

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

国内規制に係る
国際放射線防護委員会刊行物の調査

公益財団法人原子力安全研究協会
平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果を取りまとめたものです。

本報告書に関する問合せは、原子力規制庁までお願いします。

まえがき

本報告書は、原子力規制庁の平成29年度放射線対策委託費（国内規制に係る国際放射線防護委員会刊行物の調査）事業の調査結果を取りまとめたものである。

現在、我が国においては、放射性同位元素等の使用等に伴う放射線障害を防止するため、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律に基づいて規制が行われている。規制体系には、より確かな規制であるために常に見直しを続け、国際機関の勧告等の動向を踏まえて、必要と判断される際には改正等の更新をしていくことが求められている。

放射線防護に係る国際機関の中において、国際放射線防護委員会（以下、「ICRP」という。）は専門家の立場から放射線防護に関する基本的な理念とそれに基づく具体的な基準等について発信する役割を有しており、各国における規制基準に対して大きな影響力がある。また、原子力規制委員会設置法に対する附帯決議においては、放射線の健康影響に関する国際基準について ICRP の知見を施策に活かすこととなっている。そのため ICRP の動向を随時、的確に把握し、その知見を遅滞なく取り入れることは放射性同位元素等に係る規制を最新・最善のものにする上で不可欠となってくる。

本事業では、ICRP の刊行物を調査し、重要性の高いものについて翻訳版を作成する。さらに、本事業に関する理解促進活動を行うことによって学術上の新知見や新しい概念について紹介し、ICRP の知見が規制当局を含む関係者に広く共有され、確かな規制に資するものとする。

平成30年3月

公益財団法人 原子力安全研究協会

目次

1. 実施概要	1
2. 調査の結果.....	4
2.1 ICRP 刊行物翻訳委員会の設置及び開催等	4
2.2 ICRP 刊行物の調査.....	5
2.3 ICRP 刊行物の翻訳版の作成.....	8
2.4 本事業の理解促進活動.....	10
3. 添付資料	13
3.1 ICRP の刊行物の翻訳物.....	13
3.1.1 Publication 125 Radiological Protection in Security Screening (校閲版)	13
3.1.2 Publication 132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation (校閲版)	29
3.1.3 Publication 130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1 (下訳版、一部翻訳版)	47
3.1.4 Publication 131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection (下訳版)	175
3.1.5 Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology (下訳版)	230
3.2 委員会の議事録.....	258
3.2.1 第1回 ICRP 刊行物翻訳委員会議事録	258
3.2.2 第2回 ICRP 刊行物翻訳委員会議事録	262
3.2.3 第3回 ICRP 刊行物翻訳委員会議事録	267
3.3 学会等において発表した内容	274
3.3.1 放射線安全管理学会 12月シンポジウム (ポスター発表)	274
3.3.2 ICRP-RERF-JHPS joint workshop (Coffee break presentation)	277
3.3.3 平成29年度医療放射線防護連絡協議会年次総会 (高橋信次記念講演の一部抜粋)	283

国内規制に係る国際放射線防護委員会刊行物の調査（平成29年度）

1. 実施概要

平成29年度は、以下の調査を実施し翻訳版の作成を進めた。

1.1 ICRP 刊行物の調査及び翻訳版の作成

ICRP の刊行物を調査し、そのうち放射線防護に係る国内の安全規制に関係が深く重要性又は緊急性の高いものを翻訳対象として選定した。専門的及び法令的観点から適切な用語と表現を吟味しつつ、翻訳作業を進行した。

（1）翻訳版作成対象の選定

ICRP の2007 年勧告（Pub.103）以降のICRP 刊行物において、公益社団法人日本アイソトープ協会における翻訳物が出版されていないもののなかから、後述するICRP 刊行物翻訳委員会（以下、「委員会」という。）が下記5本の刊行物を翻訳すべき対象として選定した。選定は、原子力規制庁の了承を得て行われた。

・選定された翻訳版作成対象の刊行物

- ①Publication 125 Radiological Protection in Security Screening
- ②Publication 132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation
- ③Publication 130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1
- ④Publication 131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection（付属書は翻訳対象外）
- ⑤Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

（2）翻訳作業及び質の担保

翻訳作業においては、翻訳の質の担保のために、（3）で設置する委員会において各刊行物のテーマにふさわしい翻訳者・校閲者・監修者を選定し、作業を依頼し進めた。翻訳者、校閲者、監修者の選定にあたっては、原子力規制庁の了承を得て行われた。選定された各刊行物の翻訳者・校閲者は以下のとおりである。

- ①Publication 125…翻訳者：米原英典氏（原子力安全研究協会）
校閲者：佐々木康人委員、佐々木道也委員
- ②Publication 132…翻訳者：保田浩志氏（広島大学）
校閲者：鈴木元委員、川口勇生委員
- ③Publication 130…翻訳者：吉澤委員ほか12名（原子力機構）
- ④Publication 131…翻訳者：鈴木啓司氏（長崎大学）

なお、翻訳原稿は、下図に示す「翻訳」「校閲」「監修」「最終確認」の段階を経て、訳語と表現の吟味を行うこととしている。

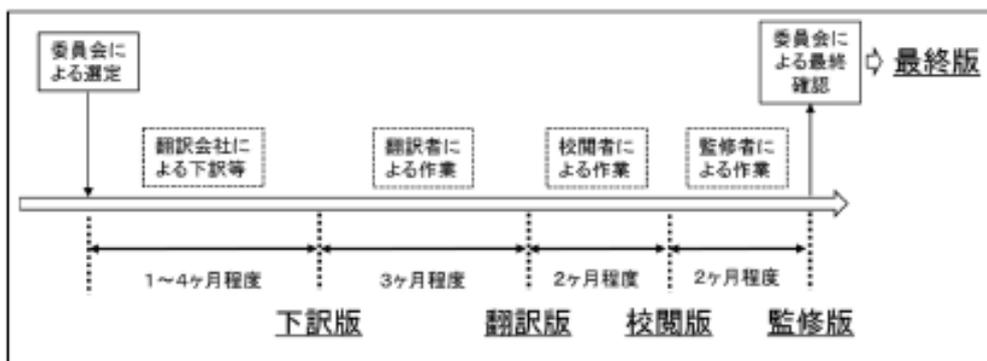


図1.1-1 標準的な翻訳作業イメージ

翻訳原稿は添付資料3.1に示すが、これらはあくまで平成30年3月時点でのドラフトであり、今後の委員校閲・監修・委員会での吟味によって、変更が予想されることに留意されたい。

(3) ICRP 刊行物翻訳委員会の設置及び開催等

当事業を的確かつ円滑に推進することを目的として、放射線防護に関する知見を有する学識経験者等で構成するICRP 刊行物翻訳委員会を設置した（委員構成は次ページ参照）。委員会では、上記（1）～（2）に係る事項の企画及び運営、進捗等の総括的案件について、専門的かつ客観的な立場からの意見を聴取した。契約期間中に下記3回の委員会を開催し検討を行った。委員会の開催にあたっては事前に原子力規制庁の了承を得るとともに、会合において原子力規制庁職員が意見を述べる機会を確保した。開催した委員会については、翻訳にあたり用語の選定に関わる検討過程の記録を含めて議事録を速やかに作成した。それぞれの議事録については、添付資料3.2に示す。

・委員会

- ①第1回ICRP刊行物翻訳委員会（平成29年7月6日）
- ②第2回ICRP刊行物翻訳委員会（平成29年12月3日）
- ③第3回ICRP刊行物翻訳委員会（平成30年3月15日）

1.2 本事業の理解促進活動

当事業では、国民に対し本事業への理解促進を促すため下記（1）～（2）の活動を行うこととなっている。本年度は、事業立ち上げの年度に行うべき理解促進活動について委員会で議論を重ねた結果、（2）に重点を置いて実施した。参加に際しては原子力規制庁に報告した。理解促進活動の実施内容については2.4項で述べ、添付資料3.3に示す。

- （1）ICRP 刊行物の翻訳物をICRPのホームページに公開
（「最終版」の刊行物が完成する平成30年度より行う）
- （2）放射線防護に係る国内の学会やシンポジウムで発表

ICRP刊行物翻訳委員会
委員構成

平成30年3月現在（敬称略、順不同）

- 委員長 丹羽 太貫 公益財団法人 放射線影響研究所 理事長
- 副委員長 今村 恵子 元 聖マリアンナ医科大学 助教授
- 委員 川口 勇生 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
放射線医学総合研究所放射線防護情報統合センター
主任研究員
- ” 佐々木道也 一般財団法人 電力中央研究所原子力技術研究所
放射線安全研究センター 上席研究員
- ” 佐々木康人 医療法人沖縄徳洲会 湘南鎌倉総合病院附属臨床研究センター
放射線治療研究センター長
- ” 鈴木 元 学校法人国際医療福祉大学
国際医療福祉大学クリニック 院長
- ” 吉澤 道夫 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門 原子力科学研究所
放射線管理部長

2. 調査の結果

2.1 ICRP 刊行物翻訳委員会の設置及び開催等

本事業を的確かつ円滑に推進することを目的として、放射線防護に関する知見を有する学識経験者等で構成する ICRP 刊行物翻訳委員会を設置した。翻訳対象とすべき ICRP 刊行物の選定、ならびに翻訳者・校閲者・監修者の選定など、本事業に係る企画及び運営、進捗等の総括的的案件について、専門的かつ客観的な立場からの意見を聴取した。契約期間中に下記の 3 回、委員会を開催し検討を行った。ICRP 刊行物翻訳委員会の開催実績は、以下のとおりである。

①第1回ICRP刊行物翻訳委員会

日時：平成29年7月6日（木） 13:30－15:30

場所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

議事：

- ・当委員会について
- ・翻訳対象と翻訳者の選定
- ・今年度の活動方針
- ・その他

②第2回ICRP刊行物翻訳委員会

日時：平成29年12月3日（日） 10:00－12:00

場所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

議事：

- ・原著新刊情報と翻訳進捗状況の報告
- ・校閲者の選定と翻訳関連の検討
- ・当事業理解促進活動の実施について
- ・その他

③第3回ICRP刊行物翻訳委員会

日時：平成30年3月15日（木） 15:00－17:00

場所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

議事：

- ・原著新刊情報について
- ・翻訳進捗状況の報告と翻訳関連の検討
- ・当事業理解促進活動の実施について
- ・その他

2.2 ICRP 刊行物の調査

本調査では、以下の手順にてICRP刊行物の調査を行い、翻訳すべきICRP刊行物の選定と新刊状況の把握を行った。

(1) 今年度翻訳版作成対象の選定

本委託業務実施期間において、まず、ICRP の2007 年勧告 (Pub. 103) 以降のICRP刊行物において、公益社団法人日本アイソトープ協会における翻訳物が出版されていないものの調査を行った。そのうち、放射線防護に係る国内の安全規制に関係が深く重要性又は緊急性の高いものを、第1回ICRP刊行物翻訳委員会において翻訳すべき対象として選定した。選定にあたっては、まず表2.2-1のリストを用いて予備選定を行った。表中のコメントは、その時点での翻訳者候補の推薦など委員からのコメントである。

表2.2-1 翻訳版作成対象の予備検討で用いたリスト

番号	タイトル	委員会	コメント(翻訳者候補など)
106	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals - Addendum 3 to ICRP Publication 53	C3	
107	Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations	C2	
110	Adult Reference Computational Phantoms	C2	
114	Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants	C5	
119	Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60	C2	
121	Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology	C3	盛武 敬氏 (丹羽委員長)
123	Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space	C4	保田 浩志氏 (佐々木康人委員)
124	Protection of the Environment under Different Exposure Situations	C5	
125	Radiological Protection in Security Screening	C4	米原 英典氏 (佐々木康人委員)
126	Radiological Protection against Radon Exposure	C4	同テーマでWHOのマニュアルあり、翻訳済
127	Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy	C3	

128	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances	C3	
129	Radiological Protection in Cone Beam Computed Tomography (CBCT)	C3	
130	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1	C2	
131	Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection	C1	酒井 一夫氏 (佐々木康人 委員)
132	Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation	C4	保田 浩志氏 (佐々木康人 委員)
133	The ICRP Computational Framework for Internal Dose Assessment for Reference Adults: Specific Absorbed Fractions	C2	

※網掛けの刊行物はデータ集

上記の予備選定で上位の候補につき、第1回ICRP刊行物翻訳委員会において詳細に検討し、以下の5本が翻訳すべき対象として選定された。

①Publication 125 Radiological Protection in Security Screening

選定理由等：保安上の理由から行うセキュリティ・スクリーニングは社会の関心に直結し、放射線規制の実務に関わりが深い。

②Publication 132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation

選定理由等：航空機搭乗時の被ばくの規制について日本はすでにガイドラインがあるが、その的確な運用には背景となる知識と考え方の理解が必要とされる。

③Publication 130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1

選定理由等：職業被ばくに関するICRP 刊行物の歴史的改訂。データ集であるため、Part2以降は数値データを含む割合によって翻訳の必要性を検討するが、Part 1はこの分野の基本概念を丁寧に記述しており、規制には必須の翻訳であろう。過去にこのテーマのICRP 刊行物は、ほぼ原研（現 原子力機構）が翻訳してきた。

④Publication 131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection

選定理由等：規制数値の表層的な運用を避けるには、放射線影響の生じるメカニズムの理解も必要であり、その意味で「幹細胞」の知見は欠かせない。ただし、当事業の対象読者を考慮して、翻訳範囲は冒頭から本文（3章まで）に留める。膨大な付属書については、内容が高度に専門的であるため研究者向けと判断し、翻訳の対象外とする。

⑤Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

選定理由等：アイソトープ協会が手がけた翻訳で、唯一仕上がっていない。小児の医療被ばくに係わる重要なテーマで社会的にも関心は高いと予想される。下訳はアイソトープ協会からの提供が見込まれ、仕上げ翻訳の段階から続けていける。

(2) ICRP刊行物の年度内刊行状況をめぐる調査

本年度の翻訳対象は、第1回 ICRP 刊行物翻訳委員会（平成29年7月6日）にて選定されたが、それ以降も刊行状況のモニターを続け、新規刊行物については概要と関連情報の調査を行った。これらの刊行物（Fukushima Proceedings を除く）については、次年度以降に翻訳版作成対象としての適否の検討を行う。

表2.2-2 平成29年7月6日以降に刊行されたICRPの新刊（平成30年3月15日時点）

番号	タイトル	備考（タイトル仮訳など）
134	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2	（仮）作業者による放射性核種の摂取 Part 2。 Publ. 130に続く、職業被ばくの線量限度に関するPubl. 30シリーズの歴史的改訂Part 2。核種別のデータ集1 収載元素 ⇒ 水素(H), 炭素(C), リン(P), 硫黄(S), カルシウム(Ca), 鉄(Fe), コバルト(Co), 亜鉛(Zn), ストロチウム(Sr), イットリウム(Y), ジルコニウム(Zr), ニオブ(Nb), モリブデン(Mo), and テクネチウム(Tc).
135	Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging	（仮）医療イメージングにおける診断参考レベル
Fukushima Proceedings	Proceedings of the International Workshop on the Fukushima Dialogue Initiative	福島第一原発事故のあと全12回行われたICRP福島ダイアログの総まとめの意味を持つ国際ワークショップの記録。
136	Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation	（仮）放射線被ばく環境におけるヒト以外の生物相に対する換算係数
137	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3	（仮）作業者による放射性核種の摂取 Part 2。核種別のデータ集2 収載元素 ⇒ ルテニウム(Ru), アンチモン(Sb), テルル(Te), ヨウ素(I), セシウム(Cs), バリウム(Ba), イリジウム

		(Ir), 鉛(Pb), ビスマス(Bi), ポロニウム(Po), ラドン(Rn), ラジウム(Ra), トリウム(Th), and ウラン(U).
138	Ethical Foundations of the System of Radiological Protection	(仮) 放射線防護体系の倫理的基盤

2.3 ICRP 刊行物の翻訳版の作成

(1) 翻訳及び校閲・監修担当者選定と進捗

前項で翻訳対象として選定したICRP刊行物に対して、翻訳の質を担保するために、翻訳委員会において各刊行物の扱う学術的内容にふさわしい、翻訳者・校閲者・監修者を選定し、翻訳と訳文検討の作業を依頼した。この選定は、原子力規制庁の了承を得て行われた。選定された各刊行物の翻訳者・校閲者は以下のとおりである。翻訳者諸氏は、それぞれ、そこで扱う内容の国際的な議論に加わっている、原著の執筆者チームの一員である、長年その分野の管理実務を管轄しているなどの根拠を以て選定された方々である。(公社)アイソトープ協会から提供されたPubl.121の翻訳者は現在検討中である。

①Publication 125 Radiological Protection in Security Screening 【校閲版】

翻訳者：米原英典氏（原子力安全研究協会）

校閲者：佐々木道也委員・佐々木康人委員

②Publication 132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation 【校閲版】

翻訳者：保田浩志氏（広島大学）

校閲者：川口勇生委員・鈴木元委員

③Publication 130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1 【下訳版。一部、翻訳版】

翻訳者：吉澤委員ほか12名（原子力機構）

④Publication 131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection 【下訳版】

翻訳者：鈴木啓司氏（長崎大学）

⑤Publication 121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology 【下訳版】

上記翻訳は、タイトルの後ろに示した翻訳段階まで進行した（翻訳段階については、本報告書 p.2 の図を参照）。今後、各進行状況に応じて、「翻訳版」⇒「校閲版」⇒「監修

版」⇒「最終確認版」と完成に向けて段階を追った訳文吟味が行われる予定である。

したがって、添付資料のICRP刊行物の翻訳原稿は、あくまで平成30年3月末時点のドラフトであり、今後の監修および委員会における吟味によって表現の変更が予想される。最終版との混乱を防ぐため、ドラフトからの引用は極力控えることが望ましい。

必要により、やむを得ず引用しなければならない場合は、必ず翻訳の進行段階と時点を付記すること。 例：〈校閲版〉（平成30年3月末現在）

（2）訳語をめぐる検討

ICRP 刊行物翻訳委員会における Publ.125 と 132 の訳語検討状況を下表にまとめる。表中の訳語には、参考のため ICRP 訳語集の訳語も併記する。これらの訳語は、今後検討が進むにつれ、変更もあり得ることに注意されたい。

表2.3-1 Publication 125（校閲版）訳語の検討（平成30年3月末時点）

用語	訳語	備考
consensus standards	合意された規格、 <u>合意の基準</u>	一般の方にも理解が容易
context	関連情況、状況	文意で訳し分け
conveyance	<u>輸送に使う乗り物</u> 、輸送手段、輸送機関	一般の方にも理解が容易
criteria	判断基準、（判断）規準	文意で訳し分け
operate	運用する、操作する	文意で訳し分け
scanning	スキャニング	
security screening	<u>セキュリティ検査</u> 、保安検査	規制庁ではsecurityをセキュリティーとしているが、Publ. 125の想定読者である交通関係者には、保安検査が望ましい

※Publ. 125（校閲版）においては下線部の訳語を採用

表2.3-2 Publication 132（校閲版）訳語の検討（平成30年3月末時点）

用語	訳語	備考
aviation	<u>飛行</u> 、航空飛行	宇宙線の強さを考慮し、高度の区別に意味があるのは「宇宙飛行」か「大気圏内飛行」であるため
bombarded	曝されている	文意から
consensus standard	合意された規格、合意の規準	文意で訳し分け
disseminate	発信する	
dissemination	発信	information dissemination

		は「情報発信」
frequent flyers	高頻度旅客	オケーショナルフライヤーはあまり使われていないため
frequent flyer programme	フリークエントフライヤープログラム	
occasional flyer	低頻度旅客	
graded approach	等級別アプローチ	IAEAのBSSでの定訳を尊重
light skin	色白の肌	褐色と訳すdark skinの逆の表現
likelihood	可能性、確度	統計学的な用語ではなく、一般的な意味の文脈であるため
of the order	オーダー、範囲、程度	
potential epidemiological studies	将来の疫学的調査	文意から
provision	<u>対策</u> 、規定、準備、提供	「規定」では表現として強すぎるため、文意から
rate of disease	疾病率	incidenceとmortalityの両方を含有する意味のため

※Publ. 132（校閲版）においては下線部の訳語を採用

2.4 本事業の理解促進活動

当事業では、国民に対し本事業への理解促進を促すため下記（１）～（２）の活動を行うこととなっている。本年度は、事業立ち上げの年度に行うべき理解促進活動について委員会で議論を重ねた結果、（２）に重点を置いて行った。参加に際しては原子力規制庁に報告した。

- （１）ICRP 刊行物の翻訳物をICRPのホームページに公開
（「最終版」の刊行物が完成する平成30年度より行う）

- （２）放射線防護に係る国内の学会やシンポジウムで発表

下記放射線防護に係る国内の学会やシンポジウムに参加し、本事業について発表した。ICRP刊行物の翻訳が規制庁の事業となったこと、事業の目的と翻訳モデル、翻訳に着手した刊行物の概要紹介など、本事業とつながりの深い教育／実務分野の方々に具体的に伝達し、対話に努めた。本事業への期待の声が多く聞かれた。

以下の5つの場において発表を行い、会場での声について原子力規制庁に報告した。

①放射線安全管理学会12月シンポジウム

日時：平成29年11月30日10：00～12月1日15：50

場所：東京大学農学部弥生講堂一条ホール

手法：ポスター発表（事務局）



写真1 ポスター発表の様子

②ICRP-RERF-JHPS joint workshop

日時：平成29年12月2日13：30～17：00

場所：東京大学 工学部 2号館221 講義室

手法：Coffee break presentation（丹羽委員長）



写真2 Coffee break presentationの様子

③平成29年度医療放射線防護連絡協議会年次総会

日時：平成29年12月15日 10:00 ～ 16:30

場所：島津ビル イベントホール

手法：高橋信次記念講演「ICRP防護体系の変遷」のなかで紹介（佐々木康人委員）



写真3 高橋信次記念講演の様子

④ICRP調査・研究連絡会

日時：平成29年12月27日 14:00 ～ 16:20

場所：御茶ノ水・東京ガーデンパレスホテル

手法：講演「放射線防護の考え方の変遷」のなかで紹介（甲斐倫明氏）※

※発表資料が公開されていないため本報告書には含んでいない。

⑤放射線防護に関する国際動向報告会

日時：平成30年1月23日 13:00 ～ 17:00

場所：東京国立近代美術館 講堂

手法：講演「ICRPに関する最新の動向」のなかで紹介（甲斐倫明氏）※

※発表資料が公開されていないため本報告書には含んでいない。



写真4 講演の様子

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication125 委員校閲版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。**ドラフトからの引用を禁ず【事務局】**

招待論説

放射線防護の倫理—基礎を正しく把握すること

国際放射線防護委員会（ICRP）は放射線防護体系の構築および系統的な更新を行ってきたが、これは現在、いかなる状況の場合にも、線量拘束値や参考レベルなどの適切な制限内もしくはそれらの制限によって導かれる防護措置の最適化を勧告するものとなっている。これは、あらゆる被ばく状況（計画、緊急時および現存）ならびにあらゆるカテゴリーの被ばく（職業、医療および公衆）に適用される。防護の最適化は、経済的および社会的な考察を考慮に入れて合理的に達成可能な限り低いレベルまで被ばくを低減することと、医療の目的と釣り合うように医療被ばくを管理することが意図されたものである。

放射線防護体系は、最新の科学的知見、100 年を超える経験、そして根本的な倫理および社会的価値観というしっかりとした基礎に基づいている。社会的価値観には、慎重さと公平さの考慮、害よりも益になることと最大限の人々に最大限の利益をもたらすこと、各人に適切なレベルの防護を提供する義務を果たすこと、そして人間の尊厳および人々の幸福を優先することが含まれる。現在、ICRP のタスクグループは、防護体系の倫理的基礎を検討し、適宜さらに詳細な説明を提示するために、世界中の専門家との関わり合いを積極的に行っている。このテーマに関するシンポジウムは現在、ICRP と、国際放射線防護学会（IRPA）の会員であるアジア、欧州および北米の放射線防護学会の合同によって企画されている。倫理的基礎を再検討する多くの利点には、我々の意思決定が堅実かつ論理的なものであることと、放射線および放射性物質と接する幅広いステークホルダーの諸問題、懸念およびニーズに我々が効果的に関わりうることを確実にすることが含まれる。科学が正確であることを確実にすることに加えて、我々はまた、普遍的な価値観に依存するとともに、複合要素の一部である懸念に、そして我々の生活に影響を及ぼす、多くの人々にとって未知の技術に取り組まなければならない。

委員会はまた、特定の分野に焦点を合わせた勧告を提供するニーズが存在する領域を特定し、次にそれらのニーズを満たすべく刊行物を作成するために、それらの分野におけるステークホルダーと協力するためのアプローチにも着手した。セキュリティ検査における放射線防護に関する本刊行物は、この取り組みの最初の成果である。ふさわしくも、これは、集団をそのセキュリティにとつての脅威から防護するという特定されたニーズが理由で、通常の一連の倫理的価値観およびアプローチを課題として取り上げる状況の一例である。これはまた、放射線の危険からの防護の最適化はるかに広範な意思決定プロセスにおいて 1 つの些細な考慮事項に過ぎない状況の一例でもある。

1

セキュリティ検査における放射線防護 (校閲版：平成 30 年 3 月)

委員会は、放射線防護は我々の日常生活にどのように適合するのかに関する対話および理解を増進するべく適時のかつ有益な助言を提供するために、放射線防護専門家、国際機関および他の種類の多くのステークホルダーとの積極的な関わり合いを続けることを期待している。

ICRP 副委員長
LACQUES LOCHARD

ICRP 第 4 専門委員会委員長
DONALD A. COOL

セキュリティ検査における放射線防護

ICRP PUBLICATION 125

2013 年 4 月に委員会により承認

抄録—人および物品に対してセキュリティ検査を施すための技術の利用は、セキュリティ上の懸念の世界的なかなりの高まりに相応して、急速に増加してきている。さまざまな技術の広がりの中で、後方散乱および透過検査能力をもたらすための電離放射線の利用も増加している。委員会は以前に、非医療環境における個人の意図的な被ばくという一般的なテーマに関連する声明をいくつか出している。本報告書は、委員会によって勧告された放射線防護原則がセキュリティ検査において、どのように適用されるべきなのかについて助言を提供するものである。より具体的に言えば、正当化、防護の最適化および計画被ばく状況における線量制限の原則は、セキュリティ検査における電離放射線の利用に直接適用することが可能である。さらに、本報告書ではいくつかの特定テーマが考慮されており、これには、検査を受ける可能性がある貨物コンテナまたは輸送に使われる乗り物に隠れているために個人（「密航者」）が被ばくするかもしれない状況が含まれる。委員会は、この技術を用いる決定が下される前に検査の慎重な正当化が考慮されるべきであると引き続き勧告する。その利用が正当化されるという決定が下されるならば、線量拘束値を用いた防護の最適化と認可および検査に関する適切な規定を含めて、計画被ばく状況としての防護の枠組みが用いられるべきである。

© 2014 ICRP, SAGE により発行

2

キーワード：セキュリティ検査；正当化；最適化

ICRP の代表としての筆者

D.A. COOL, E. LAZO, P. TATTERSALL, G. SIMEONOV, S. NIU

序文

放射線および放射性物質の発見以来、さまざまな目的のために人の意図的な被ばくが生じてきた。これらの被ばくの大部分は、何らかの種類の医学的な診断、治療または研究に関係するものだった。しかし、個人的な便益以外の目的のために個人が意図的に被ばくする状況の例はこれまでに存在し、引き続き存在している。世界規模のおよび一国のセキュリティに関する最近の事象は、精巧なセキュリティイメージング技術の発展とともに、そのような活動に対する関心を増大させている。これは、セキュリティ目的のためのこれらのイメージング技術の利用による個人の被ばくがさらに増大する可能性を高めている。

これらの被ばくは、「非医療」イメージング被ばくという一般的な範疇に入れられることがよくあった。非医療イメージングは、医療装置の利用（たとえば、薬物検知、入国管理目的）を伴う場合もあれば、その他の状況として、専門的な検査装置の利用を伴って非医療施設または公共の場で行われる場合もある。

委員会は、そのような状況に関する助言を何度も提供してきた。しかし、2001 年 9 月 11 日のテロ事件の結果として、航空旅行および他の公の場における個人に対するセキュリティがますます焦点となっている。2009 年 12 月の航空機テロ未遂事件を受け、隠匿されている関心対象物の検出の有効性の理由で電離放射線を用いるものを含めて、セキュリティ検査システムの利用がますます要求されるようになった。そのような検査は、さまざまなセキュリティ管理地点における個人の直接被ばくを伴う。セキュリティ検査のより広い意味は、国境および入国地点における貨物および輸送に使われる乗り物の検査も包含する。

本報告書は、セキュリティ用途に関係する特定の一連の事例に対する委員会勧告の適用について助言を提供するために作成された。この助言は、それぞれの特定の適用をしかるべく考慮すれば、人の意図的なイメージングの他の事例にもあてはまるかもしれないが、非医療イメージングの他の事例は本報告書には含まれていない。本報告書では、委員会の放射線防護原則をセキュリティ検査の状況の中でどのように適用

されるべきなのかについて述べる。そのようなシステムは正当化されるのか否かについて述べるのは ICRP の役割ではないが、そのようなシステムを用いるべきか否かに関する決定において考慮されるべき側面（問題点）をさらに明らかにすることが適切である。本報告書ではまた、計画被ばく状況における放射線防護の原則は、線量拘束値を用いた防護の最適化を含めて、セキュリティ検査の状況においてどのように適用されるのかについても述べる。

本報告書は、ICRP 第 4 専門委員会のオブザーバーである国際機関および組織との積極的な協力および共同作業の成果である。それらの組織および個人の貢献に特に謝意を表する。

本タスクグループのメンバーは以下のとおりだった。

D.A. Cool (議長)	R. Czarwinski	K. Kase
E. Lazo	S. Niu	M.R. Perez
A. Rannou	G. Simeonov	P. Tattersall
M. Voytchev		

第 4 専門委員会のレビューアーは以下のとおりだった。

G. Massera	S.M. Magnusson
------------	----------------

主委員会のレビューアーは以下のとおりだった。

J. Boice	E. Vaňo
----------	---------

本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だった。

J. Lochard (委員長)	M. Kai	A. McGarry
------------------	--------	------------

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

要点

- セキュリティの目的で個人を検査するための電離放射線の利用は、慎重な正当化を必要とする例外的な状況である。セキュリティ検査のための電離放射線の利用は、一般的に正当化される、または容認できると想定されるべきではない。
- 電離放射線を用いるセキュリティ検査を正当化すべきか否かに関する決定には、検査目的（脅威、脆弱性および影響）を明確にすること、当該技術がこの検査目的をどの程度果たすか、検査時の放射線被ばく、被ばくを低減するために利用できるかもしれない代わりとなる選択肢、一部の個人グループが年当たりにかかりの回数の検査を受ける可能性など、あらゆる関連因子の考慮が含まれるべきである。
- ほとんどの場合、特定のセキュリティ検査技術を用いるための正当化の決定には、放射線防護以外の多くの因子が含まれることになる。
- セキュリティ目的で検査を受けることになる個人の被ばくは、公衆被ばくとみなされる。このことは、個人が、彼らの個人的な選択の結果としてか、それとも彼らの職務の結果として、検査を受けるのかにはかかわらずあてはまる。
- 検査を受けることになる個人に対する防護の最適化には、検査目的を果たすために必要な被ばくの数、被ばくあたりの線量、ならびに追加（または反復）被ばくの回避についての考慮が含まれるべきである。
- 防護の最適化は、検査システム的设计時および運用時に適用されるべきであり、検査を受けている個人、検査を受けているのではないが検査場の近くにいるかもしれない個人ならびに検査システムの操作および保守を行う個人の被ばくを考慮するものとすべきである。これらの個人グループそれぞれに対する防護の最適化においては、線量拘束値が定められ用いられるべきである。
- セキュリティシステムを操作する個人の職業被ばくの個人モニタリングは、当該システムが設計どおりに機能していることを確実にするための継続的な品質管理プログラムの一環として行われるもの以外は必須であるとはすべきではない。
- オペレータの訓練、再訓練および能力について、また、操作時に最適化された安全を確保するためのマネジメントシステムについて、適切な規制上の期待事項が定められ、実行される必要がある。

- 正当化および最適化を含めた防護の枠組みの適切な適用は、放射線に対する感受性の高い集団を含めて、セキュリティ検査システムによって被ばくするいかなる人に対しても適正な防護をもたらすことになる。したがって、本報告書における勧告に適合するならば、子どもまたは妊婦のセキュリティ検査の場合に特別な防護対策を講じる必要はないことになる。
- 貨物および物質の検査は、貨物コンテナに隠れている個人を被ばくさせるかもしれない。この可能性は、そのような検査の正当化を考慮する決定および防護の最適化に因子として組み入れなければならない。
- ステークホルダーとの対話の利用および個人の知る権利に応えるための情報提供は、電離放射線を用いるセキュリティ検査の最適化および実施における重要な手段である。コミュニケーションは、正確であり、有益な情報を与え、ステークホルダーの懸念に応えるものであることが必要である。

委員会は以下のように勧告する。

- 検査の技術を用いる決定が下される前に、検査の正当化が慎重に考慮されるべきである。潜在的な脅威および検査のために利用可能な技術の急速な進歩を考慮して、検査の正当化は定期的にレビューされるべきである。
- 電離放射線を用いるセキュリティ検査は、計画被ばく状況とみなされるべきである。セキュリティ目的で検査を受ける個人の被ばくは、公衆被ばくとみなされるべきである。検査は正当化されると決定されるならば、これは防護の最適化、認可ならびに運用時の放射線安全を確保するための規制の検査に関する適切な規制上の枠組みに従うべきである。検査が正当化されないならば、それは実施されるべきではない。
- さまざまな種類のセキュリティ検査装置には、国際電気標準会議、国際標準化機構や米国規格協会などの合意された基準における設計仕様を達成するシステムが用いられるべきである。
- ステークホルダーとの交流を促進するために、重要なメッセージ、質問および回答が作成されるべきであり、実施時に容易に利用できるべきである。
- セキュリティ検査を受ける物品の運搬に関わる運転手などは、極めて異例な状況の場合を除いて、検査時に運搬物内に身を置くことを許されるべきではない。そのような個人の被ばくを運用上の便宜の問題とすべきではない。
- 貨物コンテナに隠れている個人の被ばくの影響を評価するには、公衆の構成員のための線量限度によって規定されるものに相当する防護

が用いられるべきである。

用語解説

アクティブ検出システム [Active detection system] ?

検査を受けている対象物を放射化するために放射線を用いるセキュリティ検査装置であり、当該物質の検出を容易にする放射線放出を引き起こす。

後方散乱検出システム [Backscatter detection system]

対象物から散乱する放射線を測定することによって画像を生成するために電離放射線を用いるセキュリティ検査装置。放射線源と検出器は対象物に対して同じ側に配置される。

透過検出システム [Transmission detection system]

対象物を透過する放射線を測定することによって画像を生成するために電離放射線を用いるセキュリティ検査装置。放射線源と検出器は対象物をはさんで反対側に配置される。

検査または検査事象 [Screening or screening event]

個人または物体を適切に検査するために必要な情報を取り出すために 1 件またはそれ以上の画像を収集すること。

セキュリティ検査 [Security screening]

セキュリティ上の脅威を引き起こすもしくは悪意のある目的のために用いられる可能性があると思われる、意図されたものではない、好ましくない、もしくは故意に持ち込まれる物体または物質を検出するために行われる活動。

1. 緒言

(1) 人の意図的な被ばくは、放射線および放射性物質の当初の発見にさかのぼる。歴史的にはほとんどの場合、これは、診断か治療のいずれ

かが意図された、患者の医療被ばくに関連した内容のものであった。これらの場合、放射線被ばくによる患者の便益は、結果として生じるかもしれない放射線によるいかなる損害にも上回ることが求められる。

(2) しかし、世界規模および一国のセキュリティに関する最近の事象は、高機能なセキュリティイメージング技術の発展とともに、この非医療状況における放射線の検討と利用と著しく増大させている。一般的には、個人が隠し持っているかもしれない物体の画像を生成するために、ますます多くの個人が意図的に被ばくするかもしれない。

(3) 本報告書の状況では、セキュリティ検査は、セキュリティ上の脅威を引き起こすもしくは悪意のある目的のために用いられる可能性があると思われるもので、意図されたものではない、好ましくない、もしくは故意に持ち込まれる物体または物質を、それらがある区域に持ち込まれる前に検出するための、当該区域の入口またはその他の入城管理地点における、電離放射線を用いるあらゆる活動であるとみなされるかもしれない。検査の対象物が個人である場合（たとえば、武器がひそかに携行されているのかどうかを断定するため）、被ばくの条件は、当該個人の意図的な被ばくに分類される。この用途は、空港の保安区域、大規模な公共イベント、裁判所や刑務所などの制限区域への入場を許可する前に個人を検査するために検討または利用されている。検査は、セキュリティ目的で必要とされる情報を得るための単一の画像からなることもあれば複数の画像からなることもある。

(4) セキュリティ検査は、セキュリティ関連品目についてさまざまな入国管理や国境検問所などにおいて物質、貨物および輸送に使われる乗り物を検査するための電離放射線の利用も包含する。この用途はほとんどの場合、個人の意図的な被ばくの範疇には入らない。しかし、個人が被ばくについて知りながらその場にいる状況（たとえば、輸送に使われる乗り物の運転員）または、知らないでその場にいる状況があるかもしれない。発覚を避けるつもりで、貨物コンテナに隠れている個人または個人グループは、「密航者」と見なされることがある。

(5) 本報告書の目的は、ICRP の関連する概念やガイダンスを要約することならびに、セキュリティ検査の状況における放射線防護に関する委員会の勧告の適用について助言を提供することである。この助言は、それぞれの特定の用途をしかるべく考慮すれば、他の事例にもあてはまるかもしれないが、本報告書の範囲には、医療またはその他の目的のための、個人の意図的な被ばくの他のいかなる事例も含まない。

(6) 電離放射線を用いる個人のセキュリティ検査のために今日用いられている主要なイメージング技術は 2 つある。すなわち、後方散乱と透過である。後方散乱技術が主として衣類の内側に隠された物体を画像化するために用いられるのに対して、透過システムは口に入れられている、体腔に隠されている、もしくは皮膚の下に埋め込まれている対象物を画像化するためにも用いられる。一般に、後方散乱システムによって検査を受ける個人に対する放射線量は、透過システムによる線量よりはるかに低い。これら 2 つの技術の組み合わせを用いるいくつかのシステムも利用可能である。物質および貨物に対する検査活動では概して、対象物の十分な画像を得るために通常は個人の検査において用いられるものよりも高いエネルギーでの透過システムを用いる。物質および貨物に対する検査活動では、特定の状況においてはアクティブ検出技

術を用いることもある。現行の検査技術の簡単な説明は第 3 章に示す。

2. 背景

- (7) 人の電離放射線による被ばくを考えると、意図的な方法による個人の被ばくは通常、医療被ばくに関連した状況の範囲内であった。しかし、そのような被ばくが生じるかもしれない状況は、さまざまなセキュリティ目的のための個人の検査のような、他の状況にもある。対象物の検査には通常、個人の意図的な被ばくは含まれないと思われるが、そのような被ばくの可能性が考慮される必要があるかもしれない例外的な状況が生じる場合もある。ICRP は 1960 年代以降、非医療に関連した状況での個人の意図的な被ばくに関する声明を出してきた。他の組織も情報、仕様、性能基準および勧告を提供している。
- (8) *Publication 15* (ICRP, 1969) は、防犯 X 線透視検査および税関検査の 2 つの例を挙げて、非医療目的のための人のイメージングに不同意を強く示した。この既定の立場から、*Publication 15* (ICRP, 1969) では、これらの活動が行われることが可能となる例外的な状況を考慮した。すなわち、もし、主務当局によって許可が与えられ、これらの検査が不可欠であるとみなされ、そしてこれらの検査が放射線の専門家の監督下で行われるのであればという状況である。
- (9) 当時の国際的な事象、すなわち航空機ハイジャックの多発により、ICRP は、旅客機の乗客のセキュリティ検査は正当化されうると考えたと述べるに至ったが、被ばくの正当化における放射線防護の責任、プロセスまたは役割に関する詳細な説明または見解は提示しなかった (ICRP, 1971)。
- (10) 1977 年勧告 (ICRP, 1977) は、上述の *Publication 15* (ICRP, 1969) を含めた以前のいくつかの ICRP 刊行物に取って代わるものではなかったが、セキュリティ検査以外の人の非医療イメージングに関するさらなる状況を考慮するものだった。
- (11) 1990 年勧告 (ICRP, 1991) には、非医療目的のための人のイメージング、あるいはより具体的に言えばセキュリティ検査の行為、に関するいかなる勧告も含まれなかった。
- (12) *Publication 73* (ICRP, 1996) は、医療における放射線防護および安全に専念するものだった。法医学目的のための被ばくを含めるために医療被ばくの範囲が拡大され [*Publication 60* (ICRP, 1991) に関して]、検査への言及が行われたが、この言及はセキュリティのような他の目的のための検査ではなく、医学的検査の状況においてだけであった。
- (13) *Publication 103* (ICRP, 2007) は、例外的な状況があるのではないならば、さらなる解析はしないで被ばくは正当化されないとみなされるべきであるための一連の条件について述べるものであった。記述された状況は、セキュリティ検査の適用を明確に含むものではなかった。

- しかし、セキュリティ検査における電離放射線の利用のための計画は、セキュリティ検査は個人の健康が動機となるのではない当該個人の意図的な被ばくであるという点で、委員会の勧告の適用に関する問題を提起した。
- (14) 他の組織、特に米国放射線防護審議会 (NCRP) も、セキュリティ検査の側面に関する情報を提供してきた。NCRP Commentary 16 (NCRP, 2003) は、人のセキュリティ検査に関する助言を提供しており、NCRP Commentary 20 (NCRP, 2007) は、加速器が発生させる高エネルギー X 線を用いる貨物のセキュリティ検査と関連するいくつかの側面に関する助言を提供しており、NCRP Commentary 21 (NCRP, 2011a) および NCRP Commentary 22 (NCRP, 2011b) は、アクティブ検出技術の放射線防護の側面を扱っている。
- (15) 国または地域の当局は、場合によっては、医療目的の場合を除いて人体に対する電離放射線の利用を禁じるために特定の立場をとってきた。他の場合では、特別な種類のセキュリティのスキヤン装置の正当化および利用に関する判断が下されたり、市販のさまざまなシステムによる線量の評価がそれぞれ単独で実施されたこともあった。米国の放射線基準に関する省庁間運営委員会 (ISCORS, 2008) など、いくつかの組織は、検査システムの正当化および、検査が正当化される場合にとるべき操作上の放射線防護の手順に関するガイダンスを提供している。決定の状況は、脅威の環境の継続的な変化と、それらの脅威に対抗するために利用可能な技術の双方とともに、変化し続けることになる。
- (16) セキュリティ検査のための電離放射線の利用を取り巻く問題は、国際組織の作業においても検討されてきた。たとえば、世界保健機関は 1977 年に技術報告書の中で、武器の検出を含めて、非医療目的のための人間に対する電離放射線の利用を扱った (WHO, 1977)。同報告書は、これはより低リスクで良好な代わりとなる選択肢が存在しない場合にのみ行われるべきであると結論づけるとともに、防護を最適化するために線量を管理する必要性を強調した。もっと最近になって、放射線安全に関する機関間委員会による情報文書 (IACRS, 2010) は、関係する問題、動向および国内要件の概略をいくつか示した。欧州放射線防護規制機関連合は、セキュリティ目的のための X 線を用いる全身スキャナーの正当化に関する声明を 2010 年 12 月に発表した (HERCA, 2010)。
- (17) 国際原子力機関 (IAEA) は最近、共同策定者である国際機関とともに、電離放射線に対する防護および放射線源の安全に関する国際基本安全基準の改定を完了した (IAEA, 2011)。改定された基準には、国内のセキュリティ上の脅威を引き起こす犯罪行為のために用いられる隠匿された物体の検出のための放射線を用いる人のイメージングは政府によってのみ正当化されなければならない、という規定が含まれている。そのような人のイメージングの正当化は考慮されるべきであると政府が決定するならば、正当化の決定に関するさらなる要件および規制上の管理に関する規定が適用可能である。
- (18) 欧州委員会は最近、欧州原子力共同体 (EURATOM) の放射線防護に関する法令の改正を提案したが (EURATOM, 2012)、これにはセキュリティ検査を目的とする電離放射線の利用を含めた非医療イメージングのための人の被ばくに関する法規定が含まれている。ひとたび採択されると、これは欧州連合 (EU) の 27 加盟国に対して法的拘束力を有することになる。EU 航空セキュリティ法の最近の改正 (EU, 2011) は、

EU 内の空港における主要なセキュリティ検査方法として、電離放射線を用いるものを除いたセキュリティスキャナーの利用を認めている。
(19) 国際標準化機構 (ISO)、国際電気標準会議 (IEC) や米国規格協会 (ANSI) など、さまざまな国内および国際的に合意された基準の策定機関は、放射線防護に関する性能基準ならびに、セキュリティ上の関心対象物の検出における性能に関する仕様を策定している。
(20) 2002 年には、1 回のスキャンによる実効線量についての $0.1 \mu\text{Sv}$ という限度を定める合意された基準が ANSI によって発行された (ANSI, 2002)。この基準は、単一のセキュリティ検査施設による個人の実効線量はどの 12 カ月間においても 0.25 mSv を超えないという限度も定めるものだった。この基準はその後、単一の画像よりもむしろ「検査」(複数のスキャンまたは観察を伴うかもしれない) にあてはまるように更新され修正された (ANSI, 2009)。
(21) 2010 年に、IEC はセキュリティを目的とする個人の検査のための X 線システムに関する国際基準 IEC 62463 を発行した (IEC, 2010a)。この基準は、セキュリティ検査システムの放射線学的性能判断基準を示したものである。別の基準プロジェクトである IEC 62709「放射線計装 - セキュリティ検査における人の防護のための、X 線およびガンマ線システムのイメージング性能の測定」も発行された (IEC, 2014)。IEC はさらに、貨物および車両の X 線撮影検査システムを扱った国際基準 IEC 62523 を発行している (IEC, 2010b)。
(22) かなりの経緯ならびにさまざまな仕様および性能基準の存在にもかかわらず、セキュリティ検査における放射線の利用、決定プロセスにおいて放射線防護が果たすべき役割、そしてそのような検査が用いられる場合における委員会の防護の枠組みの適用について、議論が続いている。本報告書の目的は、セキュリティ検査の使用が正当化されるという決定が下される場合に、ICRP の放射線防護原則がそのような検査の状況の中でどのように適用されるべきなのかについて助言を提供することである。この助言は、用いられる設備はそのような目的のために特に設計されているのか否か、あるいは、医療用放射線設備などのような、何らかの他の本来の目的からセキュリティ検査の状況へと転用されているのか否かにかかわらず、適用可能である。

3. セキュリティ検査システム
(23) 現在、セキュリティの検問所における個人の検査のために、電離放射線を用いるさまざまなシステムが利用可能である。これらのシステムは、画像を生成するために後方散乱、透過もしくはこれら 2 つの技術の組み合わせを用いることができる。
(24) スキャンシステムの導入および利用は、かなりの国民的議論を引き起こしてきた。この議論の多くは、非放射線学的な考察を焦点とするものだった。たとえば、これらのシステムが衣類を通して「見る」能力のために、プライバシーに関する懸念が提起されてきた。そのような懸念は、確かに注意を向ける必要があるが、電離放射線を用いるシステムに特有のものではない。このことは、結果として、個人の身

体の詳細な画像を取り除き、セキュリティ上の懸念があると考える品目のみを個人の全体的な輪郭の上に表示するための、ソフトウェア処理システムを含めたシステムの継続的な改良をもたらしている。同様に、画像の保持、文書化および検索の法的問題が提起されており、これは全体的な決定プロセスにおいて取り組まなければならない。これらの同じ問題は、マイクロ波のような代替技術に基づくシステムの利用に関する議論の一部にもなっているため、電離放射線を用いるシステムに特有のものではない。
(25) それぞれの種類別の技術による可能性のある放射線学的な寄与を説明するために、設備のカテゴリーおよび種類について以下に述べる。放射線防護の見地からは、装置またはシステムが、医療の診断や治療のようなある目的が本来意図されたものだったのかどうかは重要ではない。重要な問題は、被ばくの実際の状態および検討されている用途である。

3.1 後方散乱技術
(26) 人のセキュリティ検査用に設計された後方散乱システムは主として、衣類の内側に隠された物体を画像化するために用いられる。そのようなシステムによる実効線量は、人体前面の 1 画像あたり $0.1 \mu\text{Sv}$ の程度であり、人体背面または側面の画像はもっと低い実効線量を生じさせるかもしれない。さらに、用いられるエネルギーは人体を有意に透過することはないかもしれないため、組織の厚さにおける被ばくの分布は、皮膚に対して顕著であるかもしれない。被ばくの特性は、検討されている設備の仕様に左右されることになる。セキュリティ上の関心事を満足させるために要求される情報を得るには、個人を複数回 - 前面から、背面からおよび側面から - 画像化することが必要かもしれない。したがって、検査事象時の「総線量」は、単一の被ばくによる線量を上回る場合がある。ある状況においては、後方散乱システムは貨物および物質のスキャンにも有用かもしれない。
(27) これらのシステムは、高速でのラスタパターンで対象物をスキャンする電離放射線の細いビームを用いる。対象物に対して X 線の線源と同じ側にある大型検出器は、スキャンされている個人の身体から後方散乱する放射線を検出する。このようなシステムの概略図を図 3.1 に示す。
線源 検出器 図 3.1 後方散乱 X 線技術の実施方法
(28) 後方散乱システムを用いて検査される個人に対する線量は、日常生活において他の線源から受ける被ばくのごくわずかな部分である。たとえば、後方散乱検査による線量は、典型的な胸部 X 線の 1,000 分の 1 より小さい程度であり、巡航高度での 2、3 分の飛行時に受ける宇

宙放射線による線量とほぼ同じである。

(29) これらのシステムは、薬物、武器および密輸品を阻止するために、国境および刑務所に配置されてきた。2009 年 12 月の航空機テロ未遂事件を受けて、旅客機の乗客の検査のためにイメージングシステムの利用を実施すべきという圧力がかなり高まっている。

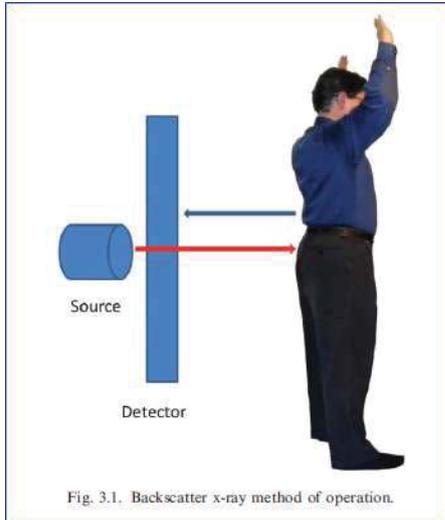


Fig. 3.1. Backscatter x-ray method of operation.

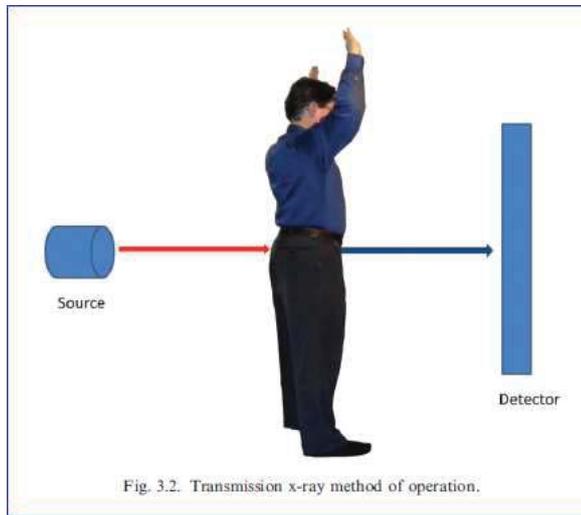
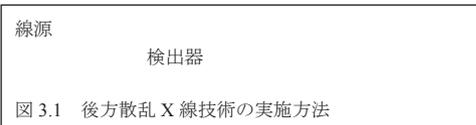


Fig. 3.2. Transmission x-ray method of operation.



13

3.2 透過技術

(30) 透過システムは、口に含まれている、体腔に隠されている、もしくは皮膚の下に埋め込まれている物体を画像化するために用いられる。この種のシステムによるスキャンあたりの実効線量は、人のセキュリティ検査用に設計されたものである場合、後方散乱システムによる線量を上回り、設備にもよるがおよそ 2~5 μSv かそれより大きい範囲である。しかし、透過画像は物体と人体部分を重ね合わせて表示する。この理由から、画像の解釈は後方散乱の場合よりも複雑である。

図 3.2 透過 X 線技術の実施方法

セキュリティ検査における放射線防護
線源
検出器

(31) これらのシステムは、電離放射線を検出器まで対象物を通り抜かせることによって画像を生成する。検出器は、対象物に対して電離放射線源とは反対側に配置される。この放射線は、装置が発生させる X 線の場合もあれば、ガンマ線を放出する放射性同位元素の場合もある。図 3.2 は、透過スキャニングシステムの概略図を示している。

(32) 透過システムは、薬物、武器および密輸品を阻止する目的で、貨物および人が乗っていない輸送に使われる乗り物を検査するためにも用いられる。貨物スキャニングシステムは通常、大きな物体の画像を生成するために必要な透過力を得る目的で、かなり高いエネルギーの放射線を用いる。そのようなシステムは、個人の検査を意図されたものではない。しかし、それらの利用においては、個人被ばくの可能性をもたらす特殊な状況が生じるかもしれない。この状況については第 5 章で論じる。

(33) セキュリティ検査システムは変化し続けることになる。たとえば、一部のメーカーは今や、後方散乱技術と透過技術の両方を用いるシステムを販売している。そのようなシステムは、検査を受けるかもしれない個人および検査場付近の他の区域にいる個人に対する線量評価において特に、さらなる放射線学的課題をもたらすかもしれない。

3.3 アクティブ検出技術

(34) アクティブ検出技術は、関心の対象物質が放射性ではない、自然に放出される放射線のエネルギーレベルが極めて低い、もしくは遮蔽が用意されている状況において、検出可能な放射線を放出するように物質を刺激するために、さまざまな粒子放射線ビームを用いる。これらのシステムは、核分裂性または爆発性の物質を含有することが疑われる物体または場所を調べるために、放射線ビームを用いることによって

作動する。具体的な一例として、ある種類の爆発性の物質が存在する場合、そのような調査は当該物質を放射化し、理論的には物質の種類、量および所在する場所を同定することを可能にするようになる特性を示す放射線エネルギーの放出を引き起こすことになる。これらの装置は、これらの物質の同定を離れたところから可能にすることが意図されている。

4. 防護の体系

4.1 被ばく状況

(35) 2007 年勧告 (ICRP, 2007) は、計画、緊急時および現存という 3 つの被ばく状況に従って放射線防護を構成している。計画被ばく状況は、線源の意図的な導入および運用の結果として生じる状況である。計画被ばく状況は、生じることが予期される被ばく（通常被ばく）と、生じることが通常は予期されない被ばく（潜在被ばく）のいずれも引き起こす場合がある。緊急時被ばく状況は、線源の管理が失われた場合における計画的な状況を運用する間に、または悪意のある行動によって、または他のあらゆる予想外の状況によって生じるかもしれない状況であり、また望ましくない影響を回避または低減するために緊急の対策を必要とする状況である。現存被ばく状況は、関連する被ばくを管理する決定が下されるときにすでに線源が存在している状況である。これには、自然起源の被ばくならびに、過去の事象、事故および行為に起因する被ばくが含まれる。

(36) 委員会は、セキュリティ検査における放射線の利用を計画被ばく状況と考えている。そのような状況においては、線源の導入が明確かつ意図的に計画され、活動の開始前に電離放射線に対する適切な防護を確保するための様々な管理を用意する機会および義務がある。通常予想され計画される活動の一部ではないかもしれない一定の状況が生じる場合もあり、これらについては第 5 章で論じる。

4.2 被ばくのカテゴリー

(37) 委員会は、職業、医療および公衆という 3 つのカテゴリーの被ばくを区別している。職業被ばくは、作業の結果として受ける作業者の放射線被ばくである。しかし、放射線の遍在ゆえに、委員会は「職業被ばく」の定義を、業務管理の責任であると合理的にみなされ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している。医療被ばくは、自身の医療または歯科の診断または治療の一環として患者が受ける、患者の支援または介助において自発的に助ける間に、職業被ばくを受ける人々以外の人が承知の上で受ける、そして自身の被ばくを伴う生物医学的研究プログラムにおいて志願者が受ける被ばくである。公衆被ばくは、職業被ばくおよび医療被ばく以外の公衆のあらゆる被ばくを包含する。

(38) セキュリティ検査における放射線および放射性物質の利用は、職業被ばくと公衆被ばくのどちらにも原因となる場合がある。職業被ばくは、保守、監視や、線源の適切な管理および運用のために必要なその他の活動を含めて、検査設備を操作している個人が受けるだろう。検査を受けているのではないが検査活動の付近にいるかもしれない他の個人の被ばくは、公衆被ばくとみなされる。

(39) セキュリティ目的のために検査を受けている個人の被ばくも、公衆被ばくとみなされる。この声明を、休日の航空旅行など、自らの個人的な選択の結果として、もしくは、航空機乗務員、出張する個人、文書や資材を運ぶ配達人や、保安区域内で作業するために出入りを必要とする個人など、自らの職務が原因として、個人が検査を受けているのかどうかにかかわらず、適用するというのが委員会の見解である。そのような被ばくはすべて、意図的なものであり、一般には当該個人の業務管理の責任ではなく、放射線または放射性物質を用いる作業とも当該個人の健康とも直接には関連しない。したがって、その被ばくの正当化に、また正当化される場合には防護の最適化に完全かつ注意深い考慮が払われることがさらにいっそう重要となる。これについては、脅威の種類および大きさならびに検査を有効に実施しないことに伴うリスクを含めて、セキュリティの必要性が明確に示されるべきである。物質の検査の結果として直接被ばくするかもしれない個人の被ばくも公衆被ばくとみなされ、これについては第 5 章でさらに論じる。

4.3 正当化

(40) 正当化の原則は、あらゆる被ばく状況において適用される 2 つの基本的な線源関連の原則の 1 つである。*Publication 103* (ICRP, 2007) は、正当化の原則によって、放射線被ばく状況を変更するいかなる決定も害よりも益になるべきであると要求している。計画被ばく状況については、委員会は、新たな放射線源を導入する際はそれが引き起こす損害を相殺するのに十分な個人的または社会的便益を達成すべきであると引き続き強調する。社会に生じる便益を因子として正当化の決定に含めるべきであることを、また、倫理的な見地から、当該個人に対する便益と損害の両方ならびに、個人の集団および社会全体に生じるかもしれない便益を明確に考慮する必要があることを強調することが重要である。

(41) 正当化は、その活動の実施には正味の便益があるのかどうかを決定するために、利用可能かもしれないさまざまな代わりとなる選択肢を考慮に入れて、ある特定の提案の考えうる便益および影響をすべて検討しなければならない多属性のプロセスである。このプロセスに含めなければならないセキュリティの問題を前提にすると、セキュリティ検査における電離放射線の利用の正当化は、ほとんど常に政府の役割である。

(42) *Publication 103* (ICRP, 2007) はさらに、考慮されるべき影響は放射線と関連するものに限定されず、これには他のリスクや、その活動の費用および便益も含まれると述べている。放射線による損害は、考慮されなければならないリスクの 1 つに過ぎない。したがって、正当化

は放射線防護の範囲をはるかに超えるものである。正当化が、便益がリスクにまさることを要求するものであるよう委員会が勧告しているのは、これらの理由からである。放射線防護当局は決定プロセスの一部ではあるが、利用可能なすべての代わりとなる選択肢から最善のものを探し出すことは放射線防護当局の責任を超える仕事であるということが重要である。

(43) セキュリティシステムにおける放射線および放射性物質の利用は正当化されるのか否かについて述べるのは、ICRP の役割ではない。委員会は、個人を検査するための電離放射線の利用は慎重な正当化を必要とする例外的な状況であると考えている。そのような検査は一般的に正当化されるまたは容認できると想定されるべきではない。Publication 103 (ICRP, 2007) に言及されているように、提案された活動の便益および影響のすべてを考慮することが必要である。セキュリティ検査の場合、多くの因子が考慮されなければならない。検査が正当化されない場合、それは実施されるべきではない。

4.3.1 個人の検査についての正当化

(44) セキュリティ検査時の個人の被ばくは、医療被ばくの場合のように、当該個人の健康に寄与することになる情報をもたらすことが意図されたものではない。しかし、一定の脅威から守られている環境にいるのがわかることによる個人的な便益はあると結論されうだろう。さらに、脅威からの社会の防護、さまざまな会合、集会または公共交通機関における個人グループの防護や、悪意のある攻撃によるインフラストラクチャーおよび重要な文化財の損傷の防止など、そのような被ばくの結果として生じるかもしれない社会的な便益もある。

(45) 検査における電離放射線の利用に関する正当化の決定には、特定の検査目的を達成するために利用可能かもしれない代替技術の考慮も含まれることになる。これには、電離放射線の利用に代わる技術ならびに、さまざまな手順上の代替技術や選択肢が含まれるかもしれない。ここでもまた、ある特定の活動について、放射線を利用しない代替策は電離放射線の利用に優先するべきなのか否かについて述べるのは、ICRP の役割ではない。対象とする物体の検出効率、スキャンを行うために必要な時間や信頼性など、放射線学的判断基準以外の因子は、電離放射線を用いるシステムによってもたらされる全体的な便益に影響を及ぼすかもしれない。さらに、放射線を利用しないシステムもスキャンされている個人に対してリスクまたは不都合を引き起こすかもしれない、それらも考慮されなければならない。委員会は、その勧告が電離放射線の利用に対するさまざまな代替方策を優先することまたは後回しにすることを暗示するものと解釈されることを望まない。システムは、ある特定の状況におけるセキュリティ検査の意図された目的を達成する上での有効性に基づいて判断されなければならないのは明らかである。

(46) ある特定の検査手法が「任意」であるかどうか、また代替手法の用意はあるかどうかについて、問題が提起されることがよくある。そのような代替検査の用意は多くの管轄部署によって要求され、手による搜索などの形をとりうるだろう。委員会は、代替手法の用意は空港などのセキュリティ検査現場においてはよくあることであり、用いられる技術の種類にかかわらず適切であると認識している。放射線防護の

役割は、電離放射線を利用することのリスクに関する情報をもたらすことであり、したがって、利用の正当化における確かな情報に基づく議論に寄与することである。セキュリティ検査の利用が正当化されると決定されるならば、電離放射線を利用することのリスクに関する情報は実施活動における議論にも寄与する。後者は、検査プロセスの一環として個人の知る権利に対処するのに十分な情報および機会があることを確保するという形をとる。コミュニケーションおよびステークホルダーとの対話については、4.6 節でさらに扱う。

(47) 電離放射線を用いるセキュリティ検査システムは、必要最低限の被ばくで有益な情報をもたらすように設計される必要がある。動作するようになる因子には通常、当該個人を十分に検査するために必要なスキャンまたは画像表示の数が含まれることになる。また、十分な情報の不足のために行う個人の再検査が理由で追加被ばくが必要にはならないように、システムが信頼性をもって操作されることが可能であることも重要である。したがって、正当化プロセスには、考慮されるべき放射線影響の決定における、システム性能および平均線量に関する期待事項が含まれる必要がある。電離放射線の利用が正当化されると決定されるならば、同様の考慮事項および期待事項は防護の最適化においても重要となる。

(48) 委員会は、検査システムの性能（脅威とみなされるかもしれない意図された物体を検出する能力）および、さまざまな種類のシステムからの、検査を受ける個人の予想線量に関する合意された基準を継続的に策定されていることを認識している。委員会は、そのような基準は正当化プロセスにおいて用いられるべきであり、もし電離放射線を用いるシステムが正当化されると決定されるならば、意図された性能を達成することと整合をとりながら最低レベルの被ばくが選択される（すなわち、防護が最適化される）べきであると勧告する。

(49) 委員会は、個人の検査システムは、もし正当化されて利用されるならば、公衆の構成員のための線量限度のごくわずかな部分にのみ寄与すべきであるという見解である。この委員会の見解は、NCRP (2003) など、他のいくつかの機関の後方散乱システムに関する勧告と一致している。ANSI (2009) や IEC (2010a) などの機関によって策定されたもしくは策定中である機器の合意された性能基準の一部として、ガイダンスも含まれている。委員会は、そのような値は、画像あたりまたは検査事象あたりの線量と、年あたりに生じる被ばくの回数に関する想定される期待値の間に導き出された明確な関係とともに、計画の目的のための境界を示す線量拘束値とみなされるべきであると勧告する。

(50) 一回ごとのスキャンにおいて、他の方法より大きな線量をもたらす透過システムの利用についても、合意された基準が策定されている。委員会は、検査を受ける個人の線量がより高くなるので、そのようなシステムを正当化するために必要な便益もまた、より大きくする必要がありと指摘する。医療被ばくとは異なり、非医療イメージングは当該個人の健康に直接寄与するものではなく、正当化は、被ばくを受ける個人に対して想定される便益を明示的に述べるものとすべきである。このことは、そのようなシステムは正当化されないことを意味するものではないが、利用に先立って実証されるべき証明の負担はいっそう大きいことを意味する。

(51) 最も重要な考慮事項の 1 つは、個人が検査を受けるかもしれない頻度である。空港における個人検査については、頻繁な航空機利用者

や配達業者のように、ある一人の個人が、日に、週にまたは月に何度も検査を受ける可能性がある。さらに、自らの職務の一部としてかなりの頻度で検査を受けるかもしれない他の個人グループはあるのかどうかを考慮することが、必要かつ適切である。そのようなグループには、日に何度も保安区域へ出入りするかもしれない空港のさまざまな地上職員や航空機乗務員などが含まれるかもしれない。検査を受けることになる保安区域への入場は職務要件の一部として要求されるため、そのようなスキャニングは職業被ばくとみなされるべきであると主張されるかもしれない。逆に、それらの被ばくは必ずしも職務に直接関連するわけではなく、検査を受ける個人は検査設備の運用管理会社によって雇用されている場合もあればそうでない場合もある。したがって、委員会は、そのような被ばくは公衆被ばくとみなされるべきであり、そのように被ばくを受ける個人は公衆の構成員の場合と一致する防護を施されるべきであると勧告する。この期待事項は、存在するかもしれない個人のさまざまなグループに関する正当化プロセスに、また、それらの防護を確保するのに十分な方策の計画および履行に含めるべきである。

(52) 検査活動による集団線量も考慮される必要がある。集団実効線量は、放射線学的な技術と防護手順を比較するための最適化の手段である。セキュリティ検査システムの場合、集団線量は、正当化プロセスにおける異なるシステムを導入した場合の影響の比較に際しても有益かもしれない。*Publication 101* (ICRP, 2006) に論じられているように、正当化および最適化プロセスにおいて決定を下すためのより有益な情報をもたらすには、構成要素に分けるのが有用かもしれない。

(53) 正当化の決定は、異なる数種類の考慮事項によって情報を与えられる必要がある。第一に、あらゆる関連因子が考慮されていることを確実にするために政府による決定が行われるべきである。意思決定を支援するのに十分明確な脅威の環境の実態を明らかにするために、セキュリティや諜報機関からの入力情報を効果的に統合しうるのもこのレベルにおいてである。ほとんどの場合、このことは、正当化および電離放射線の利用に関する決定は、政府レベルで行われる必要があるであろうことを意味するが、そのレベルでは、規制上および実施上の観点からの入力情報がセキュリティおよび諜報機関の見解により重み付けがされる。ほとんどの場合、ある特定のセキュリティ検査技術を用いるための最終決定は、放射線防護以外の多くの因子が関係することになるであろう。

(54) 正当化は政府レベルの入力情報および決定に頼るものであるが、ある提案の特定の便益および影響を理解するのに十分なほど事例に特異的な基礎に基づいてその提案を検討する必要がある。一般に、電離放射線の利用はありとあらゆる検査活動において正当化されると決定するのは適切ではない。検査システムを提案し運用する組織もまた政府機関かもしれないが、通常は輸送のような特定分野に重点が置かれる。脅威の環境、検出されるべき懸念の対象物、検査を受けることになる個人の数や累積された影響などに基づいて、検査状況に特有の区分や事情に考慮が払われる必要がある。たとえば、空港における乗客に対するセキュリティ検査の正当化の問題がありうる。もしシステムが他の現場で用いられるとすれば、その例外的な状況は被ばくを正当化するべくプラスの正味便益をもたらすかどうかを決定するために、別の一連の考慮が必要とされるだろう。しかし、これは、検査が検討される別々の空港のそれぞれについて別々の正当化が必要とされるだろうと言っ

いるわけではない。意思決定を支援するために十分な情報があることを確実にする、バランスのとれたアプローチが採用されるべきである。他の委員会勧告の例と同様に、十分な情報に基づく決定を確実にするために、十分に詳細な因子のマトリックスが考慮される必要がある。

(55) もしセキュリティ検査の利用が正当化されると決定されるならば、これは委員会の勧告による計画被ばく状況とみなされるべきであり、委員会によって勧告された放射線防護の枠組みが適切に履行されることを確実にするために、必要な管理および放射線防護プログラムが履行されるべきである。委員会はまた、潜在的な脅威や検査のために利用可能な技術における急速な変化があるとすれば、正当化は定期的にレビューされるべきであるとも勧告する。

4.3.2 物質および貨物の検査についての正当化

(56) 検査活動時の個人の被ばくを最小化または除去することが意図された通常の操作の実施方法とパラメータが考慮されることが可能でまた考慮されるべきであるから、貨物コンテナや輸送に使われる乗り物などを含めた物質の検査は、異なる種類の正当化プロセスを伴う。したがって、物質の検査は、他の放射線および放射性物質の利用状況といっそう類似しており、その状況では、防護および安全方策が確立されており、画像を生成するための個人の故意の被ばくは意図されていない。しかし、これまでの経験は、個人が被ばくしうるもしくは被ばくしたという状況がありうることを示している。この例には、貨物のスキャニング時に運転手が運搬物内にいる場合や、見つかることを避けるために個人が貨物コンテナに隠れている場合がある。ある場合は、国の当局が、関連する線量および安全上の懸念を考慮に入れた特定の正当化解析とともに、隠れている個人を積極的に捜索するためにスキャニング装置を意図的に用いたこともある。潜在的な脅威、検査のために利用可能な技術および実施経験の急速な変化を考えると、正当化の決定の定期的なレビューが適切である。これらの特殊な状況に関するさらなる考察は第 5 章に示す。

4.4 防護の最適化

(57) ある特定のセキュリティ検査環境において提案された電離放射線の利用の正当化について決定が下されている場合、個人の健康および安全を最も効果的に防護する方法でその活動が実施されることを確実にするために、防護の最適化に関する委員会の勧告が決定的に重要となる。

(58) 最適化の原則は、被ばくの可能性、被ばくする人の数およびそれらの個人線量の大きさはすべて、経済的および社会的要因を考慮して合理的に達成できる限り低く保たれるべきであると要求している。

(59) これは、防護のレベルは、害を上回る便益の幅を最大化する、一般的な事情の下で最善のものとすべきであることを意味する。この最適化手法の大幅に不公平な結果を回避するために、委員会は、ある特定の線源からの個人に対する線量またはリスクを制限するために計画被ばく状況のための線量拘束値を用いることを勧告する。

(60) 防護の最適化は、設計および設備の仕様決定の段階、検査環境の設置および構成ならびに、検査システムの運用および保守の期間において適用可能である。設置時の受け入れ試験、運用時の定期測定およびその他の品質管理措置は、防護の最適化において用いられた仮定が運用時に妥当であり維持されることを確実にするために重要である。

(61) 拘束値についての委員会の勧告は、実効線量の観点からのものである。委員会は、そのようなシステムの開発、評価および運用においては、エリアモニタリングのための周辺線量当量 $H^*(10)$ および個人モニタリングのための $H_p(10)$ を含めて、適切な実用量が用いられるべきであると引き続き勧告する (ICRP, 2007)。後方散乱セキュリティシステムに関しては、被ばくは主として皮膚に対してかもしれない。なぜなら透過の程度は検討されている設備の仕様に依存することになるためである。より高いエネルギーを用いる透過システムは、実効線量とさまざまな臓器および組織における等価線量に対してより大きく寄与することになる。セキュリティシステムを操作する個人の職業被ばくのモニタリングは、そのシステムが設計どおりに機能していることを確実にするための継続的な品質管理プログラムの一環として行われるもの以外は不要とすべきである。

4.4.1 設計および設置の期間中の防護の最適化

(62) セキュリティ検査のための意図的に計画された個人の被ばくの場合、最適化の概念にはいくつかの付加的な考慮事項が含まれる必要がある。ある特定の目的のために画像の取得が行われているとき、その目的を達成するには被ばくが低すぎることはいくらもあるだろう。逆に、被ばくが、必要な情報をもたらすために必要な程度を上回ることもありうるだろう。これらの状況のいずれも、最適であるとはみなされないだろう。電離放射線を用いるセキュリティ検査については、被ばくを除去することは可能ではないため、最適化された状況は、必要な画像情報を得ることと見合った最も低い被ばくを伴う状況ということになる。

(63) 最適化には、適切な距離、遮蔽、入域管理ならびに、予想される運用の一部ではない放射線に個人が接触することを防止するためのその他の措置を可能にするように設備の設置を計画することが含まれる。それぞれの設置の詳細は放射線防護の見地から検討することが可能であり、検査区域、保安区域に入場するための行列およびスキャニングシステムの付近において作業しているかもしれない個人の被ばくを低減するためのあらゆる機会が利用されるべきである。たとえば空港における個人のスキャニングは、保安区域の物理的な配置や、スキャニングシステムの区域における個人の複数の行列の存在による課題を引き起こすかもしれない。

(64) 検査を受ける個人に対する防護の最適化は、主として設計および設置に関する考慮事項によって決定される。スキャニングシステムがひとたび設置され運用が始まると、個人被ばくに基づいた放射線防護をさらに改善する機会は限られるかもしれない。最も適切な設備の選択および適切な性能基準を満たす設計の検証は、このプロセスの重要な構成要素である。取り得る選択肢および設計の比較においては、また他の因子がない場合には、最適化は、それぞれの被ばくについてより低い線量をもたらす、もしくは検査を完了するために必要とするスキャンまたは観察がより少ない設計が通常は優先されることを示唆するだろう。この点で、用いられる特定シナリオの場合の集団線量が、ある特定のシステムのための防護の選択肢を比較する際に有用であり、したがって意思決定プロセスに寄与するかもしれない。しかし、セキュリティ上重要な物質の検出における性能の要求、および検査の実施に必要な時間の影響も、最適化プロセスにおいては重要かもしれない。さらに、設備の設計は、検査による被ばくを繰り返す必要性を考慮するとともにそれを可能な限り回避するものとすべきである。

(65) 他の種類の設備と同様に、システムが設計どおりに機能していることを確実にするために、さまざまな運用前の受け入れ試験が実施されなければならない。これには、検査を受けている個人が受けるであろうと考えられる線量に加え、設置付近のさまざまな場所における被ばくの測定が含まれる。これには、明らかに散乱線の可能性を含む必要がある。運用開始前に、設置を解析し最適化するように配慮されなければならない。

(66) 個人を検査するために用いられるシステムについては、実効線量のさまざまな値が合意された基準として定められてきた (ANSI, 2002, 2009)。名目上、ICRP は、線源からの年間被ばくの観点から線量拘束値について述べてきた。しかし、セキュリティ検査の特異的で一時的な性質のために、特に明確に識別できる状況に関して定められよう「検査事象あたり」に関する仕様が出発点として適切である。正当化のプ

プロセスでは、個人に対するスキヤニングの累積された影響を、したがって、計画目的のために容認できるまたはできないとみなされるであろう被ばくの累積されたレベルを考慮したことになるであろう。それゆえ、線量拘束値のように実際のかつ測定可能な判断基準を用いて、被ばくをさらに低減するために、より設計に特有でかつ実用上のレベルに基づいて最適化を追求するのが論理的である。委員会は、ANSI 基準における基準のような判断の基準を、何らかの種類の「許容」または設計判断基準としてではなく、防護の最適化のための境界として役立つ線量拘束値であると考えている。

(67) 委員会は、さまざまな種類のセキュリティ検査装置に関する IEC、ISO や ANSI の基準のように合意された基準における設計仕様を達成するシステムが用いられるべきであると勧告する。装置がこの工学上および運用上の基準適合の経歴を有することを確実にすることは、運用時に放射線防護が期待される範囲内となることを確保することにおいて重要な構成要素である。

4.4.2 運用および保守期間中における防護の最適化

(68) 検査システムの運用中における最適化は主として、設備が意図されたとおりに機能していることを確保することに依存するが、その確保することにはさまざまな運転パラメータの定期的な検証、調査やその他の措置などが含まれる。運用がひとたび開始すると、品質管理活動およびオペレータの訓練が、被ばくが合理的に達成可能な限り低く保たれることを確実にするための主たる寄与因子である。

(69) 最適化の原則、すなわち、運用の状況のレビューおよび改善のための機会があるかどうかの決定を引き続き行うことは、施設が稼働を始めるときと同様に引き続き有効である。このことは、少なくとも、被ばくの正当化において考慮された限界が引き続き妥当であること、装置の運転および利用が検査システムの利用を正当化する際に考慮された境界の枠内にあること、そして検査による被ばくを繰り返す必要を避ける方法でシステムが運用されていることの確保を必要とするだろう。

(70) 継続的な運用の最適化のために必要とされる情報は、システムが設計どおりに稼働していることを確実にするために業務管理者によって行われる定期的な調査およびレビュー、個人の被ばく（職業または公衆）に変化が生じているのかどうかを決定するための、スキヤニングシステムの付近における放射線学的条件および物理的な配置の点検、そして設備が適切に機能していることを確実にするための保守スケジュールの遵守に基づくことになることが最もよくある事であろう。定期的な試験および調査が必要とされることになる。特に、被ばくの状態に影響を及ぼすかもしれない機能については、保守および校正後の放射線学的パラメータの検証も重要である。これには、スキヤニングシステムを制御し、検査用の画像を処理するために用いられるソフトウェアシステムが含まれる。調査および試験の独立した規制上の検証は、最適化の重要な一部分であるだろうし、委員会によって勧告された放射線防護の枠組みが適切に履行されていることを確実にするために重要である。

(71) 運用および施設をレビューするための放射線防護の枠組みは、電離放射線を用いる他の種類の施設について一般に確立されたものに多くの点で、類似するであろう。IAEA などの国際機関および主務当局は、防護の最適化、使用の認可や検査を含めて、類似したタイプの施設のための要件および実務的なガイダンスを作成してきた。この経験はセキュリティ検査に関する要件を制定する際に利用されるべきである。セキュリティ検査における特有の側面は、はるかに公の場における運用の実施、および放射線防護に関する過去の経験または専門知識を持たないかもしれない組織による設備の運転と関連する。

(72) 職業被ばくは、点検修理、保守、調査、校正およびその他の同様の活動を引き受ける運転者や技術者が受けるかもしれない。委員会は職業被ばくの定義を、業務管理者の管理下にあると合理的にみなされうる被ばくに限定しているが、それはどの作業員もその活動にかかわらずバックグラウンド放射線に被ばくし続けるからである。委員会は、最適化された防護は、被ばくのカテゴリにかかわらず合理的に達成可能な限り低い被ばくレベルを達成することを意味することを強調する。委員会はまた、ある被ばくを職業被ばくに分類することは、その被ばくが公衆被ばくの場合に許されるものよりも大きいことを容認されるということ自動的に意味する、と想定するのは誤った考えであることも強調する。

(73) セキュリティ検査システムを操作する個人の職業被ばくの場合の線量拘束値は通常、職業被ばくについて委員会によって勧告された拘束値のごくわずかな部分に設定されるべきである。経験によれば、十分な遮蔽ならびに線源からの十分な距離の用意を含めて、うまく設計されたシステムが用いられる場合、オペレータがいる区域には放射線はほとんどまたはまったく存在しないであろう。経験は、特に現場または移動環境において、不必要な被ばくを避けるために適切な区域の配置と管理を規定するのに有用である。放射線防護の規定を変更するために用いられる設備の試験およびモニタリングの結果も、必要に応じて用いられるべきである。したがって、委員会は、そのような個人が、その被ばくは職業被ばくの定義に適合するという事実にもかかわらず、公衆の構成員の防護と相応のレベルで防護されることを期待する。委員会はまた、セキュリティ検査システム付近の区域で作業しているかもしれないが、そのシステムの操作にはまったく関与していない他の個人にも、同じレベルの防護が提供されるであろうと期待する。

(74) 公衆被ばくのための拘束値は、通常、公衆の構成員のための線量限度のごくわずかな部分に規定されるべきである。これは特に重要である。なぜなら、被ばくを受ける個人は放射線によっていかなる直接的な便益も受けておらず、むしろ、そのセキュリティ活動などの結果としての安全な（セキュリティがしっかりとした）環境の間接的な便益を受けているためである。名目上期待されることは、個人の被ばくは検査を受けているのではない間は本質的にバックグラウンド周辺線量率と区別できないものとなるということだろう。

(75) 委員会は、セキュリティ検査システムは、正当化されるとみなされた場合、指定された主務当局による、認可および検査を含めた適切な規制上の枠組みを伴う管理の下に置かれるべきであると勧告する。IAEA は、訓練、再訓練およびオペレータの適性を含めた規制システム

および線源の管理ならびに、安全に関する主たる責任が有効に果たされることを確実にするための適切なマネジメントシステムに関する要件を規定している (IAEA, 2010, 2011)。

4.4.3 物質および貨物の検査における防護の最適化

(76) 物質や貨物などのスキャンニングは、異なる最適化の機会をもたらす。名目上期待されることは、個人が検査に含まれることはないということだろう。これがあてはまらないかもしれない状況は第 5 章で扱う。貨物および輸送機関の検査時は、線源の強度増大およびスキャンされている物質の中での放射線の散乱のために、スキャンニングの区域の外側およびスキャンシステムから多少離れたところにおける被ばくの可能性が高まるかもしれない。しかし、放射線源の利用の場合が一般的にそうであるように、公衆の構成員のスキャンニングの区域付近への立ち入りを制限するための措置が講じられるべきである。防護の最適化は、他のいかなる計画被ばく状況の場合とも同様に追求されるべきである。

(77) 固定された場所にあるのではないかもしれない貨物検査システムおよびその他のシステムについて、物理的な配置ならびに、放射線場が存在するかもしれない区域が明確に識別され、管理される必要がある。この点で、放射線防護の考慮事項は、一時的な場所において線源が用いられる場合の産業用の照射利用 (たとえば、産業用ラジオグラフィ) と同様であり、適切な調査、管理区域の設置ならびに公衆被ばくを最小化するためのその他の規定についての認可に含まれる必要がある。

4.5 線量限度

(78) 委員会は、計画被ばく状況のための適切に最適化された放射線管理プログラムの下でのセキュリティ検査システムの運用および利用が、予想される活動時の職業および公衆被ばくについて勧告されたいかなる線量限度についても問題となるべきではないと期待する。運転手ならびに貨物コンテナに隠匿されているかもしれない個人の、貨物検査の結果としての被ばくからの防護については、第 5 章で扱う。

4.6 コミュニケーションおよびステークホルダーとの対話

(79) セキュリティ検査における放射線および放射性物質の利用は、コミュニケーションおよびステークホルダーとの対話に関する多くの課題を引き起こす。それでもなお、それらは課題である一方で、委員会の防護体系の実効的な履行の決定的な構成要素である。これには、極めて低いレベルの被ばくリスク、代替検査方法の用意および個人の知る権利に関するコミュニケーションが含まれる。これらは放射線

防護の見地から取り組まれるかもしれないが、地元のステークホルダーについての他の課題も考慮することが必要となるであろう。

(80) 委員会の勧告に従って正当化され用いられるシステムは、検査を受けている個人が受けるかもしれない放射線被ばくによる非常に小さいリスクをもたらす。そのようなリスクはわずかであるが、ゼロであると仮定することはできないし、そしてシステムが設計どおりに稼働することならびに被ばくが分析され予測されたものを上回らないことを確実にするために、放射線防護のプログラムおよび管理が規定されなければならない。多くのステークホルダーは、被ばくの不本意であるという本質および、あらゆる可能性のある影響の不確実な本質のために、懸念を提起してきた。そのような状況では、個人は、被ばくを自発的に引き受ける場合もしくはある程度の管理をする場合を上回る程度の防護を望みがちである。他の種類の同様のリスクとの比較は有用かもしれないが、そのような比較を行う際は注意を払わなければならない。委員会は、そのようなコミュニケーションはメッセージが正確であり、多くの情報をもたらし、それらの懸念の個人的な本質に対応するものであるように計画されるべきであると勧告する。

(81) ステークホルダーとのコミュニケーションは、放射線防護プログラムならびにあらゆる検査活動の実施の重要な構成要素であり続ける。委員会は、セキュリティ検査に関する多くのマスコミ報道および論争があったことを認識している。この多くは、個人の権利、プライバシーや個人の知る権利など、倫理学および検査を取り巻くその他の問題に焦点が置かれた。したがって、個人の知る権利が満たされるように、情報の公示など、合理的な情報提供を行うことに焦点を合わせなければならない。放射線安全に関するより専門的な問題を焦点とする放射線防護は、考慮されることが必要なあらゆる問題のより完全な検討に寄与する。意思決定者は、同時に、脅威および考えうる対応が注意を要する性質のために、同程度の公衆との協議の影響を受けないという理由で、多くの「セキュリティ上の決定」がなされていることを認識しながらステークホルダーと関わることに努めるべきである。

(82) 検査を受けるかもしれない個人が手順、リスクおよび代替方策について疑問または懸念を有するかもしれないので、継続的なコミュニケーションの機会を、活動の通常実施時に生じる。そのような個人は、放射線防護専門家またはセキュリティ専門家とは極めて異なるリスク認知および防護に関する倫理的基礎を持っているかもしれない。委員会は、これらの対話を改善するために、重要なメッセージ、質問および回答は事前に作成されるべきであり、容易に利用可能なものとすべきであると勧告する。検査が実施されるかもしれない状況においては、平易な言葉による、ステークホルダーとのさまざまなコミュニケーション手段について、注意深く考慮されるべきである。

(83) 公衆の構成員におけるあらゆる被ばく状況の場合と同様に、計画被ばく状況において被ばくするかもしれない集団を考慮するとともに、より感受性が高い集団が関係するかもしれない場合には正当化および防護の最適化における付加的な因子を考慮することが重要である。放射線被ばくのリスクは、年齢や性別など、いくつかの因子とともに変化する。個人の検査は、あらゆる年齢の個人の被ばくならびに胚/胎児の被ばくの可能性をもたらすかもしれない状況を引き起こす。委員会は、本報告書に述べた正当化および最適化を含めた防護の枠組み

の適切な適用は、これらのより感受性が高い集団に十分な防護を提供することになると考えている。したがって、本報告書における勧告に適合するならば、先見的な放射線防護の見地から子どもまたは妊婦に対して別の防護対策を講じる必要はないことになる。正当化および最適化は、分析における因子マトリックスの1つとして、意思決定プロセスにおける感受性が高い集団の考慮を明示的に含むとともに (ICRP, 2006)、そのような考慮の結果に関する文書化をもたらすかもしれない。

5. 特別な状況

(84) 物質および貨物の検査における電離放射線の利用は、個人の被ばくをもたらす場合がある。個人の被ばくは最小化もしくは完全に回避されうるといふ、名目上の期待がある一方で、貨物が検査される場合に個人が被ばくを受けているかもしれない特殊な状況の事例が 2 つある。

5.1 運転手の被ばく

(85) 委員会は、実施上のさまざまな考慮のために、貨物をセキュリティ検査システムに通す際にトラックおよびその他の輸送に使われる乗り物の運転手はその場にいるという提議があったことを承知している。放射線防護の見地からは、貨物を検査する際に運転手の被ばくが必要とされるべきではない。委員会は、何らかの被ばくをもたらす方法で運用を実施することにプラスの正味便益があることを特定の正当化が示しているのではない限り、そのような被ばくは一般に正当化されないと考えている。そのような個人の被ばくを実施上の便宜の問題とすべきではなく、委員会は、極めて異例な状況の場合を除いて、運転手は検査時に輸送に使われる乗り物内にいることを許されるべきではないと勧告する。

(86) 運転手の被ばくが特別に正当化される極めて異例な状況においては、被ばくを防止するためのインターロックおよびその他のシステムの利用によって被ばくを排除または低減するために、考えうるあらゆる措置が講じられるべきである。特に、個人が日に何度も貨物を検査システムに通しており、それによって低頻度の被ばくという仮定を無効にしている可能性に考慮が払われるべきである。インターロックおよびその他の装置が、一次スキャンビームが個人に当たることを防止するかもしれない状況の場合でさえ、散乱放射線が線量評価において考慮されることが必要となる。さらに、被ばくを防止することが意図されたインターロックやその他のシステムの故障の可能性に考慮が払われなければならない。上述の考慮事項は、主務当局による認可の一部となる特定の要件および条件に反映されるべきである。実施経験ならびに、被ばくをもたらす運用の実施を継続する必要性の定期的なレビューが適切である。

(87) 運転手の被ばくという極めて異例な状況が生じることが許されるならば、これらの被ばくは職業被ばくとして扱われるべきであり、委員会の関連勧告に従うべきである。被ばくに関する特定の線量拘束値が規定される必要がある。さらに、極めて異例な状況を考えると、委員会は、拘束値は計画被ばく状況における公衆被ばくについて *Publication 103* (ICRP, 2007) に勧告されている範囲内で選択されるべきであると勧告する。

5.2 隠れている個人の被ばく

(88) 経験は、検査される貨物コンテナに個人が隠れているまたは潜伏している可能性があることを示してきた。そのような個人は「密航者」と見なされることもあり、これは偶発的に被ばくする個人に関するより一般的な懸念の特殊な事例である。実際には、この場合であった事例が多数ある。

(89) 委員会は、このシナリオはスキャンシステム的设计および構成において考慮されるべきであり、検査されることになるコンテナまたは輸送に使われる乗り物に隠れている個人がいるならば、起こりうる被ばくの評価が行われるべきであると勧告する。委員会はさらに、隠れている個人の線量が公衆の構成員について勧告された線量限度を超えることは起こりそうないようにシステムが設計され運用されるべきであると勧告する。ほとんどの場合、これは 1 mSv/年であると思われ、隠れている個人の検査の場合、事象あたりの判断の基準に相当するとみなされうらうだろう。

(90) 委員会は、より強力で進歩したシステムの場合は課題となるかもしれないが、上記の判断の基準はほとんどのシステムについて達成されうると考えている。そのような防護レベルは、依然として、公衆の構成員に関する委員会の勧告と一致するが、そのような個人はまさしくその行為の本質によって、放射線防護に関する通常の期待事項が想定されえない方法で行動していることを認める。そのような行動は実際には違法かもしれないが、個人の倫理および公平の考慮は、設計および運用のために想定されるリスクレベルは公衆の構成員について勧告されたものを実質的に超えるべきではないという結論を導く。同様の勧告は、NCRP の解説書 (2003, 2007) に見出すことができる。国の当局が隠されている個人を積極的に探索するために電離放射線スキャン装置を用いることを意図的に選択するならば、関連する線量および安全上の懸念を考慮に入れた特定の正当化解析が必要である。

参考文献

- ANSI, 2002. Radiation Safety for Personnel Screening Systems Using X-rays. ANSI N43.17-2002. American National Standards Institute, McLean, Virginia.
- ANSI, 2009. Radiation Safety for Personnel Security Screening Systems Using X-ray or Gamma Radiation. ANSI/HPS Standard N43.17-2009. American National Standards Institute, McLean, Virginia.
- EU, 2011a. Commission Regulation (EU) No 1141/2011 of 10 November 2011 amending Regulation (EC) No 272/2009 supplementing the common basic standards on civil aviation security as regards the use of security scanners at EU airports. Off. J. Eur. Union OJ L293/22 – L293/23. Available at: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:293:0022:0023:EN:PDF>> (last accessed March 7, 2014).
- EU, 2011b. Commission Implementing Regulation (EU) No 1147/2011 of 11 November 2011 amending Regulation (EU) No 185/2010 implementing the common basic standards on civil aviation security as regards the use of security scanners at EU airports. Off. J. Eur. Union OJ L294/7 – L294/11. Available at: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:294:0007:0011:EN:PDF>> (last accessed March 7, 2014).
- EURATOM, 2012. Proposal for a Council Directive Laying Down Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation. COM(2012) 343 final. EURATOM, Brussels. Available at: <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/2012_com_242.pdf> (last accessed January 6, 2014).
- HERCA, 2010. Statement on the Justification of Full Body-scanners Using X-rays for Security Purposes. Heads of the European Radiological Protection Competent Authorities, Paris, France. Available at: <<http://www.herca.org/index.asp>> (last accessed January 6, 2014).
- IACRS, 2010. Relevant Facts Regarding the Use of Ionising Radiation Screening Devices in Airports. Inter-Agency Committee on Radiation Safety, Paris, France. Available at: <<http://www.iacrs-rp.org/>> (last accessed January 6, 2014).
- IAEA, 2010. General Safety Requirements. Governmental, Legal and Regulatory Framework for

- Safety. GSR Part 1, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2011. General Safety Requirements. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards. GSR Part 3, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IEC, 2010a. Radiation Protection Instrumentation – X-ray Systems for the Screening of Persons for Security and the Carrying of Illicit Items. IEC 62463. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- IEC, 2010b. Radiation Protection Instrumentation – Cargo/Vehicle Radiographic Inspection Systems. IEC 62523. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- IEC, 2014. Radiation protection instrumentation – Security screening of humans – Measuring the imaging performance of X-ray systems. IEC62709 ed1.0. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- ICRP, 1969. Protection against Ionizing Radiation from External Sources. ICRP Publication 15. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1971. Statement from the 1971 London meeting of the ICRP. Br. J. Radiol. 44, 814.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).

- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
- ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).
- ICRP, 2006. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
- ISCORS, 2008. Guidance for the Security Screening of Humans Utilizing Ionizing Radiation. ISCORS Technical Report 2008-1. US Interagency Steering Committee on Radiation Standards, Washington DC.
- NCRP, 2003. Screen of Humans for Security Purposes Using Ionizing Radiation Scanning Systems. NCRP Commentary 16. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.

- NCRP, 2007. Radiation Protection and Measurement Issues Related to Cargo Scanning with Accelerator-Produced High-Energy X Rays. NCRP Commentary 20. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 2011a. Radiation Protection in the Application of Active Detection Technologies. NCRP Commentary 21. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 2011b. Radiological Health Protection Issues Associated with the Use of Active Detection Technologies for Detection of Radioactive Threat Materials. NCRP Commentary 22. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- WHO, 1977. Use of Ionizing Radiation and Radionuclides on Human Beings for Medical Research, Training and Nonmedical Purposes. Technical Report Series 611, pp. 1–39. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
-

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication 132 委員校閲版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。ドラフトからの引用を禁ず 【事務局】

ICRP 年報
ICRP PUBLICATION 132
航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護
編集主幹 C.H. CLEMENT 編集委員 N. HAMADA ICRP の代表たる筆者 J. Lochard, D.T. Bartlett, W. Rühm, H. Yasuda, J-F. Bottollier-Depois
国際放射線防護委員会 に代わり
によって発行
この発行物は「ICRP, 2016. 航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護. ICRP Publication 132. Ann. ICRP 45(1), 1-48.」と引用されたい。

論説
宇宙放射線の海における飛行
電離放射線は、自然界に遍く存在する。トリウム、ウランおよびカリウム—地球が形成されるはるか以前に太陽の中心において生み出された、生まれながらに放射性の元素—ならびにそれらの壊変生成物は、地球上に生命が存在する以前から存在したし、今後数十億年にわたってなお存在することになる。それらは、さまざまな度合いで岩石中、土壌中、水中、空气中、植物中、動物中および人間の体内に見出される。土壌からの放射線に加えて、我々は、宇宙のカオスの形成において、また星にエネルギーを供給する大規模プロセスによって生成さ

<p>れる、太陽および外宇宙からの宇宙放射線にもさらされる。この「放射線の海」の中で進化したこの世の生命および将来世代は、我々が現在しているようにその中で生きることになる。</p> <p>電離放射線は直接感知することができず、その存在が明らかとなったのは、Wilhelm Röntgen による 1895 年の X 線発見 (Röntgen, 1895) からである。翌年、Henri Becquerel は、放射線が自然環境に在ることを発見した (Becquerel, 1896a,b)。その 16 年後、宇宙放射線は高高度気球飛行を伴う実験において Victor Hess によって発見された (Hess, 1912)。</p> <p>何十年にもわたって、放射線防護では、X 線のような人間によって製造または濃縮された放射線源、ならびに、原子炉および加速器において生み出された放射性同位元素対象とされた。しかし、ここ数十年間、ある種の自然線源、特にラドンが一層の注目を集め始めた。ラドンによる被ばくは、自然放射線による世界の平均線量の半分に相当する (UNSCEAR, 2010)。国際放射線防護委員会 (ICRP) は、ごく最近 <i>Publication 126</i> (ICRP, 2014) の中で、ラドン被ばくと関連する放射線防護を扱った。</p> <p>日常の宇宙放射線被ばくもまた、我々が生きる環境の自然の部分である。これについては、数十年前まで、地球の磁場および大気宇宙放射線からの防護をもたらすので、あまり関係しないものとみなされていた。しかし今や、500 人を上回る宇宙飛行士がこの防護範囲を超え、著しく高い宇宙放射線線量率に直面しており、この数は今後増加することになる。この特別な状況は、「宇宙における宇宙飛行士の放射線被ばく評価 (Assessment of radiation exposure of astronauts in space)」と題された <i>Publication 123</i> (ICRP, 2013) の中で扱われた。</p> <p>さらに、今日では、民間航空機による旅行の増加を背景に、宇宙放射線被ばくは航空機乗務員および乗客にとっても重要である。高所を移動する際、我々は地上よりも高いレベルの宇宙放射線にさらされる。典型的な民間飛行高度では、線量率は一般に、主として緯度、高度および太陽活動のレベルによるが、2~10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ の範囲である (ICRU, 2010)。この線量は、世界平均として 2400 μSv かつその典型的な範囲として 1000~13,000 μSv というである、自然放射線に起因する他の被ばくによる年線量と比較して有意となるには、年に何百時間もの飛行を要する (UNSCEAR, 2010)。よって、本刊行物では、毎年何百時間上空を過ごす人を含んでいる航空機乗務員および高頻度旅客 (frequent flyer) を対象とする。</p> <p>大気中の宇宙放射線は、複雑な粒子組成およびエネルギーを持つ一次放射線場と二次放射線場の両者を含む。こうした放射線場の全スペクトルをモニタリングできる測定器は概してかさばり、あまり頑健ではないので、航空機乗務員および乗客に対する線量を測定するのは難しい。それ故、過去 20 年にわたる研究においては、ソフトウェアプログラムコードに基づく線量評価が主に行われてきた。上空の放射線場</p>
--

は比較的一定であり、局所的に線量の変化が生じるのはまれで、太陽によって引き起こされるグラウンドレベルエンハンスメント（ground-level enhancement [GLE]、太陽フレアの影響による地上の線量増大）で起こるぐらいなので、コードの利用は可能である。これらのコードは、通常飛行計画として提示される、航空路に沿った緯度、経度および気圧高度の情報を使用する。

国際的には、航空機乗務員および乗客に対する線量が測定データの中央値の±20%以内の誤差で計算できることが検査・確認されたコードやモデルは 11 を上回る数にのぼる。これらのコードは通常保守的な推定値をもたらすもので、この精度は科学界において受け入れられるものとみなされている。

1996 年以来、欧州連合では、航空機乗務員は 8～12 km の典型的な飛行高度において職業被ばくを受ける作業者と認識されてきた。こうした背景のもと、欧州の航空会社はすべて、航空機乗務員の被ばくの記録を保存するよう要求されている。2006 年以降は、EURATOM/96/29（EURATOM, 2006）によって法令として遵守が命じられ、すべての加盟国で履行されている。同様に、1990 年代に、カナダは *Publication 60*（ICRP, 1991）における勧告を採用して航空機乗務員の放射線モニタリングを行うことを求め、これは PCAIRE プログラムの開発につながった。2006 年に、日本の放射線審議会は航空機乗務員に対する線量のモニタリングおよび管理に関するガイドラインを発行するとともに、関連する記録の保存を自発的に行うよう、国の代表的航空会社および国内航空会社に強く促した。

米国は、放射線被ばくに関する教材ならびに連邦航空局の民間航空医学研究所によって提示された勧告限度を通じて、航空機乗務員の放射線安全を促進している。同研究所は、先述したのと同じ飛行計画パラメータを用いるコンピュータプログラムを作成しており、自主的なモニタリングならびに個人的な被ばく線量評価および勤務体制に関するガイダンスを奨励しているが、航空会社による正式なモニタリングプログラムは義務づけられてはいない。

これらのコードを使えば線量評価を比較的簡単に行うことができ、これは放射線防護における重要なステップとなる。その後のステップは、防護オプションの検討ならびに容認できない被ばくおよび線量分布の不公平さを回避するための個人線量規準に拠る防護の最適化を必要とする。

Publication 103（ICRP, 2007）の中で、委員会は、計画、現存および緊急時という 3 つの被ばく状況を導入した。これらの状況は、被

ばくのカテゴリー（公衆、職業および医療）とともに、いかなる特定の状況においても最も適切な放射線防護のアプローチを明確に示すのに役立つ。

本刊行物は、防護に関する決定を行いうる前に線源が存在するため、宇宙放射線被ばくは現存被ばく状況であることを明言する。さらに、本刊行物では、航空機乗務員の宇宙放射線被ばくは職業被ばくであるので、たとえオプションが限られるケースであっても、雇用主は防護において取るべき役割を有することを明言する。これについてはいかなる矛盾もない。職業被ばくは現存被ばく状況においても生じうるが、これは防護措置が予め計画できないことを意味するものではない。

個人線量の制限を伴う一般的な防護の最適化のアプローチは、あらゆる事情においてあてはまる。被ばくのカテゴリーおよび被ばく状況のタイプは、これが達成される方法に影響を及ぼすことになる。さらに、特定の事情は、どの措置が実務的であり、有効であり、取る価値があるのかを左右する。本刊行物は、航空飛行時の宇宙放射線に固有の放射線防護に関する勧告を提示するものである。

IAN GENTLEY

ICRP 科学秘書
編集主幹

CHRISTOPHER CLEMENT

論説の参考文献

- Becquerel, H., 1896a. Sur les radiations é mises par phosphorescence. Comptes Rendus 122, 420–421.
Becquerel, H., 1896b. Sur les radiations é mises par phosphorescence. Comptes Rendus 122, 501–503.
EURATOM, 2006. Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 Laying Down Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General

- Public Against the Dangers Arising from Ionizing Radiation. Off. J. Eur. Commun. No L 159/1. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01996L0029-20000513&from=EN> (last accessed 14 May 2016).
- Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* 13, 1084–1091.
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. Report 84. J. ICRU 10(2).
- Röntgen, W., 1895. Über eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsberichte der Würzburger Physik-med. Gesellschaft* 22, 153–157.
- UNSCEAR, 2010. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York.

航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護
ICRP PUBLICATION 132
2016年3月に委員会により承認
抄録 —本刊行物において、国際放射線防護委員会（ICRP）は、現行のICRP放射線防護体系、航空飛行時の被ばくに関する最新の利用可能データ、そして航空飛行時の被ばくの管理において世界中で得られた経験を考慮に入れて、航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護に関する改訂ガイダンスを提示する。本刊行物では、宇宙放射線の起源、乗客および航空機乗務員はそれをどのように浴びるのか、この現存

被ばく状況に適用される基本的な放射線防護の原則、そして利用可能な防護対策について述べる。最適化の原則の履行については、委員会は、個人が受けるかもしれない被ばくのレベルに釣り合った等級別アプローチを勧告する。目標は、最も被ばくする個人の被ばくを合理的なレベルに保つことである。委員会はまた、宇宙放射線に対する意識を高めるとともに、関係するステークホルダー間の情報に基づく決定を支援するために、関連情報を積極的に発信するよう勧告する。
© 2016 ICRP. SAGE により発行。
キーワード: 宇宙放射線; 航空飛行; 航空機乗務員; 高頻度旅客; 等級別アプローチ
ICRP の代表たる筆者 J. LOCHARD, D.T. BARTLETT, W. RÜHM, H. YASUDA, J-F. BOTTOLLIER-DEPOIS

序文
<p><i>Spirit of St. Louis</i> 号がロングアイランドから 5800 km 飛んでル・ブルジェ空港に着陸した後、その飛行士 Charles Lindbergh の第一声は、「さあ、着いたぞ！」だった (<i>The New York Times</i>, 1924)。当時の観客たちは、寒さ、天候条件、そして疲れに対するこの先駆者の勇気を強調したが、放射線被ばくについて語った者は誰もおらず、それには十分な理由があった。当時、宇宙放射線のことを承知していたのは一握りの科学者に過ぎなかったのである。この先駆的な偉業は、大陸横断飛行への道を切り開いた。Charles Lindbergh の飛行以後、航空機の性能および収容力の向上、格安航空会社、そして旅行業の拡大によって、航空旅客数が大幅に増加した。2014 年には約 32 億枚の航空券が販売されており、この数字は 2030 年までに倍増することが予想されている (ICAO, 2015)。さらに、ビジネスジェット市場は年に約 4% 成長し続けており、全航空機は 2032 年までに倍増することが見込まれている。これにより、航空機乗務員および乗客の宇宙放射線による個人および集団被ばくが顕著に増える可能性が大きい。</p> <p>これとの関連で、2010 年 10 月に南アフリカのケープタウンで開かれた会合において、国際放射線防護委員会 (ICRP) の主委員会は、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対する放射線防護に関するガイダンスを作成するために、第 4 専門委員会直属のタスクグループ 83 の編成を承認した。</p> <p>タスクグループ 83 の付託事項は、宇宙放射線被ばくに対する航空機乗務員および乗客、特に高頻度旅客の防護のための 2007 年勧告 (ICRP, 2007) の適用について記述し明確化する報告書を作成することだった。同報告書では、航空飛行時の被ばくの管理と関連する被ばく状況のタ</p>

イブならびに履行されるべき適切な放射線防護原則について論じられるべきである。特に、委員会によって勧告された放射線防護体系の基礎である最適化の原則の履行には注意が払われるべきである。

タスクグループ 83 のメンバーは以下のとおり：

J. Lochard（議長）	J-F. Bottollier-Depois	W. Rühm
D.T. Bartlett	R. Hunter	H. Yasuda

客員メンバーは以下のとおり：

S. Mundigl

第 4 専門委員会の批評的査読者は以下のとおり：

D.A. Cool	M. Kai
-----------	--------

主委員会の批評的査読者は以下のとおり：

H. Liu	S. Romanov
--------	------------

Sylvain Andresz は、有用な科学上および編集上の助力の提供によって、本報告書の作成において重要な役割を果たした。また、Gerhard Frasch, Gérard Desmaris および Frank Bonnotte から有用なコメントを多数受け取った。本タスクグループは、これら全員ならびに原子力防護評価センター（CEPN）の貴重な支援に感謝の意を表す。

タスクグループ 83 は、2011 年 2 月 1～2 日にフランスのフロントネー・オー・ローズにある CEPN の構内で会合し、その後は通信によって作業した。

本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：

(2009～2013)

J. Lochard（委員長）	T. Homma	G. Massera
W. Weiss（副委員長）	M. Kai	K. Mrabit
J-F. Lecomte（秘書）	H. Liu	S. Shinkarev
P. Burns	S. Liu	J. Simmonds

P. Carboneras	A. McGarry	A. Tsela
D.A. Cool	S. Magnusson	W. Zeller

(2013～2017)

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

要点

- 宇宙放射線は、宇宙および太陽に由来する高エネルギー粒子からなる。基本的に、高度および緯度が高いほど線量率は高くなる。線量率の急増は、太陽フレアとの関連で起こりうる。結果として、航空機による飛行は宇宙放射線被ばくを増大させる。
- 乗客の数は増加し続けること、航空機技術は航空機がより長時間より高い高度で飛行するのを可能にすることを考えると、航空機乗務員および乗客の宇宙放射線への累積被ばくは増大すると思われる。したがって、委員会は、防護の戦略を策定し履行するのが重要であると考えている。
- 委員会は、太陽フレアによって引き起こされるものを含めて、宇宙放射線被ばくを現存被ばく状況とみなしている。
- 委員会は引き続き、航空機のあらゆる乗客、すなわち、低頻度旅客と私的な理由または職務に因る高頻度旅客のいずれの被ばくも公衆被ばくとされるべきであり、航空機乗務員の被ばくは職業被ばくとして扱われるべきであると考えている。
- 委員会は、特定の事情において特別な注意を要するような最も高い被ばくをする個人の被ばく水準を考慮に入れて選択された線量参考レベルを、一般的には 5～10 mSv year⁻¹ の範囲で設け、被ばくが合理的に達成可能な限り低く保たれるよう勧告する。
- 防護の戦略の現実的な履行にあたり、委員会は、個人の飛行頻度に基づく等級別アプローチを勧告する。
 - 航空機のほとんどの乗客は低頻度旅客であり、それらの宇宙放射線被ばくは放射線被ばくの総量との関係で見れば取るに足らない量

<p>とみなされる。しかしながら、委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をあらゆる乗客が入手できるようにするよう勧告する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 私的な理由または職務のための高頻度旅客の場合、一般的事項の情報を提供すべきという勧告に加えて、委員会は、その必要を感じた場合に個人が飛行頻度の調整を考えることを可能にするために、線量の自主的評価を奨励する。 ○ 被ばくが航空機乗務員に匹敵する職務のための高頻度旅客のごく一部のために、委員会は、そのような航空機利用者に関する要件が、一般的な事情に従って、当該個人とその組織の間の対話によってケースバイケースで決定されるよう勧告する。 ○ 航空機乗務員の場合、委員会は、操業管理者が以下のようにするよう勧告する。 <ul style="list-style-type: none"> (i) 教育プログラムを通じて、宇宙放射線について航空機乗務員に個人的に知らせる。 (ii) 航空機乗務員の線量を評価する。 (iii) 航空機乗務員の個人および累積線量を記録する。これらのデータは当該個人が入手できるようにするべきであり、少なくとも当該個人の平均余命に匹敵する合理的な期間にわたって保存されるべきである。 (iv) しかるべき場合には、選択された線量参考レベルを考慮し、当該航空機乗務員との協議を経て、飛行勤務表を調整する。 <p>・ ほとんどの目的では、航空機乗務員および乗客に対する線量の評価には、適切に検証された計算プログラムの1つを用いれば十分であるとみなされる。</p> <p>・ 私的な理由または職務に因る高頻度旅客のうち妊娠している乗客は、被ばくの自主的評価に基づいて、胚／胎児の宇宙放射線被ばくを低減するために飛行頻度を調整することを望むかもしれない。航空会社の管理者は、妊娠した航空機乗務員のために、委員会の勧告と整合するよう、妊娠の届け出後の残りの期間における職務を調整するための規定を用意すべきである。</p> <p>・ 委員会はまた、国の当局または航空会社が、宇宙放射線に対する意識を高め、関係するあらゆるステークホルダー間の情報に基づく決定を支援するために関連情報を積極的に発信するとともに、職業被ばくを受ける個人について放射線防護文化を促進するよう勧告する。</p>

<p>用語解説¹</p> <p>¹ 本刊行物の発行時点において、委員会は、いくつかの不完全および不整合のために、<i>Publication 103</i> (ICRP, 2007) に含まれている用語解説を改訂中だった。本刊行物では、定義は <i>Publication 103</i> の用語解説よりもむしろ本文に見出されるものを参照していることに注意されたい。</p>
--

<p>被ばくのカテゴリー [Categories of exposure]</p> <p>委員会は3つの放射線被ばくカテゴリー、すなわち、職業被ばく、公衆被ばくおよび医療被ばくを区別している。</p>
<p>宇宙放射線 [Cosmic radiation]</p> <p>宇宙放射線は、主として原子核である地球大気圏外に由来する高エネルギー粒子と、大気およびその他の物質との相互作用によって生じる粒子からなる電離放射線である。</p> <p>一次宇宙放射線は、地球の軌道における宇宙および太陽から入射する宇宙放射線である。</p> <p>二次宇宙放射線は、大気またはその他の物質と相互作用する一次宇宙放射線によって直接もしくは連鎖的な反応において生み出される粒子からなる。航空機における放射線防護および放射線測定の観点で重要な粒子は、中性子、陽子、光子、電子、陽電子、ミュー粒子ならびに、比較的量は少ないが、パイ中間子および陽子よりも重い原子核である。</p> <p>銀河宇宙放射線は、太陽系外に由来する宇宙放射線である。</p> <p>太陽宇宙放射線は、太陽からの宇宙放射線である。</p>
<p>線量規準 [Dose criteria]</p> <p>防護の最適化のための境界を提示する目的に沿って不公平さに対処するために、また十分な防護を確保するために、放射線防護プログラムの一環として定められる個人線量のあらゆる規準の総称。委員会の用語である「参考レベル」、「線量拘束値」および「線量限度」はすべて、特定の事情における線量規準の例である。</p>
<p>胚 [Embryo]</p> <p>子宮内発育の初期段階にある、まだ生まれていないヒト（妊娠3カ月前）。</p>
<p>緊急時被ばく状況 [Emergency exposure situation]</p> <p>緊急時被ばく状況は、計画された線源の制御の喪失もしくは、制御されていない線源に関係するあらゆる予想外の事象（たとえば、悪意のある事象）の結果として生じる被ばく状況である。これらの状況は、被ばくを回避または軽減するために至急および適時の対策を必要とする。</p>

雇用主 [Employer]
相互に合意した関係により、作業者の雇用においてその作業者に対して認知された責任、関与および義務を負う、国の法律に従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もしくはその他の人。
現存被ばく状況 [Existing exposure situation]
現存被ばく状況は、結果として生じる被ばくを管理する決定が行われる時点においてすでに存在する線源に起因する被ばく状況である。これらの線源には、自然線源（宇宙放射線、ラドンおよびその他の自然起源の放射性物質）および人工線源（過去の行為、事故または放射線事象による長期被ばく）が含まれる。被ばくの特徴づけは、それらの管理の前提条件である。
被ばく状況 [Exposure situation]
自然または人工放射線源がさまざまな経路を通じて運ばれ、その放射線が人または他の生物相の被ばくに帰着する状況。
被ばく経路 [Exposure pathway]
放射線または放射性核種が人に到達し被ばくを引き起こしうる道筋。
胎児 [Fetus]
子宮内で完全に発育した、まだ生まれていないヒト（妊娠 3 カ月より後）。
フルエンス [Fluence]
フルエンスは、ある球に入射する粒子の数をその断面積で割った商である。フルエンスは m^2 の単位で測定される。
高頻度旅客 [Frequent flyer]
私的な理由または職務のために頻繁に航空機で旅行し、フリークエントフライヤープログラムに登録されているかもしれない人。高頻度旅客の中には、一般的な航空機乗務員と同程度の年間飛行時間（たとえば、 $500 h year^{-1}$ ）に達する人もいるかもしれない。

グラウンドレベルエンハンスメント [Ground-level enhancement]
中性子モニタによって容易に検出される程度まで地表の放射線レベルを増大させるのに十分なエネルギーおよび強度の宇宙線を太陽フレアが放出する場合、それらは「グラウンドレベルエンハンスメントまたはグラウンドレベルイベント (ground-level enhancement or event)」と呼ばれる。
等級別アプローチ [Graded approach]
等級別アプローチは、ある個人グループについて立案された委員会の勧告または要請が、一般的な事情も考慮して、それら個人の被ばくのレベルに釣り合ったものであることを確実にすることを目的とする。
正当化 [Justification]
(i) 放射線に関する計画された活動は、総合的に見て有益であるのかどうか（すなわち、その活動の導入または継続による個人および社会の便益は、その活動の結果として生じる危害にまさるのかどうか）、もしくは(ii) 緊急時被ばく状況または現存被ばく状況において被ばくを管理する決定は、総合的に見て有益であると思われるのかどうか（すなわち、個人および社会の便益は、そのコストおよびそれが引き起こすいかなる危害または損害にもまさるのかどうか）を決定するプロセス。
低頻度旅客 [Occasional flyer]
たまに航空機で旅行し、達する年間飛行時間が一般的な航空機乗務員より明確に下回る人。
職業被ばく [Occupational exposure]
職業被ばくは、作業者が自らの業務の結果として受けるあらゆる被ばくをいう。しかし、放射線の遍在ゆえに、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みなされうる状況の結果として作業場で受ける放射線被ばくに限定している。
操業管理者 [Operating management]
組織の最高レベルにあつて組織の指揮、管理および評価を行う人またはそのグループ。最高経営責任者、総裁、業務執行役員や執行グループなど、別の用語も多く用いられる。

<p>防護の最適化 [Optimisation of protection]</p> <p>放射線防護の最適化の原則は、経済的および社会的因子を考慮に入れて、個人線量の大きさ、被ばくする人の数および潜在被ばくの可能性を合理的に達成可能な限り、適切な線量規準（拘束値または参考レベル）よりも低く保つことを目的とする線源関連プロセスである。</p>
<p>計画被ばく状況 [Planned exposure situation]</p> <p>計画被ばく状況は、放射線源の意図的な導入と運用の結果として生じる被ばく状況である。計画被ばく状況は、予期することおよび完全に管理することが可能である。</p>
<p>防護原則 [Principles of protection]</p> <p>放射線防護体系を構成する 3 つの基本原則。すなわち、制御可能なあらゆる被ばく状況に適用される正当化の原則および防護の最適化の原則ならびに、計画被ばく状況にのみ適用される線量限度の適用の原則である。</p>
<p>防護対策 [Protective action]</p> <p>人を電離放射線の危害から防護するために定められる対策。防護対策は一般に、線源までの距離、被ばくの時間、もしくは遮蔽に影響を及ぼす対策である。</p>
<p>参考レベル [Reference level]</p> <p>緊急時被ばく状況および現存被ばく状況において、この線量規準は、それより上では被ばくの発生を許すことを計画するのは不適切であると判断され、それより下では防護の最適化が履行されるべきである、線量またはリスクのレベルを表す。参考レベルとして選択される値は、考慮されている被ばくの一般的な事情に左右されることになる。</p>
<p>知る権利 [Right to know]</p> <p>自律、公正および慎重という倫理的価値観と整合するように、患者、作業員および公衆の構成員は、自身はいかなる危険性にさらされており自身をどのように防護すべきなのかについて知らされる権利を有するという原則。</p>
<p>リスク [Risk]</p>

<p>リスクは、結果（例えば、がん）が生じることになる確率に関係する。本報告書では、リスクに関する用語は以下のようにまとめられる。</p> <p>過剰相対リスクは、被ばく集団における疾病率を非被ばく集団における疾病率で除して 1 を減じたものである。これは、Sv あたりの過剰相対リスクとしてよく表される。</p> <p>相対リスクは、被ばく集団における疾病率を非被ばく集団における疾病率で除したものである。</p>
<p>太陽フレア [Solar flare]</p> <p>太陽フレアは、太陽から宇宙空間へ高エネルギー太陽粒子が大規模に放出される現象である。発生頻度は太陽活動に伴って変化し、週に 1 回未満～日に数回である。大規模太陽フレアは、小規模太陽フレアよりも低頻度である。太陽フレアは、「太陽粒子現象」として知られる、太陽風に乗った高エネルギー粒子の流れを生じさせる。これらの粒子が地上の宇宙放射線検出器によって観測される場合、それらは「グラウンドレベルイベントまたはグラウンドレベルエンハンスメント（ground-level event or enhancement）」と呼ばれる。</p>
<p>太陽風 [Solar wind]</p> <p>太陽風は、一太陽の磁場のために一高温になって太陽コロナから離れ、400 km s⁻¹の平均速度で太陽から放射状に伝搬する、電子、陽子およびアルファ粒子のプラズマである。太陽風は、銀河宇宙放射線のフルエンスに影響を及ぼす、比較的強力であり組んだ磁場を伝搬する。太陽風は、北極地方のオーロラ（北極光）や南極地方のオーロラ（南極光）を引き起こす。</p>

<p>1 緒言</p> <p>(1) 航空機の中で自分の座席に着くことは、時には長い行程になりうる。チェックインおよびパスポート検査の後、空港のセキュリティ検査を受けなければならない。このプロセスにおいて、放射線が役割を演じることがある。機内持ち込み手荷物を検査するために、また場合によっては人物を検査するために、それが用いられる場合である。委員会は最近、セキュリティ検査における放射線防護に関する勧告を発表している（ICRP, 2014）。</p> <p>(2) 離陸後、航空機が巡航高度へと上昇するのに従って、宇宙放射線被ばくは増大する。典型的な巡航高度（>10,000 m）においては、線量率は 7 μSv h⁻¹（海拔ゼロ地点における宇宙放射線被ばくレベルの 150 倍超）に達しうる。より高い高度でより長い時間にわたって飛行す</p>

る新しい超長距離ジェットの将来的な利用は、現在の飛行慣行と比較して総線量を 30～50%増加させると推定されている [ドイツの乗務員組合（*Vereinigung Cockpit*）による推定であり、Frasch et al. (2012) によって引用された]。

(3) 委員会は以前に、妊娠した航空機乗務員に特に注意を払って、航空機乗務員の放射線防護を特に焦点とする一連の勧告を作成した (ICRP, 1984, 1991)。本刊行物では、これらの勧告をレビューするとともに、乗客、特に私的な理由または職務のために旅行する高頻度旅客の被ばくも考慮することになる。

1.1 背景

(4) 委員会は、*Publication 9* (ICRP, 1965) の中で、高高度で飛行する結果として生じる被ばくに初めて言及した。*Publication 26* (ICRP, 1977) の 88 項では、委員会は、「高高度飛行」は自然放射線被ばくを増加させる可能性があることに言及した。*Publication 39* (ICRP, 1984) の 10 項では、「現状のとおり飛行すること」が現存被ばく状況の一例として示された。

(5) 委員会は、宇宙放射線被ばくに対する防護に関する最初の勧告を *Publication 60* (ICRP, 1991) の中で発表した。委員会は、民間ジェット機の運航に関与する人員は職業被ばくを受ける人として扱われるよう勧告した。飛行時間が限られているゆえに線量はあらかじめ定められた値を超えないと思われるため、個人モニタリングのための線量計の使用は必要ではないとみなされた。委員会はさらに、他の乗客よりも頻繁に飛行する高頻度旅客や配達人などのグループにも注意が払われるべきであると指摘した。他の乗客の防護に関する言及はなかった。

(6) 委員会はその後、*Publication 75* (ICRP, 1997) の中で勧告を明確化し、ビジネス旅客は（約 5～6 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ で約 200 h の飛行を考慮して）1 mSv 程度の年実効線量を受けうるに過ぎないと思われるため、高められたレベルの宇宙放射線に職業被ばくするグループは航空機乗務員のみであると委員会は考える、と指摘した。委員会はまた、航空機内で指定区域の使用を考慮する必要はないこと、航空機乗務員の年実効線量は飛行時間および対応する航空路の場合の典型的な実効線量率から導き出されるべきであること、そして被ばくの制御はおもに飛行時間と航空路選択の制限によって確保されることを繰り返して述べた。最近になって、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) と ICRP による共同刊行物は、航空機の高度における宇宙放射線場について述べるとともに、航空会社およびその規制者による航空機乗務員の線量評価の国際的な調和を容易にするために、航空機乗務員に対する宇宙放射線による線量の妥当性確認のための参考データを提供した (ICRU, 2010)。

(7) 本刊行物は、航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護と関連するこれまでの委員会勧告に取って代わるものである。

1.2 範囲

(8) 委員会は最近、宇宙における宇宙放射線被ばくの管理に関する勧告を *Publication 123* (ICRP, 2013) として発表している。本刊行物の目的は、航空飛行時の宇宙放射線被ばくの管理に関する委員会の勧告を更新し明確化することである。本刊行物は、*Publication 103* (ICRP, 2007) における航空機乗務員の防護に関する一般的な勧告の発展を考慮に入れるものである。本刊行物は、乗客、特に私的な理由または職務のための高頻度旅客の被ばくを考慮することによって、考察の範囲を航空機乗務員以外へと拡大することが意図されている。本刊行物では、妊娠した女性の被ばくというトピックも扱う。

1.3 本刊行物の構成

(9) 2 章では、宇宙放射線による航空飛行時の被ばくの特徴を提示する。同章では、線源および被ばく経路の簡潔な説明ならびに、太陽フレア、被ばくレベルの定期的評価、そして個人および集団線量データの概要を示す。3 章では、被ばく状況のタイプ、関係する被ばくのカテゴリならびに適用されるべき基本原則を含めて、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対する ICRP の放射線防護体系について述べる。4 章では、被ばくするさまざまな個人、すなわち低頻度旅客 (occasional flyers)、高頻度旅客 (frequent flyers) および航空機乗務員について等級別アプローチを用いた、ICRP 放射線防護体系の履行に関するガイダンスを示す。1 つの節では、妊娠した乗客および航空機乗務員の被ばくという特殊な状況を扱う。

2 航空飛行時の宇宙放射線被ばくの特徴

2.1 歴史的背景

(10) 1859 年 9 月、英国のアマチュア天文学者である R.C. Carrington は、地球に向かって移動する、大きな質量放出を伴う太陽フレアを観測した。電信システムは欧州とアメリカのいたるところですぐに故障し、カリブ海まで南方の空をオーロラが満ちた。今日では、1859 年のこの事象のような太陽陽子またはプロトン現象 (SPE) は、磁気嵐を引き起こしうる比較的高エネルギーの粒子を放出することが知られている。

(11) 1912 年、V. Hess は、3 個の電離箱とともに 5300 m の高度まで、歴史に残る気球飛行を行った。Hess は、上昇するのに従って放射線のレベルが高くなることを発見し、これは電離放射線が原因であると考えた。放射線は最高高度では、地上と比較して 4 倍高かった。Hess は、気球上昇を夜間に数回、皆既食の間に 1 回行うことによって、太陽が放射線源である可能性を排除した。Hess は、「私の観測結果は、透過力

<p>が極めて大きい放射線が上方から我々の大気に入るという仮定によって最もよく説明される」と結論づけた（Hess, 1912）。</p>
<p>(12) 1925 年, R.A. Millikan は, これらの放射線の起源が地球大気圏外にあることを証明するとともに, 「宇宙線」および「宇宙放射線」という用語を導入した。同年, A. Compton は, 宇宙放射線は主として荷電粒子であると提唱した。</p>
<p>(13) 民間の超音速航空機が開発されたのは 1960 年代である。すなわち, ツポレフ-144 プロトタイプの初飛行は 1968 年であり, コンコルドプロトタイプの初飛行は 1969 年だった。超音速航空機が巡航する高高度（約 19,000 m）は, 航空機乗務員および乗客の宇宙放射線被ばくに関する懸念を増大させた。線量のモニタリングを確保するために, 一部の航空機乗務員は個人線量計を携帯し, コンコルドには放射計が取り付けられた。ツポレフ-144 の乗務員用には, 特別な線量計も開発された。放射線レベルの増大が著しい場合（たとえば, ツポレフ-144 では 300 $\mu\text{Sv h}^{-1}$）, 航空機はより低い高度へと下降することがよくあった。これは, 航空機における宇宙放射線被ばくの日常モニタリングの端緒を開いた。今日では, 航空飛行時の宇宙放射線による線量は一般に, モニタリング結果によって検証されているコンピュータコードを用いて推定されている。</p>

<p>2.2 線源および経路</p>
<p>(14) 地球は, 太陽系外から来る高エネルギー粒子 [銀河宇宙放射線 (GCR)] および太陽から来る高エネルギー粒子 [太陽宇宙放射線 (SCR)] に絶えずさらされている。さらに, 地球は時に, 太陽からの高エネルギー粒子の放出 (SPE) にさらされることもある。GCR は主として, エネルギーフルエンス分布が 10^{20} 電子ボルト (eV) 超に及ぶ陽子 (85%) からなる。これらの高エネルギー粒子は宇宙放射線の固有の特徴であり, 線量に大きく寄与する。SCR の 99% は, エネルギーが一般に 10^6 eV を下回る陽子からなる。GCR および SCR は一般に, 「一次宇宙放射線」と呼ばれる (UNSCEAR, 2008 ; ICRU, 2010)。</p>
<p>(15) GCR は大気の原子的構成要素と相互作用し, 連鎖的な相互作用ならびに宇宙放射線被ばくに寄与する二次反応生成物を生み出す (図 2.1)。これらは, 航空機の高度から地上までの大気中の深度に伴って強度が低下する。この低下は高度 16 km と 8 km の間でほぼ線形であり, $1.5 \mu\text{Sv h}^{-1} \text{ km}^{-1}$ の割合である (EC, 2004)。</p>
<p>(16) GCR を構成する粒子は荷電しているため, 太陽の太陽風（すなわち, 太陽系全体にわたって磁場を生み出す太陽コロナからの陽子および電子のプラズマ）の磁場によって影響を受けうる。これらの磁場は, さもなければ地球の大気に入るであろう低エネルギー GCR を偏向させる。太陽風は 11 年の太陽活動周期とともに変化し, 磁場における変動を引き起こす。地球の軌道付近では, GCR は太陽活動極小期に最大であり, 太陽活動がより大きく, 太陽黒点, フレアおよびコロナ質量放出を伴う時に, GCR は強力な太陽風のために最小になる (図 2.2)。</p>

<p>(17) 宇宙放射線粒子の経路は地球の磁場を横切るために曲げられ, これが荷電粒子に対する遮蔽の一部として作用する。地球の磁場が地表とほぼ平行である赤道付近では, 高度が低いほど到達する粒子が少なくなり, 磁気遮蔽効果が大きくなる。地球の磁場が地表とほぼ垂直である磁極付近では, 最大数の一次宇宙放射線粒子が大気に到達し, 航空飛行高度まで透過する二次放射線を生み出す可能性がある。したがって, 宇宙放射線被ばく率は, 極圏でより高くなり, 赤道付近でより低くなる (図 2.3)。</p>
<p>(18) 要するに, 航空機における宇宙放射線場は, 高度, 地磁気緯度および太陽活動周期によって変調する。通常の航空機の高度および赤道においては, 電子/陽電子および中性子が線量の主たる構成要素であり, 陽子がこれに続く。対照的に, より高い緯度においては, 線量は主として中性子による (表 2.1)。さらに, より高い高度においては, 陽子よりも重い原子核（たとえば, アルファ粒子）が寄与が生じ始める。</p>

<p>2.3 太陽フレア</p>
<p>(19) 例外的に高いレベルの放射線は太陽フレアによって生じうるが, かなりのエネルギーを持っており地上の中性子モニタによって観測できるのはわずかに過ぎない（年に約 1 回）。これらは「グラウンドレベルエンハンスメントまたはグラウンドレベルイベント (ground-level enhancement or event)」（GLE）と呼ばれる。GLE は, 航空飛行高度における線量率の増大を引き起こす。図 2.4 は, 1989 年 10 月に衛星によって観測された各日の陽子フルエンスを示したものであり, 太陽フレアが容易に観測できる。</p>
<p>(20) 現在のところ, 大きな不確実性を伴わずに SPE GLE の線量を予測することはほとんど不可能である (Desmaris, 2006)。SPE GLE の場合における高められた実効線量率に対応する航空機乗務員に対する線量の計算は通常, 地上の中性子モニタもしくは利用可能ならば機内測定の結果を用いて適応的に行われる。計算された線量率は相当大きなものになりうるが, EURADOS 作業グループ 11 によって得られた結果によれば, 5 倍以上のファクターの大きな不確実性によって特徴づけられる (EC, 2004 ; Beck et al., 2008)。Lantos and Fuller (2003) によれば, GLE は 1942 年以降に 64 回観測されているが, これらのうち, 12,000 m における航空機乗務員の等価線量の, 30 μSv を上回る増大のかなりの尤度と関連づけられたのは 18 回に過ぎなかった。これは, 同様の航空飛行において太陽極小期に GCR によって受ける線量の 3 分の 2 に匹敵する。Lantos and Fuller (2003) は, 12,000 m において 1 mSv を上回る線量増大につながる可能性があったと思われる GLE は 4 回に過ぎないと推定した。Beck et al. (2008) も, 線量が航空飛行あたり数百 μSv を上回る GLE はまれであると結論づけた。</p>
<p>(21) 委員会は, 雷雨時に大気中に生じるガンマ線放射への航空機乗務員および乗客の潜在被ばくに関する懸念が近年提起されていることを承知している。宇宙放射線とは関係のないこの現象は, 1991 年に米国航空宇宙局によって初めて観測された。「地球ガンマ線放射」と名づけられたこれらの放射は, 従来の航空飛行高度において発生し, 最大 20 MeV のエネルギーで数ミリ秒持続すると思われる。それらの発生メカニズムの詳細は引き続き調査されているが, ガンマ線はおそらく, 電光によって加速された電子により生み出され, 光速に近い速さで進み,</p>

大気中の原子に衝突するだろう (Dwyer et al., 2012)。地球ガンマ線放射と関連する航空機乗務員および乗客の潜在被ばくを評価するための実証された/頑健な手法は、現在のところ存在しない。安全手順は、巨大な熱帯雲を避けるために進路を変更することを、またそれらの雲の上を上昇しないことを航空機のパイロットに要求すると指摘されている (Desmaris, 2016)。しかし、航空機への落雷は毎年起きており、あらゆる関連する一時的現象のモニタリングは今後数年続くことになる。したがって、委員会は、その機会が合理的かつ利用可能になるのに従って、最適化の原則と整合する調査および対策を継続することを奨励する。

2.4 航空機における個人被ばくの評価

(22) 航空機における個人被ばくは、コンピュータプログラムを用いて比較的容易に推定することができる。実際に、航空機における宇宙放射線場はおおむね均一であり、所定の航空飛行の場合、異なる個人の被ばくは同様である (Battistoni et al., 2005)。ほとんどのコンピュータプログラムの場合、大気は航空機がそれを通して航空飛行する立方体に分割され、ある立方体における平均実効線量率は、高度、地磁気緯度および太陽変調に左右される。立方体を横切る際の線量は、線量率と航空機が立方体を横切るのに必要とされる時間の積であり (図 2.5)、これは基準となる航空飛行プロファイルにより決定される。2 空港間実際の航空飛行プロファイルは、主として天候条件のために基準となる航空飛行プロファイルとは異なる可能性があるが、線量に対して有意な影響があるとは考えられない (Van Dijk, 2003)。

(23) 航空機における線量率を評価するコンピュータコードは、航空機における周辺線量当量率の測定によって検証し強化することができる。たとえばドイツでは、公式の線量計算のために用いられる計算プログラムを検証するために、2機の旅客機に周辺線量当量率計が4年にわたって備え付けられた (Frasch et al., 2014)。周辺線量当量率の決定に関する詳細については、欧州委員会 (EC, 2004) によるものや、国際標準化機構 (ISO) の規格である ISO 20785 の第 1~3 部 (ISO, 2011, 2012, 2013) など、さまざまな合意された規格に論じられている。

(24) EC (2004) は、1993~2003 年の期間にわたる測定および計算された周辺線量当量率を集約したデータを発表している。これらのデータは、ICRP と ICRU の共同刊行物 (ICRU, 2010) に示されている周辺線量当量基準値の特定を導く解析の主たる根拠となっている。これらの基準値は、航空機乗務員に対する線量評価のための日常手順の適合性をチェックするために用いることができる。

(25) 航空機において職業被ばくを受ける個人のモニタリングをすることが、ICRP (1997, 2007) によって勧告されている。個人線量は適時的に推定することができるため、委員会は引き続き、航空飛行時の個人被ばくのモニタリングのためには、測定装置 (線量計およびその他の機器) を用いる代わりに検証されたコンピュータコードの利用で十分であると勧告する。これらのコードは、関係当局の要件を満たすものとすべきである。そのようなコードの比較は、最近発表されている (EURADOS, 2012)。

19

(26) 一例として、専用コードを用いて推定された、3つの航空路の場合の実効線量を表 2.2 に見出すことができる。赤道横断ルートの場合の線量率の値が最も低い。さまざまな航空路の場合の線量の他の例は、附属書 A に見出すことができる。

2.5 航空機乗務員の被ばく

(27) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会によって提示されたデータ (UNSCEAR, 2008) は、航空機乗務員の場合の平均年実効線量の範囲は数 mSv の次元であり (ある国において航空会社によって提供される航空路しだいでは 1.2~5 mSv)、最大値は約 6~7 mSv であることを示している。平均年実効線量は平均年間航空飛行時間に大きく左右され、これは欧州諸国では 600 時間、米国では 900 時間程度である。これらの線量推定値ならびに本刊行物に提示されている推定値は *Publication 60* (ICRP, 1991) に基づくものであることに注意すべきである。委員会は、放射線加重係数など、*Publication 103* (ICRP, 2007) で導入された線量計算の変更の結果として、線量は約 30% 低くなることを承知している。

(28) 欧州における航空機乗務員の被ばくのレビュー (Andrez and Croüail, 2015) は、平均年実効線量はチェコの航空会社の場合の 1 mSv からフィンランドおよびスウェーデンの航空会社の場合の 2.5 mSv まで、まちまちであることを示した。最も高い最大年実効線量は、デンマーク、ドイツおよびフィンランドの航空会社の場合の約 6~7 mSv である (図 2.6)。米国における航空機乗務員の場合の平均年実効線量は同等であり、2006 年で 3.1 mSv と推定された (NCRP, 2009)。日本では、乗務員の年線量が 2007 年について評価されており、パイロットの場合には平均で 1.7 mSv、最大で 3.8 mSv、そして客室乗務員の場合には平均で 2.2 mSv、最大で 4.2 mSv だった (Yasuda et al., 2011)。例外的な事情を除けば、航空機乗務員が受けるのは 10 mSv year⁻¹ 未満である。

(29) 航空機乗務員の被ばくは、総職業被ばくの重要な構成要素でもある。UNSCEAR (2008) によれば、世界における航空機乗務員の総集団年実効線量は 800 man Sv の次元である (記録されたあらゆる職業被ばく線量の 70~80%)。国ごとの集団実効線量は主として、国の代表的航空会社の規模および年間航空飛行時間に左右される。集団実効線量は、一定の国の場合には 50 man Sv year⁻¹ を超過しうる (たとえば、ドイツでは 2012 年に 78.5 man Sv)。これらの集団線量は、職業被ばく全体への主たる寄与因子となっている。表 2.3 は、いくつかの国における航空機乗務員の場合の総職業被ばくを示したものである。

(30) 航空機乗務員が受ける個人線量の分布は、ガウス分布の形状を有する (図 2.7) (実際には、この図は 2 つのガウス分布、すなわち、運航乗務員の場合の分布と客室乗務員の場合の分布の結合による結果を示している)。そのような被ばくプロファイルは、十分に低いため管理の適用に値しないレベルで比較的均一の被ばくを受ける集団に典型的である。比較すると、原子力産業における基本的な被ばく状況は一般に、航空飛行時のそれよりもはるかに変動的である。この事実および防護の最適化原則の適用により、一般に、はるかに非対称の線量分

20

布に帰着する（たとえば、対数正規分布に近づく）。

2.6 航空機乗務員の疫学的調査

(31) 航空機乗務員の疫学的調査は、過去 25 年にわたって実施されてきた [Zeeb et al. (2012) によってレビューされた]。初期の調査は、カナダ、英国および日本のパイロットの調査だった。がんについては、パイロット（歴史的に、パイロットは事実上、すべて男性だった）は一般集団と比較してがん死亡率の低下を示しており、これは健康作業効果として職業コホートに観察されることがよくある。しかし、いくつかの特定種類のがん、すなわち黒色腫および脳腫瘍は、航空機乗務員の場合に高められると思われる (Zeeb et al., 2012)。

(32) 1990 年代における第 2 世代の調査には、欧米人のより大規模な一連の調査が含まれた。以前に観察されたように、パイロットのがん死亡率は一般集団よりも低く、一部のがん（黒色腫および脳腫瘍）は「非常に控えめな過剰リスク」を示した (Reynolds et al., 2002)。ある調査は、女性客室乗務員（女性は客室乗務員の 80% を占め、基本的には未婚の女性によって代表された）における白内障リスクのわずかな増加および、一般集団と比較して乳がん死亡率の「非常に控えめな増加」も示した (Rafnsson, 2005)。

(33) UNSCEAR (2006) は、黒色腫、黒色腫以外の皮膚がんおよび乳がんの一貫した過剰リスクの証拠が見ついていると述べた。しかし、雇用期間との関連は見出されておらず、個人線量に関する情報なしに、電離放射線被ばくまたは太陽紫外線への被ばくについて、観察された過剰リスクを相互に関連づけることは難しい。最近の研究は、乳がんの罹患率は宇宙放射線被ばくとは関係なく、これは経産回数減少および初産年齢の高齢化によって説明されるかもしれないことを発見した (Schubauer-Berigan et al., 2015)。

(34) 民間航空機乗務員の死亡率に関するある研究は、平均 22 年にわたって 94,000 人の欧米人を追跡した (Hammer et al., 2014)。この研究は、一般集団と比較してがんおよび心血管疾患死亡率の全体的な低下を示した。運航乗務員については皮膚黒色腫による死亡率の増加が観察されたが、これは職業被ばくと直接には関連づけられず、明色皮膚および日光浴が原因であると考えられた。他の研究とは逆に、女性の航空機乗務員について乳がんの増加は認められなかったが、男性の航空機乗務員において前立腺がんによる死亡率の増加が観察された。一般に、放射線関連がんによる死亡率は、以前の分析において報告されたものを下回った。航空機乗務員は電離放射線だけでなく、ストレス、概日リズムの妨害やジェット燃料への曝露など、多くの潜在的リスク因子にもさらされるため、筆者はさらなる分析を推奨した。

(35) 結論として、委員会は、利用可能な疫学的データは航空機乗務員の勤務期間、対応する宇宙放射線による線量および放射線関連がんの過剰リスクの間に明確な関連性が見られないと認識している。電離放射線だけでなくさまざまな潜在的リスク因子も考慮に入れたさらなる評価が必要である。

3 乗客および航空機乗務員の場合の ICRP 防護体系

(36) ICRP による人の放射線防護体系は、*Publication 103* (ICRP, 2007) に述べられている。第 (44) 項によれば、それは「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」。特に、第 (45) 項によれば、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。

(37) *Publication 103* (ICRP, 2007) の哲学は、最適化プロセスを適切な線量制限（線量規準）より下に保つことを中心的な考慮事項として、あらゆるタイプの被ばく状況に対する一貫したアプローチを勧告することである。

3.1 被ばく状況のタイプおよび被ばくのカテゴリー

3.1.1 被ばく状況のタイプ

(38) 委員会は被ばく状況を、自然または人工の放射線源に始まり、さまざまな経路を通じて放射線または放射性物質が移動し、結果として生じる個人の被ばくのネットワークとして定義している [Publication 103 (ICRP, 2007) の第 (169) 項]。防護は、線源または被ばく経路上の点において措置をとることにより、そして時には被ばくした個人の位置、被ばく時間および防護を変更することにより達成できる。便宜上、環境の経路は通常被ばくの線源と個人が受ける線量との結び付きを含むとする。

(39) *Publication 103* (ICRP, 2007) の第 (176) 項によれば、委員会は、その勧告が、すべての考えうる事情を扱う次の 3 つのタイプの被ばく状況においてすべての線源に対して適用されるよう意図している。

- 現存被ばく状況とは、結果として生じる被ばくを管理する決定が行われる時点においてすでに存在する線源に起因する被ばく状況である。その管理にあたっては、被ばくの特徴づけが前提条件となる。
- 計画被ばく状況とは、線源の意図的な導入と運用の結果として生じる状況である。計画被ばく状況は、予期することおよび完全に管理することが可能である。
- 緊急時被ばく状況とは、計画された状況を運用する間に線源の制御喪失の場合において生じる状況、もしくは制御されていない線源に関係するあらゆる予想外の事象により生じる状況である。望ましくない被ばくを回避または低減するために、至急の対策が必要である。

(40) 委員会は、航空飛行時の人の宇宙放射線被ばくを現存被ばく状況とみなしている。線源はすでに存在しており、それと関連して被ばくを制御するために防護に関するあらゆる決定が行われる。放射線源からの経路は、外宇宙、大気、そして航空機の構造および中身であり、

被ばくする個人は航空機乗務員および乗客である。被ばくを制御するための措置は、被ばくする個人の被ばく条件を変更することによってのみ実施することができる。委員会は、GLE は、大規模なものでさえ、飛行環境におけるそれらの存在がまれであることならびに航空機乗務員および乗客の被ばくに対する寄与が結果的に小さいことを考慮して、現存被ばく状況の一部であると考えている（19 および 20 項を参照）。

(41) 委員会は、防護体系の見地から重要な因子は、防護を最適化するとともに特定の被ばく事情において個人のために合理的かつ有効な防護対策を講じる機会であると指摘する。委員会は、多くの因子が航空飛行の安全に影響を及ぼすことを、また、航空機乗務員は一般的な状況に絶えず順応していることを認識している。事象を予測すること、航空機乗務員に対する情報提供を増進すること、そして適切な防護対策を講じることが合理的かつ可能になるのに従って、将来のいずれかの時点においてということであれば、委員会は、当局および操業管理者が最適化の反復プロセスの一環としてしかるべく対応することを期待するだろう。

3.1.2 被ばくのカテゴリー

(42) 委員会は 3 つの被ばくカテゴリー、すなわち、職業被ばく、公衆被ばくおよび医療被ばくを区別している。職業被ばくは、作業者が自らの業務の結果として受ける放射線被ばくである。しかし、放射線の遍在ゆえに、委員会は従来から「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る状況の結果として作業場で受ける放射線被ばくに限定している。医療被ばくは、医学的診断または治療の過程における患者の被ばくである。公衆被ばくは、職業被ばくおよび患者の医療被ばく以外のあらゆる被ばくを包含する。

(43) 航空飛行時、宇宙放射線に被ばくする集団には低頻度旅客、私的な理由または職務のための高頻度旅客および航空機乗務員が含まれる。委員会は、低頻度旅客および高頻度旅客の被ばくは公衆被ばくであり、航空機乗務員の被ばくは職業被ばくであるという見解を維持している（ICRP, 1991, 1997, 2007）。しかし、委員会は現在、それぞれのグループについて予想される被ばくのレベルおよび考慮されることが必要な責任を考慮に入れて、これら 3 グループの防護のための等級別アプローチを提案している（4.2 節）。

3.2 防護戦略の正当化

(44) 正当化の原則は、あらゆる被ばく状況に適用される 2 つの基本的な線源関連原則の 1 つである。*Publication 103* (ICRP, 2007) の第 (203) 項は、正当化の原則によって、放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も、害より便益を大きくすべきであると要求している。委員会は引き続き、現存被ばく状況の場合、正当化の原則は、被ばくを低減するとともにさらなる追加被ばくを回避するために対策を講じる

べきかどうかについて決定する際に適用されることを強調する。いかなる決定も、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であるという意味において正当化されるべきである。これらの事情により、*Publication 103* の第 (207) 項に述べられているように、正当化の原則は、航空飛行時においては、宇宙放射線被ばくに対する防護戦略を実施すべきかどうかについて決定する際に適用される。

(45) 状況の特徴づけの後、正当化を判断する責任は通常、最も広義では社会の、したがって必ずしも各個人のものではない全体的な便益が結果として生じることを確実にするために、政府または国の他の当局にある。しかし、正当化の決定への入力情報には、ユーザーもしくは政府または国の当局以外の他の組織や人物によって知らされうるであろう側面が多く含まれるかもしれない。こうした事情から、放射線防護に関する考慮は、より広範な決定プロセスへの入力情報として役立つことになる。

(46) 航空機における被ばくを制御する可能性は限られているとはいえ（4.1 節）、委員会は、それが平均個人実効線量と平均集団実効線量のいずれの点からも最も職業被ばくを受ける集団の 1 つである（2.5 節）ことを考慮して、特に航空機乗務員については防護戦略の実施が正当化されると考えている。

3.3 防護の最適化

(47) 防護戦略の実施の正当化について決定が行われると、防護の最適化が、被ばくする個人を防護するための最も有効な対策を選択することを推進する原則となる。

(48) 最適化はあらゆる被ばく状況に適用される第 2 の原則であり、ICRP の放射線防護体系にとって極めて重要である。これは委員会によって、経済的および社会的因子を考慮に入れて、個人線量の大きさ、被ばくする人の数および被ばくを受ける尤度を合理的に達成可能な限り、適切な個人線量規準よりも低く保つためのプロセスと定義されている。これは、防護のレベルは一般的な事情の下で最善のものとするべきであることを意味する。個人線量分布における重大な不公平を回避するために、委員会は最適化プロセスにおける個人線量規準の利用を勧告する [*Publication 103* (ICRP, 2007) の第 (226) 項]。

3.3.1 参考レベル

(49) 現存被ばく状況においては、参考レベルは、それより上では被ばくの発生を許すことを計画するのは不適切であると判断され、したがってそれに対して防護対策が計画され最適化されるべきである線量を表す。参考レベルは、経済的および社会的因子を考慮に入れて個人線量を合理的に達成可能な限り低く保つための、またそのようにして線量分布における不公平を防止および低減するための、最適化プロセスにお

ける防護対策の選択指針である。したがって、参考レベルは、防護対策について適宜的に判断可能にするための指標でもある。
(50) 現存被ばく状況の場合、委員会は、 <i>Publication 103</i> (ICRP, 2007) の表 5 に示されている 1~20 mSv year ⁻¹ のバンド内に参考レベルを定めるよう勧告する。このバンドにおいては、線源または経路は一般に制御可能であり、個人は必ずしも被ばくそれ自体からではなく、被ばく状況と関連する活動から直接の便益を受ける。航空飛行時には、乗客は航空飛行から直接の便益を受ける（すなわち、快適かつ安全に迅速に移動すること）。他の職業電離放射線被ばくの状況と同様に、航空機乗務員は自身の雇用から直接の便益を受ける。
(51) 特定の被ばく状況の場合、委員会は、参考レベルの値が一般的な事情に基づいて選択されるよう勧告する [<i>Publication 103</i> (ICRP, 2007) の第 (234) 項]。この選択は、特に注意を払って最適化プロセスに有意義に寄与するような被ばくを特定することを目的として個人線量分布を考慮するものとすべきである。航空飛行時の宇宙放射線に対する防護の場合、委員会は、5~10 mSv year ⁻¹ の範囲の参考レベルが一般に選択されるよう勧告する。
(52) 選択された参考値は線量限度ではなく、経済的および社会的因子を考慮に入れて被ばくが合理的に可能な限りそれ未満に保たれるおよび低減されるべきである線量のレベルを表す。個人線量限度の適用の原則は、計画被ばく状況においてのみ適用される [<i>Publication 103</i> (ICRP, 2007) の第 (203) 項]。それでもなお、規制機関によっては、法的に拘束力のある値を課すための手順として、航空機乗務員に対する職業被ばく線量限度を導入することを決定するかもしれない。

3.3.2 最適化プロセス
(53) 実際には、現存被ばく状況における防護の最適化は、(i) 被ばく状況の評価；(ii) 経済的および社会的因子を考慮に入れて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考えうる防護オプションの特定；(iii) 一般的な事情の下で最も適切な防護オプションの選択および履行；そして(iv) 是正措置の必要はあるのかどうか、もしくは防護を進捗する新たな機会は出現しているのかどうかを評価するための被ばく状況の定期レビュー、を伴うプロセスを通じて履行される。この反復プロセスにおいては、委員会は、個人被ばくの分布における公平の追求（すなわち、同様の事情の下で被ばくするグループにおける平均をはるかに上回る被ばくを一部の個人が受けるかもしれない可能性を制限するという目標）ならびに放射線防護文化の増進が重要な側面であると考えている (ICRP, 2006)。防護を最適化する際、委員会は、「ステークホルダーの視点や懸念を考慮する必要」も勧告する (ICRP, 2007)。
(54) 実際に最適化の原則を適用する方法に関する委員会の詳細な助言は以前に提供されており (ICRP, 1984, 1991, 2006)、引き続き妥当である。

4 ICRP の防護体系の履行
4.1 防護対策
(55) 航空飛行時の被ばくを制御するための潜在的な防護対策のレビューは、うまく立ち回る余地はほとんどないことを示している。 <i>Publication 75</i> (ICRP, 1997) の中で、委員会は、「(宇宙放射線) 被ばくの制御は、おもに飛行時間と航空路選択の制限によって確保される」と指摘した。実際に、航空機（胴体）の遮蔽は実行可能なオプションではない。たとえば、12,000 m において 20% の線量率低減を達成するには、30 g cm ⁻² の遮蔽が必要である。飛行時間の制限および航空路選択でさえ、実施するのは難しい対策である。
<ul style="list-style-type: none"> • 飛行時間の制限。線量は飛行時間に左右されるため、航空機乗務員の勤務計画は空中にいる時間を制限する手段である。しかし、航空機乗務員の飛行時間を制限することは被ばくする人の数を増加させるし、その大規模な実施は社会的および経済的問題を引き起こすかもしれない。 • 航空路選択。航空路を選択し高度および緯度の問題に取り組むことによって被ばくを制限することは考えられる。 <ul style="list-style-type: none"> ○ 高度。2.2 節に述べたように、地球の大気層は典型的な航空飛行高度においては宇宙放射線からのかなりの遮蔽をもたらす。航空飛行高度による最適化は、天候条件や航空交通などの因子を考慮に入れる微調整の問題であるが、コストの問題でもある。たとえば、航空飛行高度を 1300 m 下げると線量を 30% 低減しようと推定されている。しかし、この高度変更は事故のリスクを増大させ、燃料消費およびコストも 5% 増加させる (Blettner et al., 2014)。 ○ 緯度。同じく 2.2 節に述べたように、地球の磁場はさもなくば地上に達するであろう多くの宇宙放射線粒子を偏向させるが、この効果は赤道において最も有効であり、緯度が高くなると低下する。しかし、緯度による最適化、特に極圏飛行の航空路変更は、飛行距離、時間およびコストを増加させる。
(56) GLE の間の被ばくに関しては、飛行している航空機の高度を下げることもおよび、まだ離陸していない飛行を遅らせることが考えられるだろう。これらの対策の実施は非常に複雑な情報システムを必要とし、これは今のところ、技術上および組織上の考慮事項を考えると開発がなお困難である。これらの対策は、すでに過密にスケジュールされている航空交通を混乱させ、事故の可能性を増大させることもありうる。
(57) 航空飛行時の被ばくを制御するための現在のオプションを考慮して、委員会は引き続き、航空飛行時の被ばくを制御するための主たる対策は、最も被ばくする個人の飛行スケジュールを飛行時間および航空路選択の考慮による調整であると強調する。航空飛行時の防護については、委員会はここで、個人がその飛行頻度によって受けると思われる被ばくのレベルに従った等級別アプローチを勧告する。

4.2 等級別アプローチ

(58) 航空飛行時の宇宙放射線からの防護のための重要な考慮事項は、航空機旅行を必要とする事情、個人が被ばくするかもしれない頻度、そして問題となる責任である。これに関しては、私的な理由のためもしくは自身の操業管理者の要請により自身の業務との関連で航空飛行する人を区別することが重要である。

(59) 大多数の人の場合、航空輸送機関の利用は低頻度のイベントであり、宇宙放射線による線量は極めて低い（低頻度旅客）。私的にまたは自身の業務の過程においてのいずれかによって航空機を高頻度で利用する少数の乗客の場合、線量は高くなる（高頻度旅客）。この少数の乗客の場合、単純なアプローチで、これらの個人が自身の被ばくを評価し理解する機会を持つことを可能にできる。より大きな線量を一般的に受ける航空機乗務員の場合、あらゆる個人線量の定期モニタリングならびに、線量が操業管理者によって採用された参考レベルに近づきつつある個人に係る飛行勤務表の変更に基づく、防護の適切な管理が必要である。

4.2.1 低頻度旅客

(60) 委員会は、低頻度旅客が受ける宇宙放射線による線量は十分に低いため、防護措置の導入を正当化する必要はないという見解である。

(61) しかし、透明性のためおよび「知る権利」の原則を適用するために、委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をあらゆる乗客が入手できるようにするよう勧告するとともに、国の当局、航空会社、消費者団体および旅行代理店が航空飛行と関連する宇宙放射線に関する一般的事項の情報を積極的に発信するよう奨励する。たとえば、この情報は航空会社のウェブサイトに掲載することができるだろう。これらのウェブサイトは、航空飛行による線量を推定する無料のかつ妥当性が確認された計算ツールを人々に認識させることができるだろう。附属書 A は、さまざまな典型的な国際航空路の推定実効線量を示している。

4.2.2 私的な理由または職務のための高頻度旅客

(62) 個人のグループがその私的な必要のためまたは便宜上、航空機を頻繁に利用する場合がある。また、自身の操業管理者の要請によって頻繁に飛行する個人もいるかもしれない。ほとんどの高頻度旅客は、航空機乗務員と同じ事情の下で宇宙放射線に被ばくするのではない（たとえば、被ばく、飛行頻度や選択権の程度の点で）。したがって、委員会は、高頻度旅客の被ばくは公衆被ばくとみなされるよう（43 項を参照）、また、被ばくする個人は、低頻度旅客と同じように扱われるよう勧告する。委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をこれら

の個人が入手できるようにするよう勧告する。

(63) さらに、委員会は、自身の被ばくについて懸念するかもしれない高頻度旅客が、自身の被ばくについて承知し、その必要を感じた場合に飛行頻度を適合させるために、無料で利用可能な線量計算ツールを用いて自身の個人被ばくを評価するよう奨励する。

(64) 職務のための高頻度旅客のうち、ごく一部は、航空機乗務員の被ばくに匹敵する被ばく量になるような状況下で被ばくする。これはたとえば、文書および資材を輸送する配達人や航空保安官の場合にそうかもしれない。委員会は、これらの高頻度旅客の被ばくが航空機乗務員の場合に適用される要件と同様の方法で管理されるよう勧告する。問題となる職業の網羅的なリストを提示することは委員会の意図ではなく、これらの高頻度旅客を職業被ばくとみなす決定は、一般的な事情に従ってケースバイケースで行われるべきである。これは、個人が自身の被ばくを評価し、しかるべき場合にはこの情報を用いて自身の雇用主を対話に引き込むことになるかもしれない。決定は、関係するあらゆるステークホルダーが関与するプロセスの結果として生じるものとすべきである。

4.2.3 航空機乗務員

(65) 委員会は、航空会社の管理者が、特別教育プログラムまたは訓練セッションを通じて、関係する航空機乗務員に放射線および宇宙放射線被ばくについて知らせるよう勧告する。情報は安全会議において乗務員に提供することもできると思われ、他の安全問題と調和するように重視されるべきである。

(66) 職業被ばくを受ける作業員に関する限りでは、委員会は、航空機乗務員メンバーそれぞれの年実効線量が評価されるよう勧告する。年実効線量は、専用のコンピュータコードを用いて、職員勤務表および典型的な実効線量率から導き出すことができる。委員会は、線量計算の精度確認および検証のために、合意された規格に従った機内周辺モニタリングの随時の利用を勧告する（ICRU, 2010）。委員会は、GLE の寄与が個人の累積被ばくとの関連において、リアルタイム警報システムのような特定のモニタリングシステムに値するとは考えていない。しかし、委員会は、合理的に達成可能な場合は常に、GLE による線量が適度的に推定され、影響を受けた航空機乗務員の年被ばくに加算されるよう勧告する。委員会は、国際規則には 15,000 m 超で稼働する航空機のためのモニタリング機器に関する仕様が含まれていることも指摘する（ICAO, 2010）。

(67) 委員会はまた、航空機乗務員の線量が記録されることならびに、年間および累積個人線量を当該個人が請求次第入手できるようにすることも勧告する。潜在的な疫学的調査を容易にするために、この情報は少なくとも当該個人の平均余命に匹敵する合理的な期間にわたって保存されるべきである（ICRP, 1997）。

- (68) 航空機乗務員は、放射線安全以外の理由で定期的健康診断を受ける。委員会は、宇宙放射線被ばくによる線量は特定の追加的な健康診断を必要とするものではないと考えている。一般に、定期的健康診断は、宇宙放射線被ばくというテーマに関する作業者と医師の間の対話に取り組む機会である。
- (69) 適切と判断されかつ選択された線量参考レベルを尊重する目的の場合には、操業管理者は関係する個人の勤務表を調整するかもしれない（頻度および／または行先）。

4.2.4 要約

(70) 表 4.1 は、個人の宇宙放射線被ばくに関する委員会の勧告を列挙したものである。

- 4.3 胚および胎児の防護**
- (71) *Publication 82* (ICRP, 1999) の中で、委員会は、現存被ばく状況の場合における出生前の被ばくは一般集団の場合の対策以外の防護対策を必要とするものではないと結論づけた。したがって、委員会は、妊娠した女性の飛行勤務表を調整するための対策が必要になるとは考えていない。頻りに飛行し、妊娠しているかもしれないもしくは妊娠していることが見込まれる女性は、飛行勤務表に関する、情報に基づく判断および、検討することを望むかもしれないいかなる調整を行うのにも十分な情報が提供されるべきである。
- (72) 職業被ばくを受ける航空機乗務員については、妊娠した女性の場合の作業場における防護の方法は、公衆の構成員に提供されているものとほぼ同様のレベルの、電離放射線からの胚／胎児の防護を提供すべきである、というのが委員会の勧告である。*Publication 103* (ICRP, 2007) の第 (186) 項の中で、委員会は、「いったん雇用主が妊娠の届け出を受ければ、胚／胎児の追加の防護が考慮されるべきである。妊娠の申告の後、妊娠作業者の作業条件は、妊娠の残りの期間中の胚／胎児の追加線量がおおよそ 1 mSv を超えないことを確実にするようにすべきである」と勧告した。
- (73) 一般に、女性作業者は妊娠をできる限り早急にその雇用主に知らせることが奨励される。国によっては、この決定は個人の任意の問題である。これらの違いにかかわらず、妊娠した乗務員は妊娠を申告する前に 1 mSv 超を受けるかもしれない。妊娠の適時の申告を奨励するために、委員会は、女性の航空機乗務員および高頻度旅客が宇宙放射線被ばくによる胚／胎児に対するリスクについて知らされるよう勧告する。申告後、妊娠の残りの期間中に規定が作成されるべきである。

- 4.4 公衆への情報発信およびステークホルダーの関与**
- (74) 経験のある科学者、専門家および放射線防護に関する訓練を受けた専門職を除いて、市民は通常、電離放射線およびその潜在的な健康影響について知らされていない。宇宙放射線被ばくの問題については、航空機乗務員の大部分を除くと、地上での日々の生活において、また、航空機で旅行する際は高められたレベルで、絶えず宇宙放射線にさらされているとはいえ、この被ばくを気にしている人は公衆の中にはほとんどいない。しかし、近年、宇宙および気象機関によって積極的に発信されメディアによって中継される、宇宙現象、特に太陽フレアに関する情報は増えており、時には航空会社の警戒態勢を引き起こしている。この情報は、一部の乗客の宇宙放射線に対する注意を呼び起こしているが、宇宙放射線被ばくと関連するリスクについて高頻度旅客および航空機乗務員の間に疑問や時には懸念も引き起こしている。
- (75) 人は自身の日常生活においてさらされているかもしれない潜在的なリスクについて知らされる権利があるとすると「知る権利」の原則ならびに根底にある自律、公正および慎重という倫理的価値観に従って、委員会は、国の当局、航空会社、消費者団体および旅行代理店が航空飛行と関連する宇宙放射線に関する一般的事項の情報を積極的に発信するよう奨励する。この情報は容易に入手できるものでなければならず、宇宙放射線の起源；高度、緯度および太陽活動周期の影響を示すとともに、一連の伝統的な航空路と関連する典型的な線量および、まれではあるが強烈な GLE の場合に予想外の被ばくを受ける可能性を指摘するものとすべきである。
- (76) 2.4 節および 4.2 節に述べたように、近年、容易に使えツールがインターネット上でいくつか利用可能になっている。これらのツールは、あらゆるフライトについて線量計算を行うことを可能にしている。
- (77) 委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報は、メッセージが正確であり、有益であり、状況に応じて放射線防護に関わる懸念および問題の性質に対処できるものとするよう勧告する。委員会は、個人が情報に基づく決定を行うことができるようにあらゆるリスクのより包括的な見方を促進するために、宇宙放射線は他のリスクまたは懸案事項と釣り合うように考察されるべきであると提言する。
- (78) この見地から、自然および人工放射線源への他の被ばく状況との比較は有益かもしれず（たとえば、ロンドンからニューヨークへの航空飛行は高山地域で 10 日間の休日を過ごすのと同じ実効線量をもたらす）、宇宙放射線に関する一般的事項の情報の一部として入手できるようにすべきである。しかし、そのような比較は注意して行わなければならない。リスクの認知および許容性は主として、状況の特性、特に状況が個人的な決定であるとみなされる度合い、そして被ばくにつながる活動の、個人にとっての便益に左右されるためである。
- (79) 委員会は、航空飛行時の宇宙放射線に対する防護に関して、職業被ばくを受けるのではない乗客は自身の選択に引き続き責任を負わなければならないが、これらの選択は予断なしに関連情報に基づいて承知の上で行われるべきであるとと考えている。飛行頻度を減らす個人の決定は個人的な考慮に基づくことになるが、それらの考慮において宇宙放射線被ばくのリスクは他の多くの要素の間にある 1 つの要素に過ぎない

い。最後に、正確な情報に基づいてリスクの許容性を判断し、自らの防護のために決定を行うのは、そのリスクをとる個人の責任である。

5 結論

(80) 地球は、深宇宙および太陽からの粒子によって絶えず曝射されている。大気および地球の磁場は十分な遮蔽をもたらすため、地上における被ばくは特に重要ではないが、宇宙放射線被ばくは高度とともに増大する。この現存被ばく状況は、何百万もの旅行者、すなわち、私的な理由または自身の職務管理上の要請に因る乗客ならびに最も高い被ばくを受ける職業集団に属する航空機乗務員が経験している。

(81) 委員会は、低頻度の航空飛行は地上における自然バックグラウンド放射線によって 1 年に受ける線量のごくわずかな増分に寄与するに過ぎないことを指摘するとともに、防護措置の導入を正当化しない。一部の乗客は、私的な理由および極めて異なる理由から、宇宙放射線被ばくについて懸念するかもしれないことが認識されている。したがって、委員会は、それらの乗客が情報に基づく決定を行うことを可能にするために、関連情報を積極的に発信することを勧告する。

(82) 私的な理由または職務のための高頻度旅客については、委員会は同様に関連情報の積極的発信を勧告することに加え、個人が飛行頻度の調整をしかるべく考慮するために自身の被ばくの自主的評価の機会を利用するよう勧告する。航空機乗務員と同様の滞空時間を蓄積する、職務のための高頻度旅客の特定のグループについては、委員会は、それらのグループが航空機乗務員の場合と同様の要件を用いて被ばくを管理するために自身の組織との話し合いに取り組むよう勧告する。

(83) 航空機乗務員の防護については、委員会は以前の勧告を維持するとともに、操業管理者によって選択されるべき参考レベルの利用を導入する。5~10 mSv year⁻¹ の範囲の値が一般に適切である。選択される特定のレベルは、その値が最適化プロセスに有意義に寄与できるように、一般的な事情を考慮に入れるものとすべきである。宇宙放射線による被ばくを低減するための利用可能なオプションは極めて限られる。最も有効なオプションは、線量が選択された参考レベルに近づきつつある時における飛行勤務表の調整である。

(84) 上記の勧告をもって、委員会は、最も被ばくする個人—航空機乗務員および一部の高頻度旅客の線量を、合理的に達成可能な限り、選択された参考レベルよりも低く保つことを期待している。委員会はまた、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対する総合的な意識を高めることによって、ステークホルダー間においてより多くの情報に基づく対話が行われようと予想している。関係するステークホルダー—低頻度旅客、高頻度旅客および航空機乗務員—はすべて、航空飛行と関連する被ばくに関して情報に基づく決定を行うことを、さらに、航空機旅行から受けるあらゆる便益を考慮することを奨励される。

巻末の参考文献

- Andresz, S., Crou`ail, P., 2015. Results of the EAN request on the radiological protection of aircrew. European ALARA Newsletter n. 36. Available at: www.eu-alara.net (last accessed 14 May 2016).
- Battistoni, G., Ferrari, M., Pelliccioni, M., Villari, R., 2005. Evaluation of the dose to aircrew members taking into consideration aircraft structure. *Adv. Space Res.* 36, 1645–1652.
- Beck, P., Bartlett, D.T., Bilski, P., et al., 2008. Validation of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* 131, 51–58.
- Blettner, M., Boehm, T., Bottollier-Depois, J-F., et al., 2014a. Strahlenexposition beim Fliegen – Ein Fall fu`r den Strahlenschutz, *Strahlenschutz Praxis*, Heft 2, 3–30. TU`V Media GmbH, Ko`ln.
- Bottollier-Depois, J.F., Blanchard, P., Clairand, I., et al., 2007. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the SIEVERT system. *Radiat. Prot. Dosim.* 125, 421–424.
- Desmaris, G., 2006. Is space weather forecast worthwhile for an airline in terms of radiation protection? *Proceedings of the 54th International Congress of the International Academy of Aviation and Space Medicine*, 2006, Bangalore, India.
- Desmaris, G., 2016. Cosmic radiation in aviation: radiological protection of Air France aircraft crew. *Ann. ICRP* 45(1S), 64–74.
- Dwyer, J., Smith, D., Cummer, S., 2012. High energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena. *Space Sci. Rev.* 133, 133–196.

- EC, 2004. Radiation Protection 140, Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew –Compilation of Measured and Calculated Data. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS), Braunschweig.
- EURADOS, 2012. EURADOS Report 2012–03. Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic Cosmic Radiation. European Radiation Dosimetry Group, Braunschweig. Available at: http://www.eurados.org/_media/Files/Eurados/documents/EURADOS_Report_201203.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Spiesl, J., Stegemann, R., 2011. Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004 –2009. BfS-SG-15/11. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, p. 42. Available at: https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201108016029/3/Bf_2011_BfS-SG-15-11-ExpositionFlugPersonal.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Stegemann, R., 2014. Radiation exposure of German aircraft crews under the impact of solar cycle 23 and airline business factors. *Health Phys.* 107, 542–554.
- Hammer, G.P., Auvinen, A., De Stravola, B.L., et al., 2014. Mortality from cancer and other causes in commercial airlines crews: a joint analysis of cohorts from 10 countries. *Occup. Environ. Med.* 71, 313–322.
- Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* 13, 1084–1091.
- ICAO, 2010. Annex 6, Operation of Aircraft, Part I, International Commercial Air Transport – Aeroplanes, ninth edition. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- ICAO, 2015. Air Navigation Report, International Civil Aviation Organization, 2015 Edition, Montreal.
- ICRP, 1965. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1984. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14(1).
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
- 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 101b. 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, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection in security screening. ICRP Publication 125. Ann. ICRP 43(2).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic radiation exposure of aircraft crew. Report 84. *J. ICRU* 10(2).
- IRSN, 2016. SIEVERT version 2.2.4. Fontenay-aux-Roses, France. Available at: <https://www.sievert-system.org/?locale=en#Rayonnement> (last accessed 14 May 2016).
- ISO, 2011. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 2: Characterization of Instrument Response. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2012. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 1: Conceptual Basis for Measurements. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2013. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 3: Measurements at Aviation Altitude. International Organization for Standardization, Geneva.
- Lantos, P., Fuller, N., 2003. History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using semi-empirical model and Concorde measurements. *Radiat. Prot. Dosim.* 104, 199–210.
- NCRP, 2009. Ionising Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Rafnsson, V., 2005. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots. *Arch. Ophthalmol.* 123, 1102–1105.
- Reynolds, P., Cone, J., Layefsky, M., et al., 2002. Cancer incidence in Californian flight attendants. *Cancer Causes Control.* 13, 317–324.
- Schubauer-Berigan, M.K., Anderson, J.L., Hein, M.J., et al., 2015. Breast cancer incidence in a cohort of U.S. flight attendants. *Am. J. Ind. Med.* 58, 252–266.
- The New York Times, 1924. Lindbergh Does It! To Paris in 33 1/2 Hours; Flies 1,000 Miles Through Snow and Sleet; Cheering French Carry Him Off Field. 21 May 1924. The New York Times, New York. Available at:

- <http://www.nytimes.com/learning/general/onthisday/big/0521.html> (last accessed 14 May 2016).
- UNSCEAR 2006. Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, Volume 1, Annex A: Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, Annex B: Exposures from Natural Radiation Source. United Nations, New York.
- Van Dijk, J.W., 2003. Dose assessment of aircraft crew in the Netherlands. *Radiat. Prot. Dosim.* 106, 25–31.
- Yasuda, H., Sato, T., Yonehara, H., et al., 2011. Management of cosmic radiation exposure for aircrew in Japan. *Radiat. Prot. Dosim.* 146, 123–125.
- Zeeb, H., Hammer, G.P., Blettner, M., 2012. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *J. Radiol. Prot.* 32, 15–19.

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication 130 翻訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。ドラフトからの引用を禁ず 【事務局】

ゲスト論説

放射線被ばくによる線量

よくある質問は、放射線防護分野の人々は国際放射線防護委員会の 2007 年勧告 (ICRP, 2007) と関連する改訂された線量係数をなぜそれほど長く待ち続けなければならないのか、というものである。以前の勧告によって、改訂された放射線加重係数及び組織加重係数が導入され、あらゆる等価線量係数及び実効線量係数の再計算が必要となった。加重係数が唯一の変更であれば、改訂された線量係数を提示することは比較的容易な課題だったであろう。しかし、2007 年勧告では、医学画像データに基づく標準解剖学的モデルの利用に関する要件によって、かなりのさらなる複雑さが導入された。人体臓器とそれらの位置を様式化した数学的な表現を用いることから標準男性及び標準女性モデルの利用への変更は、モデルを構築してあらゆる放射線のタイプについて放射線輸送計算を行うための多大な作業プログラムが必要だった。成人モデルは *Publication 110* (ICRP, 2009) の中で発表されており、執筆時点においては、最終的な放射線輸送計算の完成が予期されている。特定の年齢の子供ならびに胎児及び妊婦に対応するモデルは開発中である。

第 2 専門委員会とその課題グループは、多数のさらなる改善を行うよう努めることによって、かなりの作業量を追加してきた。その第一は核崩壊データの更新であり、*Publication 107* (ICRP, 2008) の中で発表された。第二に、吸入又は経口摂取された放射性核種に対応する線量係数の計算において用いられるあらゆる体内動態モデルが見直されており、多くの場合、更新されている。本報告書では、ヒト呼吸気道モデルに加えらる変更、ヒト消化管モデルの利用、そして血液中に吸収される放射性核種に対応する全身モデルを特定するためのアプローチについて述べる。第三に、放射性核種の職業上の摂取に関する本報告書シリーズでは、過去に行われてきたように個別ではなく、線量係数と測定解釈のためのバイオアッセイデータを合わせて提供することが決定された。

この分野における第 2 専門委員会の作業は、科学的にも技術的にも革新的であって骨の折れるものである。この ICRP の作業に貢献する専門家は世界中に少数おり、本コミュニティは、特定の追加資金援助なしに貢献をいとわないこれらの専門家から恩恵を受けている。しかし、適切な能力が維持されることを保証するために、できれば、財政支援及び研修を提供し、調整する必要を国の当局が認識することが重要である。限られた資源が最も有効に利用されることを保証するために、入念な計画が必要とされることになる。

おそらく、ICRP の線量係数を計算するために用いられる体内動態・線量評価用モデルの複雑さのレベルは、加重係数を用いるとともに性別の平均化を伴う等価線量及び実効線量の計算において固有の単純化及び概数化を考えると、放射線防護の目的のために必要とされるものを上

回る。放射線防護の目的ではより単純なモデルで十分かもしれないが、ICRP のモデルは、等価線量及び実効線量を計算するための利用に加えて、科学的な目的のために臓器及び組織の吸収線量を計算するための利用にも用いられる。生み出された体内動態モデルは、毒物学、薬理学や医学など、他の多くの分野において用いることが可能である。また、モデルが適切な防護を確保するのに十分なほど信頼できるものであることを保証するのも重要である。

現在、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) は、選ばれた内部放出体の生物学的影響を再検討しているところである。これは以前、同委員会が詳細には扱ってこなかったテーマである。トリチウム及びウラン同位体に関するデータの調査が進行中であり、他のデータがこれに続くかもしれない。いずれの場合にも、考察には、ICRP のモデルは利用可能な科学的データを適切に考慮したかどうかが含まれることになる。この報告書は、内部放出体に起因するリスクは、モデル化された臓器・組織の線量と外部被ばくについて導き出された確率的なリスク推定値を用いて適切に評価されるのかどうかという全般的な問題も扱うことになる。ICRP は、第 1 及び第 2 専門委員会の現行作業の補完として、UNSCEAR のこのイニシアティブを歓迎している。

「放射性核種の職業上の摂取」シリーズの第 1 部として、本報告書では、体内動態及び線量評価用方法論の説明ならびに、バイオアッセイデータの利用について提示する。以後の第 2～5 部は、元素固有の体内動態モデルを説明する元素毎の項からなり、線量係数及びバイオアッセイデータを提示することになる。予定されている刊行物は以下のとおりである。

- 第 2 部—水素 (H)、炭素 (C)、リン (P)、硫黄 (S)、カルシウム (Ca)、鉄 (Fe)、コバルト (Co)、亜鉛 (Zn)、ストロンチウム (Sr)、イットリウム (Y)、ジルコニウム (Zr)、ニオブ (Nb)、モリブデン (Mo) 及びテクネチウム (Tc)
- 第 3 部—ルテニウム (Ru)、アンチモン (Sb)、テルル (Te)、ヨウ素 (I)、セシウム (Cs)、バリウム (Ba)、イリジウム (Ir)、鉛 (Pb)、ビスマス (Bi)、ポロニウム (Po)、ラドン (Rn)、ラジウム (Ra)、トリウム (Th) 及びウラン (U)
- 第 4 部—ランタニド及び残りのアクチニド
- 第 5 部—残りの元素

第 2 専門委員会とその課題グループの作業スケジュールには、一般公衆による放射性核種の経口摂取と吸入摂取のために、現在利用可能なあらゆる線量係数の置き換えも含まれている。この作業の多くは、委員会の今任期中 (すなわち、2017 年まで) に完了することが期待されている。関係者の専門知識と大変な努力に深く感謝する。

ICRP 第 2 専門委員会委員長

JOHN D. HARRISON

ICRP 第 2 専門委員会副委員長

FRANCOIS PAQUET

放射性核種の職業上の摂取：第 1 部

ICRP PUBLICATION 130

2012 年 11 月に委員会により承認

抄録—本報告書は、吸入摂取と経口摂取による放射性核種の職業上の摂取に対応する改訂された線量係数を提示するための、*Publication 30* 及び *68* に取って代わる報告書シリーズの最初のものである。これらの改訂された線量係数は、ヒト消化管モデル (*Publication 100*) ならびに、直近のデータを考慮に入れたヒト呼吸気道モデル (*Publication 66*) の修正版を用いて計算されている。さらに、さまざまな化学的形態の元素及びそれらの放射性同位体の吸入摂取と経口摂取による血液中への吸収に関する情報が提供される。特定のケースにおいては、これらのデータは物質別の勧告を行うのに十分なものであると判断される。血液中に吸収される放射性核種の全身性体内動態を記述するモデルの多くは修正されており、それらのモデルを、臓器と組織における取り込み及び残留ならびに排泄を生理学的にいっそう現実的に表現するものになっている。本シリーズにおける報告書では線量係数だけでなくバイオアッセイ測定値の解釈のためのデータも提示するが、それらは *Publication 54* と *78* に取って代わるものである。全身または臓器内容量や尿中排泄の測定値など、バイオアッセイデータを評価する際は、放射性核種摂取のパターン及び様態、関係する物質の物理的・化学的特性、被ばくと測定との経過時間を含めて、被ばくシナリオについて仮定が行われなければならない。本報告書では、モニタリングプログラム及びデータ解釈についていくつかのガイダンスを提供する。

© 2015 ICRP. SAGE により発行。

キーワード：職業被ばく；内部線量評価；体内動態モデルと線量評価モデル；バイオアッセイ解釈

ICRP の代表執筆者

F. PAQUET, G. ETHERINGTON, M.R. BAILEY, R.W. LEGGETT,

J. LIPSZTEIN, W. BOLCH, K.F. ECKERMAN, J.D. HARRISON

序文

国際放射線防護委員会 (ICRP) によって勧告された放射線防護体系は、世界中の基準及び作業実施における基礎である (ICRP, 1991, 2007 ; IAEA, 1996)。ICRP 勧告の適用の基礎は、ICRP によって定義された防護量、すなわち等価線量と実効線量である。直近の 2007 年勧告 (ICRP, 2007) ではこれらの量の定義は変更されないままであるが、放射線被ばくあたりで計算される値に影響を及ぼす重要な変更が行われている。ICRP の第 2 専門委員会は、標準体内動態モデル及び線量評価モデルならびに作業員及び公衆の構成員に関する標準データを用いて計算される、内部及び外部放射線被ばくの評価のためのこれらの標準線量係数を提示する責任を負う。*Publication 103* (ICRP, 2007) 以来、第 2 専門委員会とその課題グループは、放射線被ばくのさまざまな事情に対応する新たな線量係数を提示するためのかなりの作業プログラムに取り組んできた。

Publication 103 (ICRP, 2007) は、臓器及び組織に対する等価線量の計算において用いられる放射線加重係数の変更と、実効線量の計算において用いられる組織加重係数の変更を導入するものだった。さらに、臓器線量のあらゆる計算のためにこれまで用いられてきた複合数学モデルに代わる、解剖学的標準コンピュータファントム (すなわち、医学画像データに基づく人体モデル) の採用が重要な展開だった。このプロセスは標準成人男性及び標準成人女性モデルの採用によって開始されており (ICRP, 2009)、小児ファントムの採用によって継続されることになる。*Publication 103* (ICRP, 2007) はまた、男性及び女性に対する等価線量の個別の計算ならびに実効線量の計算における性別の平均化の必要も明らかにした。線量係数のこの改訂においては、放射性核種崩壊データを更新すること (ICRP, 2008) ならびに、ICRP の人体の解剖学的標準ファントム (ICRP, 2009) を用いて放射線輸送のいっそう複雑な取り扱いを実施すること (ICRP, 2010) によって、計算を改善することも行われている。これらの改善は、内部放出体の場合だけでなく外部被ばくの場合の線量計算にも影響を及ぼす。

本報告書は、吸入摂取及び経口摂取による放射性核種の職業上の摂取に対応する改訂された線量係数を提示するための、*Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) 及び *Publication 68* (ICRP, 1994b) に取って代わる報告書シリーズの最初のものである。これらの改訂された線量係数は、ヒト消化管モデル (ICRP, 2006) 及び直近のデータを考慮に入れたヒト呼吸気道モデル (ICRP, 1994a) の修正版を用いて計算されている。さらに、さまざまな化学的形態の元素及びそれらの放射性同位体の吸入摂取及び経口摂取に続く血液中への吸収に関する情報が提供される。特定のケースにおいては、これらのデータは物質固有の勧告を行うのに十分なものであると判断される。血液中に吸収される放射性核種の全身性体内動態を記述するモデルの多くは修正されており、それらのモデルを、臓器及び組織における取り込み及び残留ならびに排泄を生理学的にいっそう現実的に表現するものになっている。

本シリーズにおける報告書では線量係数だけでなくバイオアッセイ測定値の解釈のためのデータも提示し、それらは *Publication 54* 及び *78* (ICRP, 1988a, 1997b) に取って代わるものである。全身または臓器内容量や尿中排泄の測定値など、バイオアッセイデータを評価する際は、放射線核種摂取のパターン及び様態、関係する物質の物理的・化学的特性や、被ばくと測定との経過時間を含めて、被ばくシナリオについて仮定が行われなければならない。本報告書では、モニタリングプログラム及びデータ解釈についていくつかのガイダンスを提供する。

シリーズ最初の本報告書は、この報告書シリーズの結論を示すとともに、職業被ばくの管理、体内動態モデル及び線量評価モデル、モニタリング方法、モニタリングプログラム、そして適及的な線量評価に関する各章を含むものである。以後の報告書では、体内動態データ及び体内動態モデル、線量係数、そしてバイオアッセイ解釈のためのデータを含めて、個々の元素及びそれらの放射性同位体に関するデータを提示する。本報告書シリーズに付随する電子付属文書では、広範な追加情報を提供する。

本報告書の完成時点における内部被ばく線量評価に関する課題グループ (INDOS) のメンバーは、以下のとおりだった。

F. Paquet (議長)	G. Etherington	J. Lipsztein
E. Ansoborlo	A. Giussani	D. Melo
M.R. Bailey	R.A. Guilmette	
E. Blanchardon	J.D. Harrison	
H. Doerfel	R.W. Leggett	

通信メンバーは以下のとおりだった。

A. Bouville	A. Luciani	D. Whillans
C-M. Castellani	D. Newton	
R. Cruz-Suarez	D. Nosske	
C. Hurtgen	D.M. Taylor	

本報告書の完成時点における線量計算に関する課題グループ (DOCAL) のメンバーは、以下のとおりだった。

W.E. Bolch (議長)	T.P. Fell	M. Pelliccioni
V. Berkovski	N.E. Hertel	N. Petoussi-Henss
L. Bertelli	J.G.S. Hunt	M. Zankl

K.F. Eckerman	N. Ishigure
A. Endo	D. Nofke

通信メンバーは以下のとおりだった。

A. Birchall	C. Lee	R. Tanner
G. Gualdrini	H. Schlattl	X.G. Xu
D. Jokisch	M. Stabin	

主委員会の批評的レビュー者は以下のとおりだった。

J.K. Lee	H-G. Menzel
----------	-------------

筆者らは、V. Berkovski, D. Nosske, D. Gregoratto, J.R.H. Smith, T. Smith ならびにすべての INDOS 及び DOCAL メンバーの多大な貢献に助けられた。

本報告書の作成期間における第 2 専門委員会のメンバーは以下のとおりだった。

(2009～2013)

H-G. Menzel (委員長)	R. Cox	R. Leggett
M.R. Bailey	G. Dietze	J.L. Lipsztein
M. Balonov	K.F. Eckerman	J. Ma
D. Bartlett	A. Endo	F. Paquet
V. Berkovski	J.D. Harrison	N. Petoussi-Henss
W.E. Bolch	N. Ishigure	A.S. Pradhan

(2013～2017)

J.D. Harrison (委員長)	M. Degteva	D. Nofke
M.R. Bailey	A. Endo	F. Paquet
V. Berkovski	J.G. Hunt	N. Petoussi-Henss
L. Bertelli	C. Hyeong Kim	F. Wissmann
W.E. Bolch	R. Leggett	
D. Chambers	J. Ma	

本報告書は、2012 年 11 月 2 日に日本の福島で開催された会合において主委員会によって採択された。

用語解説

便宜上、この用語解説は、線量評価及び放射線防護全般に関する用語、体内動態モデルに関する用語、そしてバイオアッセイ解釈に関する用語の小見出しに分けて構成されている。

線量評価及び放射線防護全般に関する用語

吸収線量, D [Absorbed dose]

吸収線量は、以下の式によって求められる。

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

ここで、 $d\bar{E}$ は物質の質量 dm 中に電離放射線によって与えられる平均エネルギーである。吸収線量の SI 単位はキログラムあたりのジュール (J kg^{-1}) であり、その固有名称はグレイ (Gy) である。

吸収割合 (AF), $\phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$ [Absorbed fraction]

線源領域 r_S 内で放出されるタイプ R の i 次放射線のエネルギー $E_{R,i}$ のうち、標的領域 r_T において吸収される割合。これらの標的領域は、組織 (たとえば、肝臓) である場合もあれば、臓器内の細胞層 (たとえば、胃壁の幹細胞) である場合もある (「標的領域」及び「標的組織」の定義を参照)。

活性骨髄 [Active (bone) marrow]

活性骨髄は造血機能を有しており、生産されている多数の赤血球によって赤色を呈する。活性骨髄は、放射線誘発白血病リスクに関する標的領域となる。

放射能 [Activity]

微小の時間間隔における放射性物質の核変換数をその持続時間で除した値。放射能の SI 単位はベクレルである (Bq ; $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$)。年摂取限度 (ALI) [Annual limit on intake]。「誘導空気中濃度」も参照

ALI は *Publication 60* (ICRP, 1991, S30 項) の中で、20 mSv という預託実効線量をもたらすであろう、1 年における放射性核種の摂取量 (単位: Bq) と定義された。したがって、作業者の場合の平均 ALI は以下のとおりである。

$$ALI_j = \frac{0.02}{e_j(50)}$$

委員会は ALI の利用を勧告しない。線量限度の遵守のためには、放射性核種の摂取だけではなく外部放射線にも起因する総線量が考慮されなければならないと考えるからである。

ベクレル (Bq) [Becquerel]

放射能の SI 単位を表す固有名称 ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$)。

生物学的半減期 [Biological half-time]

生体系のコンパートメントが (さらなる取込み及び放射性崩壊がない場合に) その放射性核種内容量の半分を取り除くために要する時間。

骨髄 [Bone marrow]。「活性骨髄」及び「不活性骨髄」も参照

骨髄は柔らかく細胞密度の高い組織であり、長骨の円筒形の空洞や体軸及び四肢骨格の骨梁中の空洞に存在する。骨髄全体は、「ストローマ」と呼ばれるスポンジ状・細網状の結合組織構造、骨髄（血球形成）組織、脂肪細胞、リンパ組織の小さな蓄積、そして多数の血管及び類洞から構成される。骨髄には活性（赤色）と不活性（黄色）の 2 種類があり、これらの形容詞は骨髄の血球成分生産（造血）能力を指す。

預託実効線量, $E(\tau)$ [Committed effective dose]。「実効線量」も参照

本報告書シリーズでは、摂取に続く積算時間 τ は 50 年とみなされる。預託実効線量 $E_{(50)}$ は、以下の式に従って、個々の標的臓器または標的組織 T に対する男性及び女性の預託等価線量を用いて計算される。

$$E_{(50)} = \sum_T w_T \cdot \left[\frac{H_T^M(50) + H_T^F(50)}{2} \right]$$

預託実効線量の SI 単位は吸収線量の場合と同じ J kg^{-1} であり、その固有名称はシーベルト (Sv) である。

預託等価線量, $H_T(50)$ [Committed equivalent dose]。「等価線量」も参照

本報告書シリーズでは、臓器領域または組織領域に対する等価線量は 50 年の預託期間を用いて計算される。これは、標準成人男性または標準成人女性の標的臓器または標的組織 T における等価線量率の時間積分とみなされる。これらはまた、標準作業員の体内への放射性物質の摂取に続いて標準体内動態モデル及び線量評価モデルによって予測される。したがって、積算期間は以下のように摂取に続く 50 年である。

$$H_T(50) = \int_0^{50} \dot{H}(r_T, t) dt$$

いずれの性別についても、急性摂取後の時間 t における標的領域 r_T 内の等価線量率 $\dot{H}(r_T, t)$ は以下のように表される。

$$\dot{H}(r_T, t) = \sum_{r_S} A(r_S, t) \cdot S_w(r_T \leftarrow r_S)$$

ここで、

$A(r_S, t)$ は、標準作業員の場合の標準体内動態モデルによって予測される、摂取後の時間 t における線源領域 r_S 内の放射性核種の放射能である。

$S_w(r_S \leftarrow r_T)$ は、標準成人男性及び標準成人女性の場合の放射線加重された S 係数（すなわち、線源領域 r_S における核変換あたりの標的領域 r_T に対する等価線量）である（単位：Sv (Bq s)⁻¹）。

預託等価線量の SI 単位は吸収線量の場合と同じ J kg^{-1} であり、その固有名称はシーベルト (Sv) である。

誘導空気中濃度 (DAC) [Derived air concentration]。「年摂取限度」も参照

DAC は、 $1.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ の性平均呼吸率及び 2000 時間の年間労働時間を仮定した時の年摂取限度 (ALI) の摂取量をもたらすであろう、対象放射性核種の空気中放射能濃度（単位：Bq m⁻³）である。DAC は以下の式によって求められる。

$$\text{DAC}_j = \frac{\text{ALI}_j}{2200}$$

委員会は DAC の利用を勧告しない。線量限度の遵守のためには、放射性核種の摂取だけではなく外部放射線にも起因する総線量が考慮されなければならないと考えるからである。

線量係数 [Dose coefficient]

成人作業員の場合、線量係数は、臓器または組織 T における単位摂取量あたりの預託等価線量 $h_T(50)$ または単位摂取量あたりの預託実効線量 $e(50)$ のいずれかとして定義され、ここで 50 は、その期間にわたって線量が計算される、年数で表された線量預託期間である。他所では線量係数の代わりに「単位摂取量あたりの線量係数」という用語が用いられる場合もあることに注意。

線量拘束値 [Dose constraint]

ある線源からの臓器または組織に対する個人等価線量もしくは実効線量に関する予測的な線源関連の制限値。線源から最も高く被ばくする個人に対する防護の基本レベルを提示し、またその線源に対する防護の最適化における等価線量または実効線量の上限值としての役割を果たす。職業被ばくの場合、線量拘束値は、最適化のプロセスで考慮される複数の選択肢の範囲を限定するために用いられる、臓器または組織に対する個人等価線量もしくは実効線量の値である。

線量限度 [Dose limit]

計画被ばく状況において超えてはならない、個人に対する実効線量もしくは臓器または組織固有の等価線量の値。

記録線量, E [Dose of record]

本報告書シリーズでは、記録線量とは、個人線量当量 $H_p(10)$ の測定値と、当該作業者の個人モニタリングならびに ICRP の標準体内動態モデル及び線量評価計算モデルの結果を用いて標準作業者について適宜的に決定された預託実効線量を合計することによって評価される実効線量をいう。記録線量は、物質の吸収タイプや、吸入エアロゾルの空気力学的放射能中央径/熱力学的放射能中央径など、施設固有の被ばくパラメータを用いて評価してもよいが、標準作業者のパラメータは、本報告書シリーズにおいて ICRP が定めるように固定しなければならない。記録線量は作業者に割り当てられ、報告及び規制要件遵守の適宜の実証の目的のために保存されることが要求される。

単位内容量あたりの線量の関数 [Dose per content function]

本報告書シリーズでは、表にまとめられた一連の値 $z(t)=e(50)/m(t)$ または $z(t)=h_T(50)/m(t)$ であり、ここで $e(50)$ は実効線量係数、 $h_T(50)$ は組織または臓器に関する等価線量係数、 $m(t)$ は標準バイオアッセイ (残留または排泄) 関数である。 $z(t)$ の値は、体内または所定の臓器における予測放射能内容量あたりの、もしくは 1 日あたりの排泄あたりの、預託実効線量または臓器 r_T に対する預託等価線量を表す。

単位摂取量あたりの線量係数 [Dose per intake coefficient]。「線量係数」も参照

本報告書シリーズでは、放射性核種の単位摂取量あたりの預託実効線量 $e(50)$ もしくは、放射性核種の単位摂取量あたりの組織または臓器 r_T に対する預託等価線量 $h_T(r_T, 50)$ であり、ここで、その期間にわたって線量が計算される線量預託期間は 50 年である。

実効線量, E [Effective dose]

ICRP (2007) における実効線量の一般定義に従って、実効線量は以下のように計算される。

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]$$

ここで、 H_T^M 及び H_T^F はそれぞれ、標準成人男性及び標準成人女性の組織または臓器 r_T に対する等価線量であり、 w_T は標的組織 T に関する組織加重係数であって、 $\sum_T w_T = 1$ である。この合計は、確率的影響の誘発に対して感受性が高いとみなされる、人体のあらゆる臓器及び組織にわたって行われる。 w_R 及び w_T は無次元量であるため、実効線量の SI 単位は吸収線量の場合と同じ $J \text{ kg}^{-1}$ であり、その固有名称はシーベルト (Sv) である。

骨内膜 (または骨内膜層) [Endosteum (or endosteal layer)]

骨梁海綿質領域の骨梁表面とすべての長骨の骨幹部内の髓腔の皮質表面を覆う厚さ $50 \mu\text{m}$ の層。これは放射線誘発骨がんにかかわる標的組織と見なされている。この標的領域は、ICRP Publication 26 と 30 (ICRP, 1977, 1979) で以前に導入されていた標的領域である骨表面に代わるものである。この骨表面は、骨梁の表面と皮質骨のハウアース管の表面を覆う厚さ $10 \mu\text{m}$ の単一細胞層と定義されていた。

等価線量, H_T [Equivalent dose]

ある組織または臓器に対する等価線量は、以下のように定義される。

$$H_T = \sum_R w_R D_{R,T}$$

ここで、 w_R は放射線タイプ R の放射線加重係数であり、 $D_{R,T}$ は標準成人男性または標準成人女性の組織または臓器 r_T における放射線タイプ R に起因する臓器吸収線量である。 w_R は無次元量であるため、等価線量の SI 単位は吸収線量の場合と同じ $J kg^{-1}$ であり、その固有名称はシーベルト (Sv) である。

被ばく [Exposure]

照射にさらされている状態または状況。外部被ばくは体外の線源に起因する放射線被ばくであり、内部被ばくは体内の線源に起因する放射線被ばくである。

グレイ (Gy) [Gray]

吸収線量の SI 単位を表す固有名称 ($1 Gy = 1 J kg^{-1}$)。

不活性骨髄 [Inactive (bone) marrow]

活性骨髄とは対照的に、不活性骨髄は造血機能を有さない (すなわち、造血を直接担うものではない)。不活性骨髄は、黄色骨髄系の大部分の空間を占有する脂肪細胞によって黄色を呈する。

骨髄細胞密度 [Marrow cellularity]

造血機能を有するある骨における骨髄体積の割合。骨髄細胞密度の年齢に対する骨部位ごとの標準値は、*Publication 70 (ICRP, 1995a)* の表 41 に示されている。第一次近似としては、骨髄細胞密度は、1 から骨髄における脂肪割合を引いた値と見なすことができる。

平均吸収線量、 $D_{R,T}$ [Mean absorbed dose]

特定の臓器または組織領域 r_T における平均吸収線量は、以下の式によって求められる。

$$D_T = 1/m_T \int D dm$$

ここで、 m_T はその臓器または組織の質量であり、 D は質量要素 dm における吸収線量である。平均吸収線量の SI 単位はキログラムあたりのジュール ($J kg^{-1}$) であり、その固有名称はグレイ (Gy) である。

職業被ばく [Occupational exposure]

作業者が自らの業務の結果として受ける放射線被ばく。ICRP 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みなされる状況の結果として作業で受ける放射線被ばくに限定している。

個人線量当量、 $H_p(d)$ [Personal dose equivalent]

人体上の特定の点の下の適切な深さ d における軟組織中の線量当量。個人線量当量の単位はキログラムあたりのジュール ($J kg^{-1}$) であり、その固有名称はシーベルト (Sv) である。この特定の点は通常、個人線量計が装着される部位によって与えられる。実効線量の評価の場合には 10 mm の深さが勧告され、皮膚及び眼の水晶体に対する等価線量の評価の場合にはそれぞれ 0.07 mm 及び 3 mm の深さが勧告される。

防護量 [Protection quantity]

ICRP が放射線防護のために定義した量であって、全身と身体部分の両方の外部照射及び放射性核種の摂取による電離放射線被ばくの程度の定量化を可能にする量。

放射線加重係数、 w_R [Radiation weighting factor]

放射線タイプ R の生物効果比を反映させるために当該放射線の臓器または組織吸収線量成分に乘じられる無次元の係数。これは、ある臓器または組織における平均吸収線量から臓器等価線量を導き出すために用いられる。

赤色骨髄 [Red (bone) marrow]

「活性骨髄」を参照。

参考レベル [Reference level]

緊急時又は現存の制御可能な被ばく状況において、それを上回る被ばくの発生を許す計画の策定は不適切であると判断され、またそれより下では防護の最適化を履行すべき、線量またはリスクのレベルを表す用語。参考レベルに選定される値は、考慮されている被ばく状況の一般的な事情によって決まる。

標準男性と標準女性 (標準個人) [Reference Male and Reference Female (Reference Individual)]

放射線防護の目的のために ICRP によって定義された解剖学的及び生理学的特性を有する、理想化された男性または女性。

標準パラメータ値 [Reference parameter value]

線量評価計算において用いるのが妥当とみなされる、ICRP によって勧告されたパラメータ、係数または量の値。これらの値は固定されており、不確かさを持たない。

標準人 [Reference Person]

標準男性の線量と標準女性の線量を平均化することによって、臓器及び組織等価線量を計算するための、理想化されたヒト。標準人の等価線量は、実効線量の計算に利用される。

標準ファントム [Reference phantom]

Publication 89 (ICRP, 2002a) の中で定義された標準男性及び標準女性に合理的に模擬された解剖学的特性を有する、*Publication 110* (ICRP, 2009) の中で定義された人体のコンピュータファントム (医学画像データに基づく男性または女性のボクセルファントム)。

標準作業員 [Reference Worker]

本報告書シリーズにおいて標準作業員について定義される、標準体内動態モデル及び線量評価モデル (全身性体内動態モデル、ヒト呼吸気道モデル、ヒト消化管モデル及び線量評価モデル) ならびにそれらのパラメータ値と結びつけられる成人標準人。標準作業員の体内動態モデルの構造及びパラメータ値は性別、年齢、人種及びその他の個人固有の特性によって変化しないが、性固有モデルが利用可能な場合は標準男性パラメータ値に基づく。

シーベルト (Sv) [Sievert]

等価線量及び実効線量の SI 単位 (J kg^{-1}) を表す固有名称。

線源領域, r_S [Source region]

放射性核種を含有する人体の領域。この領域は、臓器、組織、消化管内容物または膀胱内容物である場合もあれば、骨格や呼吸気道などにおける組織の表面である場合もある。

比吸収割合, $\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R_i})$ [Specific absorbed fraction]

線源領域 r_S 内で放出される放射線 R のエネルギー E_{R_i} のうち、標的領域 r_T の質量あたりで吸収される割合。

海綿質 [Spongiosa]

体軸および体肢骨格にわたる皮質骨皮質内にある骨梁と髄組織(活性、不活性の両方)を合わせた組織を指す用語。海綿質は *Publication 110* (ICRP, 2009) の標準ファントムで定義されている 3 つの骨領域の 1 つである。残り 2 つは、長骨幹の骨髓髄質と皮質骨である。骨梁骨、活性骨髄と不活性骨髄の相対的割合は骨格部位によって変わるので、海綿質の元素組成と質量密度は一定でなく、骨格音啜立によって変わる [*Publication 110* (ICRP, 2009) の付属書 B を参照]。

(放射線加重) S 係数, $S_W(r_T \leftarrow r_S)$ [S coefficient (radiation weighted)]

標準男性及び標準女性の場合の、線源領域 r_S における所定の放射性核種の核変換あたりの標的領域 r_T に対する等価線量 (Sv (Bq s)^{-1})。

$$S_w(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R w_R \sum_i E_{R,i} Y_{R,i} \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$$

ここで、

$E_{R,i}$ は、その放射性核種の核変換において放出される放射線タイプ R の i 次放射線のエネルギーであり、単位はジュールである。

$Y_{R,i}$ は、核変換あたりの放射線タイプ R の i 次放射線の収率である ((Bq s)⁻¹)。

w_R は、放射線タイプ R の放射線加重係数 (表 1.1) である。

$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$ は、線源領域 r_S 内で放出される放射線タイプ R のエネルギー $E_{R,i}$ のうち、標的領域 r_T の質量あたりで吸収される割合として定義される、比吸収割合である (kg⁻¹)。

このケースでは、成人の場合、時間 (年齢) に伴う解剖学的パラメータのいかなる変化も考慮されないため、 S_w は時間に関して不変であり、その値は放射能 (Bq) あたりの等価線量率 (Sv s⁻¹) または、標的領域における核変換 (Bq s) あたりの等価線量 (Sv) のいずれかを表すことに注意。

標的領域、 r_T [Target region]

放射線吸収線量を受ける人体の臓器領域または組織領域。

標的組織、 T [Target tissue]

実効線量において組織加重係数が割り当てられる、体内の臓器または組織 (用語解説における定義及び表 1.2 を参照)。多くの場合、それぞれの標的組織 T は単一の標的領域 r_T に対応する。しかし、胸郭外気道、胸郭内気道、結腸及びリンパ節の場合、2 つ以上の標的領域 r_T の分割加重が標的組織 T を定義する (表 3.5 及び 3.7 節を参照)。

組織加重係数、 w_T [Tissue weighting factor]。「実効線量」も参照

確率の影響に起因する放射線損害全体に対する当該臓器または組織の相対的寄与を表現するために、ある臓器または組織 r_T に対する等価

線量に加重される係数。これは以下のように定義される。

$$\sum_T w_T = 1$$

作業員 [Worker]

本報告書シリーズでは、常勤、非常勤または臨時雇用にかかわらず、雇用主のために作業し、職業上の放射線防護に関係する権利及び義務を認識しているあらゆる個人。

体内動態モデルに関する用語

吸収 [Absorption]

メカニズムにかかわらず、血液中への物質の移行。一般に、粒子の解離ならびに可溶性物質及び粒子から解離した物質の血液中への取り込みに適用する。

空気力学的直径、 d_{ae} [Aerodynamic diameter]

着目する粒子と同じ空気中終末沈降速度を有する、単位密度 (1 g cm⁻³) の球の直径 (µm)。

消化管 [Alimentary tract]

そこで食物が消化される、口から肛門までの管。

消化管移行係数、 f_A [Alimentary tract transfer factor]

消化管に入る放射能のうち、血液中に吸収される割合。放射性崩壊による損失又は当該消化管への放射能の内因性の流入を考慮に入れない

い。

肺胞-間質 (AI) 領域 [Alveolar-interstitial region]

呼吸細気管支、胞状部を有する肺胞管及び肺胞囊並びに間質結合組織からなる、呼吸気道の一部 (気道分岐 16 以降)。
空気力学的放射能中央径 (AMAD) [Activity median aerodynamic diameter] (「粒子数中央径」も参照)

エアロゾル中の放射能の 50%は、空気力学的直径 (d_{ae}) が AMAD を上回る粒子と関連する。沈着が主に慣性衝突と沈降に依存する場合、通常は AMAD がおよそ $0.3 \mu\text{m}$ を上回るときに使用される。

熱力学的放射能中央径 (AMTD) [Activity median thermodynamic diameter]

エアロゾル中の放射能の 50%は、熱力学的直径 (d_{th}) が AMTD を上回る粒子と関連する。沈着が主に拡散に依存する場合、通常は空気力学的放射能中央径がおよそ $0.3 \mu\text{m}$ を下回るときに使用される。

基底細胞 [Basal cell]

胸郭外及び気管支上皮の基底膜に付着しており、表面に広がっているのではない立方上皮細胞。

血液 [Blood]

体内動態モデルにおける通過コンパートメントに相当する。以前の ICRP 刊行物では、「通過コンパートメント」又は「体液」とも呼ばれた。

気管支領域 (BB) [Bronchial region]

気管 (気道分岐 0) 及び気管支 (気道分岐 1~8) からなる、呼吸気道の一部。

細気管支領域 (bb) [Bronchiolar region]

細気管支及び末端細気管支からなる、呼吸気道の一部 (気道分岐 9~15)。

骨表面 [Bone surface]

「骨内膜」を参照。

クリアランス [Clearance]

粒子輸送及び血液中への吸収による、呼吸気道からの物質の除去。

粒子数中央径 (CMD) [Count median diameter] (「質量中央径」も参照)

(たとえば、顕微鏡検査によって) 測定される試料中の粒子の (数の) 50%は、CMD を上回る直径を有する。

コンパートメント [Compartment]

本報告書シリーズでは、一次反応速度則によって特徴づけることができる、体内の放射性物質の数学的プールと定義される。コンパートメントは、臓器 (たとえば、肝臓)、臓器の部分 (たとえば、肺の気管支領域)、組織 (たとえば、骨)、組織の部分 (たとえば、骨表面) 又は人体の他の物質 (たとえば、血液) と関連しうる。放射能は、コンパートメント内で均一に分布するとみなされる。

沈着 [Deposition]

吸い込まれた空気中の物質のうち呼息後に呼吸気道に残留する量を決定する初期過程を指す。物質の沈着は、吸息及び呼息の両方の間に起こる。

内因性排泄 [Endogenous excretion]

血液から消化管への物質の排泄を明示するために用いられる用語であり、胆汁排泄及び消化管壁を通じた物質の通過に適用する。

骨内膜 (または骨内膜層) [Endosteum (or endosteal layer)]

骨梁海綿質領域の骨梁表面とすべての長骨の骨幹部内の髓腔の皮質表面を覆う厚さ $50 \mu\text{m}$ の層。これは放射線誘発骨がんにかかわる標的組織と見なされている。この標的領域は、ICRP Publication 26 と 30(ICRP, 1977, 1979) で以前に導入されていた標的領域である骨表面に代わるものである。この骨表面は、骨梁の表面と皮質骨のハヴアース管の表面を覆う厚さ $10 \mu\text{m}$ の単一細胞層と定義されていた。

外因性排泄 [Exogenous excretion]

吸収を伴わずに消化管を通り抜ける物質の (糞中) 排泄を明示するために用いられる用語。

胸郭外 (ET) 気道 [Extrathoracic airway]

前部鼻道 (ET₁ 領域) 及び後部鼻道、咽頭並びに喉頭 (ET₂ 領域) からなる、呼吸気道の一部。咽頭の口腔部はヒト消化管モデルに含まれるため、もはや ET₂ 領域の部分ではないことに注意。

被ばく (吸入摂取との関連における) [Exposure (in the context of inhalation)]

ある人がさらされる放射性核種の空気中濃度 (Bq m^{-3}) と被ばく時間の積。より一般的には、空気中濃度が時間とともに変化する場合、被ばく時間にわたって積分される、ある人がさらされる放射性核種の空気中濃度の時間積分。

胃腸管における吸収割合, f_1 [Fractional absorption in the gastrointestinal tract] (「消化管移行係数」も参照)

Publication 30 (ICRP, 1979a) の胃腸管モデルにおいて用いられた、消化管から血液中に直接吸収される元素の割合。

ヒト消化管モデル (HATM) [Human Alimentary Tract Model]

経口摂取された物質の、ヒト消化管を通じた移動を記述するための体内動態モデル。Publication 100 (ICRP, 2006) で公表された。

ヒト呼吸気道モデル (HRTM) [Human Respiratory Tract Model]

吸入摂取された物質の、ヒト呼吸気道における沈着、移動及び吸収を記述するための体内動態モデル。Publication 66 (ICRP, 1994a) で公表され、本報告書で更新された。

インハラビリティ [Inhalability]

吸息前に周辺空気の体積中に存在する粒子のうち、鼻及び口に入る粒子の割合。

(体内) 摂取 (量) [Intake] (「取り込み」も参照)

環境から呼吸気道又は胃腸管に入る放射性核種。急性摂取は、瞬時に起こるとみなされる、吸入摂取または経口摂取による単一の摂取として定義され、慢性摂取は、特定の期間にわたって続く摂取として定義される。

質量中央径 (MMD) [Mass median diameter] (「空気力学的放射能中央径」及び「粒子数中央径」も参照)

エアロゾル中の物質の質量の 50% は、直径が MMD を上回る粒子と関連する。幾何標準偏差が σ_g である対数正規分布の場合、MMD は粒子数中央径 (CMD) から計算することができる。

$$MMD = CMD + 3 \exp\left(\ln \sigma_g\right)^2$$

物質の比放射能が一様である場合、MMD は放射能中央径 (AMD) に等しいことになる。エアロゾル中の放射能の 50% は、直径が AMD を上回る粒子と関連する。粒子の空気力学的直径に対する粒径の関係、したがって粒子から形成されるあるエアロゾルの空気力学的放射能中央径に対する AMD 及び CMD の関係は、粒子の密度及び形状並びにそれらの直径が測定された方法によって決まる (さらなる情報については A.3.3 節を参照)。

鼻呼吸者 [Nasal augmenter]

「睡眠」、「着座」及び「軽運動」の運動レベルにおいては完全に鼻で呼吸するが、「激しい運動」時には口鼻で (一部は鼻で、一部は口で) 呼吸する人。ほとんどの人はこの様式に従って呼吸するため、「鼻呼吸者 (normal nose breather)」としても知られる。標準作業者を含まないすべての標準対象者は、鼻呼吸者と仮定される。

鼻呼吸者 [Normal nose breather]

「鼻呼吸者」を参照。

粒子輸送 [Particle transport]

物質を呼吸気道から消化管及びリンパ節へと除去する過程並びに物質を呼吸気道のある部分から別の部分に移動させる過程。

標準体内動態モデル [Reference biokinetic model]

本報告書シリーズにおいて標準作業者に採用される体内動態モデル。標準体内動態モデルは、人体のさまざまな臓器又は組織における放射性核種の摂取、取り込み、分布及び残留並びにそれに続くさまざまな経路による人体からの排泄を記述するものである。

分泌細胞 [Secretory cell]

粘液又は漿液分泌物を有する非線毛性上皮細胞。

皮下組織 [Subcutaneous tissue]

皮膚の直下に位置する疎性の繊維質組織。これには血管、結合組織、筋肉、脂肪及び腺が含まれる。創傷を通じた摂取との関連では、これは、可溶性物質若しくは溶解物質の血液中への除去又はリンパ管を経た不溶性物質の除去に先立って放射性核種が保持されうであろう創傷部位における組織を表す。

ヒト呼吸気道モデルの気管支領域における標的領域 [Target region in the bronchial region of the Human Respiratory Tract Model]

表 3.3 を参照。他のそれぞれの領域の場合、特定される標的は一つだけであるため、固有の記号は必要とされない。BB_{bas} は、基底細胞が分布する気管支領域における組織として定義され、BB_{sec} は、分泌細胞が分布する気管支領域における組織として定義される。

熱力学的直径, d_h [Thermodynamic diameter]

対象粒子と同じ空気中拡散係数を有する球状粒子の直径 (μm)。

胸郭内 (TH) 気道 [Thoracic airway]

気管支領域、細気管支領域及び肺胞-間質領域を合わせたもの。

通過コンパートメント [Transfer compartment]

組織における沈着場所からの血液を通じた放射性物質の移動を考慮に入れるために ICRP によって以前使用された体内動態モデルの多く

に数学的便宜上導入されたコンパートメント。

呼吸気道から血液中への吸収率に従って分類された、物質のタイプ [Types of materials, classified according to their rates of absorption from the respiratory tract into blood]

タイプ F は、呼吸気道から血液中に容易に吸収される沈着物質として定義される (速い吸収)。タイプ M は、呼吸気道から血液中への吸収率が中程度の沈着物質として定義される (中位の吸収)。タイプ S は、呼吸気道において比較的不溶性である沈着物質として定義される (遅い吸収)。タイプ V は、線量評価の目的のために、呼吸気道から血液中に瞬時に吸収されると仮定される沈着物質として定義される (一定のガス及び蒸気のみ；非常に速い吸収)。

取り込み [Uptake] (「(体内) 摂取 (量)」も参照)

呼吸気道若しくは消化管から又は皮膚を通じて血液中に入る放射能。

バイオアッセイ解釈に関する用語

バイオアッセイ [Bioassay]

直接 (インビボ) 測定又は人体から排泄される若しくはその他除去される物質の間接 (インビトロ) 分析により、体内の放射性核種の性質、放射能、位置又は残留を決定するのに用いられるあらゆる手順。

バイオアッセイ関数 [Bioassay function]

「標準バイオアッセイ関数」を参照。

内容量 [Content]

特定の臓器、組織又は人体における放射性物質の放射能。

決定しきい値 [Decision threshold]

ある物理的影響 (たとえば、試料中の放射性核種の存在) を定量化する実測結果がそれを超える場合にはその物理的影響が存在することを示すとみなしてもよい、測定量の固定値 (ISO, 2010a,b)。決定しきい値は、その物理的影響が存在しないという仮説とそれが存在するという対立仮説のいずれか 1 つに決めるための統計的検定の棄却限界値である。実測結果が棄却限界値を超える場合、これは、当該仮説が棄却されるべきであることを示すとみなされる。統計的検定は、その仮説を誤って棄却する確率 (第一種過誤) が多くとも所定の値 α に等しいように設計される。決定しきい値は、ある特定の測定結果が有意であるかどうかを決定するためにその測定後に評価される、事後的な量である。決定しきい値は、「決定レベル」又は「最小有意放射能」とも呼ばれる。

誘導調査レベル (DIL) [Derived investigation level] (「調査レベル」も参照)

調査レベル又は別の一次的なレベルから導き出される、測定可能量の事前設定レベル。DIL は、個人又は作業環境と関連するいかなる作業パラメータについても設定することができる。放射性核種の摂取に対する被ばくの個人モニタリングの場合、DIL は測定された人体若しくは臓器/組織の内容量、排泄物中の放射能レベル、又は個人用エアサンプラによって測定された空気中濃度と関連する可能性が最も高い。

検出限界 [Detection limit]

その測定手順によって検出可能であるという特定の確率を保証する、測定量の最小の真の値 (ISO, 2010a,b)。検出限界は、次のように、決定しきい値に従って統計的検定及び仮説と関連する最小の真の値である：実際には真の値が検出限界に等しいかこれを超える場合、その仮説を誤って棄却しない確率 (第二種過誤) は多くとも所定の値 β に等しい。検出限界は、測定の実施に先立って特定の測定方法について評価される、事前の量である。

直接測定 [Direct measurement]

取り込まれた放射性核種のあらゆる種類のインビボ測定 (すなわち、全身計数、肺計数、甲状腺計数など) を表す総称用語。

排泄関数 [Excretion function]

「標準バイオアッセイ関数」を参照。

排泄速度 (瞬間) [Excretion rate (instantaneous)]

放射性核種が排泄物中に除去される瞬間速度 (Bq s^{-1})。

調査レベル (IL) [Investigation level] (「誘導調査レベル」も参照)

これを超えたら摂取の原因又は意味合いが調査されるべきである (ICRP, 1997b), 防護量で表された事前設定レベル。IL は、個人又は作業環境と関連するいかなる操作パラメータについても設定することができる。放射性核種の摂取に対する被ばくの個人モニタリングの場合、それらは、測定された人体若しくは臓器/組織の内容量、排泄物中の放射能レベル、又は個人用エアサンブラによって測定された空気中濃度と関連する可能性が最も高い。

測定量, M [Measured quantity]

取り込みのモニタリングの一次的な結果。測定量は、インビボ測定の場合には全身、臓器又は組織における放射性核種の放射能 (Bq) であり、インビトロ測定の場合には排泄物試料中の放射性核種の放射能である。多くの場合、24 時間分の試料が用いられる。

記録レベル [Recording level]

これを超えたら結果が記録されるべきであり、これより低い値は無視される、事前設定レベル。

標準バイオアッセイ関数 [Reference bioassay function]

本報告書シリーズでは、時間 $t=0$ における急性摂取に続く、体内の放射能の時間推移 (「残留関数」) 又は尿中若しくは糞中に排泄される放射能の時間推移 (「排泄関数」) を記述する標準体内動態モデルによって予測される、表にまとめられた一連の値 $m(t)$ と定義される。残留関数 $m(t)$ が摂取後の時間 t における人体、臓器又は組織における放射性核種の予測放射能を表すのに対して、排泄関数 $m(t)$ は摂取後の時間 t における 24 時間分の排泄物試料中の放射性核種の予測放射能を表す。本報告書シリーズでは、排泄関数の場合、 t は 24 時間分の試料の採集期間の終了までの日数であり、試料採集期間中の放射性崩壊は考慮される。

残留関数 [Retention function]

「標準バイオアッセイ関数」を参照。

しきいレベル [Threshold level]

これを超えたら何らかの特定の対策又は決定が行われるべきである、測定量の値。これを超えたら結果が記録されるべきであり、それより低い値は無視される記録レベル及びそれを超えたらその結果の原因又は意味合いが調査されるべきである調査レベルが含まれる。

1 緒言

1.1 本報告書シリーズの範囲

(1) 放射性核種の職業上の摂取 (OIR) は、さまざまな産業、医療、教育及び研究施設における日常的な操業の間にかかることがある。それらは、放射性物質に関する異常事象の後にも起こるかもしれない。

(2) 放射性核種の摂取による職業上の内部被ばくの適切な評価は、施設又は活動の設計、計画及び認可のため、作業者の放射線防護の最適化のため、操業時の放射線防護のため、並びに規制要件遵守の適及的実証のために不可欠である。

(3) 放射性核種の摂取後、臓器及び組織が受ける線量は長期にわたって続くため、等価線量及び実効線量は長期にわたり蓄積される。結果として生じる量は、「預託線量」と呼ばれる。
(4) 作業者の内部被ばくは、「預託実効線量」という防護量において評価されるべきである。
(5) 本報告書シリーズでは、包括的な一連の線量係数（すなわち、単位摂取量あたりの預託実効線量及び臓器又は組織に対する預託等価線量）を提示し、単位内容量あたりの線量の関数に関する値も提示する。単位内容量あたりの線量の関数は、特定の時間において人体又は所定の臓器における単位放射能内容量もしくは 1 日あたりの排泄試料中の単位放射能を生じさせる摂取に起因する、預託実効線量もしくは臓器又は組織に対する預託等価線量である。
(6) これらのデータは、予測的評価と適及的評価のいずれにも用いてよい。予測的評価は、施設又は行為の設計及び計画段階において得られた、予測される放射性核種の被ばくに関する情報を用いて、特定の活動に携わる作業者の摂取及び結果として生じる線量の推定値をもたらす。これらの評価は一般に、被ばく条件に関する初期設定の仮定及び、吸入エアロゾルの粒径分布や吸入摂取後または経口摂取後の物質の吸収特性など、物質固有の特性を記述するパラメータの初期設定値を利用する。適及的評価は、個人線量記録を維持するとともに規制要件の遵守を実証する目的で線量を評価するために、個人モニタリング及び作業場モニタリングの結果を利用する。これらの評価では、状況次第では 6 章で説明するように、被ばくに関する固有の情報を利用してよい。
(7) 施設における操作に起因する作業者の個人被ばくは適及的に評価されるべきであり、記録線量の観点から記録し、報告されるべきである。一般に、記録線量は、(a) 当該作業者の個人モニタリングの結果を用いて標準作業員について適及的に決定される預託実効線量及び、(b) 外部被ばくに関して測定された個人線量当量 $H_p(10)$ 、という 2 つの成分の合計である。各 2 つの成分は、個別に記録線量の成分と呼ばれることがある。「記録線量」という用語の使用は、この量の成分は用語解説に示されている用語の定義に従って正式に評価され、記録され、報告されるという事実を強調することが意図されている。
(8) 本報告書シリーズには、線量係数の導出に用いられる ICRP の標準モデルに関する詳細情報が含まれる。シリーズの最初の本報告書において提供される情報には、ICRP の標準ヒト呼吸気道モデル (HRTM) (ICRP, 1994a) に加えられる修正の説明及び、ICRP の標準ヒト消化管モデル (HATM) (ICRP, 2006) の概要が含まれる。シリーズの以後の報告書では、標準全身性体内動態モデルの構造及びパラメータ値の説明を提示する。
(9) 本報告書では、モニタリング方法及びモニタリングプログラムの概要並びにバイオアッセイデータの解釈に関する一般ガイダンスも提示する。シリーズの以後の報告書では、モニタリングプログラムの設計及び立案のための放射性核種固有の情報並びに、職業上の内部線量の

適及的評価を提示する。
(10) 本報告書シリーズにおいて提示される資料は、職業上の放射線防護の範囲を超える適用が意図されたものではない。そのような適用の一例は、臓器線量が組織反応に関するしきい値に近づく又は超える可能性がある場合、また、被ばくに関係するパラメータと吸収線量の規模の個人固有の再構築を必要とするかもしれない治療の場合のような、相当な放射性核種を摂取するケースの評価である。そのようなケースでは、正式に評価された記録線量が臓器又は組織における吸収線量の個人関連推定値によって補完されるべきである。そのような個人関連評価は、本報告書シリーズの範囲を超えるものである。
(11) 一部の例外的な状況においては、公衆被ばくが生じ、臓器又は組織における吸収線量が組織反応に関するしきい値を下回るならば、本報告書シリーズにおいて提示される資料はバイオアッセイモニタリングプログラム（通常は全身及び/又は甲状腺モニタの利用に基づく）の立案並びに公衆の成人構成員について得られたバイオアッセイモニタリングデータの解釈のために用いることができるだろう。

1.2 本報告書シリーズにおける防護量及び線量係数

(12) ICRP によって定義された防護量—等価線量及び実効線量—は、ICRP 勧告の適用の基礎である。実効線量の概念は、性別、年齢（成人の場合）、解剖学、生理学や人種など、個人の身体関連パラメータに依存せず、個人の内部被ばくと外部被ばくの両者の特徴づけるために用いてもよい一つの量を提示するものである。広い適用性を達成するために、実効線量及び等価線量は、生理学的パラメータ値の広範な平均化を伴う計算モデルを用いて定義される。具体的に言えば、Publication 89 (ICRP, 2002a) は標準個人の重要パラメータ（ヒトの臓器及び組織の質量、ジオメトリ及び組成）を定義しているが、本報告書シリーズでは、関連する一連の ICRP 標準体内動態モデルを含めて、標準作業員 (ICRP, 1994b) の場合の関連パラメータを提示する。
(13) 実効線量は個人固有な線量の量ではなく、むしろ特定の被ばく条件下での標準人に対する線量である。一般的なケースでは、標準人は標準作業員（用語解説を参照）又は特定年齢の公衆の標準構成員のいずれかになりうる。
(14) 内部線量評価においては、等価線量又は実効線量の直接評価をもたらすいかなる実用線量も定義されていない。体内の放射性核種による等価線量又は実効線量を評価するためには、別の方法が適用される。それらの方法は主として、さまざまな放射能測定及び体内動態モデル（計算モデル）の適用に基づいている。
(15) 本報告書シリーズでは、線量係数及び単位内容量あたりの線量の関数は標準作業員について提示される。これらのデータは、各々の放射性核種のさまざまな物理化学的形態及びさまざまなエアロゾル粒径分布に応じて提示される。経口摂取及び注入（すなわち、血液中への

直接侵入)に関するデータは、偶発的な(たとえば、汚染された皮膚上の物質の)経口摂取もしくは無傷の又は傷がある皮膚を通じた急速な吸収(注入)のケースに対応するバイオアッセイデータの解釈を可能にするために提示される。

(16) 直近の勧告(ICRP, 2007)では、防護量の一般定義は変更されないままであるが、放射線加重係数及び組織加重係数の変更、標準コンピュータファントムの採用(ICRP, 2009)や、新世代の標準体内動態モデルの開発など、放射線被ばくあたりの線量計算値に影響を及ぼす変更が行われている。

(17) 本報告書シリーズでは、*Publication 30* シリーズ(ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b)及び*Publication 68* (ICRP, 1994b)に取って代わるOIRに対応する改訂された線量係数を提示する。バイオアッセイ測定値を解釈するためのデータも提示するが、それらは*Publication 54* 及び78 (ICRP, 1988a, 1997b)に置き換わるとともに、特定の放射性核種に関するバイオアッセイ測定の結果を解釈するために必要とされるあらゆる情報を単一のICRP刊行物として集約するものである。

(18) 本報告書シリーズの完全なデータセットは、電子付属文書として提供される。印刷された報告書には、抜粋された一連のデータ及び資料が含まれる。データは、各元素及びその放射性同位体ごとに標準フォーマットで提示される。表にまとめられた線量係数は、既知の放射性核種の摂取量から預託実効線量及び臓器又は組織に対する預託等価線量を決定するために用いてもよい。表にまとめられた単位内容あたりの線量の関数に関する値は、適切なバイオアッセイ量(たとえば、全身又は肺における放射性核種の放射能や、尿や糞に含まれる放射性核種の排泄)の測定から預託線量を直接評価するために用いてもよい。同様に、図表形式で提示される体内又は1日あたりの排泄試料中の単位摂取量あたりの放射性核種の放射能の値は、単一のバイオアッセイ測定に対する摂取量を評価するために用いてもよい。次に、預託線量は、表にまとめられた線量係数を用いて摂取量から評価してもよい。各元素及び放射性同位体について提供される情報の完全な説明は7章に示す。

(19) 改訂線量係数、単位内容あたりの線量の関数及び標準バイオアッセイ関数は、*Publication 100* (ICRP, 2006)のHATM並びに、直近のデータを考慮に入れた*Publication 66* (ICRP, 1994a)のHRTMの修正版を用いて計算されている。HRTMに加えられた修正については、本報告書の3.2節及び付属書Aで説明する。さらに、本報告書シリーズではさまざまな化学形の元素及びそれらの放射性同位体の吸入摂取及び経口摂取の後に続く血液中への吸収に関する情報が提供される。選ばれたケースにおいては、これらのデータは物質固有の勧告を行うのに十分なものであると判断される。放射性核種の全身性体内動態に関する多くのモデルは修正され、臓器及び組織における取り込み、残留並びに排泄を生理学的により現実的に表現するものである。

(20) 線量係数の計算には、体内動態モデル、生理学的標準データ、コンピュータファントム及び放射線輸送計算コードが用いられる(ICRP, 2007)。ICRPは、作業による個々の放射性核種の吸入摂取又は経口摂取に対する線量係数を刊行しており、臓器及び組織に対する等価線量と実効線量のいずれも示している(ICRP, 1991, 2007)。この計算におけるステップ(図1.1)は、以下のように要約することができる。

- 標準体内動態モデルの利用によって、標準作業者の人体臓器及び組織における放射性核種の分布、及び残留が吸入又は経口による摂取後の時間の関数として決定される。放射線防護の目的では、標準作業者のあらゆる体内動態パラメータも性別、解剖学、生理学、人種及びその他の個人関連因子によって変化しないと仮定されるが、性固有モデルが利用可能ならば標準男性パラメータ値に基づく。それぞれの線源領域において、50年の期間内に起こる核変換(放射性崩壊)の総数が計算される。
- それぞれの線源領域における核変換に起因する、各標的臓器又は標的組織における性固有の吸収線量を計算するために、男性及び女性の標準コンピュータファントムに基づく線量評価モデル並びにモンテカルロ放射線輸送コードが用いられる。
- 臓器又は組織に対する性固有の等価線量を決定するために、放射線加重係数が適用される。
- 性固有の預託等価線量は性平均される。
- 性平均された預託実効線量を決定するために、組織加重係数が適用される。

(21) 本報告書シリーズにおいて用いられる計算手順の詳細は3.7節に述べる。

1.3 放射性核種の職業上の摂取に関する以前の報告書

(22) *Publication 30* シリーズ(ICRP, 1979a,b, 1980, 1981, 1982a,b, 1988b)は、*Publication 26* (ICRP, 1977)において刊行された勧告並びに*Publication 23* (ICRP, 1975)における解剖学的及び生理学的データを参照し、吸入摂取及び経口摂取による放射性核種の摂取に対応する作業者の場合の線量係数及び年摂取限度(ALI)の値を示すものだった。*Publication 68* (ICRP, 1994b)は、*Publication 60* (ICRP, 1991)における1990年勧告を受けて、作業員について更新した線量係数を提示した。これは、吸入摂取された放射性核種に対応する*Publication 66*のHRTM (ICRP, 1994b)、*Publication 70* (ICRP, 1995a)において更新された骨格に関する基本的な解剖学的及び生理学的データ、そして*Publication 56*, 67, 69及び71 (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c)に示された31元素の選ばれた同位体の修正された全身性体内動態モデルを適用するものだった。他の元素に対応する体内動態モデルは*Publication 30* (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b)から採用され、膀胱及び結腸壁について線量推定値を改善するために明確な排泄経路を追加することにより修正された。*Publication 68* (ICRP, 1994b)はALIを示すものではなかった。ICRPは、作業場における、外部放射線及びあらゆる放射性核種の摂取に起因するあらゆる電離放射線被ばくを考慮に入れる必要性を強調したかったためである。

(23) *Publication 54* 及び78は、放射性核種の吸入摂取及び経口摂取に続いて生じる作業員の線量を推定するための、モニタリングプログラムの設計及び結果の解釈に関するガイダンスを提供するものだった(ICRP, 1988a, 1997b)。このガイダンスは、バイオアッセイデータ(す

なわち、人体及び臓器の含量並びに 1 日あたりの尿中及び糞中排泄物の測定値) から摂取量及び線量を評価することを可能にするための数値データにより立証されたものだった。これらのデータは、作業場において直面しうるものとして選ばれたいくつかの放射性核種について提示された。単一摂取後のさまざまな時間又は日常モニタリングにおける測定量の予測値は、測定された放射能あたりの当該摂取の放射能により示された。評価された摂取量から実効線量を計算するために標準線量係数が用いられたであろう。

1.4 等価線量及び実効線量の計算に影響する Publication 103 における変更

(24) Publication 103 (ICRP, 2007) において発表された 2007 年勧告では、等価線量と実効線量の概念及び利用については変更されないままであるが、それらの計算において用いられる方法については、いくつかの修正が加えられた。放射線加重係数及び組織加重係数は、以前勧告された Publication 60 (ICRP, 1991) の値から変更された。光子、電子及びアルファ粒子の場合の放射線加重係数 (w_R) は変更されていない。このため、潜在的に重要で内部に沈着する放射性核種で唯一異なるのは中性子の場合である (表 1.1)。その変更内容は、追加データを利用できるように反映したものではなく、むしろ防護の目的のための放射線加重の適切な取り扱いを再検討したことを反映したものである。中性子においてエネルギーの関数である階段関数 w_R を廃止したのは、実際には連続関数のみが用いられてきたという事実を反映したためである。連続関数の主たる変更は、低エネルギーにおける w_R 値の引き下げであり、これは二次光子による低い線エネルギー付与の寄与をより適切に反映するものである。また、高エネルギーにおける w_R 値は、陽子の w_R 値に収束すると仮定するに十分な理論的根拠がある。

(25) Publication 103 (ICRP, 2007) において勧告された組織加重係数 (w_T) の値を表 1.2 に示す。Publication 60 (ICRP, 1991) に示された値からの変更は、放射線リスクに関する知識が向上したことを反映するものである。がんリスクに関する主たるデータ源は、日本の原爆被爆者の追跡調査によるものであり、バックグラウンドのがん罹患率が異なる 7 つの西洋人及びアジア人の集団の平均リスク係数を導出するために用いられた (ICRP, 2007)。これらの新たな w_T 値は、致死率や生活の質の低下及び損失生存年数によって調整されたがん死亡率データではなく、罹患率データに基づいている。遺伝的影響における重みづけは現状、理論上の平衡よりは最初の 2 世代における疾患の推定値に基づいている。2007 年勧告 (ICRP, 2007) における w_T 値の主な変更は、乳房についての引き上げ (0.05 から 0.12 へ)、生殖腺についての引き下げ (0.2 から 0.08 へ)、そしてより大きな「残りの組織」へ多くの臓器及び組織を含めたこと (0.05 から 0.12 へ) である。残りの組織の線量は現状、性別ごとに 13 の臓器及び組織に対する線量の算術平均として計算される (表 1.2)。組織加重係数は変わらず、性別及びあらゆる年齢にわたる平均を表す。

(26) 2007 年勧告 (ICRP, 2007) において導入されたさらなる重要な変更は、外部及び内部線源による線量は人体の標準コンピュータファントム (ICRP, 2009) を用いて計算される、ということである。過去に委員会は、特定のファントムを特定せず、両性具有の医療内部被ばく

線量 (MIRD) タイプのファントム (Snyder ら, 1969), Kramer ら (1982) の性別モデルや、Cristy と Eckerman (1987) の年齢別ファントムなどのいろいろな数学ファントムを使用してきた。実際の人の医学画像データから構築されるボクセルモデルは、数学 (すなわち定型化された) ファントムにおいて与えられるものよりも現実的な人体描写をもたらす。こうして ICRP は、内部被ばくと外部被ばくのいずれについても体内の線量分布の計算において用いられるべき標準ファントムを定義するためにボクセルモデルを用いることを決定した。Publication 110 (ICRP, 2009) において説明されているこれらのモデル (すなわちコンピュータファントム) は、標準成人男性及び標準成人女性を表す。これらは特に、2007 年勧告 (ICRP, 2007) による実効線量の概念に対応する放射線防護量の計算のために設計されている。臓器及び組織に対する等価線量 H_T は標準成人男性と標準成人女性について独立に計算され、その後実効線量 E の計算において平均される。すなわち、

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]$$

ここで:

$$H_T^M = \sum_R w_R D_{T,R} \text{ (男性)}$$

$$H_T^F = \sum_R w_R D_{T,R} \text{ (女性)}$$

(1.1)

(27) Publication 103 (ICRP, 2007) では、実効線量は標準値に基づく防護量として用いることが意図されており、特定の個人ではなくむしろ標準人に関連したものであることが明確にされている。実効線量の主な利用は、放射線防護における計画立案と最適化のための予測的な線量評価、及び規制目的のための (線量限度の) 遵守の適切的実証である。等価線量と実効線量の計算における性平均は、これまで両性具有の数学ファントムを使うことを暗に含んでいたが、現状、成人男性及び成人女性ファントムにおける等価線量の平均であることが明確に示されている。組織加重係数の導出における性別及び年齢の平均化は、絶対的な放射線損害の推定値における男女間、及び大人と子供間の違いを目立たないように見ることができる。しかし、実際の防護は、男性と女性または異なる年齢グループについて個別に実効線量を計算することによって改善されることはないと思われ、そうすることはこれらの量の精度について誤解を招く可能性がある。

1.5 本報告書シリーズにおいて導入される体内動態モデル

(28) 個々の元素及びそれらの放射性同位体に対応する体内動態モデルは、それぞれの線源領域における時間積分した放射能を決定することによって、所定の期間中 (通常、成人の場合は 50 年、子供の場合は 70 歳まで) に特定の組織、臓器または人体領域 (線源領域) 内で起こ

る形質転換の総数を計算するために用いられる。線量評価モデルは、すべての放出物のエネルギー及び収量を考慮に入れて、それぞれの線源領域において起こる形質転換の点で重要なすべての臓器／組織 (標的) におけるエネルギーの沈着を計算するために用いられる (ICRP, 2008)。次に、標的領域における預託吸収線量 (単位: グレイ) は、線源領域において起こる崩壊の数、及び標的領域におけるエネルギー沈着が分かれば計算することができる。

(29) 消化管及び呼吸気道の体内動態モデルは、結果的に血液中への吸収及び／又は人体から失われることになる、これらの器官内の放射性核種の移動を定義するために用いられる。血液中に吸収される放射性核種の挙動は、複雑さがさまざまである元素固有の全身性モデルによって記述される。これらのモデルは、線量係数の導出とバイオアッセイデータの解釈の両方を目的としたものである。本報告書シリーズで用いられるモデルは以下に示すとおりであり、さらなる情報は 3 章で提供する。

1.5.1 ヒト呼吸気道モデル

(30) *Publication 66* (ICRP, 1994a) に述べられている HRTM は、その発表以後に蓄積されたデータを考慮に入れるために本報告書において更新されているが、このモデルの基本的な特質は変わらないままである。放射性核種を含んだ吸入粒子は、胸郭外 (ET) 気道 (鼻、喉頭など)、肺の気管支 (BB) 及び細気管支 (bb) 気道、そして肺胞-間質 (AI) 領域に沈着し、異なる部位における沈着は主として粒径に依存する (ICRP, 1994a, 2002b)。呼吸気道からの除去は、主として溶解及び血液中へ吸収されること、ならびに咽喉への粒子の輸送と、それに続く消化管への侵入という競合プロセスによって起こる。血液中に吸収されるもしくは粒子輸送によって除去される割合は、物質の種分化及び可溶性、また放射性核種の放射性半減期に左右される。呼吸気道に関する ICRP モデルは、本書ではガス及び蒸気にも、そしてラドン及びその放射性子孫核種の吸入摂取にも適用される。

(31) 血液中への吸収について、本報告書で導入される主たる変更は以下のとおりである。

- タイプ F, M 及び S の吸収既定値の再定義: タイプ M 及び S における急速溶解割合 (f_r) の値を、それぞれ 0.1 及び 0.001 から 0.2 及び 0.01 に引き上げ。それとともに急速溶解速度 (s_r) の値を、 100 d^{-1} から、タイプ M 及び S において 3 d^{-1} 、タイプ F において 30 d^{-1} とする引き下げ。
- 十分な情報が利用可能な選ばれたケースにおける、 f_r , s_r 及び低速溶解速度 (s_l) の物質固有のパラメータ値 (たとえば、ウランの形態)。
- 十分な情報が利用可能である場合、元素固有値 s_r 並びに束縛状態パラメータ f_b 及び s_{b0} 。
- 可溶性及び反応性が呼吸気道に沈着する割合によって定義されるガス及び蒸気の取り扱いの修正。省略時の解釈として、100% の沈着 (20%

は ET₂, 10% は BB, 20% は bb 及び 50% は AI) 及びタイプ F の吸収である。*Publication 66* (ICRP, 1994a) に述べられている SR-0, -1, -2 の分類は有用ではないことがわかっており、もはや用いられない。

(32) 粒子輸送によるクリアランスについては、主たる変更は以下のとおりである。

- 最近のヒト対象実験的研究に基づいた、前部領域から後部領域への移行を含む、鼻道からのより現実的なクリアランス。
- 最近のヒト対象実験的研究に基づいた、気管支樹からの低速粒子のクリアランスの特性の修正。これは現在、気管支樹の全体における粒径に依存する現象ではなく、細気管支においてのみ起こると仮定される。
- 不溶性 ⁶⁰Co 粒子及び二酸化プルトニウムにさらされた作業員の長期追跡調査を含む最近のデータに基づいた、モデル構造の修正を伴う肺の AI 領域における残留の延長。

1.5.2 ヒト消化管モデル

(33) *Publication 30* (ICRP, 1979a) の胃腸管モデルは、*Publication 100* (ICRP, 2006) に述べられている HATM によって置き換えられている。この HATM の主たる特徴は、以下のように要約できる。

- あらゆる消化管すなわち、口腔、食道、胃、小腸、右結腸、左結腸及び直腸・S 字結腸 (S 字結腸及び直腸) を含める。
- ある元素及びその放射性同位体の血液中への吸収は、小腸においてのみ起こる (すなわち、総吸収割合 f_a は小腸からの吸収割合 f_{aI} に等しい) という省略時の解釈。情報が利用可能である場合、他の領域における吸収を考慮に入れたモデル構造。
- 情報が利用可能である場合、消化管領域の壁の粘膜組織及び歯への残留を考慮に入れたモデル構造。
- 消化管のそれぞれの領域内のがん誘発に関する標的領域位置の明示的な指定。

(34) *Publication 100* (ICRP, 2006) では、消化管区画の幹細胞層への電子及びアルファ粒子吸収割合の暫定値を示してある。本報告書の一環として、両方の粒子タイプ、また内容物と壁の両方の線源について新たな計算が行われている。小腸内の領域については、分節の折り重なりに関する新しいモデルが導入されている。さらなる詳細は来たる刊行物 (ICRP, 2016c) に示されることになる。

1.5.3 全身性モデル

(35) 全身性モデルは、全身性循環に達してからの体内の放射性核種の時間依存分布及び残留並びに、人体からのその排泄について説明し

ている。呼吸気道及び消化管における放射性核種の挙動を説明する ICRP の現在の及び過去の体内動態モデルとは対照的に、ICRP の全身性モデルは概して、パラメータ値だけでなくモデル構造についても元素固有のものであった。すべての潜在的に重要である全身の貯蔵される場所、及び放射線防護において対象となるすべての元素の移行経路を表現する単一の汎用モデル構造は、複雑すぎるために実用にはそれほど役立つまいだろう。しかし、以前の ICRP 報告書では、体内における挙動が定性的に同様であることが知られており（または予想されており）、一般的には化学族である元素グループの全身性体内動態を扱うために、汎用モデル構造が用いられてきた。例えば、*Publication 20* (ICRP, 1973) は、アルカリ土類金属のカルシウム、ストロンチウム、バリウム及びラジウムについて汎用モデル構築を導入したが、ほとんどのモデルパラメータについては元素固有の値を提示した。*Publication 30* の第 1～3 部 (ICRP, 1979a, 1980, 1981) では、プルトニウムについて開発されたモデルが、モデル構造だけでなくパラメータ値も含めて、ほとんどのアクチノイド元素に適用された。汎用全身性モデル構造の利用は、放射性核種の摂取による公衆の構成員に対する線量に関する ICRP 報告書の中で増加しており (ICRP, 1993, 1995b,c)、本報告書においてさらに拡大されている。これは全身性体内動態モデルの開発、記述及び適用を容易にするからである。重要な進展として、データの可用性が許可されるに従い、臓器残留及び排泄の動態に関して生理学的にいつそう現実的なモデルとなってきたため、それらのモデルは線量係数の計算だけでなくバイオアッセイデータの解釈にも適用できる、ということである。

1.5.4 放射性子孫核種の取り扱いに関するルール

(36) 放射性崩壊によって一連の放射性核種を生じさせる放射性核種（「親」核種と呼ばれる）に対応する線量係数には、親核種の摂取後にインビボで生成される放射性子孫核種による線量が含まれる。この線量係数は、子孫核種の体内動態に関する仮定に強く左右される可能性がある。本報告書シリーズでは、放射性崩壊によって体内で生成される子孫核種の運命について、以下を前提とする。

(37) 希ガスを除くあらゆる放射性核種の場合：

- 吸入摂取された親核種の、呼吸気道から血液中への吸収を記述するパラメータ値は、呼吸気道において形成される崩壊系列のすべての構成核種に適用される。
- 全身性コンパートメントにおける崩壊によって生成される、もしくは呼吸気道又は消化管において崩壊により生成された後に血液中に吸収される子孫核種の、全身性体内動態は、本報告書シリーズの以後の部で示される、親核種に関する元素の節内で定義する。いくつかの例外はあるが概して、子孫核種の全身性体内動態は親核種の全身性体内動態とは無関係であると仮定される。その構成核種がすべて同じ元素の同位体である崩壊系列の場合、その子孫核種には人体の全体にわたり親核種と同じ動態が割り当てられる。
- 親核種の経口摂取後に消化管内容物における崩壊によって生成される（小腸またはより上部のコンパートメントにおいて）、もしくは全身

性コンパートメントにおいて生成された後に消化管内容物中に移行する子孫核種の初期設定の吸収割合 f_A は、親核種として経口摂取されるときに当該子孫核種の f_A の標準値である。放射性核種が異なる化学的または物理的形態に対応する標準値を複数有する場合、 f_A の既定値は、提示された最大の標準値である。

- 親核種の吸入摂取後に呼吸気道において生成される、もしくは呼吸気道から消化管へ放射能が移行した後に消化管において生成される、子孫核種の既定の吸収割合 f_A は、吸入摂取された物質のうち、割り当てられた吸収タイプにおける急速溶解の割合 (f_f) と、親核種として経口摂取されるときに当該子孫核種の f_A の標準値の積である。親核種として経口摂取した子孫核種が、異なる化学的または物理的形態に相当し、 f_A の標準値を複数有する場合、 f_A の既定値は、当該吸収タイプの場合の f_f と、提示された最大の標準値の積である。

(38) 放射性崩壊によって呼吸気道モデル及び消化管モデルのコンパートメントにおいて生成される希ガスは、血液コンパートメントへの移行及び呼吸気道モデルと消化管モデルのコンパートメント間の移行を伴わずに、これらのコンパートメントから 100 d^{-1} の速度で直接環境へと排出されると推測される。体内で形成されるそのような希ガスの子孫核種は、37 項に述べたルールに従うと推測される。

1.6 本報告書シリーズにおいて導入される線量評価

(39) 線量計算は、核崩壊データ、人体解剖学を描写する擬人化ファントム及び体内の放射線輸送とエネルギー沈着をシミュレートするコードの利用を必要とする。本報告書シリーズで提供されるデータは、修正された崩壊データ (ICRP, 2008)、医学画像データに基づいた成人男性及び成人女性の ICRP 標準コンピュータファントム (ICRP, 2009) 及び十分に確立されたモンテカルロコード (Pelowitz, 2008 ; Kawrakow et al., 2009 ; Niita et al., 2010) を用いて計算される。

(40) 全ての線量計算について、放射性核種は、臓器全体（例えば、肝臓）又はある組織内の薄層（例えば、骨表面）に存在し得るが、線源領域の至る所に均一に分布すると仮定される。同様に、標的細胞は、臓器全体から細胞層までサイズが異なる標的領域の至る所に均一に分布すると仮定される。線源領域と標的領域の間の「クロスファイヤー」放射線による線量は、透過性の光子放射線にとって重要である。「非透過性」のアルファ及びベータ粒子放射線については、エネルギーは、ほとんどの場合、その放射性核種が沈着する組織に主として沈着する。光子及び電子輸送は、線源と標的のほとんどの組み合わせにおいて起こる。さらに、多数の重要なケースにおけるアルファ及びベータ放出については、特別な配慮が考慮される。これらには以下がある。

- 気道中の放射性核種からの呼吸気道の気道壁における標的細胞に対する線量 (ICRP, 1994a)
- 管腔中の放射性核種からの消化管における標的細胞に対する線量 (ICRP, 2006)

- 骨表面上及びミネラル骨内の放射性核種からの骨表面内部 (50 μm 層；下記を参照) 及び全ての赤色骨髄に隣接する細胞に対する線量

1.6.1 核崩壊データ, *Publication 107*

(41) 線量計算のための基本的要求は、半減期、崩壊モード、そして放射性核種及びそれらの子孫核種によって放出されるさまざまな放射線のエネルギーと収率に関する信頼できる情報である (Eckerman et al., 1994; Endo et al., 2003, 2005)。本報告書における計算では、*Publication 107* (ICRP, 2008) において提供されている核崩壊データを用いる。同刊行物は *Publication 38* (ICRP, 1983) に置き換わるものであり、97 元素 1252 放射性同位体の放射線放出に関するデータを提供している CD-ROM を付随した説明文からなる。原子番号が 101 未満の元素の放射性同位体は、それらの半減期が 1 分を上回る場合又はそれらが選ばれた放射性核種の子孫核種である場合、並びに基礎的な核構造データがそれらの放出の意味ある分析を可能にする場合に、*Publication 107* (ICRP, 2008) に採り入れられた。CD-ROM の利用は、放出される放射線と、オージェカスケード及び自発核分裂データのさらなる詳細の完全なリスト化を可能にしている。提供されているデータには、放出される放射線のエネルギー及び強度；ベータ、中性子並びにオージェ電子及びコスタークローニッチ (CK) 電子スペクトル；自発核分裂放射線及びアルファ反跳；半減期、分岐崩壊及び系列；そしてカットオフなしの放出数が含まれている。

(42) 本報告書シリーズでは、半減期が 10 分以上の、*Publication 107* (ICRP, 2008) に含まれているほとんどすべての放射性核種及びその他の選ばれた放射性核種について、線量係数及びバイオアッセイ関数が提示される。崩壊系列を有する放射性核種については、半減期が 10 分以上の全ての親核種が含まれるが、娘核種の半減期についてはいかなる制約も定めない。

1.6.2 成人標準コンピュータファントム, *Publication 110*

(43) 伝統的に、ヒト解剖学の定型化されたコンピュータファントムが、外部と内部両方の放射線防護のための線量係数の計算において用いられてきた。これらのファントムは、標準人の内臓解剖学及び外側の体表面を描写するために数学的表面方程式を用いて構築されており (Cristy, 1980; Cristy and Eckerman, 1987)、したがって解剖学的リアリズムを捉える能力は限られている。放射線輸送シミュレーションのための代替形式として、ボクセルファントムは、コンピュータ断層撮影法 (CT) 又は磁気共鳴映像法から得られる、実際の個人のセグメント化された断層撮影データに基づいている (Zankl et al., 2002, 2003, 2007)。上記のように、2007 年勧告 (ICRP, 2007) は、内部及び外部両方の放射線源に対する線量係数の改訂のために現実的な解剖学的モデルの利用を採用した。*Publication 110* (ICRP, 2009) は、標準成人男性及び標準成人女性のコンピュータファントムの開発及び使用目的について述べている。これらの標準ファントムは、その身長及び体重が標準値と厳密に一致する 2 人の個人のボクセルモデルの修正を経て構築された。その報告書は、このプロセスのために用いられた方法及び結果として得

られたファントムの解剖学的及びコンピュータ的特性について述べている。

(44) 標準成人男性及び標準成人女性のコンピュータファントムは、放射線輸送及びエネルギー沈着をシミュレートするコードとともに、ある臓器又は組織 T における平均吸収線量 D_T の評価のために用いてもよいし、そこから引き続き等価線量及び実効線量を計算してもよい。

1.6.3 骨格線量評価における進歩

(45) 本報告書では、内在する放射性核種—ベータ粒子、電子、アルファ粒子、光子及び中性子 (例えば、自発核分裂による)—から放出される全ての放射線について、*Publication 30* (ICRP, 1979a) の骨格線量評価モデルが大幅に更新されている。*Publication 30* のモデルに対する改良には、粒子エネルギー、骨髄細胞性及び骨固有海綿質微小構造に対する吸収割合依存性のより精密な取り扱いが含まれる。放射線輸送シミュレーションのために、骨格画像の 2 つの標準セットが定められた。第一のセットは、40 歳の男性死体から採取された約 38 の骨格部位の 1 mm ex-vivo CT 画像を含むものだった (Hough et al., 2011)。これらの画像は、皮質骨、梁状海綿質及び髄腔の骨格部位別体積割合を定めるために、また粒子輸送に関する巨視的幾何モデルとして役立つために用いられた。第二のセットは、骨梁及び骨髄組織の体積割合を定めるために、また粒子輸送に関する微視的幾何モデルとして役立つために、梁状海綿質コア試料の 30 μm マイクロ CT 画像を含むものだった。両画像セットは、内部放出される電子の放射線輸送の画像ペア化において組み合わせられた (Shah et al., 2005)。線源組織は、骨髄 (活性及び不活性)、鈣質骨表面 (骨梁及び皮質骨) 並びに鈣質骨体積 (骨梁及び皮質骨) であった。考慮された標的領域は、活性骨髄 (造血幹細胞及び前駆細胞の代用組織) 並びに、骨格骨内膜の修正された 50 μm モデル (骨前駆細胞の代用組織) (用語解説における「骨内膜」を参照) であった。内在するベータ粒子及び中性子が発生させる反跳陽子の吸収割合は、Jokisch et al. (2011a,b) に示されている経路長ベースの輸送アルゴリズムに基づいて定められた。内部放出される光子及び中性子の活性骨髄及び骨内膜への吸収割合の値は、*Publication 110* による標準成人男性及び標準成人女性のボクセルファントム (ICRP, 2009) の海綿質及び髄腔領域内のエネルギー依存粒子フルエンスをまず計算し、次にフルエンス—吸収線量応答関数 (DRF) を適用することによって取得された。これらの光子及び中性子の骨格 DRF の導出に関するさらなる詳細は、*Publication 116* (ICRP, 2010) の付属書 D 及び E だけでなく、Johnson et al. (2011) 及び Bahadori et al. (2011) にそれぞれ与えられている。

1.7 バイオアッセイデータの解釈

(46) 一般的に適用されるバイオアッセイデータからの線量評価体系は、直接測定 (例えば、全身又は特定の臓器及び組織の外部モニタリング) 又は間接測定 (例えば、尿、糞又は環境試料) のどちらかからの放射性核種の摂取量評価に頼る。放射性核種の摂取に関するこれらの測定量の予測値は ICRP によって勧告されており、これらの値は摂取量を推定するために用いることができる (ICRP, 1997b)。次に、いかな

る摂取に起因する預託実効線量は、ICRP によって勧告された若しくは ICRP が勧告する方法論を用いて決定された適切な線量係数を用いて計算される。場合によっては、国の当局は、線量の正式な評価だけでなく放射性核種の摂取量の評価も要求する。提供されるデータは、この目的にも役立つ。

(47) Berkovski et al. (2003a) によって論じられているように、バイオアッセイ測定値を摂取時間と関連づける関数を用いて、預託実効線量をそれらの測定値から直接計算することが可能である。このアプローチの主たる利点は、ユーザーは線量を評価するために摂取量の計算という中間ステップを実施しないということである。これは、ある特定の体内動態モデル及びそのモデルの別の（以前又はより新しい）バージョンから導き出された線量係数によって計算されたバイオアッセイ関数を用いるというリスクを排除する。これは、相互比較における計算違いのよくある原因であることが示されてきている (IAEA, 2007)。

(48) どのアプローチが採用されようと、評価された線量は、多くの場合、評価された摂取量よりもパラメータ値の選択に対する感度が低い。Berkovski et al. (2003a) は、多数の放射性核種の化学的形態のについて、「内容量あたりの線量の関数」は、摂取後の幅広い測定時間に対応する吸入摂取された粒径の選択におおむね影響されないことを示した。したがって、そのような状況では、エアロゾルの適切な AMAD に関する特定の情報の必要性は生じないかもしれない。同様に、内容量あたりの線量の関数は、摂取後の特定範囲の測定時間に対して、関与する特定の化学的形態に対する吸収タイプの選択に影響しないかもしれない。最も適切な測定データの選択及び摂取時間の定義においては、注意がなお必要とされる。

(49) 測定量が実効線量に支配的に寄与する臓器線量と直接関連する場合（例えば、肺線量が実効線量を支配する、不溶性 ^{60}Co 化合物吸入摂取後の肺残留測定の場合）、バイオアッセイ測定から評価される実効線量は、パラメータ値の選択に対して比較的影響を受けない。しかし、肺線量が実効線量に支配的に寄与する場合や尿モニタリングが用いられる場合など、測定量が実効線量と密接に関連しない場合には、パラメータ値に対する影響ははるかに高いかもしれない。そのようなケースの場合、尿モニタリングの結果は全身の臓器に対する線量の信頼できる尺度を提供しうるが、評価された肺線量は吸収パラメータ値の選択に対して感度が高い。一例は、不溶性ウラン化合物の吸入摂取後の尿モニタリングデータからの実効線量評価である。

1.8 報告書の構成

(50) 本報告書シリーズは、吸入摂取及び経口摂取による OIR に対する改訂された線量係数を提供し、*Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) 及び *Publication 68* (ICRP, 1994b) に置き換わる。また、バイオアッセイ測定値の解釈のためのデータも提供し、*Publication 54* 及び *78* (ICRP, 1988a, 1997b) に置き換わる。

(51) 本報告書の 2 章は、放射性核種への職業被ばくの管理に対する線量限度及び線量拘束値の適用について論じる。また、規制上の要件の遵守を確実にするために設計されるモニタリングプログラムの目的及び要件の概略についても述べる。3 章では、線量係数及びバイオアッセイ関数を計算するために用いられる体内動態モデル及び線量評価モデルの概要を示す。そこでは *Publication 66* の HRTM (ICRP, 1994a) に加えられる変更を説明するとともに、*Publication 100* の HATM (ICRP, 2006) の主たる特質について述べる。3 章では、元素及びそれらの放射性同位体の全身性体内動態を記述するために本報告書シリーズで用いられるモデルの概論も提示する。線量評価モデル及び ICRP の計算方法論についても説明される。

(52) 個人モニタリング方法の説明は、4 章に与えられる。同章では、作業場モニタリングだけでなく、*in-vivo* 測定並びに排泄物及びその他の生体物質の分析も取り上げる。モニタリングプログラムの設計に関する一般原則、プログラムのタイプ及びモニタリング要件は、5 章に要約される。また、傷口モニタリングと、医学的介入の潜在的な影響も簡単に扱われる。漸及的線量評価の一般的な側面は、6 章において考察される。同章では、被ばく状況及び扱われている放射性核種並びにそれらの物理化学的形態を理解する必要性について考察する。同章では、有効なモニタリングプログラムのための要求事項について論じるとともに、単一の又は複数の測定におけるデータ取り扱いへのアプローチを要約する。バイオアッセイ測定結果の解釈のための体内動態モデルの利用と関連する不確かさは考慮される。

(53) 7 章では、本報告書シリーズの以後の部に含まれる情報のタイプの簡潔な概略を提示する。すなわち、体内動態データ；線量係数；そして個々の元素及びそれらの放射性同位体に関するバイオアッセイ解釈のためのデータである。それぞれの元素の項では、線量係数 [あらゆる関連する放射性同位体の吸入摂取及び経口摂取の場合、 Bq 摂取あたりの預託実効線量及び臓器又は組織に対する預託等価線量 (Sv Bq^{-1})]; 内容量あたりの線量の関数 [全身又は所定の臓器における予測放射能内容量あたり若しくは 1 日の排泄あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1})]; 及び標準バイオアッセイ関数 [吸入摂取又は経口摂取による単位摂取 (すなわち、 1 Bq) 後のさまざまな時間における、全身又は特定の臓器内に残留される若しくは尿又は糞中に排泄される放射能値 (Bq)] を提示する。データは、シリーズの印刷された報告書及び電子付属文書に提示される。

(54) 印刷された報告書に提示されるデータは、摂取量あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1}) の表、内容量あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1}) の表、そして標準バイオアッセイ関数に関するグラフに限られる。データは、最も一般的な同位体のあらゆる吸収タイプ、並びに $5 \mu\text{m}$ の AMAD について提示される。十分な情報が利用可能なケースでは (主としてアクチニド元素について)、異なる化学的形態について肺吸収が明示され、それに応じて線量係数及びバイオアッセイ関数が計算される。

(55) 本報告書シリーズに付随する電子付属文書は、*Publication 107* (ICRP, 2008) に示されほとんどの同位体並びにさまざまな物理化学的形態及びエアロゾルの AMAD について、預託実効及び等価線量係数、内容量あたりの線量の関数、そして標準バイオアッセイ関数の包括的な

セットを含む。経口摂取による取り込み及び血液への直接注入に関するデータも与えられる。電子付属文書は、ユーザーが直接又は付随するデータビューアの利用によってアクセスすることができる一連のデータファイルとして、線量係数及びその他の放射性核種固有データを提供する。データビューアは、データセットの迅速な閲覧並びに摂取後の時間の関数としての内容量あたりの線量値又は線量あたりの予測放射能含有量 (Bq Sv⁻¹) の時系列グラフなど、図表形式でのデータの視覚化を可能にする。

2 作業における放射性核種の内部被ばくモニタリング及び評価

2.1 作業者の線量の評価

(56) 職業被ばくにおいては、線量は外部放射線源と内部放射線源の両方から受けることがしばしばある。外部被ばくの適及の評価の場合、個人モニタリングは通常、個人線量計を用いて個人線量当量を測定し、この測定値を実効線量の受け入れられる推定値とみなすことによって実施される (ICRP, 2010)。内部被ばくの適及の評価の場合、預託実効線量は、体内、バイオアッセイ試料中もしくは作業場内の放射性核種の放射能測定値から決定される。

(57) 1.1 節に示したように、作業者の記録線量 E は、以下のように推定されるべきである。

$$E \cong H_p(10) + E_{(50)} \quad (2.1)$$

ここで、 $H_p(10)$ は測定された個人線量当量であり (外部被ばく)、 $E_{(50)}$ は以下の式によって評価される、内部被ばくによる預託実効線量である。

$$E_{(50)} = \sum_j e_{j,inh}(50) \cdot I_{j,inh} + \sum_j e_{j,ing}(50) \cdot I_{j,ing} \quad (2.2)$$

ここで、 $e_j(50)$ は、放射性核種 j の吸入摂取 (inh) 及び/または経口摂取 (ing) による預託期間 50 年の線量係数 (単位摂取量あたりの預託実効線量, Sv Bq⁻¹) である。摂取量 I_j (Bq) は、1 つのまたはいくつかの放射性核種 j に対応する場合がある。

2.2 モニタリングの目的

(58) 放射性核種の内部被ばくモニタリングの目的は、当該作業者が放射線リスクに対して十分に防護されていることを、また、提供される防護が法的要件に従うものであることを検証し記録することである。作業者の内部被ばくのモニタリングは、2 つのタイプに分別できる。すなわち、個人モニタリングと作業場モニタリングである。

(59) 内部被ばくの個人モニタリングには、必要ならば他の線量計測量とともに、その記録線量の評価のために個々の作業者について行う測定を利用する。計画状況及び現存状況における個人モニタリングの主たる目的は、以下のとおりである。

- 作業者の記録線量を評価するとともに規制要件の遵守を実証すること
- 施設の操業の安全管理及び制御に寄与すること

(60) 緊急時状況における個人モニタリングの主たる目的は、以下のとおりである。

- 記録線量によって、また、しかるべき場合は有意に被ばくした臓器または組織における吸収線量によって、作業者の被ばくを記録すること
- しかるべきいかなる健康監視及び治療についての開始及び支援のための情報も提供すること

(61) 通常、年線量が線量限度に対してわずかであると予想される場合には、規制要件の遵守を実証するための単純な線量評価のみが必要となる。線量が比較的高い場合には、特定の線量評価及びいかなる被ばくの事情にも重点を置くことが必要になる。

(62) 測定により、作業場に関する情報とともに、それぞれの放射性核種が特定され、その放射能が定量化される必要がある。そして、測定結果を摂取量及び/または預託実効線量によって判断することが可能であるべきである。個人モニタリング手法が線量を評価するのに適切ではないような事情がいくつか存在する場合もあり、個人モニタリング手法と作業場モニタリング手法を組み合わせることが必要な場合もある。

(63) 内部被ばくの作業場モニタリングには、作業環境中で行う測定を利用する。一例は、固定式空気サンブラを用いた空気中放射能濃度の測定である。一般に、作業場モニタリングは個人モニタリングを補完するものであり、個人モニタリングが正当化されない場合もしくは個人モニタリングの感度が不十分な場合に、個人モニタリングの代わりに内部被ばくのモニタリングのために用いられることがある。これは作業者のグループについての被ばく評価に用いることができるが、被ばく条件の仮定が必要である。作業場モニタリングはまた、作業条件が安全基準を満たしており、変化していないことを実証する際にも有用である。さらに、作業環境中への放射性核種の放出の指標となり、したがってその後の個人モニタリング測定のきっかけとなる可能性がある。

2.3 個人モニタリングプログラムのカテゴリー

(64) 日常モニタリングは、通常操業の結果として、作業場の汚染リスクが本質的に継続する条件下で、もしくは、検知されていない偶発的な摂取が起こる可能性がある場合に実施される。日常モニタリングプログラムにおける測定は、既知の摂取とは関連しないあらかじめ決められた時間に行われるため、摂取のパターンについていくつかの仮定を行う必要がある。国または地方の法律または規則は、被ばくが線量限度または線量拘束値の特定の割合を超えるおそれのある場合に必要とされるだろう体系的な日常モニタリングに関する要件を定めるものであってもよい。

(65) 特定の職務と関連して、もしくは現実のまたは疑われる異常事態における摂取量を決定するために実施されるだろうモニタリングプログラムもある。これらの事情においては、摂取の時間または潜在的摂取量はおそらくわかっており、作業場モニタリングプログラムは、あらゆる汚染の物理的及び化学的性質についても何らかの情報を提供する可能性がある。特殊モニタリングは、現実のまたは疑われる異常事態に伴う有意な被ばくを定量化するために実施する。確認モニタリングは、被ばく条件について行った仮定を確認する必要がある場合に実施する (たとえば、防護措置の有効性を確認するために)。作業関連モニタリングは、特定の作業に携わる作業員に対して行う。

2.4 個人モニタリングの必要性

(66) 雇用主及び/または免許所有者の重要な職務は、線源の管理を維持することならびに職業上被ばくする作業員の防護を確実にすることである。これを達成するために、委員会は引き続き、管理区域と監視区域の分類を勧告する (ICRP, 2007)。管理区域には、通常被ばくの管理または通常操業時の汚染の拡大防止のために、また偶発的な被ばくの防止またはその範囲の制限のために特定の防護措置及び安全規定が必要とされる。監視区域には、放射線状態は常に調査対象とされるが、特別な手順は通常は必要とされない。

(67) 個人モニタリングが必要とされる作業員のグループを特定することが必要である。個人モニタリングの実施の決定は、多くの因子に依存する。放射性物質の摂取に関する個人モニタリングは、特に汚染管理と関連して管理区域に指定され、かつ、有意な摂取を排除できない区域で働く作業員に対して日常的に行われるべきである。

(68) 管理区域内の作業員は、作業場で受ける放射線被ばくについて最も頻繁にモニタリングが行われ、特別な医学的監視を受けることもあるグループである。これらの作業員は、十分に情報を与えられ、特別に訓練されるべきであり、容易に識別できるグループを形成すべきである。

(69) 年実効線量が 1 mSv を超える作業員に対する個人モニタリングの利用は多くの組織において共通の慣行であるとはいえ、それは法

律による要求ではないかもしれない。規制上、技術上及び管理上の考慮は、少なくともその評価が容易かつ実地的であるような放射性核種については、比較的低いレベルにおける個人線量評価の根拠を裏付ける場合がある。

(70) 経験によれば、以下の作業のタイプは、作業員の内部被ばくに関する日常個人モニタリングに考慮を払う必要がある。

- 大量の気体状及び揮発性物質の取り扱い (たとえば、大規模な生産工程、重水炉や発光体製造におけるトリチウム及びその化合物の取り扱い)
- 原子炉施設の保守
- 放射性廃棄物の取り扱い (たとえば、原子力施設や病院からの)
- プルトニウム及びその他の超ウラン元素の加工
- トリウム鉱石の加工ならびにトリウム及びその化合物の使用 [これらの放射能は、放射性粉塵とトロン (^{220}Rn) 及びその子孫核種の両方による内部被ばくにつながりうる]
- ウラン鉱石の採鉱、粗製錬及び精製錬
- 天然及び濃縮ウランの処理ならびに燃料加工
- 大量の自然起源放射性物質を用いる作業
- 放射性医薬品の製造
- 大量の医療用 ^{131}I の取り扱い

(71) 作業場モニタリングの結果も、作業場の日常モニタリングプログラムの必要性を確認することを目的とする臨時の特殊個人モニタリングプログラムの必要性を示唆することがある。

2.5 妊娠及び授乳

(72) 妊娠している女性に対する作業場における防護方法は、公衆の構成員に対してとおおむね同様のレベルの胚/胎児に対する防護を実行すべきである、というのが委員会の方針である (ICRP, 2007)。委員会は、妊娠の申告に先立つその母親のいかなる被ばくも委員会によって勧告された防護体系に基づいて管理されるならば、この方針は十分に適用されると考える。ひとたび妊娠が申告され、雇用主がその届け出を受けたなら、胚/胎児に対する追加的な防護が考慮されるべきである。妊娠を申告した後の作業員の作業条件は、胎児に対する追加の外部

被ばく線量が、妊娠前及び妊娠中の放射性核種の摂取による胎児及び新生児に対する預託実効線量と合わせて、およそ 1 mSv を超えることがないようにすべきである。

(73) ICRP は *Publication 88* 及び *95* (ICRP, 2001, 2004) の中で、妊娠前または妊娠中もしくは授乳中のいずれかにおける女性作業員の放射性核種の摂取に続いて生じる、胚、胎児及び新生児に対する線量に関する情報を提供している。*Publication 88* (ICRP, 2001) に示されている胎児の線量係数と対応する成人の線量係数の比較では、妊娠前または妊娠中に女性が摂取によって受ける線量はほとんどの場合、その胎児に対する線量よりもかなり大きくなることが示された。しかし、いくつかの放射性核種では、子に対する線量はその母親に対する線量を上回る可能性がある。特に、とりわけ妊娠後期の胎児成長においては、骨格の発達に必要なリン及びカルシウムの、また程度は劣るがその他のアルカリ土類金属の取り込みが放射性同位体の相当な取り込みにつながりうる。したがって、成人の線量に対する子の線量の比率は、P 及び Ca の同位体の場合でおよそ 10~20、Sr の同位体の場合で 2~6 という倍率に達した (Stather et al., 2003 ; ICRP, 2004)。胎児の甲状腺によるヨウ素の放射性同位体の取り込みによる線量も、妊娠後期における摂取によって生じる母親の線量を上回る可能性がある (線量比は最大でおよそ 3) (Berkovski et al., 2003b)。胎児に対する線量が母親に対する線量を上回る可能性がある他の放射性核種には、トリチウム水としてのトリチウム、¹⁴C 及び ³⁵S がある。成人の線量に対する子の線量の比率は、可溶性 (タイプ F) の形態の経口摂取または吸入摂取後に最大となる。成人の線量に対する子の線量の比率は、*Publication 103* (ICRP, 2007) 及び関連する変更により、将来的な計算の結果として変化する可能性がある。子の防護は、この線量比が <1 のときにも重要である場合がある。そうでないならば容認できる職業上の線量レベルにおいて、胚、胎児または新生児に対する実効線量が 1 mSv に達するかもしれないためである (Phipps et al., 2001)。

(74) ある作業員が妊娠を申告した場合、その子供の考えうる線量は、被ばくを制限するための対策において考慮されることになる。したがって、妊娠後期における摂取に起因する子の線量は実際には、妊娠の申告前の摂取に起因する線量よりも重要ではないかもしれない。このカテゴリにおいて潜在的に重要ないくつかの放射性核種は、⁶³Ni や ⁵⁵Fe を含めて特定されている (Phipps et al., 2001 ; NoBke and Karcher, 2003)。

(75) 一般に、母乳によって経口摂取される放射性核種に起因する乳児の線量は、標準成人の線量と比較して小さいと推定される (ICRP, 2004)。*Publication 95* (ICRP, 2004) において開発されたモデルに基づくと、乳児の線量が成人の線量を 1~3 の倍率で上回ることがあるのは、トリチウム水、⁴⁵Ca、⁷⁵Se 及び ¹³¹I の場合のみである。乳児の線量は、経口摂取が出生直後に起こる場合に最大となる。これは、これらの条件下で移行が最大となるためである。成人の線量に対する乳児の線量の比率は一般に、経口摂取の場合よりも吸入摂取による場合の方が低い。*Publication 88* (ICRP, 2001) における子宮内被ばくによる子の線量との比較は、これらの線量は授乳に起因するであろう線量よりも重要であることを示しており、例外に含まれるのは ⁶⁰Co、¹³¹I 及び ²¹⁰Po である。ICRP は、近い将来にこれらの線量係数の改訂を提示する意向である。

3 体内動態モデル及び線量評価モデル

3.1 緒言

(76) 本章では、線量係数及びバイオアッセイ関数を計算するために用いられる体内動態モデル及び線量評価モデルの概要を示す。本章では、本書で HRTM (ICRP, 1994a) に加えられる変更を説明するとともに、HATM (ICRP, 2006) の主たる特徴について述べる。また、元素及びそれらの放射性同位体の全身性体内動態を記述するために本報告書シリーズにおいて用いられるモデルの概論も提示する。線量評価モデルと方法についても説明される。

(77) 作業場における放射性核種への曝露は、いくつかの経路による摂取をもたらす。すなわち、吸入摂取、経口摂取、そして無傷の皮膚及び創傷を通じた侵入である。図 3.1 は、摂取経路、体内移行及び排泄経路を要約したものである。

(78) 吸入摂取については、*Publication 68* (ICRP, 1994b) 及び線量係数に関する以後の刊行物 (ICRP, 1995c, 1996) において HRTM (ICRP, 1994a) が適用された。HRTM を取り込むにあたり、*Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) において吸入のクラス D、W 及び Y に割り当てられていた放射性核種の化学形がそれぞれ、HRTM の吸収タイプ F、M 及び S に割り当てられた。本報告書シリーズにおける元素の項目では、HRTM の枠組み内で、それぞれの元素の異なる化学形態の肺クリアランス特性に関する情報が精査される。1.5.2 項で要約し、3.2 節及び付属書 A に述べるように、機会をとらえて、*Publication 66* (ICRP, 1994a) の発行以後に利用可能となった情報を考慮して HRTM のいくつかの側面の更新が行われている。

(79) 放射性核種の経口摂取については、HATM (ICRP, 2006) が適用される。このモデルは、吸入摂取後に呼吸気道から咽喉へと除去される粒子中の放射性核種についても用いられる。HATM においては、放射性核種の吸収割合は、*Publication 30* (ICRP, 1979a) に述べられている胃腸管モデルに対して与えられたような f_1 値の代わりに、消化管移行係数 f_a によって特定される。 f_a 値は消化管のあらゆる領域からの総吸収を描写するものであるが、あらゆる吸収は小腸において起こるというのが初期の仮定である。

(80) ICRP は概して、創傷部位から血液中ならびにその他の臓器及び組織へと移行する放射性核種の摂取による線量の評価に関する助言は提供してこなかった。創傷に起因する内部被ばくはほぼ常に、通常の管理された作業環境下にある日常作業の結果としてよりもむしろ、作業場における事故のために起こる。創傷からの取り込みはそれぞれの事象の状況次第で大きく変化する可能性があり、実際には、内部汚染の評価はケースバイケースで扱われる。結果として、標準的な線量係数またはバイオアッセイ関数の提示は、価値が限られたものとなるだろう。しかし、創傷部位からの放射性核種の移行に関する情報は、米国放射線防護測定審議会 (NCRP) の科学委員会によってレビューされており、

これらのデータは、異なる物理化学的形態に対して、摂取後の創傷からの物質の移行を記述するためのモデルを開発するために利用されている (NCRP, 2006)。3.4 節では、この NCRP モデルの主な特徴を要約する。この情報は創傷汚染の個々のケースに対応するバイオアッセイデータの解釈において有用かもしれないためである。

(81) NCRP の創傷モデルなどのモデルを用いて個々のケースについて計算された、創傷部位からの放射性核種の時間依存取り込み速度は、これらの取り込み速度を OIR 電子付属文書に示されている血液への直接急性摂取の場合の線量係数と畳み込むことによって線量推定値を計算するために用いることができるだろう。同様に、個々のケースに対応するバイオアッセイデータは、時間依存取り込み速度を、同様に OIR 電子付属文書に示されている血液への直接急性摂取の場合の時間依存標準バイオアッセイ関数と畳み込むことによって予測することができるだろう。無傷の皮膚を経た放射性核種の時間依存取り込み速度が計算されているならば、同様の分析を行うことができるだろう。

(82) それぞれの摂取経路において、体内に入る放射性核種の一部は、血液中に吸収され全身に分布する。体内の放射性核種の全身性分布は、トリチウム水やカリウム及びセシウムの放射性同位体の事例のように、広がりがあり比較的均等でありうる場合や、ヨウ素 (甲状腺)、アルカリ土類金属 (骨) やプルトニウム (骨及び肝臓) の放射性同位体の例のように、ある臓器または組織に局在する場合もある。全身性体内動態モデルは、血液中に吸収される放射性核種の分布及び排泄を記述するために用いられる。それらの元素に対応する全身性モデルは、より最新の情報を考慮に入れるために必要に応じて精査され修正されており、線量評価とバイオアッセイ解釈のいずれにも適切なモデルを提供している。

(83) 沈着した物質の体内からの除去は、主として尿中及び糞中排泄によって起こるが、放射性核種は呼吸によってまたは皮膚を通じて失われる場合もある (たとえば、トリチウム水)。尿中排泄は、腎臓による濾過に続く、放射性核種の血液からの尿中への除去である。糞中排泄には 2 つの成分がある。すなわち、肝臓からの胆汁分泌及び消化管に沿った他の部位における分泌物による、消化管を通しての全身性物質の除去を表す全身性 (内因性) 糞中排泄；及び、経口摂取後にもしくは吸入摂取後の呼吸系から咽喉へのクリアランス後に吸収されずに消化管を通り抜ける物質の直接 (外因性) 糞中排泄である。本章で概略を述べる標準モデルは標準パラメータ値を割り当てられ、急性または慢性摂取後のある時間における体内または臓器の内容及び 1 日あたりの尿中または糞中排泄量を計算するために用いられる。これらのモデルは、標準バイオアッセイ関数を、また線量評価データと合わせて標準線量係数を計算するために用いられる。標準作業には、軽作業に従事する健康で非喫煙の通常の鼻呼吸者である成人男性の沈着及びクリアランスパラメータが割り当てられた。軽作業は、次を根拠に定義される：2.5 時間の着座、その間の吸入量は $0.54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ；及び 5.5 時間の軽運動、その間の吸入量は $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 。いずれのレベルの活動の場合も、吸入空気はすべて、鼻を通して入る。

3.2 ヒト呼吸気道モデル

(84) *Publication 66* (ICRP, 1994a) に述べられている HRTM は、作業員及び公衆の構成員の場合の吸入摂取線量係数を計算するために *Publication 68*, 71 及び 72 (ICRP, 1994b, 1995c, 1996) において、またバイオアッセイ関数を計算するために *Publication 78* (ICRP, 1997b) において適用された。その利用に関するさらなるガイダンスは、ICRP (2002b) に示された。

(85) 以下に述べるように、本報告書シリーズにおいては HRTM の修正バージョンが用いられる。本節では、もとの HRTM からの単純な変更について言及する。なされた主な変更は、粒子輸送と血液中への吸収の両方による、沈着した物質のクリアランスと関連する。これらの変更は、関連する最近の情報の精査及び分析ならびに HRTM への変更を行うかの判断を含んだものである。それらについては付属書 A に述べる。

(86) HRTM のもとのバージョンと同様に、呼吸気道は 2 つの組織として扱われる。すなわち、胸郭外 (ET) 気道と胸郭内 (TH) 気道である。これらの組織の領域への細分は、主として放射線に対する感受性の違いに基づくものだった。TH 領域は、気管支領域 (BB：気管、気道分岐 0；気管支、気道分岐 1~8)、細気管支領域 (bb：気道分岐 9~15)、AI 領域 (ガス交換領域、気道分岐 (16)、そして TH リンパ節 (LN_{TH})) である。ET 領域は、前部鼻道 (ET₁)；後部鼻道、咽頭及び喉頭 (ET₂)；そして ET リンパ節 (LN_{ET}) である (図 3.2)。HATM との一貫性のために、口腔はもはや、*Publication 66* (ICRP, 1994a) においてはそうだったように領域 ET₂ に含まれるのではない。このことは、このモデルを用いて得られる結果に影響を及ぼさない。口に入る空気からの ET における沈着は喉頭においてのみ起こるとみなされたためである。

3.2.1 沈着

(固体または液体) 粒子状物質のエアロゾル

(87) *Publication 66* (ICRP, 1994a) に述べられている沈着モデルは、実際上関心のあるすべてのエアロゾルサイズ (0.6 nm~100 μm) について、各領域におけるエアロゾルの沈着割合を評価するものである。ET 領域については、測定された沈着効率が粒径及び気流の特性パラメータと関連づけられ、他の条件 (たとえば、年齢や性別) に基づいて沈着を予測するために、解剖学的寸法によってそのスケールが行われた。TH 気道については、BB、bb 及び AI 領域それぞれにおける粒子沈着を計算するために、また、対象者の肺の大きさ及び呼吸率の影響を定量化するために、ガス輸送及び粒子沈着の理論的モデルが用いられた。粒子沈着をモデル化するために、これらの領域は、吸息時と呼息時の両方における一連のフィルタとして扱われた。それぞれの効率は、競合的に作用する空気力学的過程 (重力沈降、慣性衝突) 及び熱力学的過程 (拡散) を考慮することによって評価された。各領域への沈着割合は、0.6 nm における 1.0 の値からおよそ 1 μm 超では 2.5 の値へと増加する、粒子中央径の関数であるとみなされる幾何標準偏差をもつ対数正規粒径分布のエアロゾルについて計算された。

(88) 領域 ET ₁ と ET ₂ の間の ET 気道における沈着物の分布を除いて、 <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) におけるエアロゾルに関する沈着モデルの導入には、本書ではいかなる変更も加えない。付属書 A に述べるように、ET 気道における総沈着量は今や、65%が ET ₁ 、35%が ET ₂ へと分割される [およそ 50%が ET ₁ 、50%が ET ₂ であった <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) を置き換え]。
(89) 職業被ばくの場合、AMAD として一般に勧告される初期設定値は 5 μm であり (ICRP, 1994b)、これは以前に ICRP (2002b, B9 項) によって述べられているように、Dorrian and Bailey (1995)、Kelso and Wraight (1996) 及び Ansoborlo et al. (1997) によるデータのレビューと一致している。数ミクロンの AMAD は、分散メカニズムによって生成されるエアロゾルに特有である。しかし、ラドンの短寿命子孫核種はエアポーン自由イオンとして形成され、これは微量ガス及び蒸気と急速に反応し、直径がおおよそ 1 nm の粒子を形成する (「非付着子孫核種」)。これらの粒子は次には、空气中に存在するエアロゾル粒子に付着するかもしれない (「付着子孫核種」)。適切な粒径分布は、ラドンの吸入摂取の項目において勧告される [詳細は OIR : Part 3 (ICRP, 2016b) を参照]。
(90) 標準作業者の呼吸気道のそれぞれの領域における沈着割合の値を、AMAD が 5 μm のエアロゾルについて表 3.1 に示す。他のサイズのエアロゾルに対応する値は、付属書 A に示す。
ガス及び蒸気
(91) エアロゾルとして吸入摂取される放射性核種の場合、HRTM では、呼吸気道における総沈着量及び領域別沈着量は吸入された粒子の粒径分布によってのみ決定されると仮定する。ガス及び蒸気の場合には状況が異なり、呼吸気道における沈着は完全に化学形に依存する。これに関して、沈着とは、吸入空気中の物質のどのくらいの量が呼息後に体内にとどまるのかをいう。吸入されたガス分子はほとんどすべて気道表面に接触するが、それらが表面被膜に溶解または反応しない限り、通常は空気中へと戻る。したがって、吸入されたガスまたは蒸気のうち、それぞれの領域に沈着する割合は、その可溶性及び反応性に依存する。
(92) 粒子状放射性核種に関しては、より詳細な情報がない場合に用いるために初期設定パラメータ値が用意される。ガス及び蒸気の場合の一般的な初期設定値は、呼吸気道における 100%の総沈着であり (領域別沈着：20%が ET ₂ 、10%が BB、20%が bb、そして 50%が AI)、タイプ F の吸収 (3.2.3 項) を伴う。この分類は <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) に勧告されているものとは少し異なるが、適用するのはより容易である。特に、ET ₁ には沈着がないことが初期設定により仮定される。 <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) に述べられている SR-0、-1、-2 の分類は有用ではないことがわかっており、本書では用いられない。
(93) 本報告書シリーズでは、水素、炭素、硫黄やヨウ素など、いくつかの元素のガス及び蒸気形態の化合物についてパラメータ値が採用される。どのケースにおいても、総沈着、領域別沈着及び吸収について値が示される。

3.2.2 クリアランス：粒子輸送
(94) このモデルは、呼吸気道からの複数のクリアランス経路を記述するものである (図 3.3)。ET ₁ に沈着した何らかの物質は、鼻をかむなどの外的手段によって除去される。他の領域では、クリアランスは、消化管及びリンパ節への粒子の移動 (粒子輸送) と、呼吸気道における粒子からの物質の血液中への吸収の間で競合的に起こる。粒子輸送による除去速度と血液中への吸収による除去速度は、互いに無関係であるとみなされる。さらに、クリアランス速度はすべて、年齢及び性別とは無関係であると仮定される。
(95) もとの HRTM と同様に、粒子輸送速度はあらゆる物質について同一であると仮定される。したがって、あらゆる物質の粒子輸送を記述するために汎用コンパートメントモデルが用意される。本書で採用される修正粒子輸送モデルを図 3.4 に示す (もとのモデルは、行われた修正の背景及び修正モデルにおけるパラメータ値の選択に関する詳細とともに、付属書 A に示す)。速度定数の標準値は、可能な限りヒトについての研究から導き出された。粒子輸送速度は哺乳類の種の間で大きく異なることがわかっているためである。
(96) 誘導気道 (領域 ET ₁ 、ET ₂ 、BB 及び bb) に沈着した物質のほとんどにおけるクリアランス速度は、人のボランティア実験の結果に基づいている。鼻呼吸においては、ET 気道における沈着物のおおよそ 65%が ET ₁ に沈着し、おおよそ 8 h の半減期 (2.1 d ⁻¹ の速度) で、おおよそ 3 分の 1 は鼻をかむことによって、3 分の 2 は ET ₂ への移行によって除去される。これは、コンパートメント ET ₁ から環境へは 0.6 d ⁻¹ 、ET ₁ からコンパートメント ET ₂ へは 1.5 d ⁻¹ の粒子輸送速度で実現される (図 3.4)。ET ₂ に沈着したもしくは他の領域 (ET ₁ 及び BB) から ET ₂ へと移行したほとんどの粒子は、粘膜繊毛運動によって咽喉へと急速に除去され、おおよそ 10 分の時間尺度で飲み込まれる。これは、100 d ⁻¹ の速度でのコンパートメント ET ₂ から食道へのクリアランスによって表される。
(97) 気管支樹の至る所において (領域 BB 及び bb)、粘液速度は一般に気管に向かって増大するため、滞留時間は、最小で最末端の細気管支における数日から気管及び主気管支における 1 時間未満の範囲である。これは、コンパートメント bb' からコンパートメント BB' への 0.2 d ⁻¹ のクリアランス速度 (おおよそ 3.5 d の半減期) 及び BB' から ET ₂ への 10 d ⁻¹ のクリアランス速度 (おおよそ 2 h の半減期) によって表される。
(98) 複数の動物の種における実験は、誘導気道に沈着した粒子のうち気道壁において保持される (隔離される) 割合は極めて小さいことを示している。これを考慮に入れるために、領域 ET ₂ 、BB 及び bb に沈着した物質の 0.2% は気道壁において保持される (それぞれコンパートメント ET _{seq} 、BB _{seq} 及び bb _{seq}) と仮定される。物質は、0.001 d ⁻¹ の速度 (おおよそ 700 d の半減期) でこれらのコンパートメントから領域リンパ節へと除去される。
(99) ヒトの肺クリアランスは、吸入摂取後おおよそ 1 年までの期間にわたる複数の実験的研究において定量化されており、AI 領域における

沈着物のおよそ 50% がその期間中とどまった。職業被ばく後の胸部中放射能の測定及び解剖時の肺中放射能の測定は、一部の物質は数十年にわたって肺内に保持されうることを示している (ICRP, 1994a)。付属書 A に述べるように、これは修正モデルにおいて、肺泡コンパートメント (ALV) における沈着によって表される。その除去の全体の速度は 0.003 d^{-1} (およそ 250 d の半減期) であり、このうち気管支樹 (コンパートメント bb') へは 0.002 d^{-1} の速度で、間質コンパートメント (INT) へは 0.001 d^{-1} の速度で除去される。INT コンパートメントは、領域リンパ節へと、極めてゆっくり除去される (0.00003 d^{-1} の速度)。したがって、AI 領域における沈着物のおよそ 33% は間質において隔離される。

(100) 図 3.4 はそのまま、不溶性物質の残留及びクリアランスを記述するであろう。しかし、上で指摘したように、一般的には同時に血液中への吸収が存在する。

3.2.3 クリアランス：血液への吸収

(101) 血液への吸収は、沈着した物質の物理的及び化学的形態に依存する。元の HRTM と修正 HRTM のいずれにおいても、いかなる吸収も起こらないと仮定される ET_1 を除いて、吸収はあらゆる領域 (リンパ節を含む) において同じ速度で起こると (初期設定として) 仮定される。吸収は、誘導気道 (ET, BB 及び bb 領域) より空気血液開門が薄い AI 領域において、より速くなりそうであると認められる。しかし、異なる領域に対して異なる速度を与えるスケーリング係数のような、領域による吸収速度の違いを考慮するための一般的で系統的な根拠を提示するための情報は不十分である。

(102) HRTM では、吸収は 2 段階のプロセスとして扱われる。すなわち、血液中に吸収されうる物質への粒子の解離 (溶解) と、可溶性物質及び粒子から解離した物質の血液への吸収 (取り込み) である。いずれの段階についても、関連するクリアランス速度は時間に依存しうる。

溶解

(103) 元の HRTM と修正 HRTM のいずれも、時間依存溶解を表現するために同じ単純なコンパートメントモデルを用いる。ある割合 (f_r) は速度 s_r で比較的速やかに溶解し、残りの割合 ($1-f_r$) は速度 s_s でより遅く溶解すると仮定される [図 3.5(a)]。

(104) この体系の制限は、全体の溶解速度が時間とともに減少することを表現できるに過ぎないことである。これを克服するために、Publication 66 (ICRP, 1994a) は、図 3.5(b) に示されている、より柔軟な体系も記述している。この体系では、呼吸気道に沈着した物質は「初期状態の粒子」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、そこでは一定速度 s_p で溶解する。物質は同時に、「変移状態の粒子」と名づけられた対応するコンパートメントへと移行し (一定速度 s_{pt})、そこでは異なる溶解速度 s_t を有する。この体系を用いると、初期溶解速度はおよそ s_p であり、最終溶解速度はおよそ s_t である。したがって、 $s_t > s_p$ を含めて適切なパラメータ選択を伴うならば、増大する溶解速度

を表現することができる。 s_{pt} に対する s_p の比率は、速やかに溶解する割合に近似する。

(105) 図 3.5(a) に示されているモデルを用いて表現することができるいかなる時間依存溶解挙動も、適切なパラメータ選択を伴うならば図 3.5(b) に示されているモデルを用いることによっても表現できると指摘してもよい。したがって、通常はそうであるように、溶解速度が時間とともに減少する場合には、いずれの体系も使用可能であり、以下の値を用いれば同じ結果を示すだろう。

$$\begin{aligned} s_p &= s_s + f_r(s_r - s_s) \\ s_{pt} &= (1 - f_r)(s_r - s_s) \\ s_t &= s_s \end{aligned} \quad (3.1)$$

しかし、上述のように、逆は真ではない。

(106) 図 3.5(b) に示されている体系は、以前の刊行物 (ICRP, 1994b, 1995c, 1997b) では初期設定として適用された。しかし、それがもたらすさらなる柔軟性が実際に必要とされることはまれであり、表現するのがより複雑である (かつ、直観的なわかりやすさに劣る)。したがって、図 3.5(a) に示されているより単純なアプローチが今や初期設定として採用され、より柔軟なアプローチは選択肢として保持される。ウランアルミナイドを含めた、「初期状態の粒子」及び「変移状態の粒子」によって表現されている、時間とともに増大する溶解速度を示す物質の例は、本シリーズの以後の報告書における元素の節に示される。

取り込み

(107) 溶解物質の血液への取り込みは、通常、瞬時に起こると仮定される。しかし、元素によっては、溶解物質の一部は速やかに血液に吸収されるが、呼吸気道の成分との結合のために、かなりの割合がより遅く吸収される。時間依存取り込みを表現するために、溶解物質のある割合 (f_b) は「結合」状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合 ($1-f_b$) は瞬時に血液に入ると仮定される (図 3.5)。このモデルでは、「結合」状態の物質は、粒子輸送プロセスによってではなく、血液への取り込みによってのみ除去される。したがって、そこからはいかなる吸収も起こらない ET_1 を除いて、それぞれの領域について「結合」コンパートメントが 1 つのみ必要とされる。

(108) 図 3.5 に示されている体系は、図 3.4 に示した粒子輸送モデルにおけるコンパートメントのそれぞれにあてはまる。 ET_1 からはいかなる吸収も起こらないと仮定されるが、図 3.5(a) におけるモデルが用いられる場合には、 ET_1 沈着物がそれでもなお、速い吸収のコンパートメントと遅い吸収のコンパートメントに分割されなければならない。物質が ET_1 から、そこから吸収が起こる ET_2 へと除去されるためである。

(109) どの元素についても、パラメータの初期設定値は、吸収速度が速い (タイプ F)、中位 (タイプ M)、又は遅い (タイプ S) かどうかに従って勧告される。ガス又は蒸気については、血液への瞬時の取り込みが勧告される場合がある [タイプ V (非常に速い)]。
(110) タイプ F、M 及び S の場合の当初の初期設定値 [Publication 66 (ICRP, 1994a) に示されており、付属書 A の表 A.3 に再掲する] は、実験データのレビューに基づくものではなく、粒子輸送速度との比較に基づくものだった。例えば、速い溶解速度 s_r に対する 100 d^{-1} という値は、鼻 (ET ₂) から咽喉への粒子クリアランス速度に等しくするために選択された。
(111) 本報告書の以後の部を作成するに際しては、放射線防護と関連する吸入物質の吸収特性について詳細なレビューが実施された。それらは、それぞれの元素の吸入摂取の節に要約される。
(112) 情報が得られた場合、固有のパラメータ値は、インビボ研究とインビトロ研究の両方による実験データから導き出された。付属書 A に述べるように、これらは、一般的に「速い」、「中位の」又は「遅い」速度で除去されるとみなされる物質の代表値の選択に関するガイダンスを提供するためのデータベースをもたらした。これに基づき、タイプ F、M 及び S の初期設定値として選択された値は、本報告書シリーズで用いられる修正 HRTM に採用されている (下記を参照)。
(113) 限られた数の選ばれた物質、すなわち以下のような物質については、物質固有の吸収速度が元素の節の中で採用されている (また、付随する電子付属文書には、それらの物質について線量係数及びバイオアッセイ関数が提示されている)。 <ul style="list-style-type: none"> 固有のパラメータ値をそこから導き出すことができるインビボデータが存在する。 さまざまな研究の結果が一貫している。 その物質への職業被ばくが起りそうであるとみなされた。 固有の線量係数及びバイオアッセイ関数を追加的に提示することを正当化するのに十分なほど、固有のパラメータ値がタイプ F、M 及び S の初期設定のパラメータ値とは異なる。
(114) 元素の節を編集する際にレビューされたように、他の物質は、適切な実験データがある場合はそれを使って初期設定のタイプが割り当てられた。Publication 66 (ICRP, 1994a) は、実験結果に基づいて物質を吸収タイプに割り当てるための規準を示さなかった。規準は Publication 71 (ICRP, 1995c) において策定され、その適用は Supporting Guidance 3 (ICRP, 2002b) の中でさらに論じられた。ある吸収タイプに割り当てられるに足る情報がない場合、ほとんどの元素のあらゆる粒子形態についてタイプ M が仮定される。ある物質について急性摂取後 30 d までに血液中に吸収される量が、 0.069 d^{-1} という一定の吸収速度 (10 d の半減期に相当する) を有する仮想的な物質が同一条件下で同じ期間にわたって吸収されるであろう量を上回る場合、タイプ F に割り当てられる。同様に、ある物質について急性摂取後 180 d までに血液中に吸収

される量が、 0.001 d^{-1} という一定の血液吸収速度 (およそ 700 d の半減期に相当する) を有する仮想的な物質が同一条件下で同じ期間にわたって吸収されるであろう量を下回る場合、タイプ S に割り当てられる。
(115) それぞれの元素の粒子状態は、これらの規準を用いて HRTM の初期設定の吸収タイプに割り当てられた。しかし、物質をタイプ S に割り当てるための規準の厳密な適用は、継続期間が少なくとも 180 d の実験を必要とし、これは多くの有用な情報を排除すると思われるため、本文に示すように、場合によっては外挿が用いられている。これらの規準を適用することが可能だった研究については、結果はタイプ F (M 又は S) への割り当て「と整合する」(又は「を与える」) という旨の記述がなされる。結果は特定のタイプを指し示しているが、これらの規準を適用するための情報が不十分だった研究については、結果はタイプ F (M 又は S) の挙動を「指摘する」又は「示唆する」という旨の記述がなされる。呼吸気道からの吸収に関する実験データがほとんど又はまったく存在しない一部の元素については、化学的類推に基づいて物質を初期設定のタイプに割り当てることができるだろう。
(116) それぞれの元素の可溶性 (タイプ F) 形態については、呼吸気道から血液への吸収の全体速度が推定される (情報が得られる場合)。一般に、これは、(a) 沈着した物質の溶解 (飛沫として吸入されたのではないためすでに溶解している場合)；(b) 特に誘導気道における、内膜液を通じた上皮への移行；そして(c) 上皮の全域にわたる移行、を含むプロセスの組み合わせの結果として得られるかもしれない。厳密には、モデル構造の点から、これらのうち最初の 2 つは「溶解」として記述され、速い溶解速度 s_r によって表現されるだろう。なぜならば、当該物質が粒子輸送の支配下にあるのに対して、上皮の全域にわたる移行は、極度に速いのでない限り、結合割合によって表現されるべきだからである。実際には、全体速度のうちそれぞれのプロセスに割り当てられるべき量を評価するのは難しいことがよくあるかもしれないが、単純化のために、吸収全体を表現する s_r が用いられる。しかしながら、 s_r は元素に特有であると仮定され、これは内膜液及び上皮を通じた移行について予想されるだろう。元素の間には、およそ 1 d^{-1} (例えばイットリウム) から 100 d^{-1} (例えばセシウム) に及ぶ、 s_r 値の幅広い変動が認められた。このアプローチの正当化の一部は、 s_r の値は、肺胞領域に沈着した物質よりも誘導気道 (そこでは内膜液が比較的厚い) に沈着した吸入物質の体内動態全体により多くの影響を及ぼす傾向にあるという事実由来である。なぜならば、それは同様の規模の粒子輸送速度 (BB' から ET ₂ への 10 d^{-1} 、ET ₂ から食道への 100 d^{-1}) と競合するからである。 s_r の推定値における元素間の幅広い変動ゆえに、本報告書シリーズでは、この値の推定を行うことができるであろう元素について、元素固有の値が採用される。
(117) 一部の元素の可溶性形態では、溶解した物質の一部は速やかに血液に吸収されるが、かなりの割合はより遅く吸収される。場合によっては、これは粒子状物質 (粒子輸送によるクリアランスの支配下にある) の形成によって表現することができる。しかしながら、一部の溶解物質が肺の構造成分に付着し、血液への吸収によってのみ除去されるように見える場合もある。後者のタイプの時間依存取り込みを表現するために、溶解物質のある割合 (f_b) は「結合」状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合 ($1-f_b$) は瞬時に血液に入る

と仮定される (図 3.5)。粒子状物質への変換による残留よりもむしろ結合状態での保持の証拠は、1 つ以上の形をとるかもしれない (例えば、保持された物質の糞中クリアランスよりもむしろ全身性取り込み；呼吸気道の同じ領域に沈着した不溶性粒子の場合よりも遅いクリアランス；又は放射能の局所的な残留ではなく拡散を示すオートラジオグラフィ)。

(118) 結合状態は主として、肺泡領域からの可溶性物質の遅いクリアランスを考慮に入れるためにこのモデルに包含されたが、初期設定では、すべての領域に同じ結合状態パラメータ値を適用することが仮定されるだろう。場合によっては (例えば、長寿命アルファ放出体の長期的な結合状態)、このことははからずも、BB 及び bb 領域に対する高い線量計算値をもたらすだろう。そして、これらの組織に大きな加重 (按分係数) が与えられているため、肺に対する高い等価線量計算値をもたらすだろう。したがって、本報告書シリーズでは、結合状態が採用される ($f_b > 0$) 元素については、それを裏づけるための実験による証拠があるならば、それは誘導気道 (ET₂, BB 及び bb 領域) において適用されると仮定される。

(119) 呼吸気道からの吸収に関する実験データがほとんど又はまったく存在しない一部の元素については、元素固有の吸収パラメータ値 (s_r , f_b 及び s_b) は化学的類推に基づくものとすることができるだろう。

(120) 上記のとおり、実験データ (インビボ研究とインビトロ研究の両方による) から導き出された固有のパラメータ値は、一般的に「速い」、「中位の」又は「遅い」速度で除去されるとみなされる物質の代表値の選択に関するガイダンスを提供するためのデータベースをもたらした。これは、いくつかの客観的な統計手法によって中心値を導き出しうるであろう代表的な調査ではなかったことを強調しておく。むしろ、それは付属書 A に述べるように、判断情報の基礎をもたらした。修正 HRTM に対応して更新され、本報告書シリーズで適用される初期設定値を表 3.2 に示す。

(121) 近似的半減期として表される初期設定の吸収速度、及び (呼吸気道から) 血液に到達するそれぞれの領域に沈着した物質のうち血液に到達する対応する量は、以下のように要約することができる。

- タイプ V : 100% が瞬時に吸収される。そのような物質の場合、領域別の沈着を評価する必要はない。なぜならば、それらは線量計算において、あたかも血液に直接注入されたかのように扱うことができるからである。
- タイプ F : 30 d⁻¹ という s_r の一般的な初期設定値において、およそ 30 分の半減期で 100% が吸収される。bb 及び AI に沈着したほとんどすべての物質、BB に沈着した物質のおよそ 80%、ET₂ に沈着した物質のおよそ 25%、そして ET₁ に沈着した物質のおよそ 20% が速い吸収である。BB 及び ET₂ に沈着した残りの物質は、粒子輸送によって消化管へと除去される。
- タイプ M : 3 d⁻¹ という s_r の一般的な初期設定値において、およそ 6 h の半減期で 20% が吸収され、およそ 140 d の半減期で 80% が吸収さ

れる。bb, BB, ET₂ 及び ET₁ に沈着した物質のそれぞれおよそ 20%, 5%, 0.5% 及び 0.4% が速い吸収である。AI における沈着物のおよそ 80% が最終的に血液に到達する。

- タイプ S : 3 d⁻¹ という s_r の一般的な既定値において、およそ 6 h の半減期で 1% が吸収され、およそ 7000 d の半減期で 99% が吸収される。bb, BB, ET₂ 及び ET₁ に沈着した物質のそれぞれおよそ 1%, 0.25%, 0.03% 及び 0.02% が速い吸収である。AI における沈着物のおよそ 30% が最終的に血液に到達する。

(122) タイプ F, M 及び S の場合、ET₁ に沈着した物質の一部は外的手段によって除去される。呼吸気道に沈着した物質であって吸収されないものはほとんど、粒子輸送によって消化管へと除去される。リンパ節へと移行した少量は、呼吸気道における場合と同じ速度で引き続き血液に吸収される。

(123) 呼吸気道から消化管へと除去された物質に対する初期設定の仮定として、消化管における吸収割合は f_i と f_A の積であり、ここで f_A は、その元素の比較的可溶性の形態に対する消化管における吸収割合であるとしている (3.3.3 項)。このアプローチは、 f_i は消化管における吸収の点で有効な物質の可溶性割合を意味し、 f_A は可溶性割合の消化管吸収を意味するという考察に基づくものだった。このアプローチの採用においては、消化管における吸収を大きく過大評価しないことが重要であると認識された。なぜならば、これは尿中排泄の予測の過大評価を、そして尿のバイオアッセイ測定による摂取量の過小評価をもたらさうからである。

呼吸気道において生成する子孫核種

(124) 以下は、親核種の吸入摂取後に呼吸気道において生成する子孫核種に明確に適用される。吸入摂取前に生成し、親核種とともに吸入される子孫核種は、一般的に別個の摂取として扱われるため、吸入される子孫核種は、その同位体の元素に応じた体内動態を採用すると仮定される。

(125) Publication 66 (ICRP, 1994a, 272 項) は、以下のことが予想されるであろうと指摘した。

- 粒子が解離する割合は、その粒子の質によって決定され。したがって、吸入物質の溶解パラメータ値は、呼吸気道において生成する子孫核種に適用されるだろう (「共通動態」)。
- ラドンを含めた希ガスとして生成する子孫核種は例外だろう。なぜならば、それらは粒子から拡散するだろうからである。
- 解離した物質の挙動は、その元素の形態に依存するだろう。そのため、例えば、子孫核種に対する結合割合のパラメータ値は、親核種の値と同じではないだろう (「独立動態」)。

(126) それにもかかわらず、従来の HRTM の適用においては [例えば、*Publication 68, 71, 72* 及び *78* (ICRP, 1994b, 1995c, 1996, 1997b)], 希ガスを除いて、呼吸気道において生成するすべての崩壊系列核種に対し、親核種の吸収パラメータ値が適用された (「共通動態」)。関係する問題に対する詳細な検討を経て (付属書 A を参照)、本報告書シリーズでは同じアプローチが採用される。

(127) アルファ崩壊により生成する原子核の反跳は、少なくとも粒子からのラドンの放射メカニズムとしての拡散と同程度に重要でありうるだろう。そのような反跳は、アルファ粒子の放出によって生成する他の子孫核種にもあてはまる。不溶性粒子の場合、親核種と比べて、崩壊系列核種の放射能が親核種と比べて継続的に低いことに帰着するだろう。本報告書シリーズでは、線量係数の計算においてアルファ反跳による子孫核種の喪失を導入するのは実際的ではないとみなされた。しかし、この現象は、特に親核種の摂取量及び線量の検討に子孫核種を用いる場合には留意されるべきである。

(128) それにもかかわらず、親核種とその子孫核種の間で吸収挙動を直接比較できる実験結果がある場合、それらは親元素 (例えば、ウラン、トリウム) の吸入摂取の節に要約される。このような情報は、親核種の摂取量が 1 つ以上の子孫核種の測定によって評価されている場合は特に、個人モニタリングにとって有用かもしれない。

(129) 本報告書シリーズでは、計算の目的のために、呼吸気道内で子孫核種として生成するラドンを含めた希ガスは 100 d^{-1} の速度で人体から漏出するという仮定が適用される。

(130) 呼吸気道から消化管へと除去される物質については、消化管における吸収割合は $f_i \cdot f_A$ であると仮定される (上記を参照)。呼吸気道において生成する子孫核種については、 f_i は呼吸気道に沈着した親核種の f_i (粒子の基質を反映する) であるとみなされるが、 f_A の値は消化管に入る子孫核種と同じであるとみなされる。

(131) 呼吸気道において生成する子孫核種は、血液への吸収後、親核種の子孫核種の元素に適用される全身性モデルに従って挙動すると仮定される。

3.2.4 呼吸気道の線量評価

(132) HRTM の線量評価モデルは、*Publication 66* (ICRP, 1994a) の 8 章に述べられている。線量評価の目的のために、呼吸気道は 2 つの組織として扱われる。すなわち、TH 気道と ET 気道である。これらは、主として放射線に対する感受性の違いに基づいて、領域に細分される。TH 領域は、BB, bb, AI 及び LN_{TH} である。ET 領域は、 ET_1 , ET_2 及び LN_{ET} である (図 3.2)。

(133) それぞれの呼吸気道領域に対する線量は、リスクにさらされる標的細胞を含有する標的領域に対する平均線量として計算される。AI

領域及びリンパ節 (LN_{TH} 及び LN_{ET}) においては、リスクにさらされる細胞は領域の至る所に分布すると考えられ、肺全体及びリンパ節のそれぞれに対する平均線量が計算される。誘導気道を構成する領域 (ET_1 , ET_2 , BB 及び bb) の場合、標的細胞は気道表面から一定の範囲の深さにおける組織の層にあるとみなされ、この層に対する平均線量が計算される。 ET_1 , ET_2 , BB 及び bb とされる標的細胞、並びにそれぞれの領域における標的細胞含有組織の線量計算のための質量を表 3.3 に示す。

(134) これらの領域のそれぞれには、いくつかの考えられる線源領域もある。例えば、bb 領域では、気道壁において隔離された粒子 (bb_{seq}) は $20 \sim 25 \mu\text{m}$ の深さにおけるマクロファージ層にあるとみなされ (すなわち、標的細胞の下)、上皮に「結合された」放射能はその中に均一に分布しており、AI 領域に存在する放射能からの照射も考慮される。元の HRTM では、2 つの粘膜繊毛クリアランス相が存在した。すなわち、速いクリアランス相 (コンパートメント bb_1 , 図 A.1) における放射能は繊毛より上の粘液層にあるとみなされ、遅いクリアランス相 (コンパートメント bb_2) における放射能は繊毛間の粘液にあるとみなされた。修正 HRTM では、クリアランス相は 1 つのみである。

(135) 線源/標的のそれぞれの組み合わせについて、*Publication 66* (ICRP, 1994a) は、エネルギーの関数としての、非透過性放射線 (アルファ、ベータ及び電子) の場合の吸収割合を提示している。これらの吸収割合は不十分な空間分解能のためにボクセルファントムには表されないため、本書では *Publication 66* (ICRP, 1994a) に示されている値が用いられる。それらの値は、誘導気道のそれぞれの領域 (ET_1 , ET_2 , BB, bb) を描写するために単一の円筒形の幾何形状を用いて導き出された。すなわち、BB を代表する直径 5 mm の気管支及び bb を代表する直径 1 mm の細気管支である。単一相の BB 及び bb 線源領域に対応する吸収割合は、*Publication 66* (ICRP, 1994a) の中で表にまとめられているように、遅い及び速い除去に対応した線源領域の厚みによる加重和として導き出された。

(136) 組織間の感受性の違いを考慮するために、それぞれの領域 i に対する等価線量 H_i は、臓器全体の感受性に対する当該領域の相対的な推定感受性を表す按係数 A_i を乗じられる。表 3.3 には、 A_i の勧告値も示してある。*Publication 103* (ICRP, 2007) では LN_{ET} 及び LN_{TH} は「リンパ節」組織に含まれており、リンパ節はそれ自体、残りの組織及び臓器のリストに含まれている (表 1.2)。したがって、元の HRTM では LN_{ET} 及び LN_{TH} はそれぞれ ET 及び TH に含まれていたが、もはや ET 及び TH 気道に含まれない。*Publication 66* (ICRP, 1994a) においてそれらに割り当てられた w_T の割合 A_i は、表 3.3 では他の領域に再割り当てされている。それぞれの領域に対する等価線量 H_i の加重和がそれぞれ、ET 又は TH 気道に対する等価線量である。すなわち、

$$\begin{aligned} H_{\text{ET}} &= H_{\text{ET}_1} A_{\text{ET}_1} + H_{\text{ET}_2} A_{\text{ET}_2} \\ H_{\text{TH}} &= H_{\text{BB}} A_{\text{BB}} + H_{\text{bb}} A_{\text{bb}} + H_{\text{AI}} A_{\text{AI}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

(137) TH 領域に対する等価線量 H_{TH} には、*Publication 103* (ICRP, 2007) において肺について指定された 0.12 という組織加重係数 w_T が適用される。ET 気道は、残りの組織及び臓器のリストに含まれている (表 1.2)。

3.3 ヒト消化管モデル

(138) *Publication 30* (ICRP, 1979a) の胃腸管モデルは、*Publication 100* (ICRP, 2006) に述べられている HATM によって置き換えられた。この置き換えは、物質の消化管通過に関する新しい情報が利用可能になったこと、感受性が高い細胞の位置に関する理解が向上したことなど、いくつかの進展によって動機づけられたものだった。このモデル構造を図 3.6 に、パラメータ値を表 3.4 に示す。HRTM との関係として、HATM の重要な特徴は、がん誘発の感受性が高い細胞を含有する標的領域に対する線量の詳細な計算と、情報が利用可能な場合における、固有の吸収値及び/または残留値の考慮である。HATM と HRTM は、図 3.6 に示されているように、両立するものであり相互に関連するものである。

3.3.1 構造

(139) HATM は、経口摂取による口腔への、もしくは呼吸気道から粒子輸送を経て食道への放射性核種の侵入を表現するものである。これは、口腔、食道、胃、小腸及び結腸の各部分、それに続く糞中排泄を含めたあらゆる消化管領域における連続的な移行を記述する。線量は、これらの領域すべてについて計算される。結腸は、線量計算の目的のために、利用可能な通過時間データに基づいて、右結腸、左結腸及び直腸・S 字結腸 (S 字結腸及び直腸) に分割される。直腸は、通過時間を個別に決定するのが難しく、また固有の w_T 値を持たないため、S 字結腸とともに直腸・S 字結腸に包まれる。総結腸線量は、右結腸、左結腸及び直腸・S 字結腸を包むために質量加重平均として結合される。

3.3.2 モデルパラメータ

(140) HATM は、口腔、食道及び胃における固体の食物、液体及び総合的食事について異なる通過時間を提示する。一次反応速度式が仮定される。これは、消化管の管腔を通じた物質の移行に関係する複雑なプロセスのかんりの単純化ではあるが、消化管のそれぞれの部分における放射性核種の平均滞留時間について合理的正確性を持って再現することが見込まれる。

変更因子

(141) HATM に示されている初期設定の領域別通過時間は、所定の性別、年齢グループ及び物質のタイプ (たとえば、固体、液体、カリ

一のある液体やノンカロリー液体) について収集されたデータに基づく中心推定値である。*Publication 100* (ICRP, 2006) に幅広く例示されているように、消化管の各主要部分の物質の通過は、通常の条件下でさえ、被験者間及び被験者内でかなりの変動を示す。たとえば、便秘、下痢、普通でない食事、医薬品や、神経系に影響を及ぼすもしくはエネルギー消費を増大させるさまざまな疾患によって、標準からの極度に大きな逸脱が生じる場合がある。

性固有値

(142) HATM は、寸法ならびに各領域の内容物の通過時間について、成人の場合の性固有パラメータ値を提示する。胃及び腸の寸法は一般に男性よりも女性の方が小さいが、これらの領域の通過時間の中心推定値は男性よりも女性の方がおよそ 3 分の 1 大きい。しかし、男性と女性の両方において全ての消化管領域の通過時間に大きな変動があることを考慮に入れ、標準作業員には成人男性の標準通過時間が割り当てられる。

呼吸気道もしくは唾液中から入る物質

(143) 呼吸気道から除去される粘液及び付随物質は、口腔咽頭を経て食道に入る。経口摂取された食物及び液体については、HATM は、食道通過の 2 つの成分を明示する。それは、飲み込まれた物質の 90% の比較的高速な移行 (総合的食事の場合で 7 秒の平均通過時間) 及び残りの 10% の比較的低速な通過 (総合的食事の場合で 40 秒) を表す。呼吸気道から除去される全ての物質については、低速の方の食道通過時間が適用されると仮定される。唾液によって消化管に入る放射能についても同じ仮定が行われる。

3.3.3 消化管からの吸収

(144) 放射性核種は次のように消化管に入り得る。それは、経口摂取の結果としての直接的な侵入、吸入摂取後に呼吸気道から口腔咽頭及び食道への粒子の粘膜繊毛運動による間接的な侵入、あるいは唾液、胆汁や胃液などの分泌による侵入である。また、放射性核種は、親核種の崩壊によって消化管内で生成されることもある。HATM では、放射性核種の血液中への吸収は消化管に入る量に対するある割合として与えられ、総吸収は f_A と表される (ICRP, 2006)。モデル構造は、吸収に関して利用可能な情報がある領域全てについてそのデータを使用できるようにになっている。ほとんどの場合、放射性核種の領域別の吸収に関する情報は利用できず、初期設定では吸収はすべて小腸において起こることが仮定される (すなわち、 $f_{SI}=f_A$)。初期設定として、消化管の壁から内容物へ再循環しないことも仮定される。

(145) 本報告書で報告される一部の f_A 値は、以前に *Publication 30* のモデル (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) で用いるために示された f_i 値と同じである。値の修正を正当化するのに十分な新たな情報がないためである。他の領域からの吸収に関する特定のデータが利用可能な少数のケースにおいては、そのデータが考慮されるが、一部の例では (たとえば、比較的長寿命のヨウ素同位体)、消化管領域及び他の組織に対する線量は吸収の部位に関する仮定に影響されない (ICRP, 2006)。

(146) 放射性核種の吸収の程度は、元素及びその化学的形態に依存する。化学的形態の変化は口腔内から始まる消化プロセスの間に起こり得るが、主として胃及び小腸において起こる。これらの化学的形態の変化すなわちスペシエーションは、放射性核種の吸収の効率を決定し、したがって腸上皮を通じた血流への取り込みの程度を決定する (ICRP, 2006)。

(147) 経口摂取された親核種 Y の崩壊によって消化管内で生成される放射性核種 X の初期設定の吸収割合 f_A は、親核種としての X に対応する標準の f_A である。 X が異なる化学的または物理的形態に対応する複数の標準値を有する場合、初期設定の f_A は、 X について提示される最大の標準値である。

(148) 吸入摂取された呼吸気道からクリアランス後に消化管に達する粒子の場合、 f_A 値を特定する際には肺における可溶性を考慮に入れることが適切である。その物理化学的形態に従ってさまざまな可溶性を示す一部の元素については、タイプ M または S の物質の可溶性の低下は、腸における吸収の低下にも関連するという証拠がある。呼吸気道から消化管へと移行する放射性核種の場合、初期設定の f_A 値は、その吸収タイプに対応する f_i とその元素の可溶性形態に対応する f_A 値の積として決定される。吸入摂取された親核種 Y の崩壊によって呼吸気道または消化管において生成される放射性核種 X の初期設定の吸収割合 f_A は、その吸収タイプに対応する f_i と親核種としての X に対応する標準の f_A の積である。 X が異なる化学的または物理的形態に対応する複数の標準の吸収割合 f_A を有する場合、呼吸気道または消化管において生成される X の初期設定の吸収割合 f_A は、その吸収タイプに対応する f_i と X について提示される最大の標準値の積である。

(149) 放射性核種の全身性挙動を予測するために本報告書シリーズで用いられる体内動態モデルの一部は、全身性コンパートメントから消化管内容物への分泌を再現する。全身性コンパートメントから小腸またはそれより上部の消化管部分へと移行する放射能は、血液中への再吸収の対象となると仮定される。そのような場合、分泌された放射能の初期設定の吸収割合 f_A は、その放射性核種の経口摂取に対応する標準の f_A である。経口摂取された放射性核種の異なる形態に対応して複数の標準の f_A 値が与えられる場合、分泌された放射能の初期設定の f_A は、 X について提示される最大の標準値である。

3.3.4 消化管領域における残留

(150) このモデル構造は、情報が利用可能な場合において、さまざまなコンパートメントにおける放射性核種の残留に関するデータの利用を可能とする。ヒト及び動物のデータは、歯もしくは消化管領域、主として小腸、の壁の粘膜組織において、経口摂取された放射性核種が残留することを示唆または示しており、このデータは、消化管の線量の計算を精密にするために用いることができる。カドミウムについて *Publication 100* (ICRP, 2006) に示されている一例は、歯における ^{115}Cd の残留は、口腔粘膜の推定線量を、*Publication 30* のモデル (ICRP, 1979a, 1980) を用いて計算されたものと比べてほとんど 2 桁増大させることを示している。同様に、小腸壁における ^{59}Fe の残留は、小腸壁の等価線量を、*Publication 30* のモデル (ICRP, 1979a, 1980) を用いて計算されたものと比べてほぼ 2 倍に、増大させる。しかし、いずれの事例においても、これらの臓器線量の増大は、他の組織からの寄与によって支配される預託実効線量の大きな変化にはつながらない (ICRP, 2006)。消化管組織における残留に関する情報は、利用可能ならば、本報告書シリーズの個々の元素の項目に示される。

3.3.5 消化管の線量評価

(151) HATM は、それぞれの消化管領域内のがん誘発に関する標的領域に対する線量の明確な計算を可能にする。その際、それらの領域の内容物中の放射性核種による線量を考慮し、また、しかるべき場合には放射性核種の粘膜残留を考慮する。

(152) 食道及び口腔は、これらの領域における通過時間が短いために、経口摂取された放射性核種から受ける線量が極めて低くなる (ICRP, 2006)。しかし、食道には固有の w_T が割り当てられており (ICRP, 2007)、また、口腔、たとえば歯、における残留は口腔粘膜 [これは *Publication 103* (ICRP, 2007) において、残りの組織を構成する臓器及び組織に追加された] に対する線量のかかなりの増大をもたらすため、これらは包含された。

(153) 一般に、線量及びがんリスクの点で重要性がより高い消化管領域は胃と、特に結腸である。小腸は胃よりも大きな線量を受ける場合があるが、放射線誘発がんに対する感受性が高くはなく、固有の w_T 値が割り当てられていない (ICRP, 2007)。したがって、小腸は、残りの組織を構成する臓器及び組織に含まれている (ICRP, 2007)。

(154) HATM における重要な改良の 1 つは、さまざまな領域における非透過性のアルファ及び電子線による線量を計算するために用いられる方法である。*Publication 30* (ICRP, 1979a) では、内容物中の β 及び α 放出体による、全ての胃腸領域の壁の線量は、それら内容物の表面における線量に対して、 β 放出体では 100% 及び α 放出体では 1% であると仮定されている。一方、HATM は、胃腸領域それぞれの壁の粘膜層における標的細胞の位置ならびに β 及び α 粒子の壁への透過深さを考慮する。がん誘発と関連する標的は上皮幹細胞であるとみなされ、口腔及び食道では層状上皮の基底層に、また、胃、小腸及び大腸では単細胞層上皮を満たす陰窩内に位置する。

(155) この新たな方法は概して、結腸内容物中の α 及び β 放出放射性核種による結腸線量の推定値を *Publication 30* のモデル (ICRP, 1979a) を用いて得られるものよりもかなり低い結果をもたらす。これは、結腸内容物及び、(280~300 μm の深さの) 標的幹細胞の上にある粘膜組織における α 粒子及び電子のエネルギーの喪失のためである。これは、標的領域における電子のエネルギー沈着を低減し、内容物内で放出される α 粒子の、標的領域の線量に対する寄与をゼロにする。消化管壁における放射性核種の残留がない場合、経口摂取された α 放出体による、消化管のあらゆる領域に対する線量は、それらの血液中への吸収と、その後の軟組織における全身性放射能からの照射のみによることになる。

(156) 局所的な結腸線量のこの低下が総預託実効線量に及ぼす影響は、放射性核種によって異なる。 ^{55}Fe 、 ^{90}Sr 及び ^{239}Pu について *Publication 100* (ICRP, 2006) に示されている例は、結腸に対する局所線量のこの低下は実効線量にはほとんどまたはまったく影響を及ぼさないことを示している。支配的な寄与は血液中に吸収された放射能による臓器及び組織の等価線量に由来するためである。一般に、実効線量に対するこの影響は、 f_a 値が大きい放射性核種もしくは体内に長期間残留する長寿命放射性核種の場合には小さい。しかし、 ^{106}Ru の例の場合、消化管領域の等価線量が実効線量に大きく寄与するため、預託実効線量及び結腸線量はそれぞれおよそ 2 分の 1 及び 5 分の 1 に低下する。

(157) *Publication 100* (ICRP, 2006) における線量計算は、消化管区画それぞれの幹細胞層への電子及び α 粒子の吸収割合の暫定値に基づくものだった。本報告書では、粒子の種類及び、内容物と壁における線源について、新たな計算が行われている。小腸内の領域については、分節の折り重なりに関する新たなモデルが導入されている。さらなる詳細は将来の刊行物 (ICRP, 2016c) に示されることになる。

3.4 無傷の皮膚及び創傷

3.4.1 無傷の皮膚

(158) 無傷の皮膚は、ほとんどの物質の体内侵入に対する有効な障壁であり、いかなる有意な程度であってもこの障壁を越える放射性核種はほとんどない。例外のうち実際に重要なものは、液体または蒸気状態のトリチウム水、有機炭素化合物、そして蒸気状態または溶解中のヨウ素である。

(159) 考えうる被ばくシナリオが幅広いため、皮膚を通じた放射性核種の吸収についてはいかなる一般モデルも存在しない。例えばエアロゾル、液体、汚染された表面や汚染された衣類との接触によって、皮膚は汚染される可能性がある。汚染物質の物理的及び化学的形態 (pH を含む) ならびに皮膚の生理学的状態は、いかなる線量評価においても重要な因子である。

(160) 汚染された皮膚の領域に対する放射線量と、吸収の結果としての全身に対する線量のいずれも考慮されるべきである。ICRP (1991, 2007) は、次のように勧告している。局所皮膚線量は、70 μm の深さにあると仮定される感受性の高い細胞に対して計算されるべき、もしくは

は、皮膚表面下 50~100 μm の組織層にわたって平均され、皮膚組織の最も被ばくする 1 cm^2 にわたって平均されるべきである。この勧告は、皮膚表面にわたって分布する放射能にも、粒子中に凝集した放射能にもあてはまる。皮膚に沈着した放射性核種による線量の計算については、ICRP はいかなる線量評価モデルも勧告せず、いかなる線量係数も示さない。

3.4.2 創傷

(161) 放射性核種は、汚染された創傷部位から血液中ならびに他の臓器及び組織へと移行する場合がある。NCRP は、異なる物理化学的状態の物質に対応するこの移行を記述するためのモデルを開発している [NCRP (2006) 及び図 3.7]。十分なヒトデータがないため、このモデルのパラメータ値は動物実験によるデータに基づくものだった。元素固有の全身体内動態モデルと結合するならば、このモデルは、尿中及び糞中排泄を予測するためだけでなく、臓器及び組織に対する預託等価線量ならびに放射性核種の血液及び全身循環への移行後の預託実効線量を計算するためにも用いることができる。

(162) このモデルは、創傷から注入または浸透した後の、可溶性、不溶性のいずれの放射性物質にも適用できるように設計された。創傷部位内にある放射性核種の、物理的または化学的状態を説明するために、5 つのコンパートメントが用いられる。これらは、可溶性物質；コロイド状態及び中間状態の物質；粒子状態、凝集状態及び結合状態；捕捉された粒子及び凝集物；そして断片からなる。場合によっては、これらのコンパートメントは、その当初の物理化学的状態の放射性核種を含有する。また時間とともに、当初沈着した物質が状態を変化させ、1 つのコンパートメントから別のコンパートメントへと移行する場合もある。ほとんどの場合、このモデルは指定された放射性核種の物理的及び化学的状態に依存しており、2 つまたは 3 つのコンパートメントへと単純化される。

(163) 当初は可溶性の形態で創傷中に存在する放射性核種について、4 つの残留カテゴリーが定義される。すなわち、弱、中、強及び激である。これらは概して、創傷部位における持続的な残留の規模にあてはまる。分類基準は、(a) ラットについて筋肉注入された放射性物質のうち沈着後に 1 日間とどまる割合；及び(b) 当初に保持された割合が除去された速度に基づいている。

(164) 創傷部位からの放射性核種の放出は、可溶性物質の場合は血液を経由して、粒子の場合はリンパ節を経由して起こる。リンパ節における粒子のさらなる溶解は、放射性核種の血液への移行にも帰着する。血液は、この創傷モデルをそれぞれの放射性元素固有の全身体内動態モデルと結びつける中枢コンパートメントである。放射性核種はひとたび血液に到達すると、可溶性の状態でも血液中に直接注入されたかのような挙動をとる。これは、HRTM 及び HATM において採用されているのと同じアプローチと同様である。

(165) バイオアッセイ解釈のためのモデルの適用を例示するために、この創傷モデルは ^{137}Cs に対応する全身体内動態モデル (ICRP,

1979a, 1989, 1997b) と統合された。創傷モデルにおける Cs の第一の既定値は、「弱」カテゴリーである。それゆえ、このカテゴリーの場合のパラメータが創傷モデルに適用され、尿中及び糞中排泄パターンが予測された (図 3.8)。これらのパターンは、尿中では摂取後 2~3 日間、糞中ではおよそ 5 日間における ^{137}Cs のピーク排泄を示している。いずれのパターンも、創傷部位からの全身性臓器部位への ^{137}Cs の急速な拡散分布及びそこから排泄を反映している。

(166) 比較のために、汚染された創傷部位における ^{137}Cs が照射済発電用原子炉燃料の粒子中に存在するならば、それには「粒子」カテゴリーのパラメータ値を与えることができる。この場合、血液中への溶解及び吸収は「弱」カテゴリーの場合よりもはるかに遅く、尿中及び糞中排泄パターンはおよそ 10 日間後に、数年間持続する擬似平衡パターンを示す (図 3.9)。

(167) 創傷、擦傷、火傷またはその他の病理学的な皮膚損傷の存在は、放射性物質が皮下組織に到達し、その後全身循環に到達する能力を大幅に増大させる場合がある。創傷部位に沈着した物質の多くはその部位に保持されるかもしれない。それは外科的に切除することが可能ではあるが、可溶性 (輸送可能) 物質は血液へと溶解する。したがって人体の他の部分へと移行しうる。3.1 節において言及したように、創傷に起因する内部汚染の評価は実際には、専門家の判断を用いてケースバイケースで扱われる。多くの場合、創傷部位から血液中に移行する放射性核種の量は、尿のバイオアッセイデータから直接評価されるかもしれない。創傷部位から血液中ならびに他の臓器及び組織へと移行する放射性核種による線量の計算については、ICRP はいかなる線量評価モデルも勧告しない。しかし、そのようなモデルは NCRP (2006) によって発表されているため、摂取経路としての注入に対応する線量係数は電子付属文書に示してあり、これは創傷汚染後の線量の評価に役立つかもしれない。

3.5 全身性放射性核種に対応する体内動態モデル

3.5.1 親核種

(168) 本書では、体内循環に達してからの体内の放射性核種の分布及び排泄の時間依存性を記述するモデルを全身性体内動態モデルと呼ぶ。呼吸気道及び消化管における放射性核種の挙動を記述する ICRP の体内動態モデルとは対照的に、ICRP の全身性体内動態モデルは通常、パラメータ値だけでなくモデル構造についても元素固有のものだった。放射線防護における対象元素の、潜在的に重要な全身の滞留場所及び移行経路をすべて表現する汎用モデル構造は、複雑すぎて実用的な用途にはそれほど役立つまいだろう。しかし、以前の ICRP 報告書では、時折、汎用モデル構造が用いられてきた。それは体内における挙動が定性的に同様であることが知られている、または予想されている典型的な同族元素の全身性体内動態を記述するためである。例えば *Publication 20* (ICRP, 1973) は、アルカリ土類金属のカルシウム、ストロンチウム、バリウム及びラジウムについて汎用モデル構築を導入したが、ほとんどのモデルのパラメータについては元素固有の値を示した。*Publication 30*

の第 1~3 部 (ICRP, 1979a, 1980, 1981) では、プルトニウムについて考案されたモデルが、モデル構造だけでなくパラメータ値も含めて、ほとんどのアクチノイド元素に適用された。これらのアクチノイド元素のいくつかに対応する体内動態モデルは *Publication 30* の第 4 部 (ICRP, 1988b) において修正されたが、そこではプルトニウムに対応するモデル構造が汎用モデル構造として用いられ、一連の共通パラメータの値がプルトニウム、アメリカシウム及びキュリウムに適用され、他の元素に対応するモデルにおける選ばれたパラメータには元素固有の値が適用された。汎用全身性モデル構造の利用は、放射性核種の摂取による公衆の構成員に対する線量に関する ICRP 報告書の中で増加しており (ICRP, 1993, 1995a, 1995b)、本報告書においてさらに拡大されている。これは全身性体内動態モデルの開発、記述及び適用を容易にするからである。

(169) 本報告書シリーズで用いられる全身性体内動態モデルは、放射性核種の摂取による公衆の構成員に対する線量に関する ICRP 報告書シリーズ [ここでは「*Publication 72* シリーズ」(ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) と呼ぶ] において比較的限られた規模で適用された、生理学的に説明するモデリングスキームに従う。すなわち、このモデル構造は、血液を代表とする 1 つ以上のコンパートメントを含み、血管外の滞留場所から血液中への放射能の帰還を表現し (すなわち、それらは再循環モデルである) 実際の範囲に限れば、個々の元素の全身性体内動態モデルを決定すると考えられる主たる生理学的プロセスを表現する。

(170) ヨウ素や鉄など一部の元素に対応する全身性体内動態モデルは、体内におけるこれら元素の特有の挙動を記述するために特に設計されたモデル構造の枠内で開発されている。しかし、ほとんどの元素に対応するモデルは、*Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において骨親和性放射性核種に適用された 2 つの汎用モデル構造 (図 B.1 及び B.2) の 1 つもしくはそれらの構造のバリエーションの枠内で構築されている。これは、骨親和性元素についてだけでなく、比較的低い骨中沈着を示すいくつかの元素 (たとえば、コバルトやルテニウム) についても行われた。体内におけるそれら元素の主たる滞留場所及び移動経路はこれら 2 つの構造のいずれか一方には含まれるためである。場合によっては、*Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において適用されたモデル構造は、元素固有の特性に適応させるためにわずかに修正されているか、元素の体内動態の一定の側面に関する情報が限られていることを考慮して単純化されている。

(171) 本報告書で用いられる全身性体内動態モデルには、全身性放射能の尿及び糞による生物学的除去の明確な経路が含まれる。一部の元素に対応するモデルにおいては、汗などのさらなる排泄経路も表現されている。

(172) 膀胱について採用される体内動態モデルは、*Publication 67* 及び *68* (ICRP, 1993, 1994b) に述べられている。1 日あたりの排尿回数は、作業者の場合 6 回とみなされる。一次プロセスの点から膀胱の動態を表現するために、膀胱からの除去速度は 12/日とみなされる。

(173) 本報告書シリーズで用いられる全身モデルの多くにおいては、放射能は、元素固有である内因性の分泌経路によって、全身コンパートメントから消化管の特定部分への移行し、そののち糞に含まれて除去されると仮定される。分泌された物質の、消化管のさまざまな部分を通過した移行速度は、HATM に特定されている元素固有の速度である。全身コンパートメントから小腸またはより高所の消化管部分の内容物へ

と移行する放射能の一部は、血液中に再吸収されると仮定される。右結腸またはより低所の消化管区画の内容物に割り当てられる放射能は、再吸収の影響下にはないと仮定される。

3.5.2 放射性子孫核種

(174) *Publication 30* 及び *68* (ICRP, 1979a, 1994b) では、親核種の摂取に続いて全身コンパートメントにおいて生成される系列構成核種は親核種の体内動態を示すという一般的な仮定が行われた。これは「共通動態」の仮定と呼ばれる。*Publication 68* (ICRP, 1994b) では、親核種が鉛、ラジウム、トリウムまたはウランの同位体である場合には、また、テルルの子孫であるヨウ素ならびにさまざまな系列において生じる希ガス同位体についても、系列構成核種の「独立動態」という代替仮定が行われた。子孫核種の独立動態の導入は、全身的に生成される子孫核種の一般挙動パターンに基づくものであった。これは実験的研究及び職業被ばく研究のレビューによって示唆されていた (Leggett et al., 1984)。すなわち、そのデータは、軟組織または骨表面において生成されるほとんどの放射性子孫核種は親核種から移動し、それらの特有の生物学的挙動に従い始める傾向にあるのに対し、骨体積において生成される放射性核種は観察期間にわたって親核種とともに骨中にとどまる傾向にあることを示唆した。

(175) 本報告書シリーズでは、骨体積以外の全身コンパートメントにおいて生成されるもしくは呼吸気道または消化管における生成後に血液中に吸収される子孫核種には、概して独立動態の仮定が適用される。基本的な仮定は、子孫核種は、全身の滞留地点における生成、またはそこへの吸収の時点からその特有の挙動に従うということである。この仮定の導入は、親核種と子孫核種の多くの組み合わせに対応する全身モデルにおける構造的な違いのために、必ずしも容易とは限らない。例えば、ある放射性核種は、子孫核種の特有モデルにおける明確に指定された組織ではなく、親核種のモデルにおける明確に指定された組織内で生まれるかもしれない。これが起こる場合、そのモデルを解釈できるようにするには、子孫核種の除去速度及び除去された放射能の行先を定義しなければならない。

(176) たとえ子孫核種が、子孫核種の特有モデルにおける明確に指定された線源臓器である組織内で生成されるとしても、独立動態の既定の取り扱いの導入は、子孫核種のモデルがその組織を親核種のモデルにおけるコンパートメントと同一であるとみなしえないコンパートメントに分割するならば、少々任意的なものになるかもしれない。例えば、これはコンパートメントへのその組織の分割が親核種に対応する生理学的または解剖学的考察、及び子孫核種に対応する動態根拠もしくはその逆に基づく場合に起こるかもしれない。そのようなコンパートメントの同一性の問題は、ケースバイケースで扱われる。

(177) 本報告書シリーズにおけるそれぞれの元素の項では、その元素の放射性同位体の線量評価上重要な子孫核種に対応する独立動態の仮定の導入について述べる。所定の親元素に対応する導入方法は、インビボで生成される系列構成核種の挙動に関する特定情報入手の可能性、

系列構成核種の挙動に関する不確実性に対する線量推定値の感度、その元素に対応する放射性核種系列の長さ、そして系列構成核種に対応する特有の全身性モデルの複雑さ及び一貫性に依存する。場合によっては、主として物理学的半減期または生物学的半減期が短い子孫核種に関係して、その子孫核種に対応する特有の全身モデルは、インビボでの生成に続くその短期的な挙動に関する不確実性を考慮して実際的な目的のために適切と判断される、より単純なモデルによって置き換えられる。例えば短寿命子孫核種は、場合によってはそれらの生成部位において崩壊すると仮定される。第二の例として、本報告書シリーズにおいて親核種としての希ガスに適用される比較の詳細な機械論的モデルは、インビボでの生成に続くそれらの挙動への適用のために、はるかに単純なモデルによって置き換えられる。どの場合にも、親元素 Y の子孫核種としての元素 X に適用される全身モデルは、親核種としての Y が率いるあらゆる系列について同じである。たとえば、 ^{228}Th の摂取に続いて全身の滞留地点において生成される ^{224}Ra に適用される全身モデルは、 ^{227}Th の摂取に続いて全身の滞留地点において生成される ^{223}Ra にも適用される。

3.6 医学的介入

(178) 取り込みを防止するまたは排泄を増進するための医学的処置が適用される場合、本報告書シリーズにおいて要約されるモデルに示されているデータを、モニタリング情報から預託実効線量を評価するために直接用いることはできない (NCRP, 1980; Gerber and Thomas, 1992; IAEA, 1996)。そのような事情においては、当該人物における特定の汚染物質の残留を追跡するために特殊モニタリングプログラム (5.5 節) が行われるべきであり、預託線量の固有評価を行うためにこれらのデータが用いられるべきである。

3.7 線量計算方法論：ICRP 線量評価体系

(179) 以下では、放射性核種の摂取後の臓器等価線量及び実効線量の評価に適用される ICRP 線量評価体系を提示する。この体系には、さまざまな線源組織における核変換の時間依存数をもたらし、標準体内動態モデルの数値解法が含まれる。これらの解法は、核崩壊情報、標的組織の質量、そして *Publication 110* (ICRP, 2009) における標準ファントム内に定義される標的組織領域に沈着する、線源組織領域から放出される放出エネルギーの割合に関する標準データと結合される。以下に、*Publication 103* (ICRP, 2007) に定義されている防護量と整合する、これらの線量評価計算の計算形式論を提示する。さらに詳細なデータは、将来の刊行物 (ICRP, 2016c) に示される。

3.7.1 ICRP 標準体内動態モデルに対する計算解法

(177) HRTM (ICRP 1994a), HATM (ICRP 2006) 及び本報告書の全身性体内動態モデルは、体内における放射性核種の動的挙動を記述するものである。摂取経路を前提に、これらのモデルは、全身性循環へのその後の取り込み、人体組織間における分布、そして人体からの排出経路を予測する。これらの動態に重ね合わされるのは、in-situ での放射性崩壊及び放射性子孫核種の生成である。したがって、親核種の取り込み、分布及び排出に加えて、あらゆる子孫核種の取り込み、分布及び排出が予測される。

(178) 全身性体内動態のコンパートメントモデルと結合された呼吸気道及び消化管のコンパートメントモデルは、一階微分方程式の体系を定義する。この一連の方程式の解は、体内の解剖学的領域と関連づけられる数学的コンパートメント (プール) における、放射性核種と、もしあるならばその放射性子孫核種の時間依存分布である。 $A_{ij}(t)$ を、時間 t におけるコンパートメント j 内の放射性核種 i の放射能を表すものとしよう。コンパートメント j 内の、崩壊系列の構成核種 i ($i=1, 2, \dots, N$ であり、 $i=1$ は親核種である) の放射能の変化率は、以下のように記述することができる。

$$\frac{dA_{ij}(t)}{dt} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^M A_{ik} \lambda_{i,k,j} - A_{ij} \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^M \lambda_{i,j,k} + \lambda_i^p \right] - \sum_{k=1}^{j-1} A_{k,j} \beta_{k,j} \lambda_i^p \quad (3.3)$$

ここで、

M は動態を描写するコンパートメントの数である。

$\lambda_{i,j,k}$ は体内動態モデルにおける、コンパートメント j (提供側コンパートメント) からコンパートメント k (受領側コンパートメント) への、系列構成核種 i の移行速度の割合である。

λ_i^p は系列構成核種 i の物理的崩壊定数である。

$\beta_{k,j}$ は構成核種 i を形成する系列構成核種 k の崩壊率である。

(179) これらのコンパートメントについて指定される初期条件 $A_{ij}(0)$ を前提に、等式(3.3)は、人体内の放射性核種及びその子孫核種の動的挙動を定義する。等式(3.3)の右辺における第 1 項は、あらゆる提供側コンパートメントからコンパートメント j への、系列構成核種 i の流量を表す。第 2 項は、受領側コンパートメントへの移行と物理的崩壊の両方による、コンパートメント j からの構成核種 i の除去速度を表す。第 3 項は、コンパートメント内の前駆核種 k の存在による、コンパートメント j 内の構成核種 i の生成を扱う。この崩壊系列の構成核種は、構成核種 i の前駆核種が i 未満の指数を有するような順序であることに注意する。順序づけられた系列構成核種のリストは、Publication 107 (ICRP, 2008) とともに配布されている DECDATA ソフトウェアを用いて得ることができる。

(180) $N \times M$ 一階常微分方程式の体系は、適切な数値方法を用いて解決しなければならない。この体系は一般に、非ゼロ初期条件が親核種のみ適用される摂取コンパートメント (すなわち、 $j=1$) を除いたあらゆるコンパートメントに対する $A_{ij}(0)=0$ という初期条件について解決される。

(181) 線量係数の数値を計算するには、等式(3.3)の体内動態コンパートメントを r_s によって示される解剖学的線源領域と関連づけることが必要である。線源領域は生体組織である場合もそうでない場合もあり (たとえば、胃の内容物は線源臓器かもしれないが生体組織ではない)、1 つ以上の動態コンパートメントからなる場合もある。線源領域 r_s において起こる、系列構成核種 i の核変換の数 $\tilde{A}_i(r_s)$ (Bq s) は、以下の式によって求められる。

$$\tilde{A}_i(r_s, \tau) = \sum_j \int_0^\tau A_{ij}(t) dt \quad (3.4)$$

ここで、 τ は預託期間 (作業者の場合 50 年 とみなされる) である。等式(3.4)における合計は、線源領域 r_s と関連するあらゆる動態コンパートメント j にわたるものであり、放射能 $A_{ij}(t)$ は等式(3.3)を解くことによって得られる。 $\tilde{a}_i(r_s, \tau)$ (s) として表される、線源領域 r_s における放射能摂取量あたりの核変換の数は、以下の式によって求められる。

$$\tilde{a}_i(r_s, \tau) = \frac{\tilde{A}_i(r_s, \tau)}{\sum_j A_{ij}(0)} \quad (3.5)$$

ここで、分母における合計は、 $t=0$ におけるコンパートメントの内容物にわたるものである。粒子状物質及びガス状物質の吸入摂取の場合、吐き出された放射能はこの分母に含まれない。HRTM のコンパートメントに沈着するのは放射能摂取量のうちのわずかな割合に過ぎないためである。

3.7.2 臓器等価線量に対応する ICRP 標準線量係数の計算法

(182) 積算時間を τ とする場合、標的領域 r_T における標準成人男性の預託等価線量係数 $h^M(r_T, \tau)$ 及び標準成人女性の預託等価線量係数 $h^F(r_T, \tau)$ は、以下の式によって求められる。

$$h^M(r_T, \tau) = \sum_i \sum_{r_S} \tilde{a}_i(r_S, \tau) S_w^M(r_T \leftarrow r_S)_i \quad (3.6)$$

$$h^F(r_T, \tau) = \sum_i \sum_{r_S} \tilde{a}_i(r_S, \tau) S_w^F(r_T \leftarrow r_S)_i \quad (3.7)$$

ここで、 S 係数 $S_w^M(r_T \leftarrow r_S)_i$ 及び $S_w^F(r_T \leftarrow r_S)_i$ は、それぞれ男性作業員及び女性作業員の場合、線源領域 r_S における系列構成核種 i の核変換による標的領域 r_T における放射線加重等価線量 [Sv (Bq s)⁻¹] である。外部合計は親核種とその子孫核種にわたることに注意する。

(183) 実効線量を計算するために用いられる、表 1.2 に挙げられているいくつかの組織は、単一の標的領域 r_T によって代表されるとみなされる。複数の組織領域が標的組織を定める場合には、割合に応じた等価線量の加重を行わなければならない。したがって、組織 T における、標準成人男性の預託等価線量係数 $h_T^M(\tau)$ 及び標準成人女性の預託等価線量係数 $h_T^F(\tau)$ は、以下のように与えられる。

$$h_T^M(\tau) = \sum_{r_T} f(r_T, T) h^M(r_T, \tau) \quad (3.8)$$

$$h_T^F(\tau) = \sum_{r_T} f(r_T, T) h^F(r_T, \tau) \quad (3.9)$$

ここで、標的領域の加重割合 $f(r_T, T)$ は、標的領域 r_T と関連する組織 T における等価線量の割合である。表 3.5 で扱われている組織を除いて、表 1.2 の組織は単一の標的領域によって代表されるため、これらの組織の場合は $f(r_T, T) = 1$ である。表 3.5 では、ET 及び TH 領域に対応する $f(r_T, T)$ の値は、改訂版 HRTM で指定され、それらのリスク按分係数に等しいとみなされる (表 3.3 を参照)。結腸の場合、 $f(r_T, T)$ の値は、消化管壁内の幹細胞層の質量割合であるとみなされる [Publication 100 (ICRP, 2006) の表 7.8 を参照]。リンパ節の場合、 $f(r_T, T)$ の値は、ET、TH 及び非呼吸気道領域内のリンパ節 (リンパ組織ではなく) の質量の割合であるとみなされ、これは Publication 66 (ICRP, 1994a) の中で以前に示されたデータと一致する。

3.7.3 実効線量に対応する ICRP 標準線量係数の計算法

(184) Publication 103 (ICRP, 2007) の中で定義されているように、預託実効線量係数 $e(\tau)$ は以下のとおりである。

73

$$e(\tau) = \sum_T w_T \left[\frac{h_T^M(\tau) + h_T^F(\tau)}{2} \right] \quad (3.10)$$

ここで、 w_T は表 1.2 の組織 T の組織加重係数であり、 $h_T^M(\tau)$ 及び $h_T^F(\tau)$ は、それぞれ標準成人男性及び標準成人女性における、これらの同じ組織に対応する預託等価線量係数である。

3.7.4 ICRP 線量評価体系における比吸収割合の導入

(185) ある放射性核種の放射線加重 S 係数 [Sv (Bq s)⁻¹] は、以下のように計算される。

$$S_w(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R w_R \sum_i E_{R,i} Y_{R,i} \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i}) \quad (3.11)$$

ここで、

$E_{R,i}$ は、その放射性核種の核変換において放出されるタイプ R の i 次放射線のエネルギーである。

$Y_{R,i}$ は、核変換あたりのタイプ R の i 次放射線の収率である [(Bq s)⁻¹]。

w_R は、放射線タイプ R の場合の放射線加重係数 (表 1.1) である。

$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$ は、線源組織 r_S 内で放出される放射線タイプ R のエネルギー $E_{R,i}$ のうち、標的組織 r_T において質量あたり吸収される割合として定義される、比吸収割合である (kg⁻¹)。

(186) 放出される放射線のエネルギー及び収率すなわち $E_{R,i}$ 及び $Y_{R,i}$ は、Publication 107 (ICRP, 2008) から引用される。ベータ線の放出については、平均値ではなくスペクトルデータが S_w の計算において用いられる [すなわち、等式(3.5)における内部合計はそのスペクトルの積分によって置き換えられる]。

(187) いずれの性についても、Publication 107 (ICRP, 2008) の中で表にまとめられたような、核変換において放出されるすべての放射線に対応する比吸収割合の値は、将来の刊行物 (ICRP, 2016c) で発表される。表にまとめられたエネルギーにおける比吸収割合は、三次スプライン補間によって求められる。

74

(188) 線源領域と標的領域のほとんどの組み合わせについて、光子、電子及び中性子の比吸収割合は、*Publication 110* (ICRP, 2009) に述べられている標準成人男性及び標準成人女性の標準ファントムを用いて行われたモンテカルロ放射線輸送計算に基づいている。これらのファントムは、実際の人間の断層撮影画像から構成されている。

(189) アルファ粒子については、比吸収割合は、 $r_s=r_t$ ならば標的領域の質量の逆数であり、 $r_s \neq r_t$ ならば 0 である。呼吸気道及び消化管、骨格、膀胱、そして胆嚢の内部が線源領域及び標的領域の場合は例外である。これらの場合、線源領域内で放出されたエネルギーのわずかな部分のみが標的領域に沈着し、その割合はエネルギーに依存するかもしれない。

(190) 消化管及び呼吸気道においては、光子の場合の吸収割合は標準ファントム (ICRP, 2009) を用いて導き出される。*Publication 100* (ICRP, 2006) の消化管における電子及びアルファ粒子の吸収割合のデータは、将来の刊行物 (ICRP, 2016c) に含まれる補完計算を用いて更新される。*Publication 66* (ICRP, 1994a) に示された、呼吸気道における電子及びアルファ粒子の場合の吸収割合は、将来の刊行物 (ICRP, 2016c) の中で提示される。

(191) 体内動態モデルは、以下の骨格線源領域において取り込みが起こることを考慮している。

- 骨梁の表面及び体積。
 - 皮質骨の表面及び体積。この場合、骨表面には以下が含まれる。
 - あらゆる梁状海綿質領域を取り囲む皮質骨の皮質内のハバース管
 - 長骨幹の皮質骨内のハバース管
 - 長骨の骨髓腔と皮質骨幹を分ける表面
 - 活性骨髓と不活性骨髓の両方の梁状海綿質領域内の骨髓に相当する梁状骨髓。
 - 長骨の骨髓幹内骨髓ならびに皮質骨のハバース管内体液に相当する皮質骨髓。成人の場合、長骨幹の骨髓は不活性骨髓である。
- 骨格の標的領域は、以下のとおりである。
- 50 μm の骨内膜領域 (表 1.2 において骨表面と呼ばれている)
 - 活性 (赤色) 骨髓

表 1.2 の標的組織である骨表面は、ミネラル骨表面の 50 μm 以内の軟組織であり、その中に骨がんと関連する骨前駆細胞がある領域である。この標的組織は、骨髓の細胞性 (造血活性を有する骨髓体積の割合) とは無関係である。全身性体内動態モデルは、「活性骨髓」または「梁状

骨髓」を線源領域として識別することがあり、比吸収割合はいずれの線源領域についても将来の刊行物 (ICRP, 2016c) の中で示される。

3.7.5 放射性子孫核種の線量寄与

(192) 以前の ICRP 刊行物と同様に、本報告書シリーズにおける線量係数は、親核種の摂取後の放射性子孫核種の生成を考慮に入れるものである。これらの係数は、親核種の摂取に対応している (すなわち、摂取時に子孫核種は存在しない)。摂取時に放射性子孫核種が存在すると仮定されるラドンの吸入摂取は例外である。

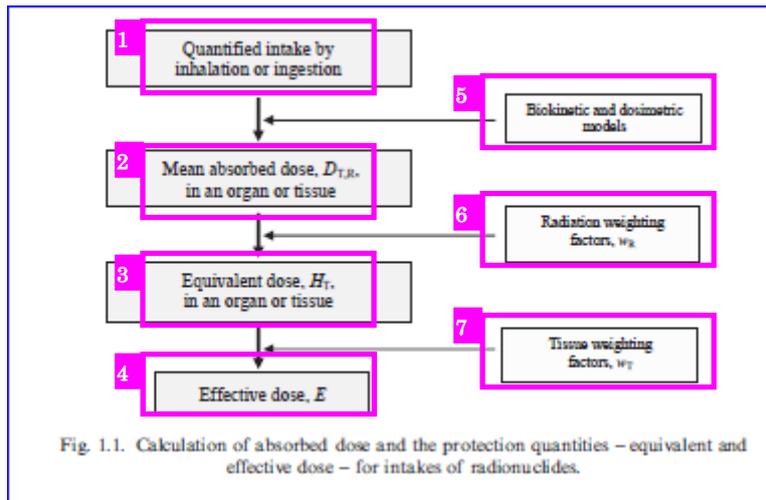
(193) 一般に、全身性体内動態モデルには、特定の臓器及び組織のコンパートメントに明示的に割り当てられるのではない、全身性放射能を含有する「その他」として表示されるコンパートメントが含まれる。「その他」は、明示的に指定されたコンパートメントの補完である。すなわち、このコンパートメントは、全身性体内動態モデルにおいて明示的に識別されたコンパートメントと関連するもの以外のあらゆる全身性組織で構成される。子孫核種について独立動態が仮定される場合、その崩壊系列のそれぞれの構成核種は異なるコンパートメントセットを有することがあり、結果として、「その他」コンパートメントの解剖学的同一性は、系列構成核種の間で異なる。*Publication 71* (ICRP, 1995c) の付属書 C.3 では、この状況に対処するための 2 つの代替計算手順が論じられた。

3.7.6 バイオアッセイデータ

(194) バイオアッセイデータからの遡及的線量評価における体内動態モデルの利用について、いくつかの問題に言及しておく。

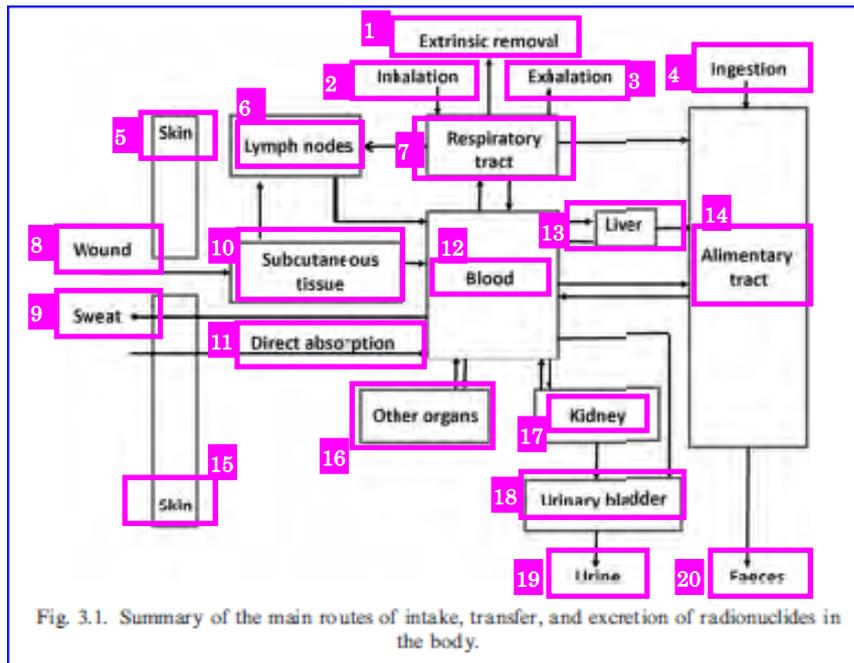
- 1.4 節に説明したように、臓器及び組織に対応する等価線量係数は、標準男性及び標準女性について計算され、実効線量の計算において平均される。一部の体内動態モデル (HATM 及び HRIM) は、性固有のパラメータ値を有する。しかし、実効線量は特定の個人よりもむしろ標準作業員について策定された防護量であるため、組織/臓器吸収線量が組織反応のしきい値をはるかに下回る場合には、日常の遡及的線量評価のための単純な手法を採用することで大きな利益が生じる。これらの理由から、本報告書シリーズにおいて採用される手法は男性の体内動態モデルを用いて摂取量を決定することであり、したがって、女性のいかなる残留係数または排泄係数も提示されない。
- 本報告書シリーズにおいて提示される単位内容量あたりの線量の関数は、体内の放射能に対応するものである (膀胱及び消化管の内容量を含む)。肺の場合、この係数には、 LN_{TH} を含めた呼吸気道の TH 領域におけるすべての放射能が含まれる。同様に、骨格の場合は、骨梁及び皮質骨 (表面と体積の両方) ならびに骨髓 (活性と不活性の両方) におけるすべての放射能が含まれる。
- バイオアッセイ試料に対応する単位内容量あたりの線量の関数は、24 時間尿試料または糞試料の内容量に適用可能である。これらの係数

を用いるには、試料採集期間の終了時点までの崩壊が補正されるべきである。



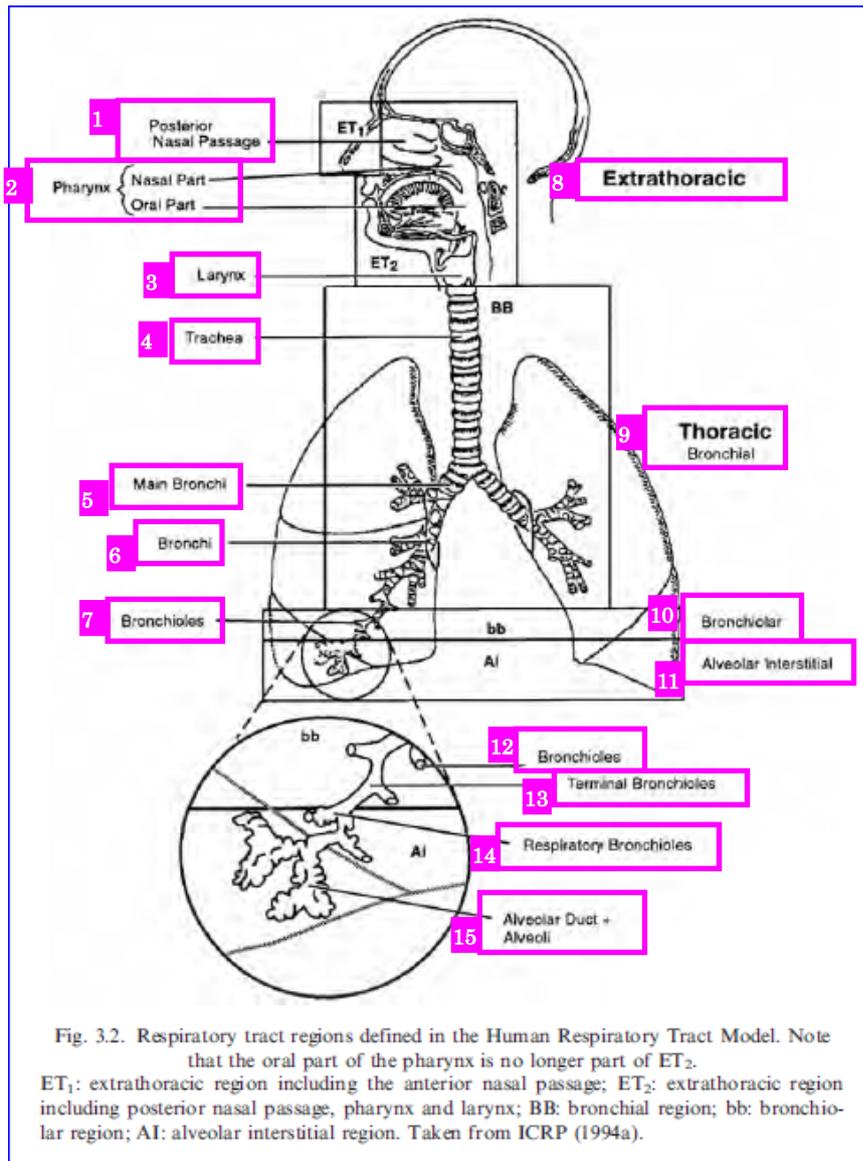
- 1 吸入摂取または経口摂取による、定量化された摂取量
- 2 臓器または組織の平均吸収線量, $D_{T,R}$
- 3 臓器または組織中の等価線量, H_T
- 4 実効線量, E
- 5 体内動態モデルおよび線量計測モデル
- 6 放射線加重係数, w_R
- 7 組織加重係数, w_T

図 1.1. 放射性核種の摂取の場合の吸収線量及び防護量—等価線量と実効線量—の計算



- 1 外的除去
- 2 吸息
- 3 呼息
- 4 経口摂取
- 5 皮膚
- 6 リンパ節
- 7 呼吸気道
- 8 創傷
- 9 汗
- 10 皮下組織
- 11 直接吸収
- 12 血液
- 13 肝臓
- 14 消化管
- 15 皮膚
- 16 他の臓器
- 17 腎臓
- 18 膀胱
- 19 尿
- 20 糞

図 3.1. 体内における放射性核種の摂取，移行および排泄の主要経路の概要

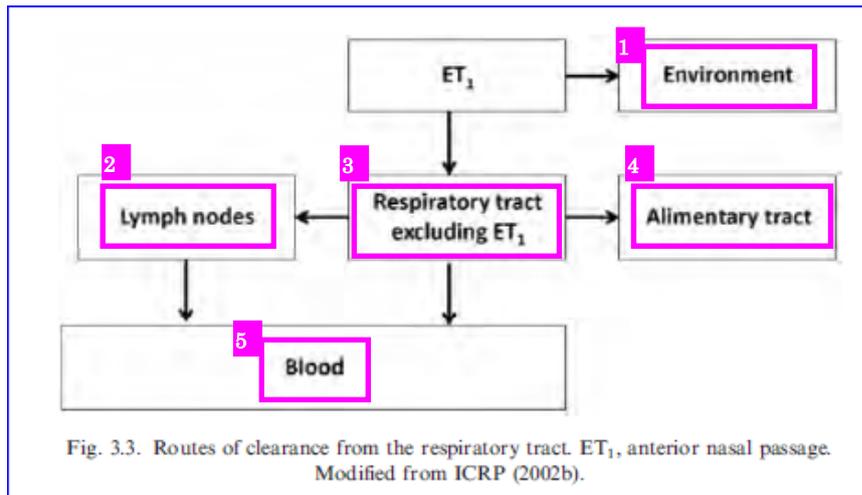


- 1 後部鼻道
- 2 咽頭
鼻部
口腔部
- 3 喉頭
- 4 気管
- 5 主気管支
- 6 気管支
- 7 細気管支
- 8 胸郭外領域
- 9 胸郭内領域
気管支領域
- 10 細気管支領域
- 11 肺胞-間質領域
- 12 細気管支
- 13 末端細気管支

- 14 呼吸細気管支
- 15 肺胞管+肺胞

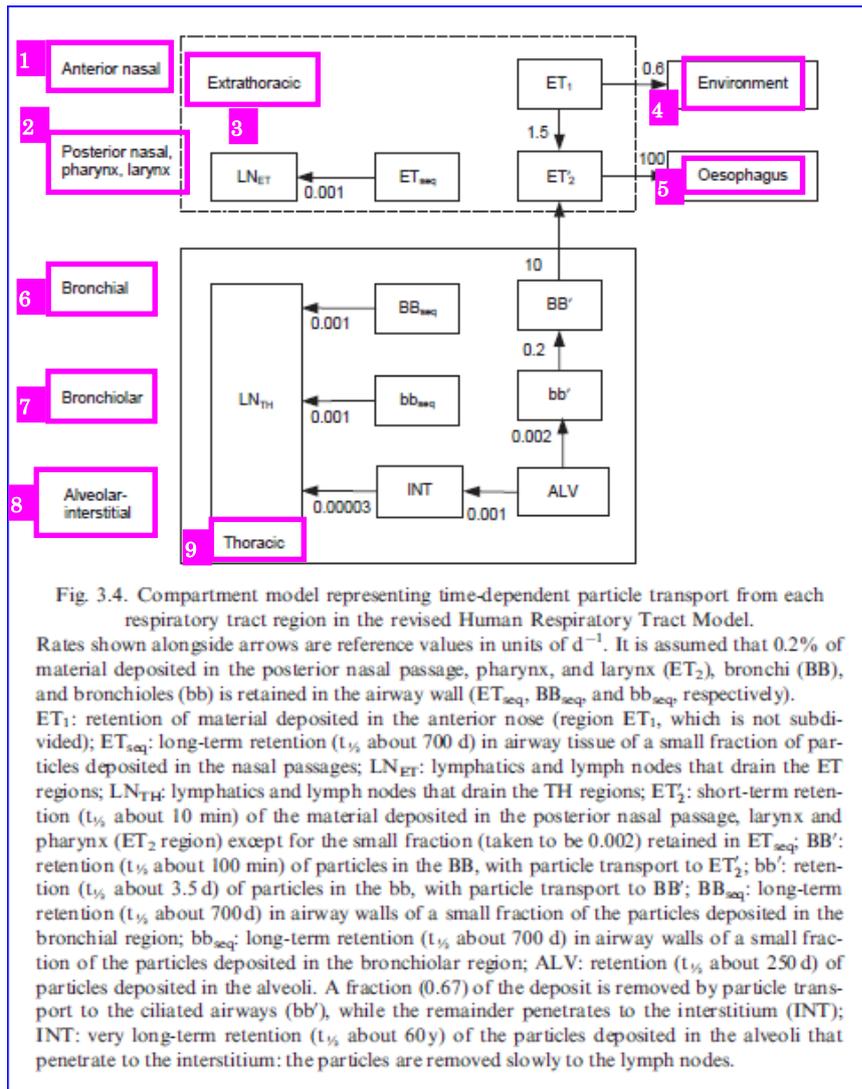
図 3.2. ヒト呼吸気道モデルにおいて定義される呼吸気道領域。咽頭の口腔部はもはや ET_2 の部分ではないことに注意せよ。

ET_1 ：前部鼻道を含む胸郭外領域； ET_2 ：後部鼻道，咽頭および喉頭を含む胸郭外領域； BB ：気管支領域； bb ：細気管支領域； AI ：肺胞-間質領域。ICRP（1994a）から引用。



- 1 環境
- 2 リンパ節
- 3 ET₁を除く呼吸気道
- 4 消化管
- 5 血液

図 3.3. 呼吸気道からのクリアランス経路。ET₁は前部鼻道。ICRP（2002b）から改変。



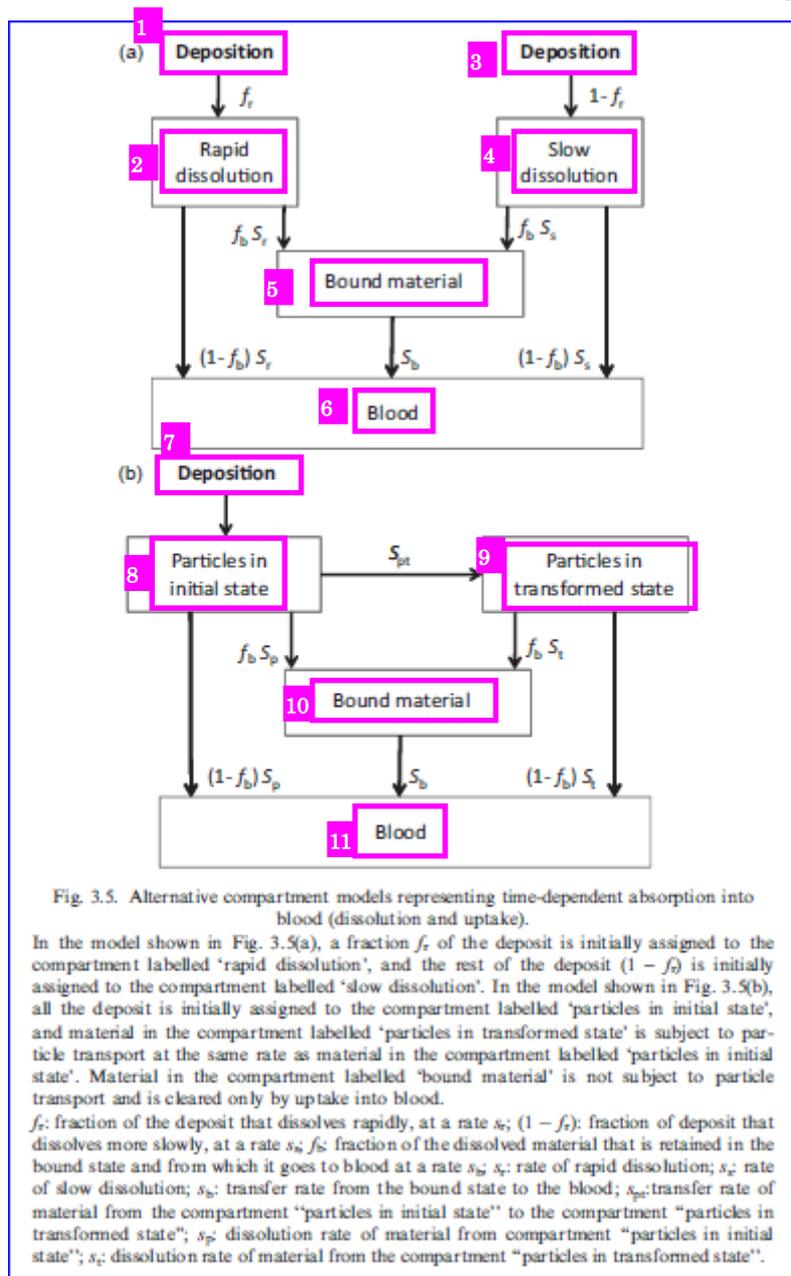
- 1 前部鼻道
- 2 後部鼻道，咽頭，喉頭
- 3 胸郭外領域
- 4 環境
- 5 食道
- 6 気管支領域
- 7 細気管支領域
- 8 肺胞－間質領域
- 9 胸郭内領域

図 3.4. 修正ヒト呼吸気道モデルにおける，それぞれの呼吸気道領域からの時間依存粒子輸送を表すコンパートメントモデル

矢印の横に示されている速度は， d^{-1} を単位とする標準値である。後部鼻道，咽頭および喉頭 (ET_2)，気管支 (BB) ならびに細気管支 (bb) に沈着した物質の 0.2% は気道壁において保持される (それぞれ ET_{seq} ， BB_{seq} および bb_{seq}) と仮定される。

ET_1 ：前部鼻道 (細分されない領域 ET_1) に沈着した物質の残留； ET_{seq} ：鼻道に沈着した粒子の微小割合の，気道組織における長期残留 (半減期 約 700 日)； LN_{ET} ：ET 領域を排出するリンパ管およびリンパ節； LN_{TH} ：TH 領域を排出するリンパ管およびリンパ節； ET_2 ： ET_{seq} に保持される微小割合 (0.002 とみなされる) を除いた，後部鼻道，咽頭および喉頭 (ET_2 領域) に沈

着した物質の短期残留 (半減期約 10 分) ; BB' : ET_2 への粒子輸送を伴う, BB における粒子の残留 (半減期約 100 分) ; bb' : BB' への粒子輸送を伴う, bb における粒子の残留 (半減期約 3.5 日) ; BB_{seq} : 気管支領域に沈着した粒子の微小割合の, 気道壁における長期残留 (半減期約 700 日) ; bb_{seq} : 細気管支領域に沈着した粒子の微小割合の, 気道壁における長期残留 (半減期約 700 日) ; ALV : 肺胞に沈着した粒子の残留 (半減期約 250 日)。沈着物の一部 (0.67) は粒子輸送によって繊毛気道 (bb') へと除去されるが, 残りは間質 (INT) へと浸透する ; INT : 肺胞に沈着した, 間質へと浸透する粒子の超長期残留 (半減期約 60 年)。すなわち, これらの粒子はリンパ節へとゆっくり除去される。

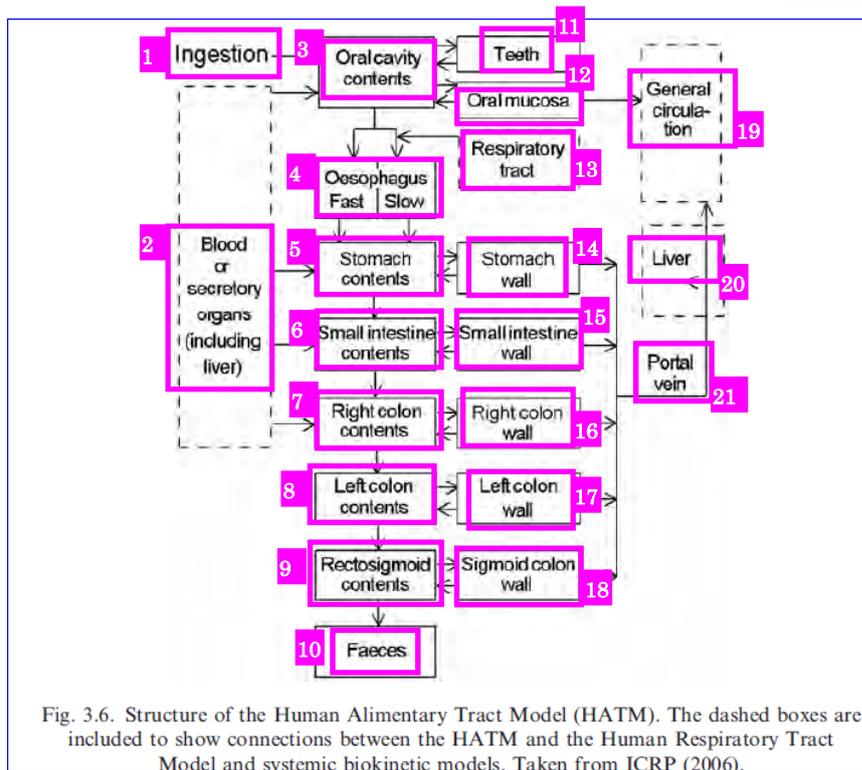


- 1 沈着
- 2 速い溶解
- 3 沈着
- 4 遅い溶解
- 5 結合した物質
- 6 血液
- 7 沈着
- 8 初期状態の粒子
- 9 変移状態の粒子
- 10 結合した物質
- 11 血液

図 3.5. 血液中への時間依存吸収を表する選択的コンパートメントモデル (溶解および取り込み)

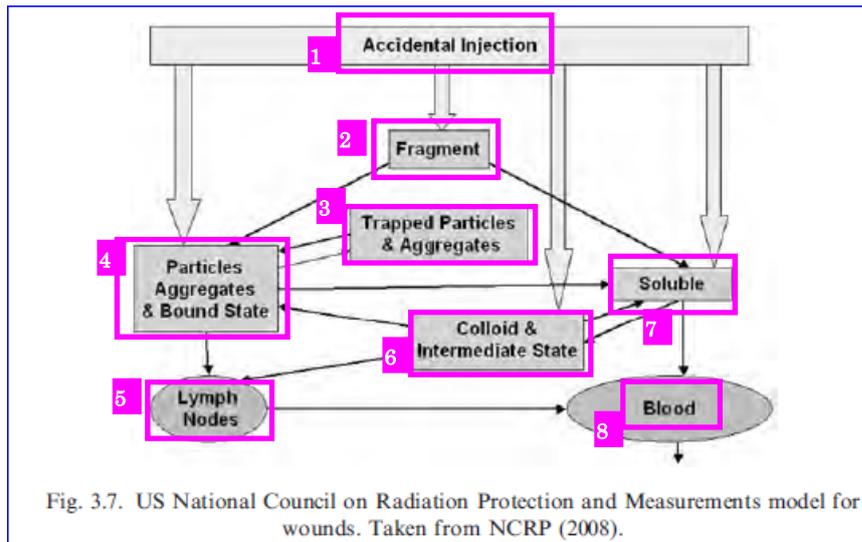
図 3.5(a)に示されているモデルでは、沈着物の割合 f が最初に、「速い溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、残りの沈着物 $(1-f)$ が最初に、「遅い溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられる。図 3.5(b)に示されているモデルでは、すべての沈着物が最初に、「初期状態の粒子」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、「変移状態の粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質は、「初期状態の粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質と同じ速度で粒子輸送の支配下にある。「結合した物質」と名づけられたコンパートメントにおける物質は粒子輸送の支配を受けず、血液中への取り込みによってのみ除去される。

f : 速度 s_r で速やかに溶解する沈着物の割合； $(1-f)$: 速度 s_s でより遅く溶解する沈着物の割合； f_b : 結合状態で保持され、そこから速度 s_b で血液へと向かう溶解物質の割合； s_r : 速い溶解の速度； s_s : 遅い溶解の速度； s_b : 結合状態から血液への移行速度； s_{pt} : コンパートメント「初期状態の粒子」からコンパートメント「変移状態の粒子」への物質の移行速度； s_p : コンパートメント「初期状態の粒子」からの物質の溶解速度； s_t : コンパートメント「変移状態の粒子」からの物質の溶解速度。



- 1 経口摂取
- 2 血液または分泌臓器 (肝臓を含む)
- 3 口腔内容物
- 4 食道
高速 低速
- 5 胃内容物
- 6 小腸内容物
- 7 右結腸内容物
- 8 左結腸内容物
- 9 直腸・S字結腸内容物
- 10 糞
- 11 歯
- 12 口腔粘膜
- 13 呼吸気道
- 14 胃壁
- 15 小腸壁
- 16 右結腸壁
- 17 左結腸壁
- 18 S字結腸壁
- 19 全身循環
- 20 肝臓
- 21 門脈

図 3.6. ヒト消化管モデル (HATM) の構造。破線の四角枠は、HATM とヒト呼吸気道モデルおよび全身性体内動態モデルの間の関連を示すために含まれた。ICRP (2006) から引用。



- 1 偶発的な注入
- 2 断片
- 3 捕捉された粒子および凝集物
- 4 粒子状態、凝集状態および結合状態
- 5 リンパ節
- 6 コロイド状態および中間状態の物質
- 7 可溶性の物質
- 8 血液

図 3.7. 創傷に対応する米国放射線防護測定審議会のモデル。NCRP (2008) から引用。

（以下は、もとの翻訳用ファイルには含まれていなかった図の訳文です。おそらく見落とされたためと思われるので追加しましたが、不要ならば削除してください）

1 日あたりの排泄, Bq

尿中

糞中

摂取後の時間, d

図 3.8. 創傷中の ^{137}Cs , 「弱」 カテゴリー；急性摂取後の予測値 (Bq 摂取あたりの Bq)

1 日あたりの排泄, Bq

尿中

糞中

摂取後の時間, d

図 3.9. 創傷中の ^{137}Cs , 「粒子」 カテゴリー；急性摂取後の予測値 (Bq 摂取あたりの Bq)

Table 1.1 Publ.103 の表 2 と用語の訳ソロエル (RI 手帳に同じ表あり)

Table 1.1. International Commission on Radiological Protection radiation weighting factors.		
2 Radiation weighting factor, w_R		
1 Radiation type	3 Publication 103 (ICRP, 2007)	4 Publication 60 (ICRP, 1991)
Photons	1	1
Electrons and muons	1	1
Protons and charged pions	2	5*
α particles, fission fragments, heavy ions	20	20
Neutrons	5 Revised continuous function of neutron energy	6 Step and continuous functions of neutron energy
7 *Pions were not considered.		

表 1.1. 国際放射線防護委員会の放射線加重係数

- 1 放射線のタイプ
光子
電子とミュオン粒子
陽子と荷電パイ中間子
アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン
中性子
- 2 放射線加重係数, w_R
- 3 *Publication 103* (ICRP, 2007)
- 4 *Publication 60* (ICRP, 1991)
- 5 修正された中性子エネルギーの連続関数
- 6 中性子エネルギーの階段関数および連続関数
- 7 *パイ中間子は考慮されていない。

Table 1.2 Publ.103 の表 3 にほぼ同じ。訳ソロエル

Tissue	w_T	Σw_T
Bone marrow, breast, colon, lung, stomach, remainder tissues (13 for each sex*)	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Urinary bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04

*Remainder tissues: adrenals, extrathoracic regions of the respiratory tract, gall bladder, heart, kidneys, lymphatic nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate (male), small intestine, spleen, thymus, and uterus/cervix (female).

表 1.2. *Publication 103* (ICRP, 2007) の組織加重係数

1

組織

骨髄, 乳房, 結腸, 肺, 胃, 残りの組織 (性別ごとに 13*)

生殖腺

膀胱, 食道, 肝臓, 甲状腺

骨表面, 脳, 唾液腺, 皮膚

2 *残りの組織: 副腎, 呼吸気道の胸郭外 (ET) 領域, 胆嚢, 心臓, 腎臓, リンパ節, 筋肉, 口腔粘膜, 膵臓, 前立腺 (男性), 小腸, 脾臓, 胸腺, 子宮/頸部 (女性)。

2 章は、表なし

Table 3.1-3.3 表注に数か所同じ文章が登場します。その部分は訳ソロエル。

Table 3.1. Regional deposition of inhaled aerosols with an activity median aerodynamic diameter of $5\ \mu\text{m}$ in the Reference Worker* (% of inhaled activity).

1 Region	2 Deposition (%) ^{†,‡}
ET ₁	47.94
ET ₂	25.82
BB	1.78
bb	1.10
AI	5.32
3 Total	81.96

4 ET₁, anterior nasal passage; ET₂, posterior nasal passage, pharynx, and larynx; BB, bronchial; bb, bronchiolar; AI, alveolar-interstitial.
 *The Reference Worker was assigned the deposition and clearance parameter values of a healthy, non-smoking, normal nose-breathing adult male at light work. Light work is defined on the following basis: 2.5 h sitting, during which the amount inhaled is $0.54\ \text{m}^3\ \text{h}^{-1}$; and 5.5 h light exercise, during which the amount inhaled is $1.5\ \text{m}^3\ \text{h}^{-1}$. For both levels of activity, all the inhaled air enters through the nose.
[†]Reference values, given to sufficient precision for calculation purposes, which may be greater than would be chosen to reflect the certainty with which the average value of each parameter is known.
[‡]The particles are assumed to have density $3.00\ \text{g}\ \text{cm}^{-3}$ and shape factor 1.5. The particle aerodynamic diameters are assumed to be log-normally distributed with geometric standard deviation σ_g of approximately 2.50 [the value of σ_g is not a reference value, but is derived from the corresponding activity median thermodynamic diameter (ICRP, 1994a)].

表 3.1. 標準作業*における、空気力学的放射能中央径が $5\ \mu\text{m}$ の吸入エアロゾルの領域別沈着 (吸入放射能の%)

- 1 領域
 2 沈着 (%) ^{†,‡}
 3 合計
 4

ET₁, 前部鼻道 ; ET₂, 後部鼻道, 咽頭及び喉頭 ; BB, 気管支領域 ; bb, 細気管支領域 ; AI, 肺胞-間質領域。

*標準作業*には、軽作業に従事する健康で非喫煙の鼻呼吸者である男性の沈着及びクリアランスパラメータが割り当てられた。軽作業は、次を根拠に定義される：2.5 h の着座，その間の吸入量は $0.54\ \text{m}^3\ \text{h}^{-1}$ ；及び 5.5 h の軽運動，その間の吸入量は $1.5\ \text{m}^3\ \text{h}^{-1}$ 。いずれのレベルの活動の場合も，吸入空気はすべて，鼻を通して入る。

[†]計算の目的のために十分な精度で与えられる基準値。この精度は，それぞれのパラメータの平均値が既知の確からしさを反映するために選ばれるであろうものよりも高くなることがある。

[‡]これらの粒子は，密度が $3.00\ \text{g}\ \text{cm}^{-3}$ ，形状係数が 1.5 であると仮定される。空気力学的粒子径は，幾何標準偏差 σ_g がおよそ 2.50 の対数正規分布であると仮定される [σ_g の値は基準値ではなく，対応する熱力学的放射能中央径から導き出される (ICRP, 1994a)]。

Table 3.2. Default absorption parameter values for Type F, M, and S materials*[†] in the revised Human Respiratory Tract Model.

Type		F (fast)	M (moderate)	S (slow)
Fraction dissolved rapidly	f_r	1	0.2	0.01
Dissolution rates:				
Rapid (d^{-1})	s_r	30 [‡]	3 [§]	3 [§]
Slow (d^{-1})	s_s	–	0.005	0.0001

*Reference values, given with sufficient precision for calculation purposes, which may be greater than would be chosen to reflect the certainty with which the average value of each parameter is known.

[†]The bound state is also used for default types of some elements.

[‡]Element-specific rapid dissolution rates are adopted for Type F forms of many elements.

[§]The element-specific value for Type F is also used for Types M and S if it is less than $3 d^{-1}$.

表 3.2. 修正ヒト呼吸気道モデルにおける、タイプ F、M 及び S の物質に対応する標準設定の吸収パラメータ値*[†]

1

タイプ

速やかに溶解する割合

溶解速度：

速い (d^{-1})

遅い (d^{-1})

2

F (速い)

M (中位の)

S (遅い)

3

*計算の目的のために十分な精度で与えられる基準値。この精度は、それぞれのパラメータの平均値が既知の確からしさを反映するために選ばれるであろうものよりも高くなることもある。

[†]結合状態は、一部の元素の標準設定タイプについても用いられる。

[‡]元素固有の速い溶解速度は、多くの元素のタイプ F 形態について採用される。

[§]タイプ F に対応する元素固有値は、それが $3 d^{-1}$ を下回るならばタイプ M 及び S についても用いられる。

Table 3.3. Target regions of the respiratory tract.

Tissue	Region	Target cells	Depth of target cell* (μm)	Mass of target region* [†] (kg)		Assigned fraction* [‡] A_i of w_T
				Male	Female	
ET	ET ₁	Basal	40–50	2.000×10^{-5}	1.729×10^{-5}	0.001
	ET ₂	Basal	40–50	4.500×10^{-4}	3.890×10^{-4}	0.999
TH	BB	Secretory (BB_{sec})	10–40	8.648×10^{-4}	7.771×10^{-4}	$1/3^{\ddagger}$
		Basal (BB_{bas})	35–50	4.324×10^{-4}	3.885×10^{-4}	
	bb	Secretory	4–12	1.949×10^{-3}	1.874×10^{-3}	$1/3$
AI			§	1.100	0.904	$1/3$

ET, extrathoracic; TH, thoracic; ET₁, anterior nasal passage; ET₂, posterior nasal passage, pharynx, and larynx; BB, bronchial; bb, bronchiolar; AI, alveolar-interstitial.
*Reference values, given with sufficient precision for calculation purposes, which may be greater than would be chosen to reflect the certainty with which the average value of each parameter is known. For the BB, bb, and AI regions, each value of A_i is exactly one-third.
[†]Male values were taken from Table 3 of *Publication 68* (ICRP, 1994b). Female values for ET and AI were taken from Table 5 of *Publication 66* (ICRP, 1994a). Female values for BB were calculated here using information from Tables 2, 4, and B6 of *Publication 66* (ICRP, 1994a). Masses for BB_{sec} and BB_{bas} are the masses of bronchial epithelium through which the secretory cells and basal cells, respectively, are distributed and are based on reference values of airway dimensions. The mass of AI includes blood, but excludes lymph nodes.
[‡]The dose to BB (H_{BB}) is calculated as the arithmetic mean of the doses to BB_{sec} and BB_{bas} .
[§]Average dose to region calculated.

表 3.3. 呼吸気道の標的領域

1

組織

領域

標的細胞

標的細胞の深さ* (μm)標的領域の質量*[†] (kg)割り当てられた w_T の割合 A_i *[‡]

2

基底細胞

基底細胞

分泌細胞 (BB_{sec})基底細胞 (BB_{bas})

分泌細胞

3

男性

女性

4

ET, 胸郭外領域; TH, 胸郭領域; ET₁, 前鼻道; ET₂, 後鼻道, 咽頭及び喉頭; BB, 気管支領域; bb, 細気管支領域; AI, 肺胞一問質領域。

*計算の目的のために十分な精度で与えられる基準値。この精度は、それぞれのパラメータの平均値が既知の確からしさを反映するために選ばれるであろうものよりも高くなることがある。BB, bb 及び AI 領域については、それぞれの A_i 値は正確に 1/3 である。

[†]男性の値は、*Publication 68* (ICRP, 1994b) の表 3 から引用された。ET 及び AI に関する女性の値は、*Publication 66* (ICRP, 1994a) の表 5 から引用された。BB に関する女性の値は、ここでは *Publication 66* (ICRP, 1994a) の表 2, 4 及び B6 による情報を用いて計算された。BB_{sec} および BB_{bas} の質量は、それぞれ分泌細胞及び基底細胞がその全体に分布する気管支上皮の質量であり、気道寸法の基準値に基づいている。AI の質量には血液が含まれるが、リンパ節は含まれない。

[‡]BB に対する線量 (H_{BB}) は、BB_{sec} 及び BB_{bas} に対する線量の算術平均として計算される。

§計算される領域に対する平均線量。

Table 3.4. Default generic Human Alimentary Tract Model transfer coefficients (per d) for total diet for the Reference Worker.*†

From ¹	To ²	Transfer coefficient [‡] (d ⁻¹) ³
Oral cavity contents	Oesophagus fast	6480
Oral cavity contents	Oesophagus slow	720
Oesophagus fast	Stomach contents	12,343
Oesophagus slow	Stomach contents	2160
Stomach contents	Small intestine contents	20.57
Small intestine contents	Right colon contents	6
Right colon contents	Left colon contents	2
Left colon contents	Rectosigmoid contents	2
Rectosigmoid contents	Faeces	2

*The transfer rates of *Publication 100* (ICRP, 2006) for the adult male have been assumed for the Reference Worker.

†Other transfer coefficients not given here are assumed to be zero unless specified in the relevant element section. In most cases, uptake into blood from the alimentary tract is taken to occur from the small intestine (SI) contents, without retention in the SI wall. The corresponding transfer coefficient is: $\frac{\lambda_{SI,RC}}{1-f}$, where $\lambda_{SI,RC}$ is the transfer coefficient from SI contents to right colon contents.

‡The degree of precision of the values given is for computational purposes, and does not reflect the certainty with which the central values are known.

表 3.4. 標準作業者の総合的食事に対応する、通常用いられるヒト消化管モデルの初期設定の移行係数 (1日あたり) *†

1

移行元

口腔内容物

口腔内容物

食道, 高速

食道, 低速

胃内容物

小腸内容物

右結腸内容物

左結腸内容物

直腸・S字結腸内容物

2

移行先

食道, 高速

食道, 低速

胃内容物

胃内容物

小腸内容物

右結腸内容物

左結腸内容物

直腸・S字結腸内容物

糞

3 移行係数[‡] (d⁻¹)

4

*成人男性に対応する *Publication 100* (ICRP, 2006) の移行速度が標準作業者に対応すると仮定されている。

†ここに示されていない他の移行係数は、関連する元素の項目に明示されていない限り、ゼロと仮定される。ほとんどの場合、消化管から血液中への取り込みは、小腸壁における残留を伴わずに小腸内容物が

ら起こるとみなされる。対応する移行係数は〈数式〉であり、ここで $\lambda_{SI,RC}$ は、小腸内容物から右結腸内容物への移行係数である。

†示されている値の精度は計算を目的とするためのものであり、それらの中心値がわかっている場合の確実さを示すものではない。

Table 3.5. Target region fractional weights, $f(r_T, T)$.

Tissue, T	r_T	$f(r_T, T)$
ET	ET ₁	0.001
	ET ₂	0.999
TH	BB*	1/3
	bb	1/3
	AI	1/3
Colon	Right colon	0.4
	Left colon	0.4
	Rectosigmoid	0.2
	LN _{ET}	0.08
	LN _{TH}	0.08
	Lymph (systemic)	0.84
Lymphatic nodes		

ET, extrathoracic; TH, thoracic; ET₁, anterior nasal passage; ET₂, posterior nasal passage, pharynx, and larynx; BB, bronchial; bb, bronchiolar; AI, alveolar-interstitial; LN_{ET}, ET lymph nodes; LN_{TH}, TH lymph nodes.
*The basal and secretory cells are the two target regions weighted equally.

表 3.5. 標的領域の加重割合, $f(r_T, T)$ 1 組織, T

2

結腸

リンパ節

3

右結腸

左結腸

直腸・S字結腸

LN_{ET}LN_{TH}

リンパ液 (全身性)

4

ET, 胸郭外気道; TH, 胸郭内気道; ET₁, 前鼻道; ET₂, 後鼻道, 咽頭及び喉頭; BB, 気管支領域; bb, 細気管支領域; AI, 肺胞-間質領域; LN_{ET}, ET リンパ節; LN_{TH}, TH リンパ節。

*基底細胞および分泌細胞は, 等しく加重される 2 つの標的領域である。

- 4, 5, 6, 7 章, 表なし

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication130 下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。**ドラフトからの引用を禁ず 【事務局】**

4 個人モニタリングおよび作業場モニタリングの方法

4.1 緒言

(195) 本章では、個人モニタリングについて、主要な測定手法、それらの利点および限界について簡潔に述べる。ほとんどの場合、放射性核種の摂取量の評価は、身体の放射能測定、排泄物のモニタリング、個人用エアサンプラを用いたエアサンプリング、作業場の測定、もしくはこれらの手法の組み合わせによって達成されるかもしれない。測定手法の選択は、放射性核種によって放出される放射線のタイプ、機器の利用可能性、汚染物質の体内動態挙動や、ありうる放射線量など、いくつかの因子によって決定されることになる。

4.2 身体の放射能測定（インビボ測定）

(196) 身体または臓器内容量のインビボ測定は、体内の放射能の迅速かつ簡便な推定をもたらす。これは、測定される被験者と関連する特定の位置に配置される 1 台以上の光子検出器を用いて行われる。これは、体外で検出される放射線を放出するような放射性核種の場合にのみ実行可能である。原則として、この手法は、X 線またはガンマ線；消滅放射線の測定によって検出される陽電子；もしくは制動放射線の測定によって検出される高エネルギーベータ粒子（たとえば、親核種 ^{90}Sr の崩壊によって生成される ^{90}Y ）を放出する放射性核種に対して用いることができる。

(197) インビボ測定のために用いられる検出器は通常、部分遮蔽されており、測定されるべき個人は、周囲の放射線源からの干渉を低減するために、遮蔽された低バックグラウンドの部屋に配置することができる。

(198) 直接（インビボ）バイオアッセイは、放射性核種が高収率で高エネルギーのガンマ線放出体であるもしくは陽電子の放出（消滅放射線の放出とともに）によって崩壊する場合に、その物質が人体から速やかに排泄されるのでない限り、最適なモニタリング方法だろう。そのような放射性核種によって放出されるガンマ線は透過性が高いため、身体の近くに配置されるシンチレーション検出器または半導体検出器を用いて容易に検出される。物質が呼吸気道から速やかに吸収され、次に人体組織に均一に分布する（たとえば、ほとんどの一般的な化学形態の ^{137}Cs ）、もしくはいくつかの臓器の間で選択的に分布する（たとえば、 ^{59}Fe ）、のいずれかである場合には、全身モニタリングが選択されるべきである。放射性核種が甲状腺などの単一臓器に選択的に沈着する場合には（たとえば、 ^{125}I 、 ^{131}I ）、関連する臓器の身体部分モニタリングが選択されるべきである。呼吸気道からの吸収がそれほど速くはない物質の場合には（たとえば、 ^{60}Co 酸化物の不溶性形態）、摂取直後は

全身モニタリングよりも肺モニタリングが望ましい。これは全身測定よりも正確な肺沈着および残留の測定をもたらすためである。

(199) 直接バイオアッセイは、比較的低いエネルギーおよび／または比較的低い収率で光子（X 線またはガンマ線）を放出する一部の放射性核種に対しても有用である（たとえば、 ^{241}Am 、 ^{210}Pb 、 ^{144}Ce ）。しかし、主として 25 keV 未満の X 線を低収率で放出する放射性核種の場合（特に、プルトニウムおよびキュリウムのアルファ放出同位体）、直接バイオアッセイは、放射線防護の目的のために要求される感度を達成しないかもしれない。

(200) 放射能が創傷中に存在する場合、それは、汚染物質が高エネルギーガンマ線を放出するならば通常のガンマ線検出器を用いて検出することができる。アルファ放出放射性核種による汚染の場合、検出ははるかに難しい。アルファ崩壊に続く低エネルギー X 線は組織内で激しく減衰することになるためであり、この作用は創傷が深いほど重要になる。放射性物質の位置を突きとめるのが必要になることはよくあり、これは十分にコリメートされた検出器を必要とする。放射性核種混合物による汚染について十分な推定が行われるべきであるならば、創傷モニタはエネルギー弁別能力を有するものでなければならない。全身測定が行われる場合には、創傷部位に残留するいかなる放射能も遮蔽することが必要かもしれない。

(201) インビボモニタリング設備の放射能校正のために、ラボは通常、市販または手製のいずれかの物理ファントムを用いる [たとえば、ボトルマネキン吸収 (Bottle-Mannikin-Absorption) ファントム、肺モニタリングのためのローレンスリバモア胸郭ファントム (Lawrence Livermore thorax phantom) (Griffith et al., 1986 ; Snyder and Traub, 2010)]。このアプローチには、身体寸法、身体形状および放射性核種分布に関して限界がいくつかある。校正ファントムにおける放射性核種の分布は、人間被験者において予想されるものと可能な限り合致すべきである。代わりに、数値校正手法が適用されることもある。数学ソフトウェアは、ファントムおよびシミュレートされた検出器による光子の検出から光子輸送をモデル化するために、ボクセルファントムとモンテカルロ統計的シミュレーションを結合する (Franck et al., 2003 ; Hunt et al., 2003 ; Gómez-Ros et al., 2007 ; Lopez et al., 2011a)。

(202) 国際原子力機関 (IAEA, 1996) および国際放射線単位測定委員会 (ICRU, 2002) は、放射性核種の身体内容量の直接測定に関するガイダンスを提供している。

4.3 排泄物およびその他の生体物質の分析

(203) 排泄物モニタリングプログラムは通常、尿の分析を必要とするが、物質が比較的不溶性である場合には、糞の分析も必要とされることがある。特定の調査のためにその他の試料が分析される場合もある。例には、日常スクリーニング手法としての鼻かみや鼻スミアの利用が

ある。
(204) 尿試料の採集は、3つの考慮事項を必要とする。第一に、試料の偶発的な汚染を回避すべく注意が払われなければならない。第二に、通常は、提供された試料の測定から単位時間あたりに尿中排泄される全放射能を評価または推定することが必要である。ほとんどの日常分析では24-h採集が望ましいが、これが実行可能ではないならば、より少量の試料には代表性がない場合があることが認識されなければならない。24-h試料の採集が容易ではない場合、分析には起き抜けの排尿が望ましい (IAEA, 2000)。尿中クレアチニン濃度の測定は、1日の一部にわたって採集された尿試料から放射性核種の24-h排泄を推定するためにたびたび用いられてきた。24-h排泄の推定値を得る他の方法には、量による正規化(比重に関する補正を伴う、伴わないにかかわらず)や、サンプリング間隔の長さによる正規化がある。さまざまな正規化方法の相対的な利点は、いくつかの著作によって論じられている (Jackson, 1966; Graul and Stanley, 1982; Boeniger et al., 1993; Kim, 1995; Duke, 1998; NCRP, 2008)。トリチウム水形態のトリチウムは、少量の試料のみ採取し、測定された放射能濃度を体内水分中濃度と関連づけるのが通例である、例外的なケースである。第三に、分析のために必要とされる量は分析手法の感度に左右される。一部の放射性核種については、数日分の排泄物の分析によってのみ、十分な感度が達成される (Duke, 1998)。
(205) 日常モニタリングのための糞試料の解釈は、糞中排泄における日々の変動ゆえに不確実性を伴う。したがって、理想的には、採集は数日にわたるべきである。しかし、実際には、複数の試料を採集するのは難しい場合があり、単一の試料に基づいて解釈することが必要になるかもしれない。糞モニタリングは、特に中度に可溶性または不溶性の化合物の吸入による摂取の判明または疑いに続いて行われる特別調査において用いられることがより頻繁にある。これらの事情においては、1日あたり排泄される量の測定は、肺からのクリアランスの評価および摂取量の推定に際して有用かもしれない。日常モニタリングに関する限りでは、採集は単一日よりもむしろ数日にわたるべきである。これは、当初数日間における糞中排泄の大きな変動性ゆえに、異常事象の直後は特に重要である。可能ならば、一部の試料は異常事象日の直後に採取されるべきである。初期の結果は被ばくした個人の特定において有用な場合があるためである。
(206) 光子を放出する放射性核種は、シンチレーション検出器または半導体検出器を用いた生体試料の直接測定によって量定されるかもしれない。アルファおよびベータ放出放射性核種の分析は通常、アルファ分光測定法や液体シンチレーション計数法などの適切な測定手法に先立って、化学的分離を必要とする。いわゆる全アルファまたはベータ放射能の測定は、単純なスクリーニング手法として時には有用な場合がある。
(207) 糞試料の分析においては、質量分析手法の利用が増加している。例には、長寿命放射性核種についてアルファ分光測定法によって可能なよりもはるかに低い検出限界を達成しうる誘導結合プラズマ質量分析法や、尿中の極低濃度の ²³⁹ Puを測定するために用いられる熱イオン化質量分析法がある (Inkret et al., 1998; LaMont et al., 2005; Elliot et al., 2006)。

3

(208) 呼吸中の放射能の測定は、 ²²⁶ Raや ²²⁸ Thなど、一部の放射性核種についてモニタリング手法として用いられる場合がある。これらの両放射性核種の崩壊系列には吐き出されるかもしれないガスが含まれるためである (Youngman et al., 1994; Sathyabama et al., 2005)。これはまた、 ¹⁴ C標識化合物の代謝によってインピボで形成される ¹⁴ CO ₂ を測定するためにも用いることができる (Leide-Svegborn et al., 1999; Gunnarsson et al., 2003)。
(209) 鼻スミアおよび鼻かみ試料における放射能の測定は、有用なスクリーニング手法として用いられる場合がある (Smith et al., 2012)。肯定的な測定値は、予想外の状況が生じたかもしれないことの目安となる。摂取を確認し定量評価をもたらすために、排泄物測定または肺モニタリングが続いて行われるべきである。

4.4 作業場の被ばくモニタリング

(210) 作業場モニタリングは、バイオアッセイ測定のきつかけとなるために有用である。さらに、作業場の特徴づけは、バイオアッセイモニタリングの補完として用いられることもある。これは作業環境に存在する放射性核種の物理的および化学的組成に関する有用な情報をもたらすためである [たとえば、粒径 (AMAD) に関する情報]。
(211) 個人被ばくのモニタリングのために用いられることがある作業場モニタリングの方法は2つある。すなわち、個人エアサンプリング (PAS) と静的エアサンプリング (SAS) である。個人用エアサンブラは、作業者の呼吸領域における空气中放射能濃度の測定から個々の作業者による摂取量を推定するために特に設計された携帯用の装置である。フィルタを含むサンプリングヘッドは、呼吸領域内の胴体上部に装着される。空気は、作業者が携帯する校正済エアポンプによってフィルタを通じて吸い込まれる。理想的には、サンプリング速度は作業者の場合の典型的な呼吸率と同様だろう (およそ 1.2 m ³ h ⁻¹)。しかし、現在の装置のサンプリング速度は、この値のほぼ5分の1に過ぎない。フィルタ上の放射能は、異常に高いいかなる被ばくの目安ともなるように、サンプリング期間の終了時に測定される場合がある。PAS測定から摂取量を評価する際の難点は、Whicker (2004) によって考察された。呼吸領域の測定値は大幅に変動する可能性がある。それらは、線源に關してのサンブラの向き、サンブラが装着される下襟 (右か左か)、エアサンプリングヘッドの設計、粒径、局所気流速度および方向や、作業者の呼吸領域内および周囲の急勾配などの測定条件によって影響されるためである。
(212) Britcher and Strong (1994) は、英国におけるコールダーホール原子炉およびセラフィールド核燃料再処理施設に対する内部線量算定モニタリングプログラムの一環として、PASの利用をレビューした。サンブラは、作業者のグループについては摂取量の十分な推定値を得るために利用できると結論づけられた。しかし、個人についてはPASを用いた評価と生体試料を用いた評価の相関は乏しく、筆者らは、操業環境において遭遇する被ばくのレベルで個々の被用者の年摂取量を推定する上でのPASの適切性に疑問を投げかけた。筆者らはまた、

4

<p>環境モニタリングの場合、PAS は SAS プログラムにまさる何らかの利点を提供するのかどうかについても疑問視した。PAS に基づく摂取量推定値とバイオアッセイ試料に基づく摂取量推定値の間の同様の相関欠如は、既知の急性被ばくについても見られた (Britcher et al., 1998)。</p>
<p>(213) 米国テネシー州オークリッジの Y12 ウラン濃縮プラントにおいて、PAS によって予測されたウラン摂取量とバイオアッセイによって予測された摂取量の間の相関を決定するために、Eckerman and Kerr (1999) によってウラン被ばく研究が実施された。この研究は、2 つの測定値の間の相関は乏しいと結論づけた。</p>
<p>(214) 静的エアサンブラは、作業場の状態を監視するために一般に用いられるが、作業者の呼吸領域における空気中濃度を過小評価する可能性がある。Marshall and Stevens (1980) は、PAS:SAS の空気中濃度比は作業の性質によって 1 未満から 50 まで変動しうると報告した。Britcher and Strong (1994) は、英国におけるマグノックスプラント作業者に対するモニタリングデータのレビューから、PAS データから評価される摂取量は SAS データによって含意される摂取量よりもほぼ 1 桁大きいと結論づけた。しかし、SAS 装置は、放射性核種の組成と、カスケードインパクタなどの粒径分析器とともに用いられるならば粒径に関する有用な情報を提供しうる。</p>
<p>(215) 全体としてみると、PAS および SAS の利用は包括的な作業場モニタリングプログラムの重要な部分でありうるし、被ばくリスクの初期の目安を提供しうる。PAS および SAS の利用に関する経験は、エアボーン放射性核種の個人摂取量および実効線量の評価のためには身体の放射能測定および/または排泄物の分析が望ましいことを示している。</p>
<p>(216) しかし、一部の超ウラン放射性核種については、バイオアッセイ試料の分析のための高感度の質量分析手法が利用できるのではない限り、身体放射能測定および尿分析は数 mSv を十分確実に上回る被ばくを定量化しうるに過ぎない。より低い被ばくの検出のためには、モニタリング方法の組み合わせが必要になると思われ、これにはエアサンプリングおよび糞分析が含まれうるだろう。</p>

<p>5 モニタリングプログラム</p>
<p>5.1 緒言</p>
<p>(217) 本章では、モニタリングプログラムの設計および管理について考察する。いかなる特定のモニタリングプログラムにおいても、関連する線量限度の有意な割合を日常的に受けそうであるとみなされる作業者もしくは事故の場合に被ばくが有意なものになりうると思われる区域で作業する作業者に対する線量の正式な評価に重点が置かれるべきであると勧告されている。</p>
<p>(218) 一般に、個人に対する内部被ばくモニタリングプログラムの割り当ては、その個人が通常操作の結果としてもしくは事故の場合に、あらかじめ定められたレベルを超える放射性物質を摂取しうるであろう尤度に基づくものとすべきである。年摂取によるその年実効線量が 1</p>

<p>mSv を超えうるであろう作業者に対する個人モニタリングの利用は多くの組織において共通の慣行であるとはいえ、それは法律によって要求されているのではないかもしれない。</p>
<p>(219) 重要なのは、モニタリングプログラムの設計と線量評価プロセスのいずれも放射線防護プログラム全体の一体化した部分とみなすことである。適切に設計されたモニタリングプログラムは、線量評価が特定の必要を満たすことを可能にするために必要なデータをもたらすものとすべきであり、最も精密な線量評価計算でき、不十分なモニタリングデータを埋め合わせることはできない。</p>
<p>(220) 評価された線量が有意なものになりうると思われる場合、異なるモニタリング方法 (たとえば、肺、尿、糞モニタリングや、作業場における被ばくモニタリング) の組み合わせを用いることによって得られるべきものは多い。それらは補完情報を提供するためである。たとえば、直接バイオアッセイ測定は臓器における沈着および残留に関する情報を提供し、尿の測定は全身性取り込みの尺度を提供しうるが、作業場モニタリングはエアボーン放射能、粒径、化学的形態および摂取時間に関する情報を提供しうる。</p>
<p>(221) これらの測定された放射能 (バイオアッセイモニタリング結果および作業場の測定値) を用いた摂取量および/または線量の評価は複雑であるかもしれない、ケースバイケースで専門家の判断を必要とすることがよくある。線量評価の責任は、適切な教育、訓練および実務経験を通じて得られた十分な専門知識と技能を有する専門家にのみ割り当てられるべきである。</p>

<p>5.2 個人モニタリングプログラムの設計に関する一般原則</p>
<p>(222) 個人モニタリングプログラムの仕様には、用いられるべきモニタリング方法 (たとえば、体内および排泄物試料中の放射能の測定や、作業場における被ばくモニタリング)、用いられる測定手法 (たとえば、光子分光測定法、アルファ分光測定法、質量分析法)、日常モニタリングにおけるモニタリング間隔、そして特殊モニタリングにおける測定期間または試料採集期間が含まれる。</p>
<p>(223) 個人モニタリングプログラムを設計する際は、多数の因子が考慮される必要がある。これらの因子には、モニタリングの目的 (たとえば、それは規制要件の遵守を実証するために実施されるのか、それとも線量は極めて低いことを単に確認するために実施されるのか)、モニタリングが行われるべき作業者の数や特定の測定方法の利用可能性など、現場の因子、そして経済的因子が含まれる。モニタリングプログラムの線量算定性能を決定する主たる因子は、作業者がそれにさらされる恐れがあるかもしれない (通常は吸入摂取によって) 物質の特性と関連する。これらの特性は以下のようなものである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射性核種およびその子孫核種によって放出される放射線 放射性核種およびその子孫核種の実効半減期

<ul style="list-style-type: none"> • エアロゾルの呼吸気道沈着特性 • その物質の呼吸気道吸収特性および消化管吸収特性 • 摂取と測定との時間の関数としての、体内における残留または人体からの排泄速度 • 特定の人体臓器および組織におけるあらゆる選択的沈着ならびに、それらの臓器におけるその後の残留 • 親核種の体内動態挙動とその子孫核種の体内動態挙動のあらゆる有意な相違 • 排泄経路（たとえば、尿、糞） • 測定の技術的な実行可能性 <p>(224) モニタリングプログラムの線量算定性能は、評価された線量の正確さおよびモニタリングプログラムと関連する感度に対するこれらの因子の影響を考慮することによって評価される場合があり、これは評価された最小検出可能線量によって定量化することができる（Carbaugh, 2003 ; Etherington et al., 2004a,b）。モニタリングプログラムの設計の最適化アプローチの1つは、測定のタイプ、数および期間に関するさまざまな選択肢は評価された線量の不確実性にどのように影響を及ぼすのかを評価することである。</p>
--

<p>5.3 モニタリングプログラムのカテゴリー</p> <p>(225) 一般に、4つのカテゴリーのモニタリングプログラムを定義することができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 日常モニタリングは、作業による摂取が通常作業時のいつでも起こりそうな場合、もしくは、さもなければ偶発的な摂取が気づかれていないままになりうると思われる場合に実施される。 • 特殊モニタリングは、現実のまたは疑われる異常事象の後に実施される。 • 確認モニタリングは、作業条件は十分なものであることを、また、日常個人モニタリングの必要はないことを実証するために実施される。これは随時の個人モニタリング測定からなりうるだろう。 • 職務関連モニタリングは、特定の作業に関する情報を提供するために実施される。 <p>(226) モニタリングのこれら4つのカテゴリーは相互に排他的なものではなく、実際にはかなり重なり合うものでありうる。たとえば、有効な日常モニタリングプログラムは、個々の作業者の被ばくおよび線量に関する信頼できるデータを提供するだけでなく、作業環境および作業手順が十分な管理下にあることを実証するためにも用いられる。</p>
--

<p>5.3.1 日常モニタリング</p> <p>(227) 日常モニタリングプログラムは、達成される感度次第で、ただ1つのタイプの測定を必要とする場合もあれば、手法の組み合わせを必要とする場合もある。放射性核種によっては、実際的な測定手法は1つのみである（たとえば、トリチウムの摂取量を評価するための尿モニタリング）。測定と解釈のいずれについても難しさを呈するプルトニウム同位体などの放射性核種の場合は、さまざまな手法を用いることが必要かもしれない。十分な感度のさまざまな方法が利用可能な場合、解釈の正確さの点からの一般的な優先順位（最高位が筆頭）は、身体放射能測定；排泄物の分析；そして作業場における被ばくモニタリングである。</p> <p>(228) これらの手法は、一般に補完的であって、相互に排他的なものではない。たとえば、作業環境のモニタリング（エリアモニタリング）の結果は、作業者の被ばくの初期の目安を提供することが可能であり、したがって特別なバイオアッセイモニタリングのきっかけとするために利用することができるし、それらの結果は、個人モニタリングの結果の解釈を助ける情報（たとえば、エアボーン放射能、粒径、化学的形態および可溶性や摂取時間に関する情報）を提供する場合もある。</p> <p>(229) 尿モニタリングは、尿中排泄速度が十分に高い元素について、吸入摂取および経口摂取後の臓器および組織への全身性取り込みの尺度を提供する。これは、創傷部位に沈着した放射能のうち全身性循環へと移行する割合を決定するためにも用いることができる。</p> <p>(230) 呼吸気道から比較的ゆっくりと吸収される物質（すなわち、「不溶性」物質）について尿モニタリングを用いる際は、注意が払われるべきである。これらの事情においては、実効線量に最も大きく寄与するのは通常は肺線量であり、物質の吸収特性に係る知識に関する不確実性は、評価された線量における有意な誤差に帰着する可能性がある。不溶性物質の場合、尿モニタリングに加えて糞モニタリングを用いることによって、感度の大きな向上を達成することができる。これは、ET気道と肺のいずれかに沈着した不溶性物質も、そのかなりの割合が消化管を経由して糞へと除去されるためである。</p> <p>(231) 糞モニタリングデータの解釈では、糞中排泄経路に固有のいくつかの因子を考慮に入れる必要がある。糞の排泄は不連続プロセスであるため（通常は一次動態を用いてモデル化されるとはいえ）、1日あたりの排泄速度を得るには3-dの期間にわたって排泄された量を合計するのが望ましい。</p> <p>(232) 個人は作業場では、燃料再処理プラントや燃料加工プラントにおいて生じるものなど、さまざまな放射性核種にさらされる場合がある。そのような事情においては、プラントにおける他の放射性核種への被ばくの可能性を評価するために、容易に検出できる放射性核種を用いることが実行可能かもしれない。たとえば、アクチニド被ばくの可能性を評価するために¹⁴⁴Ceを対象とするスクリーニングを用いること</p>

<p>ができるだろう (Doerfel et al., 2008)。</p>
<p>(233) 空気汚染を対象とする作業場モニタリングの結果は、個人モニタリングが実行可能ではない場合、個人摂取量を推定するために用いられることがある。しかし、摂取の点からのエアサンプリング測定結果の解釈は、はるかに大きい不確実性およびバイアスに左右される。</p>
<p>(234) 被ばくの確率および摂取のありうる時間パターンは、遂行されている職務に依存することがよくある。たとえば、鉱業における作業者の場合、被ばくは慢性かもしれない。他方、原子力発電所における作業者は、事故というまれな場合を除いて、有意な摂取量を被らないと予想される。</p>
<p>(235) 日常モニタリングプログラムにおいて要求される測定頻度は、放射性核種の残留と排泄および利用可能な測定手法の感度に左右される。モニタリング間隔の選択は摂取の発生確率を考慮に入れるものとすべきであるため、摂取リスクが高い場合には、摂取時間における不確実性を低減するためにモニタリング頻度を引き上げることが必要かもしれない。測定手法は、測定値における不確実性が不確実性の主因に比べて小さいように選択されるべきである。</p>
<p>(236) 急性被ばく状況が予想されるかもしれない状況の場合、Publication 78 (ICRP, 1997b) は、不明な被ばく時間から生じる摂取量の推定における考えうる誤差を限定する単純なルールを提示している。モニタリング間隔は、摂取の時間が不明であることによって導入されるいかなる過小評価も 3 分の 1 を超えないように選択される。実際には、これは最大の過小評価である。実際の被ばく分布は適時には不明だからである。評価された摂取量における誤差は、モニタリング間隔にわたる被ばくの確率分布次第で正と負のいずれの値もとりのが、いかなる過小評価の平均値も 3 分の 1 を下回るという結果になる。しかし、摂取量のかかなりの部分がサンプリングまたは測定の直前に生じる場合、摂取量は 3 倍超過大評価されうるだろう。これは、排泄物モニタリングの場合は特に重要かもしれない。毎日排泄される割合は、摂取に直接続く期間において時間とともに急速に変化することがあるためである。</p>
<p>(237) 代替のグラフ式アプローチが Stradling et al. (2005) によって開発されており、これは、吸入、粒径分布や摂取の時間を記述するパラメータなどの物質固有パラメータにおける不確実性を考慮するものである。対象線量レベルの場合に適切なモニタリング間隔を決定するには、特定の測定手法における検出限界に関する情報が用いられる。</p>
<p>(238) 慢性被ばくが予想される場合、モニタリングプログラムは、体内および排泄物中に存在する量は平衡に達するまでいずれは増加することになるという事実を考慮に入れて選択されるべきである。それぞれのモニタリング間隔において、測定値は、先行する数年に被った慢性摂取の結果として人体臓器に蓄積された放射能を反映することになる。モニタリングプログラムは、作業者の割り当て職務を考慮するものとすべきである。一定の放射性核種の場合、週末前後または欠勤前後に得られた測定値には有意差が生じることがある。</p>

<p>5.3.2 確認モニタリング</p>
<p>(239) 作業条件が十分なものである (一般的には、年実効線量が 1 mSv を下回る場合) ことを確認する 1 つの方法は、随時の個人モニタリングを行うことである。予想外の調査結果はさらなる調査の根拠となるだろう。このタイプの確認モニタリングは長期間にわたって体内に保持される放射性核種について最も有用であり、随時測定は体内に放射能の蓄積が存在しないことを確認するために行われるかもしれない。</p>
<p>5.3.3 特殊モニタリングまたは職務関連モニタリング</p>
<p>(240) 特定の職務または事象と関連するモニタリングは、新奇なまたは異常な状況の考えうる最良評価を行うために手法の組み合わせを必要とすることがよくあるかもしれない。特殊モニタリングと職務関連モニタリングのいずれも、現実の事象であれ疑われる事象であれはっきりした事象と関連するため、日常モニタリング結果の解釈において遭遇する問題の 1 つはあてはまらない。摂取の時間はわかっているからである。さらに、汚染物質の物理的および化学的形態に関するさらに固有の情報も存在するかもしれない。</p>
<p>(241) 疑われる事象のケースによっては、その異常事象の重大性を暫定的に推定するためにスクリーニング手法 (鼻かみ試料や鼻スミアの測定など) が用いられる場合がある。これらのケースでは、摂取が起こったことを確認するために、またその摂取量の概算を示すために、鼻における領域別沈着を用いることができる。肯定的な鼻スワブは、特別なバイオアッセイ測定のきっかけとすべきである (Guilmette et al., 2007)。</p>
<p>(242) 体内からの放射性核種の排出速度を高めるために治療上の手順が適用されている場合、体内におけるその残留を追跡するとともに線量評価の基礎をもたすために、特殊モニタリングが必要とされるかもしれない。治療が行われている場合、モニタリング方法の選択においては注意が払われなければならない。放射性核種の通常の体内動態が大幅に変化するためである。たとえば、プルシアンブルーは糞によるセシウム放射性同位体の排出を高める。したがって、日常的には用いられないとはいえ、糞のバイオアッセイがインビゴおよび尿モニタリングに加えて実施されるべきである。</p>
<p>(243) 切傷または創傷に続いて、何らかの放射性物質が皮下組織まで浸透し、したがって血液によって取り込まれ身体の方々に分布することがある。放射性核種および放射能の量次第では、医学的調査および特殊モニタリングプログラムに取りかかることが必要な場合もある。これらの状況においては、創傷の部位における放射性物質の量は、切除の必要に関する決定を助けるものとして、異物中および組織中の放射線の自己減衰を考慮に入れて決定されるべきである。創傷から物質を取り除く試みが行われる場合、放射能収支を維持するために、創傷部位に</p>

において回収された放射能と残留する放射能の測定が行われるべきである。切除された物質は、線量評価に情報を与えることができる、同位体比および物理化学的組成に関する情報も提供しうる。いかなる追加預託実効線量もそこから計算することができる、血液および人体組織へのいかなるさらなる取り込みも量定するために、一連のさらなる測定が必要とされる場合もある。

5.4 誘導調査レベル

(244) 放射性核種への潜在被ばくの多くの状況においては、モニタリングプログラムにおいて測定される量（すなわち、全身内容量、臓器内容量、1日あたりの尿中または糞中排泄、空气中放射能濃度）について誘導調査レベル（DIL）を定めるのが都合がよい。DILとして選択される値は、線量またはあらかじめ定められた摂取量として表された調査レベル（IL）と直接関連するかもしれない。たとえば、放射性核種の摂取が $IL=1\text{ mSv}$ を超える預託実効線量に帰着する場合は常に、調査が必要とされるだろう。したがって、単一の放射性核種についての、時間間隔を T 日とする日常モニタリングプログラムにおいては、対応する DIL は 1 mSv の預託実効線量を与えるであろう身体内容量に基づくものとすることができるだろう。これは、1年以内に複数の摂取が起こる確率は低いとみなされる場合には適切だろう。この確率が比較的高く、1年を通した摂取の確率は一律であるとみなされる場合には、DIL は $IL*(T/365)\text{ mSv}$ の預託実効線量から導き出すことができるだろう。ここで、この例では $IL=1\text{ mSv}$ である。

(245) ILに相当する値は、関連するグラフから直接得るもしくは、本報告書シリーズまたは付随する電子付属文書に示されているデータセットに含まれる単位内容量あたりの線量の関数の表から計算することができる。*Publication 103* (ICRP, 2007) に述べられている拘束値は、ILを定めるための基礎として用いることができるだろう。そのような IL を定める際は、他の被ばく源（すなわち、他の放射性核種および外部照射）にしかるべく注意を払わなければならない。摂取量および線量は低いとわかっており、これらのプロセスへの取り組み経験がかなりある状況においては、経験に基づいて測定量について単純に IL を定めることが可能かもしれない。IL を超える測定結果は、通常条件からの逸脱およびさらに調査する必要性を指摘するだろう。

5.5 記録の保存および報告

(246) 線量記録の保存とは、放射線作業員について個人線量記録を作成し保存することである。これは、線量限度および線量拘束値の遵守を実証するために外部放射線と放射性核種摂取の両方に対する個人被ばくのモニタリングを行うプロセスの不可欠な部分である。これはまた、被ばく管理の目的のための重要な情報も提供しうる。記録の保存については正式な手順が確立されるべきであり、これらの手順は IAEA (1999b, 2004a) による出版物に述べられている。個人モニタリングおよび作業場モニタリングの結果を報告するための手順および規準は、管理者およ

び/または規制当局によって明確に指定されるべきである。報告される情報は、明確に識別でき、わかりやすく、のちに必要な場合に測定値から線量を再計算するのに十分なものとすべきである。文書化されるべき情報には、用いられたモデル、仮定およびコンピュータコードの明細が含まなければならない。事故状況においては、管理者の行動の必要性および追跡モニタリングの必要性を判断するために、中間情報が必要とされることになる。

5.6 品質マネジメントシステム

(247) 放射線防護プログラム全体における品質マネジメントシステムの必要性は、国際標準化機構によって発行された 2 つの規格 (ISO, 2006, 2011) の中で論じられている。完全な説明についてはこれらの規格が参照されるべきであるが、より重要な論点のいくつかを以下に示す。

- 品質保証プログラムの性質および範囲について決定する際は、モニタリングが行われる作業員の数ならびに予想される被ばくの規模および確率に考慮が払われるべきである。
- 放射性核種の組成、吸入される粒子のサイズ、化合物の正体や吸収挙動などの因子に関する仮定は、適切な測定によって検証されるべきである。
- レビューまたは監査は適時に実施されるべきである（たとえば、新たなモニタリングプログラムが実施される場合や、プログラムに重要な変更が加えられる場合）。

(248) 研究機関は、測定および線量評価の国内のまたは国際的な相互比較に適切な間隔で参加すべきである。そのような参加は、測定手順および線量評価手順の正確さの決定を可能にし、信頼性を増進し、方法の調和化を容易にする。

6 遷及的線量評価および遷及的線量検証の一般的な側面

6.1 緒言

(249) 防護の目的のために計算される実効線量は人体の臓器および組織に対する等価線量から決定され、これらの等価線量もまた、それらの臓器および組織に対する平均吸収線量から計算される (1.2 節)。実効線量は、特定の個人の特性ではなく所定の被ばく条件を考慮に入れる値である。特に、実効線量を決定するために用いられる組織加重係数は、さまざまな年齢かつ両性の多数の個人にわたる平均を表す、選択され概数化された値である。標準男性および標準女性のそれぞれの臓器または組織に対する等価線量は平均され、これらの平均線量はそれぞれ、

<p>標準人の場合の性平均実効線量を決定するために、対応する組織加重係数を乗じられる (ICRP, 2007)。実効線量は個人固有の線量ではなく、むしろ所定の被ばく条件下にある標準人の場合の線量を示すということになる (ICRP, 2007)。</p>
<p>(250) 適及的線量評価のために適用されるかもしれない選択的アプローチは 2 つある。</p> <ul style="list-style-type: none"> 直接測定 (たとえば、全身または特定の臓器および組織における放射性核種の放射能を外部計数によって測定すること) および/または間接測定 (たとえば、尿中または糞中の放射性核種の放射能を測定することや、作業場における被ばくモニタリング) から、放射性核種の摂取量を計算する。放射性核種摂取量の評価においては測定値を解釈するために体内動態モデルが用いられ、その後実効線量が、ICRP によって勧告された基準線量係数 (単位摂取量あたりの線量, Sv Bq⁻¹) を用いて計算される、もしくは ICRP が勧告した方法論 (ICRP, 2007) を用いて決定される。 測定値を摂取の時間と関連づける関数を用いて、測定値から直接、預託実効線量を計算する。これらの測定値は、全身または臓器内容量、24-h 尿または糞試料中の放射能、もしくは作業場における空気中の放射性核種濃度でありうるだろう。バイオアッセイデータの解釈のために、このアプローチは、摂取後の時間の関数として「単位内容量あたりの線量の関数」の表 (ICRP, 2007) の利用を必要とする。
<p>(251) これら 2 つのアプローチは同等であり、同じ体内動態モデル、パラメータ値および仮定が用いられる限り同一の結果をもたらすべきものである。</p>
<p>(252) 選ばれた放射性核種に対応する「単位摂取量あたりの線量係数」の表は、本報告書シリーズおよび付随する電子付属文書に示される。放射性核種の急性摂取後の特定の時間において測定されたバイオアッセイ量の値に対応する預託実効線量も提示される。提示されるデータのさらに詳細な説明は、7.3 節に示す。これらの表は、バイオアッセイデータの解釈における調和化を促進すべき、単純で容易に利用できる手段を提供する。</p>
<p>(253) 実効線量の計算においてパラメータ値が基準値から変更されるような事情が生じることもあるかもしれない。したがって、特定の被ばく事情の下では実効線量の計算において変更されるかもしれない基準パラメータ値と、実効線量の定義に基づく変更されない値を区別することが重要である。実効線量は標準人にあてはまるため、個人固有のパラメータ値は変更されるべきではないが、物質固有のパラメータ値は変更されるかもしれない。個人固有パラメータ値の例には、線量算定用ファントムを記述するパラメータ、HRTM の呼吸パラメータおよび粒子輸送パラメータ、消化管移行係数 f_A 以外の HATM のパラメータや、全身性モデルのあらゆるパラメータがある。物質固有パラメータの例には、肺から血液への吸収パラメータ、吸入エアロゾルの AMAD などのエアロゾルパラメータや f_A がある。</p>
<p>(254) 大多数のケースでは、評価された線量は線量限度と比較して低く、そのような場合、線量評価では、勧告された物質固有パラメータ</p>

<p>既定値、表にまとめられた線量係数、本報告書シリーズに付随する「単位内容量あたりの線量の関数」の表を利用することになるだろう。評価された線量が比較的高くなりそうな場合、もしくは複数のモニタリング方法が用いられており、いくつかのモニタリング測定が行われている場合、勧告された既定値以外の物質固有パラメータ値が用いられるかもしれない。</p>
<p>(255) モニタリングデータから線量の適及的評価に取り組む際、評価者は、摂取のパターンや物質の特性などの因子について、これらの因子に関する特定情報の欠如ゆえに、仮定を行うことが必要かもしれない。モニタリングデータの組み込みによる預託線量の推定に関する一般ガイドラインを示すために、欧州委員会の第 5 次枠組みプログラムに含まれる欧州プロジェクトが設立された (IDEAS プロジェクト)。この IDEAS プロジェクトは、線量評価に関する ICRP 作業班によって行われた提案をもとに (Fry et al., 2003)、個人モニタリングデータの構造化された解釈アプローチを開発した (Doerfel et al., 2006, 2007; Castellani et al., 2013)。このガイダンスは、欧州放射線線量測定グループがさらに発展させている (Marsh et al., 2008; Lopez et al., 2011b)。</p>
<p>(256) このガイダンスに加えて、ISO は、作業者のモニタリングのための内部線量評価に関する最低要件を明細に記した国際規格 ISO 27048:2011 (ISO, 2011) を発行している。これらの IDEAS ガイドラインおよび ISO 27048 はいずれも、線量評価のために必要とされる労力は予想される被ばくのレベルにおおむね相応するものとすべきであるという原則を採用している。</p>
<p>(257) 特定の個人に対する線量が線量限度をかなり超えるかもしれず、放射線リスクを評価することが必要な異例のケースでは、臓器固有のリスクを決定するために臓器または組織固有の推定値が必要である。そのような場合は、臓器における吸収線量が計算され、最も適切な生物効果データおよびリスク係数データとともに用いられるべきである (ICRP, 2007)。この適及的個人線量評価は、認められた専門知識、技能および実務経験を有する専門家によってのみ行われるべきである。個別的な適及的線量評価およびリスク評価を行う方法に関する助言を提供することは、本刊行物の範囲外である。</p>
<p>(258) 以下の節では、被ばくに関して収集されるべき情報について論じ、単一または複数の測定におけるデータ取り扱いアプローチを要約し、測定の不確実性を含めて内部線量評価と関連する不確実性について論じる。分析の 2 つのタイプについて論じる。すなわち、標準評価とサイト固有の評価である。</p>

6.2 分析のタイプ

6.2.1 ICRP の既定の体内動態モデルおよび線量算定計算モデルを用いた基礎評価

(259) 予測的に評価された、放射性核種の摂取による作業者の年預託実効線量が低く、取り扱われる放射性核種の半減期が短く、存在する

物質の量が限られる施設および職務の場合、内部モニタリングは、遵守を実証するために行われる場合もあれば、他の目的のために定められる場合もある。それらの施設における作業員の場合、一般には、サイト固有または物質固有のパラメータを用いてモニタリング測定結果を評価する必要はない。典型的な一例は、核医学業務である。国の当局によって要求される場合には、作業場の特徴づけ（たとえば、AMAD の決定）の必要なしに、ICRP の標準モデルを用いて、技術スタッフ、医師および看護師のバイオアッセイモニタリングが成し遂げられることになる。他の例には、微量の放射性同位体を用いる大学や研究機関があるかもしれない。
(260) 新たな摂取が確認されているような日常作業の場合には、以下の既定の仮定を用いて、標準評価が行われるかもしれない。 <ul style="list-style-type: none"> • 摂取はモニタリング間隔の中間点における急性事象だった。 • 被ばくは AMAD が $5 \mu\text{m}$ である物質の吸入摂取によるものだった。 • 吸収値および f_A 値：既知の物質に対応する吸収タイプまたは比吸収パラメータ既定値は、本報告書に述べられているとおりである。化合物が不明である場合、「不特定化合物」に対応する吸収タイプが用いられるべきである。
(261) 代わりに、サイト固有または物質固有の既定値が利用可能であり文書化されているならば、作業員が従事したプロセスにはこれらの既定値が適切であることが明らかにされていることを条件に、それらを用いてもよい。
(262) 予測実効線量の値が以前に定められた低値（たとえば、 1 mSv ）を下回ることが確認されるならば、いかなるさらなる評価も必要ではない。

6.2.2 線量の詳細評価

(263) 作業員が線量限度の特定割合に定められた参考レベルを上回るもしくは DIL（たとえば、線源の管理の喪失などの状況における）を上回る線量に被ばくする可能性がある施設では、作業場モニタリングプログラムの一環として、吸入摂取または経口摂取された放射性核種の物理的および化学的特性について、また、摂取の時間およびパターンについて、情報が収集されるべきである。この情報は、評価を精密にするとともに評価された線量における不確実性を低減するために用いられるかもしれない。そのような評価において用いられるかもしれない情報のタイプについては、6.4 節に論じる。

6.3 被ばく状況の理解

(264) 被ばく状況を理解するために、作業場の情報が収集されるべきである [たとえば、取り込まれたかもしれない放射性核種（自然系列
--

の場合の平衡仮定を含む)、化学的形態、想定される粒径、あらゆる摂取のありうる時間、パターンおよび経路]。
--

6.3.1 摂取の時間およびパターン

(265) バイオアッセイデータの解釈における不確実性の主因は、摂取の時間およびパターンの割り当てである。予測される測定値を与えるバイオアッセイ関数は摂取以後の時間に依存するため、摂取はいつ起こったと仮定されるのかによって、摂取の推定値は変動することになる。単一の汚染事象、モニタリング期間中の複数の個人事象、短期間持続する摂取や慢性摂取など、考えうるさまざまな摂取パターンに考慮が払われるべきである。
(266) 慢性摂取が予想されるならば、測定（またはサンプリング）の時間を選択する際およびバイオアッセイモニタリングの結果を解釈する際に勤務スケジュールは考慮されるべきなのかどうかについて評価が行われるべきである。摂取量のある割合が急速に排泄される元素の場合、週末、休暇や休日など、いかなる被ばくも起こりえないであろう時間および期間は、評価された摂取量に大きな影響を及ぼさうだろう。半減期が短い放射性核種を除いて、そのような期間直後の測定またはサンプリング時間の選択は、急速な排泄と関連する、評価された摂取量における不確実性を低減することになる。
(267) 慢性被ばくは予想されない日常モニタリングの場合は、モニタリング間隔の終了時点において行われた測定から摂取量を推定することが必要であり、これは摂取の時間を知ることを伴わないことがよくある。
(268) 日常バイオアッセイプログラムから肯定的な測定値が現れる場合（すなわち、摂取が起こったかもしれないことを知らせる測定値）、気中または表面汚染レベルなどの作業場モニタリングデータのレビューは、摂取が起こったことがありうる時間を知らせる可能性がある。同様に、同じ作業場における他の作業員が肯定的な日常バイオアッセイ試料を示している場合、それらの個々の作業員に対応するデータおよびモニタリングスケジュールのレビューは、あらゆる作業員に対応する摂取の時間を決定するのを助けることになる。作業員との面談は、異常事象、異例の手順または機器の故障がその摂取につながった可能性はあるのかどうかをはっきりさせるものとすべきである。肯定的な測定値を確認するために、追跡バイオアッセイがスケジュールされるべきである。ことによると異なるタイプの測定を含めて、複数のバイオアッセイ結果が利用可能な場合、これらの結果と摂取量残留割合の表の比較は、摂取が起こった時間の選択を狭めるのに役立つかもしれない。
(269) 別のアプローチは Miller et al. (2002) によって述べられており、そこではマルコフ連鎖モンテカルロアルゴリズムを用いて、ベイズ統計学ベースの線量算定計算が行われる。利用可能なあらゆるバイオアッセイデータを同時に分析するこの方法は、あらかじめ同意された一連の体内動態モデルを用いて、 N の起こりうる摂取に対応する数、規模および時間を確率的に決定する。加重尤度モンテカルロサンプリング

方法は、もう 1 つのベイズ的手法である (Puncher and Bircall, 2008)。このアプローチでは、バイオアッセイデータが得られる前の被ばくに関する知識の状態を表現する確率分布から、摂取の体内動態モデルパラメータおよび時間の標本が抽出される。それぞれの標本は、「加重尤度」と呼ばれる量を得るために、所定の摂取に対応する適切な尤度関数によって加重される。観察された測定データを考慮した、それぞれの摂取の確率および摂取の時間は、単一数値積分手法を用いて加重尤度から計算される。これらの方法は、計算集約的であるとはいえ、他のタイプの事情情報がない場合に摂取の時間を仮定する必要を回避する。

(270) *Publication 54* および 78 (ICRP, 1988a, 1997b) では、いかなる情報がない場合も、摂取の時間は等しくモニタリング間隔 T の中間点の後よりも前に生じたであろうと論じられており、それゆえ、これらの状況においては $t=T/2$ という値が用いられるべきであると提言されている (すなわち、摂取はモニタリング間隔の中間点において起こったと仮定される)。代替アプローチも提言されている (Strom, 2003; Puncher et al., 2006; Birchall et al., 2007; Marsh et al., 2008a, 2008b)。しかし、ほとんどの事情においては、これらの代替アプローチの結果は中間点方法と大きく異なることはなく、摂取および線量の過大評価はおおよそ 2 倍未満かもしれない。本書では、標準評価 (6.2.1 項) には中間点方法を勧告する。

6.3.2 摂取の経路

(271) 作業場では吸入摂取のみによる摂取が最も一般的であるとはいえ、経口摂取ならびに創傷および無傷の皮膚を通じた取り込みによる摂取を除外することはできない。摂取の経路が不明な場合であって、異なるタイプのバイオアッセイ測定を含めて複数のバイオアッセイ結果が利用可能ならば、これらの結果の比較は経路の決定に役立つかもしれない。施設によっては、複数の経路による同時摂取が起こりうる。

(272) 放射性核種の放射能を直接測定によって評価することができるならば、吸入摂取された物質と経口摂取された物質を区別するために肺計数を用いることができる。しかし、これが可能ではなく、放射性核種が不溶性形態である場合、摂取の点からの糞および尿試料中に排泄された放射能の解釈は、実に問題をはらむ。上部呼吸気道に沈着する経口摂取された物質と吸入摂取された物質はいずれも、摂取後の当初数日間で糞を通じて除去されることになる。したがって、急性摂取後できるだけ早急に排泄物サンプリングを開始し、引き続き期間にわたって継続することが重要である。第 2 週以後の糞中物質は主として呼吸気道に由来することになるため、のちの測定値は、この成分に対応する初期の糞試料測定値を補正するために用いることができる。長寿命の不溶性放射性核種に慢性的にさらされる作業者のモニタリングにおいては、欠勤 15-d 後の糞中放射能は主として、吸入摂取された物質からの遅延クリアランスを反映することになり、これが線量を支配する (IAEA, 1999a, 2004b)。創傷を通じた放射性物質の摂取は、事故の結果として起こる場合がある。NCRP (2006) によって開発された創傷モデルの要約は、3.4 節に提示してある。

6.3.3 粒径

(273) 放射性核種は多数のプロセスを通じてエアボーンになりうるし、広範なサイズ、形状および密度を有するガス、蒸気や粒子などのさまざまな物理的形態で存在しうる。ほとんどのエアロゾルは、複雑な形状およびさまざまな粒径を有する粒子からなる (NCRP, 2010)。線量計算におけるモデリングの目的では、ICRP は、幾何標準偏差と合わせて吸入エアロゾルの粒径分布を記述する AMAD (AMAD が $0.3 \mu\text{m}$ を下回る場合は AMTD) を用いるよう助言している (ICRP, 2002b)。AMAD は呼吸気道における沈着に影響を及ぼし、結果として、吸収されない粒子の消化管への移行に影響を及ぼす。

(274) 作業場におけるエアボーン汚染物質の AMAD は、作業場モニタリングプログラムの一環として特徴づけられるかもしれない。作業環境によっては、複数の粒径分布様式が発見される場合がある。物質の偶発的な放出の場合、可能ならば常に、その放出物のエアボーン割合の粒径分布に関する情報が入手されるべきである。放射性エアロゾルの粒径分布が不明な場合には、職業被ばくの場合の AMAD 既定値である $5 \mu\text{m}$ が用いられるべきである (ICRP, 1994a, 2002b)。

6.3.4 化学的組成

(275) 摂取の化学的形態は、体内に入った放射性核種の挙動に重大な影響を及ぼしうる。作業環境において一般に遭遇する化学的形態は、選ばれた放射性核種について、本シリーズの以後の報告書に示される。十分な実験的データがある場合、化学的形態は既定の吸収タイプの 1 つ (タイプ F, M または S) に割り当てられ、消化管移行係数 f_A の値が割り当てられる。一部の特殊なケースにおいては、血液中への吸収を記述する物質固有のパラメータ値が提示される (3.2.3 項)。

(276) 化合物は、既定の吸収特性とは若干またはかなり異なる吸収特性を有する場合がある。バイオアッセイ測定値の解釈は、吸入摂取された放射性物質の吸収パラメータ値の選択に対して感度が高い。放射性核種のかんりの摂取の場合および事故状況においては、摂取量および預託実効線量のより現実的な評価を得るために、関係する放射性核種の化学的形態の固有データを得ることが必要かもしれない。しかし、追加のソーススタム情報の収集は時間を必要とし、異常事象/事故の直後では利用可能にはならないことがよくある。最初のモニタリング結果に従った最初の線量計算においては、放出された物質を最も忠実に記述する化学的形態の、ICRP による固有/基準の肺吸収パラメータおよび f_A が用いられるべきである。最初の線量計算の結果を確認または修正するには、追跡バイオアッセイモニタリングおよび事故のさらなる調査が用いられるべきである。

(277) 多くの状況においては、作業者は同じ放射性核種の複数の化学的形態にさらされる。たとえば、ウラン濃縮施設の異なる区域において被ばくする作業者は、ウランの異なる化学的形態にさらされるかもしれない。バイオアッセイ結果、特に排泄物結果の解釈は、これらの結果に対する異なる化学的形態の寄与と関連する仮定に大いに依存することになる。

6.3.5 バックグラウンドの影響

(278) 自然線源および人為起源線源において生じる 3 つの自然放射性崩壊系列に由来する放射性核種は、あらゆる環境媒体中に存在しており、したがって食糧、飲料水および空気中にも含まれており、人の集団による摂取につながっている。バイオアッセイ測定値を解釈する際は、これらの存在が考慮されるべきである。インビボ検出能力およびインビボ計数の最小検出レベルは、体内の ^{40}K の存在によって大きく影響される。

(279) ウランおよびトリウム系列放射性核種に由来する排泄データは、食事による摂取量について補正を必要とする場合がある。作業の開始に先立って、「ブランクの」バイオアッセイ試料が作業員から入手されるべきである。これが可能ではない場合は、自然のまたは非職業上の摂取と職業上の摂取が区別されることを可能にするために、家族の一員または同じ地域に居住する住民に由来するバイオアッセイ試料が採取され分析されるべきである (Eckerman and Kerr, 1999; Lipsztein et al., 2001, 2003)。それを超えると職業被ばくが指摘されるレベルを定義するためにこの情報を用いることは有益な場合がある。バックグラウンド値は、そのような手順を裏づける明確な証拠があることを条件に控除してもよいが、個々のバックグラウンドレベルは高度に変動的でありうることに留意すべきである。Little et al. (2007) は、職業上の摂取がない場合の個人それぞれの典型的なウラン排泄速度を特定するためのベイズ的方法について述べた。

(280) さらに、診断または治療の目的で投与されたかもしれない放射性医薬品の影響を評価することが重要である。

(281) 長寿命放射性核種の場合、バイオアッセイモニタリング結果は、先行するモニタリング間隔において特定された摂取の影響を明らかにすることができる。以前の摂取によって体内に保持された放射能は考慮されるべきである。

6.3.6 特殊モニタリング状況

(282) 多くの状況においては、被ばくは単一の放射性核種または限られた数の放射性核種に対するものとなる。しかし、元素によっては、崩壊特性が異なる多数の同位体に被ばくが関係する場合がある。ウランおよびプルトニウムは、複雑な混合物への被ばくの可能性を例証している。原子力産業においては、さまざまなプルトニウム同位体が存在する。研究は、比放射能の違いゆえにプルトニウムの同位体の挙動には

かなりの違いがあることを示している (Guilmette et al., 1992)。ウランに被ばくする作業員は常に、濃縮レベル次第で割合が異なる同位体混合物にさらされる。バイオアッセイモニタリング結果の正しい解釈のためには、濃縮に関する知識が不可欠である。

(283) 親核種の身体内容量を決定するために放射性子孫核種の直接バイオアッセイ測定が用いられる場合には、特別な考慮事項がなくてはならない (3.2 節および付属書 A)。子孫核種は常に永年平衡にあると仮定されるならば、有意な誤差が生じうる。たとえば、肺における ^{232}Th の放射能は、その子孫核種 ^{228}Ac 、 ^{212}Pb 、 ^{212}Bi および ^{208}Tl の直接測定から決定される場合には過小評価される。測定された元素と対象放射性核種間の肺残留の違いは、結果の不確実性に寄与する。同じ理由から、肺における ^{232}Th の放射能は、呼気中の ^{220}Rn の測定から決定される場合には過小評価される。

(284) また、別の放射性核種の代用物として 1 つの放射性核種が用いられる状況もある (たとえば、インビボバイオアッセイモニタリング)。一例は、肺に内部沈着した Pu のレベルの決定であり、これは ^{241}Am に関する胸部の外部モニタリングに基づいて推定されることがよくある。 ^{241}Am は一般に、作業場における Pu に付随する、もしくは ^{241}Pu の崩壊によって体内で生成される。この手順は適切であることがよくある。しかし、エアロゾルの可溶性特性および同位体組成次第で、肺からの相対クリアランス速度は異なる場合があり、 ^{241}Am に関する肺の結果は、肺における Pu 放射能を過小評価する場合がある (たとえば、硝酸塩エアロゾル)。

6.4 データの収集、処理および線量評価

6.4.1 データの収集および処理

(285) 一部のタイプの測定データは、用いる前に処理を必要とする場合がある。

- 一般に、肺および LN_{TH} における放射能の合計が「肺」放射能と呼ばれ、内部線量算定ソフトウェアによって計算されるのはこの量である。肺およびリンパ放射能の推定値が別個に与えられる場合、それらは合計されるべきである。「胸部」測定には、肝臓および骨格に蓄積する放射性核種の、それらの組織における放射能に由来するカウントも含まれる場合があり、それらの寄与は控除されることが必要になる。
- 採集期間が 24 h を下回る尿および糞試料は一般に、同等の 24-h 値へと正規化されるべきである。これは、24-h 排泄基準体積または質量の比に試料の体積または質量を乗じることによって達成することができる。男性および女性の場合の基準量はそれぞれ、尿が 1.6 L および 1.2 L、糞が 150 g および 120 g である (ICRP, 2002a)。尿サンプリングの場合、広く用いられる別の方法は、1 日あたり排泄されるクレアチニンの量へと正規化することであり、男性および女性の場合の基準値はそれぞれ、 1.7 g d^{-1} および 1.0 g d^{-1} である (ICRP, 2002a)。24-h 試料が尿の場合で 500 ml、糞の場合で 60 g を下回る場合、それが完全な 24-h 期間にわたって採集されたものであることは疑わしく、正規化

が考慮されるべきである。放射性核種によっては、日常サンプリングにはスポット試料の採集で十分である (たとえば、トリチウム水の摂取のモニタリング)。

6.4.2 線量評価：単一測定、急性摂取

特殊モニタリング

(286) 摂取の時間がわかっている特殊モニタリングまたは職務関連モニタリングの場合、摂取量は、本シリーズの以後の報告書に示される $m(t)$ 値を用いて測定結果から推定することができる。 $m(t)$ 値は、特定の放射性核種の単位摂取後の時間 t における計算されたバイオアッセイ量の値であり、「残留または排泄関数」として知られることもある。単一測定が行われる場合、摂取量 I は、測定量 M に対する以前の摂取量の寄与が取るに足りないものであるならば、測定量 M から決定することができる。測定結果すなわち M と $m(t)$ 値が比較しうことを確実にするべく、注意が払われなければならない。たとえば、尿分析の場合、バイオアッセイ結果は、採集終了時点 (分析時点ではなく) における 24-h 尿試料中の全放射能として表されなければならない。

$$I = \frac{M}{m(t)} \quad (6.1)$$

(287) 摂取量は、預託実効線量 E を得るために、線量係数 (摂取 i および放射性核種 j の経路の場合、 e_{ij}) を乗じられるべきである。すなわち、

$$E_{(50)} = e_{ij} \times I \quad (6.2)$$

(288) 代わりとしては、さまざまな放射性核種および物質のタイプに対応する、表にまとめられた「単位内容量あたりの線量の関数」の値が用いられるべきである。単位内容量あたりの線量の関数 $z(t)$ は、以下の式によって与えられる。

$$z(t) = e(50)/m(t) \quad (6.3)$$

(289) 単一測定が行われ、測定量 M に対する以前の摂取量の寄与が取るに足りないものであるならば、摂取量 I と関連する預託実効線量 $E_{(50)}$ は、以下の式によって決定することができる。

$$E_{(50)} = M \times z(t) \quad (6.4)$$

日常モニタリング

(290) 日常モニタリングの場合、モニタリング間隔中の摂取量は、モニタリング間隔の終了時点に行われた測定から評価される。摂取の時間がわかっておらず (もしくは、容易に決定することができず)、標準評価が実施されている場合 (6.2.1 項)、摂取は T 日のモニタリング間隔の中間点において起こると仮定されるべきである。以前のモニタリング間隔中に生じる摂取量の寄与が取るに足りないものであるならば、モニタリング間隔の終了時点で得られた所定の測定量 M の場合、摂取量は以下のとおりである。

$$I = \frac{M}{m(T/2)} \quad (6.5)$$

ここで、 $m(T/2)$ は、モニタリング間隔の中間点において起こったと仮定される単位摂取に対応する測定量の予測値である。モニタリング間隔中の摂取による線量は、摂取量に線量係数を乗じることによって得られる。評価された線量または摂取量はそれぞれ、線量限度またはその限度に対応する摂取量の按分割合と比較することができる。代わりに、線量または摂取量は、あらかじめ定められた IL と比較することもできる。

(291) 先行するモニタリング間隔における摂取は、得られる測定結果に影響を及ぼすことがある。日常モニタリングプログラムにおける一連の測定では、以下の手順に従ってもよい。

- 最初のモニタリング間隔における摂取の規模を決定する。
- この摂取による、以後の測定のそれぞれに対する寄与を予測する。
- それらの寄与は有意であると判断される場合、以後のあらゆるデータから対応する寄与を控除する (ISO, 2011)。
- 次のモニタリング間隔について上記を繰り返す。

(292) 代わりとして、単位内容量あたりの線量の関数の表を用いると、モニタリング間隔の終了時点で得られた所定の測定量 M の場合、摂取量 I と関連する中間点線量 $E_{(50)}$ は以下のとおりである。

$$E_{(50)} = M \times z(T/2) \quad (6.6)$$

6.4.3 線量評価：複数の測定

日常モニタリング

(293) 以前のモニタリング間隔中に生じる摂取量の寄与が取るに足りないものであるならば、以下の手順を用いてもよい。それぞれのモニタリング間隔 n について、関連する実効線量 $E_{(50)n}$ は 0 に等しいか正のいずれかであると仮定してもよい。前回モニタリング間隔 k の終了時点で得られた所定の測定量 $M(t_k)$ の場合、関連する実効線量 $E_{(50)k}$ は以下のとおりである。

$$E_{(50)k} = \left(M(t_k) - \sum_{n=1}^{k-1} \frac{E_{(50)n}}{z(t_k - \tau_n)} \right) z(t_k - \tau_k) \quad (6.7)$$

ここで、 t_k は測定 k (前回モニタリング間隔 k の終了) の時間であり、 τ_n および τ_k はそれぞれモニタリング間隔 n および k の中間点における時間である。 $M(t_k)$ が決定しきい値を下回る場合 (ISO, 2011) もしくはバックグラウンド控除の結果が負である場合、 $E_{(50)k} = 0$ である。

特殊モニタリング

(294) 摂取量評価のために用いられるべきバイオアッセイデータは、異なる時間に実施された異なる測定に対応する結果からなることがあり、異なるモニタリング手法 (たとえば、直接測定と間接測定) による結果からなることさえある。

(295) 摂取の時間がわかっている単一摂取の最良推定値を決定するには、測定量の単位摂取に対応する予測値 $m(t_i)$ を計算することがまず必要である。次に、積 $I m(t_i)$ が測定データ (t_i, M_i) と「最良適合する」ように、摂取量 I の最良推定値が決定される。複数タイプのバイオアッセイデータセットが利用可能な場合、摂取量および線量は、予測値を異なるタイプの測定データと同時に適合させることによって評価されるべきであると勧告されている。たとえば、尿および糞データセットが利用可能ならば、摂取量は、適切に加重された予測値を両データセットと同時に適合させることによって評価される (Doerfel et al., 2006, 2007; ISO, 2011; Castellani et al., 2013)。

(296) 多数の統計的データフィッティング方法が利用可能である (IAEA, 2004a,b)。最も広く適用できる 2 つの方法は、最尤法 (Doerfel et al., 2006; ISO, 2011) およびベイズ的アプローチ (Miller et al., 2002; Puncher and Birchall, 2008) である。点推定の平均や最小二乗法フィ

ットなどの他の方法は、データと関連する誤差に関する一定の仮定に対応する最尤法に基づいて正当化される。たとえば、最小二乗法は、データに関する不確実性は正規分布によって特徴づけることができると仮定される場合、最尤法から導くことができる。仮定された分布 (たとえば、正規または対数正規) は、データに対するモデルのフィットが乏しいならば、評価された摂取量および線量に劇的な影響を及ぼしうる。しかし、データに対するモデルのフィットが向上するに従って、評価された摂取量および線量に対するデータの不確実性の影響は低減する。

6.4.4 慢性被ばく

(297) 体内に存在する放射能の量および 1 日あたり排泄される量は、その個人が被ばくした期間に左右される。得られたバイオアッセイ結果 (たとえば、体内、人体臓器内または排泄物中に存在する量) は、あらゆる摂取量の重ね合わせを反映することになる。慢性摂取の場合の残留関数および排泄関数は本刊行物には示されないが、急性摂取について本報告書シリーズに示される残留関数および排泄関数を特定のいかなる慢性摂取関数と畳み込むことによって決定することができる。

6.4.5 体外除去療法の影響

(298) 内部汚染に係るケースでは、人体の自然の化合物排出速度を高めるために、もしくは場合によっては、大きな取り込みが起こるかもしれない部位における放射性核種の取り込み (たとえば、甲状腺における放射性ヨウ素) を妨げるために、キレート剤またはその他の治療法が用いられることがある。これらのいずれの目的も、預託線量を低減することである。

(299) 介入手法の利用は、摂取量および線量を推定するための上述の標準化されたモデルアプローチの利用を部分的にまたは完全に無効にするかもしれない (NRC, 2009)。ジエチレントリアミン五酢酸などのキレート剤の使用は、治療の停止後数週間または数カ月にわたって排泄速度に影響を及ぼす場合がある。

(300) 特定の助言を提供することは実行可能ではない。いかなるバイオアッセイデータの扱いも被ばくの事情ならびに線量評価のために要求される必要性および時間尺度に左右されるためである。

6.4.6 創傷

(301) その性質ゆえに、汚染された切傷または創傷に起因する放射性核種の摂取は概して、高線量被ばくのかかなりの割合を占める。放射性

核種は創傷部位から血液中ならびに他の臓器および組織へと移行する場合があります、NCRP は選ばれた放射性核種のさまざまな化学的形態についてこの移行を記述するためのモデルを開発している (NCRP, 2006)。元素固有の全身性体内動態モデルと結合すると、この NCRP モデルは、尿中および糞中排泄を予測するためだけでなく、放射性核種の血液および全身性循環への移行後の臓器および組織に対する預託線量ならびに預託実効線量を計算するためにも用いることができる。

(302) 3.1 節に言及したように、創傷に起因する内部汚染の評価は実際には、専門家の判断を用いてケースバイケースで扱われる。多くの場合、創傷部位から血液中に移行する放射性核種の量は、尿バイオアッセイデータから直接評価されるかもしれない。3.4 節では、この NCRP モデルの主たる特質を要約している。この情報は創傷汚染の個々のケースにおけるバイオアッセイデータの解釈に有用かもしれないためである。

6.5 バイオアッセイに基づく内部線量評価における不確実性

(303) *Publication 103* (ICRP, 2007) は、不確実性の評価に関して以下のように述べている。

放射線量を評価するには、外部被ばくはジオメトリー、取り込まれた放射性核種の体内動態ならびに人体をシミュレートするためのモデルが必要である。標準モデルおよび必要とされる基準パラメータ値は、さまざまな実験的調査およびヒト対象研究から判断を通じて確立され選択されている。規制上の目的のために、これらのモデルおよびパラメータ値は取り決めによって固定されており、不確実性に左右されない。

(304) 規制要件の遵守を実証するために行われる個人線量評価と関連する不確実性を評価または記録する必要はないということになる。にもかかわらず、特定のモニタリング手順（線量評価手順を含む）と関連する不確実性の評価は、モニタリングプログラムの設計を最適化するための重要な情報を提供する (Etherington et al., 2004a,b ; Davesne et al., 2010, 2011 ; ISO, 2011)。評価された実効線量における不確実性が評価される場合、物質固有のモデルパラメータ値における不確実性は考慮されるべきであるが、個人固有のモデルパラメータ値はそれらの基準値に固定されるとみなされるべきである (6.1 節)。

(305) 本節では、適及的線量評価における不確実性の重要な原因について述べるとともに考察する。バイオアッセイデータに基づく内部線量評価における不確実性は、インビボのまたは生体試料中の放射性核種の放射能を量定するために用いられる測定と関連する不確実性；バイオアッセイ結果を解釈するために用いられる被ばくシナリオにおける不確実性；そしてバイオアッセイ結果を解釈するために用いられる体内動態モデルおよび線量算定モデルにおける不確実性に左右される。被ばくシナリオには、摂取の経路、摂取の時間パターン、体内に取り込ま

れる特定の放射性核種や、沈着した放射性核種の化学的および物理的形態などの因子が含まれる。

6.5.1 測定における不確実性

(306) 体内または生体試料中の放射能の測定における不確実性は、IAEA (1996, 2000) の中で論じられている。間接または直接バイオアッセイ測定の標準手順は存在しないが、バイオアッセイ方法のいくつかの例は本報告書シリーズおよび他所に示されている。手順、検出器または施設の選択は、対象核種、検出限界や予算などの特定ニーズに左右されることになる。放射性核種の放射能を定量化するために用いられる手順はすべて、偶然誤差および系統誤差の原因である。測定における不確実性は典型的には、主として計数統計、校正手順の妥当性、線源または測定システムの汚染の可能性、そしてバックグラウンドにおける無作為変動による。NCRP は、測定の不確実性を細大もろさず扱った、内部放射線量評価における不確実性に関する包括的な報告書を作成している (NCRP, 2010)。

(307) 測定と関連する不確実性全体は一般に、測定量の値が特定の信頼水準でその範囲内にあると考えられる区間として表される (EURACHEM/CITAC, 2000)。測定における不確実性全体を推定する際は、不確実性のそれぞれの原因を取り上げ、その原因による寄与を得るためにそれを別個に扱うことが必要かもしれない。不確実性に対する別個の寄与はそれぞれ、「不確実性の成分」と呼ばれる。

(308) ある量における不確実性の成分は、タイプ A およびタイプ B の不確実性と呼ばれる 2 つの主たるカテゴリーに分けられるかもしれない (EURACHEM/CITAC, 2000 ; Cox and Harris, 2004 ; BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2010 ; NCRP, 2010)。基本的に、タイプ A の成分は、一連の観察における変動性の統計的分析によって評価される成分であり、タイプ B の成分は、他の手段によって、一般的には、利用可能なあらゆる関連情報を用いた科学的判断によって評価される成分である。全身または生体試料中の放射能の測定の場合、タイプ A の不確実性は一般に、計数統計からのみ生じ、ポアソン分布によって記述することができる不確実性とみなされるのに対して、タイプ B の不確実性の成分は、不確実性の他のあらゆる原因と関連する成分とみなされる。

(309) インビトロ測定におけるタイプ B の成分の例には、試料の体積または重量の定量化；希釈およびピペット操作における間違い；保管中の溶液の蒸発；校正のために用いられる標準物質の安定性および放射能；トレーサと対象放射性元素の間の化学的収率の類似性；ブランク補正；バックグラウンド放射性核種の排泄寄与および変動；電子的安定性；分光法の分解能およびピーク重なり；試料の汚染および夾雑物；計数のための線源配置；校正モデルからの密度および形状の変化；そして校正における均質性に関する仮定がある (Skrable et al., 1994)。これらの不確実性は、試料中の放射能の測定にあてはまる。排泄測定については、モデル予測との比較のための被験者の 24-h 平均排泄速度の推定値をもたらすために、試料中の放射能が用いられる。試料の採集期間が 24 h を下回る場合、それらの試料は同等の 24-h 値へと正規化されるべきである。これは、生物学的（被験者間および被験者内）変動性およびサンプリング手順と関連する、タイプ B の不確実性のさらなる原

<p>因を導入し、これは測定された試料中の放射能における不確実性よりもたぶん大きいだろう。サンプリングプロトコルは、プルトニウムの尿分析について Sun et al. (1993) によって、また室内ラドン被ばくについて Moeller and Sun (2006) によって示されているように、サンプリングの不確実性を最小化するように設計することができる。</p>
<p>(310) インビボ測定は、さまざまなジオメトリーで実施される（全身測定ならびに、肺、甲状腺、頭蓋、肝臓や創傷に関する測定などの臓器または部位固有の測定）。それぞれのタイプのジオメトリーは、専用の検出システムおよび校正方法を必要とする。IAEA (1996) および ICRU (2003) は、測定の感度および正確さに関する考察を含む、直接バイオアッセイ方法のレビューを発表している。</p>
<p>(311) インビボモニタリングにおけるタイプ B の成分の例には、計数ジオメトリーの違い；検出器と関連する個人の配置および計数時のその人の挙動；胸郭肉厚の決定；ジオメトリー特性、密度、体内および臓器内の放射性核種の分布や線形減衰係数など、ファントムと測定対象の個人または臓器の間の違い；隣接する人体領域における放射性物質沈着物からの干渉；分光法の分解能およびピーク重なり；電子の安定性；他の放射性核種からの干渉；バックグラウンド放射線の変動；校正のために用いられる標準放射性核種の放射能；その人の表面外部汚染；体内に存在する自然放射性元素からの干渉；そして校正用線源の不確実性がある (Skrable et al., 1994 ; IAEA, 1996)。</p>
<p>(312) 身体部分の測定の場合、ある特定の臓器における放射能によってその結果を解釈するのは一般に困難である。人体の他の領域からの放射線が検出されるかもしれないためである。そのような測定の解釈は、放射性核種およびインビボで生成されるあらゆる放射性子孫核種の体内動態に関する仮定を必要とする。IAEA (1996) には、²⁴¹Am を用いた実例が示されている。肺測定システムの校正において行われる基本的な仮定は、肺における放射能の沈着は均一であるということであるが、沈着がこのパターンに従うことはまれである。肺における粒子の分布は、粒径、呼吸率および被験者の健康の関数である (Kramer and Hauck, 1999 ; Kramer et al., 2000)。</p>
<p>(313) 計数統計と関連する測定誤差 (タイプ A の不確実性) は放射能の増大または計数時間の増大とともに減少するのに対して、測定の不確実性のタイプ B の成分は放射能または計数時間とはおおむね無関係かもしれない。放射能レベルが低く、検出限界に近い場合、不確実性全体はタイプ A の成分によって (すなわち、計数統計によって) 支配されることがよくある。容易に検出され、十分な量が存在する放射性核種の場合、不確実性全体はタイプ B の成分によって (すなわち、計数統計以外の不確実性によって) 支配されることがよくある。一般に、不確実性のさまざまな成分と関連するバイオアッセイ測定量の分布に対する寄与は対数正規分布を用いて記述することができ、不確実性は幾何標準偏差を用いて定量化することができる。バイオアッセイ測定量の分布の幾何標準偏差は、「分散係数」と呼ばれることがよくある。インビボおよびインビトロ測定における不確実性のさまざまな成分に対応する分散係数は、いくつかの研究において評価されている (Doerfel et al., 2006 ; Marsh et al., 2008 ; ISO, 2011 ; Lopez et al., 2011b)。</p>

<p>6.5.2 被ばくシナリオにおける不確実性</p>
<p>摂取の時間</p> <p>(314) 摂取の時間パターンにおける不確実性は、推定線量における不確実性の支配的な原因になりうるか、ほとんどまたはまったく寄与しないかである。たとえば、摂取が異常事象後しばらくの間認識されておらず、全身の残留ならびに尿中および糞中排泄速度が急速に減少するならば、仮定された摂取の時間パターンは、線量推定値における支配的な不確実性になりうるだろう。他方、ただちに認識された偶発的な放出の近くで作業者が被ばくする、もしくは全身の残留速度および排泄速度がほとんど一定であるならば、摂取の時間パターンは、線量推定値における不確実性の原因としては取るに足りないかもしれない。</p> <p>(315) 日常モニタリング間隔中の摂取時間が不明な場合、摂取は一般に、モニタリング間隔の中間点に割り当てられる。代わりに、考える摂取時間それぞれに対応する摂取を計算し平均する、もしくはモニタリング間隔全体にわたる一定の摂取率を仮定することもできる。Puncher et al. (2006) および Birchall et al. (2007) は、一定の摂取率はこれら 3 つの摂取シナリオのうち、測定および排泄/残留関数が正確にわかっているか、それらは不確実であるが不偏であるという理想条件下で真の摂取の不偏推定値をもたらす唯一のシナリオであると論じた。</p>
<p>摂取の経路</p> <p>(316) 実際には、摂取経路が不明であって、保健物理学に関する記録または利用可能なバイオアッセイデータに基づいてそれを容易に見分けることはできない状況に遭遇するかもしれない。たとえば、摂取は吸入摂取のみによって、経口摂取のみによって、それとも両者によって起こったのかどうかわからない場合がある。たとえ吸入摂取と経口摂取の組み合わせが起こったことはわかっていると看做しても、これら 2 つの経路に沿った相対摂取に関する情報はほとんどないかもしれない。特定の情報が無い場合は一般に、職業被ばくにおいては摂取は吸入摂取によるものだったと仮定されるべきである。これは概して、職業上の環境における放射性核種への被ばくの最も一般的な様式だからである。仮定された摂取経路が評価された線量に及ぼす影響は大きい可能性があり、評価された線量が有意なものであるならば調査されるべきである。</p>
<p>摂取の放射性核種組成</p> <p>(317) ソースタームに関する仮定 (すなわち、放射性核種の正体およびそれらの比存在度) は、作業環境に存在する放射性同位体すべての測定がモニタリングに含まれているわけではない場合には、不確実性の主因を意味するかもしれない。多くの状況においては、作業者は同一元素の複数の同位体にさらされるが、モニタリングはこれらの同位体の 1 つの測定によって果たされる。たとえば、²³⁵U の測定によるウラン</p>

の肺モニタリングは、濃縮度に関する仮定に依存する。一定の放射性核種への被ばくの評価が肺における子孫核種のモニタリング結果に基づくような事情もある。たとえば、子孫核種の測定による ^{232}Th のモニタリングは、作業者がさらされる物質中の ^{232}Th 崩壊系列に属する放射性核種の平衡に関する仮定に依存する。また、一部の放射性核種への被ばくは、作業環境に存在することがわかっている代用放射性核種の測定に基づくかもしれない。たとえば、 ^{239}Pu の肺モニタリングは、吸入物質中の ^{241}Am 、 ^{241}Pu (^{241}Am の親核種) および ^{239}Pu の相対量ならびに沈着したプルトニウム同位体および沈着した内部成長 ^{241}Am の肺からの相対クリアランス速度に関する仮定を用いた、 ^{241}Am の測定に基づくかもしれない。

(318) 吸入放射性核種の化学的形態または形態混合に関する情報は、肺に沈着した放射能に対応する適切な溶解モデルの決定に役立てるために必要とされる。肺における溶解速度は、線量推定値が排泄データのみに基づく場合は特に、線量評価における不確実性の主因を意味しうる。たとえば、線量推定値が尿中排泄データに基づく場合、肺に対する線量は、その物質が高度に可溶性であると間違えて仮定されるならば数桁過小評価されることが、あるいは、その物質の可溶性は低いと間違えて仮定されるならば数桁過大評価されることが、時にはありうる。放射性核種の吸入形態に関するいかなる直接情報も利用可能ではない場合、尿および糞データと、実行可能ならばインビボ肺測定を組み合わせれば、放射性核種の化学的形態と関連する、線量推定値における不確実性を大幅に低減するかもしれない。

粒径

(319) 粒径は不確実性の重要な原因になりうる。これは呼吸気道における仮定された沈着に影響を及ぼすためである。尿中および糞中排泄速度は粒径に左右される。粒径は吸収されない粒子の消化管への移行に影響を及ぼすためである。作業環境によっては、多様なエアロゾルが吸入可能なサイズの範囲内に存在する (Dorrian and Bailey, 1995)。

6.5.3 体内動態モデルにおける不確実性

(320) 体内動態モデルは、放射線防護においては、体内における放射性核種の時間依存分布および残留ならびにその放射性核種の尿中および糞中排泄速度を予測するために用いられる。これらのモデルは本報告書シリーズでは、放射性核種の吸入摂取または経口摂取の場合の線量係数を導き出すために、また、バイオアッセイデータの解釈において用いるための、放射性核種の摂取に続く尿中および糞中排泄の基準速度を提示するために用いられる。

(321) 体内動態モデルを開発しモデルの信頼性を評価するために用いられる情報の主たるタイプの以下の分類は、Leggett (2001) による論

文から引用されている。ICRP 報告書の中で用いられている多くの体内動態モデルの信頼性の調査は、次の論文および報告書に見つけ出すことができる：Apostoaie et al. (1998)；Leggett (2001)；Leggett et al. (1998, 2007, 2008)；Harrison et al. (2001, 2002)；Bolch et al. (2001, 2003)；Skrable et al. (2002)；Likharev et al. (2003)；Apostoaie and Miller (2004)；Sánchez (2007)；Pawel et al. (2007)；および NCRP (2010)。

体内動態モデルの構築 (構造) と関連する不確実性

(322) ある元素または化合物に対応する体内動態モデルの予測に置くことができる信頼は、そのモデルのパラメータ値と関連する不確実性だけでなく、モデル構造と関連する不確実性にも左右される。そのような不確実性は、モデル構造が既知のプロセスの単純化しすぎた描写をもたらすために、不明なプロセスがモデルから省かれているために、もしくはモデル構築の一部または全部がプロセスの考察よりもむしろ数学的便宜に基づいているために生じる場合がある。モデル構造におけるこれらの限界の何らかの組み合わせは、放射性核種に対応する事実上すべての体内動態モデルと関連する。これらの限界は、モデルのパラメータ値に対する有意義な不確実性の言明の割り当てを妨げる。それらはパラメータ値の解釈に疑問を投げかけるためである。

元素に対応する体内動態モデルを構築するために用いられる情報のタイプ

(323) モデルの構築またはモデリングアプローチにかかわらず、元素または化合物に対応する体内動態モデル、特に全身性モデルは、通常はおおむね、以下の情報源の何らかの組み合わせに基づく。

- H1：ヒトに関する直接情報 (すなわち、人間被験者における元素の定量測定)
- H2：人間被験者における科学的に類似する元素の挙動の観察結果
- A1：ヒト以外の種における元素の挙動の観察結果
- A2：ヒト以外の種における科学的に類似する 1 つ以上の元素の挙動の観察結果

H2, A1 および A2 データは、体内動態モデルの基礎とすべき情報の望ましいタイプである H1 データ (ヒトに関する直接情報) の代用物の役割を果たす。

(324) H1, H2, A1 および A2 データは時には、定量的な生理学的情報 (たとえば、骨の再構築速度)；物質収支の考慮；基本的な物理的、化学的および数学的原理に基づく理論的モデルの予測 (たとえば、肺のさまざまな部分における吸入粒子の沈着に関する理論的モデル)；解剖学的に現実的な物理的モデルを用いて導き出される実験データ (たとえば、吸入粒子の沈着を測定するために用いられる呼吸気道部分の中空

<p>铸物)；そしてインビトロデータ (たとえば、シミュレートされた肺液における化合物の溶解) など、他のさまざまなタイプの情報または制約によって補充される。これらの補充情報源の中では、物質収支および定量的な生理学的データ (P データ) が特に広く用いられる。</p>
<p>ヒトデータの適用における不確実性の原因</p>
<p>(325) ある元素または化合物に対応する体内動態モデルは、人間被験者におけるその元素の時間依存分布および排泄の観察結果 (H1 データ) に基づくものとするのが望ましい。ある程度のこのタイプの直接情報は、セシウム、鉛、ラジウム、ウラン、アメリカシウムやプルトニウムなど、いくつかの重要な非必須元素だけでなく、ほとんどの必須元素についても利用可能である。モデルの構築における生物学的現実主義の度合い次第では、人間被験者の場合の元素固有の情報を、ヒトの場合の対象元素の体内動態を制御する重要なプロセスに関する定量的な生理学的情報で補充することが可能かもしれない。たとえば、Publication 67, 69 および 71 (ICRP, 1993, 1995b,c) では、骨体積からの一定の放射性核種の長期的な除去が骨代謝回転を用いて特定されている。</p>
<p>(326) H1 データはモデル構築の目的のために望ましいタイプの情報ではあるが、このデータにはしばしば、次のような 1 つ以上の限界がある：研究対象グループが小規模なこととあいまって、ある元素の体内動態の被験者間の変動性が潜在的に大きい；観察期間が短いこととあいまって、被験者間の変動性が潜在的に大きい；その疾患が元素の体内動態を変更するかもしれない不健康な被験者の使用；女性および子供の場合の観察結果が不十分；代表性がないかもしれない少量の組織試料の採集；測定手法の不正確さ；元素の摂取パターンまたは摂取レベルにおける不確実性；および、報告された値の不整合。場合によっては、報告された値の不整合は、データの不確実な性質の最も有力な証拠の一部を提供するかもしれない。</p>
<p>(327) 放射性核種に対応する体内動態モデルの開発における重要な手段の 1 つは、職業被ばくにおいて遭遇する環境レベルまたは高められたレベルで慢性的に被ばくした被験者に対する解剖測定から推定される安定元素の基準臓器内容量の利用だった (ICRP, 1975)。そのようなデータは一般に、体内動態モデルのパラメータ値を調整するためもしくは、安定元素の摂取量、全身内容量および排泄量について報告された値の間の収支を達成すべく新たなモデル成分を導入するために用いられる。収支の考慮は、そのデータが入念に管理された条件下で収集されているとすれば、モデルパラメータに対する有用な制約をもたらす。しかし、収支の考慮は、異質の情報源および信頼できない測定手法に由来するデータに基づくことがよくあったため、場合によっては、間違ったモデルまたはパラメータ値を導いたかもしれない。</p>
<p>(328) H1 データに基づく信頼の言明は、測定手法の信頼性、被験者の数および健康状態、被験者および生体試料の代表性、異なる研究に由来するデータの整合性、摂取のレベルおよびパターンに関する知識や、モデル化される状況とその情報の関連性など、さまざまな因子を反映するだろう。たとえば、H1 データに基づくパラメータ値に対する信頼は、そのデータが次の研究対象集団のいずれに関する研究において</p>

<p>決定されるとしても低下するだろう：摂取がわかっている複数の重病被験者；摂取の特徴づけが乏しい複数の健康被験者；または、摂取がわかっている 1 名の健康被験者。</p>
<p>体内動態データの種間外挿における不確実性</p>
<p>(329) 体内動態データの種間外挿は、細胞構造、臓器構造および生化学に関する、あらゆる異種にわたる一般的な生物学的規則性という概念に基づく。細胞構造、臓器構造、生化学および体温調整が特にヒトに近い哺乳類の種は、汚染物質の体内動態に関して哺乳類以外の種よりも十分なヒトとの類似を示すことが予想される。</p>
<p>(330) 哺乳類の種の間での広範な構造的、機能的および生化学的類似性にもかかわらず、体内動態データの種間外挿は不確実なプロセスであることが判明している。あらゆる種にわたる類似はしばしば、定量的よりも定性的な性質のものである。内部沈着した放射性核種を同じ定性的方法で処理する 2 つの種が、その物質に関して異なる動態を見せる場合があるからである。さらに、哺乳類の種の間には重要な構造的、機能的および生化学的相違があり、これには分化した臓器の違い、肝胆汁の形成および組成、胆汁分泌のレベル、尿の量および酸度、体脂肪量、消化管のさまざまな領域における吸収または分泌の規模、消化管内の細菌のタイプや、骨のリモデリングの微細構造およびパターンが含まれる。</p>
<p>(331) 一般に、動物モデルの選択は、ヒトの場合の放射性核種の体内動態において最も重要であると考えられる身体のプロセスおよびサブシステムに強く左右されることになる。所定の種は一定のプロセスおよびサブシステムについてはヒトに似ているが、他は違うかもしれないためである。たとえば、サルまたはヒヒに関するデータは、ヒト以外の霊長類およびヒトの骨格における酷似性ゆえに、骨格における放射性核種の分布をモデル化する目的では、比較的高い比重を与えられるかもしれない。イヌに関するデータは、多くの放射性核種の肝臓処理に関するイヌとヒトの間の幅広い定量的類似性ゆえに、肝臓からの放射性核種の喪失速度をモデル化する目的では、比較的高い比重を与えられるかもしれない。</p>
<p>(332) 生理学ベースのモデルは、実験動物に由来するデータをその中でヒトに対して外挿すべき適切な環境をもたらす。それは、たとえ全身の外挿は無効な場合でも、外挿が有効かもしれない身体の特定の生理学的プロセスおよび特定のサブシステムを種間比較の焦点とするのに役立つためである。モデル化されるプロセス次第で、単一の種または少数の種に対応するデータに注意を限定することが望ましい場合もあれば、一群の種に対応する平均データまたはスケールされたデータに対して注意を喚起することが望ましい場合もある。</p>
<p>(333) 動物データに基づくモデル値に置くことができる信頼の度合いは、データの品質および完全性ならびに、所定の状況における動物類</p>

推の予想される強さに左右される。したがって、ヒトに対するそれらの特定データの外挿の論理的根拠だけでなく、データにおける潜在的な実験上および統計上の問題も考慮しなければならない。動物データに基づくモデル値に対する信頼は、次の場合には比較的高いかもしれない：かなり広範な種間比較が行われており、ヒトに最も似ていることが予想される種に関する観察結果が含まれている場合；データが種によって変化しない、もしくは異なる種における元素の体内動態を左右する生理学的プロセスが合理的に十分確立されている、のいずれかのために、これらの比較が種間外挿の強力な根拠を示唆する場合；モデル構造が、通常は生理学的プロセスに基づいて、ヒトに対する有意義な外挿を可能にする場合；そして、そのようなプロセスがヒトの場合に十分定量化されている（すなわち、ヒトの場合の中心値が合理的に十分確立されている）場合。ヒトとの定性的相違を見せることがよくある種についてデータが利用可能であるに過ぎない場合（たとえば、データがラットについてのみ利用可能だった場合）、もしくは、対象の量に関してヒトに対する外挿のいかなる有意義な根拠も確立されていない場合には、かなり広い不確実性区間が指摘される。動物データの品質が何であれ、不確実性区間は、データがすべての種にわたって外挿されるならばデータの予測能力に対する信頼の一部は失われるという事実を反映するものとすべきである。

体内動態データの元素間外挿における不確実性

(334) 元素に対応する体内動態モデルは、化学的類似体は生理学的酷似性をしばしば見せるという経験的な証拠に基づいて、化学的に類似する元素の場合のデータから部分的または全面的に構築されることがよくある。たとえば、アルカリ土類金属のカルシウム、ストロンチウム、バリウムおよびラジウムは、化学的類似性だけでなく多くの生理学的類似性も見せるし (ICRP, 1993)、アルカリ金属のルビジウムおよびセシウムは、それらの化学的類似体であるカリウムの挙動に従う。

(335) しかし、化学的類似体は生理学的類似体でもあるという前提には反証がある。たとえば、アルカリ金属のカリウムおよびナトリウムは物理的および化学的酷似性を共有するが、体内ではまったく異なる挙動を見せ、カリウムは主として細胞内元素、ナトリウムは主として細胞外元素である。

(336) さらに、体内で定性的には同様に挙動する、化学的に類似する元素の一部は、まったく異なる動態を見せることがある。たとえば、セシウムは定性的な意味では体内におけるカリウムの挙動に従うと思われるが、摂取後の早い時間にカリウムとは少々異なるように分布し、実質的により長い全身残留時間を示す。

(337) 化学的に類似する元素の場合のヒトデータに基づくモデル値に置くことができる信頼のレベルは、所定の状況における類推の予想される強さだけでなく、類似体に対応するデータの品質および完全性に左右される。化学的類似体に対応するデータの品質が何であれ、信頼区間は、データがすべての元素にわたって外挿されるならばデータの予測能力に対する信頼の一部は失われるという事実を反映するものとすべきである。

きである。

(338) 所定の元素の場合の化学的類推の強さはおおむね、化学的に類似する元素が生理学的に類似すると判断している度合いに左右される。すなわち、比較的大きい実験データセットが、一組の元素は基本的に、同じ定性的体内挙動を有することを、また、それらの定量的挙動は同様である、または予測できる形で異なる、のいずれかであることを示すならば、これらの元素の場合、この類推は強いとみなされるだろう。化学的に類似する元素は必ず生理学的に類似するという前提に対する反証を考えると、問題の元素が動物またはヒトの場合において比較されていないならば、この化学的類推は高い信頼をもたらさない。

(339) ある化学的類似体が良好な生理学的類似体であることが示されている場合、その化学的類似体に関するヒトデータ (H2 データ) の適用は、対象元素に関する動物データ (A1 データ) の適用よりも望ましいかもしれない。たとえば、ヒトの場合のアメリシウムに対応する体内動態モデルを構築または評価する目的では、生理学的類似体のキュリウムに関する定量的なヒトデータの利用が、アメリシウムに関する最良の定量的な動物データの利用よりも望ましいと思われる。ラジウムとバリウム、ルビジウムとカリウム、もしくは他の生理学的酷似体ペアについても同様の言明を行うことができる。他方、化学的に類似する 2 つの元素が大ざっぱな生理学的類似性を示すに過ぎないならば、さまざまな動物の種について元素固有のデータが利用可能な場合は特に、動物類推が化学的類推よりも選好されるかもしれない (たとえば、ウランとカルシウムの場合にそうであるように)。一般に、化学的類似体に対応する動物データに対する信頼は、対象元素に対応する動物データに対する信頼よりも低いだろう。

集団内の変動性から生じる中心推定値における不確実性

(340) 「不確実性」はここでは、集団の場合の中心値に関する知識の欠如をいい、「変動性」は集団の異なる構成員間の定量的相違をいう。不確実性と変動性は別個の概念であるとはいえ、集団内の体内動態特性の変動性は、体内動態量の中心推定値における不確実性に寄与する重要な因子であることがよくある。これは、一般に利用可能な観察結果の数が少ないことと、体内動態研究の被験者は通常、無作為に選ばれているのではないという事実のために、そのような変動性とその集団におけるそれらの特性の中心傾向を特定するという問題を複雑にするからである。

(341) ヒトの集団内の放射性核種、医薬品または化学物質の体内動態の変動性は、年齢、性別、妊娠、授乳、運動、疾患、ストレス、喫煙や食事など、多数のさまざまな生理学的因子または環境的な性質のホスト調整因子に起因すると思われる。個人間の大きな体内動態の変動は、目に見えるほどの環境的相違がない場合に存続することがあり、これらの変動は遺伝学的に制御されるのかもしれないことを示唆している。現実世界の状況においては、遺伝学的因子と環境的因子が動的に相互作用し、人体に取り込まれた物質の挙動の大きな変動を生み出す場合がある。

ある。

6.5.4 線量算定モデルにおける不確実性

(342) 線量算定モデルは、体内に存在する放射性核種の核変換によって放出される放射線に起因する平均吸収線量を推定するために用いられる。吸収線量は、放射線感受性であるとみなされる標的領域（臓器、組織または組織領域）について計算される。放射線加重係数および組織加重係数は、等価線量および実効線量を決定するために平均吸収線量に適用される。これらの加重係数には基準値が割り当てられるので、不確実な量とはみなされない。したがって、たとえば推定された臓器に対する等価線量と関連する不確実性は、根底にある平均吸収線量と関連する不確実性であるとみなされる。

(343) 内部放出体の場合の平均吸収線量における不確実性に寄与する物理的および解剖学的パラメータは、以下のとおりである。

- 放射性核種およびあらゆる放射性子孫核種によって放出される核放射線および原子放射線のエネルギーおよび強度
- 組織における、放出された放射線の相互作用係数
- 人体組織の元素組成
- 人体臓器の体積、形状および密度
- 線源領域（放射性核種を含有する領域）と標的領域（その線量値が要求される放射線感受性の臓器および組織）の空間的関係を記述するパラメータ

(344) 解剖学を描写する計算モデルには、また、標的領域において吸収されるエネルギーを計算するために用いられる数値手順には、限界がある。これらの不確実性の規模は、放射線のタイプおよびエネルギーならびに特定の線源-標的ペアによって異なる。医学画像データに基づくコンピュータファントム（「ボクセルファントム」と呼ばれることがよくある）の採用は、いくつかの線源領域と標的領域のより現実的な空間的関係をもたらすことによってある程度、光子および中性子放射線による組織のクロス照射と関連する不確実性を低減している（ICRP, 2009）。しかし、吸収線量は、非透過性放射線からの寄与によって支配されることがよくある。医学画像データに分解することができない線源領域および標的領域の場合（たとえば、呼吸気道および消化管ならびに骨格における線源領域および標的領域）、不確実性は、これらの領域を描写するために用いられる計算モデルと関連する。

(345) 解剖学的モデルは静的であり、したがって、呼吸およびリクライニング以外の体位による臓器の空間的位置における不確実性には対処しない。

35

ICRP Publication 130 (下訳版、一部翻訳版：平成 30 年 3 月)

(346) 吸収線量における不確実性に寄与する線量算定モデルのパラメータは、放出された放射線のエネルギーおよび強度を決定する核変換プロセスと関連する物理的パラメータおよび体内の放射線輸送を左右するパラメータである。光子の場合の減衰係数および吸収係数に關係する不確実性は比較的小さく、概して 10% を下回るが、アルファ粒子および電子の場合の軟組織の阻止能値に帰せられる不確実性はそれより少し大きい。基本的な核データの改善は、放射性核種の物理学的半減期および崩壊モードの分岐比における不確実性を低減している。自発核分裂の遅発ベータおよびガンマ線を扱うための線量算定計算において用いられる単純化された手順は、一部の組織における平均吸収線量のかなりの不確実性に寄与しうる。

(347) 線量算定計算では、解剖学的領域（線源領域）をそれぞれの体内動態コンパートメントと関連づけなければならない。多くの体内動態モデルは、全身性放射能をいくつかの特定された臓器/組織の間で分割しており、残りの放射能を表す「その他の組織」と呼ばれるコンパートメントを含んでいる（3.7 節を参照）。線量算定手順では、「その他の組織」コンパートメントにおける放射能を、モデルにおいて明示的に特定されていないすべての組織の間で均一に分配する。「その他の組織」の構成組織である組織については、かなりの不確実性が平均吸収線量と関連するかもしれない。「その他の組織」には、明示的な組織加重係数を割り当てられた組織が含まれることがよくある。たとえば、乳房組織は体内動態モデルにおいて線源領域として明示的に特定されるのはまれであり、したがって、その平均吸収線量は、「その他の組織」へのその包含に基づくことがよくある。

(348) いくつかの数値方法は、動態を記述する潜在的に大きな数（数百）の「硬い」結合微分方程式のセットを解くことができるが、数値の正確さの要求を計算時間と釣り合わせなければならないことがよくある。平均吸収線量における不確実性に寄与するコンパートメントモデルの問題には、崩壊系列構成核種の仮定された体内動態（独立動態または共通動態）や、それら組織の解剖学的同一性が崩壊系列構成核種間で異なる場合の「その他の組織」の描写がある [Publication 71 (ICRP, 1995c) の 3.7.2 項および付属書 C]。

7 元素および放射性核種について提示されるデータ

(349) 本章では、本報告書シリーズの以後の部において提供される情報について述べる。提示されるデータは、職業上の放射線防護および作業者の記録線量の計算の目的のための基準値である。本シリーズで提示される標準作業者の体内動態パラメータ値ならびにデータは、性別、年齢、人種、健康状態およびその他の個人固有の特性によって変化しない。

(350) 以後の部のそれぞれの元素セクションには、作業場において遭遇するさまざまな放射性物質の化学的形態に関する情報；主要な放射性同位体ならびにそれらの物理学的半減期および崩壊モードのリスト；吸入摂取、経口摂取および全身性体内動態に関するデータのレビュー；そして標準全身性体内動態モデルの構造およびパラメータ値が含まれる。提示される線量算定データには、線量係数 [あらゆる関連放射性同

36

位体の吸入摂取および経口摂取に対応する、預託実効線量および指定された臓器または組織に対する預託等価線量 (Sv Bq^{-1})；単位内容量あたりの線量の関数 [予測される体内の放射能内容量あたりまたは予測される 1 日あたりの排泄あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1})]；そしてバイオアッセイ関数 [吸入摂取または経口摂取による単位摂取 (すなわち、 1 Bq) 後のさまざまな時間における、体内または特定の臓器内に保持される、もしくは尿中または糞中排泄される放射能の値 (Bq)] が含まれる。線量算定データは、3.2 節に述べた修正 HRTM, HATM (ICRP, 2006)、そして標準作業員について本報告書シリーズにおいて定義される標準全身性体内動態モデルを用いて計算される。

7.1 線量係数およびバイオアッセイ関数

(351) 標準作業員に対する実効線量の評価のために、以下の線量算定データが提示される。

- 単位摂取量あたりの、預託実効線量および指定された臓器または組織に対する預託等価線量 [または「単位摂取量あたりの線量係数」 $e(50)$ (Sv Bq^{-1})]。これらの係数は、当該摂取の放射能に基づく評価のために用いられるべきであり、その放射能摂取量は予測的に (すなわち、設計または計画段階において) もしくは遡及的に (すなわち、モニタリングデータに基づいて) 評価することができる。
- 急性摂取後のさまざまな期間に応じて表にまとめられた、標準作業員の身体の選ばれた線源領域内 (たとえば、肺、甲状腺、全身) および 24-h 排泄物試料中の放射性核種の、単位内容量あたりの預託実効線量の関数 [または「単位内容量あたりの線量の関数」 $z(t)$ (Sv Bq^{-1})]。これらの時間依存量は、全身計数や尿分析データなどのモニタリングデータに基づく遡及評価のために用いられるべきである。単位内容量あたりの線量の関数は、5 章に述べたように、モニタリングプログラムの設計のために予測的に用いることもできる。

(352) 標準バイオアッセイ関数 $m(t)$ は、当該摂取と関連する放射能割合 (すなわち、残留および 1 日あたりの排泄に対応する、 Bq 摂取あたりの Bq) の形で表にまとめられプロットされる。この 1 つの例外はトリチウム水の摂取の場合であり、この場合、データは Bq 摂取あたりの Bq L^{-1} で示される。これは線量率と直接関連するためである。

(353) $z(t)$ の利用は、最初に摂取量を計算するために残留または排泄関数 $m(t)$ を適用し、次に結果として生じる実効線量を計算するために線量係数 $e(50)$ を適用するという従来の方法の代わりに、線量評価を単一のステップへと単純化する (6.4 節)。単位内容量あたりの線量の値 $z(t)$ は、摂取量を最初に決定する必要を伴わない、バイオアッセイ測定値からの預託線量のより容易な評価を可能にするために提示される。

(354) それぞれの放射性核種について、すべての吸収タイプに応じた吸入摂取による摂取量に対応してモニタリング期間が選択されているため [Publication 78 (ICRP, 1997b) の 91 項に述べられているように]、摂取の時間が不明なことによって導入されるいかなる過小評価も、モニタリング間隔の間における急性摂取が仮定されるならば 3 分の 1 を超えない。適用されているモデルを用いて決定されるモニタリング

の頻度は、体内の放射性核種の挙動とその物理学的半減期の両方によって決定される。

(355) 全身性コンパートメントおよび HRTM のコンパートメントにおける放射性核種の内容量に関するバイオアッセイデータは、選ばれた親核種についてのみ示される。個人モニタリングの目的では、通常は親核種の内容量に関するバイオアッセイデータで十分である。

7.2 印刷された報告書および電子付属文書に提示されるデータ

(356) 印刷された報告書に提示されるデータは、吸入摂取および経口摂取の場合の単位摂取量あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1}) の表、吸入摂取の場合の単位内容量あたりの預託実効線量 (Sv Bq^{-1}) の表、そして吸入摂取の場合の Bq 摂取あたりの残留および排泄データのグラフに限られる。データは、すべての吸収タイプについて、また、それぞれの元素セクションの最も一般的な同位体について提示される。十分な情報が利用可能な場合は (主としてアクチノイド元素について)、さまざまな化学的形態に対応する肺吸収が明細に述べられ、それらに従って線量係数およびバイオアッセイデータが計算される。標準作業員によって吸入される粒子のサイズは、 $5 \mu\text{m}$ の AMAD およびおよそ 2.5 の幾何標準偏差 σ_g を持つ対数正規分布であると仮定される (ICRP, 1994a, 170 項)。それらの粒子は、 3.00 g cm^{-3} の密度および 1.5 の形状係数を持つと仮定される (ICRP, 1994a, 181 項)。ラドンの短寿命子孫核種は例外とされ、OIR: Part 3 (ICRP, 2016b) の吸入摂取セクションに述べられる。

(357) 本報告書シリーズに付随する電子付属文書には、単位摂取量あたりの預託実効および等価線量係数、単位内容量あたりの預託実効線量の関数、そして標準バイオアッセイ関数の包括的なセットが含まれる。データは、半減期が 10 分以上の、Publication 107 (ICRP, 2008) に含まれているほとんどすべての放射性核種について、また、その他の選ばれた放射性核種について提示される。データは、さまざまな物理化学的形態について、また、 $0.001 \mu\text{m}$ の AMTD から $20 \mu\text{m}$ の AMAD までの範囲の中央径を持つエアロゾルについて提示される。経口摂取による摂取 (特定の f_a 値) の場合および血液への直接入力の場合のデータも提示される。

7.3 提示されるデータの品質保証

(358) 委員会は、品質保証を特に重視している。内部線量係数に関する第 2 専門委員会タスクグループは、本報告書シリーズに示される量が、異なる研究機関において異なるコンピュータコードを用いて独立して計算されるよう手配した。これらの計算におけるいかなる不一致も、発行前に調査され解決された。

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication 130 下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。ドラフトからの引用を禁ず 【事務局】

付属書 A ヒト呼吸気道モデルの修正
A.1 緒言
(A1) OIR シリーズの発行は、 <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) に述べられている HRTM を経験および新たな情報に照らして更新する機会を提供する。OIR シリーズにおいて用いられる HRTM の修正版は 3.2 節に要約してあり、もとの HRTM からの単純な変更について述べてある。行われる主たる変更は、粒子輸送と血液中への吸収の両方による、沈着した物質のクリアランスと関連する。これらの変更は、HRTM における変更を実施する際に、関連する最近の情報のレビューおよび分析ならびに判断を必要としたものである。以下では、これらの展開について述べる。ET 気道からの粒子輸送を記述するモデルの変更は、ET 気道に沈着した物質の ET ₁ および ET ₂ 間の分布の変更を必要としたものであり、これについて以下に述べる。本付属書では、呼吸気道において形成される子孫核種の取り扱いに対して加えられた詳細な考察についても述べる。
A.2 クリアランス：粒子輸送
(A2) もとの HRTM と同様に、粒子輸送速度は年齢および性別とは無関係であり、あらゆる物質について同一であると仮定される。したがって、あらゆる物質の粒子輸送を記述するために汎用コンパートメントモデルが用意される。この仮定には例外があることが認識されている [<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) の付属書 E を参照]。特に、AI 領域からの一部のナノ粒子のクリアランスは、このモデルにおいて仮定される挙動とは異なる場合がある (A.3.4 項を参照)。しかし、これを考慮に入れることに伴う複雑さの追加は、放射線防護の目的のためには正当化されないとみなされた。
(A3) もとのモデルを図 A.1 に示す。それぞれの基準パラメータ値は図 A.1 に示されており、表 A.1 にリスト化してある。速度定数の基準値は、可能な限りヒト対象研究から導き出された。粒子輸送速度は哺乳類の種の間で大きく異なることがわかっているためである。
(A4) 新たな研究は、 <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) が発行されたときに可能だったよりも、信頼できる粒子輸送パラメータ値が選択されることを可能にしている。
(A5) 本書で採用される修正粒子輸送モデルを図 A.2 に示す (図 3.4 にも示してある)。それぞれの基準パラメータ値は図 A.2 に示されており、表 A.1 にリスト化してある。ここではこれら 2 つのモデルの違いを要約し、それらの変更の背景を以下に詳しく示す。

1

(A6) 領域 ET ₂ は、モデルの中では 2 つのコンパートメントによって記述される。すなわち、ET _{seq} と ET ₂ である。口腔はもはや ET ₂ には含まれないため、コンパートメント ET ₂ は後部鼻道、咽頭および喉頭からなるものとして再定義される。
(A7) BB および bb 領域のそれぞれにおいて、咽喉へのクリアランスフェーズは今や、2 つではなく 1 つである。したがって、図 A.1 におけるコンパートメント BB ₁ および BB ₂ は図 A.2 におけるコンパートメント BB' によって置き換えられ、図 A.1 におけるコンパートメント bb ₁ および bb ₂ は図 A.2 におけるコンパートメント bb' によって置き換えられる。
(A8) AI 領域においては、もとの HRTM の 3 つの AI コンパートメントが ALV コンパートメントおよび INT コンパートメントによって置き換えられている。粒子は、ALV コンパートメントから繊毛気道 (bb') または INT コンパートメントのいずれかへと除去される。INT コンパートメントからは、粒子はリンパ節へと極めてゆっくり除去される。
(A9) したがって、修正 HRTM では以下のコンパートメントが定義されている。 <ul style="list-style-type: none"> ET₁：前部鼻道（細分されない領域 ET₁）に沈着した物質の残留。 ET_{seq}：鼻道に沈着した粒子の微小割合の、気道組織における長期残留（半減期約 700 d）。 LN_{ET}：ET 領域を排出するリンパ管およびリンパ節。 LN_{TH}：TH 領域を排出するリンパ管およびリンパ節。 ET₂：ET_{seq} に保持される微小割合（0.002 とみなされる）を除いた、後部鼻道、咽頭および喉頭（ET₂ 領域）に沈着した物質の短期残留（半減期約 10 分）。 BB'：ET₂ への粒子輸送を伴う、BB における粒子の残留（半減期約 100 分）。 bb'：BB' への粒子輸送を伴う、bb における粒子の残留（半減期約 3.5 d）。 BB_{seq}：BB に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留（半減期約 700 d）。 bb_{seq}：bb に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留（半減期約 700 d）。 ALV：肺胞に沈着した粒子の残留（半減期約 250 d）。沈着物の一部（0.67）は粒子輸送によって繊毛気道 (bb') へと除去されるが、残りは間質 (INT) へと浸透する。 INT：肺胞に沈着した、間質へと浸透する粒子の超長期残留（半減期約 60 y）。これらの粒子はリンパ節へとゆっくり除去される。

2

A.2.1 粒子輸送：胸郭外気道
(A10) <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) では、利用可能な情報に基づいて、経鼻吸入摂取時は ET ₂ における沈着よりも ET ₁ における沈着の方がやや多いと、また、ET ₁ に沈着した粒子のほとんどは鼻をかむことによって除去されるが、一部は ET ₂ へと、したがって数時間の時間尺度で消化管へと除去される、と評価された。また、粒子は ET ₂ から咽喉へと除去され、10 分という次元の時間尺度で飲み込まれることを示す、かなりの量の実験データもあった。
(A11) ET ₁ からのクリアランスに関する定量的な情報の欠如ゆえに、もとの HRTM では、これらの判断が単純化された形で適用された。ET 気道に沈着した物質のうち、ET ₁ におけるおよそ 50% の沈着物は鼻をかむことによって 1 d ⁻¹ の速度で除去され、ET ₂ における残りの沈着物は 100 d ⁻¹ の速度で胃腸管へと除去されると仮定された (図 A.1)。
(A12) この欠点に対処することが意図された実験において、被験者は、静止して着座している間もしくは軽運動を行っている間に、空気力学的直径 (d_{ae}) が 1.5 μm 、3 μm または 6 μm の放射性標識不溶性粒子を経鼻吸入した (Smith et al., 2002, 2011)。初期 ET 沈着物の少なくとも 95% が除去されるまで (概して 2 d)、経鼻気道における残留および自発的な鼻かみによるクリアランスが追跡された。平均して、初期 ET 沈着物の 19% は鼻をかむことによって除去され (50% のクリアランスに対応する幾何平均時間は 8 h だった)、残りは消化管へと除去された：15% は数分以内に、21% は数分～1 h で、そして 45% は鼻をかむことによって除去された割合と同様の時間尺度で除去された。この研究における測定ならびに、もとのモデルの基礎とされた以前の研究は、1 h 以内に除去されなかったほとんどの粒子は前部鼻道において保持されることを示している。
(A13) これらのデータに基づいて、修正モデルでは、ET ₁ に沈着した物質 (今や、ET における沈着物の 65% とみなされる) は 2.1 d ⁻¹ の速度 (およそ 8 h の半減期) で、およそ 3 分の 1 は鼻をかむことによって、3 分の 2 は ET ₂ への移行によって除去されると仮定される (Smith et al., 2014)。これは、コンパートメント ET ₁ から環境へは 0.6 d ⁻¹ 、コンパートメント ET ₁ からコンパートメント ET ₂ へは 1.5 d ⁻¹ の粒子輸送速度で実現される。ET ₂ からのクリアランスは変更されず、これは 100 d ⁻¹ の速度 (およそ 10 分の半減期) で消化管へと行われる。
(A14) もとの HRTM と同様に、修正モデルでも、ET ₂ に沈着した (しかし、ET ₁ からそこへと除去されたのではない) 粒子の微小割合は気道壁において隔離され (ET _{seq})、リンパ節へと移行すると仮定する。しかし、隔離される割合は、もとの HRTM における ET ₂ 沈着物の 0.05% から、修正モデルでは 0.2% へと引き上げられる。これは部分的には、ET ₂ における沈着割合の引き下げを理由とするが、 <i>Publication 66</i> の中でレビューされた、鼻道における吸入粒子の長期残留に関する実験データの再考によるものでもある (ICRP, 1994a ; Smith et al., 2014)。
(A15) もとの HRTM では、吸入摂取時に鼻道に沈着した粒子は、ET ₁ と、ET ₂ の一部である後部鼻道の間で等しく分配されると仮定された

<p>[しかし、吸息時および呼息時の多分散エアロゾルについて沈着効率が計算された方法ゆえに、放射線防護上対象となるほとんどのエアロゾルサイズにおいて、<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) に示されている沈着割合は ET₁ よりも ET₂ の方が少々高い]。修正 HRTM では、最近の実験 (Smith et al., 2011) に基づいて、鼻呼吸の場合、ET 気道における沈着物は 65% が ET₁ へ、35% が ET₂ へと分配されると仮定される。修正 HRTM における ET₁ および ET₂ に沈着した吸入物質の割合を計算する目的で、ET 気道における総沈着量を示すために ET₁ および ET₂ に沈着した割合 (もとの HRTM を用いて計算された) が合計され、次に、65% が ET₁ へ、35% が ET₂ へと配分された (口呼吸の場合、ET₁ には沈着がなく、ET₂ に沈着した割合はもとの HRTM を用いて計算されたもので変わらない)。</p>
(A16) 表 A.2 は、(a) 静止して着座している成人男性、(b) 軽運動を行っている成人男性、および (c) 標準作業者の場合の、エアロゾルサイズの関数としての呼吸気道のそれぞれの領域における沈着割合の値を示したものである。AMAD が 5 μm であるエアロゾルに対応する標準作業者の場合の値は、表 3.1 に示してある。
(A17) AMAD がおよそ 0.3 μm を下回るエアロゾルについては、呼吸気道における沈着は熱力学的メカニズム (すなわち、拡散) によって支配され、結果として、沈着割合は主として AMTD に依存する。したがって、表 A.2 では、AMTD に対する沈着割合をこのサイズ範囲で表にまとめている。AMAD がおよそ 0.3 μm を上回るエアロゾルについては、呼吸気道における沈着は衝突および沈降によって支配されるため、沈着割合は主として AMAD に依存する。したがって、表 A.2 では、AMAD に対する沈着割合をこのサイズ範囲で表にまとめている。
(A18) もとの HRTM における ET の取り扱いからの変更は、多くの場合、ET ₁ から ET ₂ への移行ならびに、それによる ET ₂ および消化管における全身性取り込みの増大ゆえに、線量係数を増大させることになる。これらの変更は、糞試料における放射性核種の測定の解釈にも影響を及ぼすことになり、鼻に沈着した物質 (これは概して、吸入物質のおよそ 50% である) のうち、消化管を通じて除去される割合が大きくなる。
A.2.2 粒子輸送：気管支気道および細気管支気道
<i>低速クリアランス</i>
(A19) もとの HRTM には、半減期が 23 d である、BB および bb 領域 (図 A.1 におけるコンパートメント BB ₂ および bb ₂) に沈着した粒子の低速クリアランスフェーズが含まれている。これは主として、ボランティアが放射性標識粒子の「シャローボラス (shallow bolus)」(すなわち、主たる気道に粒子を沈着させることが意図された、それぞれの呼吸の終了時点における少量のエアロゾル) を吸入した実験の結果に基づくものだった。「低速除去」割合が認められ、これは d_{ae} よりも幾何学的粒子径 d_p との相関の方が高いことを示すとみなされた (ICRP, 1994a)。

<p>もとの HRTM は、BB および bb に沈着した粒子の低速除去割合 (f_s) は $d_p \leq 2.5 \mu\text{m}$ の場合に 0.5 であり、粒子が大きくなると急激に低下すると仮定している。</p>
<p>(A20) 修正 HRTM では、もっと最近の人のボランティア実験に基づいて、気管支樹からの低速クリアランスに対して別のアプローチがとられている。特に、一連の研究では、大きな粒子 (d_{ae} が $6 \mu\text{m}$) は極度にゆっくり吸入されており、これは理論的には、ほとんどの沈着が細気管支において起こることに帰着するべきものである (たとえば、Anderson et al., 1995 ; Camner et al., 1997 ; Falk et al., 1997, 1999 ; Philipson et al., 2000 ; Svartengren et al., 2001)。24 h における残留は予測された AI 沈着をはるかに上回っており、気管支樹における低速クリアランスの概念を裏づけている。</p>
<p>(A21) Falk et al. (1997, 1999) は、6 カ月までの期間にわたって、ゆっくり吸入された (およそ $45 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) d_{ae} が $6 \mu\text{m}$ であるテフロン粒子の肺残留を、通常の流量 (およそ $450 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) で吸入された同様の粒子の残留と比較した。初期肺沈着物 (ILD) のおよそ 50% は、いずれの様式の吸入でもそれに続く当初 24 h で除去された。24 h 以後の残留は 2 成分指数関数によって十分に説明されており、クリアランス速度はおよそ 3.7 d (「中速」フェーズ) および 200 d (AI 領域からのクリアランスに帰せられる) の半減期を有する。中速フェーズと関連する割合は、ゆっくりした吸入後は ILD のおよそ 18%、通常の吸入後は ILD の 6% だった。3 つの異なるモデルを用いて計算された BB, bb および AI 領域における沈着は平均して、ゆっくりした吸入後は ILD のそれぞれ 17%、63% および 18%、通常の吸入後はそれぞれ 30%、26% および 43% であり、良好な一致を示した。したがって、予測された細気管支沈着と中側フェーズにおいて除去される量の間には強い相関があり、中速フェーズは細気管支に沈着した粒子のおよそ 25% と関連することを示唆した。</p>
<p>(A22) Svartengren et al. (2001) は、d_{ae} が $6 \mu\text{m}$ である粒子がシャローボラス (shallow bolus) として、またそれぞれの場合においてゆっくりした吸入によって吸入されると、それぞれの被験者において残留が極めて類似することを認めた。1 つの解釈は、低速クリアランスは細気管支に特有であって、手法が異なるという事実にかかわらず沈着パターンは極めて類似するというものであり、これは補完的な沈着モデリングによって裏づけられた見解だった。しかし、沈着パターンは異なり、ゆっくりした吸入後よりもボラス吸入後の方が気管支沈着が多くなる可能性を、また、HRTM で仮定されているように、大きな気道と小さな気道のいずれにおいても低速クリアランスが同程度に起こる可能性を排除することはできないだろう。</p>
<p>(A23) Philipson et al. (2000) は、d_{ae} が同じである、したがって肺沈着パターンは同じであるが、密度は異なるため d_p の値が異なる ($d_{ae} \approx d_p \sqrt{\rho}$、ここで ρ は粒子密度) 粒子を投与することによって直接、d_p の影響を調査した。ボランティアは、d_{ae} が $6 \mu\text{m}$ であるポリスチレン (PSL、密度 1.05 g cm^{-3}) およびテフロン (密度 2.13 g cm^{-3}) の粒子を吸入した。テフロンの幾何学的直径 d_p ($4.5 \mu\text{m}$) は PSL ($6.1 \mu\text{m}$) よりも小さく、HRTM は、f_s はテフロンの方が大きくなる (14% 対 5%) と予測している。しかし、これら 2 つの粒子の残留はそれぞれの被験者において同様</p>

5

<p>だった。</p>
<p>(A24) Smith et al. (2007, 2008) は、これらの代替仮説をより批判的に検証し、肺胞沈着を最小化するために、d_{ae} は同じであるが密度は大きく異なる粒子をシャローボラス (shallow bolus) として投与することも行った。ある研究において、ボランティアは、d_{ae} が $5 \mu\text{m}$ である PSL および金 ($\rho = 19.3 \text{ g cm}^{-3}$) の粒子を吸入し、対応する d_p の値はそれぞれ $5 \mu\text{m}$ および $1.2 \mu\text{m}$ であり、f_s の値はそれぞれおよそ 10% および 50% だった。したがって、HRTM によれば、金の肺残留は PSL のそれをはるかに上回るべきものだった。しかし、いかなる被験者においても、これらの間に有意な違いは何ら認められなかった。別の研究では、d_{ae} が $8 \mu\text{m}$ である PSL および金が用いられ、おおむね同様の結果が得られた。</p>
<p>(A25) したがって、これらの結果は、HRTM において仮定された d_p に対する f_s の依存と整合するものではない。しかし、Publication 66 (ICRP, 1994a) の仮定の基礎とされたボラス実験の結果との明らかな食い違いは解決されていない。考える説明は、推論された d_p に対する依存は偶然のものだったというものかもしれない。それは主として、比較的大きな粒子 (d_p または $d_{ae} > 4 \mu\text{m}$) を用いて行われた測定に基づくものであり、その時に利用可能だった測定値は比較的小なかった。</p>
<p>(A26) 最近の別の研究は、気管支樹からの低速粒子クリアランスに関するもとの HRTM の仮定との不整合を示した。Gregoratto et al. (2010) は、Philipson et al. (1996) による研究における肺胞残留 (下記を参照) を分析した際、吸入摂取後 7~50 d の肺クリアランスは、BB および bb 領域からの低速クリアランスの結果として、HRTM によって予測されたものをはるかに下回ることを認め、その期間には AI 領域からのクリアランスはないとさえ仮定した。</p>
<p>(A27) したがって、関連する最近のヒト対象研究のほとんどは、誘導気道における低速クリアランスは細気管支に沈着した粒子と関連することを示唆しており、これは Publication 66 (ICRP, 1994a) において仮定されている粒径依存クリアランスメカニズムよりも簡単な説明である。修正 HRTM では、誘導気道における低速クリアランスは bb 領域においてのみ起こると仮定され、上述のように Falk et al. (1997, 1999) に従って、粒子は 0.2 d^{-1} の速度 (およそ 3.5 d の半減期) で bb 領域から BB 領域へと除去されるとみなされる (隔離された微小割合を除く。下記を参照)。BB 領域から ET 領域への急速クリアランス速度は、10 d^{-1} で変わらない。</p>
<p>(A28) Falk et al. (1997, 1999) の結果は、ゆっくり除去されるのは bb 領域に沈着した粒子の小部分に過ぎず、それらの実験の条件ではこれは 25% ぐらいであることを示唆している。そうであるならば、Camner et al. (1997) によって提案されているように、それは主としてより小さな細気管支において起こると考えるのが合理的である。しかし、残っている不確実性 (および bb 領域の下位区分について利用可能な沈着割合の欠如) を考慮して、本書では単純化のために、それは bb 領域に沈着したあらゆる粒子にあてはまると仮定される。また、低速クリアランスは BB および bb 領域に直接沈着した粒子のみにあてはまると仮定したもとの HRTM とは異なり、それは AI 領域から bb 領域へと除去さ</p>

6

れるあらゆる粒子にもあてはまると仮定される。これらの変更は、モデルの単純化に帰着する。すなわち、単一のコンパートメント BB'が BB₁ および BB₂ に取って代わり、単一のコンパートメント bb'が bb₁ および bb₂ に取って代わる (図 A.2)。線量算定モデルに対する関連する変更については、3.2.4 項に述べてある。

気道壁における隔離

(A29) もとの HRTM は、BB および bb 領域に沈着し気道壁において保持される粒子の割合 (BB_{seq} および bb_{seq}) はどのサイズの場合も 0.7% であり、この物質は 0.01 d⁻¹ の速度でリンパ節へと除去されると仮定した。もとの HRTM が完成したとき、この現象は、ラットの遠位気管への放射性標識粒子の沈着後の放射能残留を追跡した Patrick および同僚ら (たとえば、Takahashi and Patrick, 1987) によって十分に定量化されていたに過ぎなかった。その後、Takahashi et al. (1993) は同様の実験を実施し、ウサギ、イヌおよびサル遠位気管に ¹³³Ba 標識 BaSO₄ を点滴注入した。注入の 1 週間後に保持される量は、注入された量のそれぞれ 0.145%、0.044% および 0.043% だった。これらの値はラットの場合に認められた値をはるかに下回っており、種間の相違を示唆している。鼻上皮の壁における粒子の残留について上記で選ばれた値、すなわち 0.2% という ET_{seq} は、複数の種における複数の異なる物質に関する結果に基づくものだったが、気管について認められた範囲内である。これに基づいて、本書では、BB_{seq} と bb_{seq} の双方において保持される割合に対応する値およびそれらから領域のリンパ節へのクリアランス速度は、ET_{seq} の場合と同じであると仮定される (すなわち、0.2% および 0.001 d⁻¹)。結果として、修正モデルは、BB および bb から LN_{TH} への移行は少なくなると仮定する。解剖研究において認められた LN_{TH} 内容量に対する肺内容量の比率との整合性を維持するために、AI 領域から LN_{TH} への移行は相応して多くなると仮定する (下記を参照)。

(A30) もとの HRTM における気管支樹からの低速クリアランスの取り扱いからの変更は、多くの場合、線量係数を低下させることになる。これらの低下は、低速クリアランスが実効線量係数の最大成分を与えた (Bailey et al., 1995)、半減期が数週間以上のタイプ M のアルファ放出放射性核種の場合にかなりのものとなる。隔離に関するパラメータ値の変更は、実効線量係数にはほとんど影響を及ぼさない。それは実効線量係数にわずかに寄与するだけでしかないためである。

A.2.3 粒子輸送：AI 領域

(A31) もとの HRTM では、AI 領域は 3 つのコンパートメント、すなわち、主としてそれぞれ 0.02 d⁻¹、0.001 d⁻¹ および 0.0001 d⁻¹ の速度 (およそ 35 d、700 d および 7000 d の半減期) で気管支樹を経由して胃腸管へと除去される AI₁、AI₂ および AI₃ によって表された (図 A.1)。ヒトの肺クリアランスは、吸入摂取後およそ 1 y までの実験的研究において定量化されていた (ICRP, 1994a)。この期間にわたる不溶性粒子の肺

残留は概して 2 成分指数関数に従い、およそ 30% は半減期がおよそ 30 d、残りは半減期が数百 d であり、300 d において初期肺胞沈着物のおよそ 50% の残留を示すとみなされた。この情報は、AI₁ に関するパラメータ値を定義するために利用された。

(A32) 職業被ばく後の胸部における放射能の測定および解剖時の肺における放射能の測定は、一部の物質は数十年にわたって肺において保持されうることを示している。Publication 66 (ICRP, 1994a) では、放射性核種のインビボ測定に基づいた、偶発的な吸入摂取に続くヒトにおける TH 残留に関する情報がレビューされた。摂取後 300 d までの残留は対照実験において特徴づけられていたため、少なくとも 400 d にわたって残留がそれに続く偶発的な摂取に関する研究のみが包含された。摂取後 300 d において残存する初期肺胞沈着物のおよそ 50% のありうる運命に関するガイダンスを得ることが目的だったため、最終測定の時間 t_f における TH 残留 $R(t_f)$ は、300 d における残留 $R(300)$ の割合として表された。これは、摂取後しばらくしてから最初の測定が行われたケースにおける情報の包含も容易にするとともに、エアロゾルサイズ、呼吸パターンや可溶性成分などの因子による、初期クリアランスにおける相違の影響を回避するものだった。Publication 66 (ICRP, 1994a) の図 E.10 においては、 $R(300)$ の割合としての TH 残留 $R(t_f)$ が t_f と対照してプロットされた。この情報をここでは図 A.3 に示す。その測定が当該酸化物の急性摂取後の 10 y に及んだ元素 (コバルト、ウラン、プルトニウムおよびアメリシウム) のそれぞれについて、300 d において胸部内にとどまる物質の有意な割合 (> 10%) の超長期残留の証拠が認められた。

(A33) これらの結果は、AI₂ および AI₃ に関するパラメータ値を定量的に定めるためには用いられなかった。発表されたインビボ研究は典型的なものではなく、異例に低速肺クリアランスを表している可能性があるともみなされたためである。「AI 沈着物のうち AI₃ へと向かう割合 (a_3) は、容易には定量化されない。300 d において保持されるのは初期肺胞沈着物の 50% に過ぎないため、 a_3 は 0.5 未満である。一部の被験者においては摂取後の 5000 d において測定可能な TH 残留が存在するため (図 A.3)、 a_3 はおそらく、初期肺胞沈着物の少なくとも数パーセントだろう。おおよその値としては、 $a_3=0.1$ と、したがって、差分により $a_2=0.6$ と仮定される」と指摘された (ICRP, 1994a)。図 A.3 はまた、もとの HRTM によって予測された不溶性粒子の残留も示しており、これは最終測定が摂取後 2000 d 未満に行われた場合の結果とはびつたり一致しているが、測定がそれより後の場合の結果を過小評価している。

(A34) 修正モデルでは、もとの HRTM の採用以後に発表されたさらなるヒト対象研究が考慮されており、それらはすべて、AI 領域における長期残留は仮定されたものよりも大きいことを示している。

(A35) Davis et al. (2007) による最近の研究は、Publication 66 (ICRP, 1994a) が採択されたときに利用可能だったいかなる情報よりも十分な、長期肺残留に関するインビボ情報を提供している。作業者のグループが同時に短時間の吸入摂取によってコバルト-60 含有粒子に被ばくしており、ほとんど (7 名) がおよそ 15 y にわたって追跡されていた。これらの作業者は原子力産業の作業者を代表すると仮定するのが合理的である。これらの作業者はすべて、HRTM の予測よりもはるかに低速なクリアランスを示しており、これは HRTM が発表された時点におい

<p>て利用可能だった、2000 d を超える残留に関する少数のデータと整合している (図 A.3)。</p>
<p>(A36) それゆえ、長期肺残留データのレビューが実施されている (Gregoratto et al., 2010)。HRTM の完成以後に発表された、別の主要な 3 つの関連研究が特定された。それらの結果は、HRTM の基礎とされた結果とともに、AI 領域からの粒子輸送の新たなコンパートメントモデルを開発するために用いられた。</p>
<p>(A37) Philipson et al. (1996) は、^{195}Au 標識テフロン粒子の吸入摂取後およそ 3 y にわたって、10 名のボランティアにおける肺残留を追跡した。この研究の継続期間は、HRTM が開発されたときに利用可能だった実験のおよそ 3 倍の長さであり、試験用粒子からの放射性標識の漏出は少なかったように思われる。1965 年 10 月のロッキーフラツプラントにおける火災時に酸化プルトニウムを吸入した作業員については 30 y にわたって肺残留が追跡されており (Mann and Kirchner, 1967; ORAUT, 2007)、これは原子力産業の作業員を代表するべき別のグループである (Gregoratto et al., 2010)。Kuempel et al. (2001) は、もとの HRTM よりも生理学的にいっそう現実的でありより単純でもある、AI 領域における粒子残留モデルを開発した。これには、HRTM における 3 つの AI コンパートメントの代わりに、気管支樹と INT コンパートメントの双方へと除去される ALV コンパートメントが含まれており、INT コンパートメントはリンパ節へと除去される。このモデルは、それによって粒子質量沈着速度を評価することができる被ばく歴ならびに肺における (また、事例のおよそ 50% においてはリンパ節についても) 粉塵濃度の解剖測定値を有する米国の炭鉱夫のグループに適用された。このモデルはデータと整合する最も単純なモデルとみなされ、観察された範囲にわたって、高い肺負荷におけるクリアランス障害のいかなる証拠も認められなかった。Kuempel et al. (2001) によって導き出された最適化されたパラメータ値は、ALV から bb へのクリアランスについては速度 $m_1=0.001 \text{ d}^{-1}$、ALV から INT へのクリアランスについては速度 $m_i=0.00047 \text{ d}^{-1}$、そして INT からリンパ節へのクリアランスについては速度 $m_{LN}=10^{-5} \text{ d}^{-1}$ だった。もとの HRTM AI モデルとの主たる違いは、AI 沈着物のかなりの割合が INT において隔離されるということである [$m_i/(m_i+m_T)=0.32$]。Kuempel et al. (2001) は、HRTM は鉱夫における肺残留をおよそ 4 分の 1 過小評価すると指摘した。</p>
<p>(A38) Gregoratto et al. (2010) は、Kuempel et al. (2001) のモデルは上記に概略を述べた他の 3 つの研究におけるデータに対して十分な AI 残留の描写をもたらすものであることを示した。Gregoratto らは、Kuempel らのモデル構造を利用するが、HRTM パラメータ値の基礎とされた実験データセットと、もっと最近の長期研究のいずれにも適合させた新たなモデルを開発した (図 A.4)。Gregoratto らは、$m_T=0.0017 \text{ d}^{-1}$ および $m_i=0.0010 \text{ d}^{-1}$ という ALV からの粒子輸送速度を得た。本書ではこれらの値が採用されるが、m_T の値は切り上げて 0.002 d^{-1} とし、モデルの根底にある不確実性を反映させる (図 A.2)。これらの値はおよそ 250 d ($m_i+m_T=0.003 \text{ d}^{-1}$) という ALV からのクリアランス半減期を示し、不溶性粒子の ALV 沈着物のおよそ 33% は INT において隔離される。もとの HRTM よりも大きい AI 残留は、タイプ S の長寿命アルファ放出体の場合には単位摂取量あたりの肺線量が 50~100% 高くなることに帰着しそうであるが、より可溶性の形態に対する影響は、たとえばと</p>

<p>しても小さいことになる。</p>
<p>(A39) Gregoratto et al. (2010) が分析した長期研究においては、喫煙者而非喫煙者の間にいかなる明確な違いも認められなかった。これは、<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) の中でレビューされた研究において認められた、非喫煙者よりも喫煙者の方が残留が大きいことは対照をなすが、同刊行物ではこの比較を行うことが可能だったとはいえ、初期の研究は継続期間が比較的短いものだったことが指摘されている。これはまた、肺磁界測定法を用いて追跡された酸化鉄の肺胞残留に関する研究において認められた、非喫煙者よりも喫煙者の方が残留がはるかに大きいことも対照をなすが [OIR: Part 2 (ICRP, 2016a) における鉄吸入セクションを参照]、この場合は粒子輸送よりも血液中への吸収の方が支配的なクリアランスメカニズムであるとみなされる。したがって、<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) の表 19 において提案されている、AI 領域からの粒子輸送に対する喫煙の影響に関する変更機能は、修正モデルにはあてはまらないとみなされる。さらに、同表における他の変更因子を個人線量評価において適用することも勧められない。</p>
<p>(A40) もとの HRTM では、非喫煙者の場合、Pu の吸入摂取から 10,000 d 後で $[\text{LN}]/[\text{L}]\approx 20$ (Kathern et al., 1993) という、解剖データから推定される値に等しいリンパ節および肺における物質濃度の比率を示すために、AI 領域から LN_{TH} への輸送速度は $2\times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ と定められた。<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) のモデルよりも本書で採用されるモデルの方が、BB および bb 領域における沈着物のうち気道を経由して LN_{TH} へと除去される割合 (BB_{seq} および bb_{seq}) が小さいことおよび AI 残留が長いことにより、BB および bb 領域から LN_{TH} へと除去される量は今や、AI 領域からの量と比べるとごくわずかである。$[\text{LN}]/[\text{L}]\approx 20$ という比率は、$3\times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ という INT から LN_{TH} への輸送速度を用いて得られる (Gregoratto et al., 2010)。</p>
<p>A.3 クリアランス：血液中への吸収</p>
<p>(A40) 3.2.3 項に要約したように、血液中への吸収は沈着した物質の物理的および化学的形態に依存する。もとの HRTM と修正 HRTM のいずれにおいても、いかなる吸収も起こらないと仮定される ET_1 を除いて、吸収はあらゆる領域 (リンパ節を含む) において同じ速度で起こると (自動的に) 仮定される。吸収は、誘導気道 (ET, BB および bb 領域) の場合よりも空気血液関門が薄い AI 領域ではより高速になりそうであると認められるが、異なる領域における異なる速度に関するスケール係数など、これを考慮に入れるための一般的な体系的根拠を提示するために利用可能な情報は不十分である。</p>
<p>(A41) HRTM では、吸収は 2 段階のプロセスとして扱われる。すなわち、血液中に吸収される物質への粒子の解離 (溶解) と、可溶性物質および粒子から解離した物質の血液中への吸収 (取り込み) である。いずれの段階と関連するクリアランス速度も、時間に依存する可能性がある。</p>

溶解
<p>(A42) もとの HRTM と修正 HRTM のいずれも、時間依存溶解を描写するために同じ単純なコンパートメントモデルを用いる。ある割合 f は速度 s_r で比較的急速に溶解し、残りの割合 $(1-f)$ は速度 s_s でよりゆっくりと溶解すると仮定される [図 A.5(a)]。この体系の制限は、時間とともに減少する溶解速度全体を表現できないに過ぎないということである。これを克服するために、<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) は、図 A.5(b) に示されている、より柔軟な体系も描写している。この体系では、呼吸気道に沈着した物質は「初期状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、そこでは一定速度 s_p で溶解する。物質は同時に、「変換された状態にある粒子」と名づけられた対応するコンパートメントへと移行し (一定速度 s_{pt} で)、そこでは異なる溶解速度 s_t を有する。この体系を用いると、初期溶解速度はおおよそ s_p であり、最終溶解速度はおおよそ s_t である。したがって、$s_t > s_p$ を含めて適切なパラメータ選択を伴うならば、増大する溶解速度を表現することができる。s_{pt} に対する s_p の比率は、急速に溶解する割合に近似する。図 A.5(a) に示されているモデルを用いて描写することができるいかなる時間依存溶解挙動も、パラメータ値の適切な選択を伴うならば図 A.5(b) に示されているモデルを用いることによって描写することができる、と指摘してもよい。しかし、上記に言及したように、逆は真ではない。</p>
<p>(A43) 通常はそうであるように、溶解速度が時間とともに減少する場合には、いずれの体系も用いることが可能であり、以下の値を用いるならば同じ結果を示すだろう。</p> $s_p = s_s + f(s_r - s_s)$ $s_{pt} = (1-f)(s_r - s_s)$ $s_t = s_s$
<p>(A44) 図 A.5(b) に示されている体系は、以前の刊行物 (ICRP, 1994b, 1995c, 1997b) では自動的に適用された。しかし、それがもたらすさらなる柔軟性が実際に必要とされることはまれであり、描写するのがより複雑である (かつ、直観的なわかりやすさに劣る)。したがって、より単純なアプローチが今や既定として採用され、より柔軟なアプローチは選択肢として保持される。ウランアルミナイドを含めた、「初期状態にある粒子」および「変換された状態にある粒子」によって描写されている、時間とともに増大する溶解速度を示す物質の例は、本シリーズの以後の報告書における元素セクションに示される。</p>
取り込み
<p>(A45) 溶解物質の血液中への取り込みは通常、瞬時に起こると仮定される。しかし、元素によっては、溶解物質の一部は急速に血液中に吸</p>

<p>取られるが、呼吸気道の成分との結合のために、かなりの割合がよりゆっくりと吸収される。時間依存取り込みを描写するために、溶解物質のある割合 (f_b) は「束縛」状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合 $(1-f_b)$ は瞬時に血液に入ると仮定される (図 A.5)。このモデルでは、「束縛」状態の物質は、粒子輸送プロセスによってではなく、血液中への取り込みによってのみ除去される。したがって、そこからはいかなる吸収も起こらない ET_1 を除いて、それぞれの領域について「束縛」コンパートメントが 1 つのみ必要とされる。</p>
<p>(A46) 図 A.5 に示されている体系は、ET_1 を除いて、図 A.2 に示した粒子輸送モデルにおけるコンパートメントのそれぞれにあてはまる。ET_1 からはいかなる吸収も起こらないと仮定されるが、図 A.5(a) におけるモデルが用いられる場合には、ET_1 沈着物がそれでもなお、高速コンパートメントと低速コンパートメントの間で分配されなければならない。物質が ET_1 から、そこから吸収が起こる ET_2 へと除去されるためである。</p>
<p>(A47) どの元素についても、パラメータの既定値は、吸収は高速 (タイプ F) とみなされるのか、中速 (タイプ M) とみなされるのか、それとも低速 (タイプ S) とみなされるのかどうかに従って勧告される。<i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a) に示されており表 A.4 に再掲するもとの基準値は、それについては近似値が与えられた f, s_r および s_s [図 A.5(a)] よりもむしろ、そのパラメータの初期溶解速度 s_p、変換速度 s_{pt} および最終溶解速度 s_t [図 A.5(b)] によって指定された。ガスまたは蒸気については、<i>Publication 68</i> (ICRP, 1994b) のように血液中への瞬時の取り込みも勧告されており、<i>Publication 71</i> (ICRP, 1995b) ではタイプ V (超高速) と定義されている。</p>
<p>(A48) タイプ F, M および S の場合のもとの既定値 (ICRP, 1994a, b, 表 A.4) は、実験データのレビューに基づくものではなく、粒子輸送速度との比較に基づくものだった。急速溶解速度 s_r に対応する 100 d^{-1} という値は、鼻 (ET_2) から咽喉への粒子クリアランス速度に等しくするために選択された。したがって、タイプ F の場合、ET_2 に沈着した物質のおよそ半分は血液中に吸収され、残りは飲み込まれる。タイプ S の場合の 10^{-4} d^{-1} という低速溶解速度は、何らかの長期肺残留があることを確実にするべく、AI 領域から胃腸管への最も遅い粒子輸送速度 (図 A.2) に等しくするために選択された。タイプ M の値は、これら 2 つの中間とするために選択された。しかし、既定のタイプ F およびタイプ S の場合のパラメータ値は、これらのクラスの物質を代表するというよりもむしろ、「高速」および「低速」溶解の両極端を意味すると認識されている。</p>
<p>A.3.1 吸入物質の吸収特性のレビュー</p>
<p>(A49) 本報告書シリーズの以後の部を作成するに際しては、放射線防護と関連する吸入物質の吸収特性について詳細なレビューが実施された。それらは、それぞれの元素の吸入摂取セクションに要約される。</p>

<p>(A50) 情報が利用可能だった場合、固有のパラメータ値は、インビボ研究とインビトロ研究の両方による実験データから導き出された。以下に述べるように、これらは、「高速」、「中速」または「低速」の速度で除去されると一般にみなされる物質を代表する値の選択に関するガイドダンスを提供するためのデータベースをもたらした。既定のタイプ F、M および S についてそれに基づいて選択された値は、本報告書シリーズで用いられる修正 HRTM に採用されている。</p>
<p>(A51) 限られた数の選ばれた物質、すなわち以下のような物質については、物質固有の吸収速度が元素セクションの中で採用されている(また、付随する電子付属文書には、それらの物質について線量係数および標準バイオアッセイ関数が提示されている)。</p> <ul style="list-style-type: none"> 固有のパラメータ値をそこから導き出すことができるインビボデータが存在する。 さまざまな研究の結果が一貫している。 その物質への職業被ばくが起りそうであるとみなされた。 固有の線量係数およびバイオアッセイ関数を追加的に提示することを正当化するのに十分なほど、固有のパラメータ値がタイプ F、M および S の既定のパラメータ値とは異なる。
<p>(A52) 他の物質は、元素セクションを編集する際にレビューされたように、利用可能であれば適切な実験データを利用して既定のタイプに割り当てられた。Publication 66 (ICRP, 1994a) は、実験結果に基づいて物質を吸収タイプに割り当てるための規準を示さなかった。規準は Publication 71 (ICRP, 1995c) において策定され、その適用は ICRP (2002b) の中でさらに論じられた。タイプ M は、ある吸収タイプへの割り当てをそれに基づいて行いうるであろう情報がない場合に、ほとんどの元素のあらゆる粒子形態について仮定される。ある物質は、急性摂取後 30 d までに血液中に吸収される量が、0.069 d^{-1} という一定の吸収速度 (10 d の半減期に相当する) を有する仮想的な物質から同一条件下で同じ期間にわたって吸収されるであろう量を上回るならば、タイプ F に割り当てられる。同様に、ある物質は、急性摂取後 180 d までに血液中に吸収される量が、0.001 d^{-1} という一定の血液中吸収速度 (およそ 700 d の半減期に相当する) を有する仮想的な物質から同一条件下で同じ期間にわたって吸収されるであろう量を下回るならば、タイプ S に割り当てられる。</p>
<p>(A53) それぞれの元素の粒子形態は、これらの規準を用いて HRTM の既定の吸収タイプに割り当てられた。しかし、物質をタイプ S に割り当てるための規準の厳密な適用は、継続期間が少なくとも 180 d の実験を必要とし、これは多くの有用な情報を排除すると思われるため、本文に示すように、場合によっては外挿が用いられている。これらの規準を適用することが可能だった研究については、結果はタイプ F (M または S) への割り当て「と整合する」(または「を与える」) という趣旨の言明が行われる。結果は特定のタイプを指し示しているが、これらの規準を適用するための情報が不十分だった研究については、結果はタイプ F (M または S) の挙動を「指摘する」または「示唆する」と</p>

<p>いう趣旨の言明が行われる。呼吸気道からの吸収に関する実験データがほとんどまたはまったく存在しない一部の元素については、化学的類推に基づいて物質を既定のタイプに割り当てることができるだろう。</p>
<p>(A54) それぞれの元素の可溶性 (タイプ F) 形態については、呼吸気道から血液中への吸収の全体速度が推定される (情報が利用可能である場合)。一般に、これは、(a) 沈着した物質の溶解 (飛沫として吸入されたのではないためすでに溶解している場合) ; (b) 特に誘導気道における、被覆液を通じた上皮への移行 ; そして (c) 上皮の全域にわたる移行、を含むプロセスの組み合わせの結果として得られるかもしれない。厳密には、モデル構造の点から、これらのうち最初の 2 つは「溶解」として記述され、急速溶解速度 s_r によって表現されるだろう。当該物質が粒子輸送の支配下にあるのに対して、上皮の全域にわたる移行は、極度に急速であるのでない限り、束縛割合によって表現されるべきだからである。実際には、全体速度のどのくらいの量がそれぞれのプロセスに割り当てられるべきなのかを評価するのは難しいことがよくあると思われ、単純化のために、吸収全体を表現するために s_r が用いられる。しかし、s_r は元素に特有であると仮定され、これは被覆液および上皮を通じた移行について予想されるだろう。元素の間では、およそ 1 d^{-1} (たとえば、イットリウム) から 100 d^{-1} (たとえば、セシウム) に及ぶ、s_r の値の幅広い変動が認められた。このアプローチの正当化の一部は、s_r の値は、肺動脈領域に沈着した物質よりも誘導気道 (そこでは被覆液が比較的厚い) に沈着した吸入物質の体内動態全体に対してより多くの影響を及ぼす傾向にあるという事実による。それは同様の規模の粒子輸送速度 (BB から ET₂ へが 10 d^{-1}、ET₂ から食道へが 100 d^{-1}) と競合するためである。s_r の推定値における元素間の幅広い変動ゆえに、元素固有の値は本報告書シリーズでは、この値の推定を行うことができるであろう元素について採用される。</p>
<p>(A55) しかし、一部の元素の可溶性形態の場合、溶解物質の一部は急速に血液中に吸収されるが、かなりの割合がよりゆっくりと吸収される。場合によっては、これは粒子状物質 (粒子輸送によるクリアランスの支配下にある) の形成によって表現することができる。しかし、それは肺の構成成分に付着し、血液中への吸収によってのみ除去されると思われる場合もある。後者のタイプの時間依存取り込みを描写するために、溶解物質のある割合 (f_b) は「束縛」状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合 ($1-f_b$) は瞬時に血液に入ると仮定される (図 A.5)。粒子状物質への変換による残留よりもむしろ束縛状態での残留の証拠は、1 つ以上の形をとるかもしれない (たとえば、保持された物質の糞中クリアランスよりもむしろ全身性取り込み ; 呼吸気道の同じ領域に沈着した不溶性粒子の場合よりもゆっくりとしたクリアランス ; もしくは放射能の焦点残留よりもむしろ拡散を示すオートラジオグラフィ)。</p>
<p>(A56) 束縛状態は主として、肺動脈領域からの可溶性物質のゆっくりとしたクリアランスを考慮に入れるためにこのモデルに包含されたが、同じ束縛状態パラメータ値はあらゆる領域においてあてはまるものが自動的に仮定される。場合によっては (たとえば、長寿命アルファ放出体の場合)、長期的な束縛状態、これははからずも、BB および bb 領域に対する高線量を導きうるだろう。これらの組織に与えられる大きな加重 (按分係数) ゆえに、これは次に、肺に対する高い等価線量計算値を導きうるだろう。したがって、本報告書シリーズでは、束縛状態</p>

が採用される元素 ($f_b > 0$) については、それを裏づけるための実験による証拠があるならば、それは誘導気道 (ET₂, BB および bb 領域) において適用されるに過ぎないと仮定される。

(A57) 呼吸気道からの吸収に関する実験データがほとんどまたはまったく存在しない一部の元素については、元素固有の吸収パラメータ値 (s_r , f_b および s_b) は化学的類推に基づくものとすることができるだろう。

A.3.2 吸収パラメータ既定値に対する修正

(A58) 上記に言及したように、実験データ (インビボ研究とインビトロ研究の両方による) から導き出された固有のパラメータ値は、「高速」、「中速」または「低速」の速度で除去されると一般にみなされる物質を代表する値の選択に関するガイダンスを提供するためのデータベースをもたらした。

(A59) およそ 100 セットのパラメータ値が利用可能だったときに (すなわち、第 2 部および第 3 部の元素についてレビューのほとんどが完了したときに)、これらの結果が照合され分析された。これは、いくつかの客観的な統計平均によってそこから中心値を導き出しうるであろう代表的な調査ではなかったことを強調しておく。むしろ、それは以下に述べるように、判断に情報を与える基礎をもたらすものだった。

(A60) 元素セクションの最新ドラフトの本文に示されているパラメータ値は、上記に示した *Publication 71* (ICRP, 1995c) の規準に従ってタイプ F, M および S に分類され、表にまとめられた。多少の選択が行われた。特に不確実であることが指摘されたいいくつかの値は除外された。ある物質 (または極めて類似する物質) について結果のセットが複数あった場合、それらは結合され、少数の化合物に重みを与えすぎること避けるために中心値が採用された。パラメータ値のセットによっては、データフィッティングにおける限界ゆえに、 s_r の値は固定され、 f_r および s_s の値のみが評価されたことに注意せよ。そのような場合、仮定された s_r の値は中心値の導出には包含されなかった。

(A61) 評価された f_r 値、 s_r 値および s_s 値の中央値、幾何平均および幾何標準偏差 (σ_g) を表 A.5 に示す。タイプ F の物質に対応する f_r 値の場合を除いて σ_g は極めて大きく (4~14)、これは推定値の幅が広いことを反映しており、したがって中心値における不確実性が大きいことを示している。

(A62) 表 A.6 に示す更新された既定値は主として以下の考察に基づくものだったが、中心値における大きな不確実性および単純な概数の必要性も考慮に入れたものである。

急速割合, f_r

(A63) タイプ F の場合、中央値 (0.95) は現行の既定値 1.0 に近い。導入における容易さのために、2 フェーズの溶解には変更しないのが望ましい。既定値は 1.0 のままとする。

(A64) タイプ M の場合、中央値は現行の既定値 (0.1) を上回る (0.20)。更新された既定値は 0.2 とみなす。

(A65) タイプ S の場合、中央値は現行の既定値 (0.001) を上回る (0.007)。更新された既定値は切り上げて 0.01 とする。

急速溶解速度, s_r

(A66) タイプ F の場合、物質に対応する実験データから推定される、割り当てられるであろう中央値は 12 d^1 であり (表 A.5)、これはもとの HRTM の既定値 100 d^1 を大きく下回る。しかし、この結果は少数の元素に対応する結果によって大きく影響されており、これらの結果のおよそ半分は 4 つの元素のみによるものである。既定値の選択においてより広い範囲の元素による情報を包含するために、適切な実験情報が利用可能だった場合に評価された、元素の可溶性 (タイプ F) 形態に対応する元素固有の s_r 値も考慮された (上記を参照)。物質固有のいかなる値も評価されなかったいくつかの元素については、元素固有の値が存在する。したがって、元素固有の値の分布は、それぞれの元素が同じく寄与する (含まれるのは 1 つ) 幅広い元素を包含しており、その中央値は 50 d^1 である。いずれの中央値も考慮に入れて、タイプ F に対応する更新された s_r 既定値は 30 d^1 とみなされる。

(A67) タイプ M および S の場合、物質に対応する s_r 推定値の割り当てられるであろう中央値はそれぞれ 1.7 d^1 および 2 d^1 であり (表 A.5)、これらはもとの HRTM の既定値 100 d^1 をはるかに下回る。タイプ F の場合のように、これらの分布は少数の元素に対応する結果によって大きく影響されている。タイプ F の場合、元素固有の s_r 値の考慮は幅広い元素を関係させ、物質固有の値よりも少々高い値の選択につながった。しかし、急速溶解速度 s_r は、タイプ F の物質の場合には吸収全体を表現するものであって、元素固有であると仮定されるが、タイプ M および S の物質の場合には粒子の基質の溶解によって決定されるため、それほど元素に特有のものではないだろう。したがって、タイプ M および S の物質については、元素固有の s_r 値は評価されなかった。これらの因子ならびに s_r 推定値における大きな変動全体を考慮に入れて、タイプ M および S に対応する更新された既定値は同じであり、切り上げて 3 d^1 とみなされた。本書では、タイプ M および S の物質に対応する 3 d^1 の s_r 既定値はあらゆる元素にあてはまると仮定される。ただし、タイプ F の元素固有値がそれ自体 3 d^1 を下回る場合はこの限りでなく、この場合は、タイプ F の元素固有値がタイプ M および S にも適用される。たとえば、硫黄の場合、3 つのタイプのどれについても既定値が用いられ；バリウムの場合、タイプ F に対応する元素固有の s_r 値は 20 d^1 であるが、タイプ M および S については 3 d^1 の既定値が用いられ；イットリウムの場合、タイプ F に対応する元素固有の s_r 値が 1 d^1 であるため、タイプ M および S についても 1 d^1 が用いられる。

<p>低速溶解速度, s_s</p> <p>(A68) タイプ M および S の場合、中央値は 0.003 d^{-1} および 0.00018 d^{-1} であり (表 A.5)、現行の既定値 0.005 d^{-1} および 0.0001 d^{-1} と同様である。既定値はそれぞれ、0.005 d^{-1} および 0.0001 d^{-1} のままとする。</p> <p>(A69) したがって、現在利用可能なデータは、もとの既定値よりも、タイプ M および S の物質については典型的な急速割合が大きいことを、しかしどの 3 つのタイプについても急速溶解速度は低いことを示唆している。これは、ET 気道においては急速吸収を低減し、肺においては急速吸収を増大する影響を及ぼす。</p>
--

<p>A.3.3 呼吸気道において形成される子孫核種</p> <p>(A70) 以下は特に、親核種の吸入摂取後に呼吸気道において形成される子孫核種にあてはまることに注意せよ。吸入摂取前に形成され親核種とともに吸入される子孫核種は一般に別個の摂取として扱われるため、子孫核種はそれぞれ、それがその同位体である元素にしかるべき体内動態を示すと仮定される。呼吸気道における子孫核種の挙動に関する多くの問題は自然崩壊系列と関連して生じるため、これらを図 A.6 (ウラン-238 系列)、図 A.7 (ウラン-235 系列) および図 A.8 (トリウム-232 系列) に示す。</p> <p>(A71) <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a, 272 項) は、以下のことが予想されるであろうと指摘した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ある粒子の解離がその粒子の基質によって決定される割合と、したがって吸入物質の溶解パラメータ値は、呼吸気道における粒子中に形成される子孫核種に適用されるだろう (「共通動態」)。 ラドンを含めた希ガスとして形成される子孫核種は例外だろう。それらは粒子から拡散すると思われるためである。 解離した物質の挙動はその元素の形態に依存するため、たとえば、子孫核種の場合の束縛割合のパラメータ値は、親核種の場合と同じではないだろう (「独立動態」)。 <p>(A72) 以下では次に、これらの点について考察する。しかし、HRTM の以前の適用においては [たとえば、<i>Publication 68, 71, 72</i> および <i>78</i> (ICRP, 1994b, 1995c, 1996, 1997b)], 希ガスを除いて、呼吸気道において形成される崩壊系列のあらゆる構成核種に親核種の吸収パラメータ値が適用された (「共通動態」) ことに注意すべきである。検討を経て (下記を参照)、本報告書シリーズでは同じアプローチが採用される。</p> <p>粒子の基質における残留</p>

<p>(A73) 一般に、タイプ M および S の物質の低速溶解割合に適用される仮定は、子孫核種の溶解はそれがその中で形成される粒子の基質の溶解によって決定されるというものである。したがって、その溶解パラメータ値は吸入物質と同じものとすべきである。</p> <p>ラドンの放射およびアルファ反跳</p> <p>(A74) HRTM の適用においては、子孫核種として形成される希ガスは一般に例外とされている (ICRP, 1994b)。ヨウ素の崩壊によって形成されるキセノンの放射性同位体は、<i>Publication 30 Part 1</i> (ICRP, 1979a) において仮定されているように、崩壊を伴わずに人体から漏出すると仮定された。これには、呼吸気道において形成されるキセノンが含まれていた。計算の目的のために、呼吸気道において子孫核種として形成されるラドンは 100 d^{-1} の一定速度で人体から漏出すると仮定されている (ICRP, 1994b)。この速度は、便宜的な任意の急速度として定められた。根底にある仮定は、ラドン (たとえば) の喪失は拡散のような連続プロセスであるというものである。自然崩壊系列における 3 つのラドン同位体—^{222}Rn (ラドン)、^{220}Rn (トロン) および ^{219}Rn (アクチノン)—はそれぞれ、半減期がおよそ 3.8 d、56 s および 4 s であるため、崩壊速度はおよそ 0.18 d^{-1}、1100 d^{-1} および $15,000 \text{ d}^{-1}$ である。したがって、100 d^{-1} の喪失速度という仮定は、^{222}Rn はほとんどすべて、崩壊する前に粒子から漏出し、^{220}Rn はおよそ 10% が漏出し、^{219}Rn はほとんどすべて、粒子中で崩壊することを含意する。ICRP (2016b) におけるトリウム吸入摂取セクションに述べられているように、トリウムの肺内容量を吐き出されたトロンと比較した研究は、肺における粒子中に形成されるトロンのおよそ 10% は漏出するという仮定とおおむね一致しているように思われるが、ウラン鉱石の粉塵からのラドン (^{222}Rn) 放射の測定は、100% はるかに下回る値を示している。</p> <p>(A75) Griffith et al. (1980) は、ThO_2 または UO_2 粒子の吸入摂取に続く、肺における ^{232}U およびその子孫核種 (^{228}Th を含む) の残留を記述するためのモデルを開発した。化学的な溶解に加えて、Griffith らは、拡散による粒子からの ^{220}Rn の放射ならびに、アルファ粒子の崩壊において形成される核の反跳の結果としての、^{220}Rn を含む子孫核種の放射を考慮した。Griffith らは、拡散による喪失割合および粒径の関数としての反跳 (しかし、球状粒子の場合のみ) を計算するための方程式を提示した。Griffith らは、子孫核種についておよそ $0.05 \mu\text{m}$ の反跳範囲 (10 g cm^{-3} の粒子密度を仮定して) ならびに、AMAD が $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲であるエアロゾルについて $0.3 \sim 0.1$ の範囲の、反跳放射による喪失割合を計算した。拡散放射による粒子からの ^{220}Rn 喪失の計算値は予測が困難であり、仮定された拡散係数 ($10^{-15} \sim 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) によって $0.03 \sim 0.7$ の範囲だった。</p> <p>(A76) Coombs and Cuddihy (1983) は、ThO_2 および ^{232}U を 1% 含有する酸化ウラン (UO_2 と U_3O_8 の混合物) のサイズ分画試料から、反跳によって漏出する ^{228}Th の割合および拡散によって漏出する ^{220}Rn の割合を測定した。漏出する ^{228}Th の割合は、AMAD が $2.5 \mu\text{m}$ (およそ $1 \mu\text{m}$ の CMD) である粒子におけるおよそ 0.07 から、AMAD が $0.65 \mu\text{m}$ (およそ $0.1 \mu\text{m}$ の CMD) である粒子においてはおよそ 0.3 へと増加した。</p>

これは、Griffith et al. (1980) のモデルと合理的に一致した。計算された反跳範囲は密度を乗じられた反跳範囲によって表され、およそ $20 \mu\text{g cm}^{-2}$ の値だった。拡散によって漏出する ^{220}Rn の割合は、AMAD が $2.5 \mu\text{m}$ である粒子におけるおよそ 0.07 から、AMAD が $0.65 \mu\text{m}$ である粒子においてはおよそ 0.35 へと増加した (また、およそ $3 \times 10^{-14} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ の拡散係数を示した)。これは反跳によって漏出する ^{228}Th の割合と同様だったため、反跳によって漏出する ^{220}Rn の割合とおそらく同様だった。 ^{220}Rn および ^{228}Th の反跳範囲は同様だからである (Griffith et al, 1980)。

¹ 測定される (たとえば、顕微鏡検査によって) 試料中の粒子の 50% (数による) は、CMD を上回る直径を有する。幾何標準偏差が σ_g である対数正規分布の場合、質量中央径 (MMD) は以下のように CMD から計算することができる [たとえば、Baron and Willeke (2001) を参照]。

$$\text{MMD} = \text{CMD} + 3 \exp(\ln \sigma_g)^2$$

エアロゾル中の物質の質量の 50% は、直径が MMD を上回る粒子と関連する。物質の比放射能が均一である場合、MMD は放射能中央径 (AMD) に等しいことになる。エアロゾル中の放射能の 50% は、直径が AMD を上回る粒子と関連する。粒子の直径 (d_p) と粒子の空気力学的直径 (d_{ae}) の関係、したがって AMD および CMD と粒子から形成されるエアロゾルの AMAD の関係は、粒子の密度および形状ならびに、これらの直径が測定された方法に左右される。たとえば、Publication 66 (ICRP, 1994a, D.4.1 節) や支援ガイダンス 3 (Supporting Guidance 3) (ICRP, 2002b, B.1.2 節) を参照。しかし、およそ $0.1 \mu\text{m}$ より大きい緻密な形状の粒子の場合、 $d_{ae} \approx d_p \sqrt{\rho}$ であり、ここで ρ は粒子密度である。

(A77) Johnson and Peterman (1984) は、アルファ粒子の反跳による ThO_2 からの ^{220}Rn の放射ならびに肺からのその吐き出しを記述するためのモデルを開発した。Johnson および Peterman は、生成された ^{220}Rn 原子のうち反跳によって粒子 (密度 10g cm^{-3}) から漏出する割合は、直径 1nm でのおよそ 1.0 から直径 10nm ではおよそ 0.5、直径 $0.5 \mu\text{m}$ ではおよそ 0.1 へと減少すると計算した。AMAD が $1 \mu\text{m}$ であるエアロゾルにおける平均割合は 0.2 と計算されており、これは Griffith et al. (1980) によって導き出された結果とおおむね一致しているように思われる。

(A78) したがって、反跳は、少なくとも粒子からのラドンの放射の点で拡散と同程度に重要なメカニズムであるように思われる。これは、その場合に AMAD がおよそ $1 \mu\text{m}$ であるエアロゾルにおいては、肺における粒子中に形成される ^{222}Rn 、 ^{220}Rn または ^{219}Rn のおよそ 10% の、肺の空気への放出が生じるであろう支配的なメカニズムでありうると思われる。さらに、アルファ粒子の反跳は、子孫核種として形成されるラドンだけでなく、アルファ放出によって形成される他の子孫核種にもあてはまる。崩壊系列の場合、これは、その系列の構成核種の放射能が比較的不溶性の粒子中に保持される親核種と比べて継続的に低いことに帰着するだろう。これを確認する何らかの実験的証拠は存在する [ICRP (2016b) におけるトリウム吸入摂取セクションを参照]。しかし、本報告書シリーズでは、線量係数およびバイオアッセイ関数の計算においてアルファ反跳による子孫核種の喪失を導入するのは実際的ではないとみなされた。代表的な作業場のエアロゾルに対応する喪失割合の評価は複雑だろう。それはアルファ崩壊エネルギー、沈着した粒子の粒径分布、そしてそれらの粒子の形状および密度に左右されるためである。

あり、実際の導入には仮定を単純化することが必要とされるだろう。比較的不溶性の粒子中の吸入された ^{232}U および吸入摂取後のその子孫核種に対応する線量に対する反跳の影響について本シリーズに際して実施された調査 (タスクグループによる) は、予想どおり、呼吸気道に対する線量は低下し、全身性取り込みに起因する組織に対する線量は増大することを認めた。しかし、この例においては、実効線量に対する影響はほとんどなかった。アルファ崩壊によって形成される放射性核種を特定する際に、また、粒子中に残る割合と肺液へと漏出する割合の間で子孫原子を分配する際に必要とされる計算上の労力はかなりのものであると思われ、これらの報告書において当然に得られる利益とは釣り合わないと思われた。それでもなお、この現象は、特に親核種の摂取量および線量を検討するために子孫核種を用いる場合には留意されるべきである。

(A79) 計算の目的のために、呼吸気道において子孫核種として形成されるラドンは 100d^{-1} の速度で人体から漏出するという仮定が本報告書シリーズでは維持され、あらゆる希ガスに適用される。しかし、HRTM の以前の導入においては (ICRP, 1994b)、呼吸気道において子孫核種として形成されるラドンは、他の除去経路に加えて、 100d^{-1} の速度で人体から漏出すると仮定された (ICRP, 1994b)。本報告書シリーズにおいては、放射性崩壊によって呼吸気道 (および消化管) のコンパートメントにおいて生成される希ガスは、血液コンパートメントへの移行および呼吸気道と消化管のコンパートメント間の移行を伴わずに、これらのコンパートメントから直接環境へと、 100d^{-1} の速度で漏出すると仮定される。したがって、この 100d^{-1} の速度は他の除去経路に付加されるのではない。

可溶性 (解離した) 物質

(A80) 呼吸気道において形成される子孫核種の可溶性物質または溶解物質の挙動 (特に血液中への取り込み速度) は、形成される子孫核種がその同位体である元素に依存すると予想することができる。上記に論じたように、可溶性 (タイプ F) 物質の場合、急速溶解速度 s_r は呼吸気道から血液中への吸収全体を表し、多くの元素において元素固有である。したがって、タイプ F の物質が呼吸気道に沈着する場合、形成される子孫核種に対応する s_r の値は、親核種の s_r 値に従う (「共通動態」) よりむしろ、形成される元素の s_r 値である (「独立動態」) と予想されるだろう。同様に、呼吸気道において形成される子孫核種には元素固有の束縛状態パラメータ値があてはまると予想されるだろう。しかし、タスクグループによって実施された分析は、タイプ F の放射性核種の子孫核種に対して、呼吸気道内での共通動態よりもむしろ独立動態を適用しても、呼吸気道の組織線量係数に違いはほとんど生じない (最大で倍率 2 であるが、ほとんどの場合これをはるかに下回る)、実効線量係数の違いはもっと小さくなることを示した。タイプ F の物質の場合、血液中への吸収は急速であり、全身性組織における沈着による線量はしばしば、呼吸気道の組織に対する線量よりも実効線量に対する寄与が大きいことになる。したがって、独立動態の適用に伴う複雑さの追加は正当化されないとみなされた。さらに、多くの実際の被ばく状況においては、親核種の摂取はしばしば、その子孫核種の同時摂取を伴うこ

となる。それらの放射能（別個の摂取として扱われるこれには、その元素にしかるべき吸収動態が与えられることになる）は、呼吸気道内で形成される子孫核種の放射能よりもかなり大きいことがよくあるだろう。（その半減期が短いのでない限り）タイプ F の物質が血液中に吸収される前に親核種の崩壊はほとんど起こらないためである。

(A81) したがって、本報告書シリーズにおいては、呼吸気道内で形成される放射性子孫核種は（希ガスを除いて）親核種の吸収挙動に従うと自動的に仮定され、親核種と同じ溶解および取り込みパラメータ値を与えられる（共通動態）。血液中への吸収後、それらは、親核種の娘核種としての元素に適用される全身性モデルに従って挙動すると仮定される。

(A82) にもかかわらず、親核種の吸収挙動とその放射性子孫核種の吸収挙動の直接比較を可能にする実験結果が利用可能ならば、それらは親元素（たとえば、ウラン、トリウム）の吸入摂取セクションに要約される。そのような情報は、親核種の摂取量が 1 つ以上のその子孫核種に関する測定によって評価されている場合は特に、個人モニタリングを行う人にとって有用かもしれない。トリウムとその子孫核種の挙動は、これに関連して特に重要でありうる。一般に、トリウムは可溶性形態での沈着後、かなり長期にわたって肺に残留するのに対して、重要な子孫核種、特にラジウムおよび鉛の可溶性形態は比較的容易に吸収されるためである。

A.3.4 放射性ナノ粒子

(A83) 近年、ナノ粒子（物理的直径が 100 nm を下回る粒子、「超微粒子」としても知られる）、それらの応用、そしてそれらの毒物学に対する関心が非常に高まっている。NCRP は最近、知識の現状およびナノテクノロジーと関連する放射線安全プログラムに係るガイダンスに関する報告書を作成するために、NCRP 科学委員会 2~6 を設置した (Hoover et al., 2015)。しかし、このサイズ範囲の放射性粒子の放射線量算定は何年にもわたって考慮されてきた。

(A84) 呼吸気道におけるナノ粒子の沈着は、吸入されたラドン子孫核種の線量算定におけるその重要性ゆえに、特に関心を持たれている。ラドンガスの崩壊後、新たに形成された放射性核種は微量ガスおよび蒸気と急速に (<1 s) 反応し、「非付着」割合として記述される、サイズがおおよそ 1 nm の粒子を形成する。それらの放射性核種はまた、空気中の既存のエアロゾル粒子に付着して (1~100 s 以内)、「付着」割合を形成することもあり、その一部は < 100 nm である [詳細は、OIR: Part 3 (ICRP, 2016b) におけるラドンの吸入摂取セクションを参照]。したがって、HRTM における沈着モデル [3 章および ICRP (1994a) を参照] は、0.6 nm 以上のサイズ範囲を包含する。

(A85) 呼吸気道からのナノ粒子のクリアランスに関しては、一般的な放射線防護の目的では、粒子輸送メカニズム（たとえば、粘膜繊毛運動やマクロファージ遊走）は物質または粒径とは無関係であると仮定され、粒子はこれらのメカニズムのトレーサとしての機能を果たす。し

かし、*Publication 66* (ICRP, 1994a) の付属書 E では、一部のナノ粒子は既定のモデルとは異なる挙動を示す場合があることが認識されている。

(A86) *Publication 66* (ICRP, 1994a) の付属書 E における E.3.3.2 項は「物質に対する粒子輸送の独立性」の仮定を扱っており、同項には粒径の考慮が含まれている。同項は、サイズがおおよそ 20~30 nm の範囲にある粒子は、クリアランスモデルの基礎とされているより大きな粒子よりもゆっくり除去されるということの証拠を報告している。すなわち、「Ferin et al. (1990, 1991) は、酸化チタンと酸化アルミニウムの両方を用いて、直径が 0.2 μm ~0.5 μm である粒子の場合よりも 0.02 μm ~0.03 μm である粒子の場合の方がラットにおける肺残留が大きいことを認め、これは間質への超微粒子の浸透の方が大きいことによるかもしれないと示唆した」。数十ナノメートルの範囲にある粒子の肺胞クリアランスの方がゆっくりであることは、さまざまな理由から、しかし主として過度の複雑さを避けるために、HRTM のクリアランスモデルに含まれてはいない。このサイズ範囲にある比較的不溶性の粒子は概して、放射線防護の点でそれほど重要ではなく、ほとんどの状況においては、放射能の大部分はより大きな粒子と関連する。さらに、これらの研究結果は、肺胞クリアランスがヒトよりも大幅に速いラットにおけるものだった。ヒトの場合、肺胞に沈着した粒子のうち、ラットの場合よりもはるかに大きな割合が間質へと向かうと思われるため、ヒトの場合の影響を予測するのは難しいだろう。

(A87) *Publication 66* (ICRP, 1994a) の付属書 E (E.2.2 節) は、数ナノメートルよりも小さい粒子は容易に血液中へと輸送されるということの証拠を報告している（吸入されたプルトニウム-ナトリウムエアロゾルの体内動態に関する研究は、プルトニウムの血液中への移行が顕著に大きいことを示しており、これは酸化プルトニウムナノ粒子の形成に帰せられた）。ICRP (1994a) は、「ここで用いられる吸収という用語には粒子状物質の血液へのいかなる輸送も含まれるとはいえ、これは数ナノメートルよりも小さい粒子の場合にのみ重要であると思われる。Smith et al. (1977) および Stradling et al. (1978a,b) は、1 nm の $^{239}\text{PuO}_2$ または $^{238}\text{PuO}_2$ 粒子はラットにおいて肺から血液へと容易に移動するが、25 nm よりも大きい粒子の移動はごくわずかであると認めた。これは、肺毛細血管における細胞間隙は 4 nm を超えないという観察結果と一致している (Lauweryns and Baert, 1977)」と述べた。Kanapilly and Diel (1980) は、ラットによって吸入された直径が 9 nm である $^{239}\text{PuO}_2$ 粒子について、同様の極めて急速な取り込みを認めなかった。この現象は、物質固有の吸収パラメータ値を用いて HRTM の枠内で扱うことができる。しかし、血液中へと移行するプルトニウムは、通常のプルトニウムの全身性モデルに従わない場合がある。

付属書 B ICRP の全身性体内動態モデルの発展

B.1 近年の ICRP 報告書における全身性モデルの立案

(B1) *Publication 30* (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) は、職業上の環境において一般に遭遇する放射性核種に対応する包括的な一連の

全身性体内動態モデルを提示した。これらのモデルは概して、一方向流を有する一次コンパートメントモデルとして解釈してもよい残留関数（たとえば、指数項の和）の形をとるものだった。これらのモデルは主として、体内の主たる貯蔵場所におけるそれぞれの放射性核種の累積放射能を推定するために設計された。これらのモデルは、体内の放射性核種の現実的な移動経路を描写するのではなく、血液中への取り込み後の元素の初期分布および線源臓器における元素の正味の生物学的半減期を記述するに過ぎなかった。胃腸管または呼吸気道からもしくは創傷を通じて吸収される放射能は、一般的には 0.25 d 以上の特定の半減期で放射能がそこから線源臓器へと移行する通過コンパートメントに入ると仮定される。線源臓器における残留は通常、線源領域内の複数の仮想コンパートメントにおける残留を表す複数の生物学的半減期とともに、1~3 つの一次残留成分によって記述される。組織から血液中への放射能の帰還は、ヨウ素に対応するモデルを除いて、*Publication 30* の中で明示的に扱われてはいない (ICRP, 1979a)。一般に、ある臓器から離れる放射能は集合的な排泄コンパートメントへと直接移動すると仮定される（すなわち、実際の排泄経路に沿った放射性崩壊は評価されない）。骨に沈着する比較的短寿命の放射性核種（半減期が 15 d までの）は概して骨表面に割り当てられ、寿命がより長い放射性核種は、利用可能なデータによって示された、骨におけるそれらの主たる残留部位によって、骨表面または骨体積のいずれかに割り当てられる。

(B2) *Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) の全身性体内動態モデルは主として、適宜的な線量評価よりもむしろ、計画の目的のための単位摂取量あたりの線量係数の計算が意図されたものだった。一部の元素については、これらの全身性体内動態モデルは、ICRP の並列的なバイオアッセイモデルとは別個に開発された。たとえば、*Publication 54* (ICRP, 1988a) の中で勧告されたプルトニウム、アメリカシウムおよびキュリウムに対応する尿中および糞中排泄モデルは、図 B.1 に示す、これらの元素に対応する並列的な全身性体内動態モデルとは無関係に導き出された。

(B3) 放射性核種の摂取による公衆の構成員に対する線量に関する ICRP 報告書シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) は、次の 31 元素の選ばれた放射性同位体に対応する年齢固有の全身性体内動態モデルを提示している：水素、炭素、硫黄、カルシウム、鉄、コバルト、ニッケル、亜鉛、セレン、ストロンチウム、ジルコニウム、ニオブ、モリブデン、テクネチウム、ルテニウム、銀、アンチモン、テルル、ヨウ素、セシウム、バリウム、セリウム、鉛、ポロニウム、ラジウム、トリウム、ウラン、ネプツニウム、プルトニウム、アメリカシウムおよびキュリウム。ここでは、このシリーズを締めくくった要約報告書 (ICRP, 1996) にちなんで、これらの報告書を「*Publication 72* シリーズ」と呼ぶ。*Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) における全身性体内動態モデルのほとんどは、*Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) において適用された、図 B.1 に例示したものと同一モデリングスキームに従っている。ただし、*Publication 60* (ICRP, 1991) の発行後に完成した報告書には、明示的な排泄経路が含まれている。これらの経路は膀胱および結腸に対する線量の評価を可能にするために含まれており、そのいずれにも *Publication 60* (ICRP, 1991) における組織加重係数が割り当てられている。*Publication 72* シリーズ (ICRP,

1989, 1993b, 1995b,c, 1996) においては、鉄および次の「骨親和性」元素には、全身性放射性核種のいっそう現実的な移動経路を含む別のモデリングスキームが適用されている：カルシウム、ストロンチウム、バリウム、鉛、ラジウム、トリウム、ウラン、ネプツニウム、プルトニウム、アメリカシウムおよびキュリウム。これらの元素に対応するモデル構造ならびに、*Publication 30* から受け継がれたヨウ素に対応する構造は、臓器から血液中への物質の帰還を、また実行可能ならば、放射性核種の体内動態を決定する生理学的プロセスを描写する。そのような生理学的プロセスの例には、骨表面からのプルトニウムまたはアメリカシウムの除去に帰着する骨のリモデリングや、血液から鉄の蓄積部位への鉄の移行に帰着する、細網内皮細胞による老化赤血球の貪食がある。

(B4) *Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において適用された、アクチノイド元素のトリウム、ネプツニウム、プルトニウム、アメリカシウムおよびキュリウムについて用いられる汎用モデル構造を示す生理学ベースのモデリングスキームを図 B.2 に例示する。全身性の組織および体液は 5 つの主たる構成要素に分割される。すなわち、血液、骨格、肝臓、腎臓およびその他の軟組織である。血液は、均一に混合されたプールとして扱われる。他の主たる構成要素のそれぞれはさらに、これら 5 つの元素すなわち、より一般的に言えば「骨表面親和性」元素に関する利用可能な体内動態データをモデル化するために必要とされる最小限の数のコンパートメントに分割される。肝臓は、短期および長期残留を表すコンパートメントに分割される。肝臓に入る放射能は、そこから、放射能が再び血液中へと移行する場合もあれば、胆汁分泌によって腸へと移行する場合もあれば、そこから放射能が血液へとゆっくり戻る長期コンパートメントへと移行する場合もある、短期コンパートメント（肝臓 1）に割り当てられる。腎臓は 2 つのコンパートメントに分割される。すなわち、数時間または数日の期間で放射能を尿へと失わせるコンパートメント（尿中経路）と、もう 1 つは放射能を血液中へとゆっくり戻すコンパートメント（その他の腎臓組織）である。骨髄以外の残りの軟組織は、血液中への放射能の帰還がそれぞれ急速、中速および低速であることを表すコンパートメント ST0, ST1 および ST2 に分割される。ST0 は、血液中への放射能の急性入力後の軟組織における放射能の急速な蓄積および血液中への急速な帰還を考慮に入れるために用いられ、血液中を循環する放射能の一部とみなされる。骨格は皮質部分と梁状部分に分割され、これらの部分はそれぞれ、骨表面、骨体積および骨髄に細分される。骨格に入る放射能は、骨のリモデリングプロセスによって放射能がそこから徐々に骨髄および骨体積へと移行する骨表面に割り当てられる。放射能は、数カ月の期間で骨髄から血液中へと失われ、その後、血液中への当初入力と同じパターンで再分配される。皮質骨および骨梁のコンパートメントからのどの先行への移行速度も、それぞれ年に 3% および 18% と仮定される皮質骨および骨梁の代謝回転速度の関数である。

(B5) *Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) においては、カルシウム、ストロンチウム、バリウム、ラジウム、鉛およびウランには、図 B.2 に示されているモデル構造のバリエーションが適用された (図 B.3)。これらの元素は、骨における沈着後、数時間または数日以内に骨体積全体にわたって拡散するため、上記で扱った骨表面親和性元素とは異なる挙動を示す。これらの元素は、骨体積に到

達すると、血漿へと再び移行する場合もあれば（モデルにおける骨表面を經由して）、骨体積中に固定され、その後徐々に骨のリモデリングの速度で血液へと移行する場合もある。図 B.2 において骨髄および生殖腺を表すコンパートメントは、骨体積親和性元素に対応するモデルからは削除される。それらのコンパートメントは概して、これらの元素の蓄積が増大する部位ではないためである。図 B.3 に示されているコンパートメントのいくつかは、すべての骨体積親和性元素に適用できるわけではない。たとえば、肝臓、腎臓および赤血球は、カルシウムおよびストロンチウムの重要な蓄積部位ではないが、鉛の場合には重要な貯蔵場所である。図 B.3 に示されている特定のコンパートメントまたは経路が所定の元素の場合には重要ではないならば、それは当該元素についてはモデルの中で別個には考慮されない。たとえば、カルシウムに対応するモデルにおいては、血液は単一の十分に混合されたプールとして扱われ、肝臓および腎臓は「その他の軟組織」の一部であると仮定される。

(B6) *Publication 72* シリーズの第 2~4 部 (ICRP, 1993, 1995b,c) において用いられている全身性モデルは、*Publication 60* (ICRP, 1991) における勧告に基づいた放射線核種の職業上の摂取に対応する線量係数を更新するために、ICRP の HRTM (ICRP, 1994a) とともに *Publication 68* (ICRP, 1994b) の中で適用された。*Publication 72* シリーズの第 2~4 部 (ICRP, 1993, 1995b,c) で扱われていない元素については、*Publication 68* (ICRP, 1994b) の中で適用された全身性体内動態モデルは *Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) から採用され、膀胱および結腸に対する線量を扱うために特定の排泄経路を包含するように修正された。

(B7) *Publication 68* (ICRP, 1994b) において適用された体内動態モデルは、15 元素の選ばれた放射性同位体に対応する作業者の場合のバイオアッセイデータの解釈に関する勧告を更新するために、*Publication 78* (ICRP, 1997b) の中で用いられた。*Publication 78* (ICRP, 1997b) の中で扱われている 15 元素のうち 9 元素に対応する全身性モデルは、*Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において採用された生理学ベースのモデルだった。

B.2 本報告書シリーズにおいて用いられる全身性モデル構造

(B8) *Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において選ばれた元素について導入された生理学的に描写するモデル構造には、放射線防護において従来用いられた残留関数モデルと比べていくつかの潜在的な利点があると、今や広く認識されている。たとえば、生理学的に描写するモデル構造は、

- モデルパラメータ値の策定における放射線生物学的データの補完として、生理学的情報および生理学的に合理的な仮定の利用を容易にする。
- 集団のさまざまな下位グループおよび観察期間の範囲を超える時間に対して放射線生物学的データベースの範囲を超えて外挿する基礎を

もたらず（たとえば、骨のリモデリング速度に依存することがわかっているパラメータ値は、骨のリモデリング速度に関する年齢固有のデータに基づいて、年齢に応じて変化させることができる）。

- 実験動物に由来する体内動態データのヒトに対する外挿を容易にする。これは、たとえ全身の外挿はそうではないとしても外挿が有効かもしれない、身体の特定の生理学的プロセスおよび特定のサブシステムに種間比較を集中させるのを助けるためである。
- ある元素に由来する体内動態データの、その化学的類似体に対する外挿を容易にする。化学的類似体の生理学的類似性の度合いは、ある生理学的プロセスと別の生理学的プロセスの間で異なるかもしれないためである（たとえば、アルカリ土類金属は、血液から骨へは同様の移行速度を示すが、骨における非交換性部位へは極めて異なる移行速度を示す）。
- 排泄を人体組織と体液の間の放射能の交換と関連づけるため、線量計算およびバイオアッセイ解釈のために同じモデルを用いることができる。
- 親核種および体内で生成されるそれらの放射性子孫核種の差異的な体内動態のモデリングを可能にする。
- 胚および胎児に対する線量に関する ICRP 刊行物 (ICRP, 2001) および母親による放射性核種の摂取に起因する乳児に対する線量に関する ICRP 刊行物 (ICRP, 2004) の中で実証されたように、モデルを新たな適用へと拡大する目的のためにコンパートメントおよび経路をモデルに追加することを可能にする。

(B9) 他方、本報告書で勧告しているモデルを含めて、放射線防護において現在用いられている全身性体内動態モデルにおける生理学的現実主義のレベルは、誇張されるべきではない。最も精巧なモデルでさえ、パラメータ値を決定するために利用可能な情報の量と質に関して、生物学的現実主義と実際の考慮事項の間の妥協を意味する。たとえば、*Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において骨親和性放射性核種に適用されているどの再循環モデルにも、モデルの中で明示的に特定されていないあらゆる軟組織について、血液と的高速、中速および低速交換を表す軟組織コンパートメントが含まれている。これらの軟組織コンパートメントは概して、生理学ベースよりもむしろ動態ベースで定義されている（すなわち、コンパートメントのサイズおよび代謝回転速度は、軟組織による元素の蓄積および喪失に関するデータとの合理的な整合性のために定められている）。元素によっては、これらの軟組織コンパートメントは特定の部位またはプロセスと関連するように思われるが、これらの関連は一般に、利用可能な情報によって確認されるものではない。たとえば、カルシウムの体内動態研究は、軟組織における急速代謝回転プールは、間質液に多少の急速交換性細胞内カルシウムを加えたものにほぼ相当するかもしれず (Heaney, 1964; Harrison et al., 1967; Hart and Spencer, 1976)；中速代謝回転速度は、ミトコンドリアカルシウム、軟骨カルシウムおよび交換性の異栄養カルシウム（たとえば、動脈プラークや石灰化節）を含む、交換速度がより遅い複数のプールの複合に由来するかもしれず (Heaney, 1964; Borle, 1981)；軟組織における長期残留は、人体内に徐々に蓄積する比較的非交換性の異栄養カルシウムと関連するかもしれない (Heaney,

1964) ことを示唆しているが、立証はしていない。

(B10) 多くの元素の場合、これらの元素の全身性挙動を決定するプロセスに関する情報の不十分ゆえに、真の生理学的システムモデルを開発することは実行可能ではない。たとえ比較的十分に理解されている元素の場合でも、モデルの構成要素は、多プロセスの正味の結果を表すことが意図されたものであるに過ぎないことがよくある。たとえば、図 B.2 に示されている骨表面親和性放射性核種に対応するモデルおよびその前身 (Leggett, 1985, 1992) において、骨体積における放射能の埋蔵の描写は、異なる速度で起こるいくつかの既知のまたは疑われる埋蔵プロセスの時間に伴う正味の結果を近似することが意図されている。形成期または再吸収と形成の間の過渡期のいずれかにおいて骨のリモデリング単位に沈着する放射能は、比較的急速に埋蔵されるかもしれない。表面放射能の遅延埋蔵は、骨の再構築プロセスの間の「局所再循環」の結果として生じるかもしれない (すなわち、骨のモデリングの間に破骨細胞によって除去される表面放射能の一部は、同じ血管によって供給される新骨形成の近接部位においてほとんど即時に再沈着するかもしれない)。無機イオンのそのような局所再沈着は、特に皮質骨において起こると考えられる (Parfitt and Kleerekoper, 1980)。表面沈着物の埋蔵は、いかなる事前の再吸収プロセスを伴うこともなく新骨が以前に形成された骨の上に沈着する現象である「骨ドリフト」の結果として起こる場合もある。骨ドリフトは成熟骨よりも未成熟骨の場合により大きな規模で起こるが、骨内のドリフトならびに骨膜-骨内膜ドリフトによる骨体積の拡大は、ヒトにおいては一生を通じて持続する (Epker and Frost, 1965a,b ; Frost, 1986 ; Priest et al., 1992)。「骨単位のドリフト」は、あらゆる年齢においてヒトの皮質骨内で観察され、それらの内含量は法科学鑑定において死亡年齢推定のために用いられる。

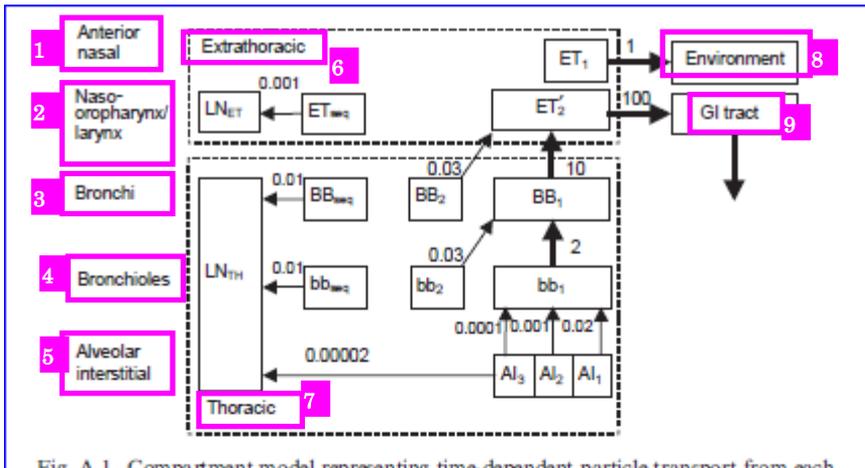


Fig. A.1. Compartment model representing time-dependent particle transport from each respiratory tract region in the original Human Respiratory Tract Model.

Rates shown alongside arrows are reference values in units of d^{-1} . It was assumed that: (1) the alveolar-interstitial (AI) deposit is divided into AI_1 , AI_2 , and AI_3 in the ratio 0.3:0.6:0.1; (2) the fraction of the deposit in the bronchi (BB) and bronchioles (bb) that is cleared slowly (BB_2 and bb_2) is 50% for particles of physical size $<2.5 \mu m$ and decreases with diameter $>2.5 \mu m$, and the fraction retained in the airway wall (BB_{seq} and bb_{seq}) is 0.7% at all sizes; and (3) 0.05% of material deposited in the ET_2 region is retained in its wall (ET_{seq}) and the rest in compartment ET'_2 which clears rapidly to the gastrointestinal (GI) tract.

AI_1 : relatively short-term retention (half-time, $t_{1/2}$ about 35 d) of a fraction, taken to be 0.3, of the deposit in the AI region; AI_2 : long-term retention ($t_{1/2}$ about 700 d) of a fraction, taken to be 0.6, of the deposit in the AI region; AI_3 : very long-term retention ($t_{1/2}$ about 6000 d) of a fraction, taken to be 0.1, of the deposit in the AI region; BB_1 : short-term retention ($t_{1/2}$ about 100 min) of particles in the BB region: the particles are removed by rapid mucociliary clearance; bb_1 : short-term retention ($t_{1/2}$ about 8 h) of particles in the bb region: the particles are removed by rapid mucociliary clearance; BB_2 : intermediate retention ($t_{1/2}$ about 20 d) of particles in the BB region; bb_2 : intermediate retention ($t_{1/2}$ about 20 d) of particles in the bb region; BB_{seq} : long-term retention ($t_{1/2}$ about 70 d) in airway walls of a small fraction of the particles deposited in the BB region; bb_{seq} : long-term retention ($t_{1/2}$ about 70 d) in airway walls of a small fraction of the particles deposited in the bb region; ET_1 : retention of material deposited in the anterior nose (region ET_1 , which is not subdivided); ET'_2 : short-term retention ($t_{1/2}$ about 10 min) of the material deposited in the posterior nasal passage, larynx, pharynx and mouth (region ET_2), except for the small fraction, taken to be 0.0005, retained in ET_{seq} . (In *Publication 66*, this compartment was labelled ET_2 . It is here, as in *Publication 71*, labelled ET'_2 to distinguish it from the region ET_2 which also includes compartment ET_{seq}); ET_{seq} : long-term retention ($t_{1/2}$ about 700d) in airway tissue of a small fraction of particles deposited in the nasal passages; LN_{ET} : lymphatics and lymph nodes that drain the extrathoracic region; LN_{TH} : lymphatics and lymph nodes that drain the thoracic regions. Taken from ICRP (1994a).

- 1 前部鼻道
- 2 鼻口咽頭／喉頭
- 3 気管支
- 4 細気管支

- 5 肺胞－間質
- 6 胸郭外領域
- 7 胸郭内領域
- 8 環境
- 9 胃腸管

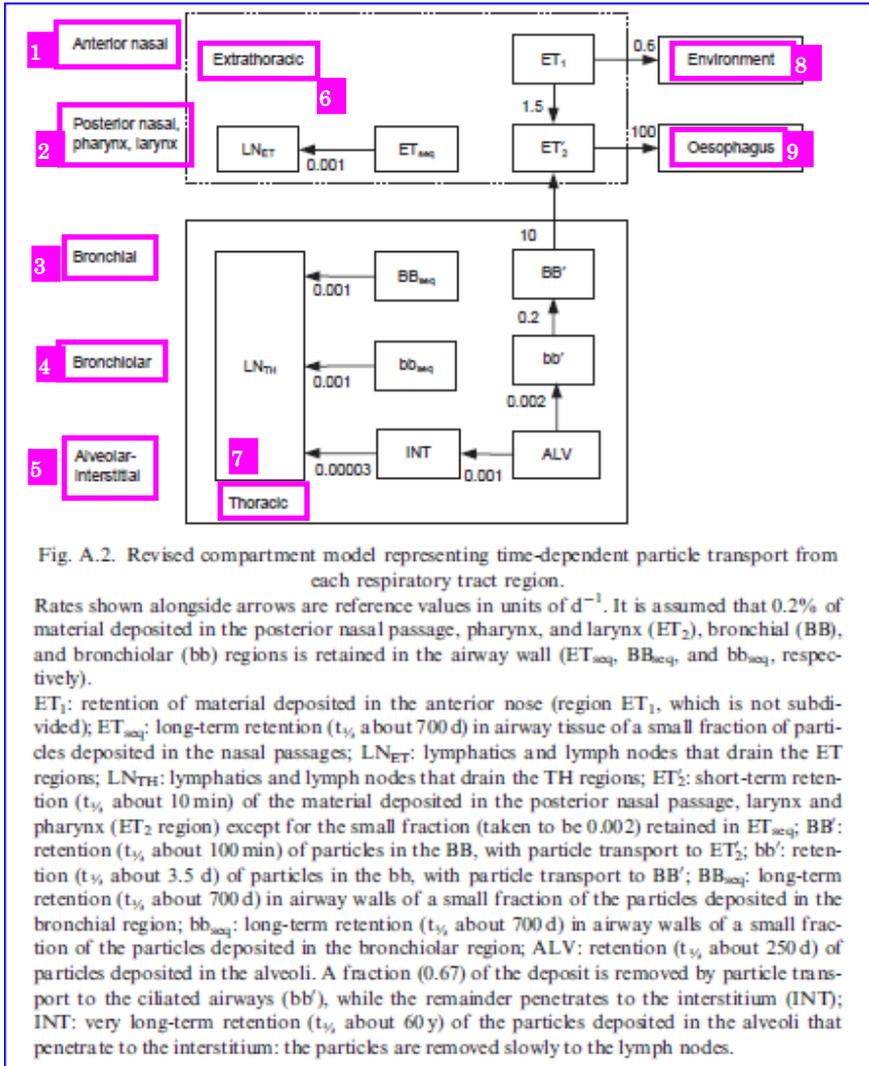
図 A.1. もとのヒト呼吸気道モデルにおける、それぞれの呼吸気道領域からの時間依存粒子輸送を描写するコンパートメントモデル

矢印の横に示されている速度は、 d^{-1} を単位とする基準値である。次のように仮定された：(1) 肺胞－間質 (AI) 沈着は、 $0.3 : 0.6 : 0.1$ の比率で AI_1 , AI_2 および AI_3 に分割される；(2) ゆっくり除去される気管支 (BB) および細気管支 (bb) における沈着物の割合 (BB_2 および bb_2) は、粒子の物理的直径が $<2.5 \mu\text{m}$ の場合は 50% であり、 $>2.5 \mu\text{m}$ の場合は直径とともに減少する。また、気道壁において保持される割合 (BB_{seq} および bb_{seq}) は、粒径にかかわらず 0.7% である；および、(3) ET_2 領域に沈着した物質の 0.05% はその壁において保持され (ET_{seq})、残りは胃腸 (GI) 管へと急速に除去されるコンパートメント ET_2 において保持される。

AI_1 ：AI 領域における沈着物のうち 0.3 とみなされる割合の比較的短期の残留 (半減期約 35 d)； AI_2 ：AI 領域における沈着物のうち 0.6 とみなされる割合の長期残留 (半減期約 700 d)； AI_3 ：AI 領域における沈着物のうち 0.1 とみなされる割合の超長期残留 (半減期約 6000 d)； BB_1 ：BB 領域における粒子の短期残留 (半減期約 100 分)：これらの粒子は急速な粘膜纖毛クリアランスによって除去される； bb_1 ：bb 領域における粒子の短期残留 (半減期約 8 h)：これらの粒子は急速な粘膜纖毛クリアランスによって除去される； BB_2 ：BB 領域における粒子の中期残留 (半減期約 20 d)； bb_2 ：bb 領域における粒子の中期残留 (半減期約 20 d)；BB 領域に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留 (半減期約 70 d)； bb_{seq} ：bb 領域に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留 (半減期約 70 d)； ET_1 ：前部鼻道 (細分されない領域 ET_1) に沈着した物質の残留； ET_2 ： ET_{seq} に保持される、0.0005 とみなされる微小割合を除いた、後部鼻道、咽頭、喉頭および口腔 (領域 ET_2) に沈着した物質の短期残留 (半減期約 10 分) (*Publication 66* では、このコンパートメントは ET_2 と名づけられた。これは本書では、*Publication 71* と同様に、コンパートメント ET_{seq} も包含する領域 ET_2 と区別するために、 ET_2 と名づけられる)； ET_{seq} ：鼻道に沈着した粒子の微小割合の、気道組織における長期残留 (半減期約 700 d)； LN_{ET} ：胸郭外領域を排出するリンパ

ICRP Publication 130（下訳版、一部翻訳版：平成 30 年 3 月）

管およびリンパ節；LN_{TH}：胸郭内領域を排出するリンパ管およびリンパ節。ICRP（1994a）から引用。

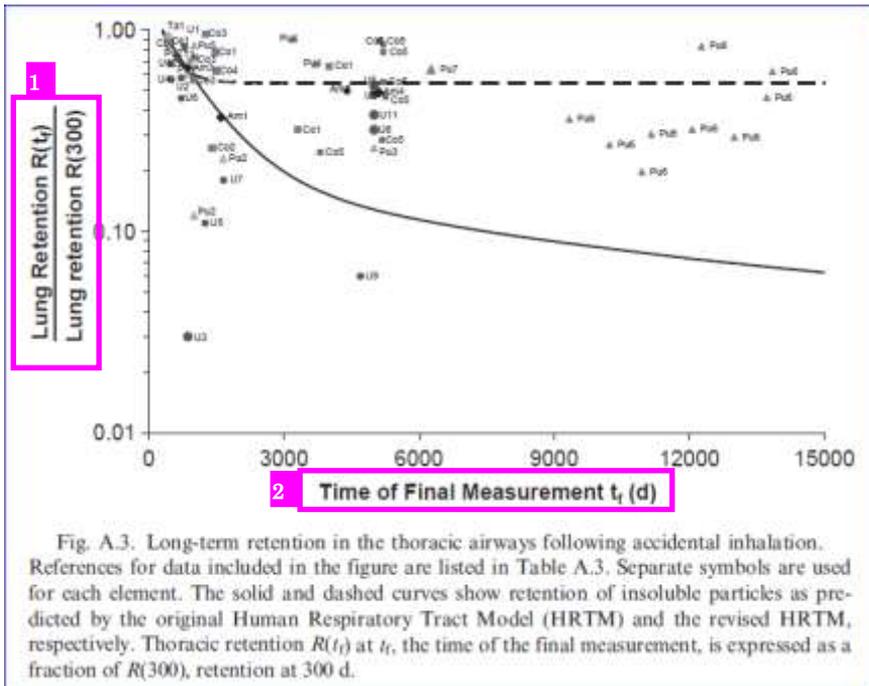


- 1 前部鼻道
- 2 後部鼻道，咽頭，喉頭
- 3 気管支領域
- 4 細気管支領域
- 5 肺胞－間質領域
- 6 胸郭外領域
- 7 胸郭内領域
- 8 環境
- 9 食道

図 A.2. それぞれの呼吸気道領域からの時間依存粒子輸送を描写する修正コンパートメントモデル

矢印の横に示されている速度は、 d^{-1} を単位とする基準値である。後部鼻道、咽頭および喉頭 (ET_2)、気管支領域 (BB) ならびに細気管支領域 (bb) に沈着した物質の 0.2% は気道壁において保持される (それぞれ ET_{seq} 、 BB_{seq} および bb_{seq}) と仮定される。

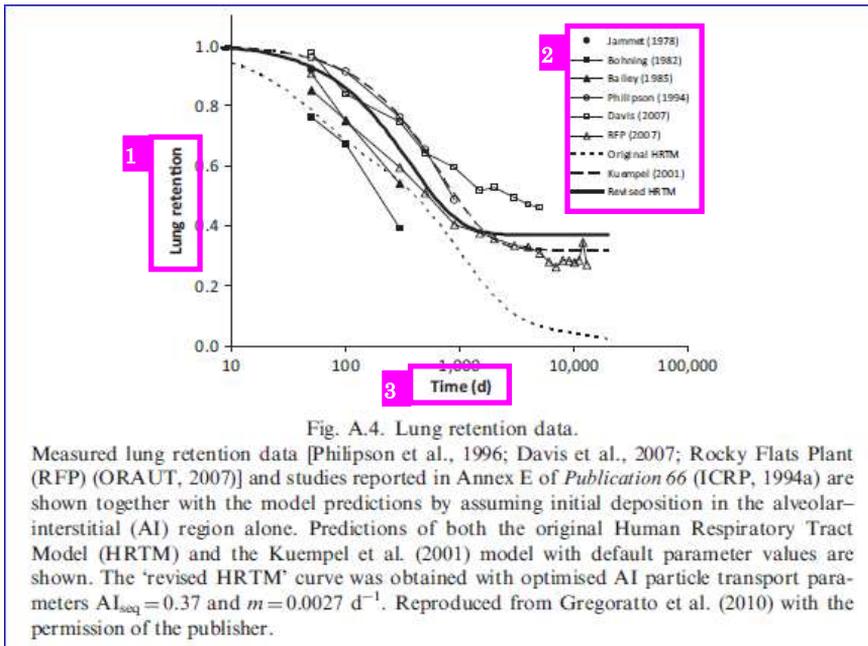
ET_1 : 前部鼻道 (細分されない領域 ET_1) に沈着した物質の残留 ;
 ET_{seq} : 鼻道に沈着した粒子の微小割合の、気道組織における長期残留 (半減期約 700 d) ; LN_{ET} : ET 領域を排出するリンパ管およびリンパ節 ; LN_{TH} : TH 領域を排出するリンパ管およびリンパ節 ; ET_2 : ET_{seq} に保持される微小割合 (0.002 とみなされる) を除いた、後部鼻道、咽頭および喉頭 (ET_2 領域) に沈着した物質の短期残留 (半減期約 10 分) ; BB' : ET_2 への粒子輸送を伴う、 BB における粒子の残留 (半減期約 100 分) ; bb' : BB' への粒子輸送を伴う、 bb における粒子の残留 (半減期約 3.5 d) ; BB_{seq} : 気管支領域に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留 (半減期約 700 d) ; bb_{seq} : 細気管支領域に沈着した粒子の微小割合の、気道壁における長期残留 (半減期約 700 d) ; ALV : 肺胞に沈着した粒子の残留 (半減期約 250 d)。沈着物の一部 (0.67) は粒子輸送によって繊毛気道 (bb') へと除去されるが、残りは間質 (INT) へと浸透する ; INT : 肺胞に沈着した、間質へと浸透する粒子の超長期残留 (半減期約 60 y)。すなわち、これらの粒子はリンパ節へとゆっくり除去される。



- 1
肺残留 $R(t_f)$
肺残留 $R(300)$
- 2 最終測定的时间 t_f (d)

図 A.3. 偶発的な吸入摂取に続く、胸郭内気道における長期残留

図に含まれているデータの参照文献は表 A.3 に挙げてある。それぞれの元素について別個の記号が用いられている。実線および破線の曲線はそれぞれ、もとのヒト呼吸気道モデル (HRTM) および修正 HRTM によって予測された不溶性粒子の残留を示している。最終測定的时间 t_f における胸郭内残留 $R(t_f)$ は、300 d における残留 $R(300)$ の割合として表されている。



1 肺残留

2

Jammet (1978)

Bohning (1982)

Bailey (1985)

Philipson (1994)

Davis (2007)

RFP (2007)

もとの HRTM

Kuempel (2001)

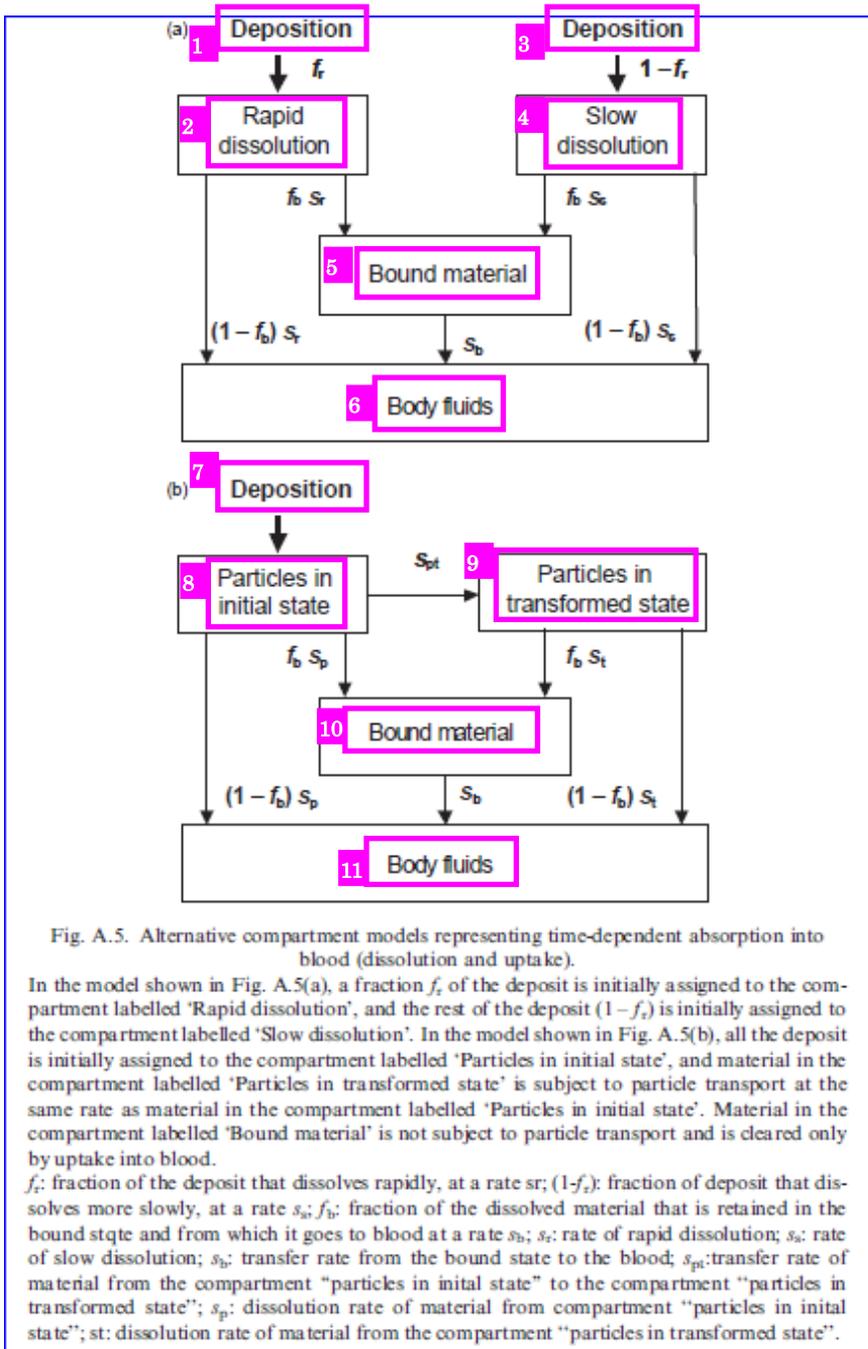
修正 HRTM

3 時間 (d)

図 A.4. 肺残留データ

測定された肺残留データ [Philipson et al., 1996; Davis et al., 2007; ロッキーフラッツプラント (RFP) (ORAUT, 2007)] ならびに *Publication 66* (ICRP, 1994a) の付属書 E に報告された研究が、肺胞-間質 (AI) 領域のみにおける初期沈着を仮定することによるモデル予測とともに示されている。ヒト呼吸気道モデル (HRTM) ならびにパラメータ既定値を用いた Kuempel et al. (2001) のモデルが示さ

れている。「修正 HRTM」の曲線は、最適化された AI 粒子輸送パラメータ $AI_{seq}=0.37$ および $m=0.0027 \text{ d}^{-1}$ を用いて得られた。発行者の許諾を得て Gregoratto et al. (2010) から再掲。



- 1 沈着
- 2 急速溶解

- 3 沈着
- 4 低速溶解
- 5 束縛された物質
- 6 体液
- 7 沈着
- 8 初期状態にある粒子
- 9 変換された状態にある粒子
- 10 束縛された物質
- 11 体液

図 A.5. 血液中への時間依存吸収を描写する選択的コンパートメントモデル (溶解および取り込み)

図 A.5(a)に示されているモデルでは、沈着物の割合 f が最初に、「急速溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、残りの沈着物 $(1-f)$ が最初に、「低速溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられる。図 A.5(b)に示されているモデルでは、すべての沈着物が最初に、「初期状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、「変換された状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質は、「初期状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質と同じ速度で粒子輸送の支配下にある。「束縛された物質」と名づけられたコンパートメントにおける物質は粒子輸送の支配を受けず、血液中への取り込みによってのみ除去される。

f : 速度 s_r で急速に溶解する沈着物の割合; $(1-f)$: 速度 s_s でよりゆっくりと溶解する沈着物の割合; f_b : 束縛状態で保持され、そこから速度 s_b で血液へと向かう溶解物質の割合; s_r : 急速溶解速度; s_s : 低速溶解速度; s_b : 束縛状態から血液への移行速度; s_{pt} : コンパートメント「初期状態にある粒子」からコンパートメント「変換された状態にある粒子」への物質の移行速度; s_p : コンパートメント「初期状態にある粒子」からの物質の溶解速度; s_t : コンパートメント「変換された状態にある粒子」からの物質の溶解速度。

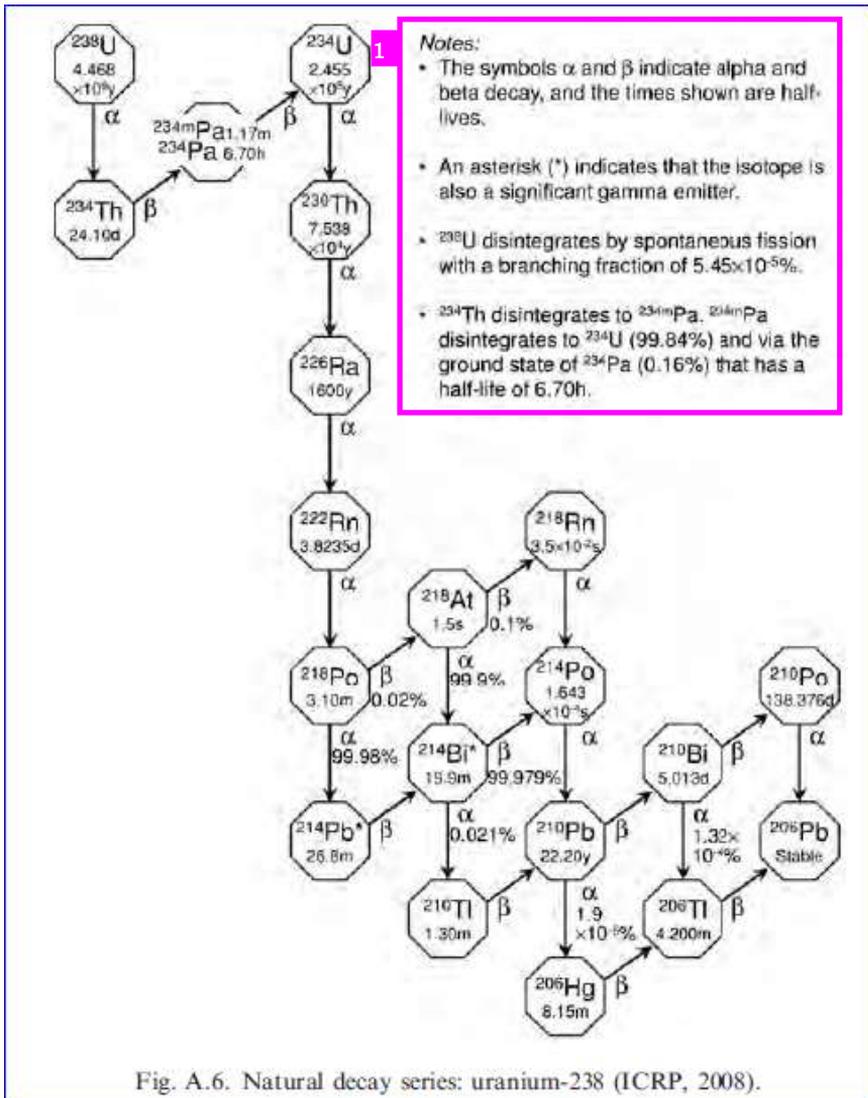


Fig. A.6. Natural decay series: uranium-238 (ICRP, 2008).

1

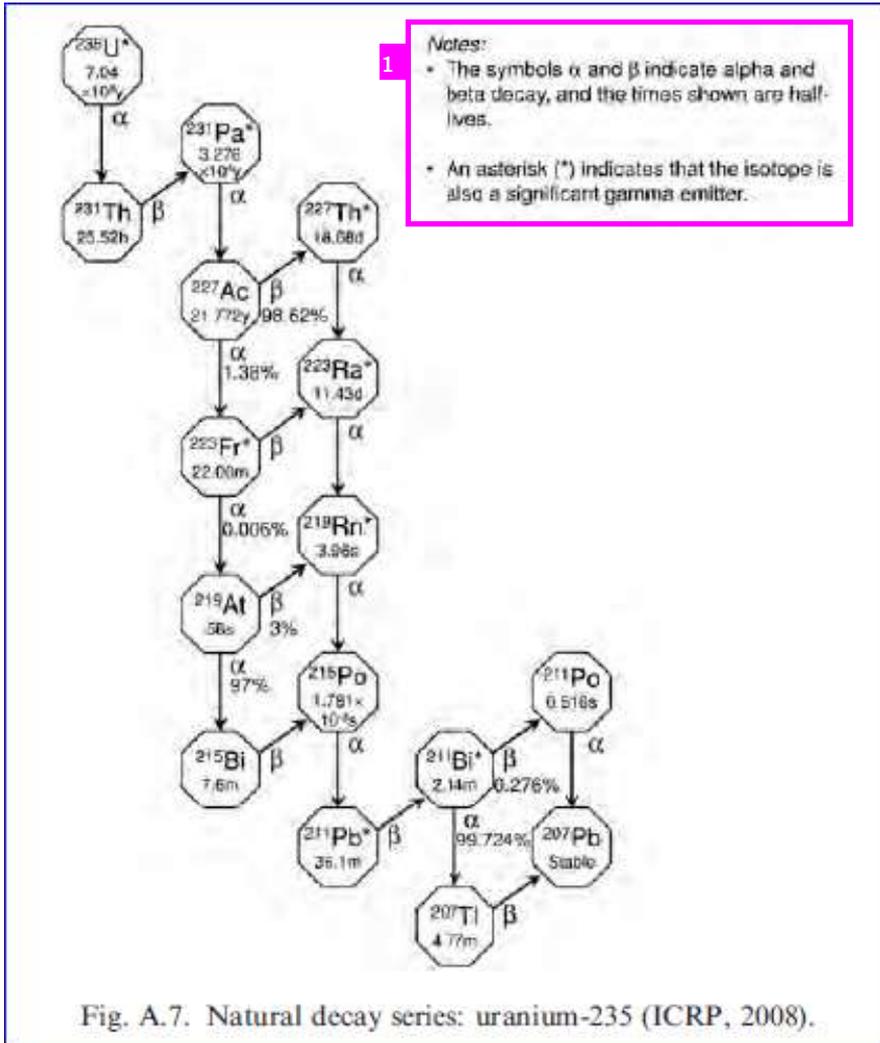
注記：

- 記号の α および β はアルファおよびベータ崩壊を示しており、示されている時間は半減期である。
- アスタリスク (*) は、その同位体がかんりのガンマ放出体でもあることを示している。
- ^{238}U は $5.45 \times 10^{-5}\%$ の分岐比で自発核分裂によって崩壊する。
- ^{234}Th は $^{234\text{m}}\text{Pa}$ へと崩壊する。 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ は ^{234}U (99.84%) へと、

ICRP Publication 130（下訳版、一部翻訳版：平成 30 年 3 月）

また半減期が 6.70 h である ^{234}Pa （0.16%）の基底状態を経て崩壊する。

図 A.6. 自然崩壊系列：ウラン-238（ICRP, 2008）

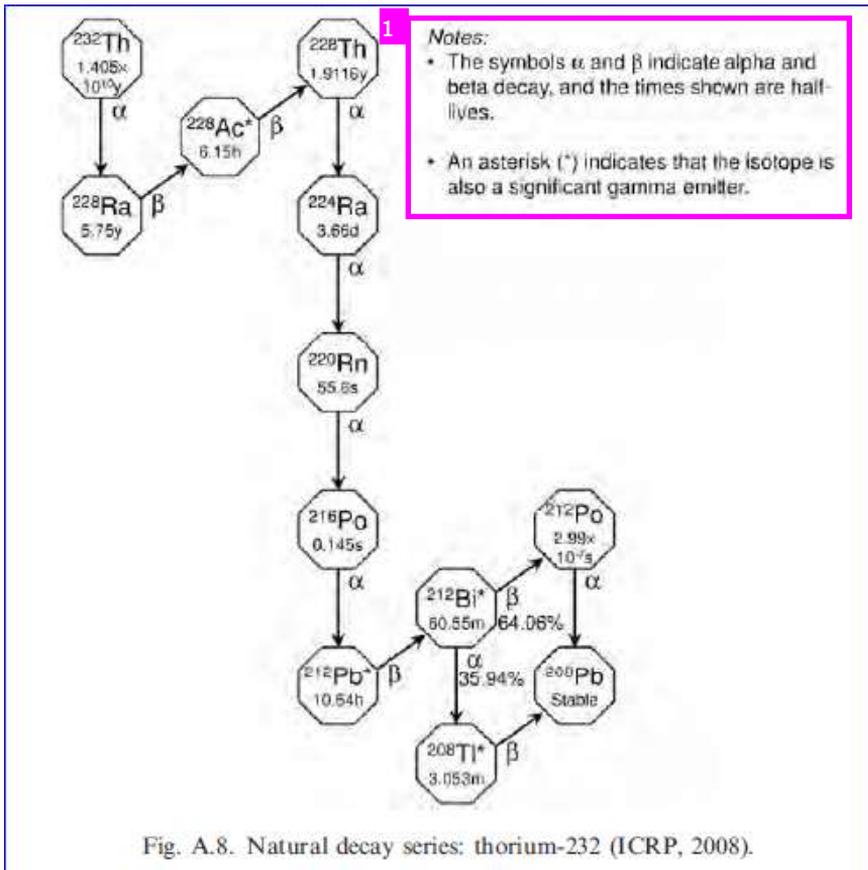


1

注記：

- 記号の α および β はアルファおよびベータ崩壊を示しており、示されている時間は半減期である。
- アスタリスク(*)は、その同位体がかんりのガンマ放出体でもあることを示している。

図 A.7. 自然崩壊系列：ウラン-235 (ICRP, 2008)

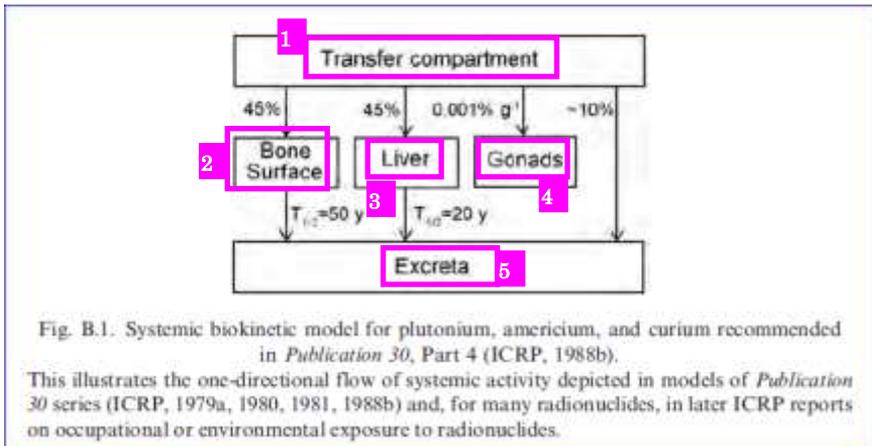


1

注記：

- 記号の α および β はアルファおよびベータ崩壊を示しており、示されている時間は半減期である。
- アスタリスク (*) は、その同位体がかんりのガンマ放出体でもあることを示している。

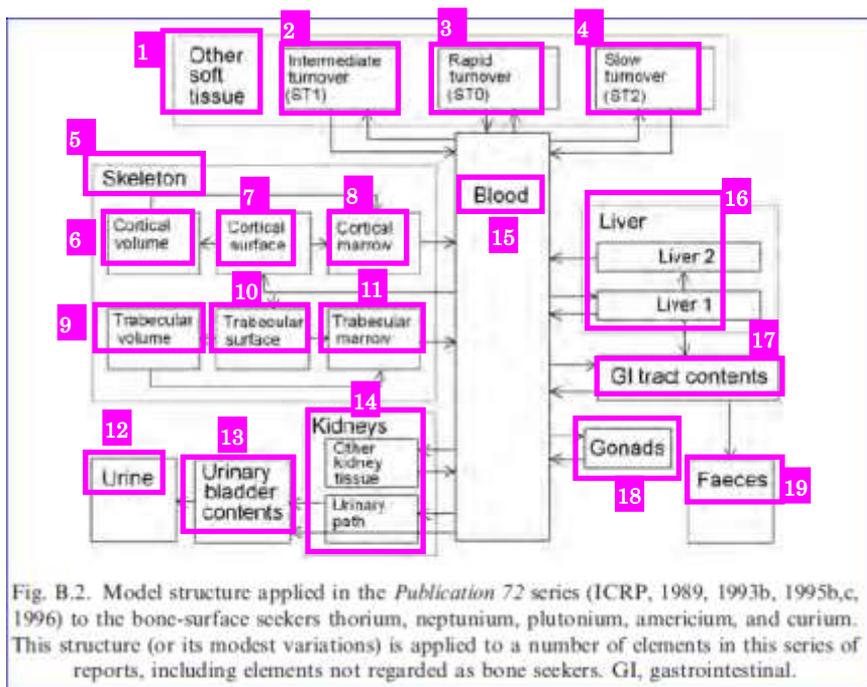
図 A.8. 自然崩壊系列：トリウム-232 (ICRP, 2008)



- 1 通過コンパートメント
- 2 骨表面
- 3 肝臓
- 4 生殖腺
- 5 排泄物

図 B.1. *Publication 30, Part 4* (ICRP, 1988b) の中で勧告された、プルトニウム、アメリシウムおよびキュリウムに対応する全身性体内動態モデル

これは、*Publication 30* シリーズ (ICRP, 1979a, 1980, 1981, 1988b) のモデルにおいて、また、放射性核種への職業上または環境上の被ばくに関する以後の ICRP 報告書においては多くの放射性核種について描写された、全身性放射能の一方向流を例示したものである。



- 1 その他の軟組織
- 2 中速代謝回転 (ST1)
- 3 急速代謝回転 (ST0)
- 4 低速代謝回転 (ST2)
- 5 骨格
- 6 皮質体積
- 7 皮質表面
- 8 皮質骨髓
- 9 梁状体積
- 10 梁状表面
- 11 梁状骨髓
- 12 尿
- 13 膀胱内容量
- 14 腎臓
その他の腎臓組織
- 15 血液
- 16 肝臓
- 17 消化管内容物
- 18 性腺
- 19 糞

肝臓 2

肝臓 1

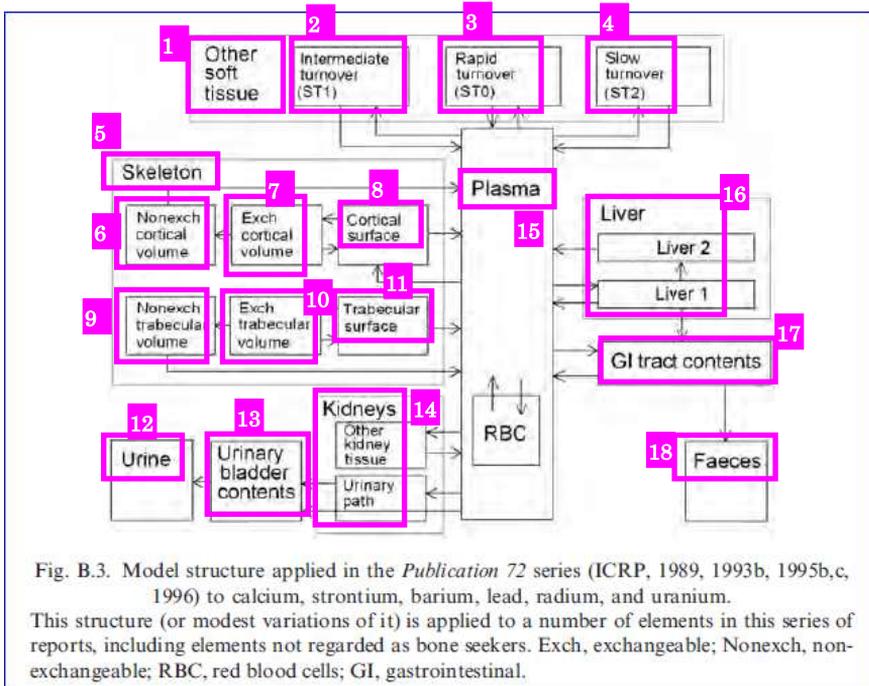
17 胃腸管内容量

18 生殖腺

19 糞

図 B.2. *Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) において骨表面親和性元素のトリウム、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウムおよびキュリウムに適用されたモデル構造

この構造 (またはその多少のバリエーション) は、骨親和性とはみなされない元素を含めて、本報告書シリーズにおいていくつかの元素に適用される。GI, 胃腸。



- 1 その他の軟組織
- 2 中速代謝回転 (ST1)
- 3 急速代謝回転 (ST0)
- 4 低速代謝回転 (ST2)
- 5 骨格
- 6 非交換性皮質体積
- 7 交換性皮質体積
- 8 皮質表面
- 9 非交換性梁状体積
- 10 交換性梁状体積
- 11 梁状表面
- 12 尿
- 13 膀胱内容量
- 14 腎臓
その他の腎臓組織
- 15 血漿
- 16 肝臓
- 17 GI tract contents
- 18 Faeces

肝臓 2

肝臓 1

17 胃腸管内容量

18 糞

図 B.3. *Publication 72* シリーズ (ICRP, 1989, 1993b, 1995b,c, 1996) においてカルシウム, ストロンチウム, バリウム, 鉛, ラジウムおよびウランに適用されたモデル構造

この構造 (またはその多少のバリエーション) は, 骨親和性とはみなされない元素を含めて, 本報告書シリーズにおいていくつかの元素に適用される。Exch, 交換性 ; Nonexch, 非交換性 ; RBC, 赤血球 ; GI, 胃腸。

Table A.1 表の中身については、略称でない用語だけ翻訳。

Table A.1. Reference values of parameters for the compartment model to represent time-dependent particle transport from the human respiratory tract.						
1 (a) Clearance rates						
2 Original HRTM (from ICRP, 1994a, Table 17A)				3 Revised HRTM		
4 From	To	Rate (d ⁻¹)	Half-time*	4 From	To	Rate (d ⁻¹) Half-time*
Al ₁	bb ₁	0.02	35 d	ALV	bb'	0.002 –
Al ₂	bb ₁	0.001	700 d	ALV	INT	0.001 –
Al ₃	bb ₁	0.0001	–	INT	LN _{TH}	0.00003 –
Al ₃	LN _{TH}	0.00002	–			
bb ₁	BB ₁	2	8 h	bb'	BB'	0.2 4 d
bb ₂	BB ₁	0.03	23 d	bb _{seq}	LN _{TH}	0.001 700 d
bb _{seq}	LN _{TH}	0.01	70 d			
BB ₁	ET' ₂	10	100 min	BB'	ET' ₂	10 100 min
BB ₂	ET' ₂	0.03	23 d	BB _{seq}	LN _{TH}	0.001 700 d
BB _{seq}	LN _{TH}	0.01	70 d			
ET' ₂	5 Gastrointestinal tract	100	10 min	ET' ₂	7 Oesophagus	100 10 min
ET _{seq}	LN _{ET}	0.001	700 d	ET _{seq}	8 LN _{ET}	0.001 700 d
ET ₁	6 Environment	1	17 h	ET ₁	8 Environment	0.6 –
				ET ₁	ET' ₂	1.5 –
9 (b) Partition of deposit in each region between compartments						
10 Original HRTM (from ICRP, 1994a, Table 17B)				11 Revised HRTM		
12 Region or deposition site	Compartment	Fraction of deposit in region assigned to compartment [†]		Region or deposition site	Compartment	Fraction of deposit in region assigned to compartment
ET ₁	ET ₁	1		ET ₁	ET ₁	1
ET ₂	ET' ₂	0.9995		ET ₂	ET' ₂	0.998
	ET _{seq}	0.0005			ET _{seq}	0.002
BB	BB ₁	0.993-f _s		BB	BB'	0.998
	BB ₂	f _s			BB _{seq}	0.002
	BB _{seq}	0.007				
bb	bb ₁	0.993-f _s		bb	bb'	0.998
	bb ₂	f _s			bb _{seq}	0.002
13 (continued on next page)						

表 A.1. ヒト呼吸気道モデルによる、時間依存粒子輸送を描写するため

のコンパートメントモデルにおける基準パラメータ値

- 1 (a) クリアランス速度
- 2 もとの HRTM (ICRP, 1994a, 表 17A から)
- 3 修正 HRTM
- 4
輸送元
輸送先
速度 (d^{-1})
半減期*
- 5 胃腸管
- 6 環境
- 7 食道
- 8 環境
- 9 (b) それぞれの領域における沈着物のコンパートメント間の分配
- 10 もとの HRTM (ICRP, 1994a, 表 17B から)
- 11 修正 HRTM
- 12
領域または沈着部位
コンパートメント
領域における沈着物のうちコンパートメントに割り当てられる割合†
領域または沈着部位
コンパートメント
領域における沈着物のうちコンパートメントに割り当てられる割合
- 13 次ページに続く

Table A.1. (continued)

1 Original HRTM (from ICRP, 1994a, Table 17B)			2 Revised HRTM		
3 Region or deposition site	Compartment	Fraction of deposit assigned to compartment [†]	Region or deposition site	Compartment	Fraction of deposit assigned to compartment
AI	bb _{acq}	0.007			
	AI ₁	0.3	AI	ALV	1
	AI ₂	0.6			
	AI ₃	0.1			

HRTM, Human Respiratory Tract Model; Regions or depositions sites: ET₁, anterior nasal passage; ET₂, posterior nasal passage, pharynx, and larynx; BB, bronchial; bb, bronchiolar; AI, alveolar-interstitial; INT, interstitial; ALV, alveolar; LN_{ET}, extrathoracic lymph nodes; LN_{TH}, thoracic lymph nodes. Compartments: ET₁: retention of material deposited in the anterior nose (region ET₁, which is not subdivided); ET₂₀₀ long-term retention ($t_{1/2}$, about 700 d) in airway tissue of a small fraction of particles deposited in the nasal passages; ET₂ short-term retention ($t_{1/2}$, about 10 min) of the material deposited in the posterior nasal passage, larynx and pharynx (ET₂ region) except for the small fraction (taken to be 0.002) retained in ET_{acq}; BB: retention ($t_{1/2}$, about 100 min) of particles in the BB, with particle transport to ET₂; bb: retention ($t_{1/2}$, about 3.5 d) of particles in the bb, with particle transport to BB; BB_{acq} long-term retention ($t_{1/2}$, about 700 d) in airway walls of a small fraction of the particles deposited in the bronchial region; bb_{acq} long-term retention ($t_{1/2}$, about 700 d) in airway walls of a small fraction of the particles deposited in the bronchiolar region; ALV retention ($t_{1/2}$, about 250 d) of particles deposited in the alveoli. A fraction (0.67) of the deposit is removed by particle transport to the ciliated airways (bb), while the remainder penetrates to the interstitium (INT); INT very long-term retention ($t_{1/2}$, about 60 y) of the particles deposited in the alveoli that penetrate to the interstitium: the particles are removed slowly to the lymph nodes.

*The half-times are approximate because the reference values are specified for the particle transport rates and are rounded in units of d⁻¹. A half-time is not given for the transport rate from AI₁ to LN_{TH}, or from INT to LN_{TH}, because these rates were chosen to direct the required amount of material to the lymph nodes. The clearance half-times of compartment AI₃ in the original HRTM, and compartments ALV and ET₁ in the revised HRTM are determined by the sum of the clearance rates from them.

[†]As noted in the caption to Fig. A.1, it is assumed in the original HRTM that the slow-cleared fraction f_s is particle-size-dependent. For details, see Table 17 and Section E.5.6 in *Publication 66* (ICRP 1994a).

表 A.1. (続き)

1 もとの HRTM (ICRP, 1994a, 表 17B から)

2 修正 HRTM

3

領域または沈着部位

コンパートメント

領域における沈着物のうちコンパートメントに割り当てられる割合[†]

領域または沈着部位

コンパートメント

領域における沈着物のうちコンパートメントに割り当てられる割合
4

HRTM, ヒト呼吸気道モデル；領域または沈着部位：ET₁, 前部鼻道；ET₂, 後部鼻道，咽頭および喉頭；BB, 気管支領域；bb, 細気管支領域；AI, 肺胞-間質領域；INT, 間質領域；ALV, 肺胞領域；LN_{ET}, 胸郭外リンパ節；LN_{TH}, 胸郭内リンパ節。

コンパートメント：ET₁：前部鼻道（細分されない領域 ET₁）に沈着した物質の残留；ET_{seq}：鼻道に沈着した粒子の微小割合の，気道組織における長期残留（半減期約 700 d）；ET₂：ET_{seq}に保持される微小割合（0.002 とみなされる）を除いた，後部鼻道，咽頭および喉頭（ET₂領域）に沈着した物質の短期残留（半減期約 10 分）；BB'：ET₂への粒子輸送を伴う，BBにおける粒子の残留（半減期約 100 分）；bb'：BB'への粒子輸送を伴う，bbにおける粒子の残留（半減期約 3.5 d）；BB_{seq}：気管支領域に沈着した粒子の微小割合の，気道壁における長期残留（半減期約 700 d）；bb_{seq}：細気管支領域に沈着した粒子の微小割合の，気道壁における長期残留（半減期約 700 d）；ALV：肺胞に沈着した粒子の残留（半減期約 250 d）。沈着物の一部（0.67）は粒子輸送によって繊毛気道（bb'）へと除去されるが，残りは間質（INT）へと浸透する；INT：肺胞に沈着した，間質へと浸透する粒子の超長期残留（半減期約 60 y）。すなわち，これらの粒子はリンパ節へとゆっくり除去される。

*これらの半減期は近似値である。基準値が粒子輸送速度について指定されており，d⁻¹の単位で概数化されているためである。AI₃からLN_{TH}への，またはINTからLN_{TH}への輸送速度については，半減期は示されていない。これらの速度は，必要とされる物質をリンパ節に割り当てるために選択されたためである。もとのHRTMにおけるコンパートメントAI₃ならびに修正HRTMにおけるコンパートメントALVおよびET₁のクリアランス半減期は，それらのコンパートメントからのクリアランス速度の合計によって決定される。

†図 A.1 の説明文に言及したように，もとの HRTM では，低速除去割合 f_s は粒径依存であると仮定されている。詳細は，*Publication 66* (ICRP, 1994a) における表 17 および E.5.6 節を参照。

Table A.2 表タイトル、小見出し(a)、(b)、(c)、表注のみ訳

μm	ET ₁	ET ₂	BB	bb	AI	1	Total
2 (a) Adult male resting (sitting) (breathing rate = 0.54 m ³ h ⁻¹)							
AMTD							
0.0006	5.953 × 10 ⁻¹	3.205 × 10 ⁻¹	6.144 × 10 ⁻²	1.568 × 10 ⁻²	3.762 × 10 ⁻⁶		9.930 × 10 ⁻¹
0.001	5.424 × 10 ⁻¹	2.921 × 10 ⁻¹	9.541 × 10 ⁻²	5.381 × 10 ⁻²	2.054 × 10 ⁻⁴		9.839 × 10 ⁻¹
0.002	4.268 × 10 ⁻¹	2.298 × 10 ⁻¹	1.194 × 10 ⁻¹	1.735 × 10 ⁻¹	9.412 × 10 ⁻³		9.590 × 10 ⁻¹
0.003	3.390 × 10 ⁻¹	1.826 × 10 ⁻¹	1.104 × 10 ⁻¹	2.591 × 10 ⁻¹	4.395 × 10 ⁻²		9.351 × 10 ⁻¹
0.005	2.347 × 10 ⁻¹	1.264 × 10 ⁻¹	8.279 × 10 ⁻²	3.038 × 10 ⁻¹	1.509 × 10 ⁻¹		8.985 × 10 ⁻¹
0.01	1.317 × 10 ⁻¹	7.093 × 10 ⁻²	4.638 × 10 ⁻²	2.454 × 10 ⁻¹	3.541 × 10 ⁻¹		8.485 × 10 ⁻¹
0.02	7.707 × 10 ⁻²	4.150 × 10 ⁻²	2.656 × 10 ⁻²	1.678 × 10 ⁻¹	4.375 × 10 ⁻¹		7.505 × 10 ⁻¹
0.03	5.963 × 10 ⁻²	3.210 × 10 ⁻²	2.060 × 10 ⁻²	1.338 × 10 ⁻¹	3.953 × 10 ⁻¹		6.414 × 10 ⁻¹
0.05	4.441 × 10 ⁻²	2.391 × 10 ⁻²	1.554 × 10 ⁻²	9.960 × 10 ⁻²	3.111 × 10 ⁻¹		4.946 × 10 ⁻¹
0.1	3.411 × 10 ⁻²	1.837 × 10 ⁻²	1.077 × 10 ⁻²	6.594 × 10 ⁻²	2.170 × 10 ⁻¹		3.462 × 10 ⁻¹
0.2	4.384 × 10 ⁻²	2.361 × 10 ⁻²	7.815 × 10 ⁻³	4.351 × 10 ⁻²	1.632 × 10 ⁻¹		2.820 × 10 ⁻¹
AMAD							
0.3	4.231 × 10 ⁻²	2.279 × 10 ⁻²	7.949 × 10 ⁻³	4.469 × 10 ⁻²	1.656 × 10 ⁻¹		2.833 × 10 ⁻¹
0.5	7.109 × 10 ⁻²	3.828 × 10 ⁻²	7.070 × 10 ⁻³	3.354 × 10 ⁻²	1.478 × 10 ⁻¹		2.978 × 10 ⁻¹
0.7	1.036 × 10 ⁻¹	5.580 × 10 ⁻²	7.445 × 10 ⁻³	2.968 × 10 ⁻²	1.470 × 10 ⁻¹		3.435 × 10 ⁻¹
1	1.502 × 10 ⁻¹	8.088 × 10 ⁻²	8.673 × 10 ⁻³	2.800 × 10 ⁻²	1.509 × 10 ⁻¹		4.187 × 10 ⁻¹
2	2.657 × 10 ⁻¹	1.431 × 10 ⁻¹	1.270 × 10 ⁻²	2.803 × 10 ⁻²	1.511 × 10 ⁻¹		6.006 × 10 ⁻¹
3	3.343 × 10 ⁻¹	1.801 × 10 ⁻¹	1.497 × 10 ⁻²	2.734 × 10 ⁻²	1.369 × 10 ⁻¹		6.936 × 10 ⁻¹
5	4.011 × 10 ⁻¹	2.159 × 10 ⁻¹	1.626 × 10 ⁻²	2.373 × 10 ⁻²	1.040 × 10 ⁻¹		7.610 × 10 ⁻¹
7	4.257 × 10 ⁻¹	2.293 × 10 ⁻¹	1.574 × 10 ⁻²	1.977 × 10 ⁻²	7.815 × 10 ⁻²		7.686 × 10 ⁻¹
10	4.336 × 10 ⁻¹	2.335 × 10 ⁻¹	1.402 × 10 ⁻²	1.493 × 10 ⁻²	5.244 × 10 ⁻²		7.485 × 10 ⁻¹
15	4.235 × 10 ⁻¹	2.281 × 10 ⁻¹	1.109 × 10 ⁻²	9.647 × 10 ⁻³	2.939 × 10 ⁻²		7.017 × 10 ⁻¹
20	4.087 × 10 ⁻¹	2.200 × 10 ⁻¹	8.780 × 10 ⁻³	6.540 × 10 ⁻³	1.793 × 10 ⁻²		6.620 × 10 ⁻¹
3 (b) Adult male at light exercise (breathing rate = 1.5 m ³ h ⁻¹)							
AMTD							
0.0006	5.788 × 10 ⁻¹	3.116 × 10 ⁻¹	5.918 × 10 ⁻²	4.311 × 10 ⁻²	3.406 × 10 ⁻⁴		9.930 × 10 ⁻¹
0.001	5.192 × 10 ⁻¹	2.796 × 10 ⁻¹	7.855 × 10 ⁻²	1.037 × 10 ⁻¹	4.225 × 10 ⁻³		9.852 × 10 ⁻¹
0.002	3.979 × 10 ⁻¹	2.142 × 10 ⁻¹	8.325 × 10 ⁻²	2.217 × 10 ⁻¹	4.829 × 10 ⁻²		9.654 × 10 ⁻¹
0.003	3.110 × 10 ⁻¹	1.674 × 10 ⁻¹	7.156 × 10 ⁻²	2.670 × 10 ⁻¹	1.302 × 10 ⁻¹		9.472 × 10 ⁻¹
0.005	2.118 × 10 ⁻¹	1.140 × 10 ⁻¹	5.045 × 10 ⁻²	2.560 × 10 ⁻¹	2.897 × 10 ⁻¹		9.220 × 10 ⁻¹
0.01	1.187 × 10 ⁻¹	6.393 × 10 ⁻²	2.745 × 10 ⁻²	1.799 × 10 ⁻¹	4.909 × 10 ⁻¹		8.808 × 10 ⁻¹
0.02	7.224 × 10 ⁻²	3.890 × 10 ⁻²	1.616 × 10 ⁻²	1.194 × 10 ⁻¹	4.950 × 10 ⁻¹		7.417 × 10 ⁻¹
							4 (continued on next page)

表 A.2. エアロゾルサイズの間数としての、呼吸気道の各領域における沈着割合*† (成人男性、鼻呼吸者)

- 1 合計
- 2 (a) 静止（着座）している成人男性（呼吸率= $0.54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ）
- 3 (b) 軽運動中の成人男性（呼吸率= $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ）
- 4 次ページに続く

Table A.2. (continued)

μm	ET ₁	ET ₂	BB	bb	AI	1	Total
0.03	5.638×10^{-2}	3.036×10^{-2}	1.258×10^{-2}	9.370×10^{-2}	4.167×10^{-1}		6.097×10^{-1}
0.05	4.268×10^{-2}	2.299×10^{-2}	9.405×10^{-3}	6.829×10^{-2}	3.109×10^{-1}		4.543×10^{-1}
0.1	4.302×10^{-2}	2.317×10^{-2}	6.758×10^{-3}	4.399×10^{-2}	2.057×10^{-1}		3.226×10^{-1}
0.2	8.048×10^{-2}	4.334×10^{-2}	6.445×10^{-3}	2.777×10^{-2}	1.427×10^{-1}		3.007×10^{-1}
AMAD							
0.3	7.657×10^{-2}	4.123×10^{-2}	6.378×10^{-3}	2.864×10^{-2}	1.458×10^{-1}		2.986×10^{-1}
0.5	1.374×10^{-1}	7.399×10^{-2}	8.097×10^{-3}	2.016×10^{-2}	1.172×10^{-1}		3.568×10^{-1}
0.7	1.926×10^{-1}	1.037×10^{-1}	1.022×10^{-2}	1.677×10^{-2}	1.068×10^{-1}		4.301×10^{-1}
1	2.601×10^{-1}	1.401×10^{-1}	1.304×10^{-2}	1.465×10^{-2}	9.938×10^{-2}		5.272×10^{-1}
2	3.927×10^{-1}	2.114×10^{-1}	1.809×10^{-2}	1.263×10^{-2}	8.253×10^{-2}		7.174×10^{-1}
3	4.523×10^{-1}	2.435×10^{-1}	1.930×10^{-2}	1.138×10^{-2}	6.733×10^{-2}		7.938×10^{-1}
5	4.923×10^{-1}	2.650×10^{-1}	1.801×10^{-2}	8.949×10^{-3}	4.488×10^{-2}		8.292×10^{-1}
7	4.955×10^{-1}	2.668×10^{-1}	1.565×10^{-2}	6.961×10^{-3}	3.098×10^{-2}		8.159×10^{-1}
10	4.819×10^{-1}	2.595×10^{-1}	1.241×10^{-2}	4.858×10^{-3}	1.897×10^{-2}		7.777×10^{-1}
15	4.523×10^{-1}	2.436×10^{-1}	8.593×10^{-3}	2.846×10^{-3}	9.571×10^{-3}		7.169×10^{-1}
20	4.273×10^{-1}	2.301×10^{-1}	6.185×10^{-3}	1.789×10^{-3}	5.411×10^{-3}		6.707×10^{-1}
2 (c) Reference Worker‡ (breathing rate = 1.2 m³ h⁻¹)							
AMTD							
0.0006	5.811×10^{-1}	3.129×10^{-1}	5.950×10^{-2}	3.925×10^{-2}	2.932×10^{-4}		9.931×10^{-1}
0.001	5.225×10^{-1}	2.814×10^{-1}	8.092×10^{-2}	9.672×10^{-2}	3.660×10^{-3}		9.852×10^{-1}
0.002	4.019×10^{-1}	2.164×10^{-1}	8.834×10^{-2}	2.149×10^{-1}	4.282×10^{-2}		9.644×10^{-1}
0.003	3.149×10^{-1}	1.695×10^{-1}	7.702×10^{-2}	2.659×10^{-1}	1.181×10^{-1}		9.455×10^{-1}
0.005	2.150×10^{-1}	1.157×10^{-1}	5.500×10^{-2}	2.627×10^{-1}	2.702×10^{-1}		9.187×10^{-1}
0.01	1.206×10^{-1}	6.492×10^{-2}	3.011×10^{-2}	1.891×10^{-1}	4.717×10^{-1}		8.764×10^{-1}
0.02	7.292×10^{-2}	3.927×10^{-2}	1.763×10^{-2}	1.263×10^{-1}	4.869×10^{-1}		7.430×10^{-1}
0.03	5.684×10^{-2}	3.060×10^{-2}	1.371×10^{-2}	9.934×10^{-2}	4.137×10^{-1}		6.142×10^{-1}
0.05	4.292×10^{-2}	2.312×10^{-2}	1.027×10^{-2}	7.269×10^{-2}	3.109×10^{-1}		4.599×10^{-1}
0.1	4.177×10^{-2}	2.249×10^{-2}	7.323×10^{-3}	4.707×10^{-2}	2.073×10^{-1}		3.260×10^{-1}
0.2	7.532×10^{-2}	4.056×10^{-2}	6.638×10^{-3}	2.998×10^{-2}	1.456×10^{-1}		2.981×10^{-1}
AMAD							
0.3	7.176×10^{-2}	3.864×10^{-2}	6.599×10^{-3}	3.089×10^{-2}	1.486×10^{-1}		2.965×10^{-1}
0.5	1.281×10^{-1}	6.897×10^{-2}	7.953×10^{-3}	2.203×10^{-2}	1.215×10^{-1}		3.486×10^{-1}
0.7	1.801×10^{-1}	9.695×10^{-2}	9.833×10^{-3}	1.859×10^{-2}	1.125×10^{-1}		4.180×10^{-1}
1	2.447×10^{-1}	1.318×10^{-1}	1.242×10^{-2}	1.652×10^{-2}	1.066×10^{-1}		5.120×10^{-1}
2	3.749×10^{-1}	2.018×10^{-1}	1.732×10^{-2}	1.479×10^{-2}	9.218×10^{-2}		7.010×10^{-1}
							3 (continued on next page)

表 A.2. (続き)

1 合計

2 標準作業者‡ (呼吸率 = 1.2 m³ h⁻¹)

3 次ページに続く

Table A.2. (continued)

μm	ET ₁	ET ₂	BB	bb	AI	1	Total
3	4.357×10^{-1}	2.346×10^{-1}	1.869×10^{-2}	1.363×10^{-2}	7.712×10^{-2}		7.797×10^{-1}
5	4.795×10^{-1}	2.582×10^{-1}	1.777×10^{-2}	1.103×10^{-2}	5.319×10^{-2}		8.197×10^{-1}
7	4.857×10^{-1}	2.615×10^{-1}	1.567×10^{-2}	8.763×10^{-3}	3.761×10^{-2}		8.093×10^{-1}
10	4.751×10^{-1}	2.558×10^{-1}	1.265×10^{-2}	6.275×10^{-3}	2.368×10^{-2}		7.735×10^{-1}
15	4.482×10^{-1}	2.414×10^{-1}	8.944×10^{-3}	3.803×10^{-3}	1.236×10^{-2}		7.147×10^{-1}
20	4.247×10^{-1}	2.287×10^{-1}	6.550×10^{-3}	2.457×10^{-3}	7.171×10^{-3}		6.695×10^{-1}

2 ET₁, anterior nasal passage; ET₂, posterior nasal passage, pharynx, and larynx; BB, bronchial; bb, bronchiolar; AI, alveolar-interstitial; AMTD, activity median thermodynamic diameter; AMAD, activity median aerodynamic diameter.

*Reference values are given to a greater degree of precision than would be chosen to reflect the certainty with which the average value of each parameter is known.

†The particles are assumed to have density of 3.00 g cm^{-3} and shape factor of 1.5 [typical of compact, irregular (i.e. non-spherical) particles]. The particle diameters are assumed to be log-normally distributed with geometric standard deviation σ_g increasing from a value of 1.0 at 0.6 nm to a value of 2.5 above approximately $1 \mu\text{m}$ [Publication 66 (ICRP, 1994a, Para. 170)]. The value of σ_g is not a reference value, but is derived from the corresponding AMTD (ICRP, 1994a).

‡Light work is defined on the following basis: 2.5 h sitting, at which the amount inhaled is $0.54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; and 5.5 h light exercise, at which the amount inhaled is $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. For both levels of activity, all the inhaled air enters through the nose. The deposition fractions are therefore volume-weighted average values for the two levels of activity given for normal nose-breathing adult males sitting and at light exercise in Table A.2(a,b). As described in the text, the fractions deposited in ET₁ and ET₂ were summed to give the total deposit in the extrathoracic airways, and partitioned 65% to ET₁ and 35% to ET₂.

表 A.2. (続き)

1 合計

2

ET₁, 前部鼻道; ET₂, 後部鼻道, 咽頭および喉頭; BB, 気管支領域; bb, 細気管支領域; AI, 肺泡-間質領域; AMTD, 熱力学的放射能中央径; AMAD, 空気力学的放射能中央径。

*基準値は, それぞれのパラメータの平均値がわかっている確実さを反映するために選ばれるであろうものよりも高い精度で与えられる。

†これらの粒子は, 密度が 3.00 g cm^{-3} , 形状係数が 1.5 であると仮定される [緻密な不規則形状 (すなわち, 非球状) 粒子に典型的な]。粒子径は, 0.6 nm における 1.0 の値からおよそ $1 \mu\text{m}$ 超では 2.5 の値へと増加する幾何標準偏差 σ_g を持つ対数正規分布であると仮定される [Publication 66 (ICRP, 1994a, 170 項)]。 σ_g の値は基準値ではなく, 対応する AMTD から導き出される (ICRP, 1994a)。

‡軽作業は, 次を根拠に定義される: 2.5 h の着座, その間の吸入量は $0.54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; および 5.5 h の軽運動, その間の吸入量は $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 。いずれのレベルの活動の場合も, 吸入空気はすべて, 鼻を通して入る。したがって, これら

の沈着割合は、表 A.2(a,b)における着座している鼻呼吸成人男性および軽運動中の鼻呼吸成人男性について与えられた 2 つのレベルの活動に対応する体積加重平均値である。本文に述べたように、胸郭外気道における総沈着量を示すために ET₁および ET₂に沈着した割合が合計され、65%が ET₁へ、35%が ET₂へと分配された。

Table A.3 表タイトルのみ訳

Table A.3. Sources of data on retention in the thoracic airways used in Fig. A.3.		
Cobalt	Uranium	Plutonium
Co1 Newton and Rundo (1971)	U1 Ronen (1969)	Pu1 Newton et al. (1983)
Co2 Gupton and Brown (1972)	U2 Saxby et al. (1964)	Pu2 Ramsden (1976)
Co3 Raghavendran et al. (1978)	U3 Rundo (1965)	Pu3 Ramsden et al. (1978); Ramsden (1984)
Co4 Ramsden (1984)	U4 Schultz (1966)	Pu4 Bihl et al. (1988a,b,c)
Co5 Davis et al. (2007)	U5 Scott and West (1967)	Pu5 Foster (1991)
	U6 West and Scott (1966)	Pu6 ORAUT (2007)
	U7 West and Scott (1969)	Pu7 Carbaugh and La Bone (2003)
Cerium		
Ce1 Tyler and Lister (1973)	U8 West et al. (1979)	
	U9 Crawford-Brown and Wilson (1984)	Americium
Tantalum	U10 Kvasnicka (1987)	Am1 Fry (1976)
Ta1 Newton (1977)	U11 Price (1989)	Am2 Toohey and Essling (1980)
¹⁹⁵ Au-labelled teflon		Am3 Newton et al. (1983)
T1 Philipson et al. (1996)		Am4 Wernli and Eikenberg (2007)

表 A.3. 図 A.3 において用いられた、胸郭内気道における残留に関するデータ源

Table A.4 すべて翻訳

Table A.4. Original Human Respiratory Tract Model (HRTM) default absorption parameter values for Type F, M, and S materials [based on *Publication 66* (ICRP 1994a, Table 18)].*

Type		F (fast)	M (moderate)	S (slow)
Model parameters				
Initial dissolution rate (d^{-1})	s_p	100	10	0.1
Transformation rate (d^{-1})	s_{pt}	0	90	100
Final dissolution rate (d^{-1})	s_t	—	0.005	0.0001
Fraction dissolved rapidly	f_r	1	0.1	0.001
Approximate dissolution rates				
Rapid (d^{-1})	s_r	100	100	100
Slow (d^{-1})	s_b	—	0.005	0.0001
Fraction to bound state	f_b	0	0	0
Uptake rate from bound state (d^{-1})	s_b	—	—	—

*The model values s_p , s_{pt} , and s_t in this table are the original HRTM reference values (i.e. the recommended default values for use in the model). No 'bound' state was assumed for default types.

表 A.4. もとのヒト呼吸気道モデル (HRTM) による, タイプ F, M および S の物質に対応する吸収パラメータ既定値 [*Publication 66* (ICRP 1994a, 表 18) に基づく] *

- 1
 タイプ
 モデルパラメータ
 初期溶解速度 (d^{-1})
 変換速度 (d^{-1})
 最終溶解速度 (d^{-1})
 急速に溶解する割合
 近似的溶解速度：
 急速 (d^{-1})
 低速 (d^{-1})
 束縛状態への割合
 束縛状態からの取り込み速度 (d^{-1})

- 2
 F (高速)
 M (中速)
 S (低速)

3 *この表におけるモデルの値 s_p , s_{pt} および s_t は, もとの HRTM 基準値 (すなわち, モデルにおいて用いることが勧告された既定値) である。どの既定のタイプについても「束縛」状態は仮定されなかった。

Table A.5-A.6 表タイトルと表注のみ翻訳

Table A.5. Central values of dissolution parameters for Type F, M, and S materials from a review of experimental data.*				
1 Type	2	F (fast)	M (moderate)	S (slow)
Fraction dissolved rapidly	f_r	0.95 (0.84) [1.4]	0.20 (0.18) [4]	0.007 (0.003) [9]
Dissolution rates:				
Rapid (d^{-1})	s_r	12 (9) [8]	1.7 (1.5) [9]	2.0 (3.8) [14]
Slow (d^{-1})	s_s	0.02 (0.02) [8]	0.003 (0.003) [4]	0.00018 (0.00008) [9]
3 *Median value, with geometric mean in parentheses, and geometric standard deviation in square brackets.				

表 A.5. 実験データのレビューによる、タイプ F, M および S の物質に対応する溶解パラメータの中心値*

1

タイプ

溶解速度：

急速 (d^{-1})

低速 (d^{-1})

2

F (高速)

M (中速)

S (低速)

3 *中央値，幾何平均（丸括弧内）および幾何標準偏差（角括弧内）

Table A.6. Updated default absorption parameter values for Type F, M, and S materials.*†				
1 Type	2	F (fast)	M (moderate)	S (slow)
Fraction dissolved rapidly	f_r	1	0.2	0.01
Dissolution rates:				
Rapid (d^{-1})	s_r	30^{\ddagger}	3^{\S}	3^{\S}
Slow (d^{-1})	s_s	—	0.005	0.0001
3 *Reference values (see footnote to Table 3.1).				
†The bound state is also used for default types of some elements.				
‡Element-specific rapid dissolution rates are adopted for Type F forms of many elements.				
§The element-specific value for Type F is also used for Types M and S if it is less than $3 d^{-1}$.				

表 A.6. タイプ F, M および S の物質に対応する更新された吸収パラメータ既定値*†

1

タイプ

溶解速度：

急速 (d^{-1})

低速 (d^{-1})

2

F（高速）

M（中速）

S（低速）

3

*基準値（表 3.1 の脚注を参照）。

†束縛状態は、一部の元素の既定タイプについても用いられる。

‡元素固有の急速溶解速度は、多くの元素のタイプ F 形態について採用される。

§タイプ F に対応する元素固有値は、それが $3 d^{-1}$ を下回るならばタイプ M および S についても用いられる。

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication 131 下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。ドラフトからの引用を禁ず 【事務局】

放射線防護の発がん性に関する幹細胞生物学

論説

幹細胞放射線生物学：放射線防護のための基礎科学

国際放射線防護委員会 (ICRP) の放射線防護体系は、科学的証拠、倫理的価値観、そして経験という 3 つの柱に基づいている。本刊行物は、科学的証拠ベースの側面を検討するための直近の刊行物である。他の最近の例には、*Publication 115* および *118* (ICRP, 2010, 2012) がある。

より深遠な理解に照らすと変更が必要な可能性はあるのかどうかを評価するために放射線防護体系に不可欠な科学における最新の発展の結果を検討し続けることは、ICRP の義務である。ICRP の 5 つの常設専門委員会の 1 つである放射線影響に関する第 1 専門委員会はこの任務に専心しており、これは他のいくつかの専門委員会、特に放射線被ばくによる線量に関する第 2 専門委員会および環境の防護に関する第 5 専門委員会の重要な要素でもある。

本刊行物は、ICRP 刊行物によく見られるよりも主たる科学的証拠のレビューおよび強化の構成要素が大きいとはいえ、幹細胞生物学から現れる証拠の放射線防護上の意味合いを実際に考慮している。これらの意味合いは、異なる組織における放射線発がん上の標的細胞の集団の定義、発がんに関する直線しきい値なし外挿モデルおよび相対リスクモデルの利用、高線量および低線量と線量率効果の関係や、放射線がんリスクの年齢依存性など、電離放射線の確率的影響に関する放射線防護の基本的側面のいくつかに関係する。

成体幹細胞 (寿命を通して身体組織を維持する長寿命細胞) と関連する証拠および概念のいくつかは、放射線生物学にその起源がある (たとえば、Till and McCulloch, 1961 ; Bedford and Dewey, 2002)。幹細胞とその直接の子孫は、体内における長寿命の特性ならびに、過度のおよび有害な増殖がないならば継続的な長期間の組織維持を可能にする、分裂後の子孫たる娘細胞の運命の入念な制御の要求ゆえに、がんの起始の点でもっともらしい標的細胞とみなされて久しい。幹細胞に関する基礎研究はここ数十年で劇的に進展しており、これは主として、さまざまな疾患の治療における幹細胞の潜在的な利用ならびに、病因論における幹細胞の重要性の認識によって推進されている。

「幹細胞能」を決定づける非常に限られた数の遺伝子の同定は、幹細胞研究の進展に不可欠となっている。これは、多能性の制御に関する業績ゆえの Sir John Gurdon および Sir Shinya Yamanaka に対する 2012 年ノーベル生理学・医学賞の授与において認識された。幹細胞能の制御に関する知識のいっそうの増進に加えて、ヒトおよび実験室モデルにおいて特定の幹細胞集団を特徴づけ分離する能力も大きく進歩している。

1

知識のこの拡大と、幹細胞および初期前駆細胞の放射線発がんにおける重要な標的細胞としての認識を考慮すると、放射線発がんに関連する組織幹細胞の包括的なレビューを考えるのが時宜を得ている。

幹細胞の特性と、それらが放射線防護と関連のある線量範囲にわたる電離放射線被ばくにどのように応答するのかについて、我々がまだ完全に理解しているわけではないことは明らかである。それでもなお、本刊行物では、興味深く潜在的に重要な新たな問題および概念を提起する。たとえば、幹細胞がそこに存在する特定組織の微小環境「ニッチェ」の放射線誘発変容や、ニッチェ占有競争はがんリスクにどのように影響を及ぼす可能性があるのかなどである。さらに、幹細胞特性を獲得するための細胞の考えうる脱分化に関する新たな洞察は、「リスクのある」標的細胞集団の完全な理解を増進する上で重要かもしれない。知識ベースは拡大し発展し続けることになるのであれば、幹細胞放射線生物学の理解増進の放射線防護上の意味合いのさらなる発展と精緻化を予期すべきである。

全体的な意味では、本刊行物は、放射線防護のためのリスク外挿およびリスク推定に関する判断に情報を与えるために、特に幹細胞における基本的な生物学的プロセスに関する詳細な洞察を得る必要を強調するものである。近い将来においては、放射線防護が放射線起因疾患のリスクの評価のための根本的な基礎として疫学的証拠に頼ることから脱却することになると想像するのは難しい。しかし、放射線起因疾患病因論の生物学的基礎に関する知識の増進は、それを超えると疫学的証拠が利用可能な線量および線量率におけるリスク推定へのアプローチに対する信頼を強化するのに資するだろう。この点で、本刊行物は、生物学的知識を放射線防護勧告にいっそう組み込むための重要な手段として歓迎されるべきである。

ICRP 第 1 専門委員会副委員長
SIMON BOUFFLER

ICRP 科学事務局長
編集主幹

CHRISTOPHER H. CLEMENT

放射線防護の発がん性に関する幹細胞生物学

ICRP PUBLICATION 131

2

2015 年 2 月 主委員会により承認

抄録—本報告書は、国際放射線防護委員会の放射線防護体系の主たる部分をなす放射線の確率的影響と関連のある問題に関して、幹細胞/前駆細胞およびそれらの電離放射線応答のレビューを提示するものである。幹細胞の特性、維持および再生、年齢に伴う変化、幹細胞「ニッチェ」における存在、そして急性および遷延被ばくに対する放射線感受性に関する最新情報は、造血組織、乳腺、甲状腺、消化管、肺、皮膚および骨に関する付属書として一連のかんりのレビューに提示される。この幹細胞に関する知識の基礎は、直接しきい値なし（LNT）モデル、組織間のがんリスク、線量率効果や、被ばく時の年齢および到達年齢による放射線発がんリスクの変化などの問題に関する生物学的洞察を提示するために報告書の本文で用いられる。

本書で考慮される組織はすべて幹細胞集団を有するとはいえ、生物学ならびに幹細胞および前駆細胞の関連放射線生物学に関する知識は、造血組織、腸粘膜や表皮など、かなり迅速に再生する組織の方が進んでいる。幹細胞の維持、再生および応答の重要な特質はニッチェ定着において働く微小環境シグナルであり、組織によってはその明確な空間的位置が特定されている。発がん上の標的細胞の同一性は、ほとんど静止しており、したがって悪性腫瘍に帰着するために必要な長期にわたる突然変異配列を蓄積しうる、より原始の幹細胞集団を引き続き指摘している。さらに、造血組織や皮膚など、特定のケースにおいては、娘の前駆細胞が標的細胞となる可能性も多少ある。幹細胞を突然変異の蓄積から保護することに寄与しうるとされる生物学的プロセスはいくつかある。すなわち、(a) 正確な DNA 修復、(b) 損傷幹細胞死の迅速な誘導、(c) 突然変異体が分化中の娘細胞に渡され親細胞には保持されないようにするための、一部の組織系における分裂時の DNA 親鋳型鎖の保持、そして(d) 無傷の幹細胞が損傷した幹細胞をニッチェ定着のために駆逐する幹細胞競争である。DNA 修復は主として照射から数日以内に起こるが、幹細胞競争は組織のタイプによって数週間または何カ月も必要とする。

上述のプロセスは組織間の放射線発がんリスク値の違いに寄与するかもしれない。それらのプロセスは、LNT モデルならびに相対および絶対リスクモデルと関連のある機構的洞察も提供する。放射線生物学的知識はまた、放射線防護ガイドラインの中で現在用いられている線量・線量率効果係数の検討に関する科学的洞察ももたらす。さらに、生物学的情報は、子宮内被ばくの影響を含めて、放射線発がんに対する年齢依存感受性の潜在的な理由にも寄与する。

© 2015 ICRP. SAGE により発行。

キーワード：幹細胞；正常組織；放射線感受性；慢性放射線；発がん；放射線リスク

3

ICRP Publication 131（下訳版：平成 30 年 3 月）

ICRP の代表たる筆者

O. NIWA, M.H.BARCELLOS-HOFF, R.K. GLOBUS, J.D. HARRISON
J.H. HENDRY, P. JACOB, M.T. MARTIN, T.M. SEED, J.W. SHAY,
M.D. STORY, K. SUZUKI, S. YAMASHITA**序文**

本報告書は、国際放射線防護委員会（ICRP）第 1 専門委員会のタスクグループによって、次の付託事項に基づいて作成された：(a) 放射線発がんのメカニズムに関して幹細胞生物学および放射線生物学をレビューすること、(b) 異なる組織における幹細胞および関連細胞の応答をそれぞれのがんリスクと比較し、幹細胞、前駆細胞および幹細胞ニッチェのもっともらしい役割を解明すること、(c) 短期放射線および慢性照射シナリオにおける確率的リスクの予測のための指針となる原則の検討において、幹細胞/前駆細胞生物学、放射線応答および均一な急性被ばくによる発がんリスクに関する知識を利用すること。

ICRP はその勧告およびさまざまな報告書の中で、さまざまな組織において発がんの原因となる標的細胞の位置および放射線応答についてさまざまな判断および仮定を行ってきた。ほとんどの場合、標的細胞は組織幹細胞であると考えられるが、それらの娘の前駆細胞である場合もある。これらの細胞の再生および放射線応答は年齢とともに変化し、それらの「ニッチェ」定着によるシグナルに左右される。幹細胞が標的細胞である根本的な証拠は近年増加している。この証拠は発がんに関する生物学的基礎の理解に寄与するとともに、ヒトの応答のモデリングを支援するのに役立つ。この標的細胞/幹細胞のテーマに関する報告書は、異なる組織における放射線発がんリスクに関する標的細胞のあらゆる証拠を初めて共通の枠組みおよび視野に入れるために今日のかつ有用であろうと考えられた。

直線しきい値なしモデル、線量率効果、標的細胞の位置、組織リスク係数や放射線に対する年齢依存感受性など、ICRP にとって引き続き重要な特定の問題に関して幹細胞の知識を扱うには、異なる臓器系における証拠をレビューすることが必要だった。これは、選ばれた一連の特性が異なる 7 つの臓器系それぞれについて、共通のテンプレートを用了別個のレビューとして一連の付属書をまとめることによって行われた。これらの付属書（および筆者）は以下のとおりである。

付属書 A. 造血組織：放射線誘発白血病において幹細胞および系列コミット前駆細胞が果たす役割（T.M. Seed）

付属書 B. 乳腺幹細胞（M.H. Barcellos-Hoff）

4

付属書 C. 甲状腺幹細胞 (K. Suzuki および S. Yamashita)
 付属書 D. 消化管幹細胞 (J.H. Hendry)
 付属書 E. 肺幹細胞 (J.W. Shay, M.D. Story および P. Jacob)
 付属書 F. 皮膚幹細胞および放射線発がん (M.T. Martin)
 付属書 G. 骨幹細胞 (J.D. Harrison および R.K. Globus)

ヒトと実験動物両方の臓器系に関する情報がレビューされ、がんリスクにおけるさまざまな幹細胞プロセスの考えうる役割が予測された。タスクグループのメンバーは、以下のとおりだった。

O. Niwa (議長)	J.H. Hendry	T.M. Seed
M.H. Barcellos-Hoff	M.T. Martin	K. Suzuki

通信メンバーは、以下のとおりだった。

R.K. Globus	P. Jacob	M.D. Story
J.D. Harrison	J.W. Shay	S. Yamashita

主委員会の批評的レビュー者は、以下のとおりだった。

J.D. Boice Jr

特に R. Cox および C.S. Potten (2012 年 8 月 3 日死去)；第 1 専門委員会メンバーの S. Bouffler, D. Laurier, A.J. Sigurdson, M. Tirmarche, R. Wakeford および W. Doerr；主委員会メンバーの D. Cool, C. Sousins, C-M. Larsson および J. Lee；そして C. Land, N. Nakamura, A. Noda, D. Preston, J. Preston, R. Shore および C. Streffer からは、多くの有用なコメントが寄せられた。

本報告書の作成期間における第 1 専門委員会のメンバーは、以下のとおりだった。

(2009～2013)

J. Preston (委員長)	S.C. Darby	F.A. Stewart
W.F. Morgan (副委員長)	J.H. Hendry	D.O. Stram
W. Rühm (書記)	N. Nakamura	M. Tirmarche
T.V. Azizova	S. Salomaa	R. Wakeford
R. Chakraborty	A.J. Sigurdson	P-K. Zhou

(2013～2017)

W.F. Morgan (委員長, 2015 年 11 月 14 日死去)	R. Chakraborty	D.O. Stram
	W. Doerr	Q. Sun
A.J. Sigurdson (副委員長, 2015 年まで)	S. Salomaa	M. Tirmarche
S. Bouffler (副委員長, 2015 年から)	M. Hauptmann	R. Wakeford
W. Rühm (書記)	D. Laurier	A. Wojcik (2015 年から)
T.V. Azizova	P. Rajaraman	
N. Ban		

総括

(a) 国際放射線防護委員会 (ICRP) は、放射線防護体系に関する新たな勧告を *Publication 103* (ICRP, 2007) として発行した。がんおよび遺伝性影響である放射線の確率的影響も考慮された。委員会は以前に、*Publication 59* (ICRP, 1992) における皮膚がんリスク、*Publication 79* (ICRP, 1998) におけるがんに対する遺伝学的感受性、*Publication 90* (ICRP, 2003) における出生前照射後の生物学的影響 (胚および胎児) や、*Publication 99* (ICRP, 2005) における放射線関連がんリスクの低線量外挿など、放射線によるがん誘発のさまざまな側面をレビューした。もっと最近になって、委員会は、*Publication 115* (ICRP, 2010) においてラドンによる肺がんリスクを、また *Publication 118* (ICRP, 2012) において組織反応 (確定的影響) に対応するしきい線量もレビューした。

(b) がんは単一標的細胞における突然変異変化の結果として生じ、根本的に重要な側面はがん誘発の原因となる標的細胞の性質および特性

である。以前は、それ以上の詳述なしに、ほとんどの場合、標的細胞は当該組織における「幹細胞」であると仮定されてきた。近年は、幹細胞、娘の前駆細胞および分化した機能細胞の系列に関する知識が著しく増進している。また、異なる組織における調節シグナルや、それらの組織が損傷に応答する方法に関する知識も蓄積している。それゆえ今般、放射線発がんモデルと関係のある、幹細胞およびそれらの調節プロセスの分野の諸側面をレビューするのが適切であると考えられた。しかし、異なる組織における標的細胞としての幹細胞に関して、また年齢効果を含めた、電離放射線被ばく後の発がんメカニズムの包括的なレビューは最近行われてはいない。

(c) 本報告書の本文は 1~3 章からなる。これに続くのは、造血系、乳腺、甲状腺、消化管、肺、皮膚および骨における幹細胞に関する詳細なレビューからなる付属書 A~G である。選択は、放射線防護の目的上の重要性ならびに利用可能な放射線生物学的知識および関心の範囲に基づいて行われた。ICRP による放射線防護の枠組みの上での本刊行物の主たる意味合いは、以下のとおりである。

- **発がん上の標的細胞およびそれらの位置。** 組織幹細胞は第一に、発がん上の標的細胞とみなされる。造血組織、結腸粘膜および表皮においては、前駆細胞も標的細胞である証拠が多少ある。微小環境「ニッチェ」は幹細胞維持の重要な調節因子かつ幹細胞応答の修飾因子であり、動物研究により、幹細胞ニッチェはこれらの再生組織中に位置することがわかっている。
- **直線しきい値なし (LNT) モデルおよび相対リスク (RR) モデル。** 単一幹細胞が放射線誘発がんの原因であること、突然変異論、そして多重突然変異の要件は、一部の組織および臓器に対する LNT アプローチと整合する。発がんは主として、次の 3 つのメカニズム因子に依存する：(a) 幹細胞の数および放射線誘発突然変異に対する感受性、(b) 組織における突然変異幹細胞の保持、(c) 素因となる突然変異体の数が十分な幹細胞の集団サイズ。本報告書では、過剰 RR (ERR) 関数は主として、放射線誘発突然変異に対する細胞の感受性および素因を有する幹細胞の保持を反映する。これら 2 つの因子に加えて、過剰絶対リスク (EAR) 関数は素因を有する幹細胞の集団サイズを反映するため、幹細胞に関してより複雑であるが包括的であり、幹細胞集団が放射線発がん上の標的である。現在のところ、生涯の幹細胞分裂回数×幹細胞総数が、幅広いさまざまな組織における自然発生（自発性）がんの罹患と関連する重要な因子であると主張されている。しかし、これのみでは、がんの自然発生についても放射線誘発がんについてもいくつかの特質を説明することができない。また、リスク転移が主として ERR に基づく組織の場合、RR モデルと組み合わせた LNT モデルは、ある種のがんの根底にあるバックグラウンドリスクを低減する何らかのリスク低減対策は放射線関連がんリスクの低減においても有効かもしれないことを暗示している。この点を例証するならば、喫煙の減少はラドン関連肺がんリスクを低減する。とはいえこの場合は、リスク転移のために相対リスクモデルと絶対リスクモデルの組み合わせが用いられる。
- **線量・線量率効果係数 (DDREF) の値。** DDREF の値については最近大いに論じられており、低い値が提言されている疫学的研究がある一方、それより高い値が見出される研究もあり、動物系によっては解明が必要である。本報告書においてレビューされた情報から、構成

要素たる係数の線量効果率係数 (DEF) および線量率効果係数 (DREF) は、生物学的レベルでは概念的に異なるものとみなしてよいことが明らかである。前者は急性低線量の場合にあてはまり、後者は組織における標的細胞/幹細胞の長期動態が線量応答を修飾するかもしれない慢性低線量の場合にあてはまる。

- **低線量率における応答修飾メカニズム。** >0.5 Gy の急性線量後に細胞系および動物系においてゲノム不安定性効果およびバイスタンダー効果が存在することの証拠は多いが、ほとんどの場合、これらの効果は線量と非線形関係にあり、低線量への外挿を問題をはらむものにする。≤100 mGy を用いた関連動物研究では、また原爆被爆者のリンパ球においては、ゲノム不安定性効果は存在しないまたは小さいものだった。また、適応現象に関する動物研究も線量および組織のタイプに伴う変動を示しており、ここでもまた、放射線防護の枠組みへのいかなる頑健な組み込みも困難にする。別のメカニズムは DNA 不死配列仮説であり、これによって親の DNA 鎖が幹細胞に保持され突然変異体は娘細胞に渡されるため、全体的な突然変異負荷量を低減する。しかし、この証拠は組織のタイプおよび手法の間で変動する。さらなるメカニズムは、照射を受けなかった幹細胞が照射を受け損傷した幹細胞を幹細胞ニッチェにおける定着のために駆逐する場合であり、これは幹細胞の補充における突然変異を低減するだろう。実験系におけるこの証拠は多少あるが、ヒトの場合における意味合いは現在のところ不確かである。
- **放射線発がんに対する年齢依存感受性。** 放射線発がんに対する年齢依存感受性は、次のように要約することができる：胚および胎児段階は低~中；子供は高；成人は低で、年をとるのに従って高くなる可能性がある。幹細胞の点では、発育の胎児段階で被ばくした幹細胞は、放射線によって損傷した幹細胞が新たに確立された限られた数の幹細胞ニッチェに定着するために照射を受けなかった幹細胞と激しく競争する新生児成長の間は保持されそうにないと考えうる。対照的に、幼少期における高い感受性は、幹細胞競争がそれほど厳しいものではないとすれば理解しうる。幼少期の成長時には組織体積の増大に対処するために幹細胞/ニッチェ単位の数が増加するからである。しかし、放射線発がんの年齢依存パターンに関する真の機構的洞察は、現在のところ欠けている。

用語解説

α/β 値または比 [α/β value or ratio]

細胞生存曲線の曲率の尺度。 α/β 値は、細胞致死の直線成分と二次成分が等しい線量でもある。組織の場合、 α/β 値は線量分割の変化に対する感度の尺度である。インビボでは、 α 成分は低線量における線量-応答勾配を描写し、これは線量率とは無関係とみなされることがよくあるが、慢性放射線シナリオにおいては細胞再生および細胞競争プロセスによって修飾されることがありそうである。 β 成分はより高い線量における累積損傷による勾配増大を描写し、これは分割または低線量率被ばくの間には修復可能である。

絶対リスク (AR) [Absolute risk (AR)] 有害な健康影響のリスク。すなわち、ある特定期間にわたる特定の健康事象（たとえば、疾患罹患）の発生確率または発生率。
吸収線量, D [Absorbed dose] 物質の特定の点において電離放射線によって単位質量あたり与えられるエネルギー。吸収線量の SI 単位はキログラムあたりのジュール ($J\ kg^{-1}$) であり、その固有名称はグレイ (Gy) である。
活性 (赤色) 骨髄 [Active (red) bone marrow] 骨髄には、多能性造血幹細胞 (HSC) から始まり成熟した血球に至る血球形成のための細胞系が含まれる。
適応応答 [Adaptive response] 前もって線量を与えられた後の細胞または組織の放射線抵抗性の増大もしくは、慢性被ばく条件下で生物体が生存能力を保持するとともにあらゆる組織、臓器および系の生殖能力および正常な機能的安定性を維持することを可能にする放射線被ばくへの順応。放射線適応の主たる判断基準は、生物体およびその決定臓器の細胞の放射線抵抗性 (耐性) の増大である。
アデノーマ, 腺腫 [Adenoma] 腺にできる良性腫瘍。アデノーマは、結腸、副腎、下垂体、甲状腺や前立腺などを含む多数の臓器から生じうる。これらの腫瘍は良性であるとはいえ、時間とともに進行して悪性となることがあり、その段階においては「腺がん」と呼ばれる。
AML/eto [AML/eto] 染色体相互転座 t(8,21)(q22, q22)によって生じる急性骨髄性白血病 (AML) 関連キメラ遺伝子/遺伝子産物。
アポトーシス [Apoptosis] 細胞核が特徴的な濃染性の小球を呈し、少なくともデオキシリボ核酸 (DNA) の一部がその後にヌクレオソーム間の単位に分解される細胞死の様式。「プログラムされた」ものであると仮定されることもあるため、潜在的に制御可能なプロセス。
非対称分裂 [Asymmetric division] 2つの異なる種類の娘細胞を生み出す細胞分裂 (たとえば、幹細胞と前駆細胞の両方を生み出す組織幹細胞) (「不死配列仮説」を参照)。
ベースライン疾患率 [Baseline disease rates] 研究対象作用因子への曝露がない場合に集団において観察される年間の疾患罹患率。
切断点クラスター領域/エイブルソン遺伝子 (Bcr/abl) [Breakpoint cluster region/abelson (Bcr/abl)]

特有の慢性骨髄性白血病 (CML) 関連ゲノム再編成。
胚盤胞 [Blastocyst] 脊椎動物の懐胎初期に形成される構造。桑実胚がこれに先行する。胚盤胞は、その後に胚を形成する内部細胞塊 (胚結節) および、内部細胞塊と「胞胚腔」として知られる液体で満たされた空洞を取り囲む外部細胞層 (栄養膜) を有する。ヒトの胚盤胞は、70~100 の細胞からなる。
敷石状形成細胞検査/敷石形成細胞検査 (CAFC/CACA) [Cobblestone area forming cell/cobblestone area cell assay (CAFC/CACA)] 骨髄における原始自己複製造血前駆細胞のインビトロアッセイを表す略語。
ケアテーカー遺伝子 [Caretaker genes] ケアテーカー遺伝子は、ゲノムを安定させる遺伝子産物をエンコードする。
細胞死 [Cell death] 放射線生物学との関連では、細胞死は一般に、「増殖能の喪失」と呼ばれることがよくあるクローン形成能の恒久的喪失を導くいかなるプロセスにも等しい。細胞死は、アポトーシス、壊死やオートファジー、また時には早期老化や早期分化などのさまざまなプロセスによる物理的な死も当てはまる。
チェックポイント [Checkpoint] 損傷した細胞が拘束された後、細胞周期の次の局面へ進むために回復を経て解放される、細胞周期における時点。
クロモソリプシス (染色体破砕) [Chromothripsis] 関係する領域にわたってあちこちを行き来する、1つまたは少数の染色体の明確に限定された領域に伴う多重のゲノム再編成。
クローン形成性細胞 [Clonogenic cells] 子孫の拡大ファミリー (通常、少なくとも 50 個) を生み出す能力を有する細胞。「コロニー形成細胞」または「増殖性細胞」とも呼ばれる。
クローン形成生存率 [Clonogenic surviving fraction] 細胞死を引き起こす作用因子への曝露もしくはそれを用いた処置を生き残るクローン形成性細胞の割合。コロニーを形成することができる細胞 (クローン形成性細胞) のみが処置を生き残っているとみなされる (「細胞死」を参照)。
DNA 方向特異的染色体分染法 (CO-FISH) [Chromosome orientation-fluorescence in-situ hybridisation technique (CO-FISH)]

姉妹染色分体の分離はランダムであるのか否かを確認するために用いることができる。
コロニー [Colony] 単一のクローン形成性細胞に由来する細胞のファミリー。
複合組織（「柔軟組織」または「条件的再生組織」とも呼ばれる） [Complex tissues (also called 'flexible tissues' or 'conditional renewing tissues')] 同じ細胞において機能と増殖の両方が交互に起こりうる細胞集団。
信頼限界または信頼区間 [Confidence limits or intervals] データと統計学的に矛盾しないパラメータの最低推定値および最高推定値を与える区間。95%信頼区間の場合、この区間にそのパラメータが含まれる可能性が 95%ある。
サイトカイン [Cytokines] 本来はリンパ球から放出され免疫系の維持に関与するポリペプチドと定義された、生物学的機能を有する有機分子。これらの因子は、造血細胞だけでなく他の多くの細胞種にも多面的効果を及ぼす。同義語として「増殖因子」と呼ばれることがよくある。
累積線量 [Cumulative dose] 一定期間にわたる反復的な電離放射線被ばくに起因する総吸収線量。
D_0 [D_0] 細胞生存率を表す多標的式におけるパラメータ。平均して細胞あたり 1 つの致死事象を生み出し、生存率曲線の指数部において生存率を先行する値の e^{-1} （すなわち 0.37）へと低減する放射線量。
線量・線量率効果係数 (DDREF) [Dose and dose-rate effectiveness factor (DDREF)] 低線量および低線量率における放射線被ばくの生物学的効果（単位線量あたり）は高線量および高線量率における被ばくと比較して通常は低いことを一般化した、判断による係数。線量効果係数と線量率効果係数が含まれる。
線量率 [Dose rate] 単位時間あたり照射され、たとえば Gy h^{-1} の単位で測定された吸収放射線量。
線量率効果 [Dose-rate effect] 放射線量率の低下に伴って放射線応答が低下すること。
素線量 [Elemental dose]

単一の放射線飛跡によって細胞核に与えられる最低線量。
胚性幹 (ES) 細胞 [Embryonic stem (ES) cells] 胚体全体のさらなる発育を担う、胚盤胞の内部細胞塊における細胞。
エピジェネティック影響、あるいは遺伝子配列の変化を伴わない影響 [Epigenetic effects] エピジェネティック変化は、継承はされるが遺伝子情報の変化は意味しない細胞特性の変化からなる（たとえば、メチル化の影響）。これらは、遺伝子型の変化を伴わずに表現型に影響を及ぼす。
上皮 [Epithelium] 身体およびその臓器の最外側および最内側表面の被覆を形成する、1 つ以上の細胞層からなる膜組織。
エリスロポエチン、赤血球造成因子 [Erythropoietin] 赤血球数を調節するとともに、晩期赤血球前駆細胞を刺激して赤血球の小さなコロニーを形成するサイトカイン。
過剰絶対リスク (EAR) [Excess absolute risk (EAR)] 基礎となる（ベースライン）疾患リスク（または割合）を超える、放射線被ばくによる付加リスク（または割合）。これは、Gy あたりまたは Sv あたりの EAR として表されることがよくある。
過剰相対リスク (ERR) [Excess relative risk (ERR)] 被ばく集団における放射線誘発疾患の割合を同じバックグラウンドリスク因子（年齢、性別、人種など）を有する非被ばく集団における疾患割合で除したものの過剰な部分（パーセンテージ）。これは、Gy あたりまたは Sv あたりの ERR として表されることがよくある。
指数関数型生存率曲線 [Exponential survival curve] 片対数グラフでは直線である、しきい値または肩領域を持たない生存率曲線。
蛍光依存細胞分別法 (FACS) [Fluorescence-activated cell sorting (FACS)] 特定の細胞表面マーカーを用いて幹細胞を同定するために用いることができる。
分割および線量照射パターン [Fractionation and dose delivery patterns] 放射線の分割あたりの線量は、総線量を特定の分割回数に分けたものである。非常に多数の極小線量分割は、低線量率被ばくに等しくなる。長期にわたって延々と続く極めて低い線量率は、「慢性被ばく」と呼ばれる。
分割感度 [Fractionation sensitivity]

分割あたりの線量に対する等効吸収放射線量の依存性。通常は α/β 値によって定量化される一分割感度が高いと α/β 値は低いという特徴がある（「 α/β 値」を参照）。
γH2AX フォーカス [γH2AX foci] 電離放射線によって引き起こされる DNA 切断端の同定。H2AX は、ヒストン H2A をコードする複数の遺伝子の 1 つである。H2AX は、DNA 二本鎖切断 (DSB) における反応としてセリン 139 がリン酸化されると、「 γ H2AX」と呼ばれる。 γ H2AX は、細胞における DSB を調べるための感受性標的である。
腹壁破裂 [Gastroschisis] 腹部内容物がそれによって自由にはみ出る前腹壁における欠陥によって特徴づけられる先天的欠陥。
原腸陥入 [Gastrulation] 単層の胞胚が外胚葉、中胚葉および内胚葉からなる 3 層の原腸胚へと再構成される、ほとんどの動物の胚発育における初期段階。
GATA 配列結合タンパク 2 (GATA-2) [GATA binding protein 2 (GATA-2)] 初期造血前駆細胞のためにジンクフィンガー DNA 結合ドメインの転写因子/調節遺伝子/遺伝子産物をエンコードするマスター調節遺伝子。
ゲートキーパー遺伝子 [Gatekeeper genes] ゲートキーパー遺伝子は、潜在的ながん細胞の増殖を防止するとともに細胞増殖の増加を直接導く突然変異の蓄積を防止するために作用する遺伝子産物をエンコードする。
ゲノムの完全性 [Gnomic integrity] 細胞のゲノムの構造的および機能的内容の保存。
顆粒球コロニー刺激因子 (G-CSF) [Granulocyte colony-stimulating factor (G-CSF)] 前駆細胞から顆粒球への増殖と分化を刺激するサイトカイン。
顆粒球マクロファージコロニー刺激因子 (GM-CSF) [Granulocyte-macrophage colony-stimulating factor (G-CSF)] 前駆細胞から顆粒球、マクロファージおよび好酸球への増殖と分化を刺激するサイトカイン。
グレイ (Gy) [Gray (Gy)] 吸収線量の SI 単位を表す固有名称：1 Gy=1 J kg ⁻¹ 。

増殖因子 [Growth factor] 細胞表面の受容体と結合すると細胞増殖を刺激する有機分子。同義語として「サイトカイン」と呼ばれることがよくある。
増殖分画 [Growth fraction] 活発に細胞増殖している生存細胞の割合。
階層型組織 [Hierarchical tissues] 幹細胞、前駆（遺伝子増幅）細胞および分裂終了（分化または成熟）細胞の系列からなる組織。
高線エネルギー付与 (LET) 放射線 [High linear energy transfer (LET) radiation] LET が高い放射線。たとえば、アルファ粒子、重イオンや高速中性子の相互作用生成物。飛跡に沿った電離密度が高い。
相同組換え (HR) [Homologous recombination (HR)] HR は、姉妹 DNA 鎖の完全な写しを複製することによって DNA の損傷領域を修復するために S および G ₂ 期の細胞において起こる。HR は潜在的にエラーフリーである。
形成不全 [Hypoplasia] 組織における細胞数の減少（たとえば、早期応答性組織における放射線誘発増殖障害による）。
ヒポキサンチン-グアニンフォスホリボシルトランスフェラーゼ (Hprt) 検査 [Hypoxanthine-guanine phosphoribosyltransferase (Hprt) assay] Hprt 検査は、哺乳類のインビトロ細胞遺伝子突然変異検査である。X 染色体上に位置する「Hprt」と呼ばれるレポーター遺伝子における突然変異頻度の推定は、研究対象細胞種における吸収線量の生物学的影響に関する情報を提供しうるため、有用な生物学的線量評価手段である。
不死配列仮説 [Immortal strand hypothesis] 幹細胞における複製エラーを最小化するための DNA 鎖の非対称分離。幹細胞は 1 回の DNA 合成後に DNA 鋳型鎖を保持するが、前駆細胞は娘の鎖を受け継ぐ。
罹患 (罹患率) [Incidence (incidence rate)] 特定期間内の集団における疾患発生率であり、100,000 人あたり年あたり、すなわち 100,000 人・年あたりの疾患発生件数で表されることがよくある。
初期勾配 [Initial slope]

細胞生存率曲線の初期部分の勾配であり、線形二次モデルでは通常、 α 値によって示される。
間期死 [Interphase death] 照射された細胞の、有糸分裂に至る前の死。「アポトーシス」の同義語として用いられることもある。
ノックアウトマウス [Knockout mice] 1つ（以上）の遺伝子が無効化されているマウス。
ラベル保持細胞 (LRCs) [Label-retaining cells (LRCs)] 複数回の細胞分裂を通して DNA ラベルを保持する細胞。
生涯リスク [Lifetime risk] 所定の年齢までの、何らかの特定の原因による罹患または死亡の累積リスク。
線エネルギー付与 (LET) [Linear energy transfer (LET)] 荷電粒子の飛跡に沿ったエネルギー損失率であり、通常は $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ の単位で表される。
直線しきい値なし (LNT) 線量応答モデル [Linear-no-threshold (LNT) dose-response model] 低線量領域では、ゼロより大きいいかなる放射線量も、過剰がんおよび/または遺伝性疾患リスクを単純比例で増加させることになるという仮説に基づく線量応答モデル。
線形二次 (LQ) 線量応答モデル [Linear-quadratic (LQ) dose-response model] ある影響 E (たとえば、疾患、死亡や異常) のリスクを、線量に比例する 1 つの成分 (線形項) と線量の二乗に比例するもう 1 つの成分 (二次項) という 2 つの成分の和として表現する統計モデル。 $E = \alpha D + \beta D^2$ であり、ここで D は線量である。細胞生存率の場合、 $S = \exp -(\alpha D + \beta D^2)$ である。
低線エネルギー付与 (LET) 放射線 [Low linear energy transfer (LET) radiation] LET が低い放射線。たとえば、電子、X 線やガンマ線。
リンパ系 [Lymphatic system] 全身から組織液を集めて血液に戻す、内径がさまざまなリンパ管のネットワーク。「リンパ節」と呼ばれるリンパ球の集まりは、リンパ管の経路に沿って位置する。
マクロファージ・コロニー刺激因子 (M-CSF) [Macrophage colony-stimulating factor (M-CSF)]

多能性造血細胞からのマクロファージの形成を刺激するサイトカイン。
マンモスフィア [Mammosphere] 単一乳腺細胞に由来する細胞のスフェロイド。マンモスフィアからの単一細胞は、乳房脂肪体に移植されると乳腺全体を再生することができる。
腸管多腫瘍発症 (Min) マウス [Multiple intestinal neoplasia (Min) mouse] Min マウスは、大腸腺腫症 (Apc) 遺伝子の生殖細胞短縮型変異のために遺伝学的にヘテロ接合型であり (すなわち、 $\text{Apc}^{\text{Min}+/}$)、生後数週間以内に腸管に多発性腸腫瘍および散発性結腸腫瘍を発症する。Min マウスは、照射されたマウスにおける腫瘍形成研究のための感受性モデルを提供する。
多段階発がんモデル [Multistage carcinogenesis model] がん遺伝子およびがん抑制遺伝子の突然変異の段階的獲得と関連する発がんモデルであり、外部増殖因子の漸進的喪失を伴う。
壊死 [Necrosis] 細胞膜の完全性の喪失と関連する細胞死。たとえば腫瘍の無酸素領域において生じ、照射後の細胞死の様式でもある。
過去に喫煙経験のない非喫煙者 [Never-smokers] 一度も喫煙したことがない人。
ニッチ (または幹細胞ニッチ) [Niche (or stem cell niche)] そこに幹細胞が存在し、増殖および分化を制御するさまざまなシグナルによって維持される、組織における特定の微小環境。
非同末端端結合 (NHEJ) [Non-homologous end joining (NHEJ)] NHEJ 修復は、非周期細胞において、また周期のあらゆる局面において多様に起こり、修復タンパク質 Ku70, Ku80 および DNA 依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット (DNA-PKcs) に依存する。
非喫煙者 [Non-smokers] 喫煙しない人。
非標的効果 [Non-targeted effects] バイスタンダー効果やゲノム不安定性の誘発など、自身は照射されないが隣接する細胞または親細胞が照射される細胞において生じる効果。

がん遺伝子, 腫瘍遺伝子 [Oncogene] 突然変異または過剰発現すると, 正常細胞のがん細胞への転換に寄与する遺伝子。
毛母腫 [Pilomatricoma] 毛母基および毛幹の原始細胞から生じる, ゆっくり成長する良性皮膚腫瘍。
血小板由来増殖因子 (PDGF) [Platelet-derived growth factor (PDGF)] 線維芽細胞の増殖を誘導し, 創傷の治癒に関与するサイトカイン。また, 一部の上皮細胞と内皮細胞に, そして間葉細胞にも作用する。
ポアソン分布 [Poisson distribution] 事象発生の確率は低い観測の件数が多い場合にあってはまる分布。確率分布はゼロから無限大に及び, 平均が分散に等しいことが分布の重要な特性である。
潜在性致死損傷修復 (PLDR) [Potentially lethal damage repair (PLDR)] 細胞分裂が起こる前に, 照射後の遅延期間において起こる DNA 修復。
プログラム細胞死 [Programmed cell death] 細胞内の分子によって行われる能動的プロセスの結果として起こる細胞死。例にはアポトーシス, オートファジー, 終末分化, 老化, そして壊死までも含まれる。
防護量 [Protection quantities] 放射線防護のために委員会が策定している, 全身と身体部分両方の外部照射および放射性核種の摂取による人体の電離放射線被ばくの程度の定量化を可能にする線量関連量。
放射線増感剤 [Radiosensitiser] 放射線に対する細胞および組織の感受性を増大させるあらゆる薬品。一般的には, フリーラジカルによる損傷の修復における酸素によく似た電子親和性化学薬品にも用いられるとはいえ, これらはより正確には「低酸素細胞増感剤」と呼ばれるべきである。
放射線感受性 (細胞の) [Radiosensitivity, cellular] 電離放射線被ばくを生き残ることに対する細胞の感受性。通常は, 2 Gy における生存率 (すなわち SF ₂) によって, もしくは LQ 式または多標的式的パラメータによって示される。
Ras [Ras]

ラット肉腫がん原遺伝子/低分子量グアナシン三リン酸加水分解酵素 (GTP アーゼ) タンパク質/細胞の増殖, 分化および細胞生存率に関与する基本的な細胞シグナル伝達因子。
Rb [Rb] がん抑制機能を有する網膜芽細胞腫がん原遺伝子。過剰な細胞増殖を制限する。
活性酸素種 (ROS) [Reactive oxygen species (ROS)] スーパーオキシド, 過酸化水素やヒドロキシルラジカルなどの分子種。これらの種は, 細胞シグナル伝達プロセスにおいて作用することがある。レベルが比較的高い場合, これらの種は細胞の高分子 (DNA や RNA など) を損傷し, 細胞死プロセスに関与するかもしれない。
回復 [Recovery] 細胞レベルでは, 線量分割間または低線量率照射中の時間の関数としての, 細胞生存率の増加。組織レベルでは, 分割の時間間隔の増大および分割あたりの線量の低減に伴う, もしくは低線量率照射に伴う, 組織の等効果総線量の増加。
生物学的効果比 (RBE) [Relative biological effectiveness (RBE)] 等しい生物学的効果を与える対象試験放射線の線量に対する低 LET 基準放射線 (通常は ⁶⁰ Co ガンマ線またはキロボルト X 線品質) の線量の比。RBE の値は, 対象とされる線量, 線量分割および生物学的エンドポイントによって変わる。
相対リスク (RR) [Relative risk (RR)] 基礎となるベースラインリスクと比べたリスク全体 (すなわち, 放射線誘発リスクを含む) の表現。総リスクが基礎となるベースラインリスクの 2 倍であるならば, RR は 2 である。
細胞の増殖能 [Reproductive integrity of cells] 何度も (通常は 5 回超) 分裂する, したがって「クローン形成性」となる細胞の能力。
老化 [Senescence] 分化, 加齢または細胞損傷に伴う細胞増殖の恒久停止。
傍細胞 (SP) [Side population (SP)] フローサイトメトリーにおいて, 用いられるマーカーに基づくと標識集団とは異なる細胞亜集団。DNA 結合色素 Hoechst 33342 のより強い排出を示す細胞であることがよくある。定義上, SP 細胞は特異的な生物学的特性を有するが (たとえば, これらは幹細胞のような特性を呈することがある), この特異性の正確な性質は SP の同定において用いられるマーカーに依存する。

シーベルト (Sv) [Sievert (Sv)]	放射線防護における等価線量, 実効線量および実用線量の SI 単位を表す固有名称。単位はキログラムあたりのジュール (J kg^{-1}) である。
SKY 染色体分染法, または 24 色染色体分染法 [Spectral karyotyping (SKY) analysis]	特有標識の染色体固有プローブを含有する SKY プローブ混合物を用いて前処理されハイブリダイズされた中期細胞を用いる, 細胞の染色体の内容の SKY。
遅い修復 [Slow repair]	数週間～数年の時間尺度で起こる放射線耐性の長期的な回復であり, 長期的な細胞内修復を伴うことがよくある。
スフェロイド [Spheroids]	単一細胞の多分裂によって培養で作られ出される細胞の凝集塊。スフェロイドは正常細胞と悪性細胞のいずれからも作り出すことが可能であり, 後者は腫瘍転移のモデルとして用いられることがよくある。
幹細胞 [Stem cells]	無限増殖能を有し, 自己複製および分化を行って, ある系列組織のあらゆる種類の細胞を生み出すことができる細胞。幹細胞は全能性(あらゆる系列を生み出す)と評されるが, その娘の前駆細胞は多能性(多数の系列を生み出す), 複能性(複数の系列を生み出す)もしくは単能性(1つの系列)でありうる。
幹細胞能 [Stemness]	自己複製ならびに分化した子孫を生み出す能力の根底にある幹細胞特性。階層型系列組織によっては, より原始の幹細胞とそれほど原始ではない幹細胞の間で幹細胞能の度合いに差がある。
放射線の確率的影響 [Stochastic effects of radiation]	影響の重篤度ではなく影響の発生確率がしきい値なしの線量の関数とみなされる悪性疾患または遺伝性影響。
亜致死損傷修復 (SLDR) [Sublethal damage repair (SLDR)]	低線量率被ばく中もしくは線量分割間に起こり, 総線量が急性として照射された場合を下回る細胞致死または組織応答に帰着する DNA 修復。
標的効果 [Targeted effects]	照射された細胞において生じる効果。

テロメア [Telomeres]	染色体の末端。細胞老化の決定因子の 1 つは, DNA 複製によるテロメアの喪失である。迅速に複製する細胞は通常, テロメアの短縮を避けるためにテロメラーゼ活性を有する。テロメアの短縮は, ゲノム不安定性および発がんとも関連する。
奇形がん [Teratocarcinoma]	胎児性がんまたは絨毛がん, もしくはその両方の要素を伴う奇形腫の要素からなる悪性新生物であり, 精巣に生じることが最もよくある。
組織加重係数, w_T [Tissue weighting factor]	身体の均一照射に起因する健康損害全体に対する組織または臓器の相対寄与を表現するために, 組織または臓器 T における等価線量に加重される係数。
形質転換増殖因子 β (TGF β) [Transforming growth factor β (TGF β)]	胚発生および組織恒常性に不可欠な生物学のプロセスの多くを調節し, したがって一部の組織の治癒において役割を果たすサイトカイン。TGF β の効果は関係する組織によって異なることがあり, たとえば, TGF β は上皮細胞の増殖を阻害するが, 線維芽細胞においては増殖, 分化およびコラーゲン合成を刺激する。
前駆細胞 [Transit cells]	階層型組織において細胞産生を増幅する分化中の増殖性細胞。
転座 [Translocations]	染色体が切断し, 断片が別の染色体と再結合するときに起こる染色体異常。転座には, 構造的に異なる多くの種類がある。
栄養外胚葉 [Trophectoderm]	外胚葉, 中胚葉および内胚葉の分化後の哺乳類の胚盤胞の外層であり, この外層は胚の外胚葉とつながっている。
がん抑制遺伝子 [Tumour suppressor gene]	がん抑制遺伝子, すなわち抗がん遺伝子は, がんへの経路に踏み出すことから細胞を保護する遺伝子である。この遺伝子が変異してその機能の喪失または低下を引き起こすと, 通常は他の遺伝子変異と重なって, 細胞はがんへと進む可能性がある。
ワーキングレベルマンス (WLM) [Working-level month]	170 h のワーキングマンスの場合に 1 ワーキングレベル (WL) の濃度において大気を吸い込むことによる累積被ばく。ラドンの場合, 1 WL は, 1.3×10^5 MeV のポテンシャルアルファエネルギーの放出に帰着することになる, 1 リットルの空気中におけるラドンの短寿命子孫核種

のあらゆる組み合わせである。1 WL=2.08×10⁵ J m⁻³。

略語集	
2D	二次元
3D	三次元
8-OHdG	8-オキシ-2'-デオキシグアノシン
53BP1	p53 結合タンパク質 1
A bomb	原子爆弾
ABC	ATP 結合カセット
ABCG2	ATP 結合カセットサブファミリーG メンバー2
ADC	腺がん
AGM	発生中の胚の大動脈/性腺/中腎領域
AKAP9	A キナーゼアンカータンパク質 9 遺伝子
AKT	v-akt マウス胸腺腫ウイルスがん遺伝子ホモログ
ALL	急性リンパ芽球性白血病
ALP	アルカリフォスファターゼ
AML	急性骨髄性白血病
Ang-1	Tie2/アンジオポエチン 1
APC	大腸腺腫症
AR	絶対リスク
AT	毛細血管拡張性運動失調症

ATM	毛細血管拡張性運動失調症変異
ATP	アデノシン三リン酸
BADJ	細気管支肺胞接合部
BAR	バックグラウンド絶対罹患率
Bax	Bcl-2 結合 X タンパク質
BASC	細気管支肺胞幹細胞
BBD	良性乳房疾患
BCC	基底細胞がん
BCL-2	同名の特異的遺伝子によってエンコードされた B 細胞リンパ腫 2 遺伝子産物
BCNS	基底細胞母斑症候群
BCRP1	切断点クラスター領域偽遺伝子 1
BEIR	電離放射線の生物学的放射線に関する米国の委員会
bFGF	塩基性線維芽細胞増殖因子
BFUe	赤芽球系列内のバースト形成単位, 初期骨髄前駆細胞
B-lymphocyte	ファブリキウス嚢と関連する体液性媒介リンパ球
Bmi1	B 細胞特異的モロニーマウス白血病ウイルス組み込み部位 1
BMP-4	骨形成タンパク質 4
BRAF	v-raf マウス肉腫ウイルスがん遺伝子ホモログ B1
BRCA	乳がん感受性
BrdU	プロモデオキシウリジン, チミジンの合成ヌクレオシド
C57BL/6	毛が黒色の近交マウス共通系統 (CC Little 系統 57) (亜系統 6)

CAFC/CACA	敷石状形成細胞検査／敷石形成細胞検査
CALLA	急性リンパ芽球性白血病共通抗原
CaM kinase	カルモジュリン依存性タンパク質キナーゼ
Car-S	発がん感受性
CBA	近交マウス共通系統（Strong 系統），骨髄性白血病感受性系統（他の系統には RFM および C3H がある）
CBCC	陰窩基底部分柱細胞
C cell	カルシトニン分泌細胞
CCSP	クララ細胞分泌タンパク質
CD34+	クラスター分類表面分子発現細胞（番号 34）
CD34 ⁺ Lin ⁻	CD34+表面抗原を発現するが特定の系列特異的表面マーカーを欠く造血幹細胞亜型
CD49f	クラスター分類の表面分子発現細胞（番号 49）
CFU-C	インピトロで定量される培養コロニー形成単位（前駆細胞）
CFUe	赤血球分化能に限られるコロニー形成単位
CFU-F	線維芽細胞様コロニー形成単位
CFU-gm	顆粒球および単球分化能に限られるコロニー形成単位
CFU-m	単球分化能に限られるコロニー形成単位
CFU-meg	コロニー形成単位－巨核球（巨核球コミット前駆細胞）
CFU-Ob	コロニー形成単位－骨芽細胞
CFU-S _{day7}	インピボで定量される脾臓コロニー形成単位（前駆細胞）（下付き文字はサンプリング期）
CHEK2	チェックポイントキナーゼ 2
CI	信頼区間

cKit ⁺	幹細胞増殖因子受容体に対する結合親和性を有するネコ肉腫ウイルスがん遺伝子 v-kit の細胞ホモログ，チロシンプロテインキナーゼ Kit
CLL	慢性リンパ性白血病
CLP	リンパ球系共通前駆細胞
CML	慢性骨髄性白血病
CMP	骨髄球系共通前駆細胞
CNS	中枢神経系
COL1	I 型コラーゲン $\alpha 1$
CO-FISH	DNA 方向特異的染色体分染法
COX	シクロオキシゲナーゼ
CS	カーネギー発生段階
CXC	CXC モチーフケモカインー特にサイトカインに結合および応答する内在性膜受容体
CXCL12	造血幹細胞（HSC）ホーミング CXC モチーフケモカインリガンド 12
DC	先天性角化不全症
DCAMKL-1	ダブルコルチンおよびカルモジュリン依存性タンパク質キナーゼ様 1
DCC	大腸がん欠失
DDREF	線量・線量率効果係数
DEF	線量効果係数
DMBA	7,12-ジメチルベンズ(a)アントラセン
DNA	デオキシリボ核酸
DNA-PK	DNA 依存性プロテインキナーゼ

DNA-PKcs	DNA 依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット
DREF	線量率効果係数
DSB	DNA 二本鎖切断
Dsh	Dishevelled
DUOX1/2	デュアルオキシダーゼ 1/2
Dusp 2	二重特異性プロテインフォスファターゼ
E	胎生期
EAR	過剰絶対リスク
EB	表皮水疱症
EGF	上皮増殖因子
EGFP	高感度緑色蛍光タンパク質
EGFR	上皮増殖因子受容体
EMA	上皮膜抗原
EMT	上皮間葉転換または移行
EpiSC	表皮幹細胞
EPU	表皮増殖単位
ER	(O)エストロゲン受容体
ERR	過剰相対リスク
ES	胚性幹
ESA	上皮細胞表面抗原
eto	11 21

FACS	蛍光依存細胞分別法
FAP	家族性大腸腺腫症
FasL	Fas リガンド
FISH	蛍光 in-situ ハイブリダイゼーション
Flk1	胎児肝キナーゼ 1
FLM	標識有糸分裂の分画
Flt3	ネコ肉腫ウイルス (fms) 関連チロシンキナーゼ 3 の McDonough 株
FOXA2	フォークヘッドボックス A2
Fzd	Frizzled
GATA-2/5	GATA 配列結合タンパク 2/5
GBP10	増殖因子受容体結合タンパク質 10
G-CFU	骨髄内の顆粒球コロニー形成単位（前駆細胞）
G-CSF	顆粒球コロニー刺激因子
GEMM-CFU	顆粒球，赤血球，単球，巨核球コロニー形成単位
GFP	緑色蛍光タンパク質
γH2AX	リン酸化ヒストン H2AX
GLI	グリオーマ関連がん遺伝子ホモログ
GM-CFU	顆粒球／単球コロニー形成単位（前駆細胞）
GM-CSF	顆粒球マクロファージ・コロニー刺激因子
GMP	顆粒球／マクロファージ前駆細胞
GNAS	グアニンヌクレオチド結合タンパク質，α 刺激活性ポリペプチド 1

GPA	グリコホリン A
Gpr49	G タンパク質共役型受容体 49
GTP	グアノシン三リン酸
GTPase	グアノシン三リン酸加水分解酵素
Gy	グレイ，電離放射線吸収線量の単位
H3	ヒストンクロマチン 3
HD	ホジキン病
HER2	ヒト上皮増殖因子受容体 2
HH	ハリネズミ
HLX1	H2.0 様ホメオボックス 1
hMSC	ヒト間葉系（間質）／幹細胞
Hopx	ホメオボックス単独タンパク質ホメオボックス
Hoxb4	ホメオボックス b4
HPC	造血前駆細胞
HPP-CFU	高増殖能コロニー形成単位
Hprt	ヒポキサンチン-グアニンフォスフォリボシルトランスフェラーゼ
HPV	ヒトパピローマウイルス
HR	相同組換え
HSC	造血幹細胞
HSPC	造血幹細胞および前駆細胞
hTERT	ヒトテロメラーゼ逆転写酵素

HZE	高電荷，高エネルギー
IGF1	インスリン様成長因子 1
IL	インターロイキン，リンパ系組織サイトカイン
IL2Rgc	インターロイキン 2 受容体 γ 鎖
Ink4a/Arf	キナーゼ 4 a の阻害剤／代替読み枠
ISC	腸幹細胞
iPS	人工多能性幹
JUN	調節遺伝子／遺伝子産物，cFos と結合して初期応答転写因子 AP-1 を形成する
K	サイトケラチン
KDR	キナーゼ挿入ドメイン受容体，VEGFR2 表面受容体
KGF	ケラチノサイト増殖因子
Klf4	クルップル様転写因子 4
K-ras	カーステンラット肉腫ウイルスがん遺伝子ホモログ
KSC	ケラチノサイト幹細胞
LacZ	β -D-ガラクトシダーゼ
LCNEC	大細胞神経内分泌がん
LEAR	生涯過剰絶対リスク
LET	線エネルギー付与
Lgr5	ロイチンリッチリピートを持つ G タンパク質共役型受容体 5
LI	ラベリングインデックス
LIF	白血病抑制因子

Lin ⁺ /Lin ⁻	細胞系列特異的表面抗原を発現する（+）または発現しない（-）造血細胞
LKB1	肝キナーゼ B1
LNT	直線しきい値なし
LOH	ヘテロ接合性消失
LQ	線形二次
LRC	ラベル保持細胞
Lrig1	ロイチンリッチリピートおよび免疫グロブリンドメイン 1
LRP5/6	低密度リポタンパク質受容体関連タンパク質 5/6
LSK	Lin ⁻ /Sca-1 ⁺ /c-Kit ⁺
LSS	寿命調査
Lt-HSC	長期再生造血幹細胞
LTR-1c	長期増殖始原細胞；インビトロ，原始，自己複製前駆細胞
LYrs/TLSR5	劣性母系伝達リンパ腫抵抗性 2/胸腺リンパ腫サプレッサー領域 5
MAPK	分裂促進因子活性化タンパク質キナーゼ
MaSC	乳腺幹細胞
MCL-1	骨髄細胞白血病配列 1；BCL-2 関連アポトーシス調節細胞表面マーカー
M-CSF	マクロファージ・コロニー刺激因子
M-CFU	マクロファージ・コロニー形成単位
Mdm2	マウス二重微小染色体 2
MDS	骨髄異形成症候群
MF	突然変異頻度

MFH	悪性繊維性組織球腫
MGMT	O ⁶ -メチルグアニン-DNA メチルトランスフェラーゼ
MI	分裂指数
Min	腸管多腫瘍発症
miRNA	マイクロ RNA（マイクロリボ核酸）
Mir-34	マイクロ RNA 34
MLL-AF9	9 番染色体タンパク質由来の混合型白血病-急性リンパ芽球性白血病 1 融合遺伝子
MMTV	マウス乳がんウイルス
MNU	メチルニトロソ尿素
MPP	複能性前駆細胞
MR	骨髄再構築；自己複製増殖造血細胞種を同定する
MRA	骨髄再構築活性；原始再生造血幹細胞の特質
Mre11	減数分裂組換え 11
MSC	間葉系（間質）／幹細胞
Msi-1	ムサン 1
mTert	マウステロメラーゼ逆転写酵素
MUC1	ムチン 1
Myb	骨髄芽球腫がん原遺伝子／転写因子エンコード遺伝子；造血調節遺伝子
Myc	「マスター」転写因子をエンコードするがん原遺伝子／調節遺伝子
NBCC	母斑基底細胞がん
NBN	ニブリン

NCRP	米国放射線防護測定審議会
NHEJ	非相同末端結合
NIS	ナトリウム・ヨウ素共輸送体
NK-lymphocyte	ナチュラルキラー細胞型リンパ球
NOD-scid	非肥満糖尿病重症複合免疫不全マウス
Notch	キイロシヨウジョウバエ表現型の哺乳類遺伝子ホモログ；保存されたシグナル伝達経路
NSC	神経幹細胞
NSCLC	非小細胞肺がん
NTRK1	神経栄養チロシンキナーゼ受容体型 1
NeuroD1	ニューロン分化 1
Oct3/4	オクタマー結合転写因子 3/4
OPG	オステオプロテゲリン
OSCC	オックスフォード小児がん調査
Osx	オステリックス
P4	陰窩基底部から 4 番目の位置
p16	サイクリン依存性キナーゼ阻害因子（番号 2A）
p21	サイクリン依存性タンパク質キナーゼ阻害因子（番号 21）；細胞周期調節遺伝子
p210	BCR/ABL 融合遺伝子産物
p53	がんタンパク質／がん抑制タンパク質（番号 53）；細胞周期調節タンパク質／遺伝子
PARP-1	ポリ（ADP-リボース）ポリメラーゼ 1
Pax5/8	ペアードボックス 5/8

PAX8/PPARG	ペアードボックス 8／ペルオキシソーム増殖因子活性化受容体 γ 融合がん遺伝子再構成
PCNA	装飾細胞核抗原
PCR	ポリメラーゼ連鎖反応
PD	集団倍加
PDGF	血小板由来増殖因子
PIG-A	ホスファチジルイノシトール N-アセチルグルコサミニルトランスフェラーゼサブユニット A 酵素
PI3K	ホスファチジルイノシトール 3-キナーゼ
PI3KCA	ホスファチジルイノシトール 3-キナーゼ触媒サブユニット p110 α
PLDR	潜在性致死損傷修復
POU	Pit-Oct-Unc
PR	プロゲステロン
Pre-CFU	骨髄中の早期未熟コロニー形成単位タイプの細胞
Pre-GM-CFC	前顆粒球/マクロファージコロニー形成細胞
Ptch1	パッチド 1
PTEN	ホスファターゼテンシンホモログ
PY-Sv	人年シーベルト；放射線曝露に基づく疾患罹患率
RAD51	放射線 51 修復遺伝子（51 番）
RANK	核因子 kB 活性化受容体
RANKL	核因子 kB 活性化受容体リガンド
RARB	レチノイン酸受容体 β
RASSF1A	Ras 結合ドメインファミリーメンバー 1A

Rb	網膜芽細胞腫
RBE	生物学的効果比
RC	修復能
RET/PTC	トランスフェクション中再構成／甲状腺乳頭がん
Rho	ローダミン；細胞分取に使用される蛍光染料
RNA	リボ核酸
ROS	活性酸素種
RR	相対リスク
RTK	膜受容体型チロシンキナーゼ
Runx2	Runt 関連転写因子 2
SC	自然発生がん
Sca-1	幹細胞抗原 1
SCC	扁平上皮がん
SCF	幹細胞因子；c-kit チロシンキナーゼ受容体リガンド；造血前駆細胞成長因子
SCGBa1a	セクレトグロビン a1a
SCID	重症複合免疫不全症
SCLC	小細胞肺がん
SCN	細胞充実巣
SE	標準誤差
SEER	監視疫学遠隔成績プログラム
SF ₂	2 Gy での生存率

SHH	ソニックヘッジホッグ；ショウジョウバエ遺伝子／表現型の哺乳類ホモログ
SI	小腸
SKY	染色体分染法
SLAM	シグナル伝達リンパ球活性化分子；造血幹細胞表面マーカーのファミリー
SLC	小型明細胞
SLDR	亜致死損傷修復
SMO	スムーズンド
SNP	一塩基多型
Sox2	Y 染色体性決定領域ボックス 2
SP	傍細胞
SSB	DNA 一本鎖切断（DNA らせん内での）
STAT	シグナル伝達性転写因子
St-HSC	短期造血幹細胞
SUFU	fused のサブプレッサー
t(8,21)	第 8 および第 21 染色体の転座
T4	チロキシン
TA	一過的増殖
TAR	合計絶対罹患率
TBI	全身照射
TEL/AML1	転座 ETS 様白血病／急性骨髄性白血病 1
Tg	サイログロブリン

TGFβ	形質転換増殖因子 β
TGFBR2	形質転換増殖因子 β 受容体 2
ThOX1/2	甲状腺酸化酵素 1/2
Thy-1	胸腺細胞抗原 1
Tie2/Ang-1	Tie2, アンジオポエチン 1 に対する血管内皮細胞特異的チロシンキナーゼ受容体
TIMP3	組織メタロプロテイナーゼ 3 阻害物質
TITF-1	甲状腺転写因子 1
T リンパ球	胸腺中に存在し細胞性免疫を媒介するリンパ球
TPA	12-O-テトラデカノイルホルモール-13-アセテート
TPO	甲状腺ペルオキシダーゼ
TRAIL	腫瘍壊死因子関連アポトーシス誘導リガンド
T _s	DNA 合成時間
TSC	甲状腺幹細胞
TSH	甲状腺刺激ホルモン
TSHR	甲状腺刺激ホルモン受容体
TTF1	甲状腺転写因子 1
UBB	鰓後体
ULLC	未分化の大型明細胞
UV	紫外線
VCAM-1	血管細胞接着分子 1
VEGFR2	血管内皮成長因子受容体 2

WAP	ホエー酸性タンパク質
WHO	世界保健機関
WL	ワーキングレベル
WLM	ワーキングレベルマンス
Wnt	Wingless 型マウス乳がんウイルス組み込み部位ファミリーメンバー；ショウジョウバエ wingless 遺伝子/表現型の哺乳類ホモログ
XP	色素性乾皮症
XRCC3	X 線修復交差相補グループ 3
XTT	2,3-ビス-(2-メトキシ-4-ニトロ-5-スルホフェニル)-2H-テトラゾリウム-5-カルボキシアニリド
ZO-1	閉鎖帯 1

1. 緒言

1.1. 報告書の目的

(1) 何十年もの間、放射線誘発がんのリスクは、作業員および一般市民の放射線被ばく量を制限することが推奨される最も大きな理由であり続けている。放射線による発がんは、標的となった 1 つの形質転換細胞から始まる確率的事象であると考えられている。通常、標的細胞は各組織内の幹細胞、および場合によってはその娘細胞である前駆細胞であると考えられている。これらの標的細胞は組織特異的な特性を備えており、増殖や分化を制御する微小環境的ニッチに存在している（図 2.1 参照）。幹細胞およびその制御に関する知識は、様々な組織系および器官系に対するリスクを予想する上での基盤となるとともに、様々な被ばくのシナリオにおけるリスク計画を理解する上でも役立つであろう。

(2) 各組織中での標的細胞の位置は、短飛程放射性核種や易透過性放射線による発がんリスクを考える上で極めて重要である。委員会はその刊行物の中で、これらの細胞の位置について様々な判断を下し仮説を立てている。標的細胞は、皮膚では毛包内や基底層の毛包間表皮内に（ICRP, 1991）、呼吸気道では粘膜の基底層内および肺の肺胞内にあると考えられている（ICRP, 1995）。腸における標的細胞は腸陰窩の底部付近にあると考えられているが、それ以上に位置する細胞の発がん性については不明である（ICRP, 2007）。骨格においては、放射線誘発性骨肉腫の元となる標的細胞は、骨小腔内の骨芽細胞および骨髄内の間葉系幹細胞（MSC）であると考えられている（ICRP, 1995）。本

<p>報告書内の情報は、対象となる組織における標的細胞の位置を明らかにする上でさらに役立つものと思われる。</p> <p>(3) 本報告書は、放射線発がんのメカニズムとの関連で、組織微小環境における幹細胞および前駆細胞の生物学および放射線応答に関する知識の進展を総括する。組織形成、組織維持のダイナミズム、幹細胞の放射線感受性および再生、線量率効果、および年齢依存性など、幹細胞の生物学および放射線生物学の近年における進歩について述べられている。この情報を評価し、急性および慢性放射線量に応じた発がんリスクのメカニズムにおける幹細胞の役割の意義を、短飛程放射線のリスク計画も含めて推測する。</p> <p>(4) 様々な組織や器官での確率的放射線影響に関する科学的知見の基盤を確立するため、既知の放射線誘発性リスクを有する例として一連の器官系を選択した。これらのレビューは入手できなかったため、個々の例について詳細な付属書を作成した。すべての器官系を網羅するとなるとあまりに作業量が膨大になるため、放射線防護を目的とした場合の重要性、および利用可能な放射線生物学的知見や関心度を基準に選択した。まず、ICRP 組織荷重係数が 0.12 と最も高かった骨髄、乳房、消化管、および肺が選ばれた。このうち、幹細胞に関して最も研究が進んでいるのは造血組織であり（付属書 A）、幹細胞の位置および組織のターンオーバーのその他の階層性に関する知見が豊富にそろっているのは消化管である（付属書 D）。幹細胞の存在は、乳腺（付属書 B）では実証されているが、肺ではまだ完全には解明されていない（付属書 E）。甲状腺は、放射線に対する発がん感受性の年齢依存性が高いことから選択された（付属書 C）。骨は、内部被ばくによるがん誘発の最良のモデル系であることから選択された（付属書 G）。皮膚はシンプルな階層構造を持つため組織細胞タイプ、がんのサブタイプおよび放射線感受性が理解しやすい（付属書 F）こと、また皮膚がんの罹患率が高いもののやや不確実であること（ICRP, 1991, 1992, 2007; 付属書 F）から選択された。比較しやすいよう、付属書は各組織につき同様な情報が提示されるような書式にした。</p>
--

<p>1.2. 放射線発がんモデルおよび幹細胞生物学</p> <p>(5) 放射線誘発がんのメカニズムについて現在得られている知見は、Armitage および Doll (1954) の多段階モデル、さらにこれを分子変化へと拡張した Vogelstein ら (1988) のモデルに基づいている。しかし、これらのメカニズムは放射線発がんの文脈では十分に評価されていないため、その影響力は限られている。この状況は、しきい値なし直線 (LNT) モデルおよび相対リスク (RR) モデルを多段階モデルの文脈に置くことで打開できる。組織内の標的細胞を同定し、標的細胞の放射線応答を解明するとともに、標的細胞が発がんプロセスへと進む潜在能力を制御するターンオーバーおよび細胞間相互作用の動態を理解することで、この状況を改善できる可能性がある。これらの組織は外部被ばく、とりわけ低線量での慢性被ばくにおいて重要であるが、内部被ばく、特に組織内の短飛程放射線によるリスクを考える際にはさらに重要性が増す。新たに登場した幹細胞生物学により、これらの課題を解明し、線量および線量率効果に関する理解を深めるための基盤を得る絶好の機会が与えられるとともに、内部被ばくによる線量効果に対する標的細胞のさらに明確な位置を知ることが期待できる。さらに、異なる集</p>

<p>団間でのリスク転換方法を支持する根拠となることも期待できる。</p> <p>(6) 標的細胞の数、感受性、位置、および再生特性は、放射線発がんに関する重要な生物学的パラメータである。発がんの標的細胞は組織幹細胞およびその娘細胞の一部であると多くの人は考える。幹細胞の数はしばしば不確実であり、これを推定するために組織ごとに異なる実験動物アッセイが用いられる。幹細胞の放射線感受性は、組織内でも組織間でも異なる。例えば、精子形成上皮には細胞周期が遅い耐性細胞と細胞周期が早い感受性細胞の両方が存在しており、超粘膜にはアポトーシス感受性の感受性細胞とこれより耐性のあるクローン形成性細胞が存在しており、感受性の強い幹細胞は上皮組織よりも造血組織に多く存在する。各組織内の微小環境は、細胞間シグナル伝達やサイトカイン媒介シグナル伝達を含む様々なパラメータにおいて異なっている。</p> <p>(7) それぞれの組織内での標的細胞の位置は、短飛程放射性核種からの放射線および易透過性放射線による発がんリスクにおいて極めて重要である。幹細胞はしばしば「ニッチ」と呼ばれる特定の微小環境内に存在している。白血病の標的細胞は造血幹細胞 (HSC) およびその娘細胞の一部と考えられており、これらの細胞のニッチは小さな骨小腔および類洞付近に位置している。一部の幹細胞タイプの密度は、骨表面付近に比べて中央の血管付近で低くなっているが、再生能力に関してはその逆であるという証拠も見つかっている。ただし、一次幹細胞は骨表面付近の低酸素ニッチ内に保護されているというのが一般的な結論である (Parmar et al., 2007)。このように標的細胞のタイプや位置が不確定であることが、均一な外部被ばくのリスクに基づき短飛程放射線のリスクを正確に予測することを困難にしている。さらに、乳腺や甲状腺など多くの組織タイプについては、幹細胞のニッチおよびその形態的特性についてもさらに解明する必要がある。</p> <p>(8) 放射線防護プログラムのために、ICRP は LNT モデルに RR モデルを組み合わせて急性および慢性被ばくリスク評価に適用した。慢性被ばくの評価では、線量・線量率効果係数 (DDREF) をさらに適用した。DDREF の数値については議論の余地があるため、様々な提案がなされている (BEIR VII, 2006)。幹細胞および組織のターンオーバーを評価することで、LNT を用いた低線量外挿および DDREF 値を用いた慢性被ばくリスクの調整の妥当性が明らかにされることが期待される。後者については、ある程度は標的細胞の不確実な修復能および組織内での再生/残留率に依存している。DNA 修復については DDREF におけるその役割に関して議論されてきているが、標的細胞が幹細胞のみでなくその娘細胞である前駆細胞であるがんタイプについては、再生がさらに活発であるため、細胞の再生率の方が重要であるとみなされている。また、最近の研究では、一部のケースにおいて、損傷した組織幹細胞は未損傷の幹細胞との競合で常に排除されることが実証されている。このため、徐々に新たな細胞に置換されている当初の全標的細胞の累積線量から単純に予測されるリスクより、慢性被ばくリスクは低くなることが予想される。</p> <p>(9) 以下のセクションでは、次の疑問および主題について、幹細胞生物学における最近の進展の観点から考察する。発がんの標的細胞はどこであるのか、またそれらはどこに位置しているのか？LNT モデルは幹細胞に基づく放射線発がんの考察に適合するのか、もしするならば、ど</p>
--

のように適合するののか？現在の DDREF 値は、幹細胞に基づく放射線発がんに関する情報に支持されているののか？幹細胞応答に関連するのはどのメカニズムなのか、そしてそのメカニズムは放射線発がん感受性の組織間差を説明する上で役立つものであるののか？幹細胞の放射線発がん感受性の年齢依存性に関連するメカニズムとして考えられるものは何か、そしてリスクは？

2. 組織幹細胞の一般特性

2.1. 成体組織における細胞分裂および分化

(10) 成体組織は、それぞれ特殊化した機能性細胞セットによって体の様々なニーズを満たしている。機能性細胞とは、増殖能が限定された（しばしば欠落した）最終分化細胞であり、必要に応じて置換されなくてはならない。成人組織には 2 つのタイプ、柔軟（複合）組織と階層型組織がある。肝臓などの柔軟組織では機能性細胞が分裂能を備えており、特に損傷時などの特殊な状況下では増殖することも可能であるが、通常は幹細胞により供給されると考えられている。これに対し、階層型組織のターンオーバー率は高く、機能性細胞が体内から急速に失われる。多数の多種多様な機能性細胞を供給するため、階層型組織には幹細胞、前駆細胞および分化細胞からなる不連続な系列が存在している。階層型組織は放射線発がんの主要な標的であり、本報告書の焦点となっている。

(11) 幹細胞は胚発生初期、胎児発達および成体組織確立後の間で異なる。胚発生期の幹細胞は全能性の胚性幹（ES）細胞であり、後の器官形成時にあらゆる組織タイプへと分化する能力を備えている。胎児期では、幹細胞は成体期の特定の組織を構成するためにある程度分化の方向付けがなされている。生命の初期にあるこれらの 2 つの期では、幹細胞は主に対称性分裂して 2 つの同等な娘幹細胞を生じ、これに伴い胚および胎児のサイズが大きくなる（セクション 2.3.5 および図 2.5）。これに対し、成体組織の幹細胞は主に分化能が限定されていて完全に方向付けられており、非対称分裂するが、特に組織の損傷を修復する際には様々な程度で対称分裂もする。

(12) 成体組織幹細胞の研究は 1960 年代にはすでに始まっていた。造血前駆細胞（HPC、もともと幹細胞だと考えられていた）は、致死量の放射線を照射されたマウスに静脈注射すると脾細胞コロニーを形成可能な細胞として骨髄で初めて同定された（Till and McCulloch, 1961）。初期の研究では組織前駆細胞の再生能に焦点が当てられていたが、後の生体内研究では、非対称分裂など、組織幹細胞および組織前駆細胞の重要な特性が数多く明らかにされた（Potten and Loeffler, 1990）。

(13) 成体組織幹細胞の非対称分裂では幹細胞と前駆細胞が生じる。前駆細胞は、特に上皮組織では「一過的増殖（TA）細胞」とも呼ばれる。「前駆細胞」と「TA 細胞」という用語は造血系では使い方がやや異なるが、本報告書ではこれら 2 つの用語は同じ意味で使われる。前駆細胞はさらに分裂して数を増やし、機能性細胞へと分化するが、機能性細胞は要求された機能を果たした後、ゆくゆくは老化によって組織

39

から失われていく。この組織ターンオーバーの一般的スキームにおいては、幹細胞は静止していることが多く、前駆細胞はより速く分裂するが増殖能は限定されている。このように組織幹細胞と前駆細胞とで異なる役割を分担することが幹細胞を長期間維持するための戦略であり、複製による突然変異を最小限に抑えつつ、前駆細胞の活発な分裂によって組織の機能性区画に多数の細胞を供給する。幹細胞から分化細胞への進行は通常は一方通行であるが、特定の条件下、例えば何らかの理由で幹細胞が失われて空の幹細胞ニッチが隣接する幹細胞または脱分化した前駆細胞に占拠された場合などには可逆的にもなり得る。後者のシナリオは、ショウジョウバエおよびマウスの生殖細胞について実証されている（Cheng et al., 2008; Barrocal, 2009）。細胞の生成と消失のバランスによって身体組織の質量が維持される。

(14) 階層型組織には 3 つの細胞区画が含まれる：幹細胞区画、前駆細胞区画、および機能性細胞区画である。前 2 つの区画の細胞は分裂能を有しており、3 つめの区画の細胞は通常分裂能を有さない。幹細胞から分化細胞への工程は組織ごとに異なる。このいくぶん単純化されたスキームを図 2.1 に示す。重要な点として、各々の細胞は特定の区画に存在するが、細胞コロニー全体を見ると、異なる区画間の細胞は通常一方向性の勾配をなしている。

(15) 系列内の細胞ステージの数は組織ごとに大きく異なる。表皮などの一部組織では幹細胞が比較的限られた数の系列を供給する一方、他の組織の幹細胞は、例えば骨髄内の HSC のように多様な系列を供給する。また、Fig. 2.2 に示すように、幹細胞から機能性細胞になるまでの分裂回数も組織ごとに異なる（Potten and Wilson, 2007）。上述したように、肝臓、甲状腺、肺などの柔軟組織の分化細胞は損傷時に細胞分裂が可能である。

(16) ターンオーバー速度は組織によって著しく異なる。 ^{14}C 年代測定法を利用して様々な組織での細胞ターンオーバー速度を直接推定したところ、脳内の細胞の大部分は生涯入れ替わることなく残り、血液や腸の細胞は素早くターンオーバーすることが実証された（Spalding et al., 2005）。この方法は組織内の全細胞の ^{14}C 同位体の量を測定するため、精度が不十分であり少数の細胞がターンオーバーしている可能性は排除できない。実際、幹細胞は成体の脳内にも存在することが分かっているが（Quinones-Hinojosa et al., 2007）、脳組織の総ターンオーバーへの寄与はあまりに小さいため、この方法では検出不可能である。

(17) 同方法により、ヒトの脂肪細胞の年間ターンオーバー率は 10% であることが実証されている（Spalding et al., 2008）。ターンオーバー率は年齢によって異なり、心筋細胞では 25 歳で年間 1% だったのが 75 歳では 0.45% まで減少した（Bergmann et al., 2009）。各組織のターンオーバー率および各細胞タイプの数および位置は、外部被ばくおよび内部被ばくによる放射線発がんの組織特異的リスクを決定する重要な因子であると考えられている。成体組織では、通常は再生率の高い階層型組織の方が、再生率の低い柔軟/複合組織よりも放射線発がん感受性が高い（ただし小腸は重要な例外である）。また、ターンオーバー率は発生段階や個体の年齢によっても異なる。ターンオーバー率は、放射線発がんの組織間差および年齢依存性を決定する主要な因子である（セクション 2.5.4 および 3.6）。

40

2.2. 組織幹細胞の機能による同定および単離

(18) 組織幹細胞は、自己再生能および特定の系列の前駆細胞産生能を特徴としており、これが組織内のあらゆる細胞を生み出す。放射線照射マウスへの連続骨髄移植により、コロニー内の細胞には自己再生能があることが示された。また、組織学的観察により、コロニー内にはいくつかの細胞タイプが存在することが明らかになり、移植されたコロニー形成細胞は様々な造血細胞系列へと分化する能力を備えていることが示された。さらに、コロニー生存分析によって骨髄幹/前駆細胞の放射線感受性を推定することができる。全骨髄移植と細胞製剤の限界希釈を組み合わせた研究では、幹細胞の割合は 1/10,000 から 1/100,000 であると推定された (Szilvassy et al., 1990; Harrison et al., 1993)。

(19) 生体内コロニー形成による幹/前駆細胞の機能同定は、皮膚表皮および腸管上皮などの他の組織へと応用可能であった (Withers, 1967; Withers and Elkind, 1969)。単分散細胞および組織断片を移植することでマウスおよびラットの乳腺内、およびラット甲状腺内での幹細胞の存在が実証された (Daniel et al., 1971; Clifton et al., 1986)。コロニーアッセイも利用し、ラット乳房および甲状腺のクローン形成性細胞における放射線による発がん誘発率を定量した (Watanabe et al., 1988; Kamiya et al., 1995)。これらの生体内研究では機能に基づき幹細胞を同定したが、単離した幹細胞がなかったために細胞の性質についてそれ以上の研究を実施できなかった。

2.2.1. 胚性幹細胞および成体組織幹細胞の単離

(20) マウス胚盤胞の試験管内での移植片培養により ES 細胞を確立した (Evans and Kaufman, 1981; Martin, 1981)。胚盤胞の内細胞塊内には 20~40 の ES 細胞があり、これらがその後の胚体全体の発生を担っている。ES 細胞は、試験管内で小型の細胞が密集した特徴的なコロニー形態により同定可能である。ES 細胞は不死細胞であり、染色体末端を保護するためにテロメラーゼを発現している (Carpenter et al., 2003)。また、ES 細胞は全能細胞でもあり、栄養外胚葉を除くほぼすべての組織に寄与している。この全能性は胚性がん細胞や初期胚にも見られ、ES 細胞が同種異系部位に移植されると奇形がんを形成しやすい (Rossant and Papaioannou, 1984)。ES 細胞はヒトを含め様々な哺乳動物種から単離されている (Thomson et al., 1998)。ES 細胞は遺伝子破壊法の標的となり、ノックアウトマウスを作出する上で極めて重要な役割を担うことから、組織および全身における遺伝子機能の研究に貢献している。多種多様な修復遺伝子ノックアウトマウスが作出されており、マウスにおける放射線感受性、DNA 修復、突然変異誘発および発がんに関するこれらの遺伝子の機能解析に大きく貢献している (Griffin et al., 2005; Zha et al., 2007)。ただし、ES 細胞は放射線発がんには直接的な関連性がないため、本報告書の以降のセクションでは必要な場合のみ議論する。

(21) 細胞を単離および試験管内で培養することで、組織幹細胞の定性的および定量的分析が可能になる。組織幹細胞の試験管内長期培養に関しては、1976 年にマウス造血細胞で成功しているが、産生されたのは顆粒球細胞のみであった (Allen and Dexter, 1976)。以降、多くの

試みがなされた結果、HSC の成長および分化を調節する各種サイトカインが同定された。現在では HSC およびその前駆細胞をサイトカインの存在下で規定の培養培地で維持可能である (Miller and Eaves, 1997) が、試験管内培養による HSC の増殖はまだ控えめのものであり、その一方で放射線照射マウスへの連続移植による増加は 8000 倍以上になることが分かっている (Iscove and Nawa, 1997; Sauvageau et al., 2004)。

(22) 組織幹細胞の単離および試験管内培養は、様々な幹細胞特異的のマーカートンパク質が同定されたことで極めて容易になった (<http://幹細胞.nih.gov/info/scireport/appendix>)。このうち、細胞表面マーカートンパク質は、蛍光活性化細胞分離 (FACS) により組織幹細胞を単離する際に特に有用である (Gundry et al., 2008)。HSC の FACS 分離は、猫肉腫ウイルスがん遺伝子 v キット (c キット) の細胞ホモログ、チロシンキナーゼ受容体 [幹細胞因子 (SCF)], 幹細胞抗原 1 (Sca-1) および CD34 などの特異的細胞表面マーカーに依存する (Shizuru et al., 2005)。細胞表面マーカー (Table 3.2) は、組織特異的幹細胞に関する付属書に記述されている。

(23) 細胞表面マーカーに加え、傍細胞 (SP) 表現型の独特な細胞特性も多くの組織幹細胞によって共有されている。この特性を利用し、フローサイトメトリーにより幹細胞を富化し単離した。骨髄細胞を蛍光染料ロダミン 123 およびヘキスト 33342 で染色すると、最も染色が弱い画分には長期 HSC が含まれることが見いだされた。この弱い染色は、静止期 HSC の低い代謝活性および有糸分裂活性に関連している (Bertoncello and Williams, 2004)。アデノシン三リン酸 (ATP) 結合カセット (ABC) トランスポーターである切断点クラスター領域の偽遺伝子 1 (BCRP1) の高い発現、およびそれによりもたらされる染料の効率的排出が、静止期 HSC の SP 表現型に関連している (Zhou et al., 2001)。

(24) 幹細胞の単離および培養は、もう一つの独特な特性を利用することで達成された。神経幹細胞 (NSC) および乳腺幹細胞 (MaSC) は、HSC と同じく SP 表現型を発現する上、試験管内で培養するとスフェロイドを形成する (付属書 B)。成体マウス脳の脳室周囲領域の単細胞懸濁液を上皮成長因子 (EGF) 添加培地で培養すると、ほとんどの細胞が死滅したが、少数の細胞 (およそ 1%) は成長してスフェロイドを形成した (Reynolds and Weiss, 1992)。これらはニューロスフェアと呼ばれ、NSC とその前駆細胞に富んでいた。ニューロスフェア形成は、神経細胞への放射線影響を定量的に評価する上で有用なツールであり、このようなアッセイはラット脊髄幹細胞に対して実施されている (Lu and Wong, 2005)。スフェロイド形成は、ヒト MaSC を EGF および/または塩基性線維芽細胞増殖因子 (bFGF) の存在下で培養した場合にも確認された (Dontu et al., 2003)。ニューロスフェアと同様に、マンモスフィアも連続継代培養することができる。さらに、マンモスフィア由来の単細胞を乳腺脂肪体に移植すると乳腺全体を再生可能である (Shackleton et al., 2006)。乳腺は放射線発がんを起こしやすい組織の一つであることを考えると、試験管内培養およびマンモスフィア形成は、MaSC の放射線応答および放射線感受性を分析する上で極めて有用である。

(25) HSC は内胚葉組織から生じ、NSC および MaSC は外胚葉から生じる (付属書 A)。さらに、MSC は試験管内で増殖することができる (Chamberlain et al., 2007)。したがって、ほぼすべての組織タイプから幹細胞を単離可能であると期待される。FACS に基づき幹細胞を単離

試験管内培養する現行の系の課題の一つは、増殖した細胞集団が幹細胞に富んではいるがその子孫細胞も含んでしまっている点である。純粋な幹細胞集団の単離はまだまだ成功していない。

(26) 幹細胞研究の最近の進展により、特にターンオーバー速度の速い組織では幹細胞に階層性が存在することが実証されている。例えば、造血系の幹細胞は長期 HSC と短期 HSC の少なくとも 2 つに分類することができ、前者は後者よりも原始的である（付属書 A）。小腸に関しては、マウス陰窩に存在する多様な細胞集団内に 3 種類の幹細胞が同定されている（付属書 D）。陰窩基底層から 4 番目の位置（P4）に存在するのは、高アポトーシス感受性 P4 幹細胞と、マウステロメラーゼ逆転写酵素（mTert）を発現する高放射線耐性幹細胞の 2 種類の幹細胞集団である。3 種類目の幹細胞は、陰窩基底層に存在するロイシンリッチリピート含有 G タンパク質共役受容体 5（Lgr5）陽性で細胞周期の速い円柱細胞である。肺には、領域ごとに特異的な幹細胞が存在する（付属書 E）：気管支肺上皮幹細胞（BASC）、クララ細胞、およびクララ変異細胞であるが、これらの階層的相互作用については今後の解明が待たれる。ヒト皮膚では構造がさらに明確であり、表皮幹細胞（EpiSC）、初期前駆細胞、および後期前駆細胞がそれぞれ基底細胞がん（BCC）、扁平上皮がん（SCC）、および乳頭腫を生じる（付属書 F）。

2.3. 組織幹細胞の放射線感受性および DNA 損傷応答

2.3.1. ゲノムの完全性を維持するための組織幹細胞の基本的戦略

(27) DNA 損傷応答経路に関する現在の知識を文献 99（ICRP, 2005）にまとめた。幹細胞は組織内のすべての機能性細胞を生産にわたって補充しなくてはならないため、DNA 損傷応答は幹細胞のゲノムの完全性を維持するために特に重要である。これを達成するには、DNA 損傷、細胞分裂および DNA 複製を最小限に抑えつつ、DNA 損傷修復を最大限にし、損傷/変異細胞を排除する必要がある。もちろん、DNA 損傷応答および DNA 修復の障害はヒトの早老症候群の原因として繰り返して挙げられており、その多くは組織幹細胞の早期枯渇およびヒトの高発がん性症候群の結果もたらされるものとみなされている（Friedberg et al., 2006）。一部の組織幹細胞では、幹細胞内に抗酸化物質が豊富に存在すること、および幹細胞ニッチにより提供される低酸素環境によって、DNA 損傷が最小限に抑えられている。静止とは、様々な組織の幹細胞に共通してみられる特性であり、DNA 修復を促進し、複製による突然変異の蓄積を最小限に抑制する。また、損傷した幹細胞はアポトーシス、および組織のより分化した区画、例えば前駆細胞および機能性細胞区画への進行により排除される。組織幹細胞ニッチをめぐる幹細胞同士の競合は、損傷した娘幹細胞の排除を促進していると考えられる。

2.3.2. 組織幹細胞の放射線感受性

43

ICRP Publication 131（下訳版：平成 30 年 3 月）

(28) 組織幹細胞の DNA 修復能は放射線感受性に反映されている。幹細胞の放射線感受性は、移植法または in-situ 法による試験管内または生体内でのクローン形成アッセイにより評価することができる。上皮コロニー形成細胞についてアッセイした結果を示す（図 2.3）。ただし、上皮組織の幹細胞および前駆細胞は必要となればどちらもクローン形成性細胞になり得るため、これらのアッセイでは通常、両細胞タイプの放射線感受性を区別できない。

(29) ラット乳腺、甲状腺、肝臓および骨髄のクローン形成性細胞には中程度の潜在性致死損傷修復（PLDR）能がみとめられた（Mulcahy et al., 1980; Gould et al., 1984; Jirtle and Michaelopoulos, 1985; Kamiya et al., 1991）。上皮系全般の特性として、コロニー形成能を測定するために細胞を 24 時間 in-situ で放置してから生体内移植した際、生存率の増加が見られた。これにより、生存曲線が高線量側へとシフトした（図 2.4）。これらの PLDR 試験で供試した線量は通常 >6 Gy であったため、これより低線量で α 成分の変化があったとしても直接測定することはできなかった。ただし、24 時間の回復期間後に作成した生存曲線では曲率が増していた（つまり α/β 比が小さく、 α の減少量が β の減少量よりも大きいことが示された）。アッセイまでの放置時間をさらに延ばした場合の影響について、静止期の肝臓を用いた生体内試験を実施し、肝細胞を脂肪体に移植してコロニー成長させた（Fisher et al., 1987）。これらの細胞に限って言えば、24 時間で見られた変化は生存曲線の傾きの減少であり、この減少は供試した最長放置期間である 11 か月後まで続いた。損傷細胞の線量依存的置換という点で、放射線感受性の長期的低下は細胞増殖だけで説明できるものではなかった。放射線照射後、小核を含む細胞の割合は減少したが、その減少の程度は比較的小さかった。したがって、クローン形成能の長期的な増加は、小核形成により評価される染色体損傷の長期的修復によって部分的にしか説明できない。さらに、線量分割実験を実施し、肝細胞に in-situ で放射線照射した後、早い段階または遅い段階で生存率を測定した（Fisher and Hendry, 1987）。測定を 10 か月間遅らせた場合、 α の値はわずかに減少する傾向を示すのみであった。 β 成分は時間とともに減少も大きくなり、 α/β 比（24 時間後、1-1.6 Gy）は低いままであったが 10 か月後には 1.9-2.1 Gy へとわずかに増加した。なお、これらの組織系（甲状腺、乳腺、肝臓）は、それぞれ異なる速度論的、系列のおよび構造的特性を示すことから、照射後の経時的変化は組織特異的である可能性もある。これらのクローン形成アッセイにより、骨髄由来前駆細胞が上皮クローン形成性細胞よりも放射線感受性が高いことが判明した（図 2.4）（Hendry, 1985）。PLDR の正確な分子機構はまだ解明されていないが、放射線損傷応答のマスター遺伝子である毛細血管拡張性運動失調症変異（ATM）が同プロセスに関与していることが示唆されている。しかし、まだまだ不明な点が多い（Lobrich and Jeggo, 2005）。

(30) 近年の技術的進歩により、比較的純粋な組織幹細胞集団を試験管内で増殖することが可能になったため、組織幹細胞を直接分析できるようになった。ヒト骨髄由来のクローン増殖された MSC を直接分析して放射線感受性を調べたところ、これらの細胞はヒト肺がん細胞株およびヒト乳がん細胞株よりも高い放射線耐性を示すことが明らかになり、それが抗酸化能の高さに起因することが判明した（Chen et al., 2006）。付属書 F で述べているように、in vitro 試験では、皮膚幹細胞は前駆細胞よりも放射線耐性が高かった（Harfouche et al., 2010）。

44

(31) 様々な階層性系列における細胞ステージ別の放射線感受性を Table 2.1 にまとめる。特筆すべきは、アポトーシス型の細胞死を起こすことが多い細胞 [一部の腸幹細胞 (ISC), および A 型, 中間, および B 型精原細胞] は放射線感受性が高いという点である。

2.3.3. 幹細胞の静止／休眠および DNA 損傷応答

(32) コンパクション期以前のマウス胚は、p21 の活性化を伴わない特有の p53 依存性 S チェックポイントを有することが分かっている (Shimura et al., 2002; Adiga et al., 2007)。胚盤胞期由来の ES 細胞は、X 線照射後の p53 依存性 p21 活性化を欠損していることが実証された (Aladjem et al., 1998; Malashicheva et al., 2000)。これらの期の細胞は急速に分裂しているため、その DNA 損傷応答は試験管内の細胞のそれとは大幅に異なる。

(33) 成体組織幹細胞の DNA 損傷応答も、特に組織微小環境中で分析した場合に違いが見られる。例えば、マウス小腸の P4 幹細胞は放射線誘発性アポトーシスに対する感受性が高いことが知られている (Potten, 1977, 2004b; Potten et al., 2002) (付属書 D)。このタイプの細胞死は、損傷細胞を排除しゲノムの完全性を維持するためのメカニズムであると考えられている。面白いことに、放射線照射後、最初に DNA 複製を行い p53/p21 修復経路を通過するのは一部の P4 細胞であった (Potten et al., 2009)。P4 幹細胞のアポトーシスは 2 段階で起こる：照射 4.5 時間後での早期 p53 依存性アポトーシスは 1Gy 未満の線量で誘発され、照射後 24 時間での晩期 p53 非依存性アポトーシスは 8Gy などの高い線量で誘発された (Dove et al., 1998)。p53 欠損マウスにおける陰窩幹細胞の早期 p53 依存性アポトーシスの不在は、DNA 依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット (DNAPKcs) 遺伝子のホモ接合欠損と組み合わせると回復した (Gurley et al., 2009)。

(34) P4 幹細胞に加えて、Lgr5⁺ crypt 陰窩基底部分柱細胞 (CBCC) も一次幹細胞であると言われていた。これらの細胞は 24 時間というサイクル時間で急速に分裂し、アポトーシス感受性が低い (Barker et al., 2007)。しかし、過去および最近の文献を詳細に調べたところ、小腸の幹細胞は P4 細胞である可能性が高く、CBCC はパネート細胞を含む様々な細胞タイプへと分化可能な中間前駆細胞であると結論づけられた (Potten et al., 2009)。さらに、マウス小腸陰窩の P4 幹細胞の中から、mTert を発現する極めて小さな細胞亜集団が同定された。これらの mTert⁺ 細胞は静止細胞であり、10Gy 照射後もアポトーシス細胞死を起こさなかった (Montgomery et al., 2011)。これらの細胞から、Lgr5⁺細胞も含め小腸内のあらゆる細胞タイプが発生した。さらなる実験が必要ではあるものの、mTert⁺ P4 細胞は小腸粘膜においておそらくもっとも原始的な幹細胞である。これらの細胞は希少であり静止しており、放射線誘発性アポトーシスに感受性を示さない。これらの特性から、利他的細胞死への感受性は、すべての組織幹細胞に共通する放射線応答ではない可能性があることが示唆される。

(35) 休眠または静止は、多くの組織幹細胞の一般的な特性である。幹細胞の静止に関しては、HSC の場合は損傷センサー ATM が重要な役割を果たしている (Ito et al., 2004)。ATM^{-/-}マウスでは骨髄中の HSC が早期に枯渇した。ATM^{-/-}マウスでは活性酸素種 (ROS) のレベル

が高く、この高い ROS レベルによって p38 分裂促進因子活性化タンパク質キナーゼ (MAPK) が活性化されて静止 HSC を細胞周期へと突入させ、これが HSC の枯渇をもたらした (Ito et al., 2006; Liu and Finkel, 2006)。したがって、細胞老化は過剰に複製された幹細胞を排除し、静止は幹細胞のポテンシャルを維持するためのメカニズムである。さらなる研究により、p53 と p21 も HSC の静止状態に関与していることが明らかになった (Cheng et al., 2000; Liu et al., 2010)。

(36) 幹細胞の DNA 損傷応答には幹細胞能 (自己複製能および分化した子孫細胞を作出する能力の根底にある特性) の消失が含まれており、これにより分化が起こる。最近の研究では、メラノサイト幹細胞は放射線に曝露されるとニッチ内で最終分化を起こすことが実証されている。ATM 機能が欠損しているとマウス皮膚が放射線誘発性被毛灰色化に対して敏感になることから、ATM がメラノサイト幹細胞の最終分化に関与していることが分かった Inomata et al., 2009)。静止の場合と同様、p53 も ATM キナーゼとともに細胞老化の調節に関与している (Vigneron and Vousden, 2010)。

2.3.4. 幹細胞の DNA 修復

(37) 組織幹細胞の DNA 修復は他のタイプの細胞とはかなり違っており、細胞の分化ステージによって DNA 修復経路が異なることが知られている。例えば、最終分化した細胞ではヌクレオチド除去修復経路が減弱することが報告されている (Rasko et al., 1993; Nospikel and Hanawalt, 2002; Hsu et al., 2007)。除去修復経路に欠陥を持つマウスモデルでは、突然変異誘発および発がんにおいて組織特異的な差が見られたことから、起源の異なる幹細胞間では修復システムが異なる可能性が示唆された (Wijnhoven et al., 2007)。DNA 修復経路は特定の細胞タイプの要求に応じているのではないかと推測したくなる。損傷応答および修復系に特定の欠陥を持つマウスが作製されており、組織幹細胞の役割を研究する上で優れたモデルとなっている。マウスの老化に関していえば、修復系の欠陥は通常、造血組織などターンオーバーの早い組織に重篤な影響を与える (Park and Gerson, 2005)。老齢マウスの HSC では、一連のストレス応答性遺伝子の発現が増加していることが分かり、老化、DNA 損傷とストレス応答の間の強い相関が示唆された (Chambers et al., 2007)。これらの研究から、DNA 修復および損傷応答は、組織幹細胞が静止状態を維持しゲノムの安定性を保つ上で重要であることが分かる。

(38) 電離放射線により誘発される DNA 二本鎖切断 (DSB) は、相同組換え (HR) または非同源末端結合 (NHEJ) により修復される。HR は S 期および G2 期の細胞で起こり、娘鎖の相補鎖である正常な鎖を複製することで DNA の損傷領域を修復することから、エラーが起こる可能性がない。亜致死損傷修復 (SLDR) は Rad54 に依存することが分かっているため、HR の修復活性の指標となる (Rao et al., 2007)。NHEJ は、非周期細胞、および細胞周期のあらゆる期の細胞で様々な程度で起こり、修復タンパク質 Ku70, Ku80 および DNA-PKcs に依存している。PLDR は非周期細胞の修復であり、したがって HNEJ の修復活性の指標となる。NHEJ は、精度の高い NHEJ と、「代替 NHEJ」と呼ばれるエ

ラーを起こしやすい NHEJ 経路の少なくとも 2 つの修復系から構成される (Symington and Gautier, 2011; Deriano and Roth, 2013)。代替 NHEJ 経路は多くのゲノム再編成を触媒するが、その一部は腫瘍形成形質転換に至る。哺乳類の非周期細胞においては、高精度の NHEJ がデフォルト経路であるかもしれない。

(39) Rad54^{-/-}または Ku70^{-/-}の ES 細胞は電離放射線に対し同等な感受性を示すことから、両方の修復経路の重要性が示唆された (Gu et al., 1997)。これに対し、成体 80^{-/-}マウスおよび DNA-PKcs^{-/-}マウスは放射線に感受性を示したが、成体 Rad54^{-/-}マウスは DNA 依存性プロテインキナーゼ (DNA-PK) 欠損と組み合わせられた場合にのみ過感受性を呈した (Essers et al., 2000)。DSB 修復に様々な欠陥を持つマウスが作製され、それぞれの特性が調査された (Brugmans et al., 2007)。これらのマウスのうち、DNA リガーゼ IV 欠損マウスでは HSC の早期老化が見られた (Nijnik, 2007) ことから、NHEJ が成体組織幹細胞の放射線損傷修復の主要経路である可能性が示唆される。組織幹細胞の休眠/静止は、特に細胞を多数産生する組織、例えば造血組織や胃腸 (GI) 組織にとって重要である。細胞周期外にある静止中の組織幹細胞においては、NHEJ 経路が唯一の DNA 損傷修復経路である。したがって、NHEJ 経路、おそらく高精度の NHEJ の方は PLDR に関与しており、これを定常期の非周期細胞で起こる修復と操作的に定義する。したがって、生体内および in-situ でのクローン形成性アッセイで示されたように、組織幹細胞で PLDR が多く起こるのは当然である (図 2.4) (Hendry, 1985)。

(40) 幹細胞の静止は、組織幹細胞がゲノムの完全性を維持する上で 2 つの問題をもたらす。1 つめは、静止幹細胞は NHEJ に依存しているが、この修復経路は高精度の経路とエラーを起こしやすい経路の両方から構成されると考えられている。さらに、老齢マウスの HSC で gH2AX 巢が自然発生したことから実証されたように、DNA 損傷は静止幹細胞内で蓄積される (Rossi et al., 2007)。造血幹細胞および前駆細胞 (HSPC : Sca-1⁺, CD34⁻), 骨髄球系共通前駆細胞 (CMP : Sca-1⁻, CD34⁺) および顆粒球/マクロファージ前駆細胞 (GMP : Sca-1⁻, CD34⁺) の放射線感受性を試験した。これらの細胞の放射線感受性を試験管内でのクローン形成性アッセイにより直接試験したところ、予想通り、静止 HSPC は CMP や GMP よりも放射性耐性が強かった (Mohrin et al., 2010)。しかし、2-Gy 照射後の染色体異常の頻度を SKY 分析により測定した結果、静止 CD34⁻HSPC では 2 つの CD34⁺細胞タイプよりも 2 倍以上高くなっていた。幹細胞に富む造血細胞集団は末梢リンパ球と同等の染色体感受性を示すことが報告されているが、この研究に用いられた細胞集団は CD34⁺であったため、この研究からは CD34⁺HSPC の染色体感受性について断定的に判断することはできなかった (Becker et al., 2009)。

(41) これらの結果から、NHEJ 経路により行われる PLDR では、静止組織幹細胞の生存率は高いものの、染色体突然変異の頻度も高いことが示唆される。この考察と一致するように、V79 細胞を用いた古い PLDR 研究においても、定常期で維持された照射細胞は高い生存率を示したが、ヒポキサンチン-グアニンフォスホリボシルトランスフェラーゼ (HPRT) 変異頻度は保持時間にかかわらず同じであった (Thacker and Stretch, 1983)。ただし最近の研究では、ヒト 2 倍体線維芽細胞に放射線を照射すると、細胞周期外の G0 期にある時の方が細胞周期の G1 期

47

にある時よりも染色体異常の頻度が少なくなることが示された (Liu et al., 2010)。静止組織幹細胞のコロニー生存率および突然変異誘発と DNA 修復経路の関係について解明するには、さらなる分析が必要である。

2.3.5. ケアンズの仮説：組織幹細胞中の複製による突然変異を抑制する方法

(42) 高線量の放射線は自然条件では一般的ではないため、放射線損傷への対処は組織幹細胞の正常なメンテナンスおよび機能にとっては重要ではない。むしろ、自然発生する突然変異を回避することの方が重要である。このような自然突然変異のうち、DNA 複製は避けることのできない突然変異源である。もちろん、ヒトのがん登録データの最近の解析によれば、自然 (自発) がんの生涯リスクの変動は幹細胞の総分裂回数、すなわち幹細胞 DNA の総複製回数によって説明できる (Tomasetti and Vogelstein, 2015)。いわゆる「不死配列仮説」という興味深い仮説がケアンズ (1975) により提唱されたが、これは DNA 鎖の非対称分離により組織幹細胞中の複製エラーが最小限に抑えられるというものである。幹細胞は DNA 合成を行った後も鋳型 DNA 鎖を保持し続け、前駆細胞が娘鎖を受け継ぐ。組織幹細胞では鋳型鎖が一度も入れ替わらないため、複製エラーは最小限に抑えられる一方、エラーを含む可能性のある鎖は前駆細胞へと受け渡され、機能性細胞へと分化/成熟するにつれて失われていく。この説を裏付ける証拠として、幼少期に 3H-チミジン注射したマウスにおいて、急速に増殖する腸陰窩の幹細胞領域内に長期ラベル保持細胞 (LRC) が維持されていることが見いだされた (Potten et al., 2002)。鋳型鎖が姉妹染色分体の一方にとどまり続けるためには、組織幹細胞は組換えを起こさなければならず、したがって幹細胞は「組換えマイナス」となるため、NHEJ が唯一の正当な修復系として幹細胞内に残ることになる。また、鋳型鎖説では、有糸分裂時に鋳型鎖を持つ姉妹染色分体はすべて紡錘体極の幹細胞側に分離している必要があり、古い中心体と古い動原体が 1 対 1 で結合するはずであるが、まだ分子学的に明らかにされていない。

(43) 不死配列仮説は、LRC の存在を示す組織学的データに主に基づき提案されたものであり、マウス腸陰窩内の P4 幹細胞は 3H チミジンまたはプロモデオキシウリジン (BrdU) を長時間維持することが明らかになっている (Potten et al., 2009)。現時点では染色体の非対称分離はすべての組織幹細胞に一般化されていないため、不死配列仮説についてはまだ批判的な議論が多くなされている (Lansdorp, 2007; Rando, 2007)。DNA 鎖の非対称分離は、少なくとも HSC と毛包幹細胞では起こらないことが実証されている (Kiel et al., 2007; Waghmare et al., 2008)。ただし、マウス神経細胞の第 7 染色体では鎖特異的分離が報告されている (Armakolas and Klar, 2006)。さらに、DNA 方向特異的染色体分染法 (CO-FISH) 法を利用して解析した結果、マウス線維芽細胞と ES 細胞では姉妹染色分体の分離はランダムに起こっていたが、マウス結腸細胞での分離はランダムではなかった (Falconer et al., 2010)。不死姉妹染色分体の非対称分離には HR 経路の抑制が必要であるが、これは組織幹細胞が HR 経路よりも NHEJ 修復経路に依存している知見と一致している。最近、遺伝子配列解析手法を利用してヒト結腸、血液および頭頸部の健康な幹細胞内での突然変異蓄積率が推定された (Tomasetti and Bozic, 2015)。その結果、これらの組織での変異蓄積率は、不死配列メ

カニズムによる保護が存在しない場合に期待される値と極めて近似していたが、これは複製時の DNA のランダムでない分離を否定する証拠であり、DNA は幹細胞の娘細胞にランダムに受け継がれることを示唆していた。したがって、さらなる証拠が発見されない限り、不死配列仮説についてはまだ議論の余地がある。

2.4. 老化と組織幹細胞の枯渇

2.4.1. 組織幹細胞の死

(44) 組織幹細胞は、個体の一生にわたって分裂し組織を補充し続ける。以前は組織幹細胞は不死であり細胞老化に影響されないと考えられていた。細胞老化の決定因子の一つは DNA 複製によるテロメアの損失である。したがって、急速に複製する細胞には通常、テロメラーゼ活性が備わっており、テロメアの短縮を回避している (Blasco, 2007)。組織幹細胞もテロメラーゼ活性を有することが報告されており、様々な組織幹細胞で確認されている (Harrington, 2004)。ただし、マウスおよびヒト HSC では、試験管内での細胞継代および生体内での動物の老化に伴いテロメア DNA が失われる (Vaziri et al., 1994; Allsopp et al., 2001)。したがって、成体組織幹細胞は（例えば骨髄や腸で実証されているように）極めて高い分裂能を備えてはいるものの、不死である可能性は低い。テロメラーゼ欠損マウスは、骨髄、腸、精巣のように急速に増殖する組織で萎縮を伴う顕著な老化を示すことが報告されている (Lee et al., 1998; Rudolph et al., 1999)。現在は、老化する体内の幹細胞でテロメア短縮が起こっていることを示す十分な証拠が存在している (Flores et al., 2006)。

2.4.2. 幹細胞のテロメア長

(45) 上述の通り、組織幹細胞のテロメラーゼ活性には限りがあるため、DNA 複製のたびにテロメア末端が減っていくことは不可避である。したがって、組織幹細胞にはテロメア消失を防ぐためのメカニズムがいくつか存在する。一つは DNA 損傷を十分修復することであり、これが行われないと細胞が失われ、組織内の幹細胞を補充するために複製する必要に迫られる。このため、損傷チェックポイントおよび DNA 修復は組織幹細胞にとって重要である。また、組織幹細胞ニッチの高度に保護された微小環境内での静止は、組織幹細胞のゲノムの完全性を促進する。ニッチ内にある組織幹細胞は最も長いテロメアを有していることが、マウス毛包、小腸、精巣、角膜および脳の量的 FISH から判明した (Flores et al., 2008)。特にこの研究では、Lgr5+ CBCC のテロメアの蛍光シグナルは P4 細胞のそれと比べて小さく、前者の方が ISC の階層で上位に位置することが示唆された。組織幹細胞はテロメラーゼ活性を有し最も長いテロメアを持つはいるものの、老化マウスではテロメアの短縮が起こる。テロメアの短縮は、連続骨髄移植により HSC の複製が強いられた場合にも加速される (Allsopp et al., 2001)。

49

2.4.3. テロメア短縮と発がん

(46) テロメアが限界まで短縮されると、染色体末端が保護されなくなる。むき出しになった染色体末端は DSB として認識される。DSB はしばしば誤って再接合されて二動原体染色体を生じ、これによって細胞分裂が阻害されるか、あるいは有糸分裂時に切断されて新たな二本鎖末端を生じる。この切断-融合-架橋サイクルによって細胞内でゲノムが不安定化されるが、実際、複製によりテロメアが短縮してしまったヒト胚腎臓細胞の染色体は不安定であることが実証されている (Counter et al., 1992)。テロメアの短縮および染色体の不安定化は、DNA 損傷応答の活性化を介してリン酸化ヒストン H2AX (γH2AX)、p-53 タンパク質 1 (53BP1)、減数分裂組換え 11 (Mre11) 複合体、およびリン酸化 ATM のフォーカス形成などの他の現象をもたらす (Takai et al., 2003)。その結果生じる DNA 損傷応答は、アポトーシス細胞死および/または細胞老化を含む一連の p53 媒介性応答の活性化に至る (Karlseder et al., 1999; d'Adda di Fagagna et al., 2003)。テロメラーゼ欠損マウスは化学物質による皮膚がんの誘発に耐性を示すことから、老化には発がんを強力に阻害する役割があることが示唆される (Gonzalez-Suarez et al., 2000)。細胞老化およびアポトーシスにより幹細胞が失われると、組織の恒常性を維持するためにさらなる複製が強いられる。これにより、組織内の幹細胞がさらに失われるという悪循環が生み出される。したがって、自然発生的または強制的な複製によるテロメアの減少は幹細胞の枯渇につながり、これが老化組織の特徴となっている。

(47) テロメア短縮によりもたらされる細胞老化には、発がんを阻害する役割がある。しかし、マウスおよびヒトにおいて、短いテロメアとその結果生じるゲノムの不安定化は、がん誘導に関連している (Murnane, 2012)。テロメラーゼ欠損マウスは早老の表現型を呈するが、p53 ヌルの遺伝的背景を持つテロメラーゼ欠損マウスでは、上皮がんの発症頻度が高くなっていた (Artandi and DePinho, 2010)。興味深いことに、これらのマウスで p53 ヌル対立遺伝子はホモ接合である必要はなく、ヘテロ接合でも十分高い発がん率を示した。また、p53^{+/+} 遺伝的背景により、テロメラーゼ^{-/-}マウスの早老および幹細胞枯渇表現型が元に戻った (Flores and Blasco, 2009)。したがって、組織幹細胞のテロメア減少によってもたらされる 2 つの相反する結末、すなわち老化組織での細胞充実度の損失、および発がんにおける無秩序な細胞増殖は、p53 の状態が主な決定因子となっている。ヒトにおける放射線発がん性に関しては、テロメアが短縮して染色体の不安定性が増大していた悪性ホジキンリンパ腫患者では、放射線療法後に二次性がんが発症した (M'Kacher et al., 2007)。

2.5. 組織幹細胞ニッチ

2.5.1. 幹細胞ニッチ

(48) 恒常的条件下では、成体の組織幹細胞は非対称分裂して幹細胞と前駆細胞を生じると考えられている。この非対称な細胞分裂が起こるためには、幹細胞微小環境の空間的非対称性が必要であり、幹細胞ニッチ (Schofield, 1978) がそのような非対称性の指示を出している (Watt

and Hogan, 2000)。幹細胞ニッチ内では、幹細胞は特定のストロマの近位に付着しており、一方で娘細胞はこれらのストロマの遠位にある。細胞の片側のみでの接着分子の非対称発現によって特異的相互作用が起こり、これが短時間作用因子、主に組織特異的サイトカインによるシグナル伝達を誘導し、細胞の幹細胞能が維持される。さらに、ショウジョウバエ精巣の精子幹細胞での研究から、幹細胞がストロマに垂直に分裂する上で、中心体の整列が重要な役割を果たしていることが分かっている（Yamashita et al., 2007）。ショウジョウバエ精巣では、幹細胞は精子ニッチ内の間質細胞の近位に位置しており、GFP でタグ付けした中心体は近位から遠位方向に整列する。幹細胞およびその中心体のこの構造的特性は、哺乳類組織でも同じである（Fuchs et al., 2004）。

(49) したがって、幹細胞ニッチの位置情報は、一連の遺伝子の発現を活性化して組織内の細胞を階層構造化する上で極めて重要である。このことは、位置情報を変化させる、あるいは運命決定遺伝子の発現を直接変更することで、幹細胞、前駆細胞および最終分化細胞の遺伝子発現パターンおよび運命を可逆的に変更可能であることを意味する。ショウジョウバエ精巣では、空いている幹細胞ニッチを占領した前駆細胞が幹細胞になることが実証されている（Cheng et al., 2008）。この脱分化には、特殊な遺伝子発現パターンが伴う。ペアードボックス 5 (Pax5) 欠損成熟 B 細胞が脱分化した後に T 細胞へと分化転換したことから、遺伝子の直接操作によって細胞の脱分化および分化転換がもたらされることが明らかになった（Cobaleda et al., 2007）。脱分化および分化転換の極端な例として、オクタマー結合転写因子 3/4 (Oct3/4)、Y 染色体決定領域ボックス 2 (Sox2)、c-Myc、およびクルッペル様転写因子 4 (Klf4) の 4 つの幹細胞特異的遺伝子の異所性発現によりマウス線維芽細胞が人工多能性幹 (iPS) 細胞へと転換するケースが挙げられる（Takahashi and Yamanaka, 2006）。最近の研究はいずれも、細胞の運命はリプログラム可能であることを示している。

2.5.2. シェルターとしての幹細胞ニッチ

(50) 幹細胞ニッチは、放射線曝露などの遺伝毒性損傷後の迅速な幹細胞プールの確立を促進することが示された。致死線量を照射したマウスに MSC を移植すると、その HSC ニッチ調節活性により救出される（Lange et al., 2011）。定常状態では、幹細胞ニッチは様々な遺伝毒性ストレスからのシェルターを提供することが示された。組織幹細胞は、個体の一生涯にわたって自身を維持し続けなくてはならないため、遺伝毒性ストレスを回避するための戦略を数多く備えている。ROS から逃れるための戦略の一つが、MSC のケースのように細胞内抗酸化物質の力を借りることである（Chen et al., 2006）。別な戦略は、低酸素環境中で静止状態を維持し続けることであり、HSC の幹細胞ニッチがその 1 例である（Suda, 2007）。

(51) 骨髄には HSC のニッチが 3 種類存在する：骨芽細胞性ニッチ、血管性ニッチ、髄質細胞性ニッチ（付属書 A）（Shiozawa and Taichman, 2012）。骨芽細胞性ニッチ内では HSC は骨芽細胞と密接に関連している。つまり、放射線発がんの最も重要な標的のうちの 2 つが組織内で同

じ微小環境内に存在していることになる（Calvi et al., 2003; Zhang et al., 2003）。HSC は静止状態にあるが、細胞がこの状態にあるのはニッチ内に存在していることに依存している。骨芽細胞性ニッチ内の HSC の静止状態は、2 つの細胞タイプ間の Tie2/アンジオポエチン 1 (Ang-1) シグナル伝達によって制御されている（Arai et al., 2004）。静止状態は EpiSC も含め他の組織の幹細胞にも共通の特性である（Nishikawa and Ozawa, 2007）。また、神経、乳房、間葉系および脂肪組織など多くのタイプの組織幹細胞に加え、ES 細胞も、低酸素条件下の方が試験管内および体内で安定して維持される（Ivanovic et al., 2000; Danet et al., 2003; Ezashi et al., 2005; Zhu et al., 2005; Lin et al., 2006; Grayson et al., 2007）。HSC の骨芽細胞性ニッチには血管が少なく、一部の HSC は低酸素マーカーであるビモニダゾールで強く染色されることから、ニッチの酸素濃度は 2%未満であることが示唆される（Parmar et al., 2007）。骨芽細胞性ニッチ内に存在する HSC は、原始的で分化の方向付けがなされていないタイプであり、低酸素状態は細胞を内生 ROS から保護する上で有利である。最近の見解として、重要な「造血ニッチ」は、骨梁表面付近に位置する間葉系間質細胞および内皮細胞が形成する血管周囲空隙から構成されるものと考えられている（Morrison and Scadden, 2014）。幹細胞ニッチによる保護的な役割は、組織幹細胞への放射線の影響を評価する上で考慮する必要がある。

(52) ニッチ微小環境内での低酸素は重要ではあるが、興味深いことに、ES 細胞の培養時にはゲノム安定性維持のために適切なレベルの ROS もまた必要である（Li and Marban, 2010）。ES 細胞における染色体異常の頻度は酸素レベルが低下するにつれ低下し、抗酸化剤処理により ROS をさらに減少させると細胞内の染色体異常は増加した。この増加は、完全なる ROS 不在下では修復関連遺伝子の発現が喪失することと関連していた。

2.5.3. ニッチをめぐる幹細胞間の競合

(53) 幹細胞は非対称細胞分裂するという古典的概念に反し、幹細胞はしばしば対称分裂して 2 つの幹細胞を生じるか、あるいは分化を方向づけられた 2 つの幹細胞/前駆細胞を生じることが多数の研究結果から判明している（図 2.5）。前者の場合、過剰な幹細胞がニッチをめぐる競合することで劣等な幹細胞が排除される。後者の場合、分化を方向づけられた 2 つ細胞がニッチを去ることで、空の幹細胞ニッチが生じる。以前は生涯にわたって組織内に存在し続けると考えられていた幹細胞だが、これらのプロセスによって幹細胞のターンオーバーが起こる。

(54) このような競合とターンオーバーは、小腸陰窩の変異幹細胞の解析により初めて実証された（Potten et al., 2009）。例えば、突然変異源処理されたマウスでは、結腸では 5~7 週間以内に、小腸では 12 週間以内に変異幹細胞が陰窩全体を占拠する（Loeffler et al., 1993）。単一の幹細胞からの集団増殖、およびこれに伴う陰窩の単一クローン性も、小腸陰窩内の Lgr5⁺幹細胞の系統タギングにより実証された。クローンサイズの分布パターンから、方向圧力のない中立的浮動によって、ISC が隣接細胞を置換するか隣接細胞により置換されるかは同等である

と結論づけられた。したがって、ISC は失われるときもあれば陰窩全体を占拠することもある (Lopez-Garcia et al., 2010)。系統タギング法を利用して様々な組織を分析したところ、精巣の精子幹細胞 (Klein et al., 2010; Lopez-Garcia et al., 2010) および皮膚幹細胞 (Clayton et al., 2007) でも同様な幹細胞の競合およびそれに伴うターンオーバーが観察された。

2.5.4. 成体幹細胞ニッチ確立時の幹細胞の競合

(55) 組織タイプによって異なるが、通常、成体幹細胞ニッチは周産期から出生後期あたりに確立される。例えば、マウス腸管は高い増殖活性を備えた上皮細胞の単純な管として形成される。これらの能力の等しい上皮細胞、または胎生幹細胞の最初の分化は、出生後の栄養吸収に必要な絨毛の形成であり、胎生 15 日目に起こる。組織増殖を維持するための成体幹細胞ニッチとなる陰窩の形成は胎生 7 日目から始まる (Crosnier et al., 2006)。ここで特筆すべきなのは、形成されたばかりの成体小腸にはニッチがわずかしかなかったが、胎児小腸内にはかなりの数の胎生幹細胞が存在する点である。つまり、ニッチをめぐる強力な競合があることが示唆される。もう一つ特筆すべき点は、新生児の陰窩を占める幹細胞集団は多クローン性であり、単一クローン性は生後およそ 2 週間後に確立される (Schmidt et al., 1988)。この単一クローン性への転換は、胎生幹細胞間でニッチをめぐる競合が起こっていることを実証するものである。

(56) 造血発生は胚の卵黄嚢領域で最初に観察され、その後大動脈・性腺・中腎領域へと移行する。胎児期の造血は主に肝臓で行われるが、成体では赤色骨髄で行われる。胎児の肝臓内の HSC が骨髄ニッチへと移動し定着する (Orkin and Zon, 2008)。肝臓から骨髄への HSC の移動は哺乳動物全般で起こるが、マウスとヒトの間では発達中の胎児における造血の経時的パターンや主に造血が行われる部位が明確に異なるようである。例えば、発達中のヒト胎児では、造血活性は妊娠後期の骨髄内で着実に増大する。一方マウスでは、妊娠中期から出生までの主な造血部位は肝臓であり、HSC が肝臓から骨格部位へと活発に移動するのは、妊娠のかなり末期から出生後早期になってからである。マウスとヒトでは、「成体ニッチ発生」のプロセスは出生後のそれぞれ異なる時期に行われているものと思われる。

(57) 胎児肝臓内の HSC は、成体骨髄内の HSC とは特性が異なっており、前者は細胞周期が早く、後者は静止状態にある。HSC の特性が徐々に変化するのは、マウスでは生後 3 週目である。骨髄への再分布は、少なくともマウスではランダムではなく選択的に起こるため、S/G2/M 期移行中の HSC は生着能を欠いており、G1 期の HSC は骨髄ニッチ内に定着することができる (Bowie et al., 2006)。したがって、マウス HSC の場合、発生における新生児期での成体幹細胞ニッチへの定着が選抜プロセスの役割を果たしており、幹細胞同士がニッチへの定着をめぐる競合することで、好ましい細胞が維持され好ましくない細胞が排除される (図 2.6)。

2.5.5. 幹細胞競合に対する放射線の影響

(58) 放射線照射は骨髄ニッチへの定着をめぐる HSC の競合に影響を及ぼす。2 種類の骨髄細胞集団を標識して混合し、致死線量を照射されたマウスに移植すると、再構成された HSC に占める両集団の割合は均等になる。しかし、2 つの集団のうち片方に 1Gy を照射し、これをもう片方の未照射集団と混合して移植すると、再構成された骨髄 HSC は主に後者の集団によって占められる (Bondar and Medzhitov, 2010)。放射線照射した p53^{+/+}または p53^{-/-}遺伝子型の HSC は未照射の野生型集団との競合に負けなかったことから、この競合では p53 が放射線照射のストレスを感知する上で重要な役割を果たしていることが分かる。競争力は p53 のレベルのみに依存しており、p53 タンパク質レベルが増加したマウス二重微小染色体 (MDM2)^{-/-}マウスの骨髄細胞は、放射線照射されていなくても野生型マウスの骨髄細胞との競合に負ける。これと若干似た事象として、機能阻害された二量体化ドメインを有する p53 をレトロウイルスにより導入された骨髄細胞は、2.5-Gy の X 線照射後に野生型細胞よりも優勢となることが観察された (Marusyk et al., 2010)。全体として、組織幹細胞ニッチをめぐる幹細胞間の競合は、p53 により感知される放射線ストレスの影響を受ける。

3. 放射線発がんにおける組織幹細胞の役割

3.1. 放射線発がんにおける組織幹細胞の役割

(59) 本章では、放射線健康リスク評価の基本プロセスの重要性、および放射線防護の ICRP システムに不可欠であると考えられているガイドラインの開発について述べる。セクション 1 および 2 では組織内での発がんのメカニズムを取り上げ、特に LNT モデルおよび RR モデルにおける組織幹細胞および他の潜在的標的細胞の役割に重点を置く。続いて、幹細胞の放射線生物学、および組織幹細胞ニッチをめぐる幹細胞間の競合のダイナミズムについて考察する。この組織レベルでのダイナミズムは、これまでは細胞修復の観点からのみ考慮されてきたが、線量率効果を考慮する際に重要な役割を果たすと考えられる。幹細胞の競合は新しい概念であるが、放射線リスクのいくつかの特徴、何より放射線発がんの年齢依存性について説明することができる。全体として、本章は幹細胞生物学の知見と放射線リスク評価の重要な問題との間に橋を渡すものである。

3.1.1. 多段階発がん

(60) 成人期のがんは、主に出生後に起こる発がん性突然変異の蓄積により発生するものとみなされており、小児がんは胎児発達中に生じた変異または親から継承された変異を特徴とする。成人のがん、特に固形がんの発生率は、年齢とともに着実に増加する。Armitage と Doll (1954) は、がんの発生率は年齢の 5 乗に比例すると指摘し、多段階発がんモデルを提唱した。同モデルはその後、ヒト結腸がんの分子解析により裏付けられ、正常な上皮細胞の腺腫への転換およびがん腫への進行は、発がん遺伝子および腫瘍抑制遺伝子の突然変異の段階的獲得を伴うこと

が実証されている（付属書 D の図 D.8；Vogelstein et al., 1988）。自発的プロセスによる複数の突然変異の獲得には長期間を要するため、成人期のがんは晩年に発生する。

(61) 小児がんは出生から 15 歳までの思春期前に出現する特殊な腫瘍群を形成する。成人期がんとは異なり、網膜芽細胞腫などの小児がんは、発生するまでにわずか 2 段階しか要さないことが分かっている（Knudson, 1971）。小児がんがなぜ比較的潜伏期間が短く思春期前の若年期に発生するのかは、この 2 段階発がんプロセスによって説明できる。成人期がん小児がんの間で発生に要する段階（または突然変異）の数が異なる理由についてはまだ完全には解明されていない。ただし、おそらくは両者の標的細胞タイプが異なるためであり、前者の一部は胎児期の原始細胞（その結果発生するがんには「芽細胞腫」という接尾語がつくものが多い）、後者は成体組織幹細胞および前駆細胞を標的とする。

(62) 動物実験により、段階的発がんプロセスは 4 つの段階に分類できることが分かっている：正常な細胞が前がん性状態へと不可逆的に変化するイニシエーション段階、イニシエーションされた細胞が増殖およびクローン増殖するプロモーション段階、細胞が腫瘍としての特性を獲得する悪性転換段階、および細胞内にさらなる変化が蓄積して正常組織の領域へと浸潤する進行段階である。それぞれの段階で、細胞の増殖、静止、分化、老化、およびアポトーシスを制御する遺伝子の機能が変化する（Perez-Losada and Balmain, 2003）。これらの遺伝子機能の変化は、突然変異誘発による遺伝的メカニズム、および転写因子、クロマチン修飾、DNA メチル化、および調節性マイクロ RNA (miRNA) によるエピジェネティックなメカニズムによって生じるものが多い（Sharma et al., 2007）。ただし、本報告では論点を絞り、突然変異が決定因子となっている多段階発がんモデルに焦点を当てる。これは、放射線発がんの数値的側面についての議論を簡略化するのが狙いである。同じ理由で、エピジェネティクスおよびプロモーション/進行面に関する機構モデルについても考慮しないこととした。

3.1.2. 発がんの標的細胞

(64) 発がんの標的細胞は、組織幹細胞およびその前駆細胞であると考えられている（Reya et al., 2001）。組織幹細胞とがん細胞の特性の類似性からこの前提は妥当であると考えられ、ヒト白血病でがん幹細胞が発見されてからはこの類似性が特に強くなった（Lapidot et al., 1994）。がん幹細胞は、乳房（Dick, 2003）、脳（Hemmati et al., 2003; Singh et al., 2003）、前立腺（Lawson and Witte, 2007）、肝臓（Roskams, 2006）、および他の多くの組織で発生する様々な固形がんでも発見されている。がん幹細胞は、多くの点で正常な組織幹細胞と類似している。がん幹細胞は自己再生能を有しており、適切な宿主に移植されると腫瘍形成を開始可能である。がん幹細胞は SP 表現型を示すため、正常な組織幹細胞と同様に化学療法剤に耐性を示す。また、急速に増殖する非幹細胞とは対照的に、がん幹細胞は生体内でしばしば静止しているが、これは損傷チェックポイントが恒常的にアップレギュレートされているためである（Bao et al., 2006）。

(65) これらの類似性から、がん幹細胞は、正常な組織幹細胞および幹細胞能を回復することが可能なその前駆細胞から生じることが示唆される。がんの起源が幹細胞であるという説は、組織幹細胞のプールサイズが発がんリスクと関連しているケースが見られること、および複数の突然変異を蓄積し悪性表現型を獲得する上で十分な時間内に滞在し得る細胞タイプが幹細胞のみである（分化が方向付けられた前駆細胞は十分な時間滞在できない）ことから示唆される（ICRP, 2005）。また、自然（非照射）条件下でのがんリスクに関しては、多種多様な組織の各々における（アメリカ人）集団の組織特異的な生涯がんリスクと、推定生涯総細胞分裂回数（推定幹細胞数と幹細胞あたりの推定生涯細胞分裂回数との積）との間に強い相関が報告されている（図 3.1）（Tomasetti and Vogelstein, 2015）。同研究に関しては、データの選択、集団間のリスクの差、および解析法について様々な議論がなされている（Sills, 2015）。いずれにせよ、特定の遺伝子突然変異と特定のがんの罹患率の増加との関連性に関する知見は増加しているものの、正常なヒト集団におけるがんリスクと相関性があるとされている生物学的パラメータは、現在のところ他には生涯幹細胞分裂回数のみである。したがってこの研究は、伝統的に受け入れられてきた環境や遺伝的要因だけでなく、複製に媒介される体細胞突然変異も自然発生がん（SC）の原因として重要である可能性について強調している。また、Gy あたりの過剰絶対リスク（EAR）または過剰相対リスク（ERR）のいずれかをを用いて放射線リスクについても相関が試験された。しかし、放射線リスク値が入手可能である 10 の体内部位については、推定生涯総幹細胞分裂回数との有意な相関は見られなかった（Little et al., 2015）。したがって、このリスクに関するエビデンスから、幹細胞の複製自体は様々な組織における放射線リスクの支配的メカニズムではないことが示唆される。今のところ、様々な組織において他の幹細胞パラメータ（DNA 鋳型維持、ゲノムの不安定性、および幹細胞競合）が上述の相関に影響を及ぼすという十分な証拠は得られていない。

(66) ランクの低い幹細胞および前駆細胞もまた発がんの標的となり得ることを示唆する例がある。P4 幹細胞よりもランクの低い Lgr5+ CBCC における Cre リコンビナーゼに媒介される大腸腺腫症（APC）遺伝子の喪失は、完全な腺腫の形成に至ることが見いだされた（Barker et al., 2009）。さらに、ヒト脳において、前がん病変はまず分化した区画内で生じ、その後 5~10 年の潜伏期を経て分化型星細胞腫から低分化膠芽腫が生じることが知られている（Kihues and Cavenee, 2000）。分子レベルでは、キナーゼ 4a の阻害剤/代替読み枠（Ink4a/Arf）の不活性化は星細胞腫の脱分化を引き起こし、さらに恒常的に活性化 EGF 受容体（EGFR）を導入することで細胞に悪性神経膠腫表現型が付与されることが実証された（Bachoo et al., 2002）。

(67) 造血器悪性腫瘍では、前駆細胞が高い増殖能を保持している。マウスでは、長寿の前駆細胞が成人期の定常状態造血に部分的に貢献していることが実証されている（Sun et al., 2014）。白血病およびリンパ腫の多くは特定の系列に分化が方向付けられた表現型を保持することから、長寿の前駆細胞は発がんの一般的な標的である可能性が高いと考えられている。加えて、9 番染色体タンパク質由来の混合型白血病-急性性リンパ芽球性白血病 1 融合遺伝子（MLL-AF9）という融合発がん遺伝子を前駆細胞に直接導入すると白血病幹細胞になることが実証され

ている (Krivtsov et al., 2006)。放射線誘発胸腺リンパ腫の古典的マウスモデルは、胸腺環境内で CD4⁺CD8⁺ 前駆細胞から生じることが示された (Kominami and Niwa, 2006)。特筆すべき点として、造血器悪性腫瘍の増殖はニッチに依存していることが挙げられる。白血球細胞の増殖には骨髄の微小環境が必要であり、リンパ腫細胞の増殖にはリンパ節環境が必要である。これらの 2 つの造血器悪性腫瘍はそれぞれ幹細胞の表現型および分化が方向付けられた前駆細胞の表現型を保有している。

(68) 皮膚もまた、幹細胞に加えて前駆細胞ががんを形成し得る組織である。付属書 F で議論されている通り、皮膚では BCC, SCC および乳頭腫の 3 つのがんタイプが知られている (セクション F.5, 図 F.5)。EpiSC はヨーロッパ系人種で多くみられる BCC を生じ、初期前駆細胞はより悪性度の高い SCC を生じ、後期前駆細胞は良性乳頭腫を形成すると提唱された。これは興味深く有益なモデルではあるが、初期前駆細胞がどのようにして破棄されずに極性化された細胞の流れに耐え得るのかは分かっていない。

(69) その他の考慮すべき点として、MaSC の数は子宮内のホルモンレベルによって決定されることから、出生後の乳がんリスクへの影響が示唆される (Trichopoulos, 1990)。同様に、新生児の体の大きさは白血病リスクと相関することも知られている (Caughey and Michels, 2009)。最近になって、この相関にはインスリン様成長因子 1 (IGF1) が関与することが示され、標的細胞の数の多さあるいは HSC の増殖率の高さが白血病誘発に関与していることが示唆される (Chokkalingam et al., 2012)。最後に、増殖能の高い小腸はヒトでは発がんに耐性を示すが、隣接する大腸は放射線発がんの標的になりやすいことから、必ずしも変異した幹細胞がすべてがんを引き起こすわけではないことが分かる。大腸に比べて小腸でがん罹患率が著しく低いのは、小腸 P4 幹細胞のアポトーシスへの感受性の高さが原因であると提唱されている (Liet et al., 1992; Potten et al., 1992)。したがって、標的細胞の数だけでなくその挙動も発がんにおいて重要な役割を果たしている。

3.1.3. 発がんにおける放射線の役割

(70) 放射線発がんの現在のモデルにおいて、放射線は突然変異源として作用すると仮定され、標的細胞に 1 つか 2 つの発がん性変異をもたらすであろうと考えられている (ICRP, 2007)。放射線は DSB, 特にまとまった DNA 損傷を伴う DSB を誘発することが知られているが、これらは欠失や転座などの大きな変異を起こしやすい。転座の誘発は線形二次 (LQ) 線量反応であり、小さな欠失の誘発は線形線量反応である可能性が高い。欠失変異は腫瘍抑制遺伝子を不活性化し、転座は強力な転写プロモーター要素と並置させるか、あるいは発がん機能を有する融合遺伝子を生じることによってがん原遺伝子を活性化する。放射線の標的となるこれらの作用は LNT モデルの理論的根拠となっており、低線量および低線量率での健康リスク予測に利用されている。

(71) 発がん性変異誘発への放射線の直接的な関与については、放射線を照射した細胞を培養し、白血病や甲状腺がんを引き起こす再配列された遺伝子の転写産物を検出する実験を通じて研究されている。しかし、このような再配列を誘発するのに必要な線量は 50~100 Gy であり、

実際は数 Gy でこれらのがんが誘発されることを考えると極めて高い線量であった (Ito et al., 1993a,b)。さらに、小児甲状腺がんにおけるトランスフェクション中再構成/甲状腺乳頭がん (RET/PTC) 要素の特徴的な再配列の発生率は、強い年齢依存性を示したことから、このような転座が放射線被ばく起因するものであるかどうかについてはさらなる研究が必要である (付属書 C)。したがって、放射線誘発がんにおける放射線の痕跡についてはまだ同定できていない。

(72) 最近、複数の発がん性変異の誘発への放射線の直接関与を示唆する興味深いメカニズムが発見された。変異の段階的取得に対し、ヒトのがんのゲノム解析を実施したところ、すべてのがんの 2~3% および骨肉腫の約 25% が複数の変異を一度に獲得していることが判明した (Stephens et al., 2011)。この現象は染色体破砕と呼ばれ、1 本または数本の染色体の極めて限局した領域が、関与する領域間を行ったり来たりして複数のゲノム再配列を引き起こす。染色体破砕の発生における小核の関与が最近証明された (Crasta et al., 2012)。小核は放射線によるシングルヒットプロセスを通じて容易に誘発されるが、細胞死での役割については示唆されているものの、発がんでの役割については不明である。したがって、放射線発がんにおける染色体破砕の役割についてはさらなる研究が必要である。

(73) これらの標的とする作用に加えて、放射線にはバスタンダー効果やゲノム不安定性の誘導など、標的以外の作用もあることが知られている (ICRP, 2003, 2007; UNSCEAR, 2006)。昔から放射線には遺伝子発現に一過性的な変化を誘発する作用があることが知られているが、これらの変化の中には照射後に長期間かけて発生し持続するものもある。放射線の標的以外の作用には DNA メチル化というエピジェネティックなメカニズムが関与していることが示されている (Goetz et al., 2011)。これらの効果は、標的細胞に非致死異常を引き起こせばリスクを増加させるが、致死性 (遅発性生殖細胞死) であればリスクを低下させると言われている。およそ 0.5Gy を超える急性線量を照射後にそのような効果が存在するという証拠が多数得られている (UNSCEAR, 2006)。ただし、多くの場合、これらの効果と線量とは線形関係にないため外挿が困難である上、放射線防護に関わるような線量レベルでの研究も少ない。適切な例という、放射線に誘発される骨髄性白血病および骨髄細胞の染色体不安定化の両方に耐性または感受性を示し、高線量の放射線照射後のバスタンダーシグナル発生にも違いがある C57BL/6 および CBA/Ca マウスの利用である (Zyuzikov et al., 2011)。1.7mGy から 3Gy という急性および広範な線量範囲で試験したところ、骨髄におけるバスタンダー効果 (照射 3 時間後の p53 シグナル伝達経路により評価) は 100mGy を超える線量でのみ観察され、30 日目の染色体不安定化は 1Gy を超える線量でのみ観察された。これらの結果は幹細胞に限らず全骨髄細胞に基づくものであったが、これらの効果が低線量範囲で存在することを示唆するような証拠は得られなかった。さらに、1Gy 超の線量に曝露された原爆 (A-bomb) 生存者 50 名から単離した特徴的な転座を有するクローン増殖 T 細胞集団を FISH 解析したところ、過剰レベルの染色体不安定化は認められなかった (Kodama et al., 2005)。これらの結果は、UNSCEAR (2010, 2012) による以下の結論と一致するものである。

今日、低線量放射線曝露の生物学的影響およびバスタンダー現象や遺伝性のゲノム不安定化などの非標的効果に関しては非常に多くの

データが得られている。非標的効果に関する機構的な理解は進んでいるものの、いまだ多くの研究は主に観察に基づいている。高い線量（率）と低い線量（率）での遺伝子およびタンパク質発現応答の違いに関する報告もなされている。これらの報告は互いに結果が矛盾しており、自信をもってリスク評価に利用できるような堅固なデータに要求される一貫性が不足している。同様に、非標的現象と放射線関連疾患との因果関係を示す証拠もまだなく、非標的現象の中には低線量では生体内で発生しないものもあり得る。システムレベルでの枠組みがあれば、将来的に機構的データをリスク推定方法に統合する際に有用な指針となるであろう。

ゲノム不安定化を含む非標的効果の放射線発がんにおける役割については、ヒトではまだまだ深くは理解されていない。しかし、興味深いことに、放射線に対する過敏症、DNA 修復の欠陥、ゲノム不安定性の増加、および悪性疾患発生率の増加がヒトで観察されている (Steffier, 2010)。

(74) 放射線は組織微小環境内での細胞間および細胞組織間相互作用を変化させることも知られている。乳腺の場合、放射線は乳がんの発がんにおいて重要な役割を果たす形質転換増殖因子 β (TGF β) をマトリクスから誘導することが示されている (Nguyen et al., 2011)。放射線照射は、Notch1 および p53 ノルの幹細胞に骨髄ニッチ占有における選択優位性を付与して幹細胞-ニッチ間相互作用を変化させることで、白血病のさらなる進行に寄与する (Marusyk, 2009; Marusyk et al., 2010)。これらの研究から、放射線はがん誘導で様々な役割を果たしていることが示唆される。いずれにせよ、放射線の標的メカニズムに基づく LNT モデルは、低線量および低線量率曝露のリスクを評価する際にいまだに広く利用されている。委員会は、LNT モデルは最も実用的なアプローチであり、放射線リスク管理の上での予防原則にふさわしい堅実な根拠であると考えている (ICRP, 2005, 2007)。したがって、妥当な放射線防護プログラムを確立するために LNT が利用されている。このモデルは放射線曝露したヒト集団、特にヒトでのエビデンスのゴールドスタンダードを形成する原爆生存者におけるがん誘導の疫学的データとほぼ一致しているが、この原則から明らかに逸脱する組織特異的な例外も少数あり、他のモデルも同等に適用可能なケースも存在する。

3.1.4. 放射線発がんのモデルおよびリスク

(75) 放射線線量と固形がんの罹患率との関係は原爆生存者においては概ね線形であるものの、死亡率を解析すると <2Gy の線量範囲では浅い曲線性が観察された (Preston et al., 2007; Ozasa et al., 2012)。生存者に見られた固形がんの大部分はいわゆる「がん年齢」で発症しており、年齢と罹患率の傾向は非被ばく集団と同様であったが、前者の方が罹患率が高く、線量依存的であった。これらの効果は、放射線は完全な悪性化に必要な複数の変異のうちの一つに寄与するという仮定を支持する (ICRP, 2007)。文献では変異の数は 3~7 個であると提唱されている (Tomasetti et al., 2015)。発がんには 5 個の変異が必要であると仮定すると、SC はすでに 4 個の変異を有する細胞のうちいずれか 1 つが、内部/外部突然変異源によって増強された DNA 複製や染色体分離エラーなどの自然突然変異プロセスを通じてもう 1 つ変異を獲得した時点で

発生する。このような自然突然変異は、幹細胞の細胞分裂に伴う DNA 複製によって誘発されると想定されている。これに基づくと、特定の組織タイプの自然（自然発生）がんの生涯リスクを log/log グラフにプロットすると、幹細胞の総分裂数と強く線形相関していることが最近明らかになった (図 3.1; Tomasetti and Vogelstein, 2015)。また、放射線誘発がんは、4 つの自然突然変異を有する細胞に、放射線によりもう 1 つ変異が誘発されると起こると予想される。すべてのがんタイプで単位線量あたりの RR 値の桁数が同じであると仮定すると、放射線曝露集団の生涯がんリスクは、リスクに関する線形相関が log/log プロットのベースライン線形相関に平行に上方へとシフトすることが予想できる (図 3.1)。

(76) 照射集団 (OI) におけるがんの全発生率は、放射線誘発がん (RC) と SC の発生率を合わせたものである。したがって、放射線に曝露されたヒト集団における RR は、 $RR = OI/SC = RC/SC + 1$ の式で表すことができる。概して、放射線は突然変異を 5 個を有する細胞の割合を増加させると予想されるため、「乗法モデル」とも呼ばれる RR モデルは成人期発症がんのリスク評価に妥当である。したがって、正味の効果としては、放射線はがんリスクを線量の増加に対して直線的に、バックグラウンド罹患率を超えて比例的に増加させる。しかし、これらの考察は、放射線の役割が他の変異源因子に比べて相対的に小さいことを示している。そうすると、放射線は発がんの主要原因ではないため、果たして「放射線誘発がん」という表現が妥当であるのかという疑問が出てくる。「放射線付随がん」または「放射線関連がん」と呼ばれよいかもかもしれないが、本報告書では歴史的な理由および議論を簡潔にするために「放射線誘発がん」という用語を使用する。RR モデルとは異なり、絶対リスク (AR) モデル（「相加モデル」と呼ばれることもある）では、放射線リスクはバックグラウンドリスクから独立しており、線量に線形的に依存すると仮定される。今日では、RR モデルおよび AR モデルはどちらも原爆生存者集団における固形がんリスクに良好に適合すると考えられ、被ばく時の年齢および到達年齢の変更効果に関して一貫性のある結果が得られる (Ozasa et al., 2012)。

(77) 記述的モデルとしての役割以外に、RR モデルは放射線に被ばくした人の発がんリスクを予測管理する上で実用的に利用できることが示唆される。放射線は絶対的な変異原であるため、被ばく後のリスク管理は不可能であると考えられている。しかし、上述したように RR モデルでは、放射線照射によるリスクの高さはバックグラウンド罹患率に比例すると予測される。このため、バックグラウンド罹患率を低下させる措置は、放射線による EAR の増加をも低下させ得る。一つの例として、喫煙者而非喫煙者における居住環境由来ラドンによる肺がんのケースが挙げられる。ラドンの ERR は喫煙者而非喫煙者で 100 Bqm⁻³あたりおよそ 0.16 とほぼ同じであったが、75 歳でのバックグラウンド罹患率は喫煙者而非喫煙者の間で約 25 倍の差があった (Darby et al., 2006)。マウスでは、カロリー制限により骨髄性白血病の自然発生が減少することが実証されている。放射線被ばく後のカロリー制限によっても照射マウスでの罹患率が低下することが示された (Yoshida et al., 1997)。カロリー制限およびその他の措置の適用については、これらの措置が実験動物における放射線誘発がんおよび様々な効果についてのレビューが最近出版されている (Oliai and Yang, 2014)。これらの実験結果から、ヒトの健康を促進する措置、例えば禁煙や食生活の改善などは、

<p>バックグラウンド罹患率のみならず、放射線による一部のがんタイプの罹患率増加も減少し得ることを示唆している。このような措置は、理論上、RR モデルが適応可能ながんタイプにおいて有効であると期待される。これらの措置が将来の発がんの減少に有効であるか否か検証するために、疫学的研究を計画してもよい。</p>
<p>(78) 固形がんとは対照的に、原爆生存者における白血病、特に急性骨髄性白血病（AML）の線量反応は、強力な二次成分および線形成分を有する（Hsu et al., 2013）。さらに、AML は放射線被ばく後の潜伏期間が比較的短い。これらのことから、この腫瘍に関与する突然変異の数は少ないことが示唆される。突然変異の数が少なければ、放射線は絶対的な発がん物質として作用することで、このような突然変異をすべてもたらし得る。同様に、セクション 3.1.1 で考察するように、小児がんは成人期がん比べて少ない数の突然変異によって誘発され、潜伏期間が短いことが知られている。これらのがんタイプ、すなわち白血病と小児がんは、特定の標的集団におけるバックグラウンド罹患率に関わらず、放射線だけで十分にがんを誘発可能であるため、AR モデルが適合すると考えられる。</p>
<p>(79) 現時点の結果に関する上記観察から、放射線の役割、線量反応曲線の形、潜伏期間、および放射線発がんモデルに関する以下のパラダイムを導くことができる。放射線は線量が増加するにつれて線形的または LQ 的に突然変異を誘発する。放射線の役割は、発がんプロセスに必要な突然変異のうち数個（1 または 2 個）のみをもたらすことである。成人期固形がんは比較的多くの突然変異を必要とするため、放射線によって生じる 1 つの突然変異に加えて、他のプロセスによる変異がいくつか生じないと完全な悪性化には至らない。そのため、放射線被ばく後に長い潜伏期間を要する。このようながんは、線形の線量反応を示し、LNT モデルによく適合し、そのリスクは RR モデルにより予測可能である。これに対し、白血病および小児がんは必要とする突然変異の数ははるかに少なく（例えば 2 個）、放射線単独で誘発可能である。このようながんは LQ 線量反応を示し、潜伏期間が比較的短く、そのリスク予測には AR モデルが最適である。上記のようにまとめた線量反応、潜伏期間および放射線発がんモデルの特徴は過剰に単純化されているが、将来の研究およびメカニズムのさらなる理解を深めるための基盤となる。</p>
<p>(80) 一部のがんタイプには例外も見られ、例えば放射線誘発小児甲状腺がんなどがそうである。このがんは、チェルノブイリ原発事故後にスクリーニングプログラムを実施した結果、事故から最短 4 年という短い潜伏期間で現れた。しかし、小児甲状腺がんについては線形的な線量反応が報告された（Ron et al., 2012）。この法則を念頭に置くと、小児甲状腺がんは 2 つの突然変異を必要とし、RET/PTC 再配列をすでに保有している小児において、細胞が完全に悪性化する上で必要な 2 つめのヒットを放射線が誘発したことにより、短い潜伏期間で線形線量反応が起こったと推測し得る。再配列は甲状腺の良性結節で頻繁に見られることから、このようなメカニズムの可能性が示唆される（Marotta et al., 2011）。</p>
<p>(81) バックグラウンドリスクの異なる 2 つの集団間でリスクを転換する際、放射線防護のためのリスクモデルが経験的に選択されてきた</p>

<p>(ICRP, 2007)。この重要なテーマについては包括的なレビューが存在する（Wakeford, 2012）。現在、ICRP は多数のリスク転換モデルを利用しており、あらゆるがんタイプについては RR モデル 50%と AR モデル 50%の混合モデル、ただし甲状腺と皮膚がんでは 100% RR モデル、乳がんおよび白血病では 100% AR モデル、および肺がんでは RR モデル 30%と AR モデル 70%の混合モデルを利用している。これらのがんタイプの中で、AR モデルでの乳がんは上記の単純化された記述から明らかに逸脱している。40 歳未満で被ばくした女性における線量反応は線形であり、期待される LQ よりわずかに上方にカーブしており、潜伏期間はわずか数年ではなく比較的長く、日本人とヨーロッパ人またはアメリカ人とのバックグラウンド罹患率の違いがあまりに大きいため、特定の年齢について比較を行うためには AR モデルの方が堅実で良好な適合性を示すと考えられる（Preston et al., 2007）。したがって、ここで提案する作業仮説は、放射線被ばく後のがん罹患率の傾向を予測するには単純すぎる。ただし、今回の考察は、放射線発がんのメカニズムについての洞察、およびリスク転換のためのリスクモデルの選択に関する示唆を得る上で有用である。</p>
<p>(82) 放射線発がんのリスクおよび感受性は EAR および ERR で評価されることが多い。EAR は放射線によるがん罹患率の増加を定量化し、ERR は放射線被ばくによるバックグラウンド（コントロール）罹患率に対する相対的増加を表す。ERR も EAR も被ばく時の年齢によって異なるだけでなく、被ばく後に経時的に変化する。ERR は通常被ばく年齢が若い方が高くなるが、被ばく後の年数が経過するにつれて、あるいは到達年齢が上がるにつれて推定値は減少していく。これに対し、EAR は通常被ばく年齢が若い方が小さく、被ばく後の年数が経過するにつれて増加するが、これは高齢になるとバックグラウンド罹患率が急激に増加するためである。到達年齢が同じ場合は、原爆生存者のうち被ばく年齢が若い方が一部の固形がんの EAR が高くなるが、他のがんタイプについてはそうではない。</p>
<p>(83) がんを一定の数の体細胞突然変異の蓄積によって生じるものと仮定すると、一つのがん関連変異の誘発によって生じる過剰数のがんの発生は、次の 3 つの因子の関数として表すことができる：(a) 幹細胞（および前駆細胞または特定のがんタイプでは分化細胞）の感受性、(b) 発がんに関与する遺伝子に突然変異が生じた幹細胞の維持、および(c) 被ばく時の幹細胞の集団サイズ、これは将来的に臨界数（例えば 4 個）の突然変異を蓄積することで放射線により 1 つの変異が追加されるとがんの罹患率増加につながり得る。十分な数の素因変異を有する幹細胞の数は、完全数（例えば 5 個）の突然変異を有する幹細胞の数に比例すると予測され、これがバックグラウンドがん罹患率となる。EAR は、被ばく集団におけるバックグラウンド絶対罹患率（BAR）を合計絶対罹患率（TAR）から引くことで得られる（EAR=TAR-BAR）。これに対し、放射線感受性の過剰な相対的増加は ERR によって定量化され、次の式のように EAR を BAR で割ることで得られる：ERR=EAR/BAR。EAR は BAR に依存しており、異なる集団間でリスク転換する場合には RR モデルの方がよく適合するがんタイプでは特に依存している。EAR が BAR より強く影響されている例は、喫煙者および非喫煙者集団におけるラドン誘発肺がんである（Darby et al., 2005, 2006）。EAR は喫煙者集団でははるかに大きかったが、ERR は喫煙属性の影響を受けなかった。喫煙者の EAR が大きかったのは、喫煙者では素因を有する標的幹</p>

細胞の数が増加していたために BAR が大きかったことを反映していたと考えられる。ERR は両集団で同じであった。喫煙誘発疾患は、ラドンによる発がん性変異の放射線誘発に対する標的幹細胞の感受性にそれほど影響していないと推測したくなる。概して、EAR および ERR は、それぞれ放射線発がんにおける幹細胞挙動の異なる機構的特性を表している（セクション 3.6.2）。

(84) 本報告書で考察している一部の組織の EAR および ERR の代表的な値は ICRP (2007) から抜粋されたものであり、表 3.1 に引用される。これらの数値は、30 歳で 1Gy に被ばくした人の 70 歳でのリスクに標準化されている。引用されている数値の不確実性は、乳房が最も高く、甲状腺が最も低く、胃、結腸、肺が中間である。30 歳で被ばくした人の 10 年間ごとの EAR の低下率は、乳房で最も大きく、甲状腺、胃および結腸ではこれより小さく互いに同等であり、肺では変化が見られなかった。ERR の値の桁数は引用したすべての組織で同じであり、30 歳で被ばくした人の 10 年間ごとの低下率は甲状腺が最も高く、胃および結腸ではこれより小さく、乳房ではゼロであり、肺では増加が見られた。骨髄、皮膚および骨表面の値は、同じ方法で直接比較することができないため、表 3.1 には引用していない。骨髄については、より好適な線量反応モデルは LQ である (Hsu et al., 2013) ため、骨髄の係数と線形モデルにのみ基づいている表 3.1 の数値とは直接比較できない。1 Gy での (30 歳で被ばく、70 歳での) 白血病の EAR 線量係数は、女性では 10^4 人年あたり 0.70 (線形項) および 0.71 (二次項) であり、男性では 10^4 人年あたり 1.06 および 1.09 であった。対応する男性および女性の ERR 値は 0.79 (線形項) および 0.95 (二次項) であった。特筆すべきは、被ばく年齢が 10 歳上がるごとに肺の ERR が 17%増加することであり、表 3.1 の他の組織では減少しているのと対照的であった。皮膚は特殊なケースであり、セクション F.2.1 で詳しく説明する。リスク係数は表 3.1 とは異なる方法で計算され、その値はきわめて不確実である。原爆生存者の寿命調査 (LSS) において線形線量反応を仮定した場合の骨がんの罹患率については、30 歳で被ばくした人の 70 歳での EAR は 10^4 人年 Gy⁻¹ あたり 0.39 [95%信頼区間 (CI) 0.08~1.04]、ERR は 0.48 (95% CI 0.07~1.4) と算出された (Preston et al., 2007)。二次モデルが提唱され (UNSCEAR, 2006)、さらに最近の解析では、0.85Gy を閾値とした線形 ERR モデルが、統計学的および生物学的観点からもっとも妥当なモデルであると推察された (Samartzis et al., 2013)。さらに、²²⁴Ra データに基づき骨がん誘発に関する EAR および LNT モデルが開発され (EPA, 2011) たが、LNT モデルは ²²⁶Ra データには合致せず、シグモイド S 字形反応が最もよく適合していた (Rowland et al., 1978)。このような差異および直接比較の困難さを考慮すると、特に皮膚や骨と表 3.1 の他の組織に関しては、幹細胞に基づくメカニズムに関連づけて EAR および ERR 値について詳しく議論することは極めて思案的である (セクション 3.6.2)。

(85) 完全性を期すために組織荷重係数 W_T の値も表 3.1 に引用してあるが、これらの値は、本報告書のための最初の組織選択の際の根拠の一部である (1 章)。 W_T は ICRP リスクモデルの基本要素の一つであり、総合的健康リスク、主にがんによる健康リスクへの各組織または器官の相対的寄与率を表しており、これらの器官の等価線量を重みづけする際に利用される (ICRP, 1991)。こうして導出された加重線量が実効線量であり、この値から特定の線量に対する名目リスクが算出される。 W_T の値は 2007 年に改訂され (ICRP, 2007)、30 歳で単位線量に急

性被ばくした人の 70 歳でのがんの ERR は組織間で異なることが再確認された。ICRP が推奨する W_T 値は骨髄、結腸、肺、胃、および乳房が 0.12、膀胱、食道、肝臓および甲状腺が 0.04、および骨表面、脳、唾液腺および皮膚が 0.01 である。荷重係数は、総合的なヒト健康リスク（すなわち死亡率、特定のがんタイプの罹患率とこれが致死性である確率を組み合わせたものであり、QOL および損失生存年数について調整したもの）に言及している (Box A.1, ICRP, 2007)。がんのデトリメント調整名目リスク係数は、致死率/生活の低下で重みづけしたがん罹患率データを相対的寿命損失で調整したものにに基づく。

3.2. 放射線発がんにおける幹細胞および幹細胞ニッチ

3.2.1. 幹細胞の放射線生物学および放射線発がん

(86) 発がん、特に成人でのがん発症には重要な要素が 2 つある。一つが標的細胞による発がん性変異の獲得であり、もう一つがそのような素因を有する細胞を、さらなる変異が蓄積して完全な悪性に至るまで体内にとどめておくことである。前者は細胞の放射線感受性および突然変異誘発が、後者は組織微小環境内での幹細胞のダイナミクスによって決まる。

(87) 純粋な幹細胞集団の放射線生物学的な分析はまだそれほど多くなされていない。いずれにせよ、過去の研究成果や最近のエビデンスから、組織幹細胞の放射線感受性は組織間および組織内でかなり異なることが示唆されている。このような差異が発がんの放射線感受性にどのように関係しているかについては今のところ分かっていない。小腸の場合、P4 幹細胞は最小線量 100mGy でもアポトーシスが誘発され高い感受性を示したのに対し、小腸内で最も原始的な幹細胞と推定されるテロメラーゼポジティブ P4 幹細胞は 10Gy の放射線を受けても生存し得る (Para. 37)。細胞の DNA 修復能が極めて高かったとしても、これほどの線量を受けてまったくエラーを起こさないでいられるとは考えにくい。この放射線抵抗性の高さは理解しにくいものである。このことから、テロメラーゼポジティブ P4 細胞は、より低ランクの幹細胞のハウスキーピング的な供給源というより、非常時のための予備群としての役割を果たしている可能性が浮上する。HSC は最も放射線感受性の高い組織の一つであるが、長期 HSC は短期 HSC よりも高い放射線抵抗性を示す (Para. A75)。皮膚では、幹細胞は前駆細胞よりも放射性抵抗性が高い (セクション F4.1)。一般に、原始的な組織幹細胞は分化が方向づけられた細胞に比べて放射線抵抗性が高いが、これと放射線発がんに対する感受性との関連についてはまだ分かっていない。

(88) 静止状態が幹細胞の放射線抵抗性に重要な役割を果たしていることは前のセクションで述べた通りである。さらに、組織幹細胞にとって静止状態を維持することは、複製による突然変異を回避し組織幹細胞の枯渇を防ぐための最良の方法である。同時に、静止状態は自然発生 DNA 損傷の蓄積をもたらすことがマウス HSC で実証されている (Rossi et al., 2007)。さらに、静止細胞は DNA 損傷に対処するために NHEJ 修復に頼る必要があるが、NHEJ 経路は正確ではあるがエラーも起こりやすい。したがって、静止状態による恩恵は、複製による突然変異を

回避すること、損傷蓄積により生じる突然変異のリスクを冒すこととのバランスで成り立っているものである。複製による突然変異を回避するためのもう一つの方法は、DNA 不死配列の保持および幹細胞特異的染色体分離という独特のメカニズムであり、腸および乳腺の幹細胞ではこれが行われている可能性が高い。幹細胞は、複製による突然変異を回避するために複数の戦略を身につけてきたものと考えられる。放射線発がんの細胞プロセスを理解するためには、生体内で静止中の組織幹細胞の放射線生物学的特性についてさらに分析する必要がある。

3.2.2. 組織の放射線生物学および放射線発がん

(89) 組織の定常状態の維持には 3 つの区画が関与している：幹細胞区画、前駆細胞区画、および機能性細胞区画である。一部の前駆細胞は例外的に組織内に長期間とどまるが、細胞は最初の区画から出るといずれ体外に排出される。したがって、変異を蓄積し悪性表現型を獲得する上で十分な期間にわたって体内にとどまる幹細胞が主な標的となる。しかし、セクション 3.1.2 でも述べたように、幹細胞同士もニッチをめぐって常に競合しているため、幹細胞ですら他の幹細胞による置換は免れない。組織幹細胞は時々対称分裂して余分な幹細胞を生じるため、ニッチをめぐって競合が起こる。

(90) ショウジョウバエ生殖細胞の分析により、ニッチをめぐる生殖幹細胞の競争力に関与する主要遺伝子として E カドヘリンが特定された (Zhao and Xi, 2010)。このショウジョウバエの系では、幹細胞の急速なターンオーバーが、生殖腺内で異常を起こした幹細胞を効率的に排除するメカニズムとして働いている。幹細胞が様々なニッチ細胞と接触している哺乳類の幹細胞系でも同様なことが起こっている可能性が高い。HSC は N カドヘリンおよびインテグリンを介して骨芽細胞と相互作用し、Tie2/Ang-1 シグナル伝達を受け取って静止状態を制御している (Suda, 2007)。小腸の Lgr5+幹細胞では、パネート細胞に接着し必要なシグナルを受け取ることが幹細胞の幹細胞能力を維持する上で必須であった (Sato et al., 2011)。放射線を含むストレスおよび/または遺伝子の突然変異によりこれらの遺伝子の発現が変化すると、幹細胞がニッチを占有するための競争力に影響が出るものと考えられる。幹細胞とニッチとの相互作用に低線量放射線が及ぼす影響については研究されていない。>2 Gy 照射が E カドヘリン発現量に与える影響を調べたところ、哺乳類上皮細胞ではダウンレギュレーション、ラット肝臓ではアップレギュレーションと、異なる結果が得られた (Andarawewa et al., 2007; Moriconi et al., 2009)。このような変化により、適性の低い幹細胞が競争に負けニッチから追い出されることになると推測される。実際、骨髄に >0.5 Gy の放射線を照射すると、レシビエント宿主内での HSC の競争力が低下すると報告されている (Marusyk et al., 2010)。この組織微小環境に基づく選択プロセスは、DNA 修復やアポトーシスといった分子および細胞による品質管理とは独立した、組織による品質管理として機能していると考えられる。

3.3. 放射線発がんに対する線量率効果

65

ICRP Publication 131（下訳版：平成 30 年 3 月）

3.3.1. 細胞に基づく考察

(91) 放射線防護のためには、放射線、特に低線量および低線量率被ばくのリスクを推定する必要があり、この場合に考慮すべきリスクは確率的影響のリスクである (ICRP, 2007)。ICRP はこのリスクの推定する際、LNT モデルおよび DDREF を採用し、低線量および低線量率被ばく条件に適合させている。ICRP が選択した DDREF の数値は 2.0 であり、現在もこれを採用している (ICRP, 1991, 2007)。一般に、急性被ばくに対するがんの線量反応は上向きの凸曲線を描くが、これは数多くのモデルにより十分説明可能である。細胞ベースの 2 つの生物物理学的モデルが広く受け入れられている：Kellerer and Rossi (1972) の重損傷モデル、および Goodhead (1985) による修復飽和モデルである。特に重損傷モデルは、以下の LQ 式とともに広く採用されている (UNSCEAR, 2006)：

$$E(D) = \alpha D + \beta D^2 \quad (3.1)$$

(92) 式(3.1)の線形項は細胞内での 1 飛跡的事象を表しており、線量率に左右されないものと仮定される。二次項は細胞修復の対象となる 2 飛跡的事象を表しており、したがって低線量および低線量率では無視できる項である。低線量の定義については、UNSCEAR(1993) が 200mSv 未満と提唱しているが、これはこの線量範囲内では線形項が線量反応のレベルを左右するためである。さらに、式(3.1)の前提の下では、低線量と低線量率とで放射線発がんのリスクが同じになる。低線量と低線量率をまとめて DDREF という 1 つの因子で扱うことができるのはこのためである。DDREF は以下の式で表される：

$$DDREF = (\alpha D + \beta D^2) / \alpha D = 1 + (\beta/\alpha)D \quad (3.2)$$

(93) 電離放射線の生物学的影響に関する米国の委員会 (BEIR) の VII 回目の委員会 (BEIR VII, 2006) では、ベイズ理論を採用して式(3.2)を原爆生存者の疫学的データおよび動物データに適用し、1.5 という DDREF 値を導出した。さらに、低線量率に被ばくする放射線作業者を対象とした調査で報告された固形がんリスク係数も、LSS で急性被ばくで観察されたものと同等であり、1.0 という DDREF 値が示唆された (Jacob et al., 2009)。UNSCEAR は DDREF の使用を断念し、LQ モデルを LSS データに適用して低線量/低線量率係数を直接求めた (UNSCEAR, 2006)。得られたリスク係数は、LSS データに基づき DDREF 値 2.0 で調整された ICRP のリスク数値と一致していた。

(94) BEIR VII (2006) および UNSCEAR (2006) が計算式に基づき導出した DDREF は、LQ 式の妥当性、特に線形項が線量に左右されないことに依存している。細胞レベルでは、放射線による突然変異誘発率の線形項は線量に左右されないという十分な証拠がある。しかし組織レベルでは、突然変異およびがんの直線的な線量反応の傾きは、線量率の低下とともに減少する。この傾きの減少は、幹細胞競合による組織レベルでの異常細胞の排除が働いている場合に期待されるものである。

66

3.3.2. 組織に基づく考察

(95) 2章で述べたように、 ≥ 1 Gy の放射線を照射したマウスの HSC は未照射の HSC との競合に負けることが、致死線量を照射したマウスへの同時移植により実証されている (Bondar and Medzhitov, 2010)。この結果から、放射線照射により全体的幹細胞能から逸脱するとその細胞は組織から排除されることが示唆される。幹細胞競合は、表現型が不適切な細胞を排除するための組織レベルの品質管理であるとみなされている。したがって、体内には 3 つのレベルの品質管理システムが備わっている：分子レベルの品質管理である DNA 修復、細胞レベルの品質管理であるアポトーシス、そして組織レベルの品質管理である幹細胞競合である。

(96) 幹細胞の排除は、LQ 式(3.1)の線形項に影響を及ぼすと推測される。そのような例が、マウスでの放射線による生殖細胞系突然変異誘発で見られる。雄マウスの場合、誘発は放射線量の一次関数であり、線量率を減少させると誘発率も低下する (Russell and Kelly, 1982)。雌マウスの場合、線量率効果は極端であり、線量率を減少させると線形的線量反応が完全に平坦になる (Searle, 1974)。このようなデータは、分子および細胞レベルでの品質管理では説明できない。前のセクションで述べたように、低線量率での DNA 修復による突然変異回避は、LQ 式の二次項にのみ影響するはずであり、線形項は線量率の影響を受けないはずである。また、細胞レベルの品質管理であるアポトーシス機能は、線量率が低くなると効率が低下する。したがって、いかなるメカニズムによるものであろうと、照射細胞の損失は線量効果係数 (DEF) ではなく線量率効果係数に寄与している可能性が高い。

(97) この問題における主な疑問は、低線量被ばくが幹細胞能に影響を及ぼすか否かであり、もし影響するのであれば、幹細胞能に影響する最低線量はどれくらいかということである。もし最低線量が放射線の素線量、つまり 1 つの放射線飛跡により細胞核に供給される最低線量であるならば、興味深い可能性が浮上してくる。直径 $8\mu\text{m}$ の哺乳類細胞核への ^{60}Co 線の素線量はおよそ 1mGy である (Feinendegen, 1985)。1 年あたり数 mGy の線量率での慢性被ばくは、体内の全細胞が数か月に 1 回の頻度で 1 つの放射線飛跡によりヒットされていることになる。これにより、ヒットされた幹細胞は任意の時点で周囲のヒットされていない幹細胞とニッチ内で競合することになる。素線量が幹細胞能に影響を及ぼすのであれば、ヒットされた細胞は競合により組織幹細胞ニッチから優先的に排除されることになる。この排除理論によって線形項が低下することから、組織レベルでの幹細胞競合は、現在 ICRP により採用されている DDREF 値のように、1 より大きい DREF 値の可能性を十二分に残すものである。

3.4. 動物実験によるヒトデータの補足

(98) 動物系での放射線誘発腫瘍に関する研究は多くなされており、線量と罹患率の関係および線量率/分割効果についての知見が得られている。これらの研究は主に AML、およびハーダー腺、下垂体、卵巣、肺、乳房、皮膚、および骨の固形がんが焦点が当てられている (NCRP,

2005; ICRP, 2006)。委員会の全体的な見解として、動物腫瘍データは低線量および低線量率での罹患率と線量との直接関係説を支持しており、閾値線量はないと見なしている (ICRP, 2005)。しかし、この結論には様々な注意点が有り、特に実験動物で研究された腫瘍タイプの中には必ずしもヒトで最重要ではないものもあり、感受性については多くの株間および種間差が見られる。さらに、広い線量範囲において、任意の株または種内では全腫瘍の頻度は増加しておらず、腫瘍によっては放射線により頻度が低下しているものもある。「観察された線量-罹患率関係の多様さから、単独で罹患率と線量との関係を普遍的に表すことのできる数学モデルは存在しない」と言われている (Upton, 1985)。とはいえ、定義された 1 種またはそれ以上の動物株における放射線誘発腫瘍の研究は、ヒトを含むあらゆる動物種で基盤となっている分子、細胞および組織レベルでのメカニズムを解明する上で有用である。

(99) 造血系において放射線で誘発される確率的事象に関しては (付属書 A)、マウスで最も詳しく研究されている白血病タイプは AML である。AML はすべての小児白血病の 5%未満であるが、放射線により誘発される 3 つの白血病サブタイプ、すなわち AML、慢性骨髄性白血病 (CML)、および急性リンパ芽球性白血病 (ALL) のうちの 1 つである。AML の標的細胞に関しては、最近のマウスでのエビデンスから、最初の放射線誘発 AML 幹細胞は、照射された HSC だけではなく多能性前駆細胞や CMP から生じると示唆される (Hirouchi et al., 2011; セクション A.5)。また、第 2 染色体の二重特異性プロテインフォスファターゼ (Dusp2) のヘミ接合性欠失が、放射線誘発 AML 幹細胞の自己再生能に寄与している可能性がある。高純度 HSC における「不死配列仮説」の詳細な研究の結果、BrdU は HSC マーカーとしての特異性および感受性が低いことが判明した (Kiel et al., 2007)。すべての HSC で染色体はランダムに分離し、培養中の個々の HSC の分裂を調べた結果、標識が非対称分離した形跡はみとめられなかった。したがって、HSC は分裂時に古い DNA 鎖を保持しなかったことになる。発がんの多段階説および促進事象における微小環境の重要性からも、系列内で再生が遅い細胞の方が標的細胞になりやすく、通常、このような細胞は集団内でより原始的な幹細胞であることが示唆される。実際、そのような原始細胞の主要部位である中央の骨髄類洞領域内の標的細胞では、慢性放射性核種の線量/位置と AML 罹患率との相関が最も強かった (Lord et al., 2001)。マーカー研究において、これらは CD34⁺CD48⁺CD150^{hi} 系列陰性 (Lin⁻)Sca-1⁺c-Kit⁺(LSK) であると同定された。

(100) セクション A.1.1 で述べたように、極めて低い被ばく (バックグラウンドレベルからおよそ 1Gy) 後の AML の罹患率は、線量の増加に対しほぼ線形性を示す。1 から $2\sim 3\text{Gy}$ の線量では、線量-罹患率曲線は上向きのカーブを描き、 $>3\text{Gy}$ では曲線が下向きにカーブする傾向がある。また、このようなデータから推定される DDREF 値は極めて変動が大きいの、 3Gy までの線量範囲では通常 $2\sim 5$ の間に収まる (UNSCEAR, 1993)。線量 $<1\text{Gy}$ の数値はこれより低くなると予想されるが、これは線量-反応曲線のシングルヒット (アルファ成分) が反映されるためである。マウスに 28 日間にわたって $0.04\sim 0.11\text{mGy}/\text{分}$ を合計 1.5Gy 連続照射する有名な実験では、5% という AML 罹患率 (Mole et al., 1983) はおよそ 0.5Gy の急性照射でも得られ (Mole and Major, 1983)、 $\geq 1.5\text{Gy}$ での DREF 値は ≤ 3 となる。さらに、これより高い線量 3.0

<p>および 4.5 Gy を同じ線量率で照射した場合も、不思議なことに AML の罹患率が 5% となった。このことから、幹細胞/クローン形成性細胞に関するいくつかの「生物学的因子」が遷延被ばく線量に対する反応に影響していると推測されるが (Mole and Major, 1983)、これについてはセクション A.2.2 でさらに考察する。</p>
<p>(101) げっ歯類における乳腺腫瘍誘発に対する線量および線量率の影響に関する研究が多数報告されている (付属書 B; UNSCEAR, 1993)。SD ラットを用いた研究では、線量増加に対し罹患率はほぼ線形性を示した。≥ 150 倍の差がある線量率および約 2~3Gy の線量 (高線量率) での DDREF 値は <2 からおよそ 4 までの範囲であった (Shellabarger et al., 1966; Gragtmans et al., 1984)。BALB/c マウスでは、高線量率での線量-罹患率曲線は約 0.25 Gy までは LQ であり、線形項は低線量 (0.07mGy/分) 被ばく後とほぼ同じであった (Ullrich, 1983)。線量分割試験では、0.1 Gy/回以上の線量で二次成分の有意な寄与がみとめられ、どちらのケースでも毎日 0.01 Gy の急性分割線量で被ばくした場合の腫瘍罹患率は、合計線量 0.25Gy での低線量率被ばくとほぼ同じであった (Ullrich et al., 1987)。1.7~0.25 Gy の範囲では線量低下に伴い DDREF も低下し、0.1~0.01 Gy の線量ではほぼ 1 になると予想される。マウスでの研究から、25 日間までの線量分割/遷延被ばく (すなわち 0.25Gy を 0.01Gy/日の分割線量で照射) によって得られる乳がん罹患率は、急性被ばく反応の LQ 分析から予想される罹患率と同じであった。</p>
<p>(102) 被ばく時年齢の影響については、げっ歯類およびヒトの両方で思春期あるいはその前後の比較的限られた時期に発がん感受性が確認されているが、この時期は標的細胞数が最大になるか、あるいは幹細胞制御にとって重要な時期であると仮定される。乳腺上皮およびそれを制御する多数の因子には明確な階層性系列が存在する。例えば、マウス乳腺上皮内の CD24⁺CD29^{high} 集団には、MaSC を定義する 2 つの特性である多能性および自己再生能を有する細胞が多く含まれる。また、マウス乳腺内の上皮 LRC は非対称分裂し鋳型 DNA 鎖を維持するという証拠もある (Smith, 2005)。ただし、放射線誘発乳がんの標的細胞の起源が幹細胞であるか前駆細胞であるかについてはまだ解明されていない。</p>
<p>(103) 甲状腺 (付属書 C) に関しては、放射線により乳頭がんおよび濾胞がんの両方が誘発されるが、ヒトでは前者が、一般ラットモデルでは後者が多くを占める。3000 匹の雌の Long-Evans ラットにおいてがん腫 (大部分が濾胞がん) の線量-罹患率の関係を調べたところ、0.8Gy 以上では X 線量が増加するにつれて罹患率も増加し、それ以上の線量では 10.6Gy までは平坦になる (Lee et al., 1982)。しかし大部分はアデノーマであり、これら是对照的に連続的に増加する線量-罹患率曲線を描いた。したがって、2 つの腫瘍タイプの曲線の形は大幅に異なっていた。さらに、¹³¹I および詳細な線量測定を用いた同時研究では (Lee et al., 1979)、高線量率の X 線に対するがん腫の反応と似ていたが、高線量の ¹³¹I では X 線に比べてアデノーマの罹患率が低下する傾向が見られた。アデノーマの罹患率を IQ ベースで解釈すると、およそ最初の線量ポイントである 0.8Gy までは単独の線形成分 (線量率によって変化しない) であり、約 2Gy では約 2 の DDREF が適用されると考えられる。ただし、両腫瘍タイプの合計罹患率については、不確実性は大きいものの、単独の線形成分は高くなり、DDREF は低くなる可能性がある。ラットに低線量の急性 X 線を照射した場合と低線量率の ¹³¹I を照射した場合の腫瘍罹患率が類似していたことは、ヒトでのデータと一致</p>

69

<p>している (すなわち、チェルノブイリ事故後の外部放射線被ばくの ERR は内部放射線被ばくの ERR と一致していた) (セクション C.2)。甲状腺上皮に幹細胞タイプの系列が存在する証拠はあるものの (セクション C.3)、異なる腫瘍タイプが系列内の同一または異なる標的細胞から生じるかについては知見が得られていない。</p>
<p>(104) 胃および結腸のがん (付属書 D) は、げっ歯類では高線量 (例: ≥ 8 Gy) の放射線でしか誘導されず (Boice and Fry, 1995)、小腸ではまれである。後者について考えられる原因は、大腸では生存 (抗アポトーシス) 遺伝子 B 細胞リンパ腫 2 (bcl-2) の発現により阻害されている変異幹細胞の放射線誘発アポトーシスが、小腸では起こることである (Merriitt et al., 1995)。いずれにせよ、胃と結腸は発がん誘導に対してかなり耐性がある。多発性腸腫瘍 (Min) マウスは、マウスにおいて放射線照射による腫瘍発生を研究するための高感度なモデルとなる。Min マウスは、生殖細胞系列での Apc 遺伝子の短縮型変異に関して遺伝的にヘテロ接合であり (Apc^{Min/+})、出生から数週間以内に腸管内に多発性腸腫瘍および散発性結腸腫瘍を発生する。CHB6 Apc^{Min/+} マウスに 2Gy の X 線を照射した場合の腫瘍罹患率は以下の通りであった: 子宮内で受胎後 7 日目に照射するとマウス 1 匹あたりの腫瘍数 30 (未照射コントロール群に比べて有意に高くはなかった)、受胎後 14 日目に照射するとマウス 1 匹あたりの腫瘍数 44、2 日齢新生児に照射するとマウス 1 匹あたりの腫瘍数 85、10 日齢新生児に照射するとマウス 1 匹あたりの腫瘍数 130、および 35 日齢の若い成体に照射するとマウス 1 匹あたりの腫瘍数 70 であった (Ellender et al., 2006)。新生児は若い成体に比べて腫瘍誘導に対する感受性が高かった。X 線線量-アデノーマ罹患率曲線は、0~5Gy の範囲では LQ であり、小腸では盲腸および結腸直腸に比べて腫瘍数が明らかに多かった (Ellender et al., 2011)。腫瘍罹患率は、盲腸では ≥ 2 Gy 照射群で増加し、結腸直腸では ≥ 1 Gy 照射群で増加した。全体として、小腸のアデノーマは無茎型であり、大腸ではアデノーマの数が少なく有茎型であった。小腸ではマイクロアデノーマ発症も見られ、供試した線量範囲内では高線量ほど罹患率が高かったが、大腸では見られなかった。</p>
<p>(105) 結腸腫瘍の標的細胞はいまだに陰窩幹細胞であると考えられており、前駆細胞も標的細胞に含まれるか否かについてはまだ解決していない。興味深い新事実として、小腸でも大腸でも、細胞周期が遅く寿命が長く放射線抵抗性を示す希少な (陰窩 150 個あたり 1 個) mTer⁺ 幹細胞が発見されており、これがあらゆる腸細胞タイプに分化している。これらの細胞はおそらく、発がんの多段階モデルの観点から結腸の標的細胞の最有力候補である。APC 遺伝子の生殖細胞系列突然変異は、ヒトおよびマウスの両方において腸での発がんの原因となっている。ヒトでは、変異型 APC の遺伝はがんの素因となる家族性大腸腺腫症 (FAP) を伴い、散発性結腸がんでは APC の突然変異は初期体細胞事象である。APC 遺伝子に生殖細胞系列突然変異を保有する個体は、数百から数千の結腸直腸腺腫性ポリープを発生し、治療せずに放置するとその一部ががん腫へと進行する。</p>
<p>(106) 原爆生存者およびウラン鉱山作業者を対象とする研究では、放射線誘発肺がん (付属書 E) は小細胞肺がん (SCLC) である可能性が高く、腺がん (ADC) である可能性は低いとみられる (Land et al., 1993)。マウスでは SCLC が起こらず、ADC が最も一般的な肺がんタイプ</p>

70

である。0.4Gy/分および0.06mGy/分照射の反応を比較したところ、急性照射された雌のBALB/cマウスにおけるADC誘発は、線形項が線量率から独立しているLQモデルに合致することが示された（Ullrich, 1983）。また、DDREFは3 Gyで約4.2、2 Gyで約3.2であり、さらに線量分割研究から、DDREFは0.1 Gyで約1.1であると予想された（Ullrich et al., 1987）。同じマウス系統で誘導された乳腺腫瘍については、急性の遷延分割被ばくまたは低線量率被ばくによる肺腫瘍の誘導頻度をLQ解析した結果、互いに一致していた。

(107) 呼吸気道では、放射線関連発がんの標的細胞は気管および中心型肺の大気管支の基底細胞、および抹消肺のクララ変異型およびII型肺胞細胞に存在すると考えられている（付属書 E）。上皮幹細胞ニッチは、気道が終結し肺胞を形成するゾーン内に同定された。細気管支肺胞接合部にあるマウスの推定BASCは、セクレトグロビン α 1a（SCGB1a1）およびII型細胞マーカーサーファクタントタンパク質C、Sca-1を共発現し、CD45 and CD31については陰性である。分子解析の結果、ヒトADCおよびSCCでは異なる組織病理学的表現型を示す一方、ゲノムプロファイルは1つの明確なSCC特異的アンプリコンを除いてほぼ完全に重複していた（Tonon et al., 2005）。したがって、肺がんタイプごとに共通または異なっている起源細胞について、より理解が進む可能性がある。さらに、照射された微小環境からの影響もあり得る。例えば、放射線照射されストレスがかかった領域へのMSCの移動は、発がんにおける代替的または発生メカニズムとして誘導されている可能性がある。

(108) ヒトでの放射線誘発皮膚がん（付属書 F）は大部分がBCCである。従来の考えでは、放射線誘発皮膚がんの閾値線量は8~10Gyの範囲内に存在していたが、原爆生存者のデータから、BCCは中程度の線量、最低約1Gyでの急性被ばくによって誘導可能であることが示された。マウスでは放射線は容易にSCCを引き起こすがBCCは起こさない一方、ラットでは誘導された皮膚腫瘍の約20%がBCCであった。ラットでは付属器（毛包および皮脂腺）腫瘍は低線量での方が多く上に発生が遅く、類表皮腫瘍は高線量での方が多く上に発生が早いという傾向はあるものの、全腫瘍を合計した場合の線量-反応曲線はLQモデルと一致した（および高LET放射線では線形性を示した）。生涯にわたって毎週0.75または1.5Gyの放射線を反復照射したところ、1回の被ばくの線量反応から予想される以上の腫瘍が発生したことから、単位線量あたりの事象数が増加した（増感の誘導）か、あるいはクローン形成性増殖により初期形質転換細胞の数が増加したことが示唆された（Burns and Albert, 1986a,b）。放射線は少なくとも約180 μ mを貫通しないと腫瘍を誘発できず、毛包の成長フェーズやサイズにかかわらず300 μ mがほぼ最適であったことから、主な標的細胞は毛包の幹細胞ゾーン内にあることが実証された。また、年齢は放射線誘発がんの罹患率に明らかに影響を及ぼした。ラットでは、照射後70週目までに1匹あたり2つの腫瘍を誘発する線量（中線量誘発）が、10Gy（1日齢）から15Gy（28日）、17.5Gy（58日）、および30 Gy（99日）へと増加した。この抵抗性の増加を、照射された皮膚の単位面積当たりの等効果として表すと、ラット1匹あたりの等効果線量の差は1日齢と99日齢との間で3倍であるが、照射された新生児の皮膚面積が成体ラットに比べてはるかに小さいことを考慮すれば、その差は約2桁大きくなる（3 \times ~100）。

71

(109) ヒト皮膚がんのモデルから、BCCの標的細胞は幹細胞、SCCの標的細胞は初期前駆細胞、乳頭腫の標的細胞は後期前駆細胞であると推定された（Sell, 2004）。これらの異なる細胞集団の分子学的特性については引き続き分析中であり、最も有力な静止幹細胞は、高レベルの接着分子インテグリン $\alpha 6$ および低レベルのトランスフェリン受容体CD71（ $\alpha 6^{hi}$ CD71 dim ）と表記されるようである。BrdUで標識したマウス毛包バルジ細胞の分裂に関する定量的データが存在しており、長期不定期SC分裂モデルを支持している（Waghmare et al., 2008）。しかし、毛包幹細胞は古いDNA鎖を維持せず、染色体も選別しないことが実証されている。今のところ、様々な皮膚がんタイプの標的細胞を識別する明確なマーカーはまた存在しない。

(110) 放射線誘発性骨肉腫は、治療または職業による高線量電離放射線被ばくと関連があるとされている（付属書 G）。ただし、低線量被ばく後の骨肉腫の発生については推測の域を出ない。LSSコホートの80,000名を分析して骨肉腫（骨肉腫が最も一般的）の発生を評価したところ、閾値線量を約0.85Gy（95% CI 0.12~1.85 Gy）とした場合に良好な適合が見られ、この閾値を超える範囲では線形の線量反応関係が見られた（Samartzis et al., 2011）。Chadwickら（1995）は、ラジウムダイヤルペインターのデータをクローン増殖による2変異発がんモデルに適合した。解析の結果、LQ線量効果関係が適用可能であり、骨肉腫の自然（自発）罹患率は極めて低いため、低線量および低線量率での極めて低いARと一致することが判明した。放射線誘発性骨がんに関する実験の多くはイヌで実施されている。低LET β 放射体である ^{90}Sr については、線量反応は非線形的であり、累積平均骨線量が18Gyより低い場合腫瘍は発生しなかった（付属書 G）。このように閾値線量をはるかに高くなった原因として、線量測定の違い、放射性核種の遷延照射、およびヒトに比べてイヌの寿命がはるかに短いことが考えられる。骨芽細胞系列のための骨形成MSCは骨髄内に存在する。CD34幹細胞および間葉系前駆細胞は放射線誘発性骨がんの標的細胞候補である。マウスでは、これらの骨関連 α 放射体の標的細胞は骨内膜表面からわずか数十 μ m以内に位置しており、 α 粒子の飛行内である。

3.5. 組織内での標的細胞の位置

(111) 様々な組織内での標的細胞の位置は、 α 粒子および低エネルギー電子など、体内組織中に保持されている放射性核種からの短飛行粒子放出により受ける線量を計算する上で重要である。したがって、委員会は皮膚、呼吸気道および消化管、および骨格内での標的細胞の位置に関していくつかのことを判断および仮定している（ICRP, 1991, 1995, 1996, 2007）。本報告書および最近の出版物に含まれるデータに基づき、標的細胞の位置および特性を表3.2にまとめた。

(112) 幹細胞は発がんの開始および進行において変異が蓄積する主な標的であることから、幹細胞の位置が判明し明確に特定されている組織については、その位置に特異的な線量を推定することは妥当であると考えられる。しかし、幹細胞の直接の子孫が特定のがんタイプの発がんにおいてどの程度標的となるかは組織によって異なり、多くの場合はよく分かっていない。一部の組織については、幹細胞とその直接の子

孫が同じ微小環境を占めるため、このことは標的を定義する上で影響しないかもしれない。例えば表皮では、幹細胞とその直接の娘細胞が基底層に存在する。皮膚の起伏の深さには大きな差異があるが、防護線量の計算のためにヒト表皮内での標的細胞の名目深さは $70\mu\text{m}$ と見なされている。結腸の例では、粘膜表面からの距離は深さ $280\sim 300\mu\text{m}$ の陰窩基底部と見なされ、主に腸管腔内の放射性核種からの照射を考慮する場合、この帯域を拡大して前駆細胞を含めても線量計算結果はほとんど変わらない。ただし呼吸気道の場合は、気道内の標的細胞のタイプおよび位置に関する仮定が、 ^{222}Rn の α 粒子放出子孫を含む一部の放射性核種の推定線量の主要決定因子となり得る。骨肉腫については、つい最近まで骨表面に隣接する $10\mu\text{m}$ 層が標的であると考えられていたが、現在は $40\sim 50\mu\text{m}$ 層とするのが適切であるとされている。白血病については、幹細胞は骨内膜および血管性ニッチ内に位置することが知られている一方、平均赤色骨髄線量の計算による絞り込みには成功していない。ただし、向骨性 α 粒子放出体（例えば ^{239}Pu および ^{226}Ra ）による白血病リスクは、このような計算ではかなり過大評価されると認識されている。乳腺や甲状腺などの他の組織については、幹細胞候補がどの領域に分布するかは考慮されず、放射線線量は組織平均として算出される。

3.6. 細胞に基づく考察および組織に基づく考察

(113) がん罹患率パラメータ（表 3.1）と (a) 幹細胞の数および放射線誘発性突然変異に対する感受性、(b) 組織内での変異幹細胞の維持、および (c) 十分な数の素因変異を有する幹細胞集団のサイズという 3 つの機構的因子との関係については、1 つ以上の因子が各組織の放射線リスク数値に寄与していることを示す決定的証拠が欠如している。一例として、現在の推定では、組織間での幹細胞数の差は重要な因子ではないと考えられるが、数については不確実性が大きいことに注意が必要である。ヒト 1 人あたりの推定総幹細胞数は、骨髄では約 10^8 （付属書 1）、結腸では約 4×10^7 （付属書 D）、および皮膚では約 2×10^7 （付属書 F；表皮細胞 35,000 個あたり機能性幹細胞 1 個、およびヒト一人あたりの総表皮細胞数 8×10^{10} ）である。これらの数字は 3 桁以上の差があり、その順位は EAR または SRR で表されるがん罹患率に関する感受性の順位とは明らかに異なる（表 3.1）。また、Tomasetti and Vogelstein (2015) が 31 の組織/位置での総幹細胞数を考察したところ、幹細胞数と自然（自発）がんのリスクとの間の関連性を示唆する傾向が見られたものの、その傾向は幹細胞数に幹細胞あたりの生涯分裂数を掛けた場合ほどは強くなかった。いずれにしても、放射線リスクと総幹細胞分裂数との間の直接の相関性だけでは、小腸内での放射線誘発性がんが比較的に少ないことを説明できそうにない。その生物学的理由として、小腸の幹細胞ゾーン内での p53 媒介アポトーシス、結腸での Bcl-2 発現による p53 媒介アポトーシスの阻害、および親 DNA 鋳型鎖が維持されるエピデンスなどが挙げられる（Potten, 2004）。また、真の標的細胞集団を、追加で「潜在的」幹細胞も含む大きな集団とするか、部位間で異なる少数の放射線抵抗性 mTert⁺ 幹細胞のみから構成される小さい集団とするかによって、2 つの部位の間に違いが出てくる可能性もある。

(114) 放射線発がんに対する感受性の組織間差異が生じるメカニズムは複数あると思われる、幹細胞数やターンオーバーといった組織特異的メカニズム、および DNA 複製、DNA 修復、細胞周期制御およびアポトーシスといった細胞特異的メカニズムが含まれる。これらの分野、特に組織幹細胞に関する知見はまだ十分ではない。一般的傾向として、放射線発がんリスクは、皮膚、結腸および胃など更新速度が速い組織では高く、食道、肝臓、甲状腺および骨表面など更新速度が遅い組織では低くなる。幹細胞の増殖速度が早ければ変異の蓄積速度も速くなるかもしれないが、前駆細胞のターンオーバー率は高いため、細胞が十分に変異を蓄積して完全な悪性を獲得するための時間は与えられていないと考えられてきた。増殖しない成体組織は放射線発がんに対してはほぼ耐性である。脳はその一例であるが、成体霊長類の脳でも少数の NSC がゆっくり増殖する（Gould et al., 1999）。これに対し、乳房など感受性の高い組織の中にはあまり活発に増殖しないものもある（付属書 B）。同様に、膀胱も放射線発がんに感受性であることが知られているが、この組織はむしろ静止状態にある。したがって、組織の増殖活性から放射線発がんに対する組織の感受性を単純に予測することはできないようである。

(115) 一部の組織幹細胞は、DNA 複製時の鋳型鎖の非対称分離、NHEJ のような特殊な DNA 修復システムの採用、利他的アポトーシス細胞死、および細胞分化などの特別なメカニズムを特徴としている。これらの細胞特性は幹細胞ニッチの組織微小環境によって厳密に調節されており、これが幹細胞の「幹細胞能」の維持に重要である。したがって、これらの特性に混乱が生じると突然変異の蓄積につながりやすい。乳腺の場合、ニッチが放射線発がんの標的であることが実証された（セクション B.4.2）。一部の組織では、幹細胞が常にニッチをめぐる競合にさらされており、一部の幹細胞の排除につながる。この排除が、放射線に対する組織特異的感受性の寄与因子である可能性がある。結論として、何らかの形で組織のがん感受性に寄与しているメカニズムが多数知られているが本報告書で推測されているが、それらの適用性や重要性についてはいまのところまだ分かっていない。

3.7. 放射線発がんの年齢依存性

3.7.1. 自発がんの年齢依存的発生

(116) 小児がんは、出生後から思春期までに発生するがんと定義され、親から受け継がれた素因変異を保有する子供で発生すると考えられている。突然変異の獲得は、胎児発達または小児期成長中にも起こり得る。小児がんおよび電離放射線を含む病因に関する疫学的研究については、文献 90（ICRP, 2003）に詳細に述べられている。小児がんの罹患率は、生児出生あたり約 1×10^{-4} である。小児がんのタイプは限られており、がんタイプごとに発症する年齢期がある（Ries et al., 1999）。例えば、遺伝性の網膜芽細胞腫は生後 1 年以内に発症する。加えて、これらの保因者は青年期頃に骨肉腫を発症する（Knudson, 1971; Abramson et al., 1984; Friend et al., 1986）。このような二相性パターンの発症は、非遺伝性の網膜芽細胞腫および骨肉腫でも見られる（Ries et al., 1999）。

(117) 成人がんは、体細胞が突然変異を獲得した結果発症すると考えられており、罹患率は年齢とともに確実に増加する (Armitage and Doll, 1954)。このように年齢依存的増加を示すことから、がんは平均寿命の長い先進国において死因の第一位となっている。がんの罹患率には性差がある。青年期までは男性の方がわずかに高く、70 歳以上になると男性は女性のほぼ 2 倍になる (Bleyer et al., 2006)。成人がんの罹患率は、40 歳代では女性が男性の 2 倍になるが、これはこの年齢層での女性特有のがんによるものである。

3.7.2. 出生前放射線被ばくによるリスク

(118) Russell and Russell (1954) はマウスを用い、放射線影響の発生段階依存性について初めて綿密に調査した。妊娠雌マウスを放射線に被ばくさせたところ、着床前は胚死に対する高い感受性が見られた。ただし奇形は見られず、これが現在でも一般原則となっている。しかし、Pampfer and Streffer (1988) の報告では、腹壁破裂に関する特定の遺伝的素因を有するマウス系統を着床前に X 線および中性子に被ばくさせたところ、腹壁破裂（乳児の腸が体外に出る出生異常）が観察された。他のマウス系統でも、電離放射線および遺伝毒性物質への曝露後に同様な影響が報告されている。ただし、このような症例は特定の遺伝的素因に関してのみ観察された (ICRP, 2003; Jacquet, 2012)。奇形は、主に器官形成が起こる胚発生後期に被ばくした場合に誘発された。興味深いことに、Howlett ら (1988) の古典的研究において、高い発がん性を示すラウス肉腫ウイルスをニワトリ胚に接種しても腫瘍形成が見られず、胚では形質転換表現型が強力に抑制されることが示唆された。また、孵化後にウイルスを接種されたニワトリはウイルス血症となり、あらゆる外傷部位に腫瘍が発生した。これらの観察結果に基づくと、乳腺（付属書 B）、甲状腺（付属書 C）および結腸（付属書 D）における放射線誘発性前がん性組織小形成異常によって示されるように、がんは組織幹細胞およびそのニッチを有する成体タイプの組織構造において発症する疾患であると推測したくなる。

(119) 胎児期被ばくの影響に関するヒトでの研究で最大規模のもの一つにオックスフォード小児がん調査 (OSCC) がある。イギリス国内での小児がんによる死亡の症例対照研究として実施された OSCC では、子宮内 X 線検査との関連性が見いだされ、胎児期は放射線に対する感受性が高く、小児白血病および他の小児がんでも 1Gy あたりの ERR は 50 であった (Wakeford and Little, 2003)。子宮内被ばくした原爆生存者のがん罹患率の疫学的研究では、白血病以外の小児がんでも高い ERR (1Gy あたり 22)（わずか 2 症例に基づくもので統計学的には無意味である）が示唆されたが、小児白血病リスクの増加は見られなかった (Wakeford and Little, 2003)。Ohtaki ら (2004) の研究では、子宮内被ばくした原爆生存者から採取した末梢血リンパ球中の染色体転座を調べたところ、約 100mGy を超える線量では線量反応はみとめられず、母親および他の成人では線量反応が見られたことと対照的であった。染色体異常が見られなかった原因として Ohtaki らは、胎児期の造血細胞が中線量（通常がんリスクを左右する細胞死滅を誘発する線量よりはるかに低い線量）での放射線照射による細胞死に高い感受性を示すことを挙げている。新たに確立された骨髄ニッチから幹細胞が競合により排除されたことも、子宮内被ばくした原爆生存者のリンパ球に染色体異常

が見られなかった原因の一つであると考えられる。1Gy あたり 1.0 という中程度の ERR が主に成人発症型固形がんについて得られ、全体的リスクは小児期被ばく時よりも低く、ERR は 1.7 であった (Preston et al., 2008)。注目すべき点として、子宮内被ばく者および小児被ばく者を合わせて解析した結果、線量反応は上向きの曲線を描いたことから、これらのコホートでのがん誘導に二次成分の存在が示唆された。委員会は大規模なレビューを実施したが、その当時は胎児期被ばくのリスクに関して明確な結論に達することはできなかった (ICRP, 2003)。子宮内被ばく者の固形がん発生に関する入手可能なデータおよび不確実性に基づき、ICRP (2007) は、子宮内被ばく後の生涯がんリスクは幼児期での被ばく後の生涯がんリスクと同等であると判断した。さらに最近のフォローアップ研究に基づくと、この仮定では子宮内被ばく者の生涯リスクが過大評価されていると思われる (Preston et al., 2008)。

(120) 理想的には、疫学的研究で解決できない部分は実験的研究で補うべきである。しかし、そのような実験的アプローチの問題点の一つが、ヒト小児がんの適切な動物モデルが存在しないことである。例えば、ヒト小児がんは比較的まれであり、出生から 15 歳までの累積罹患率は約 10^{-4} である。実験的研究で使用する動物の数は通常 100 個体未満であるため、 10^{-4} の頻度で発生するがんを検出するには少なすぎる。したがって実験的研究は、ヒトの成人がんを模したがんの生涯発生率に対する子宮内被ばくの影響を分析するために実施される。実験用マウスおよびラットを用いたこれらの研究から、子宮内被ばくは新生児被ばくに比べて白血病および各種固形がんを誘発する効果が低いことが判明した (Upton et al., 1960; Sasaki, 1991; Inano et al., 1996; Di Majo et al., 2003)。Apc^{Min/+}マウスの放射線に対する年齢依存的感受性に関する詳細な研究から、感受性は 10 日齢新生児で最も高く、2 日齢新生児、35 日齢の若い成体、14 日齢胎児、7 日齢胚の順に低下していった (Ellender et al., 2006)。したがってマウスでの研究から、胎児期は全体的に新生児期よりも感受性が低く、初期胚期は白血病および固形がんの放射線誘発に対する感受性ははるかに低いことが示された。ただし、マウスではヒトに比べて胎児期が短く、これが 2 種間で異なる結果が得られた原因の一つであるかもしれない。出生前期における放射線発がん感受性に影響する様々なパラメータについては、文献 90 (ICRP, 2003) に詳述されている。OSCC は、妊娠第 1 期が小児がん誘発に対する感受性が最も高いと報告しており (Bithell and Stillier, 1988)、初期胚発生期は全体的に放射線発がんに対して非感受性であるというマウスでのデータと矛盾している。考えられる理由の一つとして、妊娠第 1 期で受けた線量が第 2 期および第 3 期よりも高かった可能性があり (Mole, 1990)、感受性が明らかに高かったのは単に実験中に受けた線量に比例していただけかもしれない (Doll and Wakeford, 1997)。ただ、出生前被ばくおよび小児がんリスクの症例対照研究は、いずれも関与する症例および対照についての個人線量再構築を実施していない点に注意すべきである。線量推定は全国調査に基づいており、機械のパラメータ、反復実験、および記述されていない手順などに関して不確実な点がある。

(121) 細胞特性について考えると、胎児期の幹細胞と出生後の幹細胞の違いを識別するのは困難である。したがって、放射線発がん感受性の違いは組織レベルで探す必要がある。胎児期組織の特徴の一つが明確なニッチ様構造の欠如であり、成体では組織幹細胞は幹細胞ニッチと

いう明確な微小環境内に存在すると考えられている。成体タイプのニッチは、多くの組織では出生後に確立される。セクション 2.5.4 で議論されたように、例えば胎児発達中の HSC の主な増殖部位は肝臓である。HSC はその後骨髄ニッチに移動し定着する。新たに確立された骨髄ニッチの収容数には限りがあり、そこへ膨大な数の HSC が移動する。ニッチに定着できるのは G₀期の HSC のみであることが実証されている (Bowie et al., 2006)。この選択的定着が、異常な HSC を排除するための効率的なメカニズムとして働く。

(122) Ohtaki ら (2004) は、子宮内被ばくした原爆生存者は通常、リンパ球内で染色体異常（遺伝的不安定性）を発現しないが、線量<50 mGy では異常率がわずかに上昇することを見いだした。このことが、子宮内被ばくした原爆生存者に白血病が見られない原因であるかもしれない。同様に、子宮内被ばくしたマウスでも染色体異常は観察されなかった (Abramsson-Zetterberg et al., 2000; Nakano et al., 2007)。別な研究では、胎児造血系短期増殖幹細胞で誘発された (0.5~1.5 Gy) 不安定な染色体異常はその後の細胞分裂で排除されたが、長期増殖幹細胞では維持された (Devi and Satyamitra, 2005)。これより最近の研究では、子宮内被ばくした HSC の排除には若干「漏れ」があることが示され、生き残った HSC のクローン増殖が検出されている (Nakano et al., 2012)。これらの研究結果は、2つの仮定によって説明できる。1つ目は、胎児 HSC は放射線による細胞死滅への感受性が高い必要はない。2つ目は、染色体突然変異を有する胎児 HSC は、胎児期から新生児期にかけて、おそらく骨髄ニッチをめぐる競争により優先的に排除される。さらなる研究は当然必要であるが、組織レベルでの競争は造血組織内の異常幹細胞を排除するためのフィルターとして有効に働いていると考えられる。しかし、造血組織で得られた知見に矛盾して、子宮内被ばくしたラットでは、染色体転座を起こした異常な乳腺上皮細胞が維持されることが見いだされた (Nakano et al., 2014)。また、胎児ラットに放射線を照射しても乳がんリスクの増加は見られなかった (Imaoka et al., 2013)。したがって、胎児被ばくした動物における異常幹細胞の運命は組織ごとに異なると考えられる。前のセクションで述べたように、胎児被ばくさせた *Apc^{Min/+}* モデルマウスで放射線による腸腫瘍誘発への感受性が低かったのも (Ellender et al., 2006)、これとある程度似た理由からであろう。胎児発達中、腸は幹細胞層を有する単純な管として形成される (Crosnier et al., 2006)。マウスの場合、最初の分化である絨毛形成は 15 日齢の胎児で起こる。しかし、陰窩形成は生後 7 日目にならないと開始されない。このことから、胎児期 ISC の数の多さに対し、陰窩幹細胞ニッチに定着する幹細胞の数が少ないことが示唆される。このことが胎児幹細胞間での激しい競争をもたらし、これによってこのような異常細胞が排除され、成体腸組織の維持に寄与していると考えられる。

(123) 新生児期における競争による異常細胞の排除は、放射線により損傷した幹細胞のみならず、自然発生した異常細胞に対しても起こると考えられる (Nakamura, 2005)。ALL は主要な小児がんであり、特定のタイプの白血病でのみ見られる特徴的転座を有する。臍帯血サンプルを PCR 解析したところ、新生児の約 1% が、小児 ALL に特異的な主な転座の一つである転座 ETS 様白血病/急性骨髄性白血病 1 (TEL/AML1)

77

融合遺伝子を保有していた。この転座は、正常な胎児発達でも発生することが示されている (Mori et al., 2002)。実際、転座保有者の数はこのタイプの小児白血病罹患率より 2 桁も多く、素因変異を有する細胞は小児期の成長中に排除されている可能性が示唆される。出生後に素因細胞が排除される可能性については、ALL のバックグラウンド罹患率は 3 歳前後で最も高くなり、その後 20 歳までは年齢とともに急激に低下し、高齢者で再び増加するという事実から示唆される (Smith, 2005)。出生後の発達段階で HSC が骨髄ニッチに安定的に定着することが、素因変異を有する好ましくない細胞を選択的に排除するためのバリアとして働いているのではないかと推測したくなる。

(124) このようながん素因変異を有する細胞の排除は、他の多くの散発性小児がんでも行われていると思われる (Ries et al., 1999)。神経堤を起源とする腫瘍である神経芽細胞腫は、小児期に最も多く見られる悪性腫瘍の一つであり、15 歳までの罹患率は 10,000 人に約 8 人である。しかし、生後 3 か月以内に死亡した乳児の剖検サンプルでは、前がん病変はむしろ普通に見られるものであり、約 200 人に 1 人の割合で検出された (Beckwith and Perrin, 1963)。したがって、新生児での病変の発生率および神経芽細胞腫の罹患率にはかなりの差があり、大部分の前がん病変はなんらかのメカニズムにより排除されることが示唆される。これに合致するように、腫瘍罹患率は生後最初の数か月が最も高く、その後急激に低下し、15 歳までにゼロになる (Goodman et al., 1999)。これと同様に罹患率が生後急激に低下するパターンは、他の小児がん、たとえば網膜芽細胞腫、ウィルムス腫瘍、および肝芽腫でも報告されている。これらの腫瘍については、ALL の場合と同様な異常/前がん幹細胞の実際の排除に加えて、前がん細胞の最終分化も罹患率低下のメカニズムとして関与していると考えられる。

(125) マウスでの胎児被ばくに関するデータは、妊娠初期ではリスクが最小であることを示す傾向にある。しかし、妊娠 17 日目で被ばくとすると、肺および下垂体のがんを誘発することが示された (Sasaki, 1991)。興味深いことに、マウスではこれら 2 つの器官は妊娠 17 日目までにすでに十分に発達している (Sheng and Westphal, 1999; Yu et al., 2004)。したがって、特定の組織が十分に発達している周産期の胎児被ばくによってもがんは誘発される可能性がある。マウスに比べてヒトは胎児発達の期間がはるかに長いので、特定の組織は周産期にも出生後と同等の感受性を示す可能性がある。Wakeford (2008) は、OSCC の骨盤計測診断の 90% が妊娠最終月に実施されたと報告している。したがって、胎児発達の晩期は、出生後の新生児期と同等の放射線発がん感受性を示すと考えられる。一方、研究で調査されたあらゆる小児がんタイプの RR が極めて近似していたことから、出生前 X 線検査との因果関係が疑われる (Boice and Miller, 1999; ICRP, 2003)。小児期被ばくの生涯 RR はがんタイプによってかなり変動があることは特筆すべきである (UNSCEAR, 2013)。

3.7.3. 放射線によるがん誘発に対する小児の高い感受性

(126) 小児は白血病および一部の固形がんの放射線誘発に対する感受性が高いことは周知である (ICRP, 2003)。放射線誘発性がんに対する小児の感受性については、最近の UNSCEAR による文献において広くレビューされており、感受性の高さはがんのタイプによって大きく異

なる（UNSCEAR, 2013）。分析した 23 のがんタイプのうち、約 25%については小児は成人より感受性が高かった。これらのタイプには白血病、甲状腺がん、皮膚がん、および脳腫瘍が含まれる。膀胱がんなど約 15%のがんタイプについては小児の感受性は成人と同じであり、肺がんなど約 10%のがんについては成人より感受性が低い。20%のがんタイプについては感受性の違いを結論付けるにはデータが不十分であり、30%のがんタイプについては放射線被ばく後にリスク増加が見られない。放射線誘発性がんの ERR、特に若年性がんについては、被ばく時の年齢に反比例するがんタイプが多かった（若年で高く、到達年齢が上がるにつれリスクが低下する）（Preston et al., 2007）。ALL の Gy あたりの ERR は 10 歳未満の小児では 15 超であり、年齢が上がるにつれてリスクが急激に低下する（Hsu et al., 2013）。特筆すべきことに、若年性 ALL の ERR は高いが EAR はやや低く、これは小児でのがんのバックグラウンド罹患率が成人に比べてかなり低いことに起因する。小児期被ばくによる成人固形がんの Gy あたりの ERR は最大 3～5 であり、被ばく時の年齢が上がるにつれ急激に低下する。さらに、一部のがんでは、小児期被ばく後のがん発生までの期間が比較的短い。たとえば、甲状腺がんの最短潜伏期間については、チェルノブイリ事故後の小児では 4 年以内に発症した（セクション C.1）。結果として、小児期被ばく後の固形がんの単位線量あたりの生涯 ERR は約 1.0 となる（Pierce et al., 1996）。

(127) 白血病および一部の成人固形がんの放射線誘発に対する感受性が小児で高いのは、小児では幹細胞および前駆細胞の増殖速度が速いことに起因すると考えられる。しかし、これらの細胞は胚や胎児でも増殖が速いが、前のセクションで詳述したように、これらの発生段階での放射線誘発がん感受性は小児期ほど高くない。したがって、小児期で被ばく後の放射線誘発性がんへの感受性が高い理由は、増殖などの細胞特性だけでは説明できない。ただし組織レベルでは、小児と成人とで大きく異なる特性の一つあり、これが放射線誘発がんに対する小児の感受性の高さに寄与しているかもしれない。上述したように、成体幹細胞ニッチは周産期前後に確立されるが、確率される時期は組織や種ごとに異なるようである。小児期の成長中、幹細胞ニッチはその幹細胞とともに一つの単位を形成し、成長する体の需要に合わせて数を増加させる（図 3.2）。

(128) 腸の場合、この幹細胞／ニッチの増殖プロセスは陰窩の分裂によって達成される（Fujimitsu et al., 1996）。この分裂は陰窩のサイズ拡大から始まり、その後底から分割して 2 つの陰窩が形成される。陰窩のサイズが拡大すると陰窩ニッチの収容量も増えるため、ニッチ内での幹細胞間の競争が緩和される。加えて、ニッチ間の競争も緩和される。その結果、異常幹細胞が残りやすくなるため、腸内に変異が蓄積されやすくなる。したがって、幹細胞／ニッチ単位の増殖プロセスは、放射線被ばく後の小児のがん発生に対する感受性の高さに寄与している可能性がある。

3.7.4. 成人期被ばくによる発がんリスク

79

(129) 一般に、放射線誘発がんリスクは被ばく時の年齢が上がるにつれて低下する。また、放射線被ばく後の到達年齢が上がるとリスクは低下する。成人期被ばくによるリスクは小児期被ばくにくらべて低いが、これは幹細胞の細胞特性が変化することによって説明できる部分もある。たとえば、小児幹細胞は頻繁に非対称分裂を起こすことで成長する体の要求に応えるが、成体幹細胞はそれほど頻繁には非対称分裂を起こさない。このため、前者は後者に比べて突然変異を起こしやすい。また、小児期成長中の幹細胞は、上述したように体の成長に合わせて幹細胞ニッチの数が増加するため、競争にさらされる機会が少ない。実際、セクション 3.3.2 で述べたように、成体幹細胞は小児幹細胞に比べて激しい競争にさらされており、これによってリスクが低く抑制されていると考えられる。

(130) 異常幹細胞の排除は動物モデルで実証されている。マウス乳がんの場合、放射線被ばくによって誘発されるイニシエーションされた細胞の数は、完全悪性に進行する細胞の数よりはるかに多い（Adams et al., 1987; Kamiya et al., 1995）。実際、ラットの乳がん発がんモデルでは、照射された乳腺クローン形成性細胞 13 個に 1 個という高い頻度で発生しており、これは放射線照射により誘発された特定の変異で説明できるものではない（Para. B55）。高頻度で見られるイニシエーションされた細胞においても、新生物の発生頻度ははるかに低かったことから、このような細胞の十分な排除、あるいはその異常表現型の抑制が起こったことが示唆される。

(131) 成人期での放射線被ばくについては、被ばく後の任意の時期での ERR は、小児被ばく後に比べて小さいのが一般的である。リスクは白血病では数年以内に、固形がんでは 10 年以上経過後に発生し、増加した ERR はやがて被ばく者の到達年齢が上がるにつれて低下し始める。このようながんリスクが増加して低下するパターンは繰り返し観察されているが、最も信頼できるデータは疫学的研究から得られたデータ（Boice et al., 1985）、特に原爆生存者の研究から得られたデータである（Preston et al., 2007; Richardson et al., 2009; Hsu et al., 2013）。Armitage and Doll (1954) の多段階発がんモデルに基づき、急性照射を 1 ヒット受けた集団の RR は、到達年齢が上がるにつれて 1/年齢の割合で減少すると予測された（Pierce and Mendelsohn, 1999）。最近、原爆生存者のデータが集積され、RR の低下率が推定された。推定値はがんタイプにより異なっていたが、全体として低下率は約 1/年齢²の範囲内にあった（Preston et al., 2007）。さらに、ラドンに被ばくしたウラン鉱山作業者の研究では、肺がんの RR は鉱山での作業を中止してから 10 年ごとに約 50%ずつ低下しており、低下率は約 1/年齢³に比例することが示唆された（Tomasek et al., 2008）。これらの RR 低下率は 1/年齢より高く、上述したように、組織内のイニシエーションされた／前がん細胞が経時的に失われることを示唆しているかもしれない。

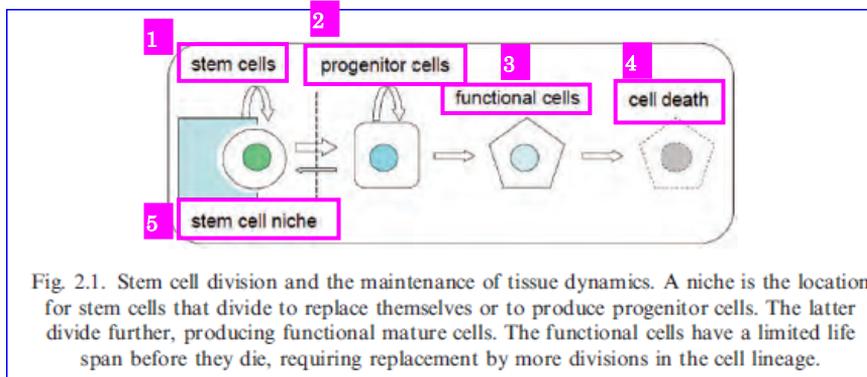
(132) 全体として、上述した放射線誘発がんに対する年齢依存的感受性は以下のようにまとめられる：胚および胎児期では低から中程度、小児では高く、成人では低い。ただし、この放射線感受性のパターンについての機制的洞察はまだ得られていない。過去には、小児の放射線誘発がんに対する感受性が高い理由は、単純にこの時期はヒトの生涯の中で体細胞の増殖速度が速い時期であるからだと推測されていた。しかし、この単純な推測では、胎児期では増殖速度がさらに速いにもかかわらず極めて高い放射線誘発がん感受性を伴わない事実を説明するのが難し

い。ただし、後者については議論的になっている。

3.8. 今後の研究への提言

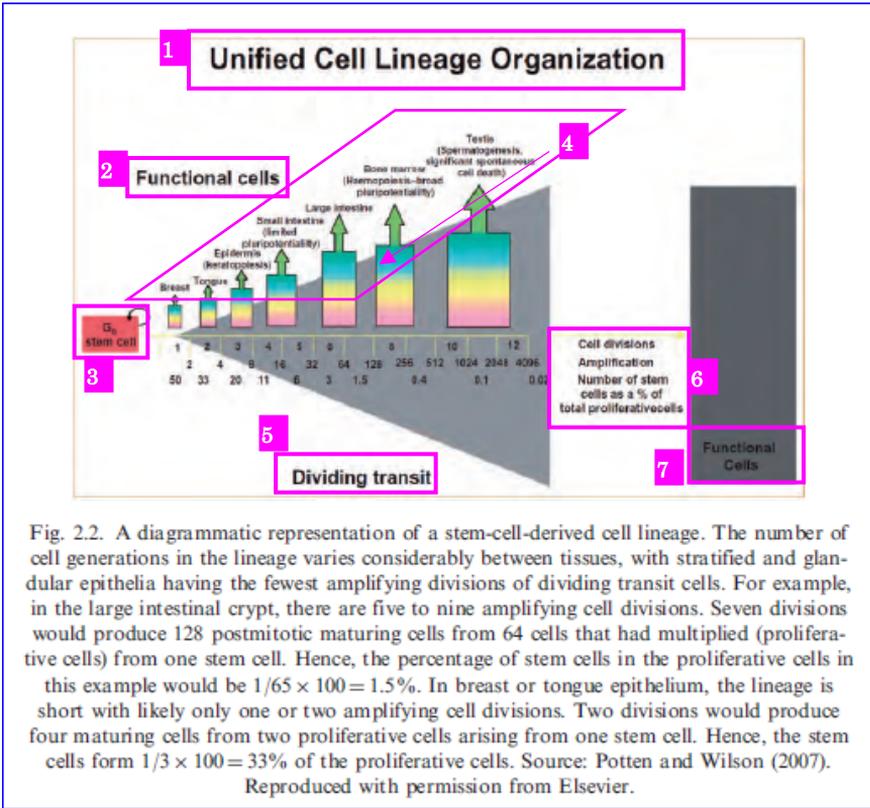
- 骨髄、大腸および皮膚における幹細胞/ニッチ系および発がんをもたらす放射線障害感受性に関しては、乳腺、甲状腺、肺、および骨など、リスクのある他の組織よりも知見が得られている。したがって、後者の（再生の遅い）組織における幹細胞系、その制御因子、および急性および遷延照射に対する突然変異/機構的反応に関しては、さらなる調査が必要である。この極めて重要な分野での研究は、幹細胞およびその低線量放射線反応に関する研究プログラム、たとえば欧州原子力共同体による多施設 RISK-IR（リスク、幹細胞および組織動態—電離放射線）プロジェクト（<http://www.risk-ir.eu>）により支援されている。
- ゲノム不安定性、非標的効果、および適応については広く研究がなされ、文献で詳しく考察されている。しかし、低線量での慢性照射による発がん効果へのこれらの寄与、および放射線防護の原則の枠組み内でいかにして合意に到達するかについては不確実な部分が残っており、今後の課題である。
- 親 DNA 鋳型が非対称幹細胞分裂中に維持されることで幹細胞集団内での突然変異負荷が低く抑えられるとする DNA 不死配列説は、放射線発がんを防止する役割を果たしていると考えられる。本報告書で考察されている組織の一部では、このメカニズムを支持する証拠が得られている（例えば小腸陰窩、乳腺上皮および表皮）が、このメカニズムは HSC には適合しないことが分かっている。したがって、さらに多くの組織タイプについて研究を実施し、この現象を呈する組織において、急性および遷延照射後の幹細胞で重要とされる発がん性変異の測定を試みることは有益であろう。
- 正常な幹細胞と放射線により損傷した幹細胞が幹細胞ニッチをめぐって競合することが、照射後の発がん事象が予想よりも少なくなる原因と考えられているが、この概念は線量 $\geq 1\text{Gy}$ での急性被ばく後の造血組織の研究結果により支持される。より低い線量、特に慢性被ばくの影響について調査すること、および可能な限り他の組織でも調査することが有益であろう。
- DDREF の数値については議論が分かれており、一部のヒト集団では他のヒト集団や実験動物系に比べて低くなるようである。この原因については現在のところよく分かっていない。また、被ばく時年齢の影響については、ヒト集団と実験動物系との間で、胎児期および新生児期での発がんに関するエビデンスに矛盾が見られる。これらの差異を生体レベルで調整することで、放射線防護システムの一貫性および堅牢性が強化されるはずである。

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication131 下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。



1. 幹細胞
2. 前駆細胞
3. 機能性細胞
4. 細胞死
5. 幹細胞ニッチ

図 2.1 幹細胞分裂および組織維持のダイナミクス。ニッチとは、幹細胞が分裂して自身を補充したり前駆細胞を生じるための場所である。後者はさらに分裂して成熟機能性細胞となる。機能性細胞には寿命がありいずれは死ぬため、さらなる分裂によって細胞系列を補充する必要がある。



1. 統合された細胞系列組織
2. 機能性細胞
3. G₀幹細胞
4. (下側から)
 - 乳房
 - 舌
 - 表皮
 - 小腸 (限定的な多能性)
 - 大腸
 - 骨髄 (造血-広い多能性)
 - 精巢 (精子形成, 重要な自発的細胞死)
5. 分裂中の前駆細胞
- 6.

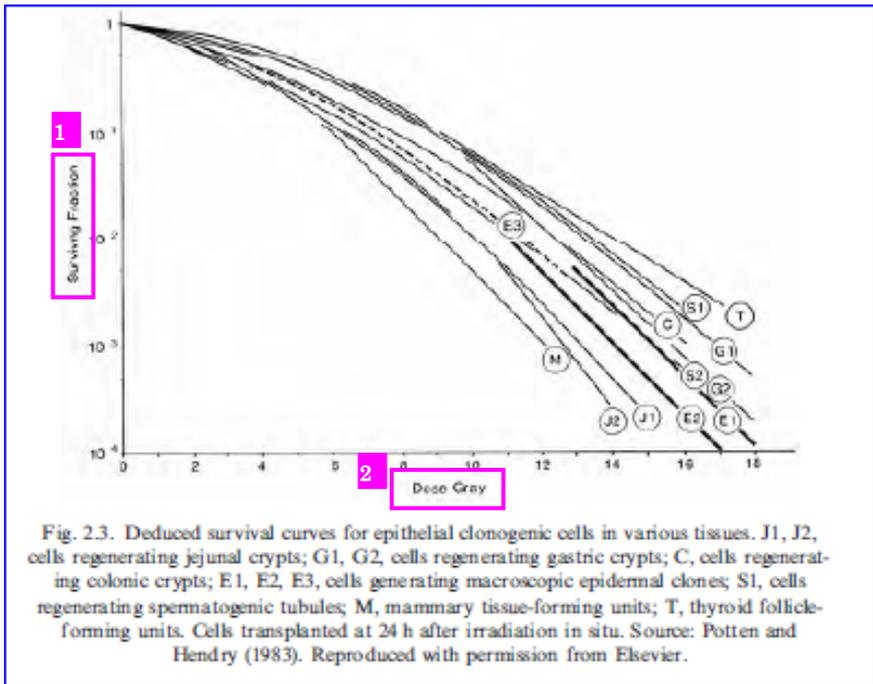
細胞分裂

増幅

全増殖性細胞に占める%として表される幹細胞の数

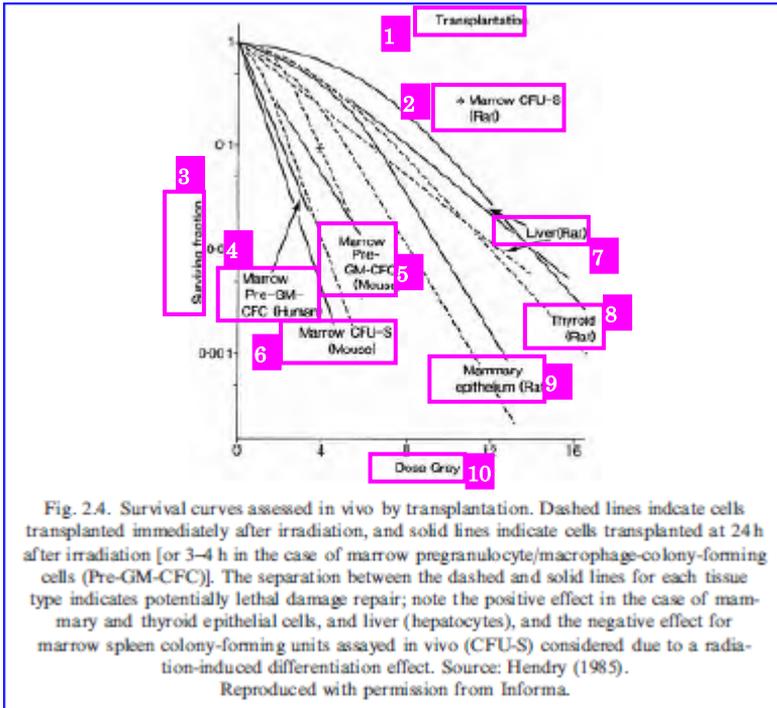
7. 機能性細胞

図2.2 幹細胞由来細胞系譜の模式図。系列内の細胞世代数は組織ごとに大幅に異なっており、重層上皮および腺上皮が分裂中の前駆細胞の増幅分裂回数が最も少ない。例えば大腸陰窩では5～9回の増幅細胞分裂が起こる。7回の分裂で、1個の幹細胞から増殖した64個の細胞(増殖性細胞)から128個の分裂終了成熟細胞が生じる。つまり、この例では増殖性細胞に占める幹細胞の割合は $1/65 \times 100 = 1.5\%$ である。乳房または舌上皮では系列は短く、増幅細胞分裂はおそらく1回か2回のみである。2回の分裂で、1つの幹細胞から生じた2個の増殖性細胞から4個の成熟細胞が生じる。つまり、肝細胞は増殖性細胞の $1/3 \times 100 = 33\%$ を占める。出典：Potten and Wilson (2007)。Elsevier社の許可を得て複製。



1. 生存率
2. 線量 Gy

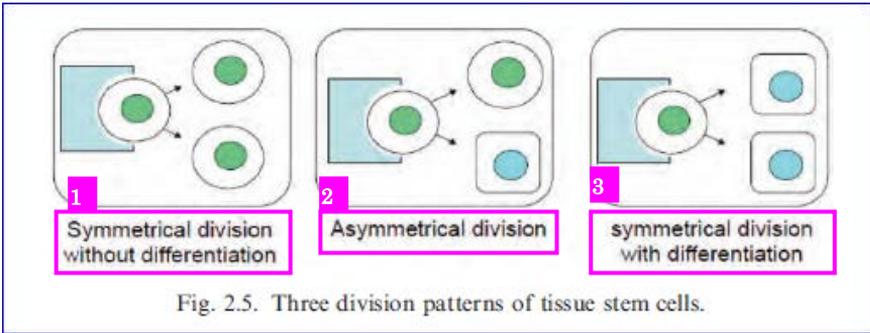
図 2.3 様々な組織の上皮クローン形成性細胞の推定生存曲線。J1, J2, 空腸腺窩を再生する細胞；G1, G2, 胃腺窩を再生する細胞；C, 結腸陰窩を再生する細胞；E1, E2, E3, 肉眼で観察できる表皮クローンを再生する細胞；S1, 精子形成管を再生する細胞；M, 乳房組織形成単位；T, 甲状腺濾胞形成単位；細胞は in-situ での照射から 24 時間後に移植。出典：Potten and Hendry (1983)。Elsevier 社の許可を得て複製。



1. 移植
2. 骨髄 CFU-S (ラット)
3. 生存率
4. 骨髄 Pre-GM-CFC (ヒト)
5. 骨髄 Pre-GM-CFC (マウス)
6. 骨髄 CFU-S (マウス)
7. 肝臓 (ラット)
8. 甲状腺 (ラット)
9. 乳腺上皮 (ラット)
10. 線量 Gy

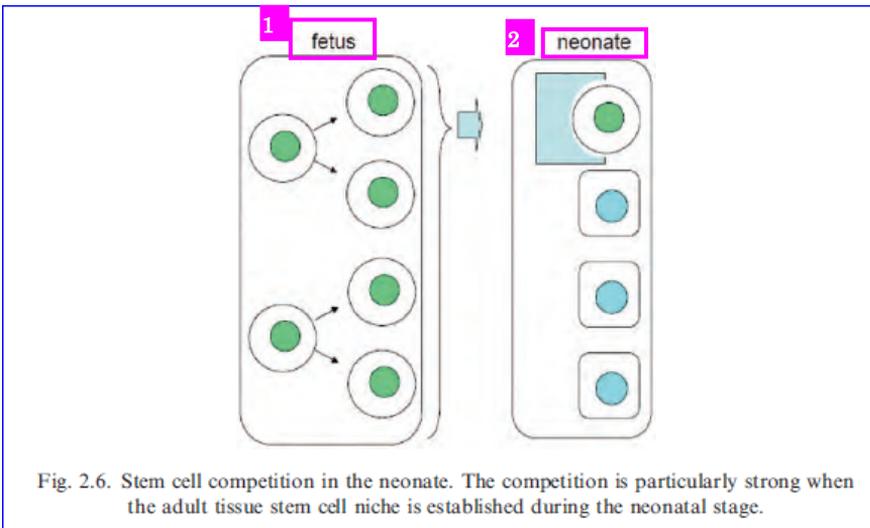
図 2.4 移植により生体内で評価した生存曲線。点線は照射直後に移植した細胞を示し、実線は照射の 24 時間後 [あるいは骨髄前顆粒球/マクロファージコロニー形成細胞 (Pre-GM-CFC) の場合は 3~4 時間後] に移植した細胞を示す。各組織タイプの点線と実線の分離は、致死性損傷の修復が起こった可能性を示す; 乳房および甲状腺上皮細胞および肝臓 (肝細胞) では正の効果, および生体内でアッセイされる骨髄脾臓コロニー形成単位 (CFU-S) での負の効果は、放射線に誘

発された分化効果によるものと考えられる。出典：Hendry (1985)。
Informa 社の許可を得て複製。



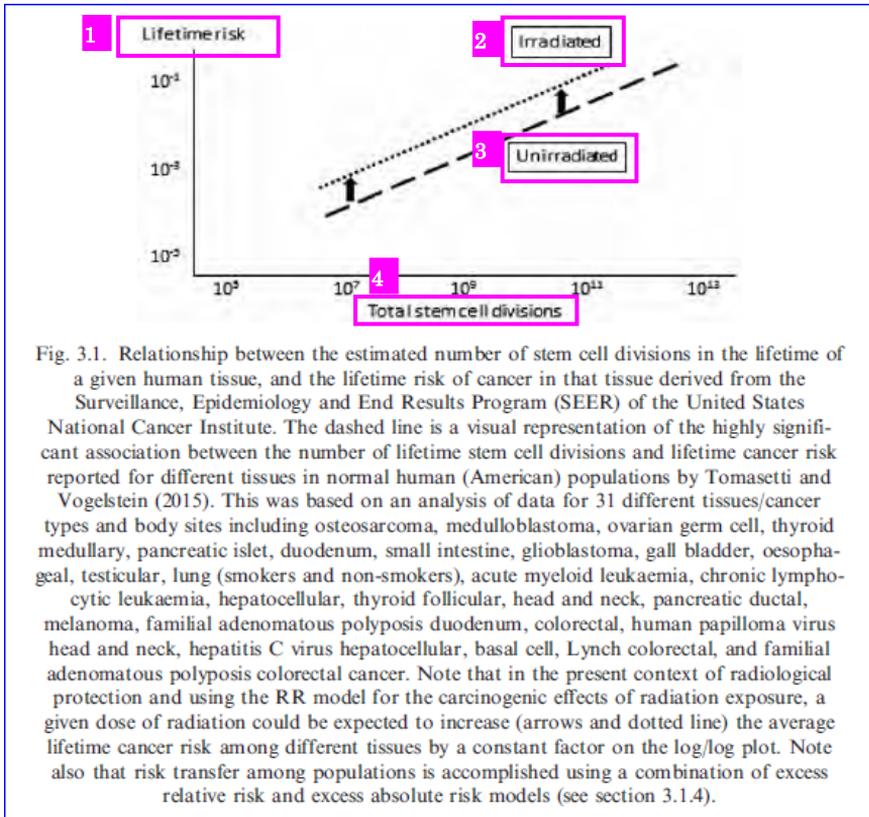
1. 分化なしの対称分裂
2. 非対称分裂
3. 分化ありの対称分裂

図 2.5 組織幹細胞の 3 つの分裂パターン。



1. 胎児
2. 新生児

図 2.6 新生児における幹細胞競合。新生児期に成体組織幹細胞ニッチが確立されている間は特に競合が激しい。



1. 生涯リスク
2. 照射
3. 未照射
4. 総幹細胞分裂回数

図3.1 特定のヒト組織における推定生涯幹細胞分裂回数と、当該組織における生涯リスクとの関係、アメリカ国立がん研究所の監視疫学遠隔成績プログラム (SEER) から。破線は、Tomasetti and Vogelstein (2015)により報告された正常なヒト(アメリカ人)集団における様々な組織の生涯幹細胞分裂回数と生涯リスクとの間に極めて有意な相関があることを視覚的に示している。骨肉腫、骨芽腫、卵巣胚細胞、甲状腺髄様、膵島、十二指腸、小腸、膠芽腫、胆嚢、食道、精巣、肺(喫煙者および非喫煙者)、急性骨髄性白血病、慢性リンパ球性白血病、幹細胞、甲状腺濾胞、頭頸部、膵管、メラノーマ、家族性腺腫性

ポリポーシス十二指腸，結腸直腸，ヒトパピローマウイルス頭頸部，C型肝炎ウイルス肝細胞，基底細胞，リンチ結腸直腸，および家族性腺腫性ポリポーシス結腸直腸がんを含む31種類の組織／がんタイプおよび身体部位についてのデータを解析した結果に基づく。今回は放射線防護の観点から放射線被ばくの発がん影響についてRRモデルを使用しているため，任意の線量の放射線は，様々な組織における平均生涯リスクをlog/logプロット上で定数倍に増加（矢印および点線）させると推測される。また，集団間でのリスク転換は，過剰相対リスクモデルおよび過剰絶対リスクモデルを併用して実施される（セクション3.1.4を参照）。

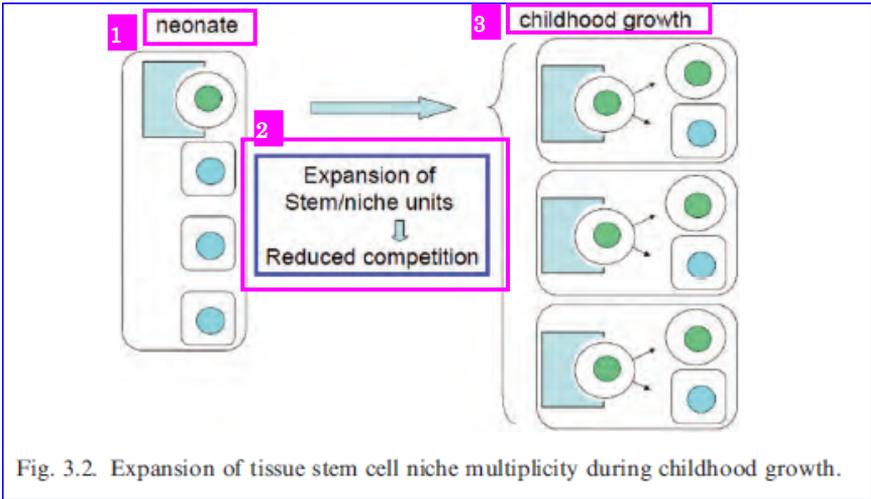


Fig. 3.2. Expansion of tissue stem cell niche multiplicity during childhood growth.

1. 新生児
2. 幹／ニッチ単位の拡張
競争低下
3. 小児期成長

図 3.2 小児期成長中の組織幹細胞ニッチ多重性の拡張

【 3章で引用がある付属書 F からの図 】

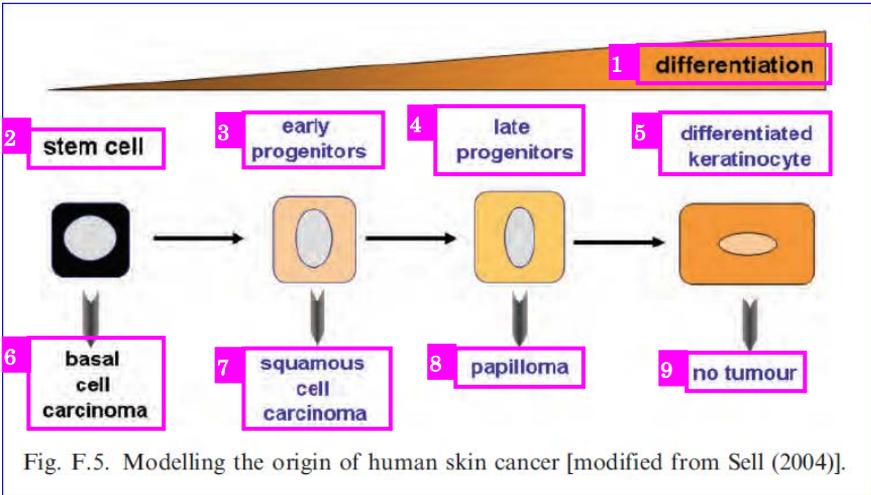


Fig. F.5. Modelling the origin of human skin cancer [modified from Sell (2004)].

1. 分化
2. 幹細胞

3. 初期前駆細胞
4. 後期前駆細胞
5. 分化ケラチノサイト
6. 基底細胞がん
7. 扁平上皮がん
8. 乳頭腫
9. がんなし

図 F.5 ヒト皮膚がんの起源モデル [Sell (2004) から改変]。

この翻訳物は、平成 30 年 3 月時点の ICRP Publication131 下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。

1 章は表なし。2 章・表 1, 3 章・表 2

表 2.1 階層性状態と放射線感受性の関係 (Potten and Hendry, 1983 から更新)。

組織階層	放射線感受性	D ₀ (Gy)	付属書
骨髄			
幹／前駆細胞 (クローン形成性)	高		
移行顆粒球	中		
移行赤血球	非常に高		
成熟細胞	低		
線維芽様 CFU-F	中		
乳房			
幹細胞	中		
甲状腺			
幹細胞	中		
小腸上皮			
P4 幹細胞の一部 (SI)	非常に高		
CBCC	中		
m-Tert	耐性		
クローン形成性細胞 (SI および結腸)	中		
移行細胞	低		
機能性細胞	非常に低		
表皮			
幹 (クローン形成性) 細胞	中		
移行細胞	低		
機能性細胞	非常に低		
精巣			
精原細胞幹 (クローン形成性) 細胞	中		
タイプ A	高		
中間	非常に高		
タイプ B	非常に高		
機能性 (精母細胞)	低		
セルトリ細胞	非常に低		

CFU-F, 線維芽細胞様コロニー形成単位 ; SI, 小腸 ; CBCC, 陰窩基底部分柱細胞。

表 3.1 本報告書で取り上げる様々な組織のがん罹患率に基づく過剰絶対リスク (EAR) および過剰相対リスク (ERR) モデルの係数, および組織荷重係数 (w_T)

	EAR		ERR		
組織	被ばく時 年齢 30 歳, 到達年 齢 70 歳で の 10^4 人あ たり 1Gy あたりの 過剰症例 数	被ばく時 年齢 : 10 年上がる ごとの EAR の変 化%	被ばく時 年齢 30 歳, 到達年 齢 70 歳で の 1Gy あ たりの ERR	被ばく時 年齢 : 10 年上がる ごとの ERR の変 化%	
乳房					
甲状腺					
胃					
結腸					
肺					

M, 男性 ; F, 女性。

出典 : 出版物 103 (Publication 103) (ICRP, 2007) の表 A.4.7, A.4.6, および A.4.3。

表 3.2。様々な組織の放射線誘発がんの標的細胞の位置および特性。

付属書, がん	ヒト標的細胞	マーカー	位置
A, 白血病	HSC (および潜在的に一部の前駆細胞)	CD34 ⁺ , CD59 ⁺ , Thy1 ⁺ , CD38 ^{low/+} , c-Kit ^{low} , Lin ⁻	骨内および血管性ニッチ
B, 乳房	乳房幹細胞	可能性として CD24 ⁺ CD29 ^{high} , および可能性として K6	乳腺幹細胞ニッチ (明確ではない)
C, 甲状腺	濾胞幹細胞	可能性として Oct4 ⁺ Pax8 ⁺ Tg ⁻	細胞充実巣
D, 胃	粘膜幹細胞	可能性のある標識維持細胞 (デフェンシン5 ⁻ , Muc2 ⁻ , クロモグラニンA ⁻)	胃小窩, 深さ 60~100μm
D, 結腸	粘膜幹細胞 (可能性として一部の娘細胞)	Lgr5 ⁺ ; mTert ⁺ ; ; 可能性として DCAMKL-1も	陰窩基底部, 深さ 280~300μm
E, 肺	可能性としてクララ, クララ変異型, または気管支肺胞幹細胞	SCGBa1a, 界面活性剤タンパク質C, Sca-1, CD45, CD31 ⁻ ; 可能性として (c-KIT ⁺ , Nanog, Oct 3/4, KLF4, Sox2) 細胞も	気管支肺胞管分岐ゾーン, 可能性として遠位肺ニッチも
F, 皮膚	表皮幹細胞 - 基底細胞がん (初期前駆細胞 - 扁平上皮がん; 後期前駆細胞 - 乳頭腫)	α6 ^{bri} CD71 ^{dim} ; β6 ^{bri} /CD71 ^{dim} も	毛包間基底層, 名目深さ 70μm
G, 骨	間葉系幹細胞 - 一部の HSC	CD90, CD73, CD105, および可能性として Stro-1, CD106, VCAM-1 CD34 ⁻	MSCニッチおよび脈管周囲骨髓

HSC, 造血幹細胞

この翻訳物は、平成30年3月時点のICRP Publication121下訳版であり、今後の作業状況や委員会での用語の検討状況、監修等によって変更することもあり得る。**ドラフトからの引用を禁ず【事務局】**

ICRP Publication 121
論説
小児科医療における放射線防護の改善
<p>電離放射線は、1世紀以上にわたり医療で使用されてきた。これが診断と治療の双方に非常に大きな利益をもたらした患者のケアに大きな改善をもたらしたことは疑いのないところである。近年、最先端のイメージング技術と手法、高度に専門された電離放射線の治療応用、透視誘導手技などの導入により、この分野は驚異的な進歩を見せており、何十年前には想像も及ばなかった外科的インターベンションが可能となっている。</p> <p>国際放射線防護委員会 (ICRP) は、医療における放射線の使用の急速な進歩を継続的にフォローしている。放射線防護体制は、患者、介助者、介護者、生医学研究のボランティア、医療被ばくを受ける可能性あるすべての人々の防護を含め、あらゆる側面を網羅している。医師その他のスタッフの職業被ばくも考慮される。医療手技から生じる公衆の被ばくも同様である。委員会の2007年の勧告 (ICRP,2007d) の防護体制が医療における放射線防護にどのように適用されるかを解説するために Publication 105 (ICRP,2007b) が作成されているが、それ以降のいくつかの刊行物で、個々の医療用途についてさらに詳細にこのテーマを扱っている。</p> <p>2007年の勧告 (ICRP,2007d) に記されているように、医療被ばくは計画的な被ばく状況内で発生する。この場合、リスクと便益の大半が一人一人の個人 (患者) に適用されるため、線量限度は適用されない。介助者と介護者、生医学研究のボランティアのケースはわずかながらそれより複雑であるが、同じ一般原則が当てはまる。しかし、医療被ばく状況を含め、どのような状況であっても、保護の最適化が鍵となる原則である。診断手技における最適化の参考として、ICRP は診断参考レベルの使用を推薦している。他の医療被ばくに参考レベルの使用範囲を広げるかどうかは検討中である。</p> <p>すべての状況で、保護の最適化が線量を最小限にすることは限らない。最適化とはむしろ損害と利益のバランスをとることである。同じことが医療被ばくにとっても当てはまる。これについて、委員会は患者の保護の最適化が、医療目的に見合うように患者の線量を管理することであるとより明示的に述べている。患者が被る損害を低減するために線量を低減することは賢明であるが、たとえば、画像から必要な診断情報がもはや得られないほど低いコンピュータ断層撮影線量や手技が十分な有効性を有さなくなるまで治療線量を低減することは、優れた医療行為に反し、健全な放射線防護ではない。</p> <p>正当化も、医療被ばくの鍵となる原則である。Publication 105 は3つのレベルの正当化を記述している。その一つは個々の被ばくの正当化である。これは、特に複雑な診断手技やインターベンション手技など的高線量検査にとって重要である。この場合、臨床医による個々の正当化は特に重要であり、入手可能なすべての情報を考慮すべきである。具体的には、提案されている手技および代替手技の詳細、個々の患者の特徴、予想される患者線量、過去または今後予想される検査または治療に関する情報の入手可能性などである (ICRP, 2007b, パラグラフ 67)。</p>

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

<p>重要な「個々の患者の特徴」の1つは年齢である。小児科患者に対しては、成人患者に対してとは異なった扱いをしなければならないことは広く認められている。その1つの理由は、乳幼児および小児は平均して、同じ線量を被ばくする成人に比べがんを発症するリスクが大きいからである。小児のほうが寿命が長いので、放射線によるなんらかの有害影響がある場合、それが発現する時間もそれだけ長くなる。発達段階の臓器と組織は放射線の影響に対してより敏感である。</p> <p>本刊行物は医療における放射線防護のおもな基本的概念を取り上げ、特に画像診断、従来のX線撮影と透視法、IVRとコンピュータ断層撮影法における小児科患者に対する放射線防護を具体的に検討する。具体的な例とガイダンスを提示している。付属書Aは、中枢神経系、頸部と脊柱、筋骨格系、心臓胸郭系、胃腸系、泌尿生殖器系に対する小児科放射線学手技の適切な使用の臓器の系統別のガイダンスを含む。</p> <p>多くの場合、医療機器と手技は、成人の患者を念頭に置いて設計または準備される。このことが明示的に示される場合もあればそうでない場合もある。電離放射線が使用される多くの場合で、小児科患者にあわせて設備または手技を調節することが放射線防護に大きな改善をもたらす可能性がある。また、同じ医療的便益を少ない線量で提供できる可能性がある。本刊行物は、小児科患者に特化した放射線防護に関するガイダンスを提示しているが、究極の目的は、小児という、人間集団の中でもわれわれが本源的に特別な配慮をしたいと考える層の放射線防護を改善することにある。</p> <p>まったく別件であるが、委員会はオタワ (カナダ) のICRP事務局に Michiya Sasaki が加わったことに歓迎の意を表したいと思う。Sasaki 博士は、無償の専門家として2012年1月にICRPに加わった。Sasaki 博士は、ICRP書記補佐として、さまざまな点でICRP事務局長を援助している。具体的にはICRP主委員会の会議に向けた準備、ICRP年次報告の作成、ICRPウェブサイトの維持、特にICRP年報の刊行などである。彼は以前のいくつかの刊行物の作成に協力してきたが、前回発行の報告書から、彼は現在ICRPの年報の共同編集者と認められている (Executive Assistant) の Lynn Lemaire 氏の支援に感謝を示している。その支援により彼は快適に働き、オタワでの「生活をうまく始める」ことが可能となった。彼は、自身が所属する日本の団体であるCRIEPI (電力中央研究所)、彼をICRP「ファミリー」に迎え入れたICRPメンバー、オタワでの仕事と生活に適応するのを親切に援助してくれた他の多くの人々に感謝している。Sasaki 博士はICRPに貢献し、カナダの素晴らしい文化と美しい自然を楽しむことを待ち望んでいる。</p>
<p>CHRISTOPHER H. CLEMENT ICRP事務局長 編集長</p>
<p>MICHIYA SASAKI ICRP書記補佐 共同編集者</p>

小児科の放射線診断およびIVRにおける放射線防護
ICRP Publication 121
2011年10月に委員会により承認
抄録—小児科患者は、同じ線量に被ばくする成人に比べがんを発症する平均リスクが大きい。小児のほうが寿命が長いので、放射線によるなんらかの有害影響がある場合、それが発現する時間もそれだけ長くなる。発達段階の臓器と組織は放射線の影響に対してより敏感である。本刊行物は、紹介医と小児患者に画像診断とインターベンション手技を行っている臨床スタッフの放射線防護に対して指導原理を提示することを旨としている。これは放射線防護の基本的概念の概説から始まり、次に正当化と最適化の原則を含む放射線防護の一般的側面について説明する。その後、個々のモダリティ—X線撮影と透視法、IVR、コンピュータ断層撮影—に対する放射線防護のガイドラインと提案を深く検討する。報告書は要約と提言で締めくくられる。
電離放射線を必要とするすべての手技について放射線手技の厳格な正当化の重要性が強調されており、電離放射線を使用しないイメージングモダリティの使用を常に検討すべきである。放射線防護最適化の基本的目的は、必要な画像ができるかぎり低い放射線量で得られ、診断の解釈において十分な質を維持できるように純粋な便益が最大化されるようなやり方でイメージング・パラメータを調節し、防護措置を設けることにある。小児向けの新しい画像装置を購入する場合は、線量低減措置を講じることができるとどうかにか特別な考慮を払うべきである。小児科のイメージングの独自の側面の1つは患者サイズ(および体重)が幅広いことにある。そのため、設備、技術およびイメージング・パラメータの最適化と変更に対する特別な注意が必要となる。優れたX線撮影技術および透視技術の例には、患者の位置調整に対する注意、照射野サイズと十分な視準、防護遮蔽の使用、被ばく要素の最適化、パルス式透視法の使用、透視時間に対する制限などが含まれる。大がかりな小児科インターベンション手技は、経験豊かな小児科インターベンション操作者が行うべきである。別の固有の放射線防護のトレーニングレベルを設けることが望ましい。これが必須となっている国もある。コンピュータ断層撮影の場合、線量低減は、患者の体重または年齢、スキャンする部位、検査の適応(例えば、ノイズが多い画像でも十分な診断品質があれば受容すべきである)にしたがって、スキャンパラメータ(mA, kVp, ピッチ等)の調整によって最適化すべきである。その他の線量低減戦略としては、多相検査プロトコルに対する制限、スキャン部位の重複の回避、該当領域のみのスキャン、などがある。管電流変調法、臓器ベースの線量変調法、自動kV技術、反復の再構成などの最新の線量低減技術を適宜利用すべきである。
本刊行物が医療機関における手技の標準化を促進するのを支え、認識を高め、最終的に患者の便益のために医療行為を向上させることに寄与することが期待されている。
© 2013 ICRP エルゼビア社より発行
キーワード: 正当化, 最適化, 小児科患者, 放射線防護, 診断放射線医学, IVR
P-L. KHONG, H. RINGERTZ, V. DONOGHUE, D. FRUSH, M. REHANI, K. APPELGATE, R. SANCHEZ

序文
国際放射線防護委員会(ICRP)第3専門委員会は、2001年に小児科放射線防護の最適化に対する取り組みに初めて着手し、「CHILDSMART」というスローガンをステッカーとポスターで広く宣伝した。本刊行物は、2004年に北京で開催されたICRP会議で初めて構想され、会議で、小児科放射線防護というテーマが、優れた放射線医療において最も重要であり、そのような文書がこのテーマの重要性に対する認識を高めるために必要であることが確認された。本刊行物は、医療における放射線防護行為に関して第3専門委員会が作成した過去のICRP Publicationに準拠した小児科放射線診断とIVRにおける放射線防護に関する包括的報告書であり、小児診療に関わる紹介医と臨床スタッフのガイダンスとなることを意図している。さらに、医療従事者の間からICRPに対し、この分野での勧告を明確化してほしいという要請が寄せられた。第3専門委員会は、Hans Ringertzを議長とするワーキングパーティを発足させることとした。このワーキングパーティは、主要な放射線科医と小児科放射線医学と放射線防護という専門分野とする医学物理学者から構成された。その後2009年に、Pek-Lan Khongが、ポルトでのICRP会議でHans Ringertzとともにこのワーキングパーティの共同議長に就任した。
このワーキングパーティの委員は以下の通りである。委員は全員、本刊行物に貴重な貢献を果たした。 P-L. Khong (共同議長), H. Ringertz (共同議長), V. Donoghue D. Frush M. Rehani K. Applegate R. Sanchez
本報告書は、2010年と2011年のICRP会議での内部議論でさらに議論され、推敲され、また、パブリックコンサルテーションのプロセスを通じて得たコメントも非常に役に立った。委員会はまた、本刊行物の作成全体を通じて数多くの有益な提案を行ってくれた政府、非政府組織や個人のすべての貢献に対しても感謝の意を表したい。

総括
(a) 本刊行物は、紹介医と画像診断とインターベンション手技を行っている臨床スタッフに対して、放射線から小児患者を防護するための指導原理を提示することを旨としており、小児のイメージングに特有と思われる具体的な問題に焦点を当てている。
(b) これは放射線防護の基本的概念の概説から始まり、次に正当化と最適化の原則を含む放射線防護の一般的な側面について説明している。その後、個々のモダリティ — X 線撮影法と透視法、IVR、コンピュータ断層撮影 (CT) — に対する放射線防護のガイドラインと提案を深く検討している。最終章は要約と提言で締めくくられる。
(c) 電離放射線に関連するすべての手技、特に比較的高い放射線量を照射するモダリティ、CT とインターベンション手技について放射線手技の厳格な正当化の重要性が強調されている。電離放射線を使用しないイメージングモダリティの使用を常に検討すべきである。
(d) 画像診断とインターベンション手技に対する放射線防護の最適化の基本的目的は、必要な画像ができるかぎり低い放射線量で得られ、純粋な便益が最大化極大化されるようなやり方でイメージング・パラメータを調節し、防護措置を設けることにある。
(e) 患者サイズ (および体重) で広範囲に対応するため最も幅広い範囲で小児科用途に使用できるよう X 線撮影装置を最適化することが必要である。ほとんどの画像装置とベンダー指定のプロトコルが、成人用に構成されており、小児科で使用するには、装置パラメータと被ばくパラメータの修正が必要と思われる。設置、イメージング・プロトコルの設定、最適化を支援するため、可能な限り医学物理学者の助言を求めるべきである。新しい画像装置を購入する場合は、線量低減措置を講じることができるかどうか特別な考慮を払うべきである。
(f) 最適化プロセスを支援するための現地、地域内、国レベルでの診断参考レベル (DRL) の策定と定期的アップデートが奨励される。また、紹介基準、画質およびイメージング技術の定期的監査は、放射線防護文化の一部として実施されるべきである。
(g) すぐれた X 線撮影技術には患者の位置決めと固定、正確な照射野サイズと正しい X 線制限、防護遮蔽の使用、X 線撮影被ばく要素 (焦点サイズ、ろ過、散乱線除去グリッドの特性と適切な使用、焦点画像面間距離、管電流-被ばく時間の積) の最適化が必要となる。
(h) 透視法の線量低減技術には、パルス式透視法の使用、できる限り X 線源から透視台を離す、イメージ増倍管をできるだけ患者に近づける、透視時間を限定し、透視法の使用は移動目標の評価に限定する、透視を開始する前にバーチャル視準を使ってポジショニングを行う、関連する解剖学的部分への視準を限定する、放射線感受性領域から離れるように X 線ビームの角度を曲げる、などの方法がある。拡大は最低限にとどめるべきである。また、放射線量 (空気カーマ-面積の積) を記録すべきである。
(i) インターベンション手技、特に小さな乳幼児に対しては、経験豊かなインターベンション操作者が実施すべきである。チーム・メンバーは放射線防護のトレーニングを受けるべきであり、インターベンション手技が相対的に高線量の手技であり、高いピーク皮膚線量と被ばくした臓器と組織に高い吸収線量を照射する可能性があるため、一部の国では別の固有の放射線防護のトレーニングレベルを設けることが要求されている。新生児、乳幼児または小児のサイズに比べイメージ増倍管の寸法が大きいこと、そして成人に比べ小児科患者では拡大を用いるニーズが大きいことが患者の線量を高める要因となっている。画像取得は必要な場合に限定すべきであり、臨床目的を達成するために要求される最も少ない一秒あたりのフレーム数を使用すべきである。画像は、視準を狭めて最低限の拡大率で取得すべきである。患者だけでなく、散乱放射線を介したスタッフへの不必要な被ばく線量の低減が重要である。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

(j) CT の場合、線量低減は、患者の体重または年齢、スキャンする部位、検査の適応 (例えば、ノイズが多い画像でも十分な診断品質があれば受容すべきである) にしたがって、スキャンパラメータ (mA, kVp, ピッチ等) の調整によって最適化すべきである。その他の線量低減戦略としては、多相検査プロトコルに対する制限、スキャン部位の重複の回避、該当領域だけをスキャンする、などがある。モーション・アーチファクト、静脈造影剤の細心の注意を払った使用、多面再構成や三次元再構成などの後処理技術の適用にも注意を払うべきである。後処理手法の適用は、検査の質の向上に有用と思われる。画像表示のためディスプレイモニターと周囲の環境を最適化すべきである。局所防護遮蔽の使用に関しては、そのやり方は医療機関ごとにそれぞれ異なる。1 つのアプローチがすべてのスキャナにあってはまるわけではなく、適切に使用しなければ遮蔽が放射線量を増やす場合さえあることから、プロトコルはスキャナごとに個別にテストすべきである。ビスマス防護具を使用する場合は、ビスマス防護具が遮蔽部分での管電流を不当に高めないようスカウト・ビュー (または自動被ばく制御プレスキャンニング) を実行した後でのみ、ビスマス防護具を取り付けるべきである点に注意することが重要である。遮蔽体は、アーチファクトを避けるため、皮膚表面に近づけすぎずはならず、表面に平らに置くべきである。最後に、管電流変調法、臓器ベースの線量変調法、自動 kV 技術、反復的再構成などの最新の線量低減技術を適宜利用すべきである。

1. 結論
(1) 乳幼児および小児の放射線診断検査は、成人に比べて単位放射線量あたりのがん発症リスクが平均して高い。
(2) 小児のリスクがより高いことは、小児の寿命がより長く放射線の有害な影響が現われる時間がそれだけ長くなることと、発達過程にある臓器と組織が放射線の影響に対してより敏感であるという事実によって説明される。さらに、乳幼児や年少の小児の平均リスクは 年長の小児に比べ高い (Preston ら, 2007)。
(3) X 線技術の使用の拡大によって、放射線診断による電離放射線の年間集団線量及び一人当たりの線量がいくつかの先進諸国でかつての最大の放射線源 (自然バックグラウンド放射線) からの線量を上回る状況となった (UNSCEAR, 2008)。そのため、すべての放射線検査が放射線防護の観点からすべての患者に対して正当化され 最適化されることが不可欠であり、特に小児科の患者にとってこれは重要である。
(4) コンピュータ断層撮影 (CT) 検査は 比較的高い放射線量をとまうと考えられ、CT 検査のうち約 7-10%は小児を対象として実施される (Brenner と Hall, 2007; Berrington de Gonzalez ら, 2009)。小児科 CT による臓器と組織の吸収線量は比較的高く、被ばくする臓器の吸収線量は通常およそ 2 から 30mGy である。
(5) 本刊行物の目的は、小児の画像撮影に特有の問題と思われる具体的な課題に焦点を当てつつ、紹介医と画像診断とインターベンション手技を行う臨床スタッフに対し 小児科患者を放射線から防護するための指導原則を提示することにある。

2. 放射線防護の基本概念
2.1 数量と単位
(6) がんや 遺伝性影響といった確率的影響 (細胞損傷) に対する放射線防護において使用される基本的物理量は、1 つの臓器または組織全体で平均した吸収線量である (すなわち、平均吸収線量、臓器または組織に沈着したエネルギーを臓器の質量で除した値)。確定的影響 (細胞致死から生じる組織反応) では、吸収線量は 直接の放射線場で照射された皮膚の量など、組織の中で特に被ばく線量の大きい部分の平均値である。確率的影響と確定的影響の定義に関する詳細についてはセクション 2.2 を参照のこと。吸収線量の国際単位はキログラム/ジュール (J kg^{-1}) であり、その特殊名称はグレイ (Gy) である。
(7) X 線を用いた医学画像手技の実施中は通常、診断手技またはインターベンション手技を受けている患者の臓器または組織の平均吸収線量を直接に測定することができない。しかし近年、いくつかの実践的な手段から臓器と組織の平均吸収線量を導き出す方法の開発に大きな進歩がみられ、かなりの量のデータが発表されている (例えば ICRU, 2005; IAEA, 2007)。実際には、患者の線量を管理するのに外部の放射線場を特徴づける測定可能な数量が使われている。これらの数量は 入射表面線量や入射表面空気カーマのような単純な数量と、X 線装置の特徴に応じて複雑に変動するその他の数量から構成される [例えば CT の場合は、Publication 87 および 102 (ICRP, 2000b, 2007a) 参照]。これらの測定から得られた線量読み値は 長年にわたり、入射表面線量と線量面積の積のような空気中の吸収線量として表されてきた。しかし実際には、最新の線量評価装置で測定されている量は空気中の吸収線量ではなく空気カーマである。そのため、ICRU (2005) と IAEA (2007) は、診断参考レベルに対しては入射空気カーマ、入射表面空気カーマ、空気カーマ - 面積の積などの空気カーマで表した放射線場関連数量を使用することを推奨している (DRL; セクション 3.2.3 参照)。したがって、医学界もこれらの数量をよく熟知しておくべきである。しかしながら本刊行物においては文献中の表記にしたがって、データ表には空気中の線量として表わしている。
(8) 放射線の種類によって確率的影響をもたらす細胞損傷を誘発するうえでの有効性に差がある。これを考慮に入れるために、量「等価線量」(臓器または組織の平均吸収線量に 無次元の放射線加重係数をかけた値) が導入されている。この係数は放射線種類を考慮する。撮像で使用される放射線の主要なタイプ (光子) の場合には放射線加重係数は 1 であり、平均吸収線量と等価線量は数値的に等しい。等価線量の国際単位は 1 キログラムあたりのジュール (J kg^{-1}) で、特殊名はシーベルト (Sv) である。放射線加重係数に関する詳細な議論は、Publication 92 および 103 (ICRP, 2003, 2007b) に示されている。
(9) 等価線量値が同じでも体の臓器と組織が異なれば 生じる傷害の確率も重篤度も異なる。委員会は、傷害の確率と重篤度の組合せを「損害 (デトリメント)」と呼んでいる。これは 健康損害を意味している。体のすべての臓器と組織における等価線量の確率的影響によって生じる総損害を反映するには、臓器や組織ごとの等価線量に組織加重係数を乗じ、それぞれの結果を体全体について合計して実効線量を求める。実効線量の国際単位も 1 キログラムあたりジュール (J kg^{-1}) であり、特殊名はシーベルト (Sv) である。組織加重係数は Publication 105 (ICRP, 2007b) において推奨されており、表 2.1 にも示している。平均吸収線量、等価線量、実効線量の関係を図 2.1 に示す。

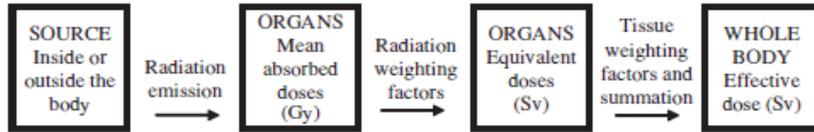


Fig. 2.1. The relationship between absorbed dose, equivalent dose, and effective dose.

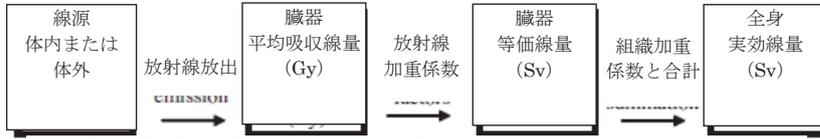


図 2.1 吸収線量、等価線量および実効線量の関係

(10) 委員会は、放射線防護ガイダンスの確立のための主たる防護数量として実効線量が使用されることを意図していた。実効線量は特定の個人の被ばく状況に遡ってその確率的影響のリスクがどの程度であったかを評価するために使うべきでない。また、実効線量を人間の被ばくの疫学的評価にも使用すべきでない。これは 組織加重係数を設定するための損害を求める際、委員会が放射線リスクのさまざまな要素の相対的重篤度について判断を加えているからである。このような確率的影響のリスクは年齢と性別に依存し、医療被ばくのリスクは健康の状態などの他の要因に依存する。作業員や一般集団（導き出した実効線量のもととなる集団）における年齢と性別の分布（および健康状態）が電離放射線を使った医療手技を受けた集団の年齢分布や性別分布（および健康状態）全体とまったく異なる可能性があり、評価しようとしている病状においてどのような個人が優勢であるかに応じて、医療手技によっても異なってくる。これらの理由から、医療における電離放射線使用のリスク評価は、リスクにさらされている個々の組織のリスク推定値、そして 医学手技を経験しようとしている個人群の年齢分布および性別分布（そして、既知の場合は健康状態）のリスク推定値を使って、平均吸収線量または等価線量に応じて行うのが最も適切である (ICRP, 2007b)。

(11) 実効線量は 以下の場合に対して確率的影響に関連した相対的線量を比較するときに実際的に有用となりうる。

- ・ 診断検査手技やインターベンション手技が異なる場合
- ・ 類似した技術や手技を使用しているが実施される病院や国が異なる場合
- ・ 同じ医学的検査に対して使用する技術が異なる場合

ただしこれは実効線量を比較する代表的患者または患者集団が年齢と性別（そして健康状態）の点でほぼ同じであることを前提としている。しかし、比較しようとしている代表的患者または患者集団（例えば小児、全員が女性、高齢の患者、重篤な症状の患者）における年齢分布および性別分布（および健康状態）と委員会の男女両方とすべての年齢からなる参照分布とのあいだに大きな相違がある場合は委員会の 2007 年の勧告 (ICRP, 2007b) のセクション 4.3.5 で示した実効線量の比較は不適切である。これは確率的影響のリスクの大きさが年齢と性別（および健康状態）に依存しているという事実の結果である。

Table 2.1. Tissue weighting factors recommended in *Publication 103* (ICRP, 2007b).

	Tissue weighting factor (w_T)	Σw_T
Bone marrow (red), colon, lung, stomach, breast, remainder tissues*	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04
Total		1.00

* Remainder tissues: adrenals, extrathoracic region, gallbladder, heart, kidneys, lymphatic nodes, muscles, oral mucosa, pancreas, prostate, small intestine, spleen, thymus, and uterus/cervix.

表 2.1 *Publication103* (ICRP, 2007b) において推奨されている組織加重係数

	組織加重係数 (w_T)	Σw_T
骨髄 (赤色), 大腸, 肺, 胃, 胸, その他の残りの組織*	0.12	0.72
性腺	0.08	0.08
膀胱, 食道, 肝臓, 甲状腺	0.04	0.16
骨表面, 脳, 唾液腺, 皮膚	0.01	0.04
合計		1.00

*残りの組織: 副腎, 上気道領域, 胆嚢, 心臓, 腎臓, リンパ結節, 筋肉, 口腔粘膜, すい臓, 前立腺, 小腸, 脾臓, 胸腺および子宮/頸部

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

2.2 放射線防護の生物学的根拠の概要

(12) 放射線の生物学的影響は、確定的影響（組織反応）と確率的影响（がんや遺伝性影響）という 2 つのタイプに分類することができる。これらの影響について ここで短く説明する。放射線防護の生物学的根拠は 2007 年の勧告 (ICRP, 2007b) において詳しく説明されている。

2.2.1 確定的影響

(13) 臓器または組織の多くの細胞が死に到った場合にしか影響が生じないとすれば、放射線量が閾値を越えないかぎり、臨床的には影響は観察できないことになる。この閾値の大きさは放射線の線量率（すなわち単位時間あたりの線量）と線形エネルギー付与、照射された臓器または組織、臓器または組織の照射された部分の体積、関心対象となる臨床上的影響に応じて変わってくる。線量が閾値を超えて増加すると、影響の発生確率は 100% にまで急速に上昇し（すなわち、被ばくした人すべてに影響がみられるようになり）、線量の増加とともに影響の重篤度が増加する。委員会はこれらの影響を「確定的」（組織反応）と呼んでいる。確定的影響（組織反応）に関する詳細な議論と情報は ICRP (2007b) で述べられている。そのような影響は放射線療法とインターベンション手技に電離放射線を適用した場合、特に透視誘導インターベンション手技が複雑で、長い透視時間や数多くの画像撮影が必要な場合に発生しうる。

2.2.2 確率的影响

(14) 1 個の細胞の DNA に対する放射線損傷が、なお再生能力を有する形質転換細胞を生じさせることを示す細胞および分子生物学からの有力な証拠が存在する。体の防御機能は通常非常に効果的であるにもかかわらず、この種の損傷が必ずしも放射線とは関連しない他の因子の影響によって促進され悪性疾患（体細胞影響）にいたる確率がわずかながら存在する。低線量ではその確率は低いので放射線関連がんの発生確率は低く、被ばくした人々のたかだかごく一部にしか発現しない。初期損傷が性腺の生殖細胞にあれば遺伝性影響が起こる可能性がある。これらの体細胞への影響と遺伝性影響はいずれも「確率的」影響と呼ばれる。

(15) 放射線による確率的影响の発生確率は線量の増加とともに増加し、低線量でもおそらく線量と比例する。高い線量や高線量率では、確率は線量の増加ともなって単純な比例よりも著しく高まることが多い。さらに高線量になり確定的影響（組織反応）の閾値近くに達すると、細胞致死による影響が競合するために確率の上昇はゆるやかになり、低下に転じる場合も考えられる。電離放射線を治療手技やインターベンション手技で使用した場合にはそうした影響が見られる確率が高まる。

(16) 単一の放射線検査では患者のがん誘発の確率はわずかに高まるだけであるが、先進国では集団の構成員全員が平均して毎年そのような検査を受けている。したがって、累積的リスクは高まっている。放射線の作用が一次関数的（線形）しきい値なしモデルに従うとの前提で行った計算では、一般集団のうち放射線手技での被ばくに関連していると思われるがん死亡の仮想上の割合は当該がん死亡率の 1% から数% の範囲であると推定される (NAS/NRC, 2006)。それに加え、リスクは集団の中で不均一に分布している。患者の一部の集団はその健康状態ゆえにずっと頻繁に検査されている。また、患者のなかにはがん誘発に対する感受性が平均以上に高い集団が存在する（例えば胎児、乳幼児、年少の小児、遺

伝子感受性を有している患者)。さらに、若い頃に発症するがんは人生後半に顕在化するがんにはるかに大きな生存期間の喪失につながる。幼い小児の被ばくの場合、平均リスク、特に甲状腺がんの平均リスクが高くなる (Preston ら, 2007)。これらすべての状況は、放射線使用の適切な根拠と医療における放射線防護の最適化が放射線防護の欠くことのできない原則であることを示している。

(17) 確率の影響に関する詳細な議論と情報は ICRP (2007b) に示されており、低線量のがんリスクに関する委員会の見解は [Publication 99](#) (ICRP,2005) に提示されている。疫学的根拠のみで 100mGy またはそれ以下のオーダーの吸収線量をうけた後のがんリスクが増加するかしないかを確定することは不可能である。線形しきい値なしモデルは依然、低線量、低線量率での放射線防護という実目的を果たすための賢明な根拠となっている。

3. 小児科画像診断における放射線防護の一般的側面

3.1 放射線診断手技の正当化

(18) [Publication 103](#) (ICRP, 2007b) は、電離放射線の使用を必要とする検査を行う場合には紹介する医療従事者に対し、放射線科医または資格を持つ撮像医療従事者と協議して以下の根拠を示すことを義務づける一般的放射線防護原則を定めている。

- ・ 実施しようとしている放射線検査の使用が患者にとって害を上回る利益をもたらすこと
- ・ 特定の疾患や年齢の集団に対して特定の放射線検査が必要となったときには、その検査の目的が明示されており、それによって診断または治療の改善が通常見込まれるか、あるいは照射される個人について必要な情報が得られること
- ・ 検査がその患者本人のために必要とされていること

(19) 放射線検査を受けている小児科患者にとっては検査が必要であることは非常に重要である。臨床情報を含め紹介医が署名または保証した検査依頼文書が検査が行われる前に提供されているべきである。疑念が生じた場合、最終決定は放射線科医または資格を有する撮像医療従事者が必要に応じ紹介医と協議して行うべきである。

(20) 行なう検査の種類決定には正当化がなされなければならないし、あらゆる検査は個人または公衆の健康にとって害よりも便益が上回らなければならない。小児の診断、患者管理、治療、処置および最終的な転帰について、紹介医が行う決定の有効性にその検査が影響を及ぼすことを想定するべきである (Dauer ら, 2008)。

(21) 正当化は必要としている結果が、他の方法なら患者にとってはリスクは低いその方法では得られないことも含意している。(European Commission, 1996)。

(22) 正当化は選択されたイメージング手技が信頼できる (すなわち、それは再現性があり、問題とする臨床上の問題に関して十分な感度、具体性、正確性と予測値をもたらす) ことを要求する。したがって、検査を担当する放射線科医または資格を持つ撮像従事者は検査の正確な解釈を行える十分な知識と経験を持っているべきである。これを可能にするため、検査は医学物理学者 (士) による適切な品質モニタリングと安全対策と連携して、資格のある放射線科医またはレントゲン技師/テクノロジストが実施すべきである。正当化は一人の人が検査の全責任を負うこと

<p>も必要とする。この人物、通常は放射線科医、は規制当局が認定した放射線手技と放射線防護の訓練を受け経験を積んでいるべきである。この人物は、患者の管理と治療にとって最も適切な手技を確立するために紹介医と緊密に協力すべきである。責任者は資格を持つテクノロジストに検査業務を委任することができる。またテクノロジストも適切な訓練をうけ経験を有しているべきである。</p> <p>(23) 超音波検査法と磁気共鳴映像法 (MRI) などの電離放射線を使用しない手技への代替の可能性は常に考慮すべきである。これは、特に小児科の慢性疾患患者に当てはまる。イメージングへの紹介を行なう際の臨床医のためのガイドラインは、たとえばアメリカ放射線科専門医会 (American College of Radiology) (1996) と英 国王立放射線科専門医会 (Royal College of Radiologists) (2007) が公表している。これらのガイドラインは多くの一般的な臨床上の問題を調べるために開発された画像診断法の適切さを議論している。英 国王立放射線科専門医会が作成した小児科患者のためのそのようなガイドラインの実例を付属書 A に紹介している。</p> <p>(24) 出産年齢に達していて出産能力のある女性患者が妊娠している、あるいは妊娠している可能性があるかどうかを X 線検査前に確認することは重要である。前回あった月経の期間を記載しておくべきである。患者が妊娠していると判断した場合は、胎児が直接ビーム上にくる場合および/または手技が比較的高い線量をとまうならば、患者の信頼性と経歴によっては医師は妊娠検査を命じようとするかもしれない (ICRP, 2000a)。</p> <p>(25) 電離放射線の使用を含む生医学研究プロジェクトの要請はすべて個別に検証すべきである。研究機関は生医学的研究被ばくが個別に正当化できるようにするため研究や開発の道筋を通して適切なメカニズムを整備する必要がある (例えば研究機関の倫理審査委員会と放射線防護委員会との協調)。最終的な転帰において小児科患者に明確な利益をもたらすことができる高い確率が存在すべきである。</p>

3.1.1 正当化されない小児科放射線診断の例

(26) 以下は、通常正当化されない放射線診断の例である。

- ・ てんかんの乳幼児または小児の頭部 X 線写真
- ・ 頭痛の乳幼児または小児の頭部 X 線写真
- ・ 副鼻腔炎が疑われる 6 才未満の乳幼児または小児の副鼻腔 X 線写真
- ・ 外傷のない斜頸の乳幼児または小児の頸椎 X 線写真
- ・ 手足の負傷を比較するための反対側の X 線撮影
- ・ 6 才未満の小児の舟状骨 X 線写真
- ・ 3 才未満の小児の鼻骨 X 線写真

15

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

<p>(27) 集中治療室の定期的な毎日の胸部検査の使用は控え、具体的な兆候が存在する場合に限定すべきである (Valk ら, 2001)。これらのガイドラインはアメリカ放射線科専門医会が公表している (1996)。</p> <p>(28) 移民の若者の青年年齢要請などの純粋に法医学的目的のために要請される放射線検査は医学的には正当化されない (ICRP, 2007b)。</p>

3.2 放射線防護の最適化

<p>(29) 検査時における放射線防護最適化の基本的目的は、必要な画像ができるかぎり最も低い放射線量で得られ、正味の便益が極大化されるようなやり方でイメージングのパラメータを調節し、防護措置を設けることにある [すなわち、ALARA (合理的に達成可能なかぎり低く) 原則¹がすべての検査で厳守されるべきである]。</p> <p>¹略形「ALARA」が「保護の最適化」という用語と同じ意味の言葉として、あるいは、それを言い換える言葉として時には使用される。しかし、「合理的に達成可能なかぎり低く」という表現が最適化概念の一部にすぎないことに留意すべきである。この概念全体は、より正確には、要求された医療目的 (診断的または治療的) を達成するために必要な最低限のレベルに患者の被ばくを保つことを意味している。画像診断と X-線誘導インターベンションにおいては、これは画像枚数と品質が診断またはインターベンションに必要とされる情報を得るのに十分であることを意味する。放射線療法では、ALARA は正常組織のみに適用され、標的の線量は合理的に達成可能なかぎり低くとは期待されておらず、むしろその逆である。「ALARA」という略語だけをこの文脈から切り離して使用すると誤解をまねき不必要な論議の原因となりうる。</p> <p>(30) 放射線防護の最適化は、おもに 3 つの側面から構成される。すなわち、放射線設備そのもの、小児科患者に十分に適合できるように放射線設備と技術パラメータの適切性を確保すること、そして小児科患者に適用できる DRL である。</p>

3.2.1 放射線設備

<p>(31) 最適化プロセスの一部として、設備が適切に動作しており、適切な照射がおこなわれ、確立された設置基準および性能基準に適合していることを確認することが重要である。これは購買プロセスから始まる。この段階では、関連する国際基準、国内基準または地域内基準に適合することを義務づける仕様書に定められたレベルに性能が達する設備を購入すべきである。</p> <p>(32) 設置するときには、これらの規格ごとの性能が確保されるよう設備の受入試験と試運転の両方を実施すべきである。国によってはエンドユーザー/病院または規制当局に代わって供給元以外の代理人 (物理学者/士またはエンジニア) がこれを実施すべきである。法律によって義務づけられているかどうかにかかわらず可能なかぎり医学物理学者 (士) の助言を求めべきであり、そしてその助言に従うこと、および口腔内歯科装置などの比較的単純な設備の場合でも適切に文書化しておくことが重要である。適切な文書化によってパルス透視にフィルタやユニットのような機器が欠落しているのを把握することが容易になる。</p> <p>(33) 日常診療での使用に導入した後は設備が適切に動作し続けていることを確実にしておくことが重要である。これは医療機関が定型的業務として一貫性検査を定期的実施し文書化することによって保証することができる。適切な検査とそれをどの程度の頻度で行なうかの提言が公表されている (IPEM, 2005)。一般的な X 線撮影装置に対する検査例は X 線ビームが光ビームの位置推定システム (Horwitz ら, 1993) と一致する</p>

16

かどうかの検査などがある。次に重要なのは X 線ビーム出力を測定し、フィルタが存在しているかどうかチェックすることである。その他の比較的簡単な品質管理テストは CT スキャナのような設備のメーカーが実施していることが多い。さらに要求度の高い検査レベルでは、適切な間隔であるいは機械の大掛かりな修理または補修 (例えばチューブ交換) をした後は機械ごとに包括的に性能を確認することが重要である (IPEM, 2005)。これらの品質管理の手順はすべて適切に文書化しておくべきである。最後に、設備性能を評価するこのプロセスを当該診療科の管理に統合し、検査の所見を記録しそれに基づいて対策を講じることが不可欠である。

3.2.2 設備と技術的パラメータの妥当性

(34) ほとんどのイメージング装置は成人の患者を扱う構造になっており、設置時とその後の設備使用の両方の段階で上述したパラメータと機器の修正が必要になると思われる。理想的には特に小児科患者用に設計された装置を設置すべきである。特に小児科患者の作業量が大きい施設ではそれが望ましい。小児科手技に使用する X 線装置は小児のサイズに防護を最適化できるように設定範囲が最も幅広いものを使用すべきである。よく使う X 線検査に適合させた技術的パラメータ集を取りまとめたプロトコルを事前にインストールしておくべきである。

(35) 小児向けの新しい X 線撮影装置または透視装置を購入する場合は線量低減措置に特別な考慮を払うべきである (仮視準, 低減衰テーブルトップ, 取り外し可能なグリッド, パルス透視の利用の可否, 最終画像保持保存, ブルーミングを最小にするスペクトルフィルタや調整技術など)。銅製フィルタが付加されていない場合は、アルミニウムろ過に銅製フィルタを追加することを検討すべきである。標準的な管電圧の場合、0.1mm の銅フィルタはおおよそ 3mm のアルミニウムに等しい。

3.2.3 小児科放射線医療における診断参照レベル

(36) 患者の医療被ばくの最適化へのプロセスの助けとして DRL の概念が提案されている。DRL 値は助言的なものであり、もしその値を上回る値が定期的に出るならば行われている慣行を調査すべきである。このことは必ずしも容認できない慣行が存在することを意味するものではなく、説明や見直し、おそらくは新しいアプローチが必要であることを意味している。作業者と公衆の被ばくに使用される線量限度の放射線防護原理は患者の医療被ばくには当てはまらない。

(37) 実際には、測定するのが簡単な照射野に関連した数量 (例えば入射表面線量と入射表面空気カーマなど) が DRL 概念を実施するために使用されている。

(38) ICRP は DRL の量や数値、実施の詳細を指定していない。それは地域や国、または現地の権限を有する機関の任務である。それぞれが所管する地域のニーズを満たすべきである。例えば欧州連合では、小児科放射線医療における 5 才児に対する DRL を定めている (European Commission, 1996, 1999)。これらの値は、100 以上の小児科病院でいくつかの一般的な投影における適切な照射野に関連する数量を調査することによって設定された (Schneider ら, 1992, 1998; Perlmuter ら, 1998)。一般的な X 線撮影について胸部、頭部、腹部、脊柱、骨盤のさまざまな投影が調査されている。DRL 上限は多くの場合 4 分の 3 値 (すなわち、それらの医療機関のうち 4 分の 3 の機関での測定値を超える値) に設定されている。DRL 下限も選択することができる。これにより、どの施設で測定を行っても測定値は DRL 上限を下回るはずであり、たとえ上回

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

ても臨床情報を失わずにその DRL よりも被ばくを低減することが可能であるはずであるという合理的期待が得られることになる。たとえば散乱防止 X 線グリッドを過度に使用すると、入射表面線量値が DRL 上限値を上回るおそれがある。手技、画質、再教育、訓練の見直しによって、結果として入射表面線量値が DRL 上限を超えないようにする。入射表面線量値が低くなりすぎる場合があり、この点についてはその値が設定した下限 DRL を一貫して下回る場合には是正措置も必要になる場合があることを理解しておくことが重要である。

(39) 従来からの主な放射線診断の DRL を表 3.1 にまとめている。なおこれらは 5 才児に対する値であり、乳幼児や 10 才児といった他の年齢群については異なる値が得られることを認識しておくことは重要である。これらの年長および年少の年齢群についてのデータも表 3.2 で提示しているが、これらはこれまでのところ DRL には採用されていない (European Commission, 1996)。正式に採用された欧州連合 DRL は、1 つの年齢群であっても結果を評価することが診療科での運用の指標になるという理由から 5 歳児群に限られている。これらの DRL は世界の多くの地域でのコンピュータ X 線撮影 (CR) とデジタル X 線撮影 (DR) が広く導入される前に得られた値であり、最近の動向を考慮に入れるために拡大し、評価しなおす必要がある点に注意することが重要である (ICRP, 2004)。従来の放射線診断から CR への移行後における成人患者入射表面線量を評価した調査では、スクリーン-フィルム X 線撮影について確立されている欧州連合 DRL の線量低減幅は 15% から 38% のあいだ、米国医療物理学会が推奨している参照値の線量低減幅は 28% から 41% のあいだであると報告している (Vaňo ら, 2007)。蛍光透視検査に対して英国での値のデータが決定されており (Hart ら, 2007)、それらのデータはロンドンの Great Ormond Street Hospital で記録されている DRL 同等値と比較されている (Hiorns ら, 2006)。表 3.3 は排尿時膀胱尿道造影、バリウム胃十二指腸造影検査、バリウム食道造影について全国患者線量データベースにもとづく英国での推奨参照線量を示している (Hart ら, 2007)。欧州委員会 (1996) と英国放射線防護庁は、新生児の胸部 X 線 (前後方向) における入射表面線量の DRL として、それぞれ 80 μ Gy と 50 μ Gy を提案している (Hart ら, 2000)。

Table 3.1. Examples of diagnostic reference levels in paediatrics for standard 5-year-old patients, expressed in entrance surface dose per image for single views (European Commission, 1996).

Radiograph	5-year-old patients Entrance surface dose per single view (mGy)*
Chest: postero-anterior	0.1
Chest: anteroposterior (for uncooperative patients)	0.1
Chest: lateral	0.2
Skull: postero-anterior/anteroposterior	1.5
Skull: lateral	1.0
Pelvis: antero-posterior	0.9
Abdomen: anteroposterior/postero-anterior with vertical/horizontal beam	1.0

* Upper diagnostic reference level expressed as entrance surface dose to the patient. The entrance surface dose for standard-sized patients is the absorbed dose in air (see explanation in Para. 7 on the use of air kerma vs absorbed dose to air) (mGy) at the point of intersection of the beam axis with the surface of a paediatric patient, backscatter radiation included.

表 3.1 5才の標準的患者における小児科診断用参照レベルの例(シングルビュー用画像1枚あたりの入射表面線量として表す)(European Commission, 1996)。

X線写真	5才の患者 画像1コマあたりの入射表面 線量(mGy)*
胸部:後前方向	0.1
胸部:前後方向	0.1

小児科医療における放射線防護の改善(下訳版:平成30年3月)

(非協力的な患者の場合)

胸部:横方向	0.2
頭部:後前/前後方向	1.5
頭部:横方向	1.0
骨盤:前後方向	0.9
腹部:前後/後前方向	1.0
垂直/水平ビームによる	

*診断用参照レベル上限は患者への入射表面線量として表している。
標準サイズの患者の入射表面線量は、後方散乱放射線を含めた、小児科患者表面のビーム軸との交差点における空気中の吸収線量(mGy)で表している(空気カーマの使用と空気吸収線量の使用の対比についてはパラグラフ7参照)。

Table 3.2. Variations of entrance surface dose* (converted to mGy, to the nearest two decimal places) observed in the three European Union paediatric trials (1989/91, 1992, 1994/95): median, minimum-maximum values and corresponding ratio (minimum:maximum) of frequent x-ray examinations in paediatric patients.

Examination type	Infant			5 year old			10 year old		
	Median	Min-max	Min:max	Median	Min-max	Min:max	Median	Min-max	Min:max
Chest AP (1000 g newborn)	0.05	0.01-0.34	1:35						
Chest PA/AP	0.08	0.02-1.0	1:47	0.07	0.02-1.35	1:71	0.07	0.02-1.16	1:68
Chest AP (mobile)	0.09	0.03-0.72	1:21	0.07	0.03-0.33	1:11	0.09	0.03-0.76	1:26
Chest lateral				0.14	0.04-0.55	1:15	0.15	0.04-1.98	1:51
Skull PA/AP	0.93	0.15-4.51	1:30	1.00	0.24-4.63	1:19	1.04	0.13-5.21	1:40
Skull lateral				0.70	0.14-2.36	1:17	0.58	0.11-3.79	1:33
Pelvis AP	0.26	0.02-1.37	1:76	0.49	0.09-2.79	1:32	0.81	0.09-4.17	1:47
Full spine PA/AP	0.87	0.12-0.44	1:41						
Thoracic spine AP							0.89	0.20-4.31	1:21
Thoracic spine lateral							1.63	0.30-6.66	1:22
Lumbar spine AP							1.15	0.13-5.69	1:43
Lumbar spine lateral							2.43	0.25-23.5	1:94
Abdomen AP/PA	0.44	0.08-3.21	1:42	0.59	0.06-2.92	1:52	0.73	0.15-3.98	1:27

AP, anteroposterior; PA, postero-anterior.

* See definition for entrance surface dose in Table 3.1.

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

表 3.2

欧州連合での 3 件の小児科治験 (1989/91,1992,1994/95) で観察された入射表面線量の変動幅* (mGy に変換。小数第 3 位を四捨五入) : 小児科患者に対してよく行われる X 線検査での中央値,最小 - 最大値,対応する比 (最小値 : 最大値)

検査タイプ	乳幼児			5 才児			10 才児		
	中央値	最小 - 最大	最小 : 最大比	中央値	最小 - 最大	最小 : 最大比	中央値	最小 - 最大	最小 : 最大比
胸部 AP (1000g の新生児)	0.05	0.01-0.34	1:35						
胸部 PA/AP	0.08	0.02-1.0	1:47	0.07	0.02-1.35	1:71	0.07	0.02-1.16	1:68
胸部 AP (可動式)	0.09	0.03-0.72	1:21	0.07	0.03-0.33	1:11	0.09	0.03-0.76	1:26
胸部横方向				0.14	0.04-0.55	1:15	0.15	0.04-1.98	1:51
頭部 PA/AP	0.93	0.15-4.51	1:30	1.00	0.24-4.63	1:19	1.04	0.13-5.21	1:40
頭部横				0.70	0.14-2.36	1:17	0.58	0.11-3.79	1:33
骨盤 AP	0.26	0.02-1.37	1:76	0.49	0.09-2.79	1:32	0.81	0.09-4.17	1:47
脊柱全体 PA/AP	0.87	0.12-0.44	1:41						
胸椎 AP							0.89	0.20-4.31	1:21
胸椎横方向							1.63	0.30-6.66	1:22
腰椎 AP							1.15	0.13-5.69	1:43
腰椎横方向							2.43	0.25-23.5	1:94
腹部 AP/PA	0.44	0.08-3.21	1:42	0.59	0.06-2.92	1:52	0.73	0.15-3.98	1:27

AP 前後方向; PA 後前方向

* 表 3.1 の入射表面線量の定義参照

Table 3.3. Examples of UK national reference doses for fluoroscopy examinations on paediatric patients – 2005 review from the National Patient Dose Database, UK.

Examination type	Standard age (years)	Dose area product per examination (Gy cm ²)
Micturating cystourethrogram	0	0.3
	1	0.7 (0.8)
	5	0.8 (0.8)
	10	1.5
	15	2.5
Barium meal	0	0.4
	1	1.1 (1.2)
	5	1.3 (1.2)
	10	2.4
	15	6.4
Barium swallow	0	0.4
	1	1.2 (1.3)
	5	1.3 (1.3)
	10	2.9
	15	3.5

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

表 3.3
小児科患者における透視検査の英国全国参照線量の例—全国患者線量データベース (英国)
にもとづく 2005 年のレビュー

検査タイプ	標準年齢 (年)	検査 1 回あたりの線量 と面積の積 (Gy cm ²)
排尿時膀胱尿道造影	0	0.3
	1	0.7 (0.8)
	5	0.8 (0.8)
	10	1.5
	15	2.5
バリウム胃・十二指腸造影検査	0	0.4
	1	1.1 (1.2)
	5	1.3 (1.2)
	10	2.4
	15	6.4
バリウム食道造影検査	0	0.4
	1	1.2 (1.3)
	5	1.3 (1.3)
	10	2.9
	15	3.5

3.3 品質基準導入と監査
(40) 放射線防護文化の一環として、品質基準導入後にはフォローアップと定期的監査を行う必要がある (Schneider ら, 1993 ; Schneider, 1995)。
(41) 小児科放射線診療実務における紹介基準、画質およびイメージング技術のこれまでの監査から、小児科専門の病院の方が専門ではない病院に比べて良好な結果が得られることが知られている (Cook ら, 2001; Alt ら, 2006)。このことから、小児科専門病院による優良な慣行を共有することは、実務上でも患者転帰を改善する上でも重要である。
(42) 以下は小児科診療において放射線防護のために導入された監査手順と達成された好ましい転帰の例である：
・ 小児の頭部外傷においては、CT 検査に対する推奨されるガイドラインの監査は臨床紹介実務を改良することで CT の利用を 8 分の 1 に低減することができることを示している (Macgregor と McKie, 2005)。同様に、繰り返し監査することにより、頭部 X 線写真撮影を大幅に少なくし、小児科の頭部外傷ガイドラインの遵守においても大きな改善が実現されている (Johnson ら, 2004)。
・ 性腺遮蔽の使用については、線量低減措置を導入した後正しく位置されていることを監査することで遮蔽成績が改善された。少年と少女への正しい定置の比率はそれぞれ 32%と 22%から 78%と 94%に改善した (McCarty ら, 2001)。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

4. 従来の小児科 X 線撮影法と透視法における放射線防護
(43) 放射線診断ごとに、解剖学的撮影範囲の基準と患者の放射線量、および診断要件と線量基準を満たすすぐれた X 線撮影手技の例を具体的に述べる必要がある。
4.1. 患者の位置調整と固定
(44) たとえ患者が協力しない場合であっても、ビームが正しく中心を通るようにすること、適切な投影と視準が得られるようにすること、検査しない体の部分は遮蔽できるようにすることのために患者の位置調整は正確に行うべきである。
(45) 乳児と乳幼児に X 線撮影検査を実施する場合、多くの場合で固定が必要である。非常に小さな乳幼児にはフォームラバー製の器具などの器具の使用が考えられる。乳幼児の放射線検査を行うため、食事の後静かになったときや寝ついたときを利用するのが好都合かもしれない。固定装置は使いやすいものにし、患者に取り付けても患者 (または介護者) を傷つけないものを使用すべきである。固定装置の使用と利点を付添いの介護者にも説明すべきである。
(46) 放射線スタッフが小児科患者を保持するのは例外的な状況に限定すべきである。病院職員が小児の固定を手伝う場合は職業被ばくとみなされ、スタッフが放射線を繰り返し被ばくしないよう配慮を行うべきである。親またはその他の同伴者による患者の身体的拘束が避けられない場合、その人達に対して正確なやり方と何が求められているか、特に一次ビームからの距離の影響について説明すべきである。彼らは防護エプロンを着用して放射線の一次ビームの外側にとどまるべきである。小児を保持する介護者の手を放射線ビームを被ばくさせるべきでない。散乱放射線の被ばくから防護するためには保護手袋を着用することも考えられる。
² 「作業員」という語は委員会によって Publication 103 (ICRP, 2007b) において、「フルタイムであるかパートタイムであるか一時的であるかに関わらず、ある雇用主によって雇用され、職業的放射線防護に関する権利と義務を認識している者」と定義されている。病院ではこれらの人々はスタッフの一部である。「スタッフ」という語をこの報告書で使用しているのは想定されている読者がこの用語によくなじんでいるからである。
(47) 検査のための時間の割り当てには同伴する介護者だけでなく、時には小児にも手技を説明する時間も含めるべきである。必要な品質基準を満たす最適化された検査を実現するには時間がうまく使われることが必要となる (European Commission, 1996)。この手順は、実施される手技の詳細を説明した情報を検査に先立って提供することによって簡素化することができる。小児や親用に特に編集されたビデオ、文書、ウェブサイトを待合い所や検査室で提供することは役立つと思われる。
4.2 照射野サイズと X 線ビームの制限
(48) 照射野があまりに大きすぎると、関心対象領域以外に不必要な放射線量をもたらす、散乱放射線を増やすことにより画像のコントラストと解像度を損なう。この視準の欠如が落とし穴となりうる。特に画像取得後に画像を切り取るのに後処理技術を使用する場合のある CR/DR ではその傾向が強い。関心対象の照射野の全体が含まれるようにするにはある程度の柔軟性が必要かもしれないが、小児科患者に必要な以上に大きな照

視野サイズを繰り返し使用するのは不適切である。一方照射野が小さすぎると診断ミスリスクを高め撮影し直さなければならない場合もでてくる。

(49) 正しいビーム制限には外部の解剖学的に目印となるものについての知識が必要となる。これらの目印は発達時の体では割合がさまざまに変化するために、患者の年齢によって変動する。関心対象の照射野のサイズはその疾患にも依存する。したがってすべての年齢層で適切なビーム制限を確保するにはレントゲン技師/テクノロジストに小児の構造と年齢別の障害についての基本的知識が要求される。たとえば新生児では、「babygrams」(1枚の画像に全身、胸部、腹部、骨盤を撮影する)ではなく、視準を使って検査したい部分だけを照射することが重要である。

4.3 防護遮蔽

(50) 優れた X 線撮影手技では、小児の体の鉛製の遮蔽体またはそれと同等の遮蔽体を診断照射野のすぐそばまで近づけて使用するやり方を標準とする。外部散乱放射線や焦点外放射線から防護するため、検査によっては遮蔽体を追加することも考慮すべきである。

(51) 胸部、性腺、甲状腺が一次ビームから 5cm 以内にある場合、必要な診断情報を損なわないかぎりそれらの組織をできるだけ保護すべきである。60-80kV の被ばくの場合、照射野端すぐのところに 0.25mm の鉛当量材料で遮蔽することによって最大でおよそ 30-40%生殖腺の線量を低減できる。しかしこれがあてはまるのは遮蔽体が照射野端に正しく置かれる場合だけである。不適切に置かれればそのような遮蔽体は画質を悪化させるおそれがあり、場合によっては、遮蔽体が適切でない場合もある (Dauer ら, 2007) (CT スキャンにおける防護遮蔽についてはセクション 6.6 参照)。内部散乱放射線から発生する X 線ビームによって外部組織が被る線量は遮蔽することができない。

(52) 無鉛の防護器具が販売されており、より環境にやさしく耐久性も優れていると思われる。無鉛防護服の鉛当量は、放射線の質 (すなわち X 線管の電圧とろ過) に依存する。したがって防護有効性はただ 1 つの値だけでは反映できないかもしれない。むしろ散乱放射線を考慮した幅広いビームジオメトリで測定されるエネルギー依存性の減衰のほうがはるかに正確に放射線防護の特徴を反映する (Eder ら, 2005)。

(53) 通常、腹部 X 線撮影の主要な照射野内に男性の性腺を含めなければならない理由はない。同じことは骨盤と排尿時膀胱尿道造影検査にもふつうあてはまる。精巣は挙率放射に起因する上方への動きを避けるために陰嚢内に精巣を確保することによって防護すべきである。精巣は防護カプセルで防護すべきであるが、直接照射野に入らない様に位置調整するべきである。少女のための鉛または同等の遮蔽体と少年のための鉛または同等のカプセルが市販されており、また自作することもできる。これらの遮蔽体はさまざまなサイズのものを用意すべきである。適切な大きさに調節されたカプセルを使用すれば精巣の吸収線量は最大で 95%低減することができる。

(54) 少女では、視準器のダイアフラム内のシャドーマスクは直接遮蔽体と同じほど効率的である。シャドーマスクは直接遮蔽体よりも正確なポジショニングが可能であり、接触遮蔽体ほど簡単にはすべらない。女性の性腺に対する遮蔽が適切に行われている場合、卵巣に対する効果的遮蔽によっておよそ 50%の吸収線量の低減が可能である (Fawcett and Barter, 2009)。少女に対する腹部検査または骨盤検査では、性腺防護は不可能と思われる [例えば外傷、失禁と腹痛の兆候のある場合、遮蔽がずれると重要な病態を覆い隠すおそれがある (Bardo ら, 2009)]。

(55) 頭部 X 線撮影では前後方向での投影ではなく後前方向での投影によって眼の吸収線量を低減することができる。したがって、患者が協力できる程大きくてうつ伏せや立位での位置調整ができるようであれば後前方向での投影が望ましい。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

(56) 思春期の少女では発達過程の胸部組織が特に放射線に感受性が高いので、被ばくはできる限り制限すべきである (例えば、胸部 X 線と脊柱 X 線は、前後方向の投影ではなく後前方向の投影を使用する)。

(57) 一次照射野までの距離が 2cm 以上に保たれていれば、歯の X 線検査時に甲状腺組織を遮蔽しても線量低減にほとんど影響を及ぼさないことが明らかにされている。

4.4 X 線撮影被ばく条件

(58) X 線撮影被ばく要素 [焦点サイズ、ろ過、焦点画像面間距離、管電流と被ばく時間の積 (X 線管電圧, mAs の積)] は画質に大きな影響を及ぼすことから、被ばく要素についての知識と正しい使用が必要である。そしてこのことは患者の放射線照射にも影響してくる。装置固有の X 線管ろ過特性や散乱防止グリッド特性などの装置の永続的パラメータも考慮に入れるべきである。

4.4.1 名目焦点サイズ

(59) 小さな焦点サイズの使用と短い被ばく時間の間のバランスを維持することによって優れた画像細部を実現するよう努力すべきである。通常では小児科患者には、0.6 から 1.3 の間の名目焦点値が適している (例えば、IEC62220-1 は、焦点値を 1.2 とすることを求めている)。二重焦点 X 線管が装備されている場合は名目焦点値は選択した焦点画像面間距離での最も適切な被ばく時間と X 線管電圧の設定を可能にする値とすべきであり、小さいほうのオプションが必ずしも適切であるとは限らない。

4.4.2 追加ろ過

(60) X 線スペクトルにはさまざまなエネルギーの光子が含まれる。低エネルギー光子 (すなわちスペクトルの柔らかい部分) は患者の皮膚に完全に吸収され、画像生成に関与せず、患者の線量を必要以上に増やす。ほとんどの大部分の X 線管は 2.5mm のアルミニウムの最小限のろ過を採用しており、これは付属のろ過にプラスして固定フィルタを使用している。フィルタを追加すれば画像生成に関与しない放射線を低減し、それにより患者線量を低減することができる。ただし、新生児と非常に小さな乳幼児で使用してもそこで使われる X 線管電位は比較的低いため、線量低減は期待できない。

(61) 特定の波長で吸収端を有する希土酸化物フィルタ材料の場合、単純で安価なアルミニウム - 銅 (またはアルミニウム鉄) フィルタに勝る利点がほとんどない。またアルミニウム - 銅フィルタは、適切な高純度材料が入手できれば、簡単に自作することができる。固定式 X 線装置、移動式 X 線装置や透視装置で小児科患者に使用する X 線管はすべて、ろ過を追加し、適宜簡単に変更できるようにすべきである。通常は追加ろ過としては 1mm アルミニウム + 0.1 (または 0.2) mm の銅までで十分である。

4.4.3 散乱防止グリッド

(62) 散乱防止グリッドはコントラストを高めるが、患者の放射線量もまた増加させる。したがってグリッドを使用しないことで過度の患者の

線量を避けられるかもしれない。乳児と乳幼児においては照射される量(質量)で生じる散乱放射線が比較的低いため、散乱防止グリッドその他の散乱防止方法の使用は多くの場合不必要である。最適化によりグリッドが必要となるのは年長、通常は8才以上の子供だけである(Schneiderら, 2000)。

(63) 炭素繊維その他の非金属材料などの低減衰材料を組み込んでいるグリッドが望ましい。可動グリッドは被ばく時間が非常に短い(<10ms)場合には問題を生じるかもしれない。これらの場合にはストリップ密度が高い(密度>60cm⁻¹)静止グリッドを使用すべきである。グリッドと患者とX線ビームの正確な整列は、正確な焦点グリッド間距離に対する注意とともにきわめて重要である。小児科の患者に使用される可動グリッド装置の品質管理を行う場合、これらの要因をすべて考慮に入れるべきである。

(64) メーカーの推奨に従い、小児科患者には、グリッドの迅速かつ容易な取り外し機能がついた透視装置を使用すべきである。取り外し可能なグリッドは透視装置だけでなく、理想的には小児科患者に使用されるすべての装置に設置することが望ましい。

4.4.4 焦点画像面間距離

(65) 非グリッドカセット法を使用する場合は常に焦点画像面間距離が正しく調整されていることを見ておくべきである。グリッドテーブル付きのオーバーカウチX線管の場合、焦点画像面間距離は、通常およそ115cmであり、垂直姿勢の場合はおよそ150cmである。グリッドを使用せずカセットがテーブルに置かれている場合には焦点画像面間距離はおよそ100cmに設定し、グリッドの場合と同様に同じX線管テーブル間距離が得られるようにすべきである。特別な状況では焦点画像面間距離を長く取る必要がある。

(66) 患者線量を低減するためには、すべての透視検査において患者画像面間距離と患者増倍管間距離をできるだけ短くするべきである。

4.4.5 自動被ばく制御

(67) 小児科患者では1kgをかなり下回る早産児から体重が70kgを上回る若年者に至るまで、成人に比べ体のサイズの幅が大きい。レントゲン技師/テクノロジストは、サイズがこのように幅広いこと、したがってそれに応じて小児科の患者を扱う自動被ばく制御(AEC)装置を最適化する必要があることを認識しておくべきである。好ましくは、特に小児科X線撮影の訓練を受けたレントゲン技師/テクノロジストが装置を操作すべきである。

(68) さまざまな臨床ニーズに対しX線撮影技術の最適な適応を実現するには、受像器の速度やスイッチオフ線量がさまざまに異なるデジタル・プレートやスクリーン・フィルム・システムを使用する必要がある。スクリーンとAECチャンバーはエネルギー依存性であり、特に低い範囲のX線電圧ではその傾向が強い。しかしスクリーンとAECチャンバーに必要な電圧は同じでない場合があり、そのためAEC装置の最小被ばく時間が長くなる場合がある。AEC装置を小児科患者に使用する場合には、これらの要素をすべて考慮すべきである。

(69) 特別に設計された小児科AEC装置には、無鉛カセットの後ろで使用するための小型可動式検出器が付属している。その検出器の位置は最も重要な関心領域に即して選ぶことができる。患者の軽微な動きさえ画質と患者の線量に影響を及ぼす場合があるため、位置の選択は非常に慎重に行うべきである。デジタル・プレートの高速性にはカセット正面で微少な線量が必要となる。したがってカセット背後の検出器は1-10μGy

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

の範囲で動作しなければならず、この導入には困難さがともなう場合がある。

(70) 小さな小児の場合、体幹を調べるときの患者の体重や四肢を調べる時患者のサイズを考慮するX線撮影手法に対応する被ばくチャートはAEC装置よりもずっと安全で使いやすく安上がりである。これらのX線撮影手法はAEC装置がいつ使用できかつどのチャンバーを使用すべきかを表示することもできる。

4.4.6 透視における自動輝度調節

(71) 過度な線量率を避けるため、陽性造影剤を含んだ比較的大面積(例えば造影剤でいっぱいになった膀胱)を透視検査する時には自動輝度調節のスイッチをオフにすべきである。

4.4.7 照射時間

(72) 小児科イメージングでは総じて小児は協力的ではなく、じっとさせておくことが困難であるため照射時間は短くすべきである。装置は最も短い時間範囲で動作し、かつ再現性をもつべきである。これらの短時間での検査は強力なX線発生装置とX線管に加えて、最適な補正と精密な時限スイッチによってはじめて可能となる。古い発生装置の場合、4ms未満の照射時間に設定したいと思ってもそうしてはならない。これはピーク前時間(>2ms)が短い事前に設定した照射に干渉するからである。

(73) 小児科患者には高めのkVp手技を使用することが推奨されており、そのためには照射時間を短くすることが必要であるが、すべてのX線発生装置で照射時間を短くすることが可能なわけではない(特に移動式X線撮影装置の場合)。従って小児科患者には低い管電圧が使用されることが多い。その結果患者の線量が高くなる(Fendelら, 1989)。そのような装置では短時間の照射を行える能力は限られており、その制約を乗り越えるためには十分な過を追加して高い管電圧を使用できるようにすることで照射時間を最短にすることができる。これらの方法が小児科患者に対しCRとDR、蛍光増倍管写真撮影、高速スクリーン・フィルム・システムを使用することを可能にする。

(74) これらの短い照射時間には変圧器とX線管の間のケーブル長さが重要になる。ケーブルはコンデンサの役割を果たし、X線発生装置がスイッチオフになったあとその長さに応じて放射線の大きなサージを発生させる場合がある。このピーク後放射線は2ms以上続く場合がある(Fendelら, 1989)。

(75) 照射時間が1ms程度で正確な再現が可能で、放射線の線量率と波長が矩形構成を取りほとんどプレ照射もポスト照射もない撮像は、グリッド制御X線管を使用することによって達成できると思われる(PlewesとVogelstein, 1984)。

(76) 最適化された短時間照射ができないX線撮影装置は小児科患者に使用すべきでない。放射線安全担当職員または放射線防護アドバイザーはこの点をよく認識し、当該医療機関にその目的に装置が適切かどうか助言を行うべきである。

4.5 移動型X線撮影

(77) 画質の高い固定装置が利用できることや線量についての観点からX線検査は実行可能な限りすべて放射線科で行うべきである。した

<p>がって移動型 X 線装置の使用は放射線科に搬送できない患者に限定すべきである。</p> <p>(78) X 線撮影全般について上で述べた原則に加えて、放射線源との間に十分な距離が確保されていない近くに他の患者がいる場合、その患者を防護する携帯型の鉛遮蔽体を使用することを検討すべきである。推奨される最小距離は 1.5m である。</p> <p>(79) 放射線科に搬送できない低体重および超低体重未熟児に対してはほとんど散乱放射線がない非常に低い照射を使用する移動型 X 線装置がしばしば使用される。</p> <p>(80) 移動型装置による検査がしばしば行われる特定の治療室 (すなわち年長の小児用の集中治療室) では周囲の壁と床の遮蔽が十分であるかどうか評価すべきである。</p>

4.6 デジタル X 線撮影装置

<p>(81) デジタル X 線撮影は一般に画質と診断の正確さを向上させつつ放射線量の低減を可能にするが、それには適切な訓練と個々の放射線科で使用されるパラメータの慎重なモニタリングを行うことが前提となる。患者の線量パラメータはオペレーター・コンソールに表示されるべきである。</p> <p>(82) 新しいデジタル X 線撮影システムを導入する場合には放射線科が照射パラメータを最適化を行いその後、定期的に品質保証を維持することが重要である (ICRP,2004)。小児科の X 線撮影システムのパラメータの最適化について医学物理学の専門家に助言を求めるべきである。最も簡単な方法の 1 つはデジタル X 線撮影装置の露光指数 (exposure index) をモニターする方法である。露光指数はイメージング・プレートに入射する放射線照射の客観的指標である (Vaňo ら, 2008)。しかし入射表面空気カーマまたは空気カーマと面積の積のような照射野関連の数量の定期的監査も品質保証プログラムの一環として実施すべきである。</p> <p>(83) 最適な小児科 CR 画像または DR 画像を得るためには適切な画像処理がきわめて重要である。今ではほとんどの CR および DR メーカーは小児科患者は独特の存在であることを認識しており、画像処理を含め小児科検査のための特別な措置を開発しているかその途上にある (Sanchez Jacob ら, 2009)。</p> <p>(84) 線量低減と画像最適化の参考となる以下の勧告は、2004 年 2 月に米国テキサス州ヒューストンで開催された小児科放射線学会主催の第 2 回 ALARA 会議で発表されたものである (Willis と Slovis, 2004)。</p> <p>医療行為者へのガイドライン</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. CR と DR における線量管理にはチーム・アプローチを採用すべきである。チームには放射線科医、医学物理学者 (士)、レントゲン技師/テクノロジスト、製造元のサービスエンジニア、製造元のアプリケーション・エンジニア、製造元の画像研究者が活発に参加すべきである。 2. CR と DR の技術と実務についてのレントゲン技師/テクノロジストに対する訓練。 3. 実行可能な限り最良の患者の位置調整を行い、適切に視準を合わせる。 4. 検査の意味を考慮する。たとえば集中治療環境ではラインやカテーテルなどが本質的に高い造影作用を有している。したがって臨床の意味が単にそれらの位置を確認するだけであれば線量を大幅に低減できる余地がある。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

4.7 スクリーン・フィルム・システム

<p>(85) 技術的パラメータのなかで、速度の速い種類に属するスクリーン・フィルム・システムを選択することにより、線量低減に最も大きな影響を与えることができる。そのうえ照射時間を短縮でき、それにより小児科イメージングでブレが生じる最も一般的な原因である動きによるアーチファクト (人為的産物) を最小限に抑えることができる。速度の速いスクリーンになると解像度が低下するが、臨床的な意味においてはその多くは大して重要な問題でない。周辺部の骨格の骨詳細などの特別な目的では 200-400 のスピードのフィルムを使用することができる。それ以外のすべての目的については 400-800 のスピード・クラスが望ましい。もし異なるカセットのセットがある場合、すなわち低速・高解像度のスクリーンを使用する特別な適応に使用するカセットセットと一般的な用途のカセットがある場合、それぞれを区別しやすいうようにマークを付けるべきである。また類似したスクリーン・フィルム・システムであっても、製造元間で違いがある可能性があることに注意すべきである。また中間的なスピード・クラスのものを使用するのが一般的である。したがって、このテキストに示されたスピード・クラスはおよその目安を示すことしかできない。</p> <p>(86) 標準状態でのスクリーン・フィルム・システムの実際のスピードを測定するようユーザーに促すべきである。X 線ビーム・エネルギーの変化、特に 70kV 以下への低下にともなってスピードが変化することを各スクリーン・フィルム・システムで確認すべきである。スクリーン・フィルム・システムの解像度はスピード・クラスによって異なるので各スピードのフィルムについて解像度を測定するようユーザーに促すべきである。</p>
--

4.8 透視法

<p>(87) パルス式透視は当初患者が 1 秒あたりの照射回数減少を使って X 線ビームに被ばくする時間を制限することによって透視放射線量を低減するために開発された。今日では X 線発生装置パルス式透視システムとグリッド制御透視システムが登場している。最新のグリッド制御パルス式透視装置は X 線管の陰極と陽極の間に挿入した負に荷電したグリッドを使用する。グリッドはすばやくオン・オフを切り替えることができ、それによって発生した適切なエネルギー電子を断続的にグリッドに通過させ X 線を発生させることができる。透視パルス幅の最適化と装置の検査測定時における 1 パルスあたりの入射被ばくの慎重な選択によってさらに線量を低減することができる (Ward ら, 2006)。</p> <p>(88) パルス式透視における線量低減と画質の比較評価の結果から、小児科放射線医療においてコントラストまたは空間的解像度の大きな低減をとまうことなく最大で 10 分の 1 まで線量を低減できることが実証されている (Lederman ら, 2002)。乳幼児、歩き始めたばかりの幼児、小児のそれぞれのサイズを模擬した動物モデルにおいて、パルス式透視の使用は従来の装置に比べ放射線被ばくを 4.6 分の 1 から 7.5 分の 1 に低減し、しかも診断の質の大きな喪失はなかった (Ward ら, 2006)。</p> <p>(89) 放射線量は皮膚への入射線量を低減するためにできるだけ X 線源から透視テーブルを放しておくことによって最小限にとどめることができる。イメージ増倍管は X 線の数の捕獲を最大限に高めるためにできるだけ患者に近づけるべきである。</p> <p>(90) 操作者の脚を遮蔽するための懸架式の鉛のカーテンを患者テーブルに設置すれば、テーブルの下から出る散乱放射線は最小限に抑えるこ</p>

とができる。ビスマスまたは他の材料をしみ込ませた新世代の無菌カーテンがあればそれを利用する。これらのカーテンは操作者や他のスタッフ・メンバーの線量を著しく低減することができる。これらのカーテンは最大で 90%まで操作者の手/手首の線量を低減することが実証されており、放射線科医の腰から下を防護するために取付けることができる (King ら, 2002)。また操作者の水晶体の線量を低減することも示されている (Thornton ら, 2010)。患者の防護のために遮蔽体を使用する場合、もしアンダーカウチ X 線管が使用されているなら 戦略的には遮蔽体を患者の下に設置する必要がある、また遮蔽体は直射ビーム中に置くべきではない。これはそうすると AEC 機能を使用する装置の入射皮膚線量を増やす傾向があるためである。

(91) 手技中の放射線防護に対しては、透視の使用は移動する標的または構造物の評価に限定すべきであり透視時間には制限を設けるべきである。知見の確認には最終画像保持を使って得られる静止画像を使用すべきであり、ライブの透視は使用すべきでない。手技の誘導とモニタリングにはパルス式透視を使用すべきであり、多くの場合 1 秒当たりの 3 パルスから 8 パルスが適切である (Connolly ら, 2006)。透視中ではなく透視を開始する前に関心対象部分へのイメージ増倍管の位置取りを行うべきである。この目的に対してはある種の状況の下では仮想視準を使って透視を使わずに位置取りを行うことができる。関連する解剖学的部分へは厳密な視準を行なうことが重要である。放射線感受性領域 (胸, 目, 甲状腺と性腺) から離れるように角度をつけ、そしてできるかぎりこれらの部分が照射野から外れるように照準を当てることに注意を払うべきである。倍率の拡大は最低限にとどめるべきである。検査室内で一定時間を越えると透視に対する警報ベルや時間をライブで読み上げる機能は透視時間を制限するための有用な注意の喚起になる。その手技における空気カーマと面積の積は記録して米国医療物理学学会が公表しているベンチマークの数字と比較すべきである (American Association of Physicists in Medicine, 1998; Amis ら, 2007)。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

5. 小児科インターベンション・ラジオロジーにおける放射線防護

(92) 小児科患者に対するインターベンション・ラジオロジーの使用頻度は増えており、また複雑化して手技に要する時間も長くなっている。その結果患者の放射線量全体が大きくなっていると思われる。大がかりな小児科のインターベンション手技、特に小さな乳幼児では、臨床上の理由と放射線防護上の理由から経験豊かな小児科インターベンションの操作者が行うべきである。

(93) この手技は絶対に必要な場合に限るべきでありまた実施する場合には透視または CT ではなく超音波誘導を使うことで放射線は最小限にとどめるか、可能なかぎり回避すべきである。

(94) インターベンション・チームのメンバーは全員が放射線被ばくについて認識し、放射線物理学と放射線防護の訓練を受けるべきである。さらに一般的な放射線診断について実施される訓練レベルに加えて、もう 1 つの小児科のイメージング固有の放射線防護の訓練レベルを設けることが望ましい。これが必須となっている国もある (例えば欧州連合諸国)。また新しい X 線装置や手技が医療センターに導入されるときには、そのための追加訓練を計画しなければならない (ICRP, 2001a; Connolly ら, 2006; Rehani, 2007)。

(95) 実施する診療科では すべての設備について医学物理学者 (士) の管理の下で品質保証プログラムを導入すべきである (ICRP, 2001a)。

5.1 患者への不必要な線量の低減

(96) 小児科の透視とインターベンションの顕著な特徴は、新生児、乳幼児または小児のサイズに比べイメージ増倍管のサイズが大きい点にある。視準を使用しなければこれらの患者はイメージ増倍管が完全にカバーされ、そのため放射線被ばくを増やす可能性がある。また成人に比べ小児科患者では倍率拡大を使うニーズが大きく、それが線量をさらに増やす要因となる (Connolly ら, 2006)。透視を使う時の線量低減の方法はセクション 4.8 で述べている。

(97) 複雑なインターベンション手技は成人において高いピーク皮膚線量をもたらす、小児においては被ばくした臓器と組織に高い吸収線量を与えることが示されている。成人の皮膚への一回の照射でもたらされる放射線量の起こりうる臨床的影響はレビューされており、その事はインターベンション・チームのメンバーに知らせておくべきである (Balter ら, 2010)。これまでのところ小児のデータは公表されていない。

5.2 スタッフへの不必要な線量の低減

(98) 患者散乱放射線から生じるスタッフ被ばくには特に注意を払うべきである。成人に比べ、小児科の患者は体が小さく手技中にはより多くの動きをすすると思われる。また手技を遂行するために長い時間がかかるかもしれない。そのため透視時間が長くなるおそれがある。さらにインターベンション・チームのメンバーは多くの手技と長年の医療行為を通じて線量を蓄積していると思われる (Niklason ら, 1993 ; Tsapaki, 2001)。

(99) 小児科のインターベンション・ラジオロジーでは患者の体の大きさには幅があることに関係する独自の特徴がある。インターベンション放射線科医が小さな子に近くにはビームの近くやビームの中に入ることがしばしば必要となる。手を一次放射線ビームに露出することは避けるべきであるが、しかし予想外の緊急時や事態を複雑化させる事象が生じたときに手がビーム内について不注意で入るおそれがある。また中心カテーテル留置または膿瘍ドレナージなどの手技の際には操作者の手が直接ビーム内に入るか、またはそのすぐ近くまでいく場合がある。
(100) 以下の点に注意を払うべきである。
<ul style="list-style-type: none"> 室内にいるすべてのチーム・メンバーが防護用鉛エプロンを使用すべきであり、X線管と患者の近くで作業しているチーム・メンバーは眼の防護（天井から吊るされたスクリーンまたは有鉛ガラス）を使用すべきである。麻酔専門医に対する適切な防護も検討すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> 天井取付け式の有鉛ガラスまたはプラスチック遮蔽体または側面に遮蔽体が付いた有鉛ガラスメガネは、操作者の眼の放射線被ばくをおよそ 90%引き下げる（Thornton ら, 2010）。
<ul style="list-style-type: none"> 防護エプロンは体にぴったりと合ったものであるべきで、女性作業員には胸の腋窩突起を防護するためのアームウィングも併せて取付け、室内を動き回るスタッフには前と後ろをすっぽり覆うエプロンを着用させるべきである。
<ul style="list-style-type: none"> 放射線防護手袋は散乱放射線による手の線量をおよそ 40-50%低減することができる。しかしそのような手袋の使用が手先の器用な動きを制限し、手技を長びかせる要因となりうることに注意すべきである。また鉛手袋は一次ビーム内に入るとパラメータを引き上げ線量を増やす。わずかな角形成で手をビームから離すこと、厳格な視準、指の位置取りに対する慎重な注意が操作者の被ばくを低減する助けとなる。

小児科医療における放射線防護の改善（下訳版：平成 30 年 3 月）

<ul style="list-style-type: none"> 手技が複雑化し長い時間がかかるようになるにつれて、操作者の足と下肢の線量にはますます注意が向けられている。散乱放射線から足と足首まで線量を低減する鉛製のテーブル・フラップあるいはもっと新しい化合物によるカーテンを考慮してもよい。
<ul style="list-style-type: none"> エプロンを着用している場合、スタッフ線量は鉛製エプロンの下のバッジ線量計とエプロンの上の襟部分に付けたもう 1 つのバッジ線量計で決定すべきである（ICRP,2001a）。もし実行する手技によって一次ビーム内やその端に手が入る可能性がある時には放射線リング・バッジを使用することも重要である。
<ul style="list-style-type: none"> 操作者はイメージ増倍管の側に立つべきであり、チーム・メンバーは線源から距離を取ることで（すなわち逆二乗則）放射線量を低減するため可能なかぎり後ろに下がっているべきである。
<ul style="list-style-type: none"> 血管造影時には手動による造影剤の注入の代わりに自動注入器を使用することが、他のどの方法よりも操作者線量を低減する効果的な方法であることが示されている（Hayashi ら,1998）。可能なかぎり自動注入器を使用すべきである。また操作者は患者から距離を取り、造影剤注入時に移動式鉛スクリーンのうしろに留まるべきである。手動注入が必要な場合はカテーテルの長さの許すかぎり患者からの距離を最大にすることは放射線量を最小にするうえで重要である。

5.3 デジタル血管造影法またはデジタル・サブトラクション血管造影法を使った画像取得

(101) 画像取得は診断や手技後の転帰評価のために必要な場合にのみ行なうべきである。臨床目的を達成するために必要とされる最も少ないコマ数を使い、画像は最も低い倍率（後処理拡大は可能である）を使って得るべきである。関心対象領域だけを対象にするよう常に厳格な視準を使用すべきである。さらに実施した最終画像保持、画像取得、ビデオ録画とデジタル透視は PACS (Picture Archiving and Communication System) システムに保存でき、その後見返ることができる。

(102) C アーム装置を使用する場合、横断画像や斜断画像では X 線源が皮膚の近くに来、それが患者皮膚線量の増加につながることを認識して

おくことが重要である。横断画像や斜断画像では実際上可能なときはできるだけ、患者の腕は上げるべきである。またできるかぎり腕支持物を使い、長い手技のあいだに腕が一次ビームのほうに倒れていくのを防止すべきである。異なる投影で照射野が重なることは最小限にとどめるべきである。

6. 小児科コンピュータ断層撮影における患者の放射線防護

6.1 コンピュータ断層撮影の線量測定

(103) CT 線量インデックス (CTDI) は CT の主要な測定値である。セクション 2.1 パラグラフ 7 に示した理由により、ICRU (2005) と IAEA (2007) は空気吸収線量の代わりに空気カーマの使用を推奨している (CT 空気カーマ・インデックス)。にもかかわらず本刊行物のデータ表では文献に記されている通りに CTDI 値で示している。CTDI は一連の連続した照射による z 軸に沿った平均吸収線量を表す。これは 1 つの軸の CT スキャン (X 線管の 1 つの回転) から測定され、積算した吸収線量を総ビーム幅によって除することによって計算される。CTDI は理論的には、測定で使用するファントムと同等なサイズと減衰特性を有するスキャン体積の中心部分内の平均線量を推定する。CTDI はこの値を推定する便利な方法であり、1 回のスキャン画像を取得するだけでよい。CT の初期の時代にはこれにより相当な時間を節約することができた。CTDI は視野全体で変動しうる。体のイメージングでは、CTDI は通常回転の中心よりも表面のほうで 2 倍高くなる。視野全体を通じた平均 CTDI は加重 CTDI (CTDI_w) によって与えられる (Leitz ら, 1995; European Commission, 2000; International Electrotechnical Commission, 2002)。ここでは、

$$(1)$$

この 1/3 値と 2/3 値は中心と端部の値によって表される相対的体積を近似している (Leitz ら, 1995)。CTDI_w は、特定の kVp と mAs のスキャナ放射線出力の有用な指標である。

(104) 体積被ばくの特性分析に使用される単位は線量と長さの積 (DLP) である。このパラメータは、CTDI_w [中心部と周辺部について重み付けした CTDI (mGy/100mAs), すなわち視野全体を通じた平均 CTDI] とスキャンの長さの積から直接導き出される値である。DLP は検査終了後でも、予期計画であればそれよりも手前の段階であってもスキャナで測定することができる。

(105) CTDI_{vol} はある特定のスキャン・プロトコルでスキャンされる体積内のある 1 点における平均線量を表すパラメータである。ヘリカル CT では 1 回転あたりのテーブル走行の総ビーム幅に対する比は、「ピッチ」と呼ばれている。したがって CTDI_{vol} は CTDI_w をそのピッチで除して得られた値と等しい。したがって、CTDI_w が x および y 軸方向での平均吸収放射線量を表しているのに対して、CTDI_{vol} は x, y, および z 軸方向での平均吸収放射線量を表す。ここで z 軸方向とはテーブル・フィードに対して平行な方向を指す。CTDI_{vol} は、CTDI ファントムに類似した減衰を示す物体については CT 画像を収集する際に照射される体積内の平均放射線量を推定するが、物体のサイズ、形状、減衰がファントムと相当程度異なるときにはそれらの物体の平均線量は表さない。加えて言えば、CTDI_{vol} はスキャンの長さから独立しているためスキャンされる体積に沈着する総エネルギーは示さない。国際単位は milligray (mGy) であり、その値は将来を見越してより新しい CT スキャナのコンソールに表示できることが要求されている (世界保健機構、国際電気標準会議、米食品医薬品局、欧州連合によって)。多列検出器 CT で CTDI_{vol} を測定するとき、特に実効ビーム幅が大きな場合の問題は、照射の長さ (ビームの尾) がペンシル電離箱の長さ 100mm を越えることである。この問題を解決するように設計された電離箱が提案されている (Dixon と Ballard, 2007)。

Table 6.1. Countrywide surveys of dose estimations for paediatric computed tomography (CT) of the head, chest, and abdomen/pelvis (modified from Thomas, 2011).

CT head	1 (or 0-1) years [†]		5 (or 2-5) years		10 (or 6-10) years	
	CTDI _{vol} 16*	DLP 16	CTDI _{vol} 16	DLP 16	CTDI _{vol} 16	DLP 16
UK 2005 (Shrimpton et al., 2005)	35/30	270	50/45	470	65/50	620
Germany 2008 (Galanski et al., 2007)	33	390	40	520	50	710
Switzerland 2008 (Verdun et al., 2008) [‡]	20	270	30	420	40	560
France 2009 (Brisse and Aubert, 2009)	30	420	40	600	50	900
Greece 2009 (Yakoumakis et al., 2009)	-	-	-	650	-	975
Belgium 2010 (Buls et al., 2010)	35	280	43	473	49	637

CT chest	1 (or 0-1) years		5 (or 2-5) years		10 (or 6-10) years	
	CTDI _{vol} 32 (16)*	DLP 32 (16)	CTDI _{vol} 32 (16)	DLP 32 (16)	CTDI _{vol} 32 (16)	DLP 32 (16)
UK 2005 (Shrimpton et al., 2005)	6 (12)	100 (200)	6.5 (13)	115 (230)	10 (20)	185 (370)
Germany 2008 (Galanski et al., 2007)	1.7 (3.5)	28 (55)	2.7 (5.5)	55 (110)	4.3 (8.5)	105 (210)
Switzerland 2008 (Verdun et al., 2008) [‡]	2.5 (5)	55 (110)	4 (8)	100 (200)	5 (10)	110 (220)
France 2009 (Brisse and Aubert, 2009)	3 (6)	30 (60)	3.5 (7)	63 (126)	5.5 (11)	137 (274)
Greece 2009 (Yakoumakis et al., 2009)	-	-	-	168 (336)	-	289 (578)
Belgium 2010 (Buls et al., 2010)	4.2 (8.4)	38 (76)	4.7 (9.3)	55.5 (111)	4.5 (9)	72 (144)
USA 2008 [§]	4.3 (8.5)	-	4.8 (9.5)	-	5.5 (11)	-

CT abdomen/pelvis	1 (or 0-1) years		5 (or 2-5) years		10 (or 6-10) years	
	CTDI _{vol} 32 (16)*	DLP 32 (16)	CTDI _{vol} 32 (16)	DLP 32 (16)	CTDI _{vol} 32 (16)	DLP 32 (16)
UK 2005 (Shrimpton et al., 2005)	-	-	-	-	-	-
Germany 2008 (Galanski et al., 2007)	2.5 (5)	70 (145)	4 (8)	125 (255)	6.5 (13)	240 (475)
Switzerland 2008 (Verdun et al., 2008) [‡]	3.5 (7)	65 (130)	4.5 (9)	150 (300)	6.5 (13)	190 (380)
France 2009 (Brisse and Aubert, 2009)	4 (8)	80 (160)	4.5 (9)	121 (242)	7 (14)	245 (490)
Greece 2009 (Yakoumakis et al., 2009)	-	-	-	420 (840)	-	560 (1120)
Belgium 2010 (Buls et al., 2010)	3.9 (7.8)	50.2 (101)	5.5 (11)	104.5 (209)	4.8 (9.5)	119 (238)
USA 2008 [§]	4.3 (8.5)	-	5.0 (10)	-	5.5 (11)	-

CTDI, CT dose index; DLP, dose-length product.

References: Shrimpton et al., 2005; Galanski et al., 2007; Verdun et al., 2008; Brisse and Aubert, 2009; Yakoumakis et al., 2009; Buls et al., 2010.

* For head CT, CTDI and DLP values refer to the 16-cm phantom. For chest and abdomen/pelvis CT, values refer to the 32-cm phantom, followed by the corresponding 16-cm phantom value in parentheses. Data have been adapted from the original publications, expressed according to the 16-cm phantom (Shrimpton et al., 2005; Verdun et al., 2008; Yakoumakis et al., 2009), the 32-cm phantom (Brisse and Aubert, 2009), or both (Galanski et al., 2007).

† Proposed DRIs expressed for children aged 1, 5, and 10 years (Shrimpton et al., 2005; Brisse and Aubert, 2009; Yakoumakis et al., 2009) or using age ranges (Galanski et al., 2007; Verdun et al., 2008). Most paediatric DRL surveys do not include a specific 15-year-old category, although some include an 11-15-year-old group (Galanski et al., 2007; Verdun et al., 2008); the adult DRL in that country, or a value intermediate between adult and 10-year-old DRL, may be considered appropriate for teenagers.

‡ Switzerland subsequently adopted the values from the larger German study (Galanski et al., 2007).

§ Values calculated according to recommendations of the Alliance for Radiation Safety in Pediatric Imaging, based on the future French DRL values for adult abdominal CT recommended by IRSN, the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, in 2008.

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

表 6.1 頭部、胸部と腹部/骨盤の小児科コンピュータ断層撮影 (CT) における全国線量評価 (Thomas, 2011 をもとに改作)

CT 頭部	1 (または 0-1) 年 [†]		5 (または 2-5) 年		10 (または 6-10) 年	
	CTDI _{vol} 16*	DLP 16	CTDI _{vol} 16	DLP 16	CTDI _{vol} 16	DLP 16
英国 2005 年 (Shrimpton ら, 2005)	35/30	270	50/45	470	65/50	620
ドイツ 2008 (Galanski ら, 2007)	33	390	40	520	50	710
スイス 2008 (Verdun ら, 2008) ‡	20	270	30	420	40	560
フランス 2009 (Brisse と Aubert, 2009)	30	420	40	600	50	900
ギリシャ 2009 (Yakoumakis ら, 2009)	-	-	-	650	-	975
ベルギー-2010 (Buls ら, 2010)	35	280	43	473	49	637

CT 胸部	1 (または 0-1) 年 [†]		5 (または 2-5) 年		10 (または 6-10) 年	
	CTDI _{vol} 32(16)*	DLP 32(16)	CTDI _{vol} 32(16)	DLP 32(16)	CTDI _{vol} 32(16)	DLP 32(16)
英国 2005 年 (Shrimpton ら, 2005)	6 (12)	100 (200)	6.5 (13)	115 (230)	10 (20)	185 (370)
ドイツ 2008 (Galanski ら, 2007)	1.7 (3.5)	28 (55)	2.7 (5.5)	55 (110)	4.3 (8.5)	105 (210)
スイス 2008 (Verdun ら, 2008) ‡	2.5 (5)	55 (110)	4 (8)	100 (200)	5 (10)	110 (220)
フランス 2009 (Brisse と Aubert, 2009)	3 (6)	30 (60)	3.5 (7)	63 (126)	5.5 (11)	137 (274)
ギリシャ 2009 (Yakoumakis ら, 2009)	-	-	-	168 (336)	-	289 (578)
ベルギー-2010 (Buls ら, 2010)	4.2 (8.4)	38 (76)	4.7 (9.3)	55.5 (111)	4.5 (9)	72 (144)
米国 2008 [§]	4.3 (8.5)	-	4.8 (9.5)	-	5.5 (11)	-

CT 腹部/骨盤	1 (または 0-1) 年 [†]		5 (または 2-5) 年		10 (または 6-10) 年	
	CTDI _{vol} 32(16)*	DLP 32(16)	CTDI _{vol} 32(16)	DLP 32(16)	CTDI _{vol} 32(16)	DLP 32(16)
英国 2005 年 (Shrimpton ら, 2005)	-	-	-	-	-	-
ドイツ 2008 (Galanski ら, 2007)	2.5 (5)	70 (145)	4 (8)	125 (255)	6.5 (13)	240 (475)
スイス 2008 (Verdun ら, 2008) †	3.5 (7)	65 (130)	4.5 (9)	150 (300)	6.5 (13)	190 (380)
フランス 2009 (Brisse と Aubert, 2009)	4 (8)	80 (160)	4.5 (9)	121 (242)	7 (14)	245 (490)
ギリシャ 2009 (Yakoumakis ら, 2009)	-	-	-	420 (840)	-	560 (1120)
ベルギー-2010 (Buls ら, 2010)	3.9 (7.8)	50.2 (101)	5.5 (11)	104.5 (209)	4.8 (9.5)	119 (238)
米国 2008 [§]	4.3 (8.5)	-	5.0 (10)	-	5.5 (11)	-

CTDI, CT 線量インデックス; DLP, 線量と長さの積

参考文献：

Shrimpton ら, 2005 ; Galanski ら, 2007 ; Verdun ら, 2008 ; Brisse と Aubert, 2009 ; Yakoumakis ら, 2009 ; Buls ら, 2010)

*頭部 CT の場合,CTDI と DLP の値は,16cm のファントムについての値である。胸部と腹部/骨盤 CT の場合,値は 32cm のファントムについての値であり、その後の括弧内の値は 16cm のファントムについての値である。データはオリジナルの発表論文の 16cm のファントムにしたがって表されたデータ (Shrimpton ら, 2005;Verdun ら, 2008;Yakoumakis ら, 2009),32cm のファントムにしたがって表されたデータ (Brisse と Aubert, 2009) ,両方のファントムにしたがって表されたデータ (Galanski ら, 2007) からの引用である。

†提案されている DRL は 1 歳,5 歳と 10 歳の小児の値を表している場合 (Shrimpton ら, 2005 ; Brisse と Aubert, 2009 ; Yakoumakis ら, 2009) と年齢群を使用している場合 (Galanski ら, 2007 ; Verdun ら, 2008) がある。ほとんどの小児科の DRL 研究は 15 歳のカテゴリーを含んでいないが,11-15 歳グループを含んでいるものもある (Galanski ら, 2007 ; Verdun ら, 2008)。その国の成人の DRL または,成人と 10 歳の DRL の中間値はティーンエイジャーに当てはまると考えられるかもしれない。

‡スイスはその後,より大規模なドイツの研究 (Galanski ら, 2007) の値を採用している。

§値はフランスの放射線防護原子力安全研究所 IRSN が推奨する成人の腹部 CT に対する将来のフランスの DRL 値に基づいて,2008 年に Alliance for Radiation Safety in Pediatric Imaging (小児科イメージングにおける放射線安全連合) が推奨する計算方法に従って計算した値である。

(106) CT 線量推定値全国調査の例を小児の頭部,胸部,腹部/骨盤 CT の参照レベルとして表 6.1 に示している。

6.2 正当化/適応性

(107) 小児の頭部の軽い外傷における神経外科を必要とする負傷の有病率は 0.02%と低く,この場合には小児科脳部 CT は適応していない (Teasdale ら, 1990)。さらに,小児が外傷を負ったときには以下の基準,すなわち、小児が通常の状態にある,親にしたがって正常に行動する (2 年より幼い小児の場合) ,意識喪失がないか意識喪失が 5 秒未満である,重傷の機序がない,触知可能な頭蓋骨骨折がない,頭蓋底骨骨折の徴候がない,前頭部以外には頭皮血腫がない,嘔吐がない,ひどい頭痛がない (2 歳以上の小児の場合) といった基準を満たせば脳 CT を省略してもよいことが報告されている (Kuppermann ら, 2009)。また毎日の頭痛や片頭痛のある小児や,発作が新たに発症した小児で陽性の CT 所見が見つかっても治療や患者の転帰には影響しなかった (Lewis と Dorbad, 2000 ; Maytal ら, 2000)。

(108) 小児科患者は細い体型をしており超音波検査でも深い腹部組織の視覚化が可能であることから,小児科患者の腹部評価では通常超音波検査をまず最初に行なうべきイメージング検査とすべきである。経験豊かな操作者であれば超音波検査で多くの情報が得られ CT 検査が不要な場

41

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

合がある。たとえば超音波検査は急性虫垂炎が疑われる小児では最初に検討すべき検査である。超音波検査で答えが得られない場合,しばしば CT と MRI のどちらを選ぶかが問題になる。しかし国によっては MRI がすぐに利用できない国もあるし,また病院によっては時間外の検査が行えない場合もある。

(109) 軟組織,神経系 (ただし新生児頭部と脊柱の超音波検査を除く) 骨髄に関する詳細な情報は MRI によって最も高い精度が得られることが多い。これは優れたコントラスト解像度による。

(110) 病気に関連する死亡率のリスクが高い悪性疾患は,CT 放射線被ばくのリスクについての考慮を変化をもたらしかもしれない。しかし治療的処置の可能性が広がっている中でフォローアップ検査や画像誘導治療目的の CT 検査にもなって線量が追加されることは考慮すべきである。

(111) 既知の疾患についての生物学からして治療効果が期待できない場合,あまり早期にフォローアップの CT 検査を実施すべきでない。正当化は最初の検査時と同じくらい厳格であるべきであり代替検査法で十分な場合もある。フォローアップ CT 検査では放射線量を低減するため,臨床的な意味に応じてスキャン体積を制限することもできる。たとえば Jimenez ら (2006) は嚢胞性線維症患者のフォローアップ CT 検査 1 回あたりのスキャン範囲を 6 枚のイメージに制限することによる大幅な線量低減 (55%) を報告している。

(112) 同一の部分の繰り返しスキャンすること (すなわち多相 CT スキャンの使用) は制限すべきであり,相を追加することに正当化を行うべきである (Strauss ら, 2010)。

6.3 コンピュータ断層撮影装置における線量低減措置

(113) 最適化プロセスの一環として新しい CT スキャナを購入する場合,線量低減措置に特別な考慮を行うべきである。購入,試運転および品質対照試験等について医療物理学者 (士) に助言を求めるべきである。線量低減のためのソフトウェアとハードウェアの開発の例としては管電流変調がある。これは患者ジオメトリと密度に応じて X 線管の電流を「小児サイズにあわせる」ことができる AEC の一形態である。新しい広域検出器 CT スキャナは最小の時間で大量のスキャンを可能にする。二重線源 CT スキャナでは急速なテーブル速度と高ピッチ・スキャンによりスキャン時間を短縮し,大幅に線量被ばくを低減することから小児科胸部 CT と心臓 CT に適用されている。さらに照射ビームを修正するフィルタ (例えば蝶ネクタイ・フィルタ) が X 線検出器の効率を改善し,ダイナミック視準あるいはアダプティブ視準によって「ヘリカル過剰線量照射」による不必要な放射線を遮断する方法が現在導入されている。胸部,甲状腺または水晶体の線量節減のために患者を仰向けにした場合,新しい臓器ベースの線量変調により前方 120° の弧にわたって mA を低減することができる。逐次的再構成手法を使って画像の再構成を行うやり方はより新しい多列検出器スキャナで導入されている線量低減方法である。新しい自動 kV 技術がもうすぐ実用化され,患者のジオメトリと検査の意味するところに応じて kVp を調節できるようになる。最後に,スキャナ・コンソールに警報と通知を出せる装備した新しいソフトウェアはスキャンを行なう前に過剰な線量を防止するのに役立ち,品質保証・改善プログラムに使用することもできる (Hampton, 2010)。

6.4. 画質と検査の質の最適化

42

<p>(114) 画質と検査の質の両方に注意を払うべきである。他の画像診断法と同様に、患者の準備を最適化すべきである。たとえば鎮静を選択的に使用することで患者の動きや画質の劣化を低減またはゼロにすることができる。画像は詳細の点では優れた画質が得られたとしても、断面変換表示のようななんらかの操作をしなければ、診断に必要な情報を提供することができないことが考えられる。画質の客観的特質は画像ノイズと画像のコントラストである。放射線量被ばくを最小限にするという観点からは放射線診断に十分であれば、ノイズの多い画像でも許容すべきである。小児科 CT 検査の多くは注意深い造影剤投与にも依存している。品質/線量比を極大化するためには線量低減努力とこの重要な要素とを合致させるべきである。アーチファクト(人為的産物)も画質に関連がある。スキャン時間やピッチといった調節可能な要素が動きによるアーチファクトの発生に影響を及ぼすと考えられる。多列検出器 CT,より高速なテーブル速度,ガントリー回転が出現しており、それに伴い小児科患者の呼吸によるアーチファクトを低減できると考えられる。</p>
<p>(115) 検査の質は検査しようとする組織または部位にも依存する。骨格や肺実質の検査のほうが、脳や腹部の検査よりもより多くの画像ノイズを許容できるであろう。その理由としては前者のほうがコントラストの差が大きいことが挙げられる。したがってノイズが高い胸部検査であっても、ノイズの少ない腹部検査と検査の質は同じ場合がある。肝臓、腎臓、すい臓などの腹部臓器は正常な組織と病変部分が最小限の密度差しか示さない場合があり、診断の質を高めるのに患者に高い線量を課す場合がある。加えて、手術計画のために骨のアウトラインを決定するための三次元再構成は低線量レベルでも行うことができる (Vock, 2005)。</p>
<p>(116) 検査の質が許容可能かどうかは、その検査が臨床上的どのような意味を持っているかによっても決定される面がある。腎結石のようにたとえ小さくてもコントラストの大きい病変は小児の低線量 CT 手技でも受け入れられる (Karmazyn ら, 2009)。もっと小さくてもコントラストの低い病変はより高いコントラスト解像度が必要となる。たとえば、小さな肝転移の有無を評価する検査の場合より、肝臓の破断を評価するためのフォローアップ検査のほうが多くの画像ノイズを許容できると思われる。</p>
<p>(117) 検査の質の受け止め方はデータの表示にも関係している (ICRP, 2001b)。CT コンソール上に表示される検査は、特定の検査を表示するための最適化がなされていないモニターで表示された場合見劣りするかもしれない。画像を読影する際の周囲の環境も検査の質の受け止め方に影響を及ぼす。</p>

6.5 スキャン・パラメータの調整と線量低減の最適化

(118) X線ビームが減衰するにつれて画像ノイズは増加する。また、X線ビーム減衰はスキャンしている患者の部位をX線が貫通する距離に影響される。そのため線量が患者の体重や年齢に合致するようにスキャン・パラメータ (mA, kVp) を調整すべきである (Frush ら, 2002; Moss と McLean, 2006)。あるいはまた、AEC 技術/システム (Greess ら, 2002) を小児科患者の CT 放射線量を低減するのに使用することができる。

6.5.1 管電流-照射(露光)時間の積 (mAs)

(119) 管電流-照射時間の積は「X線管負荷」(IAEA, 2007)とも呼ばれ、画像ノイズに影響を及ぼす。これは放射線量と線形関係にある(す

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

なわち、管電流-照射時間の積を2倍にすると放射線量も2倍になる)。しかし管電流と照射時間の積とノイズの関係はもっと複雑である(すなわち、管電流と照射時間の積が増加すると、管電流と照射時間の積の平方根に比例して画像ノイズが減少する)。たとえば、管電流と照射時間の積(そして線量)が4倍に増えると、画像ノイズは半分になる。小児科患者で、検出器で同じ光子フローを実現するなら、成人の場合に比べ管電流と照射時間の積(mAs)を大幅に低減できることを何人かの研究者は示している。Huda ら(2000)は、120kVpでは体重120kgの場合1300mAsの管電流を、70kgであれば200mAsに、10kgであれば17mAsにそれぞれ低減している。Boone ら(2003)は、28cm(成人のファントム)における管電流を100%とした場合、25cmで56%、20cmで20%、15cm(それぞれ異なる小児ファントム)で5%まで低減しても、腹部プロトコルにおいて一定したコントラストノイズ比に到達できたと報告している。

(120) 胸部CTには比較的低い管電流が推奨されている。Lucaya ら(2000)は低線量・高解像度CTで放射線量の大幅な低減を実現でき(50mAでは72%、34mAでは80%)、さらに、協調的ではない小児科患者や若い患者では50mAで、協調的な場合では34mAsですぐれた画質の肺画像が得られたと報告している。Rogalla ら(1999)は、患者の年齢に応じてヘリカルCTの管電流の範囲を25から75mA(回転時間1秒の場合)とすることを推奨している。低線量スキャンのリスクには異常をとらえ損なう可能性があることだけでなく、偽陽性の所見が得られることもあることを理解しておくことが重要である。管電流-照射時間の積の値が大きく低ノイズレベルであれば偽陽性の所見は発生しないと思われる。

6.5.2 管電圧 (kVp)

(121) 小児科患者の身体的サイズは成人のそれより小さいため、小児科患者の身体を透過するために必要なkVpは成人の場合より低い。したがって成人のCT検査では120kVpの管電圧が使用されるのに対し、小児科患者では100kVp、時には80kVpで十分である。mAsを上げずに低いkVpを使用するとノイズが増加する。しかしコントラストが高い場合にはノイズが高くとも許容できるので線量も引き下げられる。この低いkVpの使用はヨード系造影剤の効果の改善も期待でき、したがってCT血管造影法に使用することが提案されている。kVpの下げ過ぎるとビーム硬化 (beam-hardening) アーチファクトを発生させる場合がある (Verdun ら, 2004)。体重5kg未満の乳幼児には80kVpを使用することがVock (2005)によって提案されている。Yu ら(2011)はファントム研究に基づき、小児胸部CTと腹腔骨盤CTにおいては重量<10kgと10-20kgに対しそれぞれ80kVpと100kVpの電位を使用することを提案している。70kVpオプションを可能にする新しいスキャン技術が実用化されつつあり、小児科集団に独自の便益が得られることが期待される。

(122) 体重調整した小児科CTプロトコルの使用が提案されている (Frush ら, 2002; Cody ら, 2004; Verdun ら, 2004; Vock, 2005)。提案されている小児科CTプロトコルのおもな例を表6.2に挙げている (Pages ら, 2003; Verdun ら, 2004; Vock, 2005)

6.5.3. スライスの厚み

(123) 小児はサイズが小さいため、空間的解像度を向上させるために成人に比べスライスを比較的薄くする必要はあるが、スライスを薄くして同じ照射を使用すると自動的にノイズも増える。このことは1.0mmの切片の代わりにそれよりも薄い0.5mmの切片を使用した囊胞性線維

症の小児患者の胸部 CT の研究において評価されており、肺ウインドウ設定で診断上許容可能な気管血管構造の描画が得られ、しかも線量を低減することができた (0.14 mSv ± 0.04 vs 0.19 mSv ± 0.03) (O'Conner ら, 2010)。ノイズレベルを一定に保つには mAs の引き上げが必要となり、結果的に放射線被ばくの増加につながる。その放射線被ばくはスライスの厚さの二乗に逆比例する。したがって厚みを半分にするとも mAs を 4 倍に増加させる必要がある。4 検出器列のスキヤナは、単列検出器より線量効率が低く、薄いスライス厚で撮影するには比較的高い線量レベルが必要となる。検出器列が 4 列以上になると、この現象は新しい検出器技術とスキヤナ・ジオメトリーの変化により重要でなくなる (Thomton ら, 2003)。

Table 6.2. Examples of suggested paediatric computed tomography (CT) protocols (Pages et al., 2003; Verdun et al., 2004; Vock, 2005).

Weight (kg)	CTDI _{vol} (mGy)	kV	mAs
Abdomen pitch 0.75			
2.5-5	7.1	80	72
5-15	9.4	100	56
15-30	14.0	120	64
30-50	18.5	120	96
Age (years)	CTDI _w (mGy)	DLP (mGy cm)	
Brain/chest			
<1	25/20	180/150	
5	25/25	200/200	
10	50/30	750/600	
Upper/lower abdomen			
<1	20/20	330/170	
5	25/25	360/250	
10	30/30	800/500	

CTDI, CT dose index; DLP, dose-length product.

45

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

表 6.2 提案されている小児科コンピュータ断層撮影 (CT) プロトコルの例 (Pages ら, 2003 ; Verdun ら, 2004 ; Vock, 2005)。

体重 (kg)	CTDI _{vol} (mGy)	kV	mAs
腹部ピッチ 0.75			
2.5-5	7.1	80	72
5-15	9.4	100	56
15-30	14.0	120	64
30-50	18.5	120	96
年齢 (年)	CTDI _w (mGy)	DLP (mGy cm)	
脳/胸部			
<1	25/20	180/150	
5	25/25	200/200	
10	50/30	750/600	
脳/胸部			
<1	25/20	180/150	
5	25/25	200/200	
10	50/30	750/600	

CTDI, CT 線量インデックス ; DLP, 線量と長さの積

6.6 防護遮蔽

(124) 局所防護遮蔽を使う医療慣行は医療機関ごとに異なる。1 つのアプローチがすべてのスキヤナにあてはまるわけではなく、適切に使用しなければ遮蔽が放射線量を増やす場合さえあることから、プロトコルはスキヤナごとに個別に試験すべきである。

(125) 少女の場合については、できるかぎり胸部組織を防護するためにビスマスを使った局所表面保護具を考慮すべきである (Coursey ら, 2008)。しかしビスマス防護具が遮蔽部分での管電流を不当に高めないよう事前の偵察的 (試験的) 確認 (または AEC プレスキャンニング) をしたあとでなければ、ビスマス防護具を取り付けるべきでない点に注意することが重要である。水晶体、甲状腺および性腺を直接の放射線や散乱放射線から防護するその他の器具が提案されている。眼が高い吸収線量を被るような X 線検査では、検査や診断が影響を受けない限り適切な遮蔽材 (例えばビスマス遮蔽体) または鉛当量眼鏡によって眼を遮蔽すべきである (例えば、脳 CT や顔面骨 CT で、ガントリーの角度が検査体積の外側に軌道を保持するのに十分でない場合)。しかし、鉛当量眼鏡はその放射線防護評価がこれまでのところ国際的に標準化されないの

46

で注意して使用すべきである。患者が協動的であれば 吸収線量を 50-70%低減することができる。
(126) 遮蔽が最適とは言えない位置に置かれると 線条アーチファクトとノイズが増加する場合がある(例えば、皮膚表面に近すぎる、表面上に滑らかに置かれていないなど)。下部アーチファクト (subjacent artefact) を最小限に抑えるのに十分な距離をとって適切に遮蔽体を設置する必要があることが推奨されている (Kim ら, 2010)。
(127) こうしたことから一部の研究者や研究機関は患者には遮蔽を使用しないことを推奨しており、その代わりに適切に照射野サイズの制限を行なうことと適切な管電流調整をすることで、多くの状況で遮蔽装置を使用することなく線量全体の大幅な低減が実現できると提案している (Colombo ら, 2004; Geleijns ら, 2006; Kalra ら, 2009)。

6.7 小児科コンピュータ断層撮影における線量低減の原則 (Vock, 2005)
(128) 小児科 CT の線量低減という目的を達成するために、以下の戦略が提言されている。すなわち、CT 検査では厳格な正当化を行なうこと、診断情報が得られるのであれば多少大きなノイズがある画像でも受け入れること、スキャン・プロトコルを最適化すること、スキャンングを必要な最小限の長さに制限すること、同一部分を繰り返しスキャンするのを避けること などである。
a. CT 検査の厳格な正当化
<ul style="list-style-type: none"> ・ 幼少期の患者には超音波検査法や MRI のような代替画像診断法を検討すべきである。しかし小児が MRI 検査を受ける場合に時々必要となる麻酔のリスクも考慮すべきである。
b. 患者を準備する
<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に幼い小児の場合、患者との打ち合わせだけでなく親との打ち合わせも行う。親が鉛のエプロンをつけ一次ビームの外側にとどまるようにとの指示にしたがい、手技が行なわれている間中小児のそばに付き添うことで小児の不快感を和らげることが期待される。 ・ 小児にとって優しい環境は小児の不安を低減することもできる。 ・ 小児の扱いになれた訓練されたスタッフがいれば、検査の質を向上させ新たな被ばくを生じることになるスキャンングの繰り返しを防止するうえで非常に有用である。

<ul style="list-style-type: none"> ・ 静脈カテーテルが必要な場合は検査前に適切に留置すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 必要な防護遮蔽の配置
c. スキャンが診断のためである限りは 画像ノイズを受け入れる
<ul style="list-style-type: none"> ・ 限界まで行く (すなわち、医療上の疑問が解決できるなら許す限りのノイズを受け入れる) ことが放射線科医の任務である (Donnelly ら, 2001)。 ・ 後処理の使用によって、信号対ノイズ比を維持しながら線量を低減できる (3-5mm という厚めのスライスを再構成して解釈する)。薄いスライス画像に比べて厚いスライス画像のほうがノイズは少ないが、薄いスライス画像は非常に重要な細部を検討し 2 次元と 3 次元の再フォーマットされた画像を得るのに使用することができる。
d. スキャン・パラメータを最適化する
<ul style="list-style-type: none"> ・ スキャナごとに形状がそれぞれ異なるので kVp と mA をそのまま比較することには問題がある。通常小児科 CT では回転時間を最短にするのが適切であり、それにより動きによるアーチファクトを最小限に抑えられる。 ・ 管電流と kVp は 患者のサイズの合うように調節すべきである。 ・ xy 平面 (角) 線量変調：これは 人体が普通は丸くないという事実を克服するために導入された。x 軸 (左右方向) よりも y 軸 (前後方向) のほうが 同じ信号対ノイズ比を達成するのに必要とされる放射線が一般的に少ない。xy 平面変調は検査する部位に応じて mAs を 20-40% 低減するので、もしこの機能が備わっておりかつ適しているなら使うべきである。

<ul style="list-style-type: none"> ・ z 軸 (縦方向) 変調：体の縦軸 (z 軸) では、十分な信号対ノイズ比を得るために必要とされる放射線は患者のさまざまな位置での組織の密度によって異なる。z 軸変調は CT ローカライズ表示からも、またインタラクティブにも誘導できる。できるかぎり z 軸変調を使用すべきである。
e. スキャン範囲を限定する これは、事前の試験的観察と回転検査の両方に当てはまる。
f. 正当化されない複数回のスキャンを同じ部位で繰り返すことを避ける
<ul style="list-style-type: none"> ・ 繰り返しスキャンが必要な場合、対象範囲をできる限り小さな体積に制限するか、求めている追加情報があやふやにならない程度にまで線量を落として行なうべきである。小児における多相造影 CT 検査はケースごとに正当化すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 同じ部位を繰り返しスキャンすることにはいくつかの医学的理由が必要であろう。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 造影剤投与前のスキャンと静脈内ボラス投与後の造影スキャン
<ul style="list-style-type: none"> ・ テストボラス法を使った正しいタイミングで行われるスキャン (例えばボラス・トラッキング法) またはボラス・トリガリング法によって適切な診断スキャンを行うための低線量での 1 つの平面での反復スキャン。この場合、連続したスキャンはごく低い線量 (例えば 5mAs) で行うことができる。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 動的造影検査。腎臓のような臓器の動脈相、静脈相および/または分泌相を含む
<ul style="list-style-type: none"> ・ 肺における位置による重力影響を確認するための仰向きとうつ伏せでのスキャン
<ul style="list-style-type: none"> ・ エア・トラッピングを検出するための吸気と呼気での肺スキャン
<ul style="list-style-type: none"> ・ 透視 X 線による CT 誘導インターベンション
<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚いスライスによるスクリーニングとその後の薄いスライスによる詳細なスキャン

7. 要約と勧告
<ul style="list-style-type: none"> ・ 電離放射線を用いたあらゆる検査の正当化と、それに続く放射線防護の最適化は、すべての患者、特に成人に比べ放射線量の単位あたりの副作用のリスクが大きいことに照らして小児科患者において重要である。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 正当化原則に従って、画像診断検査が適応であり、正当化される場合、このことは、検査をしないことによる患者のリスクが、患者が被る可能性のある放射線誘発性の損害のリスクよりも大きいことを意味する。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 電離放射線効果を使用しないイメージング技術を代替手段として使用できないか常に検討すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射線防護の最適化には、放射線設備と技術的パラメータが小児科患者に対して適切に設計されるよう放射線装置と品質管理の機能を最適化し、最適化プロセスを援助するために DRL を実施することが必要である。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 医療機関の放射線防護文化の一環として、品質基準実施と定期的監査を制度化すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 小児科患者の位置調整と固定、照射野サイズ、防護遮蔽など、優れた X 線撮影手法に注意を払うべきである。X 線撮影被ばくパラメータは、患者サイズと年齢に合うように特別に修正すべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ ほとんどのイメージング装置とベンダー指定のプロトコルは、成人用の構造になっており、小児科での使用には設備と被ばくパラメータの修正が必要と思われる。設置、イメージング・プロトコルの設定、最適化を支援するため、できるかぎり医学物理学者の助言を求めるべきである。
<ul style="list-style-type: none"> ・ インターベンション手技は、患者に高放射線量被ばくをもたらす可能性があるため、経験豊かな小児科のインターベンションを実施するスタッフが行うべきであり、患者とスタッフを防護するため、放射線防護の追加トレーニングが推奨される。
<ul style="list-style-type: none"> ・ CT の場合、線量低減は、患者の体重または年齢にしたがって、スキャン・パラメータ (mA, kVp, ピッチ) の調整によって最適化すべきであり、体重に適合させた CT プロトコルが提案、公表されている。放射線被ばくを最小限に抑えるという観点から、放射線診断上十分であれば、ノイズが多い画像であっても受け入れるべきである。最適化された検査の質は、スキャンする部位と検査の適応に依存する。その他の線量

低減戦略としては、多相 CT 検査プロトコルに対する制限、スキャン部位の重複の回避、該当領域だけをスキャンする、などである。さらに、検査の質は、放射線診断と解釈を容易にするための画像後処理によって改善できる可能性がある。

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版:平成30年3月)

付属書 A. 小児科放射線学手技の適切な使用のためのガイドライン
以下の例は、英国王立放射線科専門医会 (Royal College of Radiologists) (2007, www.rcr.ac.uk) が公表している紹介医と放射線科医のためのガイドラインをもとに作成したものである。
A.1 中枢神経系
・ 小児の頭部外傷後の頭部 X 線撮影は、事故以外の原因による負傷 (児童虐待) を除いて適応ではない。事故による脳損傷のいくつかの臨床的外傷性の特徴の数によっては、CT が適応となる場合がある。
・ 頭部または脊柱の先天性障害の場合、全身麻酔が必要される場合、または骨の詳細を詳細に描出しなければならない必要上検査方法として CT が望ましいモダリティである場合を除き、MRI が適応である。
・ 頭部の外観が異常な場合 (例えば泉門が開いた水頭症) には、超音波検査が適応である。ただし、頭蓋手術の前に三次元最構成を行う必要があり、そのために CT 検査が必要な場合は除く。手術した水頭症でシャントがうまく働かないことも考え、バルブシステム全体の X 線撮影が適応である。
・ てんかん患者の頭部 X 線撮影は適応ではない。これらの勧告は、難聴、発達遅滞、脳性麻痺が疑われる症例にも同じである。
・ 頭痛、乳様突起炎または副鼻腔炎が疑われる症例 (5 才未満では副鼻腔は十分発達していないかまたは未発達である) は、通常 X 線撮影の適応とは認められていない。この場合に専門特化した検査法は、低線量 CT または、できれば MRI である。
A.2 頰部および脊柱
・ 外傷のない斜頸の小児では超音波検査が適応であり、MRI、X 線撮影または CT が適応とされるのは、臨床所見が非定型であるかまたは長期にわたっている特定の状況下に限られる。
・ 潜在性二分脊椎は、よく見られる変異であり、いかなるイメージングも適応ではない。神経学的症状または徴候が存在する場合は、超音波または MRI が適応である。
A.3 筋骨格系
・ 2 才未満であれば、事故によらない負傷 (児童虐待) の疑いがあれば骨格検査の適応である。しかし、骨格検査は、小児科での実務のトレー

<p>ニングを受けたレントゲン技師/技術者が行い、放射線科医が検査を監督し、必要に応じて補助見解について助言を与えることが望ましい。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 手足の負傷を比較するための反対側のルーチンでの X 線撮影は正当化されない。 ・ 骨年齢決定のための左手首/手の X 線撮影は、低身長または成長不良に対して適応である。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 過敏性股関節または跛行の小児において、超音波は、関節浸出液の存在を除外または確認するため、また診断さらには治療も誘導する手段として適応がある。X 線検査または核医学検査が適応とされるのは、超音波検査で陰性であった場合だけである。MRI は、骨髄炎、無血管壊死、腫瘍などの通常見られない疾患が疑われる場合の専門的な検査である。 ・ 限局性骨痛の症状または徴候がある場合は、X 線撮影の適応である。超音波は骨髄炎が疑われる場合に有用となる場合がある。また、これらの患者に対しては MRI の使用が増加している。 ・ 生後 2 ヶ月から 5 ヶ月の乳幼児の弾発股は、超音波で評価すべきである。X 線撮影が有用なのは、超音波検査の技能を有する者がおらず、乳幼児が生後 5 ヶ月を超える場合に限られる。 ・ オスグッド・シュラッター病は、X 線撮影の適応ではない。軟部組織の腫張は臨床的に評価すべきである。
A.4 心臓胸部系
<ul style="list-style-type: none"> ・ 急性胸部感染症または再発性の喀痰を伴う咳に対しては、最初は胸部 X 線が適応ではなく、胸部 X 線の実施は、治療にもかかわらず症状が持続する、重症である、または原因不明の熱が続く患者の場合だけに限定すべきである。 ・ 異物の吸入が疑われる場合は、X 線撮影の適応である。呼気撮影、透視法、CT の使用については地域の方針のあいだで大きな幅がある。 ・ 喘鳴または急性喘鳴は、ルーチンでの胸部 X 線撮影の適応ではない。喉頭蓋炎は臨床診断できるが、気道が安定しているが異物または咽後膿瘍による閉塞が疑われる小児では特に、頸部側方 X 線が有用と思われる。 ・ 心雑音は通常胸部 X 線の適応ではない。専門医師への紹介または心エコー検査法の実施を検討すべきである。
A.5 胃腸系

小児科医療における放射線防護の改善 (下訳版：平成 30 年 3 月)

<ul style="list-style-type: none"> ・ 重積の診断において超音波検査は感度が高いが、超音波検査を実施するかどうかはオペレーターに依存する。できるかぎり重積が疑われる場合に限定すべきである。 ・ 異物を飲み込んだ場合、頸部を含む胸部 X 線を実施すべきである。腹部 X 線は、鋭利な異物または有害または有毒物質 (例えばバッテリー) を飲み込んだかどうか確認する必要がある場合にのみ適応である。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 腹部の軽微な外傷は、腹腔内の疾患や脊柱または骨盤の負傷を示唆する明確な身体的徴候がない限り、通常腹部 X 線撮影の適応ではない。CT は鈍的腹部外傷の場合に好まれる主要なイメージング検査であるが、臓器損傷が既知である場合は、フォローアップには超音波検査が有用な場合がある。大きな腹部外傷は、当該地域の成人に対する方針と同じ方針にしたがって取り扱うべきである。 ・ 超音波は、嘔吐性嘔吐において、肥天性幽門狭窄を除外するために好まれるモダリティである。通常、上部消化管造影剤検査は、再発性嘔吐や単純な胃食道逆流症の適応でない。 ・ 便秘の腹部 X 線撮影はルーチンでは適応でない。ヒルシュスプルング病が疑われる場合は、専門医への紹介と生検の実施が望ましい。 ・ 触診で腹部腫瘍が認められる場合は、まず超音波が適応である。腫瘍の存在が確認されれば、更なる画像検査 (MRI または CT のいずれか) は行われることになる。検査は専門病院で実施するのが望ましい。
A.6 尿生殖器系
<ul style="list-style-type: none"> ・ 夜尿症が続く場合は超音波で評価すべきである。静脈性尿路造影 (IVU) は、特に少女における括約筋内異所性尿管を確認するためにデュプレックス・システムで行う場合に限定すべきである。MRI 尿路造影の設備がある場合は、IVU に代って MRI 尿路造影を実施する。 ・ 神経または骨格の検査で異常が見られた小児、超音波検査で膀胱壁肥厚/肉柱膀胱が見られた小児、ビデオウロダイナミクスで神経因性膀胱尿道機能障害が見られた小児において、腰仙脊柱の X 線検査は適応となる。 ・ 無触知性精巣は、超音波検査の適応であるが、腹部停留精巣の場合は、MRI が有用と思われる。腹腔鏡検査が増えている。

・ 尿路拡張の出生前診断は超音波で評価すべきであるが、専門医へ紹介する閾値は低くすることが推奨される。

平成 29 年度 第 1 回 ICRP 刊行物翻訳委員会

議事録

日 時：2017 年 7 月 6 日（木） 13:30－15:30

場 所：(公財) 原子力安全研究協会 地下会議室

出席者：丹羽（放影研）、今村（元聖マリアンナ医大）、佐々木(康)（湘南鎌倉総合病院附属臨床研究セ）、鈴木（国際医療福祉大学ク）、寺谷、松本（規制庁）

原安協：杉浦理事長、米原主任研究員、事務局（迫田、花渕、本庄）

欠 席：佐々木(道)（電中研）、吉澤（JAEA）

【資料】

- 29 ICRP 刊行物 1-1-1 ICRP 刊行物翻訳委員会要綱（案）
- 29 ICRP 刊行物 1-1-2 原子力規制庁業務委託・仕様書
- 29 ICRP 刊行物 1-1-3 ICRP 刊行物翻訳作業フロー
- 29 ICRP 刊行物 1-1-4 平成 29 年度年間計画案
- 29 ICRP 刊行物 1-2-1 翻訳対象選定用書名リスト & 原著刊行情報
- 29 ICRP 刊行物 1-2-2 翻訳適否検討用の原著概要
- 29 ICRP 刊行物 1-2-3 ICRP 刊行物の構成と翻訳範囲
- 29 ICRP 刊行物 1-2-4 翻訳会社の紹介・説明
- 29 ICRP 刊行物 参考 1 翻訳対象の選定について（規制庁）
- 29 ICRP 刊行物 参考 2 ICRP members 201707-202106

※以下、資料番号の「29 ICRP 刊行物」は略

【議事】 -----

1. 当委員会について

1-1 規制庁の方針等

会議冒頭に、規制庁より本事業に係わる最近の規制庁の取組や動向について説明があった。規制庁は、原子力災害対策と放射線防護を一体的に取り組めるように組織を改編した。大きな方針として、① 放射線審議会の機能強化、② 安全研究事業の開始、③ 国際機関との連携強化、などが打ち出されており、本事業はこれらと関連している。

また、本事業に対する期待及び今後の放射線審議会等での活用について発言があった。

1-2 当翻訳事業について（資料 1-1-1、1-1-2）

杉浦理事長より、規制庁受託である当翻訳事業について全体像の説明があった。その後、事務局より資料 1-1-1、1-1-2 を用いて説明し、当委員会の活動内容に関する以下の質疑応答がなされ、要綱案は承認された。

- 1) 委員の欠員 これまでの日本語版翻訳検討委員会より現時点で委員が1人少なくなっている。欠員は今後補充する予定である（事務局）（⇒ 3. も参照）
- 2) 年間翻訳本数 「ICRP では年4本の刊行物を発行」（仕様書 p15、3の①）とあるが、目標翻訳数の5本という数字と整合しない、どのように考えたらよいか？
——過去に発行された中で翻訳されていない物があり、その中からも選ぶ。また、ページ数の多いものは、ワード数の単位優先で考えていく（事務局）
- 3) 理解促進活動 「理解促進活動」（仕様書 p17、3の②）とは、どのような活動を想定しているのか？
——ICRP ホームページに翻訳 PDF を公開すること、また、原子力学会春の年会でセッションを設けることを検討している。詳しくは、第2回委員会で検討する予定である（事務局）
——学会発表では本事業をアピールすることが目的であり、学術発表を求めるものではない。したがって、大変な準備が必要なものは求めておらず発表自体の敷居は高くないと考えてほしい（規制庁）

1-3 今年度の委員会活動の進め方について（資料 1-1-3、1-1-4）

事務局から資料 1-1-3、1-1-4 を用いて、今年度の活動の流れを説明した。併せて次年度以降に予想される翻訳完成までのプロセスについても確認した。

年間計画案の検討を行い、関連学会の年間予定を考えて以下の発言があった。

- 1) 学会発表をめぐって（理解促進活動-2）
 - ・活動の対象には、保健物理学会、原子力関係学会、放射線影響学会、医学放射線学会等の規模が大きい学会や、ICRP 委員の先生方を巻き込みながら行うと良い。
 - ・学会時にブースを開いてはどうか。ブースの設営では費用があまりかからない。
 - ・対象となる学会は、その年に翻訳された刊行物の内容による。・医学系のテーマであれば、医療担当者が多く集まる学会が望ましく、日本医学放射線学会、日本核医学学会も考えられる。なお、2018 年度日本医学放射線学会総会（2018 年 4 月 12 日—15 日、会長今井裕東海大学教授、於パシフィコ横浜）への Claire Cousins 氏（ICRP 委員長）の招聘が決まっている。
 - 11 月までの学会（放射線影響学会等）で可能であれば何か企画いただき、また 11 月以降の学会については第 2 回委員会で検討いただきたい（規制庁）

2. 翻訳対象と翻訳者の選定

2-1 翻訳の対象について（参考-1）

規制庁より、参考資料-1 を用いて、翻訳対象の選定方針について説明があった。

- ・当調査事業では、ICRP 刊行物の内容と考え方を規制実務に生かすことが目標であり、その意味で、優先順位が高い読者は規制関係者となる。
- ・規制庁は、他省庁への提言機能が強化された放射線審議会の事務局を務める。その意味で、医療分野の ICRP 刊行物についても理解を深める必要性は感じており、医療分

野を無条件に翻訳対象外とするものでもない。ただし、国の行政全体を視野に入れた上で、長期的に見て、どの省が担当することが医療放射線防護の実践に資するのかを検討しつつ、省庁間で調整してゆきたい。

上記の説明を受けて、委員から以下の意見と確認があった。

- ・ICRPの放射線防護の原点は医療であり、出版物も医療関係が多い。医療での被ばく線量が他分野より高いこともある。翻訳事業は厚生労働省も協力して進めると良い（丹羽委員長）
- ・今までの翻訳事業では、宇宙関係などの想定読者（audience）が少ないタイトルは翻訳対象から外してきたが、規制関係者を対象とする場合、宇宙関係やスクリーニングも取り上げることが考えられる。
- ・規制庁と医療分野の関係だが、医療機器の規制に規制庁は関わっていないか？
——一部、大型の放射線発生装置の規制は、障防法と重なるので関わっている（規制庁）

2-2 翻訳対象と翻訳者の選定（資料 1-2-1、1-2-2）

事務局が資料 1-2-1 により全翻訳委員による予備選定の結果を報告した。得票の多かったタイトルを中心に、資料 1-2-2 を用いつつ、今年度に翻訳するタイトルを選定した。結果と主な議論は、以下のとおり。番号は、着手順。

- ① Publ.125 Radiological Protection in Security Screening 48pp.
選定理由等：保安上の理由から行うセキュリティ・スクリーニングは社会の関心に直結し、放射線規制の実務に関わりが深い。
翻訳者：米原英典氏（原子力安全研究協会）。（当日中に上長許諾とご本人の快諾あり）。
- ② Publ.132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation 48pp.
選定理由等：航空機搭乗時の被ばくの規制について日本はすでにガイドラインがあるが、その的確な運用には背景となる知識と考え方の理解が必要とされる。
翻訳者候補：保田浩志氏（広島大学）
- ③ Publ.130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1 188pp.
選定理由等：職業被ばくに関する ICRP 刊行物の歴史的改訂。データ集であるため、Part 2 以降は数値データを含む割合によって翻訳の必要性を検討するが、Part 1 はこの分野の基本概念を丁寧に記述しており、規制には必須の翻訳であろう。過去にこのテーマの ICRP 刊行物は、ほぼ原研（現 原子力機構）が翻訳してきた。
翻訳者候補：吉澤委員をコーディネーターとして、原子力機構保健物理部の関係者。
- ④ Publ.131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection 351 pp.（翻訳対象は 80p. 程度に絞る）
選定理由等：規制数値の表層的な運用を避けるには、放射線影響の生じるメカニズムの理解も必要であり、その意味で「幹細胞」の知見は欠かせない。ただし、当事業の対象読者を考慮して、翻訳範囲は冒頭から本文（3 章まで）に留める。膨大な付属書については、内容が高度に専門的であるため研究者向けと判断し、翻訳の対象外とする。

翻訳者候補：鈴木啓司氏（長崎大）

⑤ Publ.121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

選定理由等：アイソトープ協会が手がけた翻訳で、唯一仕上がっていない。小児の医療被ばくに係わる重要なテーマで社会的にも関心は高いと予想される。下訳はアイソトープ協会からの提供が見込まれ、下訳仕上げの段階から続けていける。ただし、医療テーマでもあり、着手は、厚生労働省と規制庁での内部調整の結果を待つこととした。

翻訳者候補：盛武 敬氏（産業医大）

2-3 翻訳作業に関わる検討（資料 1-1-3、1-2-3、1-2-4）

事務局が資料 1-2-4 により下訳を担当する翻訳会社を紹介し、承認された。

翻訳作業に関わる事項について、以下を検討し、委員会の方針を確認した。

1) 翻訳範囲の見直し——特に、Executive Summary〈総括〉の扱い

・1冊翻訳する場合、本文から抽出して作成されている ES は該当訳文を同一とすべく翻訳品質管理で時間がかかる。だが、翻訳編集上の省力化のため、ES 部分を割愛して訳す、という扱いはしない。

・Executive Summary は、時間のない多忙な関係者にせめてこれだけは読んでほしいという思いから ICRP が生み出したものであり、その精神に敬意を払うべきである。

・大部の ICRP 刊行物に対して、全部は無理だが Executive Summary だけを翻訳するという扱いについては、今後、翻訳の可能性を広げるものとして考えても良い。

2) 翻訳作業用原稿のスタイル

・校閲時の原文との確認作業を考慮して、承認投票まで対訳型レイアウトで行う。

3. 今年度の活動方針

当委員会の活動と翻訳委員会の構成について意見交換があり、事務局より、「監修者」の当委員会における位置づけを含めて今後も意見を伺う旨、協力要請した。現時点の意見は以下のとおり。

- ・世代交代も含めて、活動継承のための委員会のあり方をともに考えたい（丹羽委員長）。
- ・委員会を構成する組織として、放医研からも委員を選出することが望ましい。
- ・本事業のような研究調査の内容は、単年度展開の扱いは本質的にそぐわない（丹羽委員長、佐々木(康) 委員ほか）。

4. その他

- ・次回、第 2 回委員会は 11 月に開催予定であり、9 月頃、日程調整を始める。
- ・翻訳の原本を委員に提供するのか質問があり、事務局より検討中であると回答した。

以上

平成 29 年度 第 2 回 ICRP 刊行物翻訳委員会

議事録

日 時：2017 年 12 月 3 日（日） 10:00～12:00

場 所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

出席者：（敬称略・五十音順）

丹羽（放影研）、今村（元聖マリアンナ医大）、川口（量研機構）、佐々木（道）（電中研）、
佐々木（康）（湘南鎌倉総合病院付臨床研究セ）、鈴木（国際医療福祉大学ク）、吉澤（JAEA）、
松本（規制庁）

原安協：杉浦理事長、米原主任研究員、事務局（野村、迫田、本庄）

【 資 料 】

- 29 ICRP 刊行物 2-1-1 前回議事録
- 29 ICRP 刊行物 2-1-2 ICRP 刊行物翻訳委員会要綱
- 29 ICRP 刊行物 2-2-1 ICRP 原著の新刊情報と概要
- 29 ICRP 刊行物 2-2-2 翻訳進捗状況報告
- 29 ICRP 刊行物 2-2-3①②翻訳および校閲関連の検討（①訳語一覧②Pub125 翻訳版）
- 29 ICRP 刊行物 2-3-1 当事業理解促進活動の実施について

※ 以下、資料番号「29 ICRP 刊行物」は略

【 議 事 】 -----

1. 原著新刊情報と翻訳進捗状況の報告

1-1 原著新刊情報について（資料 2-2-1）

事務局から前回委員会以降に刊行された図書（Publs.134,135, Fukushima Proceedings）
について報告がなされた。

- 1) ICRP Publication 134 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2
「(仮) 作業者による放射性核種の摂取 Part 2」。Publ.130 に続く、職業被ばくの線量
限度に関する Publ.30 シリーズの歴史的改訂の Part 2。核種別のデータ集-1)
- 2) ICRP Publication 135 Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging
「(仮) 医療イメージングにおける診断参考レベル」)
- 3) Proceedings of the International Workshop on the Fukushima Dialogue Initiative
福島第一原発事故のあと全 12 回行われた ICRP 福島ダイアログの総まとめの意味を
持つ国際ワークショップの記録。

これらを翻訳対象とするかどうかは次年度に検討する。関連して以下の発言があった。

1) ICRP 原本の委員への配付について 前回委員会後の検討はどうなったのか。

——翻訳対象の原本については、原著を購入して委員に提供することになった。翻訳対象以外の物については、今後購入提供するか規制庁と議論する（事務局）

——翻訳対象以外の原本の購入についても、来年度以降は検討可能である（規制庁）

- ・日本の放射線規制が今後も ICRP の動向に注目するならば、ICRP の全体活動を把握するためにも刊行物は揃えるべきではないか。翻訳の必要性を議論するためにも原本は直接関係する（今村副委員長、丹羽委員長）

1-2 翻訳進捗状況の報告について（資料 2-2-2）

事務局から翻訳進捗状況の報告と年間スケジュールについて説明し確認した。説明を受けて、以下の発言と確認があった。

1) Publ. 121* および 医学系 ICRP 刊行物の扱いについて

*Publ.121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

- ・医学系の ICRP 刊行物である Publ.121 については、前回委員会後に厚労省の担当官と議論し、本事業を用いて翻訳を進めることとなった。また他の医学関係の刊行物についても、その都度、厚労省と議論する（規制庁）
- ・規制庁の承認が得られたので、Publ.121 はこれから翻訳依頼を行う（事務局）
- ・厚労省は本事業のような翻訳事業は持っていないため、国としてあらかじめ翻訳の責任体制を築いて欲しい。ICRP の翻訳は規制庁がイニシアティブを持って行ってはどうか（鈴木委員）。
- ・医療被ばくを含めて放射線防護全体を考えた翻訳事業を行うことを国として検討して欲しい（丹羽委員長）。
- ・放射線審議会では放射線防護関連の基準の斉一化を図ることが挙げられていることから、規制庁が主体となるべきである。
- ・Publ.135 の「診断参考レベル (DRL)」については、日本は 2 年ほど前から実行している。医療被ばくの低減や医療放射線規制にも関係することから、ぜひ次の翻訳対象として欲しい（佐々木康人委員）。
- ・参考情報であるが、ICRP の現在の Chair (Dr. Claire Cousins) の専門は IVR であり、IVR では関係者自身（医療従事者と患者）がとても高い線量を受けているのが現実である。医療分野で生じる被ばくは原子力分野で日常生じる被ばくよりもはるかに高い。やはり、原子力と医療の両方を考慮して翻訳を行うことが望ましい（丹羽委員長）

2) 監修者について

- ・仕様書の指定に従い、現役の ICRP/ICRU メンバー、および前 ICRP C3 メンバーである米倉先生に監修者就任の依頼をした。前 C2 メンバーの遠藤先生は、打診をしたが辞退された（事務局）。
- ・C4 メンバーである伴先生と本間先生については、本事業の発注側である規制庁所属でも

あるため、監修者として事業に参加出来るかは規制庁内で議論をしている。12月中には結論が分かると思う（規制庁）。

- ・ C4の刊行物についての監修は、元 C4メンバーである甲斐先生を候補にしてはどうか（杉浦理事長）。甲斐先生に声をかけることは良いと思う（丹羽先生）
- ・ 今年度がちょうどその例にあたるが、ICRPでの任期ごとにメンバー交代が生じることがある。その場合、過去のICRP刊行物については作成当時のメンバーが監修するほうがふさわしいのではないか？
- ・ 分野別の監修者の候補リストを事務局で作って欲しい、議論に有用である（鈴木委員）。

3) 翻訳進行と年度区切りについて

- ・ 年間スケジュールで Publ.125は校閲版のあとの表示がない。この段階のまま、今年度末まで放置するのか。

——単年度事業の性質を考えて、年度末に半端な段階にあるのは望ましくないと考えた。

しかし、次年度について、事務局担当組織は入札で変動の可能性はあるにしても、翻訳の中核を担う「翻訳委員会」体制（委員構成など）については継続が約束されるのであれば、支払いを当該作業終了の年度に行うなどの運用で、年度を超えて次の段階の翻訳作業に進むことが可能であろう。（事務局）

——委員の構成まで仕様書で固定出来るかは不明であるが、費用の振り分けについてなど今後検討する（規制庁）。

4) Publ. 130*の翻訳の進め方について

*Publ.130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1

コーディネーター担当の吉澤委員より説明があった。

- ・ JAEAの放射線防護関連部署から数名ずつメンバーを集めて実施する予定である。本務との関係で、1月頃から翻訳の開始を考えている。年度末までの進行計画は下訳を見てから判断したい（吉澤委員）
- ・ 年度末で翻訳の区切りがあった方が良いのか。
——仕様書からみて、章毎でなくても翻訳は進められると考えている（事務局）
- ・ 量が多いことから、委員校閲も流れ作業で行ってもよいのではないか（事務局）。
- ・ 委員校閲についても下訳を見てから判断したい（吉澤委員）

2. 校閲者の選定と翻訳関連の検討

2-1 Publ.125*の訳語関連の検討について（資料 2-2-3①②）

* Publ.125 Radiological Protection in Security Screening

米原主任研究員から Publ.125の翻訳について説明があった。以下の訳語について意見交換を行った。

- ・ consensus standards …… 四字熟語にこだわる必要はなく、一般の方が理解しやすい表現であることが望ましい。「合意の基準」が良いのではないか（丹羽委員長）
- ・ context ……前後の文脈から訳語を使い分けることが望ましい、「状況」でも「関連情況」

でも文脈次第で良いと考える（丹羽委員長）

翻訳稿（p.5）に出る文章の context の場合、「セキュリティ検査のより広い内容」という表現が適切と考える。必ずしも1つの訳語に機械的統一を行うことが適切ではない。

- ・「テクニカルタームとして厳密に統一を行う用語は絞って、あとは読者に原文の意味をよりわかりやすく伝えられる表現を検討する」という方針として、今後の翻訳原稿のまとめに反映したい（事務局）
- ・ conveyance …… 「輸送機関」では組織の意味合いが強くなる。組織ではなく乗り物であるハードの意味を強調するには、「輸送手段」の方が良いのではないかと。「輸送に使う乗り物」が一般の方でも理解が容易である。貨物車はどうなるのか。conveyance は輸送している飛行機や船など全体を意味し、cargo はその上に乗っている物である。
- ・ criteria …… 状況によって言葉が変わる、日英併記のスタイルでは委員が英語を把握出来るためその都度、意味を検討することで良いのではないかと（丹羽委員長）
- ・ operate …… 文脈依存で表現を検討する。
- ・ scanning …… 「スキャニング」で良い、「走査」はあまり使われていない。
- ・ security (screening) …… 想定する読者によって訳語が変わってくる。交通関係者だと「保安検査」が一般である。「保安検査」は炉規法では、安全全般の検査を意味しているように、規制庁では「保安」を「セキュリティ」の訳語としていないので、混乱を起こす可能性がある。

関連の発言として

- ・ 訳語の選定などにも関わってくるが、セキュリティスクリーニングについては、国内で担当する省庁が明確でないが、どこがやっているのか。
——国土交通省が港の公安等をやっているのではないかと。

2-2 Publ.132 * の校閲者の選定について

* Publ.132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation

- ・ Publ.125 と Publ.130 の翻訳状況を考慮し、鈴木委員と川口委員が担当する。

3. 当事業理解促進活動の実施について（資料 2-3-1）

事務局から実施済み分の報告がなされた。今後の予定と次年度の予備検討について以下の意見があった。

- ・ ポスターセッションでは、関係者の生の声に触れ、ICRP 刊行物翻訳へのニーズと期待がたいへん大きいことを確認できた（事務局）。
- ・ 次年度の理解促進活動からは、翻訳が完成することから、翻訳内容について専門的な発表を委員にお願いしたいと考えている（事務局）
- ・ 規制庁の事業を広く伝えるのか、ICRP の考え方を広めるのか、どちらを優先するかで発表の方法が変わってくる。

——規制庁としては、仕様書にあるように ICRP の考え方を関係者に共有することが目的である。翻訳完成版よりも早い時点から広めることも検討する（規制庁）

4. その他

翻訳委員会の構成について、丹羽委員長から委員長交代の提案があった。次回の予定を含めて以下が確認された。

- ・次年度については、鈴木委員が委員長となる。
- ・翻訳委員の欠員は、鈴木委員長の体制で検討する。
- ・次回第3回翻訳委員会は来年3月とし、2月から日程調整する。

以 上

平成 29 年度 第 3 回 ICRP 刊行物翻訳委員会

議事録

日 時：2018 年 3 月 15 日（木） 15:00～17:00

場 所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

出席者：（敬称略・委員は五十音順）

丹羽（放影研）、今村（元聖マリアンナ医大）、川口（量研機構）、佐々木（道）（電中研）、
佐々木(康)(湘南鎌倉総合病院付臨床研究セ)、鈴木(国際医療福祉大学ク)、吉澤(JAEA)、
松本（規制庁）

原安協：米原主任研究員、事務局（野村、迫田、本庄、河本）

【 資 料 】

- 29 ICRP 刊行物 3-1-1 前回議事録
- 29 ICRP 刊行物 3-2-1 ICRP 原著の新刊情報と概要（ICRP Pubs.136,137,138）
- 29 ICRP 刊行物 3-3-1 翻訳進捗状況報告
- 29 ICRP 刊行物 3-3-2①②翻訳および校閲関連の検討（①訳語一覧 ②Pub132 翻訳版）
- 29 ICRP 刊行物 3-3-3 翻訳編集関連の検討（クレジット・奥付等）
- 29 ICRP 刊行物 3-4-1 当事業理解促進活動の実施案について

29 ICRP 刊行物 3(参考) 1 平成 30 年度翻訳事業仕様書+アンブレラ事業概要

29 ICRP 刊行物 3(参考) 2 平成 29 年度報告書の概要

※ 以下、資料番号「29 ICRP 刊行物」は略

【 議 事 】 -----

1. 原著新刊情報の報告

1 原著新刊情報について（資料 3-2-1）

前回委員会以降に刊行された図書（Pubs.136,137,138）について事務局が報告し、関連の深い委員よりそれぞれ各号の概要紹介と背景情報の提供があった。

- 1) ICRP Publication 136 Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation
「(仮) 放射線被ばく環境におけるヒト以外の生物相に対する換算係数」。
- 2) ICRP Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides:Part 3
「(仮) 職業被ばく限度 Part 3 (核種別)」
- 3) ICRP Publication 138 Ethical Foundations of the System of Radiological Protection
「(仮) 放射線防護体系の倫理的基盤」

これらの新刊について委員からの情報提供は以下のとおり。

- Publ 136 は、第 5 専門委員会 (C5) が取り組んでいた環境中の生物の線量に関する刊行物になる。ICRP の C5 は、2005 年当時、世界の「環境」重視の流れを受けて誕生し、環境の防護についてシステマティックに意欲的に取り組んできた。ただ、生態系を人間社会とのつながりから検討する視点がいささか弱かったこともあり ICRP 主委員会としては今期より C5 の活動を従来の C1~C4 に統合して展開するのが効果的と判断した(丹羽委員長)
- Publ 137 の内容は、放射線防護法令の職業被ばくの線量限度に対応している。核種別の換算係数 (Publ.30 のシリーズ) について ICRP が見直しを行っている一連のシリーズで、核種の摂取や代謝の評価モデルという全体に係る概念はシリーズ Part 1 の Publ. 130 (現在翻訳中) で説明しており、それにもとづく核種別の評価が Part 2~4 で展開される。内容としては非常に重要で、この係数がその後、法令の係数となってくる (吉澤委員)
- Publ 138 は、ICRP が初めて議論するテーマで、放射線防護を考える上での倫理について扱う。今回の福島第一原発事故のなかで様々な課題が見えてきた。例えば、事故の際、作業者を防護する具体的なルールは存在したが、そこに住む人々をどのように防護するかは緊急時の数値だけであった。住民に関してはチェルノブイリ以降も防護上の検討が進んでおらず、線量について 1 年当たり 20~100mSv という参考レベル, 20mSv から下げる, 年 1mSv を目指すという大まかな数値だけで他に何も無いのが現状である。また, 1mSv については「追加被ばく」として考えているが、最近の福島市内では事故による追加の線量を入れなくても広島と比べて変わらない線量となっている。このような現在の状況では、1 時間当たり 0.23 μ Sv という数字が、人々を防護するというより、生活そのものを規制するという皮肉な結果になっている。防護のあり方から考える必要がある。そのため、この刊行物では学問的な倫理について議論した。ICRP 刊行物としては Publ. 111*と同様に特異なものになっている (丹羽委員長)

* Publ. 111 原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用

- これら 3 つの新刊について翻訳はどうするのか。
 - 次年度始めに、その年度の翻訳対象選定の議論を行う。今年度は publ.133 までを検討した。次年度はこれらを含めて Publ 134 からが検討の対象となる (事務局)
 - Publ 138 が C4 の刊行物ならば、翻訳対象としては C4 の刊行物を優先的に選ぶことになっており、翻訳対象となるかもしれない (規制庁)
 - 福島において、居住区の除染で手一杯のなか、山林除染などは手を付けていない状態にある。山林の環境から住宅に汚染が流れることもあり、生態系の全体を俯瞰する視点から国は考えていく必要がある (丹羽委員長)

2. 翻訳進捗状況の報告と翻訳関連の検討

2-1 翻訳進捗状況の報告について（資料 3-3-1）

事務局から翻訳進捗状況の報告と年間スケジュールについて説明し確認した。説明を受けて、以下の発言と確認があった。

1) 今後のスケジュールについて

- ・ Publ 130 の進捗について、下訳は全て入手しており、全体の作業としては予定通りに進んでいる。本文前半について、翻訳チームの各メンバーによるチェックが終わり、私と中核になるメンバーでそれを取りまとめている状態である。後半部分についても作業に取りかかっている。委員校閲については、本文の翻訳作業が一通り終わってからが適切かと考える（吉澤委員）
- ・ Publ 131 の進捗について、下訳は昨日納品された。また翻訳担当の鈴木啓司先生からも早く翻訳作業着手の承諾を得られた（事務局）
- ・ Publ 121 は、アイソトープ協会での下訳提供につき同協会内で手続中である（事務局）

2) 監修者について

- ・ 委員校閲後の監修について、Publ 125 と 132 は誰になるのか（今村副委員長）。
——どちらも第 4 専門委員会（C4）の刊行物であり、C4 メンバーが監修を行う。日本からは現在、伴先生と本間先生であるが、いずれも本事業発注側の規制庁所属であり、監修者就任の適否について規制庁で検討が続いていた。先日、回答があり、本間先生は監修者として事業に参加できることになった。対象刊行物の作成経緯を確認した結果、Publ.132 を甲斐先生（作成当時 C4, 現 MC。この号の批判的レビュワー担当）に、Publ.125 を本間先生に、それぞれ監修をお願いしたいと考えている（事務局）

2-2 編集上のクレジット事項の表示検討（資料 3-3-3）

英語版は ICRP、日本語版は規制庁が著作権所有者となること、またその表示の仕方について、事務局が資料を用いて説明し、承認された。また、クレジット事項と表示のあり方について、以下の検討を行い、意見の一致を見た。

1) 翻訳著作権所有者の表示——翻訳クレジットについて

- ・ ISBN の代わりになる資料番号は規制庁にはないため、資料番号は特に付さないでよい。

2) 翻訳貢献者の表示——貢献者クレジットについて

- ・ 貢献者表示の対象　すべての貢献者を対象とし、その役割を記して行う。完成までの間にメンバーの変動が生じた場合には、関わった期間を付して必ず全員を表示すべきである（鈴木委員、一同賛成）。
- ・ ロゴの表示　英語版クレジットでアイソトープ協会のロゴがあった位置に、規制庁のロゴを入れてはどうか。（今村副委員長）
——ロゴを付けた方がよい。他言語版でも通例となっている（丹羽委員長ほか、多数）
——委員からロゴを付けることについて強い要望があったと報告する（規制庁）

・英語版クレジットにおける本事業名の表記

- 本事業を英訳して、規制庁に確認していただくことを考えている（事務局）。
- 国の事業の一環として国際的論文を書く際はその旨を記入するが、そのとき英語表現を指定する官庁が多い。規制庁もそのルールがあるのではないか？（鈴木委員）
- 一度確認する（規制庁）

・「邦訳版の序」の内容

- 資料 3-3-3 の p.6 で①は翻訳クレジットに、②は貢献者クレジットに相当する。それ以降の文章で、規制庁版としてあるべき姿についてご意見を伺いたい（事務局）
- 全ての刊行物を翻訳するわけではないので、なぜこの刊行物を翻訳したか、その理由を書けばよい。内容をサマリーするとバイアスがかかってしまう（鈴木委員）
- ICRP では外部著者による招待論説がよくある。内容への理解を深めてもらうためだが、なぜそうするのかは刊行物ごとに異なり、一律には言えない（丹羽委員長）
- 「邦訳版の序」には、特殊な訳語の説明も入れていた（米原主任研究員）
基本勧告のような重要な刊行物では、必ず、訳語についての説明と検討の経緯などをこの序文で読者に伝えている（事務局）
- 「邦訳版の序」は委員長が書いてはどうか（佐々木康人委員）
- いただいたご意見をもとに、規制庁と検討を続けたい（事務局）

2-3 PubL.132 *の訳語関連の検討について（資料 3-3-2①②）

* PubL.132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation

事務局から保田先生からの提案訳語とコメントについて紹介があった。また鈴木委員および川口委員から PubL.132 の翻訳について説明があった。以下の訳語について意見交換を行った。

- ・ **likelihood** ……統計学の用語「尤度」として解釈されているが、文脈から一般的な意味での使用と読めるので変えた方がよい。「確度」とコメントした（鈴木委員）
同意見である。「可能性」のようなやわらかい表現がよいと思う（川口委員）
- ・ **of the order** ……「次元」と訳しているがカタい印象がある。「オーダー」はもう日本語になっている（鈴木委員） 「次元」はカタ過ぎる、程度や範囲でもよい（川口委員）
- ・ $00 \mu \text{ Sv h}^{-1}$ などの単位の表記……これまでの訳に揃えればよい（川口委員）
原著において特に統一はなされておらず、翻訳でも原著に添って訳していた（事務局）
ポイントは「 h^{-1} 」のような数学的表現への配慮であり、日本語で多くの読者に届ける上でわかりやすい表記に統一すべきと思う。今後決めていけばよい（鈴木委員）
- ・ **consensus standard** ……PubL.132 の「合意された規格」と、125 の「合意の規準」ではコンセプト上、逆になる。合意するための規準か、合意された規準で、「合意」のかかり方が変わってくる。文脈を慎重に確認しておく必要がある（丹羽委員長）
- ・ **aviation** ……「飛行」だけでもよいと思う。宇宙線の強さを考えると、高度の区別に意味があるのは「宇宙飛行」か「大気圏内飛行」かという点だけであろう（鈴木委員）
- ・ **frequent flyer / occasional flyer / frequent flyer programme**……下訳では、「フリークエ

ントフライヤー」とカタカナにしていた（川口委員） プログラム名も旅客も、カタカナか漢字のどちらかに統一？ カタカナでもよい（鈴木委員） フリークエントフライヤーは理解できるが、オケージョナルフライヤーはあまり使われていない（今村副委員長） それでは、**frequent flyers** は高頻度旅客、フリークエントフライヤー プログラムはそのままカタカナでよい（鈴木委員）

「高頻度旅客／低頻度旅客」の訳では「飛行」の意味が抜けるが問題ないか（事務局） 本書において明らかに誤解は無いので問題ない（鈴木委員）

flyer の中に、客だけで乗務員は含まれるのか（今村副委員長） 乗務員と **flyer** は別々である（鈴木委員）

- **graded approach**……「等級別アプローチ」は、IAEA の BSS における定訳である。今回の用例は IAEA の考え方が ICRP に流れている、ICRP には「**graded approach**」についての文章はこれまでなかった（米原主任研究員） ここでの「**graded**」とはリスクの濃淡というくらいの意味ではないか（鈴木委員） ICRP の「**graded approach**」は、IAEA よりもやわらかい印象である（川口委員） IAEA は規制について、ICRP はよりジェネラルな分野を扱っている（吉澤委員） IAEA の概念であり、概念としてはどちらも同じだと考える。ICRP Publ 103 の当時にはなかった（米原主任研究員）
- **potential epidemiological studies**……ここでの **potential** は潜在的なものではなく、単に「将来の」という意味である（鈴木委員）。
- **disseminate**、**dissemination**……単に「広める」という意味で「積極的」は要らない。「**information dissemination**」は「情報発信」、「**dissemination of relevant information**」は「適切な情報を発信する」である。（丹羽委員長）
- **light skin**……これは実質、白人のことで、UV で皮膚がんが多くなり、有色人種や黒人と比べると影響が大きくなっている。訳出がむずかしい（鈴木委員） 白色ではどうか（今村副委員長） 肌が白いではどうか、白人とするのは問題があるかもしれない（佐々木道委員） 褐色と訳す **dark skin** の逆の表現なのだが（佐々木康委員） 「色白の皮膚」？ 皮膚では違和感があるので「色白の肌」（諸氏）
- **other national authorities**……「他の国内関係当局」にコメントを訂正（鈴木委員）
- **provision**……「規定」では表現として強すぎる、ルールを作り直すことではない。これは妊娠申請後の勤務規定を作り直すことより、もっと小さい話ではないか（鈴木委員） **provision** は細かいルールも大きいものも含んでいる（米原主任研究員） **crew** だけでなく **frequent flyers** も含んでおり、勤務調整だけではカバーできない（今村副委員長） **provision** には対策という意味もあり、対策がなされるということ、例えば乗務員が地上職員に派遣されるなどの意味合いではないか（佐々木道委員） 妊娠期間中の対策、方策であり「対策がなされるべき」でよい（鈴木委員）
- **rate of disease**……ここでは **incidence** と **mortality** のどちらも含有する意味で使われているため「疾病率」でよい（川口委員）
- **bombarded**……「曝射」という訳語が気になった、照射ではどうか（川口委員）「地球は、深宇宙および太陽からの粒子に絶えず曝されている」ではどうか（事務局）「曝されている」でよい（丹羽委員長） 「照射」は意図的に当てることであり、「曝射」

は曝されているイメージがある。全てを照射にすべきではない（吉澤委員）

Publ.132 に関連して、以下を確認した。

・用語解説（glossary）の配列

保田先生から、翻訳版では見出し語の五十音で配列すべきとのコメントがあった。これは近年の日本語版ではすでに対応済で、さらに原著のアルファベット順配列でも探せるように訳語リストをつけている。今後も同じスタイルでよいか？（事務局）

——日本語しか読まない人には、五十音順がよい。日英両方を読む人との割合によって変わってくる（丹羽委員長）

——この事業の目的は、多くの日本の読者に届けることなのでそれでよい（鈴木委員）

——規制庁としてはどちらでもよい（規制庁）

3. 当事業理解促進活動の実施について（資料 3-4-1）

事務局から実施済み分の報告がなされた。今後の予定と次年度の予備検討をめぐって、以下の点について意見交換を行った。

1) 翌年度の依頼への対応について

- ・今年の1月時点で、ある学会の事務局から6月のシンポジウムでの講演依頼があった。単年度事業であるため翌年度のことは4月以降でないと確答できない旨、説明して理解いただいた。このような依頼への対応方針について、委員会として考えたい（事務局）。
- ・次年度の受託者については、契約を結ぶまでは確約できない。したがって、委員会及び委員として講演をお受けするかどうかについては、契約開始4月1日までは返答ができない（規制庁）
- ・翻訳委員会は今後も続くが、事務局は次年度に変わるかもしれない。次年度の予算の問題である。例えば、招待演者として発表するならば費用負担の点で問題は生じないが、委員会の旅費で行く場合は次年度にならないと決定できない（鈴木委員）。
- ・可能性として、次年度の翻訳委員会において委員が全て変わってしまうこともあり得る。旅費の負担がシンポジウム側であるならば、個人としてでも委員会としてでも、発表しても問題ない（規制庁）
- ・規制庁事業として依頼を受けて、発表そのものを次年度事業への引き継ぎ事項として考える方式はどうか（事務局） 事業自体がなくなることもあり得る（鈴木委員）
- ・発表する場合も、肩書きや所属をどうするか検討が必要である。委員会名なのか、各委員の所属なのか。委員会名や事務局の場合は、契約前だと不確定要素がある。契約が確定してから処理するのも方法である（吉澤委員）
- ・候補の学会等リストを見ても、夏前の学会は前年度に受付が終わる（今村副委員長）
申し込みが6月以降ならば可能になるのではないか（鈴木委員）
この学会リストで言えば、保健物理学会などは個人的に受けてもらい、委員会としての参加は原子力学会以降が現実的ではないか（規制庁）
- ・年度前に委員会として講演依頼を受ける場合、その後の展開で委員会として受けられないことになったときには個人として発表することも考えてはどうか。研究者として ICRP に

対する思い入れを活かしてもらえたらよい。発表を求める声がかかる自体、このような分野では重要なことである。そこを大切にしたい（丹羽委員長）

- ・国際放射線防護調査（RASSC）では、次年度に遅れて発表することが認められている（米原主任研究員）
- ・放射線防護には、医療と原子力の2つの領域が大きく関わっている。この候補リストの場合ではどの学会も重要になる（丹羽委員長）
- ・今回のような講演依頼があることは、ありがたい機会ではないか（佐々木 康 委員）
- ・知っている範囲で特にICRPの勧告に興味を持っているのは、保健物理学会と放射線安全管理学会である。平成31年度が昨年と同様に保健物理学会と放射線安全管理学会との合同となった場合、エントリーが4月前のみとなる可能性がある。また、アイソトープ協会主催のアイソトープ・放射線研究発表会なども2月末エントリーとなる。放射線防護の関係する学会は年度前半に多い。そのためにもエントリーの仕方などはルールがあった方がよい（吉澤委員）

2) 理解促進活動の展開スタイルについて

- ・アイソトープ協会は核医学会などでブースを利用して事業関連の展示を行い、チラシなどの配布も行っている。そのような読者とふれあう参加も検討したい（佐々木 康 委員）
- ・ブースを利用して展示を行う方法と、プログラムの中でポスターや講演で発表する方法の2つがある（鈴木委員）
- ・今年の翻訳対象を紹介するというポスター発表なら毎年できるのではないか（事務局）
年度前半ではポスター発表は厳しい、後半なら大丈夫である。年度前半はブースを利用する活動とすれば、発表者については検討する必要がなくなる（鈴木委員）
事務局の方で来年度の方向性をまとめてから検討したい（規制庁）
- ・2018年4月開催の日本医学放射線学会総会において、ICRP委員長のクレアカズンズ氏に本事業の発表資料を提供して紹介を依頼することは可能である（佐々木 康 委員）
資料を提供し依頼する方向で、準備したい（事務局）
- ・福島において規制庁が関係している機会を積極的に利用してはどうか、福島対応は本事業の内容紹介の場として極めて大切である（丹羽委員長）
規制庁の他事業との連携も検討したい（規制庁）

4. その他

事務局より報告書の概要と次年度翻訳事業に係る仕様書の紹介があった。

以 上

ICRP 刊行物をめぐる新展開—規制庁の調査・翻訳事業、始動—

A New Translation Project on ICRP Publications has launched by Nuclear Regulation Authority of Japan

2017 年度 ICRP 刊行物翻訳委員会事務局（野村智之）

Secretary, ICRP Publications Japanese Translation Committee (Tomoyuki NOMURA)

原子力安全研究協会

Nuclear Safety Research Association (NSRA)

1. 経緯

平成 29 年度より原子力規制庁の委託業務として「国内規制に係る国際放射線防護委員会（ICRP）刊行物の調査」事業が始動した。ICRP が発信する放射線防護の理念と基準は、各国で規制基準を策定する基礎となっている。本事業では、その ICRP の知見が関係者に広く共有され確かな規制に資することを目的に、ICRP 刊行物の調査と翻訳を行う。

ICRP 刊行物の邦訳は、ほぼ 60 年にわたり、（公社）日本アイソトープ協会により自主的学術活動として行なわれてきたが^{*1}、本事業開始によって、規制庁とその事業受託組織へと引き継がれることとなった。当事業の 2017 年度事務局は、（公財）原子力安全研究協会に置かれている。

2. ICRP 刊行物調査と翻訳の概要

事業実施のため、「ICRP 刊行物翻訳委員会」が設置された（表 1）。翻訳委員会は、翻訳対象と翻訳者の選定につき規制庁に提言を行い、翻訳の最終案を決定する。翻訳に当たっては、「翻訳〈専門家〉—校閲〈翻訳委員〉—監修〈ICRP・ICRU メンバーもしくは同等の専門家〉」というプロセスを経て、翻訳品質を確保する。

調査・翻訳の対象は「ICRP 2007 年勧告（Pub.103）以降で既訳がないもの」であり、「放射線防護に係る国内の安全規制に関係が深く重要性又は緊急性が高いこと」を選定方針とする。平成 29 年度は、安全規制と関係が深いテーマを優先に 4 点が翻訳対象に決定し、現在翻訳進行中である（表 2）。完成した翻訳は、ICRP ホームページに PDF にて公開される（紙の図書は作成されない）。

表 1 ICRP 刊行物翻訳委員会（2017 年度）

委員長	丹羽 太貫（放射線影響研究所）
副委員長	今村 恵子（元聖マリアンナ医科大）
委員	川口 勇生（量子科学技術研究開発機構）
	佐々木道也（電力中央研究所）
	佐々木康人（湘南鎌倉総合病院付属臨床研究センター）
	鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック）
	吉澤 道夫（日本原子力研究開発機構）

表 2 2017 年度の翻訳対象（着手順）

Publ.125 Radiological Protection in Security Screening
Publ.132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation
Publ.130 Part 1 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1
Publ.131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection（付属書を除く）
Publ.121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

^{*1} ICRP Publ.1 の邦訳である「国際放射線防護委員会勧告（1958 年 9 月採択）」は、昭和 35（1960）年 1 月 25 日刊行。初期は仁科記念財団との共訳であった。引き継ぎまでに 89 点を翻訳、うち 81 点を ICRP ホームページに公開中。

ICRP刊行物をめぐる新展開 — 規制庁の調査・翻訳事業、始動！ —

2017・ICRP刊行物翻訳委員会事務局

/// 事業の紹介 ///

- ICRP刊行物の調査・翻訳事業は、平成29年度から原子力規制庁の委託業務（今年度の業務受託者は(公財)原子力安全研究協会）になりました
- 放射線防護の安全規制に役立てるため
 - 世界の規制基準の基礎である ICRP刊行物を調査
 - 重要性の高いものについて 翻訳版を作成
 - 翻訳成果公開などにより ICRPの知見を広く共有
- 事業推進のため 放射線防護に関する知見を有する学識経験者等で構成する **ICRP刊行物翻訳委員会** を設置
 - ICRP刊行物翻訳委員会（2017年度） -----
 - 委員長 丹羽 太貫（放射線影響研究所）
 - 副委員長 今村 恵子（元聖マリアンナ医科大学）
 - 委員 川口 勇生（量子科学技術研究開発機構）
 - 委員 佐々木道也（電力中央研究所）
 - 委員 佐々木康人（湘南鎌倉総合病院付属臨床研究センター）
 - 委員 鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック）
 - 委員 吉澤 道夫（日本原子力研究開発機構）

監修者（外部アドバイザー & 監修担当）

⇒ ICRP・ICRU のメンバー と 同等の 専門家の方々

■ 2017年度の翻訳対象は？ ■

Publ.125 Radiological Protection in Security Screening
（仮）セキュリティ検査における放射線防護

翻訳者：米原英典氏（元放医研、原安協）

Publ.132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation
（仮）飛行時の宇宙放射線からの放射線防護

翻訳者：保田浩志氏（広島大学）

Publ.130 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1
（仮）作業者による放射性核種の摂取（パート1）

翻訳者：吉澤委員コーディネートJAEA中心のチーム

Publ.131 Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection（付属書を除く）
（仮）放射性防護における発がんに関わる幹細胞生物学

Publ.121 Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology
（仮）小児科の放射線診断とIVRIにおける放射線防護

完成版は ICRPのホームページに PDFを公開します！

平成30年度に Pubs.125,132 の公開を予定
（Pubs.130 part1, 131の翻訳版はその次？）

ICRP英語版の無償公開情報

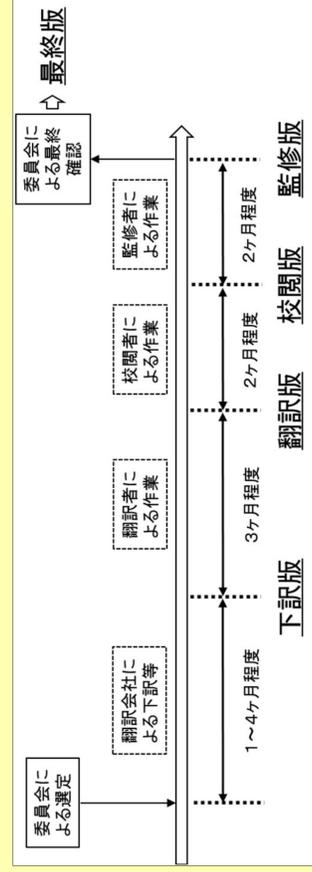
2007年勧告、全文無償公開になりました！
福島ダイアログ国際ワークショップの프로シーディングス、公開！
（ICRPシンポジウム2011,2013,2015 のプロセス・ディングスも公開中）
ICRP Publications 53 より前の号、ほとんど公開

<http://www.icrp.org/publications.asp> < GO !

■ 翻訳対象をどう選ぶ翻訳する？ ■

- 翻訳対象 Pub.103（2007年勧告）以降・既訳がない刊行物
- 選定方針 「放射線防護に係る国内の安全規制に関係が深く重要性又は緊急性が高いこと」
- 翻訳の質を保つ3段階のシステム
適正な専門用語で 原著の内容を的確に伝える翻訳を！
そのため 翻訳 ⇒ 校閲 ⇒ 監修 の3段階で翻訳を進めます

翻訳者 (1名/刊行物)	専門家の視点で下訳を検討し、訳文を仕上げる ⇒〈翻訳版〉
校閲者 (2名/刊行物)	シリーズ統一と読者への伝達性の観点から翻訳版を校閲する(翻訳委員校閲) ⇒〈校閲版〉
監修者 (1名/刊行物)	原著作成時にICRPで議論した内容・ポイントが的確に翻訳されているか校閲版を確認する ⇒〈監修版〉



■ 2007年勧告以降のICRP刊行物リスト

Publication No	Title	日本語版の有無
103 ●	The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection	○ ●
104	Scope of Radiological Protection Control Measures	○
105	Radiological Protection in Medicine	○ ●
106	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals - Addendum 3 to ICRP Publication 53	
107	Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations	
108	Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants	○ ●
109	Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations	○ ●
110	Adult Reference Computational Phantoms	
111 ●	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	○ ●
112	Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies	○
ICRU Report 84 (joint with ICRP)	Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew	
113	Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures	○
114	Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants	
115	Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon	○ ●
116	Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures	○
117	Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department	○ ●
118	ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context -	○ ●
119 ●	Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60	○ ●
120	Radiological Protection in Cardiology	○ ●
121	Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology	○ ●
122	Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste	○ ●
123	Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space	
124	Protection of the Environment under Different Exposure Situations	
125	Radiological Protection in Security Screening	
126	Radiological Protection against Radon Exposure	
127	Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy	
128	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances	
129	Radiological Protection in Cone Beam Computed Tomography (CBCT)	
130	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1	
131	Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection	
132	Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation	
133	The ICRP Computational Framework for Internal Dose Assessment for Reference Adults: Specific Absorbed Fractions	
134	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2	
135	Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging	

発表者：野村 智之

（公益財団法人原子力安全研究協会）

▼ 問い合わせ先：原子力安全研究協会 国際研究部
ICRP刊行物翻訳委員会 事務局

Tel 03-5470-1983（代表） E-mail tnomura@nsra.or.jp



A New Translation Project on ICRP Publications has been launched by the Nuclear Regulation Authority of Japan

The ICRP Publications Japanese Translation Committee (Tomoyuki NOMURA)

Secretary, the ICRP Publications Japanese Translation Committee, Nuclear Safety Research Association (NSRA)

Abstract—Since the fiscal year 2017, Nuclear Regulation Authority of Japan (NRA) has launched an outsourced project “Survey and translation of ICRP Publications for domestic radiation safety regulations in Japan.” The project is conducted for the purpose of ICRP’s knowledge being widely shared among those concerned and being helpful for the reliable Japanese domestic regulations.

The translation of the ICRP publications into Japanese, which has been conducted by the Japan Radioisotope Association (JRIA) as one of its voluntary academic activities for nearly 60 years*, will now be succeeded as this project. For FY 2017, the project is outsourced to the Nuclear Safety Research Association (NSRA) in which a secretariat for the project is set up.

For above project, the ICRP Publications Japanese Translation Committee has been established (Table 1). The committee offers suggestions to the NRA of Japan for the selection of the publications to be translated and approves the final texts of translation. To ensure quality in translation, the following “Quality Assurance Procedure” is adopted; 1) “translation” with an expert, 2) “revision” with the translation committee members, and 3) “supervision” with a committee member from the ICRP or ICRU or an expert of their equivalent. The project covers ICRP publications from Publ. 103 and after (Publications without Japanese translation). The priority for selection to translate is given to those publications that deal with important and urgent issues deeply connected to the Japanese domestic radiation safety regulations. For FY 2017 five publications have been selected, which are now in the process of translation (Table 2). The translated documents will be published open to public on a webpage of the ICRP as PDF files (no hardcopies will be published).

Table 1: ICRP Publications Japanese Translation Committee (FY 2017)

Ohtsura Niwa (chair), Keiko Imamura (vice chair)
Isao Kawaguchi, Michiya Sasaki, Yasuhito Sasaki, Gen Suzuki, Michio Yoshizawa

Table 2: ICRP Publications Selected for Translation (FY 2017)

Publ.125	Radiological Protection in Security Screening
Publ.132	Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation
Publ.130	Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1
Publ.131	Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection (excluding Annexes)
Publ.121	Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

* The Japanese translation of ICRP Publication 1 (Recommendations of the International Commission on Radiological Protection adopted in September 1958) was published on January 25, 1960. In the early days of JRIA’s translation activities, the ICRP publications were co-translated with the Nishina Memorial Foundation†. By the time of the launch of the NRA’s new translation project, JRIA has translated 89 ICRP publications of which 81 have been published open to public on webpages of the ICRP.

† http://www.nishina-mf.or.jp/index_j.html

ICRP 刊行物邦訳 に 新展開

— 規制庁事業、始まる！ —

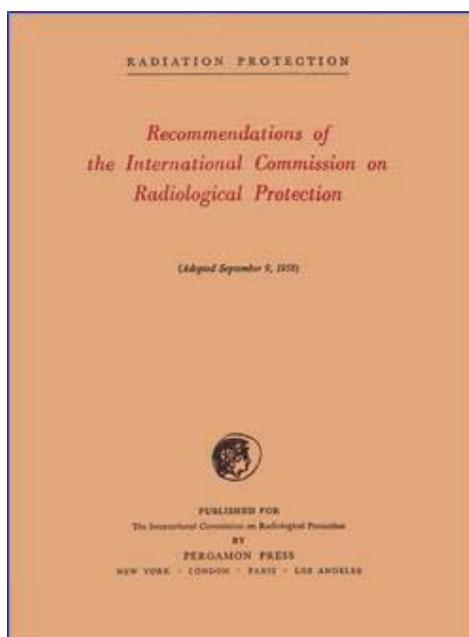
A New Translation Project of
ICRP Publications by
Nuclear Regulation Authority of Japan

1

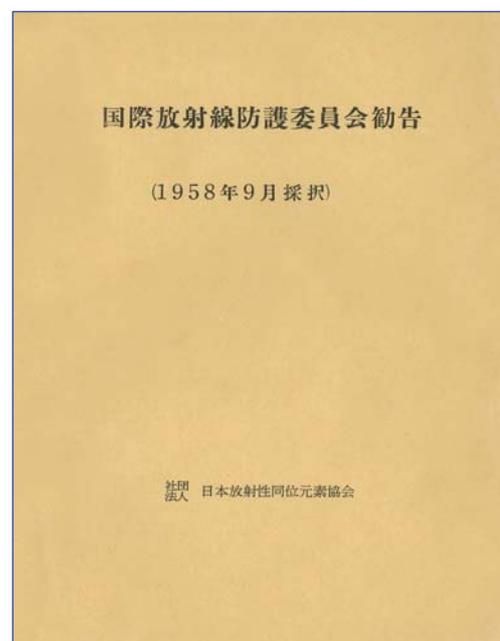
ICRP 刊行物翻訳の長い歴史

ICRP Publication 1

Publ.1 日本語版



ICRP, 1959



アイソトープ協会訳本, 1960.1.25

国内規制に係るICRP刊行物の調査/翻訳事業

- **Publ.103以降** の ICRP刊行物を調査
- **安全規制上 重要 / 緊急性が高い ⇒ 翻訳**
- ICRPの知見を広く共有、規制に資する

From FY 2017, **Nuclear Regulation Authority Japan (NRA)** outsourced a project of
“Survey and translation of ICRP Publications for domestic radiation safety regulations in Japan”

3

ICRP刊行物翻訳委員会2017

Translation Committee of ICRP publications 2017

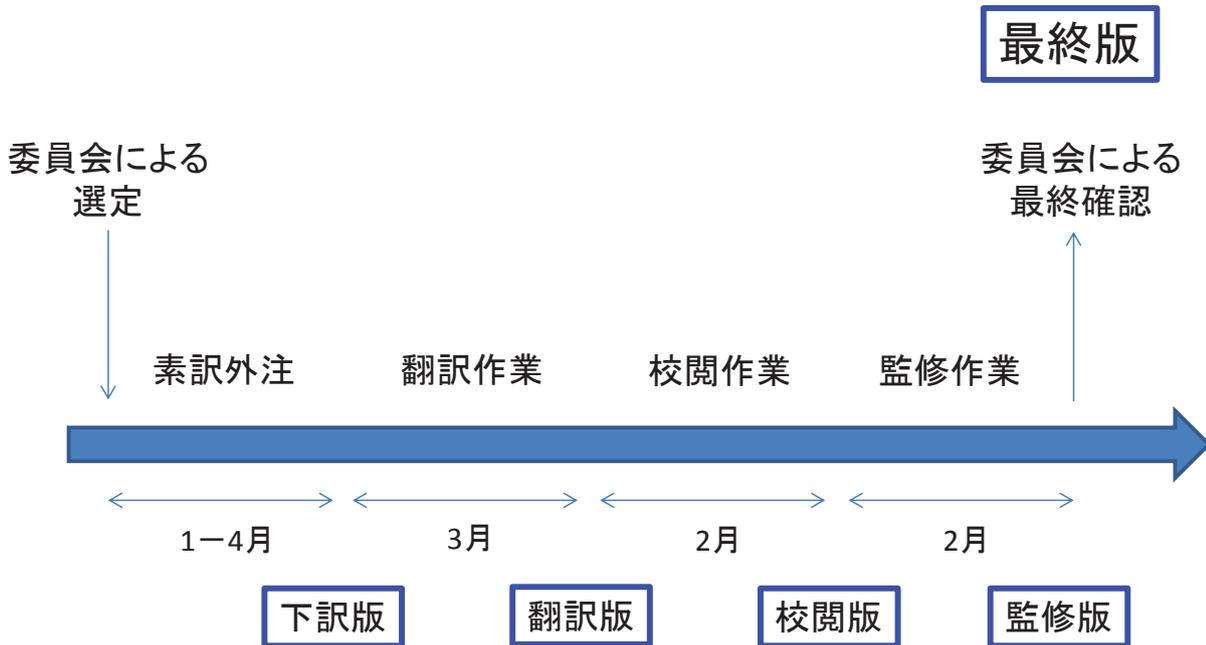
丹羽 太貫*	Ohtsura NIWA
今村 恵子**	Keiko IMAMURA
川口 勇生	Isao KAWAGUCHI
佐々木道也	Michiya SASAKI
佐々木康人	Yasuhito SASAKI
鈴木 元	Gen SUZUKI
吉澤 道夫	Michio YOSHIZAWA

* 委員長 Chair

** 副委員長 Vice-Chair

ICRP刊行物の翻訳システム

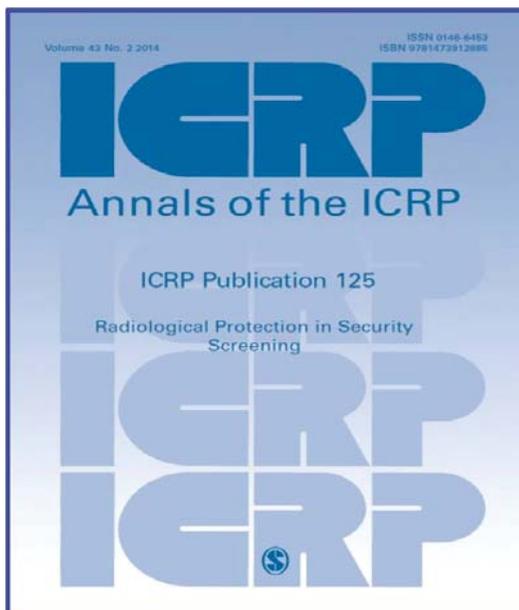
Quality Assurance System of Japanese translation



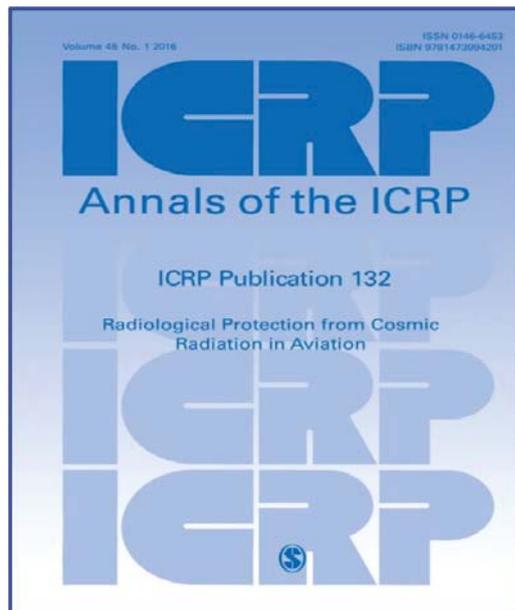
5

2017年度 翻訳開始タイトル 1

Ongoing translations for FY 2017



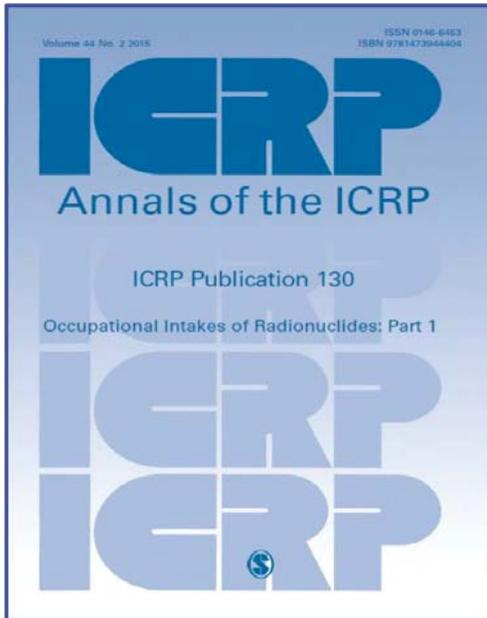
125 セキュリティスクリーニング



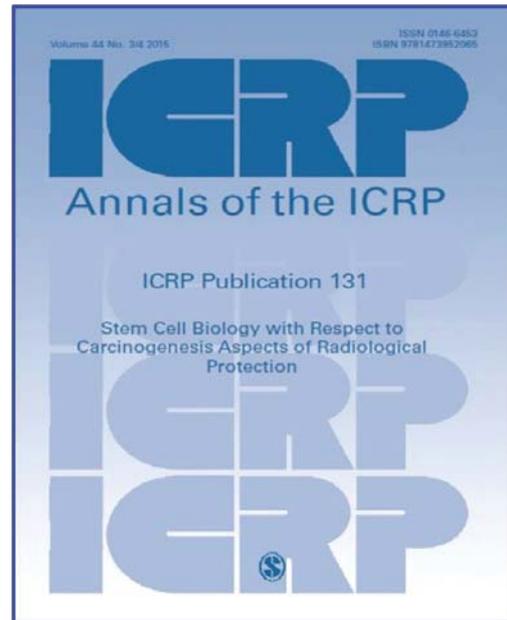
132 飛行中の宇宙線被ばく

2017年度 翻訳開始タイトル-2

Ongoing translations for FY 2017



130pt1 作業者による放射性核種の摂取

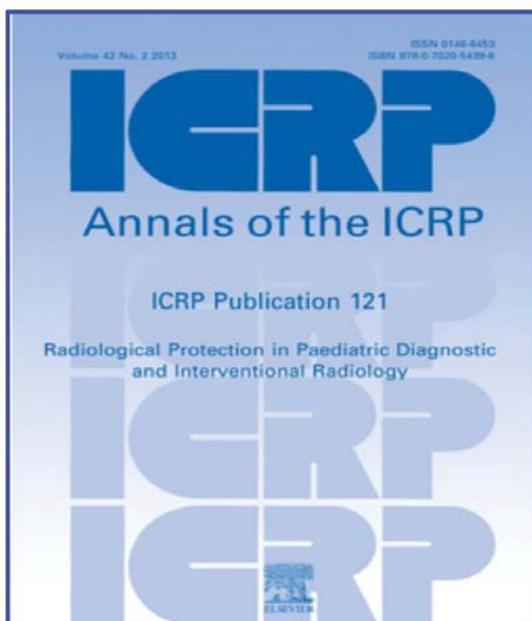


131 放射線防護から見た幹細胞生物学

7

2017年度 翻訳開始タイトル-3

Ongoing translations for FY 2017



121 小児科の放射線診断とIVR

翻訳の成果

- ICRP web に PDF公開！
- Pub 125 と 132 来年度完成予定

*Upcoming Japanese Translations
will be published on ICRP Website as before!*

【連絡先】

2017年度ICRP刊行物翻訳委員会 事務局：
原子力安全研究協会 国際研究部 野村智之
Tel 03-5470-1983（代表） E-mail tnomura@nsra.or.jp

医療放射線防護連絡協議会
2017年次大会

高橋信次記念講演 ICRP防護体系の変遷

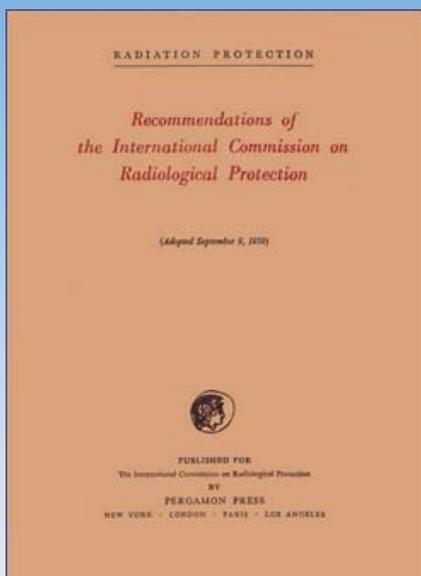
佐々木 康人

2017年12月15日(金) 11:00-12:00
於: 島津ビル イベントホール(東京)

ICRP 刊行物翻訳の長い歴史

ICRP Publication 1

Publ.1 日本語版



ICRP, 1959



アイソトープ協会訳本, 1960.1.25

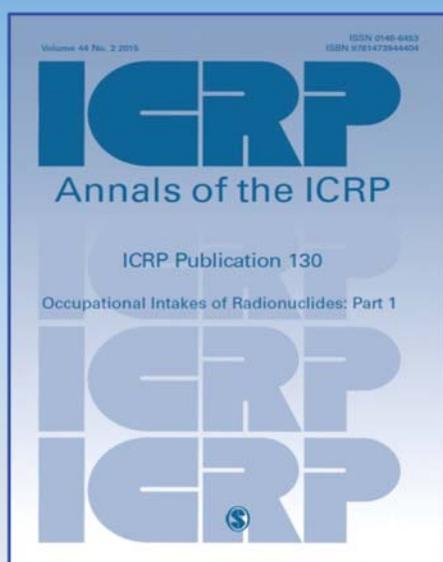
JRIA, 1959 --->> 規制庁, 2017.04~

国内規制に係るICRP刊行物の調査/翻訳事業

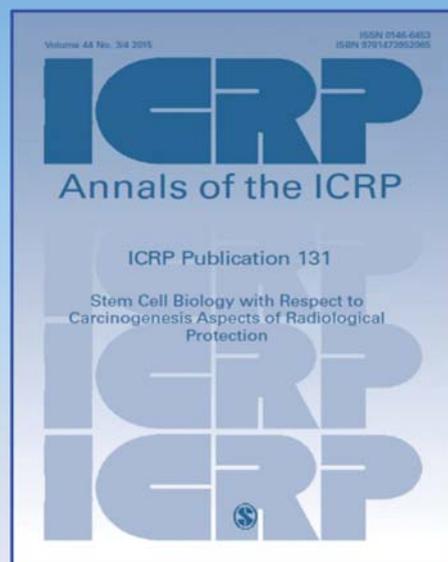
- **Publ.103**以降のICRP刊行物を調査
- **安全規制上 重要 / 緊急性が高い** ⇒ 翻訳
- ICRPの知見を広く共有、規制に資する

From FY 2017, **Nuclear Regulation Authority Japan (NRA)** outsourced a project of
“**Survey and translation of ICRP Publications for domestic radiation safety regulations in Japan**”

2017年度 翻訳開始タイトル-2 *Ongoing translations for FY 2017*



130pt1 作業による放射性核種の摂取



131 放射線防護から見た幹細胞生物学