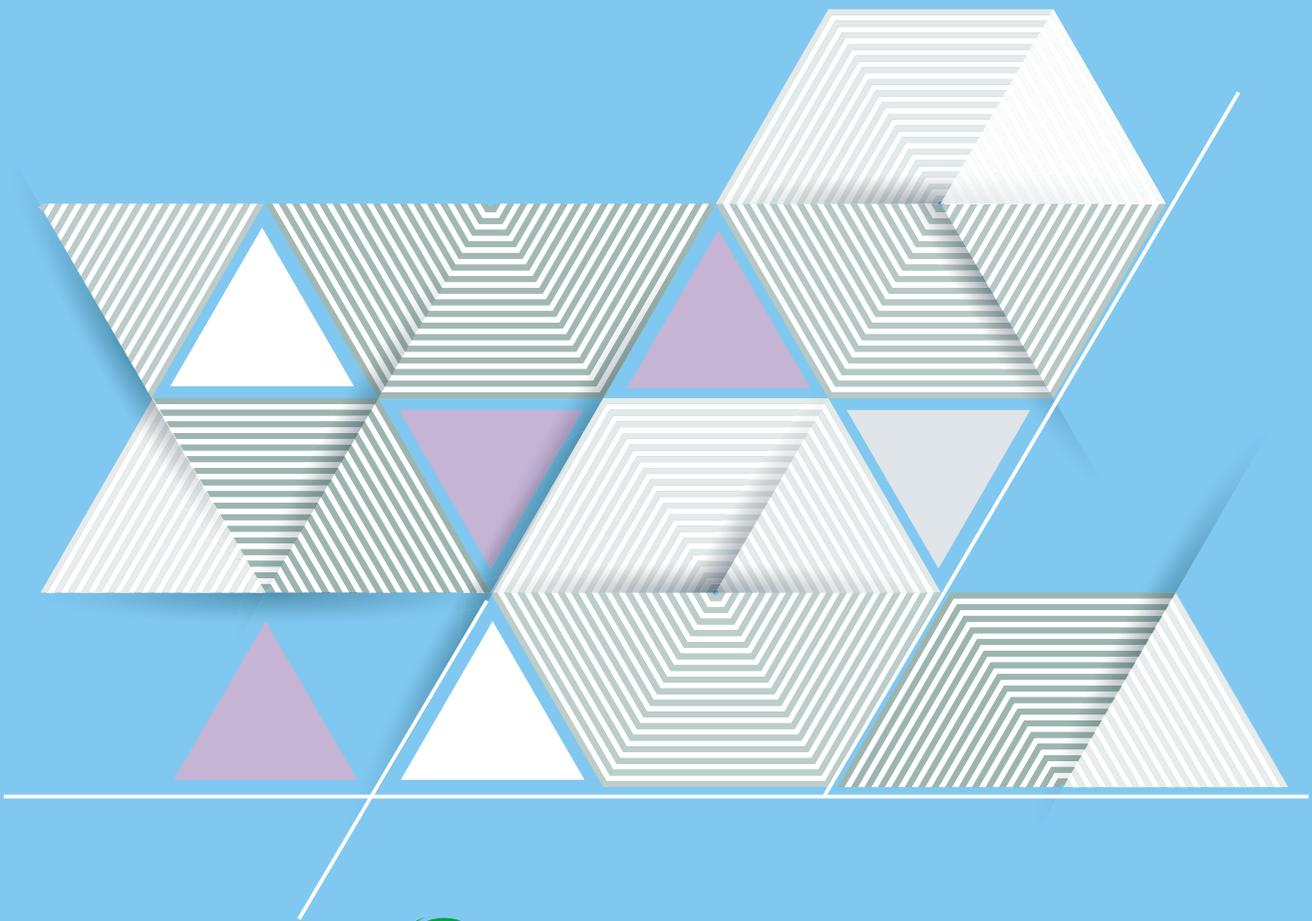


ICRP

Publication 139

IVR における 職業被ばくの放射線防護



原子力規制委員会
Nuclear Regulation Authority

IVR における 職業被ばくの放射線防護

2017年10月 主委員会により承認

ICRP

Publication 139

Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures

Editor-in-Chief

C. H. CLEMENT

Associate Editor

H. OGINO

Authors on behalf of ICRP

P. Ortiz López, L.T. Dauer, R. Loose, C.J. Martin, D.L. Miller,
E. Vañó, M. Doruff, R. Padovani, G. Massera, C. Yoder

Copyright © 2024 Nuclear Regulation Authority, Japan. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published for
The International Commission on Radiological Protection by SAGE Publications Ltd.
Copyright © 2018 The International Commission on Radiological Protection
Published by SAGE Publications Ltd. All rights reserved.

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



Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 139
Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Yoshiharu YONEKURA

Translated by

Masaaki AKAHANE, Kanako KUMAMARU, Yasutaka TAKEI,
Eriko MAEDA, Kosuke MATSUBARA

Editorial Board

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

working in close collaboration with Japanese ICRP & ICRU members.

◆ Committee members ◆

Gen SUZUKI (Chair)

Michiya SASAKI (Vice-chair)

Keiji ODA

Nobuyuki KINOUCHI³⁾

Sachiko SAKODA¹⁾

Hideki HANGAI⁴⁾

Michiaki KAI¹⁾ (Vice-chair)

Kazuko OHNO

Yoshihiko TANIMURA⁶⁾

Isao KAWAGUCHI

Yasuhito SASAKI*

Hiroshi YASUDA

◆ Supervisors ◆

Michiaki KAI (ICRP, MC)

Kotaro OZASA (ICRP, C1)

Kazuo SAKAI* (ICRP, C1)

Jiro INABA* (ICRP, C2)⁵⁾

Yoshiharu YONEKURA* (ICRP, C3)

Toshimitsu HOMMA* (ICRP, C4)

Ohtsura NIWA* (ICRP, MC)

Yoshiya SHIMADA (ICRP, C1)²⁾

Tatsuhiko SATO (ICRP, C2)

Makoto HOSONO (ICRP, C3)

Hiroko YOSHIDA (ICRP, C4)²⁾

Norio SAITO[†] (ICRU)

* Former ICRP member. † Former ICRU member.

¹⁾ From April 2021, ²⁾ From September 2021, ³⁾ Until March 2022, ⁴⁾ From April 2022 until March 2023,

⁵⁾ From June 2022, ⁶⁾ From April 2023.

邦訳版への序

本書は、ICRPの主委員会で2017年10月に承認され2018年8月に刊行された、IVRにおける職業被ばくの放射線防護に関する報告書

Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures
(Publication 139. *Annals of the ICRP*, Vol.47, No.2 (2018))

をICRPの承諾のもとに翻訳したものである。

本書の翻訳は、国際医療福祉大学 赤羽正章氏、順天堂大学 隈丸加奈子氏、川崎医療福祉大学 竹井泰孝氏、東京大学 前田恵理子氏、金沢大学 松原孝祐氏によって行われた。この翻訳稿をもとに、ICRP刊行物翻訳委員会において推敲を重ねるとともに、前ICRP第3専門委員会の米倉義晴氏の監修をいただいて、最終稿を決定した。原文の記述への疑問は原著関係者に直接確認して訂正し、また原文の意味を正しく伝えるために必要と思われた場合は、多少の加筆や修正、訳注を付した。

インターベンショナル・ラジオロジー (IVR) とは、超音波やX線透視やCTやPET-CTなどの画像情報をリアルタイムで参照しながらカテーテルを用いた血管内治療や経皮的治療を行う低侵襲性医療手技のことだ。IVRが普及し始めた当初は、主に放射線科医がIVR術者を務めていたが、IVRの普及につれ、またIVR技術が応用される対象疾患が増えるにつれ、放射線防護の専門知識の乏しい専門医（循環器内科、消化器内科、整形外科など）がIVRを実践するようになってきた。患者さんには低侵襲性のIVRだが、しっかり放射線防護を行わないとIVR術者の線量は高くなりがちで、実際にIVR術者の調査から被ばくによる白内障の前段階の水晶体混濁や皮膚の脱毛といった組織反応（確定的影響）の発生例が報告されている。

IVR治療室の線量分布は極めて不均一で、施術中の線源とIVR術者の位置関係がダイナミックに変化するなどの特徴がある。このため、水晶体や手指・脚の被ばくを低減させるためには、新たに防護機材を増やしたり、個人線量計を複数装着したりして被ばく線量をモニターする必要がある。難しいのは、IVR治療室の線量分布は、それぞれのIVR手技により変わるだろうし、また同じ手技であっても、術者の体格により線源-患

者－術者の脚の位置関係は変わるであろう。IVR 術者に不均一な線量分布を理解してもらい、適切な防護機材（防護エプロン、防護パネル・ドレープ、眼鏡等）の着用・使用を実践してもらう必要がある。従来に増して医療施設の管理者および放射線防護専門家の責任が重くなっている。放射線防護研修の充実、個人線量計による確実な測定と記録保持、そして IVR に伴う線量低減の達成が求められている。

本書「IVR における職業被ばくの放射線防護」は、現実的なハザードとしての放射線の組織反応（確定的影響）を防止するため、IVR を担う医療スタッフのみならず、個人線量計や防護機材の開発業者、医療施設の責任者や規制当局にも読んでもらいたい。

最後に、本書の翻訳チームの一員であった前田恵理子氏が、闘病の甲斐なく令和 4 年 2 月に逝去された。ICRP 刊行物翻訳委員会を代表して心から哀悼の意を表したい。

本書の翻訳の進行と編集は、事務局の原子力安全研究協会（～令和元年度）および日本エヌ・ユー・エス株式会社が担当した。

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

2024（令和 6）年 2 月

ICRP 刊行物翻訳委員会
委員長 鈴木 元

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

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

*本書の校閲担当

監修者

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

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

抄 録

委員会は、最近の刊行物（例えば *Publication 117* および *120*）において、医師やその他の医療従事者に対して、IVR 中に患者と自身を防護するための方策について実践的な勧告を提供している。これらの方策は、放射線防護の要素として枠組みに含まれる場合にのみ、また放射線防護の責任を負う専門職が対応できる場合にのみ有効である。この枠組みには、被ばくモニタリング、防護衣、教育と訓練、およびプログラム実施の品質保証のための戦略を加えた、放射線防護プログラムが含まれる。IVR に関する職業放射線防護に責任を有する専門職には、以下の者が含まれる：医学物理士、放射線防護の専門家、線量測定業務に携わる職員、供給業者および保守業者の臨床応用サポート職員、訓練／装置の標準化／手技に携わるスタッフ、労働衛生の責任スタッフ、資金提供の責任を負う病院の管理者、専門機関および規制当局。本書では、これらの要素と対象者について検討し、以下のような特定の問題について勧告を示す：エプロンを着用したときの線量測定値からの実効線量に関する評価、眼の水晶体の被ばくの推定（防護メガネのあり／なし）、末端部モニタリング、防護衣の選択および検査、職業被ばく線量が異常に高いまたは低い場合の IVR の監査（後者の場合は線量計を装着しなかった可能性を意味する）。

キーワード：職業放射線防護，IVR，被ばくモニタリング，眼の水晶体の被ばく，防護衣

目 次

	頁 (項)
抄 録	v
論 説	xi
序 文	xiii
総 括	xv
用語解説	xxiii
1. はじめに	1
1.1 経 緯	1 (1)
1.2 本書の目的	3 (8)
1.3 本書の適用範囲	3 (10)
2. 課 題	5
2.1 I V R	5
2.1.1 透視下 IVR	5 (12)
2.1.2 CTガイド下 IVR	6 (13)
2.1.3 選択的内部放射線療法のための IVR	6 (15)
2.1.4 IVRにおける陽電子放出断層撮影 (PET) の使用	7 (19)
2.2 IVRにおける放射線の種類とエネルギー	7 (20)
2.3 職業被ばく	8
2.3.1 実効線量	8 (22)
2.3.2 眼の水晶体の等価線量	10 (28)
2.3.3 手の等価線量	12 (32)
2.3.4 下肢の等価線量	13 (36)
2.3.5 選択的内部放射線療法による職業被ばく特有の問題	13 (38)
2.3.6 陽電子放出断層撮影 (PET) ガイド下の IVR による職業被ばく特有の問題	14 (40)
2.4 IVRに関する専門職員に報告されている放射線傷害	15
2.4.1 眼の水晶体の損傷	15 (43)
2.4.2 選択的内部放射線療法において報告されているインシデント	16 (51)

2.4.3	下肢の脱毛に関する報告	16	(52)
2.4.4	脳腫瘍の増加の主張	16	(53)
2.5	被ばくモニタリングにおける課題	17	(54)
2.5.1	個人線量計の誤った使用と不定期的な使用	17	(56)
2.5.2	モニタリング手法を遵守しないことについて考えられる理由	18	(60)
2.5.3	実効線量の評価	18	(61)
2.5.4	眼の水晶体のモニタリングにおける課題	19	(62)
3.	職業上の放射線防護体系の IVR への適用	21	
3.1	放射線防護の諸原則	21	
3.1.1	全 般	21	(63)
3.1.2	放射線を扱う行為と手技の正当化	22	(64)
3.1.3	防護の最適化	22	(65)
3.1.4	線量制限	22	(66)
3.1.5	線量拘束値	23	(70)
3.1.6	異常線量の調査	23	(71)
3.2	区域および作業場の分類	24	(75)
3.3	胚および胎児	24	(76)
4.	個人モニタリングと線量評価	27	
4.1	個人被ばく線量モニタリング	28	
4.1.1	被ばくモニタリングと線量限度の遵守状況の検証	28	(79)
4.1.2	被ばくモニタリングと防護の最適化	28	(81)
4.2	個人線量計の特性とその使用	28	
4.2.1	線量計の種類：パッシブ型線量計とアクティブ型線量計	28	(82)
4.2.2	線量計の特異性	30	(91)
4.2.3	線量計の信頼性および簡易性	30	(92)
4.2.4	線量計の交換期間	31	(93)
4.2.5	IVR における線量計の誤った装着を検出するためのアプローチ	31	(94)
4.2.6	型式試験および校正と、実際の IVR における散乱状態の違い	31	(95)
4.2.7	眼の水晶体用の線量計	32	(96)
4.2.8	線量計および作業者の特定	32	(97)
4.2.9	装着部位	32	(98)
4.2.10	アクティブ型個人線量計の校正	33	(99)

4.3	職業被ばくの評価	33	
4.3.1	実効線量の評価	33	(100)
4.3.2	眼の水晶体に対する等価線量の評価	37	(117)
4.3.3	手の等価線量に関する評価	40	(132)
4.3.4	下肢と足の等価線量に関する評価	41	(137)
4.3.5	選択的內部放射線療法における被ばくの評価	41	(138)
4.3.6	胚および胎児の被ばくの評価	42	(139)
4.3.7	リアルタイムモニタリングのための数値計算法	42	(140)
5.	放射線防護方法とプログラム	43	
5.1	患者の防護とスタッフの防護との関係	43	
5.1.1	患者とスタッフの被ばくを低減する措置	43	(141)
5.1.2	スタッフの被ばくのみを低減するための追加措置	44	(142)
5.1.3	患者とスタッフの被ばくの関係に関するその他の問題	44	(143)
5.2	散乱放射線の分布	44	(145)
5.3	身体の防護	46	
5.3.1	散乱放射線の知識	46	(149)
5.3.2	防護エプロン	46	(151)
5.3.3	軽量エプロン	47	(153)
5.3.4	エプロンの重さに対する独立した支え	48	(158)
5.4	甲状腺の防護	48	(159)
5.5	頭部と眼の防護	51	
5.5.1	天井吊り下げ式のシールド	51	(165)
5.5.2	その他の可動式シールド	52	(171)
5.5.3	防護メガネ	52	(172)
5.5.4	防護対策の併用	55	(186)
5.6	末端部の防護	55	
5.6.1	手	55	(188)
5.6.2	下肢および足	57	(196)
5.7	陽電子放出断層撮影 (PET) / コンピュータ断層撮影 (CT) の IVR における防護	58	(202)
5.8	選択的內部放射線療法における防護	59	(203)
5.9	防護衣の取扱い, 保管および検査	60	(206)
5.10	教育と訓練	61	(209)

5.11	職業放射線防護に関する記録	61	(212)
5.12	品質保証システムの必要性	62	(214)
6.	勧告の要約	65	
6.1	全 般	65	(222)
6.2	個人被ばくのモニタリング	65	(223)
6.3	職業放射線防護の方法および装置	66	(236)
6.4	妊娠中の作業者の防護	67	(243)
6.5	防護衣の保管および品質管理	68	(246)
6.6	品質保証プログラム	68	(249)
6.7	教育と訓練	68	(250)
6.8	記 録	69	(253)
	参 考 文 献	71	
	付属書 A. 放射線防護のための生物学的基礎のまとめ	83	(A1)
A.1	確定的影響 (有害な組織反応)	83	(A2)
A.2	確率的影響 (がんおよび遺伝的影響)	83	(A3)
A.3	子宮内照射の影響	84	(A7)
A.3.1	致死的影响	84	(A8)
A.3.2	器官形成異常 (奇形)	84	(A9)
A.3.3	中枢神経系	84	(A10)
A.3.4	白血病と小児がん	85	(A11)
	付属書 B. 数量と単位	87	(B1)
B.1	吸収線量 (<i>D</i>)	87	(B2)
B.2	線量の平均化: 臓器線量	87	(B4)
B.3	等価線量と放射線加重係数	88	(B6)
B.4	実効線量と組織加重係数	88	(B9)
B.5	損害および損害で調整された名目リスク係数	88	(B12)
B.6	実 用 量	89	(B16)
B.7	線量当量と線質係数	89	(B17)
B.8	環境モニタリングに対する実用量	89	(B18)
B.9	個人モニタリングに対する実用量	90	(B19)

論 説

歴史は戯言に過ぎないのか？

1928年に国際X線・ラジウム防護委員会〔現、国際放射線防護委員会（ICRP）〕が設立された当時、主に懸念されていたことは、医療スタッフの職業被ばくと、その時点で既に確認されていた確定的影響であった。指をなくし皮膚障害を負った医師が写っている古い写真は、現代の臨床医に対して、危険性を認識せず適切な防護をしなかった場合に引き起こされる放射線の影響に強く注意喚起するものとなっている。ICRPが90周年を迎えた2018年に、被ばくを伴う医療従事者（すなわち、IVRに関与する人々）の職業上の放射線防護の検討において重要なことを、今一度1つの刊行物で発表することは、タイムリーな行為である。

電離放射線を用いたIVRは、この数十年間で、診断、治療および緩和という点で医療に革命をもたらし、結果的に、それがなければ不可能であった治療を多くの患者に提供できるようになった。驚くほどの速さで技術が進歩し続けていることから、IVRは複雑性を増し、終了までに数時間かかることさえある。また、新たな技術は、放射線防護に対して新たな課題を突き付けることにもなった。例えば、陽電子放出断層撮影-コンピュータ断層撮影（PET-CT）ガイド下のインターベンションや、選択的内部放射線療法（放射線塞栓療法）などである。

指をなくした写真は、今や過去の話ではあるものの、複数の研究から、IVR術者の眼の水晶体の混濁、また一部の例では白内障の増加が示されている。適切な行為は患者とスタッフの線量低減につながることから、IVRを行う者およびIVRを支援する者を教育し訓練することは、いくら行っても過ぎるということはない。そのような手技について放射線防護プログラムを成功させるためには、医師、看護師、診療放射線技師、医学物理士、規制当局および管理者を含む全関係者により、チームとしての取り組みが必要である。さらに、線量計を含めた个人防护具を着用することの重要性を、スタッフが自覚する必要がある。装着の意志がないため、または高線量が記録された場合は臨床行為を継続できなくなるかもしれないという恐怖心から、線量計と鉛ガラスの防護メガネを装着しないことが非常に多い。IVR術者は、自身の防護について何らかの責任を負うべきであり、自身の防護は、放射線取扱主任者および医学物理士だけの役割であると思いつくべきではない。推奨されている個人の防護が更に遵守されるためには、行動を改めることが不可欠であり、この目標達成には教育が鍵である。

私はこれまで30年近くIVRを行う放射線科医として働いてきた中で、数種の線量計、防護

メガネ、および甲状腺防護具を装着することを忘れないためにはある程度の自制心が必要であることを認識しているが、これらの用具をまとめておくこと、そしていつも同じ準備を儀式的に行うことは困難ではないと考えている。現在、自動車を運転するほぼすべてのドライバーはシートベルトの着用を忘れないと思うし、IVRを開始する際にも、防護について同様にルーチンの準備を含めるべきである。

わずか100年あまり前の1916年のこと（ICRP設立の数年前）、Henry Fordは新聞「Chicago Tribune」のインタビュー記事で次のように述べた。

「歴史は戯言に過ぎない....我々は今日に生きていたいと思うし、ほんのわずかでも価値がある歴史といえ、今日我々が作っている歴史だけだ。」

とはいえ、過去の出来事を振り返り、そこから学習することでのみ、今日と未来のより安全な実践方法を取り入れることができよう。いずれにせよ、電離放射線の利用に関連する勧告とガイダンスを示すことがICRPの仕事の中核であり、本書に述べるとおり、医療はこれを構成する重要な部分である。今日実施されているIVRの一部は、新たに開発される治療法にとって代わられることで、数十年の間に廃れてしまうかもしれない。歴史が「戯言」と考えられるなら、今日まで発展したような放射線防護体系は得られなかったであろう。しかし、我々は今日も間違いなく歴史を作っているということを忘れてはならない。

ICRP 委員長
CLAIRE COUSINS

序 文

国際放射線防護委員会（ICRP）（以下、「委員会」とする）は、長年にわたり、電離放射線に伴うリスクに対する防護について勧告およびガイダンスを発表してきた。*Publication 103*（ICRP, 2007a）では、これら勧告の最新の改訂を示し、また *Publication 105*（ICRP, 2007b）では医療被ばくへの防護原則の適用についてまとめている。

これらの刊行物は、全般的な内容であるが、委員会はさらに、確認されていた特定の問題点、特に急速に進んでいる医療放射線の使用における問題に対応することも決定した。これは、焦点を絞り、かつ、手技に直接携わる者と日常業務で直接関係する者が利用しやすい形式で簡潔な刊行物を作成し、その刊行物が広く読まれるよう努めることにより達成された。

このような簡潔な刊行物の例には、放射線傷害の回避に関する *Publication 85*（ICRP, 2000b）、画像診断部門以外で行われる透視ガイド下手技の放射線防護に関する *Publication 117*（ICRP, 2010a）、心臓病学における放射線防護に関する *Publication 120*（ICRP, 2013a）など、IVRに関連するものがある。これらの刊行物は、IVRに関与する全スタッフメンバーの防護に向けた実践的な勧告を示している。

それでもまだ、病院の管理者、病院の放射線防護を担当するスタッフ、線量測定業務のスタッフ、装置納入業者および保守業者からの臨床応用の専門家、および規制当局から構成される読者は、職業被ばくの評価、職業放射線防護のためのツールと方法について、勧告を必要としている。また彼らは、以下のような特定の問題についても勧告を必要としている：末端部および眼の線量評価（防護メガネあり／なし）、防護衣の選択（例えば、エプロン、甲状腺シールド、防護メガネなど）、エプロンを着用したときの実効線量の推定、職業被ばく線量が異常に高いまたは低い場合のIVRの監査（後者の場合は線量計を装着しなかった可能性を意味する）。これらの問題に関するガイダンスを規定することが、本書の目的である。

作業部会の構成メンバーは以下のとおりであった。

P. Ortiz López（委員長）

R. Loose

D.L. Miller

L.T. Dauer

C.J. Martín

E. Vañó

通信メンバーは以下のとおりであった。

M. Doruff	R. Padovani
G. Massera	C. Yoder

第3 専門委員会の査読者は以下のとおりであった。

K. Applegate	M.M. Rehani
--------------	-------------

第2 専門委員会の査読者は以下のとおりであった。

J. Hunt	J.D. Harrison	N. Petoussi-Henss
---------	---------------	-------------------

主委員会の査読者は以下のとおりであった。

D. Cool	C. Cousins
---------	------------

本刊行物作成期間の ICRP 第3 専門委員会の構成メンバーは以下のとおりであった。

E. Vañó (委員長)	L.T. Dauer	P. Ortiz López
D.L. Miller (副委員長)	S. Demeter	P. Scalliet
M.M. Rehani (書記官)	K. Kang	Y. Yonekura
K. Åhlström Riklund	P-L. Khong	B. Yue
K. Applegate	R. Loose	
M. Bourguignon	C.J. Martin	

総 括

1. 経 緯

(a) 内科系および外科系の多くの専門領域の医師が、看護師と診療放射線技師のサポートを受けて、従来の手術に代わるものとして放射線画像ガイド下のインターベンション（IVR）を行っている。IVRは平均して低侵襲性であり、患者の回復期間は短く、さらに多くの種類のIVRでは従来の同等の手術に比べてその合併症率が低い。加えて、麻酔や従来の手術に耐えられない一部の患者や、従来はアクセスできなかった病変も、今では低侵襲性の画像ガイド下のインターベンションによって治療することができる。

(b) IVRの実施件数は、先進国でも発展途上国でも大幅に増加しつつある。新たな種類のIVRは複雑性も増し、X線撮影を多用する必要が生じ、さらに職業放射線防護の新たな問題が提起されている。IVRを行う放射線科医や循環器内科医のほか、通常は放射線防護の訓練を受けていないその他の専門分野の医師も、現在はIVRの実施者である。

(c) 同じ種類の手技でも職業被ばくには著しい違いが認められている。このことは、放射線防護の行為はまだ改善できることを示唆している。最近行われた眼に関するいくつかの研究においては、例えば国際原子力機関（IAEA）プログラムの調整下で行われた眼の水晶体損傷と線量の後ろ向き評価（Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose：RELID研究）などから、IVR術者が放射線防護の装置を適切に使用しなかったり、放射線防護の原則に従わなかったりした場合、放射線に関連した眼の水晶体混濁の発生率が増加することが報告されている。

2. 本書の趣旨および適用範囲

(d) 委員会は *Publication 117* (ICRP, 2010a) および *120* (ICRP, 2013a) において、IVRに関与する医師やその他の医療従事者に対して、職業放射線防護に関する実践的な勧告を与えた。一方、本書では、被ばくモニタリングの戦略、方法と選択肢に関するガイダンス、放射線防護アプローチと防護衣、その使用と検査、放射線防護プログラムの策定、教育と訓練、およびプログラム実践の品質保証についてのガイダンスを示す。本書の対象者は、医学物理士と職業放射線防護を担当するその他の医療従事者、線量測定業務に携わる職員、臨床応用サポート職員、規制当局、および全般的な安全文化ならびに品質の保証と改善に影響力をもつ全職員である。さらに、本ガイダンスは以下の者にも有用である：訓練、装置の標準化および手技に関わって

いる者、労働衛生に責任を有する者、防護の経済的サポート提供に責任を有する病院のマネージャーと管理者、および専門職員の団体（IVR 術者、医学物理士、看護師、診療放射線技師）。

3. IVR の使用，職業被ばく，および観察された影響

3.1 IVR の使用

(e) IVR は通常透視ガイド下で行われ、X 線シネ様の一連の画像を取得して正常および異常な状態、診断または治療の結果を記録する。IVR はコンピュータ断層撮影（CT）ガイド下でも行われる。通常の CT 画像を用いる場合、IVR 術者は可動式シールドの陰に入るか、または退室して画像を撮影する。CT 透視を用いる場合、IVR 術者は、IVR 装置操作中の画像を得るため室内に留まって患者を撮影する。通常の CT 画像に比した CT 透視の主なメリットは、リアルタイムのモニタリングを用いることで、患者の呼吸やその他の動きに応じて体内で動く病変にアクセスできる、という点である。さらに CT 透視によって迅速かつ効率的な IVR が可能になる。その一方、CT 透視を行った場合、患者、IVR 術者および IVR に関与するその他のスタッフが、比較的高い放射線被ばくを受けるおそれがある。

(f) ^{90}Y 標識マイクロスフェアを用いた放射線塞栓療法 [選択的内部放射線療法 (SIRT)] など X 線画像ガイド下の治療的 IVR は、切除不能の原発性または続発性肝腫瘍患者を治療するための代替法である。複数の病院で、生検および/またはラジオ波焼灼療法のため、IVR 中のリアルタイムの陽電子放出断層撮影 (PET) - CT ガイドの使用を検討している。 ^{18}F - FDG PET - CT 撮影は手術室内で、塞栓または生検を行うべき部位を特定するため、IVR の有効性を確認するため、また残存病変を早期発見するため（例えばラジオ波焼灼療法後には、最大の治療効果を得るために必要に応じて焼灼を反復することができる）に行われる。

3.2 職業被ばくと観察された影響

(g) IVR 術者は適切な防護により、職業被ばくの年間実効線量を 10 mSv 未満に維持することが可能であり、通常は 2 ~ 4 mSv の範囲かそれ以下にあるものの、複数の調査からは、個人の職業被ばく線量はこれらの数値を上回ることがあり、かつばらつきが大きいことが示されている。

(h) 白内障発症のしきい値は以前考えられていた値よりはるかに低いというエビデンスが得られるに従い、眼の水晶体への等価線量に注目が集まっている。委員会は、眼の水晶体の等価線量限度を、年間 150 mSv から、5 年という一定期間の平均値として年間 20 mSv に引き下げ、かつ年間 50 mSv を超える年がないことと勧告している。放射線画像ガイド下のインターベンションという性質上、眼に対する防護対策を取らなかった場合、仕事量が中程度から高度の職員では、眼の水晶体への線量はこの新しい年間等価線量限度を超え、長期間では水晶体の混濁

が生じるおそれがある。

(i) 心臓学会に出席し、かつ IAEA プログラム協力試験 (RELID 研究) に任意参加した心血管 IVR 術者および看護師を対象として、複数の眼科学研究が実施されている。その結果、IVR 術者の約 40～50%と、技師または看護師の 20～40%に、電離放射線の被ばく由来する損傷に一致する後囊下混濁が認められた。IVR 術者における発生率は、対照群とした非被ばく者の 4～5 倍であった (約 40～50%対 10%)。眼の水晶体の生涯吸収線量は、場合によっては数 Gy にも達すると推定された。

(j) 患者の照射体積に最も近いところにある IVR 術者の手の線量は高く、特別なモニタリングを必要とするため、末端部の等価線量は関心が高いかもしれない。治療台の両側に防護カーテンをかけていた場合でも、最大で 110 mSv という年間下肢等価線量が確認されている。この被ばくは防護カーテンと床面との隙間に起因するものであり、この隙間の大きさは照射中の X 線撮影台の高さに依存する。

4. 職業被ばくのモニタリングと被ばくの評価

(k) IAEA の医療、産業、研究における職業被ばくに関する情報システム (Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research : ISEMIR) (IAEA, 2014b) で実施された調査から、心血管 IVR 術者の 76%は常に線量計を使用し、45%は 2つの線量計を使用していることが明らかにされた。本調査は自己申告式であり、真の線量計の使用率を過大評価している可能性がある。さらに、世界では、IVR に携わる専門家に対する線量が適切にモニタリングされていない地域や、個人線量計が日常的に装着されていないことが多い地域もある。

(l) 実効線量の評価に加え、放射線画像ガイド下のインターベンションにおける職業被ばくのモニタリングには、眼の水晶体の等価線量の推定と、場合によっては末端部の等価線量の推定を含めることが望ましい。

4.1 実効線量の評価

(m) 2つの線量計を使用し、1つはエプロンで遮蔽し、もう1つはエプロンの外側で遮蔽せずに襟の高さで使用して、それらの測定値を組み合わせることで実効線量を最も適切に推定できる (過去の委員会刊行物に記載あり)。エプロン内装着の線量計から、十分な遮蔽を行うエプロンを日常的に着用していたというエビデンスも得られる。

4.2 眼の等価線量の評価

(n) 患者の照射部位に近い側の IVR 術者の襟の高さに装着した、エプロン外装着の線量計

は、実効線量の評価に寄与するのみならず、眼の水晶体と頭部の等価線量の合理的な推定も得られる。

(o) 職業被ばく線量を評価するため、数値計算法は改善される必要がある。これには高線量手技における眼の水晶体の等価線量の算定も含まれる。これらの手法は、個人線量計の日常のかつ適切な使用の監査に役立ち、また、追加的な防護（防護メガネなど）の必要性の評価に役立つと考えられる。（眼の線量を含めた）個人線量評価のための、個人の位置検知装置とともに（線量計を必要としない）計算技術の開発を追求する、研究プログラムを進める必要がある。

4.3 末端部の等価線量

(p) 一部の特殊で複雑な IVR における手の等価線量の評価は、将来的により注目していく必要がある。手が直接 X 線ビームに非常に近い場合は、手指用線量計が必要かもしれない。同様に、「足を含めた下肢」の被ばくに関する評価にもより注目していく必要がある。防護カーテンが利用できないとき、またはカーテンと床面の間に隙間があるときは、特に注意しなければならない。この隙間は、IVR 中の台の高さに応じて生じると考えられる。

4.4 線量計の使用に伴うエラーの例と、状況修正のための間接的なアプローチ

(q) エラーの例として、自分に割り当てられた線量計を使用しなかった、エプロン内装着用の線量計をエプロン外で装着した、誤った手の指にリング型線量計を装着した、他者に割り当てられた線量計を装着した、線量計を紛失したなどがある。

(r) 線量評価のための間接的アプローチが、個人線量計装着の遵守不良の特定に役立ち、また個人線量計を使用しなかった場合の職業被ばく線量の推定にも役立つ可能性がある。これらのアプローチは、患者近傍（例えば C アームの位置）における散乱放射線量を測定するための空間線量計の使用、および、患者関連数の量（例えば面積空気カーマ積）をさまざまな手技や配置に応じて作業員の眼の水晶体等価線量に換算する係数の組み合わせに基づくであろう。

5. 職業放射線防護に関するガイダンス

5.1 患者とスタッフの被ばくの関係

(s) 放射線画像ガイド下のインターベンションにおける職業放射線防護は、患者の防護と密に関連しており、患者防護のための大半の措置はスタッフを防護することになる。ただしその他にも、スタッフのみを防護するための防護措置と防護具が存在する。これらの装置の使用は、手技の操作を妨げてはならず、患者の被ばくを増加させてはならない。

5.2 遮蔽装置による防護

(t) X線室内で働くすべてのIVRスタッフは、遮蔽エプロンを装着すべきである。エプロンには通常、0.25 mm、0.35 mm または 0.5 mm の鉛当量が含まれている。ある種のデザインでは、前面を重ねて 0.5 mm の鉛当量の防護とし、他の部分は 0.25 mm の鉛当量となっている。透過率は通常、70 ~ 100 kV の範囲で 0.5 ~ 5% である（すなわち減弱係数は 200 ~ 20）。エプロンは散乱放射線から体幹を防護するが、頭、腕、手および下肢を含むその他の身体部分はエプロンで防護されない。これらの部分については、放射線防護プログラムにおいて検討するべきである。

(u) 頭部の防護において最も重要な要素は、天井吊り下げ式の含鉛アクリル板の適切な使用である。これは、どの程度効果的に配置されるかにも依るが、頭頸部全体の線量を 2 分の 1 ~ 10 分の 1 に低減できることから、IVR の設備に組み入れておくべきである。

(v) 患者の近くに留まる必要があるスタッフ（看護師や麻酔医など）には、彼らと散乱放射線の線源の間に置くことができる可動式（ロール状）シールドにより得られる付加的な防護が有益かもしれない。

(w) (h) 項の記述の通り、防護対策が不足していた場合、職業被ばくとしては、眼の水晶体の等価線量が新しい線量限度を超えるおそれがある。これが長期間にわたれば、水晶体の混濁をもたらす。反対に、IVR の透視装置が正しく操作され、手技のプロトコルが最適化され、術者が訓練を受け、眼の防護ツールが使用されている場合は、眼の水晶体の線量は線量限度を下回るはずである。

(x) 臨床医は X 線照射中に画像モニターを見ることから、眼は横と下側から照射される可能性があり、顔面の輪郭に鉛メガネを隙間なく（特にメガネの横と下側で）密着させることは重要である。

(y) 一部の手技では、天井吊り下げ式のシールドの下端に取り付けた鉛ドレープのほか、シールドドレープやシールドパッドも、手の防護に有効となり得る。術者が散乱放射線の線源（患者の照射体積）の近くにいる必要がある場合、この種の防護を検討するべきである。患者にディスプレイドレープをおく場合、ドレープが一次ビーム内に入らないようにする。入った場合は患者と術者の被ばく量が増す可能性がある。

(z) IVR 中に撮影台近くに立つスタッフは、ビーム入射側の領域で放射線場がより強力であることに注意する必要がある。これは、斜め照射または側方照射のとき特に重要である。寝台の下に X 線管を置いた透視からの、IVR 術者の頭部、上半身および手への線量は、下肢が受ける線量よりも著しく低くなる。

(aa) このことは、下肢の遮蔽カーテンを利用できないとき、また寝台が高い位置にあり

カーテンを設置しても足が防護されないときに、特に当てはまる。ロール状の鉛シールドを利用でき、適切に使用した場合、スタッフの実効線量は90%以上減少する。

(bb) 以上のように、室内の全スタッフは防護エプロンを着用することが望ましい。ビームが照射されているとき、必ずしも常に患者側に体を向けることができない者には、全周を覆うエプロンが望ましい。IVR術者は、可能であれば、天井吊り下げ式のスクリーン、寝台吊り下げ式のカーテン、およびシールドドレープにより防護されるべきである。また、スタッフは高線量撮影モード（例えば一連のシネ撮影、デジタルサブトラクション血管造影法など）の使用の間、および自動注入器による造影剤の注入中に、後退して患者との距離をとることで、線量を低減することができる。看護師や麻酔医など、患者のそばにいる必要があるスタッフには、可動式スクリーンによる防護が有効なことがある。その他の職員は、患者の照射体積からの距離をとることで防護を強化するか、または、可能であれば、シネ撮影中は室外に出るべきである。

5.3 胚および胎児の防護

(cc) 妊婦が妊娠を申告した後、その作業条件としては、妊娠の残りの期間中の胎児の追加線量が1 mSvを超えないことを保証すべきである。

(dd) 現在得られているデータからは、適切な手順に従った場合、妊婦は放射線画像ガイド下のインターベンションをしてはいけないという根拠は示されていない。しかし、妊娠が申告された場合はいかなる場合でも、雇用主は妊娠中の作業員の被ばく状況およびその他の職業上の危険（鉛エプロンの使用に伴う背部痛など）を入念に見直す必要がある。

6. 品質保証

(ee) 定期的な文書のチェックと合わせた品質保証により、放射線画像ガイド下のインターベンションに関与する専門職員が常に自分用の線量計と防護具（メガネを含む）を装着していることを確認することは、非常に重要である。

(ff) 防護具の受入試験は不可欠である。というのも、不良品を含む防護衣の供給が記録されたことがあるためである。さらに、防護具の慎重な取扱い（例えば、折り畳まないようにするなど）と定期的な検査は、品質保証および改善プログラムの一環として必要である（5章参照）。

7. 教育と訓練

(gg) 職業上の安全と放射線防護に関する専門職員の初期教育、継続的な教育、および訓練が必要である。これは特に、安全文化、ならびに画像撮影装置と放射線防護ツール（例えば、

天井吊り下げ式のシールドや鉛メガネおよび遮蔽カーテンなど)の適切な使用に関して重要である。

(hh) リアルタイムのアクティブ型線量計の使用は、特定の高線量の手技における防護の最適化に役立つのみならず、被ばくする線量レベルに関する専門職員の教育にも寄与する。

(ii) 全般的な放射線防護の知識に加え、職業放射線防護を担当する病院スタッフ、線量測定業者のスタッフ、装置納入業者からの臨床応用の専門家および規制当局には、実地臨床、IVRに使用されるX線装置、職業被ばく評価のための戦略、防護方法、および防護衣の選択と検査に関する知識が必要である。

8. 放射線防護の要となる専門職員の配置

(jj) 放射線防護と訓練プログラムの作成と継続を担当する、医学物理士またはその他の職員の役割は重要である。彼らは、IVR術者、診療放射線技師および看護師による適切な放射線防護とケアを最終的に計画して実行するチームの一員である。

用語解説

見出し語は五十音順で配列。
原著の配列順による見出し語訳は本項末尾を参照。

医療被ばく [Medical exposure]

患者が自らの医学または歯学の診断あるいは治療の一部として受ける被ばく；職業上被ばくする者以外の人が、患者の支援や介助に自発的に役立つ間に承知して受ける被ばく；および、志願者の被ばく。

X線透視下またはCTガイド下のインターベンション [Fluoroscopically or computed tomography guided interventions]

X線透視またはコンピュータ断層撮影（CT）を用いて、病変／治療部位を特定し、手技をモニターし、治療を制御および記録するために、経皮的またはその他のアクセスにより、ガイド下の治療的および診断的インターベンションからなる手技で、通常は局所麻酔および／または鎮静下で行われる（ICRP, 2000b）。一部のIVRでは透視装置による三次元（コーンビーム）画像撮影も用いられる。

エプロン外装着の線量計 [Dosimeter over apron]

防護エプロンにより遮蔽されていない線量計。

エプロン内装着の線量計 [Dosimeter under apron]

防護エプロンにより遮蔽されている線量計。

介護者と介助者 [Carers and comforters]

スタッフ以外の、患者の介護や介助を行う者。これらの個人には、両親や他の人たち、通常は家族あるいは親しい友人で、診断手法中に子どもを支える人たち、あるいは放射性医薬品投与後または小線源治療中の患者に近づくことがある人たちが含まれる（ICRP, 2007a）。

確定的影響 [Deterministic effect]

「組織反応」参照。

吸収線量 (D) [Absorbed dose (D)]

電離放射線によりある質量要素の物質に与えられた平均エネルギーを、その質量で除した商。

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

吸収線量は基本的な物理的線量で、あらゆる種類の電離放射線と物質に適用することができる。吸収線量は、そのための一次標準が存在する測定可能な量である。国際単位系 (SI) では、吸収線量の単位は $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、その固有の名称*はグレイ (Gy) である。

グレイ (Gy) [Gray (Gy)]

吸収線量の SI 単位の固有の名称。 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

個人線量当量 [Personal dose equivalent]

個人モニタリングの実用量は個人線量当量 $H_p(d)$ であり、これは人体のある特定点のある適切な深さ d (mm 単位) における軟組織中の線量当量である。個人線量当量の単位は $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、また固有の名称はシーベルト (Sv) である。特定の点は通常、個人線量計を装着する部位で与えられている。実効線量のモニタリングには実用量 $H_p(10)$ を使用し、皮膚、手および足の線量評価には個人線量当量、 $H_p(0.07)$ を使用する。眼の水晶体の線量のモニタリングには、深さ $d=3 \text{ mm}$ が適当である。ただし、実際は多くの国で、 $H_p(3)$ に関する線量計の校正は実施されていない。しかし、光子放射線の同じモニタリング目的に $H_p(0.07)$ を使用でき、これは放射線画像ガイド下のインターベンションにも適用される。

雇用主 [Employer]

相互に合意した関係により、彼または彼女の雇用において、作業者に対し、認知された責任、関与、および義務を負う、国の法律によって指定された組織、法人、共同企業体、企業、協会、信託機構、財産所有者、公共または民間機関、グループ、政治団体または行政団体、あるいは他の私人。自営業者は雇用主と作業者の両方である (ICRP, 2007a)。

作業者 [Worker]

雇用主により、常勤、非常勤、臨時雇用を問わず雇用され、職業的な放射線防護に関係する権利と義務を認識しているあらゆる個人。放射線に関係する医療職の作業者は職業上被ばくする (ICRP, 2007)。

シーベルト (Sv) [Sievert (Sv)]

等価線量、実効線量、および実用線量の SI 単位の固有の名称で、その単位は $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ である。

実効線量 (E) [Effective dose (E)]

人体のすべての特定された組織および臓器における等価線量の組織加重合計であって、次の式で表される：

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

ここで、 w_T は組織または臓器 T の組織加重係数、 w_R は放射線加重係数である。実効線量の単位は吸収線量と同じ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、その固有の名称はシーベルト (Sv) である。

*訳注 これまで「特別な名称」としていたが、国際単位系 (SI) に則して「固有の名称」とする。

確率的影響の誘発に対し感受性があると考えられる人体のすべての臓器・組織にわたって合計する。組織加重係数は年齢と性別について平均化され、両性およびすべての年齢の集団に概数として適用するように意図されている。

実用量 [Operational quantities]

外部被ばくを伴う状況のモニタリングと調査のための実用的な応用に用いられる線量。体内の線量の測定と評価用として定義されている。内部被ばくに関しては、等価線量または実効線量の評価を直接的に提供する実用量はこれまで定義されていない。体内の放射性核種による等価線量または実効線量の評価には別の方法が適用される。それらは主に、さまざまな放射能測定と体内動態モデル（計算モデル）の適用に基づいている。

職業被ばく [Occupational exposure]

次の3項目を除く、作業者がその作業の過程で受けるすべての被ばく。(1) 除外された被ばく、ならびに放射線を含む免除された活動によるまたは免除された線源による被ばく；(2) すべての医療被ばく；および、(3) 通常の地域の自然バックグラウンド放射線。しかしながら、放射線はどこにでも存在することから、委員会は、“職業被ばく”の使用を操業管理者の責任であると合理的に見なすことができる状況の結果として仕事上で受ける放射線被ばくだけに限定する。除外された被ばくおよび免除された行為もしくは免除された線源による被ばくは、一般に、職業被ばくの防護に対して考慮する必要はない（ICRP, 2007a）。

スタッフ [Staff]

本書でのスタッフとは、放射線を用いた手技中に患者のケアに係る医療従事者（例えば医師、看護師、診療放射線技師など）、またはその作業中に医用画像撮影装置からの放射線に被ばくする可能性がある医療従事者（例えば装置のサービス担当者、清掃員など）である（「作業員」参照）。

線量係数 [Dose coefficient]

放射性物質の単位摂取量当たりの線量を表すものとして用いられる。しかし、例えば、特定の放射性核種の単位面積当たり特定の放射エネルギーが沈着している表面から、特定の距離における外部線量率のように、線量または線量率と放射能の量または濃度を関連させる他の係数を述べるために用いられることもある（ICRP, 2007a）。

線量限度 [Dose limit]

計画被ばく状況から個人が受ける、超えてはならない実効線量または等価線量の値（ICRP, 2007a）。

組織加重係数 (w_T) [Tissue weighting factor (w_T)]

身体への均一照射の結果生じた健康損害全体に対する組織または臓器の相対的寄与を表現

するために、組織または臓器 T の等価線量に加重する係数 (ICRP, 1991)。これは以下のように加重される (ICRP, 2007a)。

$$\sum_T w_T = 1$$

組織反応 [Tissue reaction]

しきい線量と、線量の増加に伴う反応の重篤度の増加によって特徴付けられる、細胞集団の傷害。組織反応は「確定的影響」とも呼ばれる。組織反応は場合によっては、生物反応修飾因子を含む照射後の手順によって改善できる (ICRP, 2007a)。

組織反応のしきい線量 [Threshold dose for tissue reaction]

組織反応が 1% 発生すると推定される線量 (ICRP, 2007a)。

組織または臓器 (T) 内の平均吸収線量 (D_T) [Mean absorbed dose in a tissue or organ (T) (D_T)]

組織または臓器 T にわたって平均化された吸収線量 D_T であり、次の式で表される：

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$$

ここで、 ε_T は組織または臓器 T に付与された平均総エネルギー、 m_T はその組織または臓器の質量 (ICRP, 2007a) である。

等価線量 (H_T) [Equivalent dose (H_T)]

次の式で与えられる組織または臓器 T の線量：

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

ここで、 $D_{T,R}$ は組織または臓器 T が放射線 R から受ける平均吸収線量、 w_R は放射線加重係数である。 w_R は無次元量なので、等価線量の単位は吸収線量と同じく $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、その固有の名称はシーベルト (Sv) である。

防護原則 [Principles of protection]

放射線源および制御可能な被ばく状況にある個人に適用される、一連の原則。正当化の原則および防護の最適化の原則は線源に関連したもので、すべての被ばく状況に適用される。線量限度適用の原則は個人に関連したもので、計画被ばく状況にのみ適用される (ICRP, 2007a)。

防護 (および安全) の最適化 [Optimisation of protection (and safety)]

いかなるレベルの防護と安全が、被ばくおよび潜在被ばくの確率と大きさを、経済的・社会的要因を考慮の上、合理的に達成可能な限り低くできるかを定めるプロセス (ICRP, 2007a)。医用画像と放射線治療の手技における放射線防護の最適化とは、線量を「経済的および社会的要素を考慮しつつ、線量を合理的に達成できるかぎり低いレベルに抑えるこ

と」を意味し、患者に対する線量を医療目的に見合うよう管理すること、という表現が最も相当である。

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

線エネルギー付与 (LET) の低い放射線と比べ、高 LET 放射線の高い生物学的効果を反映させるために、臓器または組織の吸収線量に乗じる無次元の係数。ある組織または臓器にわたって平均した吸収線量から等価線量を求めるために用いられる (ICRP, 2007a)。

放射線の確率的影響 [Stochastic effects of radiation]

発生する効果の確率が、その重篤度ではなく、しきい値なしの線量の関数とみなされるような悪性疾患および遺伝性影響。

用語解説の見出し語

〈原著配列順〉

Absorbed dose (D) 吸収線量 (D)	Medical exposure 医療被ばく
Carers and comforters 介護者と介助者	Occupational exposure 職業被ばく
Deterministic effect 確定的影響	Operational quantities 実用量
Dose coefficient 線量係数	Optimisation of protection (and safety) 防護 (および安全) の最適化
Dose limit 線量限度	Personal dose equivalent 個人線量当量
Dosimeter over apron エプロン外装着の線 量計	Principles of protection 防護原則
Dosimeter under apron エプロン内装着の 線量計	Radiation weighting factor (w_R) 放射線加重 係数 (w_R)
Effective dose (E) 実効線量 (E),	Sievert (Sv) シーベルト (Sv)
Employer 雇用主	Staff スタッフ
Equivalent dose (H_T) 等価線量 (H_T),	Stochastic effects of radiation 放射線の確率 的影響
Fluoroscopically or computed tomography guided interventions X線透視下または CTガイド下のインターベンション	Threshold dose for tissue reaction 組織反応 のしきい線量
Gray (Gy) グレイ (Gy)	Tissue reaction 組織反応
Mean absorbed dose in a tissue or organ (T) (D_T) 組織または臓器 (T) 内の平均吸収 線量 (D_T)	Tissue weighting factor (w_T) 組織加重係数 (w_T)
	Worker 作業員

1. はじめに

- 低侵襲性の放射線画像ガイド下の IVR は、さまざまな病変に関して、従来の手術に比べ多数のメリットをもっている。
- 同じ種類の手技でも、職業被ばくには著しい違いが認められている。このことは、放射線防護の行為はまだ改善できることを示唆している。
- また最近の研究から、IVR 術者と IVR に係るその他の専門職員において、放射線に関連した眼の水晶体の混濁（前白内障）の発生率が高いことが明らかになっている。
- IVR 室内において専門職員に対する線量を適切にモニタリングすることは、放射線防護のために不可欠であるが、世界の多くの国や地域では、個人線量計が利用できないか、または日常的に装着されていない。このため、職業被ばく線量に関するデータは必ずしも信頼できるものではないと思われる。
- したがって、職業放射線防護および病院内の安全文化に係るすべての者に対して、指針を示す必要がある。

1.1 経緯

(1) 内科系および外科系の多くの専門領域の医師が、大抵の場合は看護師と診療放射線技師のサポートを受けて、より複雑でリスクが高い従来の手術に代わるものとして、放射線画像ガイド下でのインターベンション (IVR) を行っている (NCRP, 2010)。このアプローチには従来の手術に比べ侵襲性が低い、回復期間が短い、また一部の手技については合併症率が低いなど、複数のメリットがある (NCRP, 2010)。

(2) 医師のなかには、多臓器が関わる IVR を行う者（放射線科医など）や、1つまたは2つの臓器系内での手技を行う者（例えば循環器専門医、消化器内科医および泌尿器科医など）もいる。かつては主に放射線科医が行っていた一部の IVR（例えば下肢動脈疾患治療のための血管内手技など）でも、現在では徐々に血管外科医や循環器専門医が行うようになったものもある (Goodney et al., 2009; Harris et al., 2011)。現在、米国では、放射線科医が行っているのはこれらの手技の 20% 未満であり (Goodney et al., 2009)、また、すべての透視ガイド下 IVR の 35% 未満である (NCRP, 2009)。

(3) 放射線画像ガイド下の IVR の件数が増え、多様化し、さらに新たな種類も加わり複雑性が増しているということは、これらの IVR の有益性が広がり続けていることを意味している。

しかし、それによって被ばく量は増加し、技術の改善により得られる線量低減を相殺しているようである (Kim et al., 2008)。さらには、医療に従事する職員のうち、IVR 術者に対する職業被ばく線量が最も高い (Padovani et al., 2011)。さまざまな医療環境において、専門職員に対する職業被ばく線量の適切なモニタリングが行われておらず、その結果として職業被ばく線量に関する信頼できるデータが得られていない (Padovani et al., 2011; IAEA, 2014b)。個人用モニタリングバッジが常時装着されていなかったり、不適切に装着されていたり (Padovani et al., 2011)、付与されていないことも多々ある。一部の発展途上国では線量モニタリングシステムが運用されていない (Tsapaki et al., 2009)。加えて、各研究で用いる線量計測法が著しく違っていたり (Kim et al., 2008)、線量計の使用数や身体の中の部位に装着すべきかについて合意が得られていないため、報告された線量測定結果の比較も困難である。また、あらゆる種類の手技に関する実効線量をこれ一つで十分に推定できるというアルゴリズムはない、という事実が、どのアルゴリズムを使用すべきかという世界的な合意への到達を困難にしている。

(4) 委員会は、(特にきわめて晩発の) 組織反応の効果が複数あり、そのしきい線量はかつて考えられていたものより低いかもしれないことを示した最近の疫学的エビデンスを検討した。例えば、眼の水晶体に関する事例である (ICRP, 2011)。最近の研究から、放射線防護具を適切に使用せず、放射線防護の原則に従わなかった心血管 IVR 術者において、放射線に関連した水晶体混濁の発生率が増加していることが示されている (Vaňo et al., 1998, 2010, 2013a; Ciraj-Bjelac et al., 2010; Rehani et al., 2011; Jacob et al., 2012)。IVR 術者の手や下肢がかなり高い線量に被ばくし、防護具で遮蔽されていなかった下肢の一部で脱毛が生じたことが観察されている (Balter, 2001)。同じ種類の手技でも術者が被ばくする線量には著しい違いが認められている。このことは、放射線防護の行為はまだ改善できることを示唆している (Kim and Miller, 2009)。

(5) IVRに係る医師は、放射線防護の訓練レベルもさまざまである。例えば多くの国々では、すべての放射線科医がその放射線教育の一環として放射線物理学、放射線生物学および放射線防護と安全性の訓練を受けるが、その他の医学分野の医師に対する放射線に関連したトピックの教育の量はさまざまであり、資格認定プロセスの一環として、これら分野の試験を受けることもそうでないこともある。*Publication 113* (ICRP, 2009b) は教育と訓練、訓練の対象となる専門職員、目的、内容、管理、アプローチ、さまざまな医療従事者の教育と訓練に必要なおよびその時間、認定および資格認定に関する助言と勧告を与えている。

(6) 国内および国際的な複数の医学系学会が、職業放射線防護を改善し職業上の放射線傷害 (眼の水晶体の混濁など) を避けるためのガイドラインを採用している (Miller et al., 2010; Durán et al., 2013)。

(7) 委員会は、IVR 術者および X 線ガイド下のインターベンションに係るその他の医療従事者のために、職業放射線防護に関する実践的な勧告を、*Publication 85* (ICRP, 2000b)、117

(ICRP, 2010a) および *I20* (ICRP, 2013a) において提供している。

1.2 本書の目的

(8) 本書の目的は、職業放射線防護に関するガイダンスを、IVRに関与する職員に対してのみならず、病院の管理者、医学物理士、ならびに職業放射線防護、供給業者からの臨床応用サポート職員、線量測定業者のスタッフ、規制当局、および病院の安全文化全般に影響を及ぼすすべての者に対しても提供することである。

(9) このガイダンスには、職業放射線防護と被ばくモニタリング戦略、防護衣の使用、選択と試験、放射線防護プログラムの開発、プログラム実施のための教育、訓練および品質保証のための、ツールと方法を含めている。

1.3 本書の適用範囲

(10) 本書に示すガイダンスは、コンピュータ断層撮影 (CT)、コーンビーム CT、陽電子放出断層撮影 (PET-CT) および選択的内部放射線療法 (SIRT) を含む放射線画像下インターベンションに適用される。ただし、IVRの大多数は、X線透視ガイド下のインターベンションおよび一連のシネ撮影に関連するものであるため、本書の内容は別に規定する場合を除き、X線撮影下でのインターベンションを意味している。PET-CTとSIRTはIVR室内で行われる、またはIVRと併用されることが多いため、それらに関連する項目も記載している。IVRに関連する数量と単位は付属書Bに要約する。

(11) 本書におけるIVRとは、経皮的またはその他のアクセス経路を介して画像ガイド下で行われる診断的および治療的インターベンションで、通常は局所麻酔および／または静脈内鎮静下で行われ、電離放射線を透視、CTまたはPETの形式で用い、病変または診断／治療部位の特定または特性評価、手技のモニタリング、治療の制御および記録を行うものである。

2. 課 題

- 放射線画像ガイド下のインターベンションの実施件数は、先進国でも発展途上国でも大幅に増加しつつある。新たな種類の IVR は複雑性も増し、X 線撮影を広範に使用する必要があり、それゆえに、職業放射線防護の新たな問題が提起されている。IVR を行う放射線科医や循環器内科医のほか、通常は放射線防護の訓練を受けていないその他の専門医も、現在は IVR を施行している。
- 委員会が勧告した眼の水晶体に関する新しい限度を考えると、眼を防護しなかった場合、眼の水晶体に対する等価線量が手技上の制限線量になると考えられる。
- 最近の研究から、後囊下水晶体変化の発生率が顕著に増加していることが明らかになっている。しかし、適切な防護を行うことで、放射線白内障のリスクを大きく低下することができる。
- 医療放射線安全管理責任者*が、線量低減および放射線防護の最適化のために必要な情報を得るためには、信頼できる被ばくモニタリングが不可欠である。
- PET と SIRT が関連するインターベンションは、新しくかつ多様な放射線防護上の問題点を提起している。しかし、術者の実効線量は、慎重な最適化と放射線場への気配りによって適切な範囲内に抑えることができる。

2.1 I V R

2.1.1 透視下 IVR

(12) 全世界で行われている年間の IVR 件数は大きく増加している。米国では 2006 年、透視下 IVR は患者の医療被ばくにおける 3 番目に多い線源となり、集団実効線量に関して医療被ばくの 14% (0.43 mSv/年) を占めていた (NCRP, 2009)。診断目的の心臓カテーテル検査を含む心血管透視下手技は、透視下 IVR 全体の 28% を占めているが、透視下 IVR の被ばく量の 53% を占めている。欧州 36 カ国における、すべての透視ガイド下 IVR の頻度は 0.03 ~ 2.74% で、全 X 線手技の平均 0.6% を占めている。集団線量に関しては、IVR における医療被ばくの線量は年間 0.001 ~ 0.34 mSv で、全集団線量の 0.4 ~ 28.7% に相当する (EC, 2015)。IAEA プロジェクトの一環として調査された 11 の発展途上国のうちの 7 つの国では、IVR 実施

*訳注 原文では「radiation safety professionals」

件数は2004～2007年に50%増加していた (Tsapaki et al., 2009)。

2.1.2 CTガイド下IVR

(13) IVRはCTガイド下でも行うことができる。実施されるCTガイド下IVRの件数と時間的な傾向に関して得られているデータはかなり少ないが、手技の数や種類が増えてきていることは明らかである。例えば、米国のMayoクリニックにおいて、CTガイド下で実施された画像ガイド下経皮的肺生検の割合は、1996～1998年には66%であったものが2003～2005年には98%に増加した (Minot et al., 2012)。その他は透視ガイド下で実施された。CTは主に超音波または透視ではよく確認できない胸部、腹部および骨盤の小病変または深部病変の生検のガイドに、さらにはその他の手技における針留置のガイドに用いられている。

(14) CTガイド下IVRは、医師が可動式シールドの陰または撮影室の外にいる間に行われる間欠的なCTスキャンにより、またはCT透視（針や装置の操作中に医師が制御する間欠的または連続的なCTの照射）を用いて行うことができる。CT透視では、皮膚刺入部から標的まで針の軌跡を追えるため、CTガイド下生検手技を容易に行うことができる。CT透視はさまざまな非血管系IVRに用いられる (Daly and Templeton, 1999)。これは体液貯留と膿瘍のドレナージ中の穿刺針の誘導；脊椎痛の管理；腫瘍焼灼；および頸部、胸部、脊椎、腹部、骨盤の経皮的針生検に用いられている (Buls et al., 2003; Joemai et al., 2009; Hoang et al., 2011; Trumm et al., 2012)。通常のCTと比べたCT透視の主なメリットは、リアルタイムのモニタリングによって、患者の呼吸やその他の動きの結果として体内で移動する病変にアクセスできる、という点である。これを使用することで、IVRをより迅速かつ効率的に行うことができるため (Gianfelice et al., 2000b)、広く行われるようになってきている。その一方で、CT透視では患者および術者である医師の双方に比較的高い線量が照射される (Gianfelice et al., 2000a; Saidatul et al., 2010; Kim et al., 2011)。CT透視画像は通常のCTに比べてノイズが多いことから、この手法は、主に肺生検など高コントラストの可動病変の場合に用いられる。

2.1.3 選択的内部放射線療法のためのIVR

(15) 原発性または転移性肝がん患者で、診察時に治癒可能な患者は20%にも満たない。したがって、切除不能の肝腫瘍患者には、 β 線のみを放出する ^{90}Y 標識マイクロスフェアを用いた放射線塞栓療法のためのIVR (SIRT) などの姑息的療法、およびその他の局所領域の治療が、代替的な治療法となっている (Camacho et al., 2015)。

(16) 肝動脈にカテーテルを挿入した後、 ^{90}Y マイクロスフェア（最大 β 線エネルギー2.27 MeV、半減期64.1時間）を透視下で投与する。樹脂製マイクロスフェア (SIR-Spheres, SIRTEx, オーストラリア Lane Cove；直径20～60 μm) およびガラス製マイクロスフェア (TheraSphere, Nordion, カナダオンタリオ州オタワ；直径22 μm) という、2種類の ^{90}Y マイ

クロスフェアが使用されている。悪性腫瘍病変は主に肝動脈から血液が供給されているということがSIRTを行う根拠である。SIRTは患者の生存期間を有意に延長させることが実証されている (Bester et al., 2012)。

(17) SIRTは通常次の2つの段階で実施されている。第1段階では、血管造影検査を非標的動脈の保護的な塞栓と組み合わせて行う。次に、 ^{99m}Tc -MAA粒子を肝動脈に注入して肺と上腹部の単光子放射型コンピュータ断層撮影 (SPECT) を行い、肺へのシャント率を推定する。肺へのシャント率が10%未満の場合、 ^{90}Y 放射能全量を投与するSIRTが許容される。シャント率が10～20% (SIRTEX) の場合、 ^{90}Y 放射能を減量する (20～40%減らす) ことが望ましい。シャント率が20%を超える場合、SIRTは禁忌である。第2段階は、通常、1日以上後に、肝動脈またはその他の肝腫瘍に供給している動脈にカテーテルを挿入し、マイクロスフェアを投与する。この第2段階では、非標的動脈の一時的なバルーンによる閉塞または逆流防止カテーテルの挿入が、マイクロスフェア投与前の保護的な塞栓の代替法となり得る (Hagspiel et al., 2013; Fischman et al., 2014)。

(18) 第2段階では、線量の計算、 ^{90}Y マイクロスフェアの作製、およびカテーテルを介した肝動脈への投与を行う。典型的な放射エネルギーは、樹脂製マイクロスフェアの場合2～3 GBq (Jakobs et al., 2007)、ガラス製マイクロスフェアの場合3～7 GBqである (Andrews et al., 1994)。標的線量は通常120 Gy (80～150 Gyの範囲) である。核種の分布は、プラナー像あるいは制動放射SPECTまたはPET-CTにより検討することができる。PET-CTは空間分解能が高く、投与される放射エネルギーをより正確に定量化できる (Camacho et al., 2015)。

2.1.4 IVRにおける陽電子放出断層撮影 (PET) の使用

(19) PETは、CTまたは磁気共鳴画像法によっても不明瞭、描出困難、または検出されない代謝の活発な標的に対する画像誘導技術を提供することから、IVRにおける役割を増しつつある (Ryan et al., 2013a)。複数の病院はその研究プログラムの一環として、生検および／またはラジオ波焼灼療法などについて、IVR中のリアルタイムのPET-CTガイドの使用を検討している (Purandare et al., 2011; Venkatesan et al., 2011; Ryan et al., 2013a; Aparici et al., 2014; McLoney et al., 2014)。また、X線CTとPET撮影を用いたリアルタイム・フュージョンイメージングの開発も現在進んでいる (Purandare et al., 2011; Beijst et al., 2016)。IVR室でPETとマルチモダリティのフュージョンイメージングを使用することは、有効な塞栓部位または生検部位の特定に役立ち、また治療効果の迅速な評価も可能にすると考えられる。

2.2 IVRにおける放射線の種類とエネルギー

(20) 大半のIVRは、透視と一連のシネ撮影を組み合わせて行われる。ビームスペクトル

は管電圧とろ過により変化し、管電圧は 50 ~ 125 kVp の範囲であり、最大 1 mm の銅のろ過が付加される (NCRP, 2010)。線質と操作パラメータ (管電圧と管電流、パルス幅、多くの場合ビームろ過など) は、システムの自動露出制御により決定される (NCRP, 2010)。低線量率モードの透視には透過力の高いビーム (高い kVp とろ過) を用い (例えば 88 ~ 114 kVp, 半価層 8 ~ 10 mm Al), 一方でシネ撮影モードには低い管電圧 (例えば 68 ~ 84 kVp, 半価層 3.5 ~ 4.0 mm Al) を用いる (Principi et al., 2014)。一部の装置では、低い管電圧 (ヨウ素含有造影剤をより適切に描出するため) と高いろ過率 (低い管電圧に伴う高い患者線量を制限するため) により、シネ撮影のためのスペクトル整形が行われる (NCRP, 2010)。職業被ばくに最も関連する、患者周囲の散乱放射線の分布については、5 章で考察する。

(21) CT 透視の場合の管電圧は 80 ~ 140 kVp の範囲である。 ^{18}F -FDG を用いた PET-CT 検査の場合の光子エネルギー (511 keV) は、通常の IVR における散乱光子のエネルギーに比べてきわめて高い (NCRP, 2010)。SIRT 手技に使用する ^{90}Y からの最大 β 線エネルギーは 2.27 MeV である。IVR の大多数は、X 線ガイド下の手技に関連するものであるため、本書の内容は、別に規定する場合を除き、X 線ガイド下の手技を意味している。

2.3 職業被ばく

2.3.1 実効線量

(22) 職業被ばくに関するデータの要約および集計結果が得られている (Kim et al., 2008, 2012; ICRP, 2010a; NCRP, 2010)。手技にあたる IVR 術者は、職業被ばくの年間実効線量を 10 mSv 未満に維持し、通常は実効線量を 2 ~ 4 mSv 以下の範囲にすることが確実に可能であるものの (Miller et al., 2010), 調査からは、個人の職業被ばく線量はこれらの数値を上回ることがあることが示されている (Padovani et al., 2011)。

(23) スタッフが受ける年間実効線量は、チーム内での職務と役割 (第一 IVR 術者、診療放射線技師、看護師、麻酔担当者など)、IVR 手技の件数、症例の医学的な詳細および複雑性、患者集団 (例えば小児患者、肥満患者など)、その他の因子 (IVR 術者の技能、装置、透視やシネ撮影の使用時間) に応じて異なる。Martin (2009) は文献のレビューを行い、年間 500 件の心血管手技に従事した場合、第一 IVR 術者の年間実効線量は約 2 mSv になるであろうと推定した。Glasgow 病院の循環器専門医の場合、最大年間線量は 1.2 mSv [エプロン内で測定した $H_p(10)$] であった (Martin, 2009)。1 回の手技当たりの IVR 術者の実効線量が $10 \mu\text{Sv}$ を超えるその他の種類の手技では、甲状腺シールドの使用の有無によって年間実効線量が 10 mSv に達する可能性がある。Lie ら (2008) は、エプロン内外に 1 つずつ装着した 2 つの線量計の測定値を組み合わせて得られる年間実効線量は、最大で 11 mSv, 平均で 5 mSv であったと報告した。米国の線量測定サービス提供業者が 2011 年から 2012 年に実施した、月別実効線量 (E)

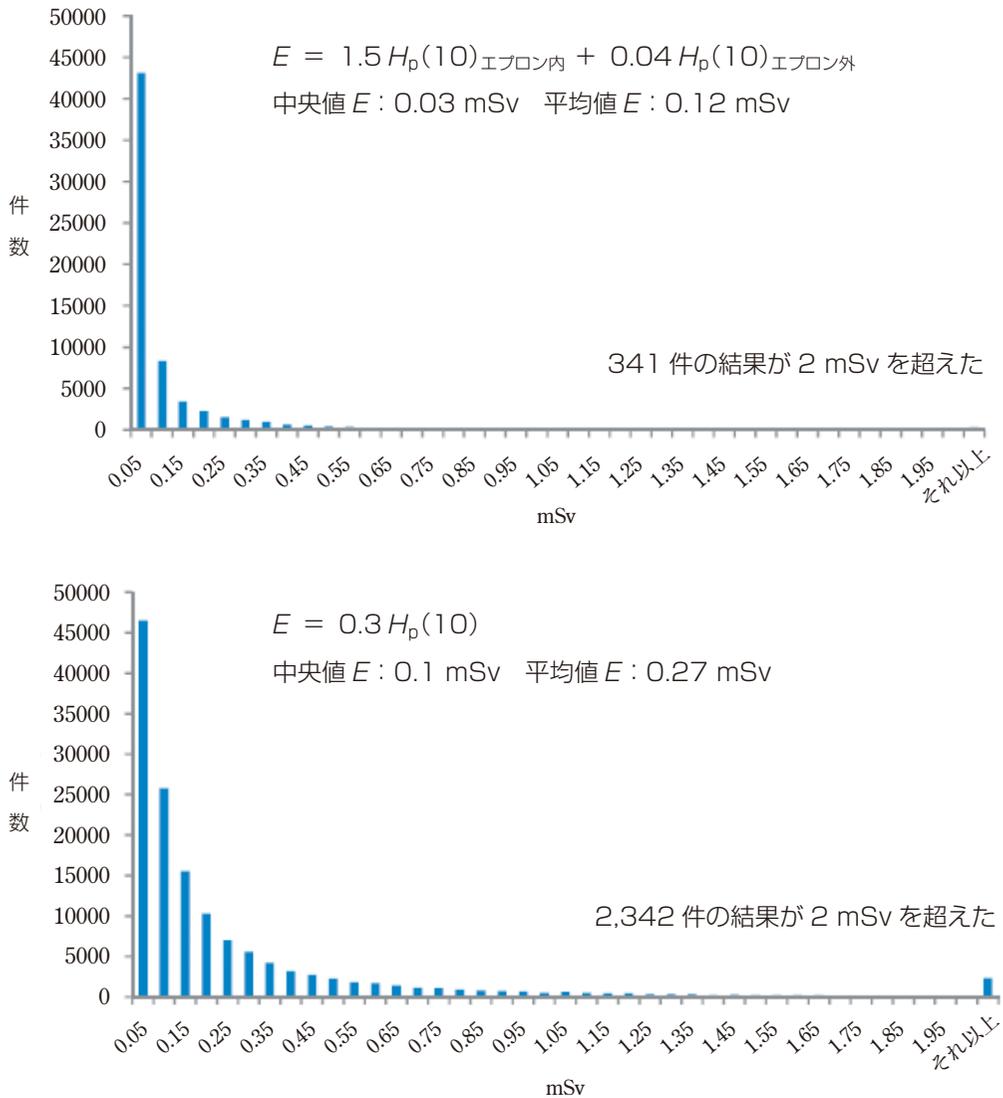


図 2.1 2つの線量計（1つはエプロン外，1つはエプロン内）で評価した実効線量（ E ）の分布（上図）と，1つの線量計（エプロン外）で評価した実効線量の分布（下図）（Yoder and Salasky, 2016）

の結果を図 2.1 に示す。合計で，2つの線量計でモニタリングされた作業員からの 102,199 点の測定値（エプロン内外で 1点ずつ）と，エプロン外の襟の高さに装着した1つの線量計でモニタリングされた作業員からの 196,526 点の測定値が得られた。その結果，推定実効線量の平均値はそれぞれ 0.12 mSv と 0.27 mSv であり，中央値はそれぞれ 0.03 mSv と 0.1 mSv であることが確認された（Yoder and Salasky, 2016）。

(24) Sánchezら(2011)*は、1,467件の手技を実施した43名の作業者に関する研究で、エプロン内線量の月別の中央値は、循環器専門医で0.11 mSv、看護師で0.01 mSv未満であることを明らかにした。エプロン外の線量は、循環器専門医と看護師でいずれも0.4 mSv/月であった。著者らは、おそらく50%もの循環器専門医が線量計を正しく装着せず、しばしばエプロンの外の線量計を装着するのを忘れたのではないかと記述している(Sánchez et al., 2011)*。9種類の手技をドイツの14病院で行った39名の医師と9名の助手を対象とした多施設共同研究から、遮蔽なしの者での1回の手技当たりの全身線量の中央値は16 μ Svであり、1回の手技当たりの局所等価線量は眼の水晶体で2.8 μ Sv、甲状腺で4.1 μ Sv、片足で44 μ Sv、片手で75 μ Svであることが示された。手で高線量の被ばくが測定され、場合によっては、500 mSvの限度値を超えていた(Häusler et al., 2009)。

(25) 第一IVR術者と同様、麻酔担当者など他のスタッフも重大な被ばくの可能性がある。Kongら(2015)は、麻酔担当者の放射線被ばくはその仕事量に左右されるのみならず、IVR中の位置とビームの方向によっても大きく異なることを明らかにした。ビームの方向によって、実効線量は10倍変化し、眼の水晶体の線量は200倍変化した。患者に近い位置で左側から照射されることで、被ばく量は高くなった。麻酔器具を適切に配置することが、被ばくの低減に有用であることが確認された。

(26) CT透視ガイド下IVRによる職業被ばくに関して得られているデータは少ない。被ばく線量が最も高い部位は、医師の手、眼および甲状腺である(Saidatul et al., 2010)。甲状腺シールドの使用は、特に若手医師にとって重要であり、甲状腺をかなり防護することができる(Saidatul et al., 2010)。平均患者線量は手技の種類に応じて異なるため(Leng et al., 2011)、症例当たりの医師の平均実効線量も、予想通り手技の種類に応じて異なる。エプロン外で測定・報告された数値は $H_p(10)$ では2~25 μ Svで、その最高値は1回の手技当たり0.4 mSvにも達した(Paulson et al., 2001; Teeuwisse et al., 2001; Joemai et al., 2009)。職業被ばく線量を低減できる、多様な技術的アプローチと防護方法が開発されてきている(Daly and Templeton, 1999; Paulson et al., 2001; Carlson et al., 2005; Hoang et al., 2011)。

(27) 経カテーテル大動脈弁置換術または経カテーテル大動脈弁植込み術による職業放射線被ばくは、そのアプローチ(経大腿動脈または経心尖)に応じて異なる。Shatilaら(2015)は単一手技について、第一術者のエプロン外装着の線量計から、最大で0.23 mSvという $H_p(10)$ 値を認めた(中央値0.11 mSv)。また他の作業者10名中8名でも顕著な被ばくを認めた。

2.3.2 眼の水晶体の等価線量

(28) しきい線量が、従来考えられていたより低いかもしれない組織反応、特にきわめて

*訳注 原文では2012年となっているが、2011年为正。

晩発であることを示唆する疫学的なエビデンスを検討した後、委員会は *Publication 118* の一部として 2011 年に声明を発表した (ICRP, 2012)。眼の水晶体について、吸収線量のしきい値は現在 0.5 Gy であると考えられている。計画被ばく状況における職業被ばくについて、委員会は現在、眼の水晶体の等価線量限度を、5 年という一定期間の平均値として、年間 20 mSv でかつ年間 50 mSv を超える年がないことと勧告している。防護メガネを装着しない場合、眼の水晶体の線量は手技上の制限線量になり得る (Lie et al., 2008; Korir et al., 2012) とともに、改定後の線量限度を超える可能性もある。

(29) 眼の被ばくに関する大半のデータは、ファントムを用いた静的実験から、または、頸部の個人線量計から導いたものである。しかし、いくつかの研究は、額の眼の近傍に線量計を装着して行われている。Lie ら (2008) は 144 件の手技 (主に心血管手技) について、左眼近傍と両眼の間に熱ルミネッセンス線量計 (TLD) をおき比較した。眼の水晶体の等価線量の中央値は、1 回の手技当たり $23 \mu\text{Sv}$ であり、患者に対する一次ビームの面積空気カーマ積は $0.4 \mu\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ であった。左眼の方が X 線発生装置に近かったことから、両眼の間の測定値よりも高い傾向があった。Kicken ら (1999) はアンダーテーブル型およびオーバーテーブル型の X 線装置における、前頭部の吸収線量を評価した。その結果、1 番目の病院における 1 回当たりの平均吸収線量は術者で $8 \mu\text{Gy}$ 、助手で $6 \mu\text{Gy}$ であること、また 2 番目の病院では術者で $16 \mu\text{Gy}$ 、助手で $14 \mu\text{Gy}$ 、3 番目の病院では術者で $43 \mu\text{Gy}$ 、助手で $28 \mu\text{Gy}$ であることを確認した。最初の 2 病院ではアンダーテーブル型の装置を用い、3 番目の病院ではオーバートューブ型の X 線装置を用い、頭部の位置は患者照射容積のビームの入射側であった。Vañó ら (2016) はエプロン外で測定した線量から、眼の水晶体への線量を導き、腎結石摘出術 1 件当たりの泌尿器科医の眼の水晶体への線量を、心血管 IVR 術者および放射線科医が受けた線量と比較した。その報告では、泌尿器科では防護シールドを使用しなかったことから、手技 1 件当たりの泌尿器科医への線量は、天井吊り下げ式シールドを使用した心血管 IVR 術者が受けた線量の 18.7 倍であったと結論づけられた。

(30) 医療従事者の放射線防護の最適化に関する欧州の研究において、TLD による測定とモンテカルロシミュレーションが、3 件の心血管インターベンションと 5 件の IVR について行われた (Vanhavere et al., 2012)。この選択は、年間作業被ばく量に対する影響の可能性 (高頻度または面積空気カーマ積が高値、あるいはその両方の手技) に基づいたものである。術者は、下肢と腎動脈の塞栓術ならびに経皮的血管形成術 (PTA) によって著しく被ばくした。脳と頸動脈手術の間、通常は大腿動脈アクセスが選択され、術者は患者の照射部位からさらに離れて立つことになるため、胸部または腹部領域で実施される他の手技に比べ、術者に対する線量は比較的低い。デジタルサブトラクション血管造影法 (DSA) と PTA による眼の水晶体の等価線量は約 $40 \mu\text{Sv}$ であり、塞栓術の線量は最大で $120 \mu\text{Sv}$ であった。この測定に含まれた心血管インターベンションのうち、ペースメーカーと心臓除細動器の留置による術者への線量

は高かったが、面積空気カーマ積は比較的低かった。これは、これらの手技においては透視のみが用いられたためである。これらの手技から高い職業被ばく線量が生じる理由は、術者が照射野にごく近いため、そしてシールドを使用せずに作業することが多いためである。眼の平均線量は 40 ~ 60 μSv の範囲内である。

(31) その他の調査から、一部のインターベンション医師の眼に対する年間等価線量は 50 ~ 100 mSv の範囲に入る可能性が示されている (Vaño et al., 2008a; Ciraj-Bjelac et al., 2010; Thornton et al., 2010; Koukorava et al., 2011; Jacob et al., 2013; Martin and Magee, 2013; IAEA, 2014b; Principi et al., 2015)。したがって、業務量の多いインターベンション医師の眼の水晶体の線量は、適切な放射線防護措置を導入しない限り、眼の水晶体に関する改定後の線量限度である 20 mSv を容易に超える可能性がある (ICRP, 2012)。

2.3.3 手の等価線量

(32) 末端部への線量は、特に X 線発生装置または X 線ビームの経路に最も近い医師または助手の手においては、体幹での線量に比べてかなり高いことがある。このことは、手を特にモニターする必要性を示唆する。あまり一般的ではないが、防護シールドが X 線管より十分に下まで、つまり足の高さまで届いていない場合には、足の線量測定が必要となることもある。Felmlee ら (1991) は Mayo クリニックの 30 症例 (経肝胆管造影および胆道系手技・腎瘻造設を含む) に関する手の線量を、他の 3 試験の結果と比較した。手で測定された最大吸収線量は 5.5 mGy で、1 回の手技当たりの線量の中央値は約 1 mGy であった。引用されたその他の試験は、1 回の手技当たりの手の線量を 0.01 mGy (神経学的手技) から 0.4 mGy (末梢血管造影検査) と報告していた。Whitby と Martin (2005) は 18 件の調査を検討し、1 回の手技当たりの手の線量を 0.01 ~ 約 2 mGy と報告していた。手の線量に影響する重要な因子には、手技の種類、使用した X 線装置、術者の専門技能、および (特に) アクセス経路があった (肥満患者では大腿動脈への順行性アクセスは困難である可能性があり、それにより高線量となることがある)。Sauren ら (2011) は、経心尖アプローチによる経カテーテル大動脈弁置換術または経カテーテル大動脈弁植込み術の場合、1 回の手技当たりの手の線量は約 2 mSv と報告した。

(33) 医療スタッフの放射線防護の最適化に関する研究 (ORAMED) において、下肢の DSA/PTA における左手に対する 1 回の手技当たりの平均等価線量は約 240 μSv であり、塞栓術では約 320 μSv であり、脳の DSA/PTA 手技では約 60 μSv であった。除細動器の植込み術における左指で記録された平均線量は 410 μSv であったが、心血管造影/血管形成術およびラジオ波焼灼療法ではそれぞれ 180 μSv と 60 μSv であった (Vanhavere et al., 2012)。

(34) Felmlee ら (1991) は、12 cm \times 15 cm の照射野、ファントムの入射吸収線量率が約 65 mGy/分、射出点の線量率は 0.7 mGy/分という条件にてさまざまな距離で散乱測定を行った。側方散乱線の線量率は 0 cm の距離で 0.7 mGy/分、5 cm の距離で 0.35 mGy/分、15 cm の

距離で 0.13 mGy/分であった (Felmlee et al., 1991)。報告された手の線量のばらつきは、X 線ビームの付近では線量の勾配が大きいこと、手の動きと位置、および IVR が大腿動脈／経皮的／内頸静脈などどこからカテーテル挿入を行うかによって医師が患者と X 線管に対してさまざまな位置をとること、によって説明されている (Whitby and Martin, 2005; Martin, 2009)。オーバーテーブル型 X 線装置の場合、一次ビームからの散乱が大きいことで、手の線量が非常に多くなる傾向もある。

(35) CT 透視において技術的に不十分な場合、医師の手が直接ビーム下におかれ (Buls et al., 2003)、それによって数分以内に年間線量限度の 500 mSv に達することがある。

2.3.4 下肢の等価線量

(36) Artschan ら (2014) はファントムへの照射から、腹部手技に使用する照射因子を再現して、さらに患者に実際の IVR を行う放射線科医から、職業被ばくの実効線量を決定した。その結果、治療台の両側に防護カーテンをかけていた場合でも、最大で 110 mSv という年間下肢等価線量が確認されている。この被ばくは防護カーテンと床面との隙間の存在に起因するものであり、この大きさは治療台の高さに依存する。そのため、比較的高い台を必要とする手技 (例えば胆道系手技) および背の高い IVR 術者の場合、下肢に高い線量が照射されると考えられる。

(37) 研究グループは、防護なしの場合、下肢の線量は手の線量を超えることが多く、防護なしの場合の 1 回の手技当たりの平均下肢線量は 0.19 ～ 2.61 mSv であり、防護カーテンを用いた場合は 1 回の手技当たり 0.02 ～ 0.5 mSv であることを確認した (Artschan et al., 2014)。ORAMED の調査から、下肢線量は 160 ～ 250 μ Sv であることが示された (Vanhavere et al., 2012)。

2.3.5 選択的内部放射線療法による職業被ばく特有の問題

(38) SIRT のさまざまな段階で種々の専門職員が被ばくする：

- ^{90}Y マイクロスフェアの使用前の調製および校正中には、核医学技師または放射性医薬品の専門薬剤師が被ばくする。
- 肝動脈に経カテーテル的に投与する間、IVR 術者とその他のスタッフが被ばくする。
- 手技後から患者の退院まで看護師が被ばくする。

(39) SIRT に伴う職業被ばく線量に関しては、数件の論文しか発表されていない。SIRT 手技による職業被ばくは、比較的低線量率の X 線と直接的な β 線照射により、特に手に対して、注意が不十分である場合に高線量率で引き起こされる。個々の患者への投与量を準備する作業者に対する線量、およびマイクロスフェアを注入する医師の手に対する線量に加え、重大な汚染の危険性もある。このような危険性を軽減するための特別な助言を 5 章に示す。被ばくデー

タは、5 mL シリンジに触れたときは皮膚等価線量率で $43.5 \text{ mSv} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ であり、皮膚表面 1 cm^2 を $50 \mu\text{L}$ で汚染された場合は $1.35 \text{ mSv} \cdot \text{kBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ である (Kemerink et al., 2012)。

2.3.6 陽電子放出断層撮影 (PET) ガイド下の IVR による職業被ばく特有の問題

(40) ^{18}F -FDG は 511 keV の光子エネルギーを持つが、これは CT および透視ガイド下の手技から生じる典型的な散乱光子エネルギーに比べてはるかに大きい (NCRP, 2010)。複数の研究において、PET 検査を受けた患者の線量が評価されている (Chiesa, 1997; Benatar et al., 2000; White et al., 2000; Seierstad et al., 2006; Heckathorne and Dahlbom, 2008; Hippelainen et al., 2008; Nye et al., 2009; Demir et al., 2010; Quinn et al., 2016)。これらから、 ^{18}F -FDG 注射直後における患者胸部前方の周辺線量当量率の合理的な代表値は、1 m で約 $0.09 \mu\text{Sv} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、30 cm で約 $0.37 \mu\text{Sv} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ であることが示された。これらの数値は、計画立案および作業者の前向きな線量評価の目的で、所定の時間と距離に対して確実に増減できる。測定部位によっては、より低い数値が測定されている (Quinn et al., 2016)。

(41) PET-CT ガイド下の生検は一般的ではないが、がんの可能性のある領域を通常の CT では十分に特定できない場合に施行される (Werner et al., 2011; Aparici and Win, 2014)。PET-CT ガイド下の IVR には、通常 ^{18}F -FDG が用いられる。Ryan ら (2013 b) は職業放射線被ばくを定量化し、1 回の手技当たりの実効線量の中央値 (範囲) が、第一術者では 0.02 (0 ~ 0.13 の範囲) mSv、看護師と麻酔担当者では 0.01 (0 ~ 0.05 の範囲) mSv、診療放射線技師では 0.02 (0 ~ 0.5 の範囲) mSv であることを確認した。術者の末端部の等価線量の中央値 (範囲) は、1 回の手技当たり 0.05 (0 ~ 0.62 の範囲) mSv であった。作業者の放射線被ばくは、手技の時間および検査室内での画像ガイドの使用と関連していた。著者らは結論として、PET-CT ガイド下 IVR による術者の実効線量は、透視ガイド下の手技による一般的な線量と有意差がない、と述べていた。PET-CT ガイド下 IVR による術者の放射線被ばくの重要な決定因子は、患者の近傍にいる時間である。新規の PET アイソトープが開発されたことで、患者付近の線量プロファイルが多様化したと考えられる (Holland et al., 2010; Williamson and Dauer, 2014)。

(42) ^{18}F -FDG による指先の線量については、Sánchez ら (2015) が、FDG の調製および投与用の完全自動化システムの使用による線量低減を測定した。その結果、放射性医薬品の調製による診療放射線技師の指先の平均皮膚線量は、 $223 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$ から $83 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$ (63%) に低減することが示された。また、患者への投与による看護師の指先の平均皮膚線量は、 $83 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$ から $11 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$ (87%) に低減した。設定投与量と実投与量の放射エネルギーの違いは 2% であった。

2.4 IVR に関する専門職員に報告されている放射線傷害

2.4.1 眼の水晶体の損傷

(43) 電離放射線によって眼が被ばくすることで、混濁に至る水晶体の特徴的な変化が生じる。そのような混濁の初期段階では視覚障害を引き起こさない可能性があるものの、線量に伴ってそのような変化の重症化が進み、視力障害性の病変に向かう。そのような変化の潜在的な可能性は、線量と逆相関している (ICRP, 2012)。一般的な透視下の作業条件で、放射線防護具を日常的に使用しない場合、患者付近で作業する IVR 術者、その他の医師、および／またはスタッフの眼に対する X 線被ばくは高くなり得る。

(44) IVR 術者における放射線誘発性混濁の最初の症例報告の 1 つは 1998 年に発表された。この放射線傷害が生じた理由は、最適化されていない IVR 室を使用したため、ならびに放射線防護プログラムを用意していなかったためであった (Vaño et al., 1998)。2004 年、Haskal は 59 名の IVR 術者を対象に X 線に関連した水晶体の変化を検討したパイロット研究の結果を発表した。スクリーニング例の 37% に、放射線被ばくに一致する水晶体後方の変化が検出された (Haskal, 2004; Junk et al., 2004)。水晶体の被ばく線量は報告されなかったが、著者らは、後囊下水晶体混濁の頻度と重症度は、年齢と経験年数に応じて増加したことを認め、ゆえに線量-効果関係の可能性を示唆した。

(45) これらの研究結果が得られた後、IAEA は 2008 年に心血管インターベンションのための「眼の水晶体損傷と線量の後ろ向き評価 (Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose: RELID)」と呼ばれるプロジェクトを掲げた (IAEA, 2016)。その目的は、水晶体の職業被ばく線量を推定し、水晶体混濁の可能性を評価することであった。

(46) 個人線量評価のデータは得られていなかったことから、大半の場合の水晶体の職業被ばく線量は、公表されている典型的な散乱線量値 (Vaño et al., 2008a,b) と、申告された業務年数、業務量、透視およびシネ撮影の状況、使用した放射線機器、室内における作業者の位置、および放射線防護具の使用に関する情報を組み合わせて推定した。一部、バッジ型個人線量計のデータを利用して、相関性の評価に役立てた。

(47) 後囊下混濁の眼科検査のため Merriam-Focht スコアを使用した (Ciraj-Bjelac et al., 2010, 2012; Rehani et al., 2011; Vaño et al., 2010, 2013a)。スコアリング (0.5, 1.0, 1.5 など) は、左右それぞれの眼について個別に行った。RELID 研究の下で合計 8 件の調査が実施された (Bogotá 2008, Kuala Lumpur 2009, Montevideo 2009, Varna 2009, Sofia 2009, Bangkok 2009, Buenos Aires 2010, and Kuala Lumpur 2011)。

(48) RELID 研究の結果から、心臓カテーテル検査室の作業者において、専門職員が放射線防護具を適切に使用せず数年間作業したとき、眼の水晶体混濁の有病率が増加したことが示

された。(循環器学会の間に)水晶体損傷の検査に自主的に参加したIVR術者の約40～50%と、技師または看護師の20～40%に、電離放射線の被ばく由来する損傷に一致する後囊下混濁が認められた。IVR術者における発生率は、対照群の非被ばく者の4～5倍であった(約40～50%対10%)。水晶体の推定被ばく線量は、専門職に従事していた全期間で数Gyに達する場合もあった。ただし、水晶体混濁が視覚的に支障をきたす白内障に進行するかは、未だ不明である。

(49) 最後に行われたRELID研究では、この研究対象集団においてコントラスト感度の放射線誘発性の低下は報告されなかったものの(Vañó et al., 2013a)、細隙灯顕微鏡検査で水晶体変化が認められた参加者の約20%について、限定的なコントラスト感度検査を行った。これらの参加者のコントラスト感度曲線から、標準化された基準データと比べてコントラストが顕著に低下していることが示された。線量と水晶体混濁の相関を調べるためには、後向きの線量推定が必要である(Vañó et al., 2013a)。眼の水晶体に対する放射線の影響に関する包括的レビューは、ICRPとNCRPの刊行物にある(ICRP, 2012; NCRP, 2016)。

(50) これらの研究の多くでは、個人線量計と防護具の使用は不規則であった。これらの結果は、5章の勧告に従った放射線防護の必要性を示唆している。

2.4.2 選択的内部放射線療法において報告されているインシデント

(51) Tosiら(2003)は、モノクローナル抗体とペプチドの両方または片方を用いた放射免疫療法を行った部門で生じた1件のインシデントについて報告した。 ^{90}Y は $150\text{ GBq}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以下の濃度で使用されていた。術者がバイアルを持つ際に付属の特殊プライヤーを使わず、非常に減衰能力の低い鉛ゴム手袋(0.1 mmの鉛当量)に使い捨て手袋を重ねるだけの防護を行い、直接手で持った。数日後、指の紅斑が認められた。フィルムバッジ、TLD指リング型線量計、および尿中放射能は正常であった。指の部分の推定線量は12 Gyであった(β 粒子、バイアルのガラスと手袋による減衰、および言及された合計の操作時間に基づく)。

2.4.3 下肢の脱毛に関する報告

(52) 防護具で遮蔽されていなかった下肢の一部に脱毛が認められており(Balter, 2001)、Wiperら(2005)は、数名の上級心血管IVR術者に両下肢の脱毛の発現を認めたことを報告している。皮膚科医の助言によれば、この発現は職業性の慢性放射線皮膚炎に一致しているという。

2.4.4 脳腫瘍の増加の主張

(53) IVRに関与する医療従事者において、脳腫瘍の発生率が高いことが示唆されている。数件の小規模症例研究とは対照的に(Wenzl, 2005; Roguin et al., 2013; Smilowitz et al., 2013),

米国の精神科医と、米国の放射線科医（Berrington de González et al., 2016）および米国の IVR 術者（Linnet et al., 2017）における死亡率を比較検討した大規模な疫学研究からは、放射線誘発がんにより死亡率が増加するというエビデンスは示されていない。これらの研究には 43,000 名を超える放射線科医、45,000 名を超える IVR 術者と 60,000 名を超える精神科医が含まれた。IVR 術者では精神科医に比べ、（主に脳の悪性新生物による）脳腫瘍のリスクが低かった。100,000 名を超える米国の診療放射線技師を対象とした縦断的研究では、職業被ばくによる脳の累積放射線被ばく量は頭蓋内悪性腫瘍による死亡率とは関連していなかった（Kitahara et al., 2017）。透視ガイド下の IVR に従事していると報告した診療放射線技師について、線量反応関連を示すエビデンスは得られなかった。

2.5 被ばくモニタリングにおける課題

(54) IVR に従事する作業者の被ばくをモニタリングする際の課題には、以下のものがある。調査が頻繁になりすぎないような、簡潔かつ容易に実施可能で一貫性のある職業被ばくモニタリング手法の必要性。単一あるいは複数の線量測定値からの実効線量および特定の組織の等価線量の推定。作業者によるモニタリング手技の遵守の確保。

(55) 作業者が受ける実効線量は、胸部または腰部に装着した線量計から推定する。末端部のモニタリングには、手の線量計の装着の快適性および感染管理と関連した現実的な課題がある。眼に対する線量の評価は（特にゴーグルを装着したときに）簡単な課題ではない。メガネの陰に線量計を装着するための装置がすでに開発されており、これを 4.2.7 項に記述している。しかしこれは世界的に使用されているわけではなく、また日常的にも使用されているわけでもない。

2.5.1 個人線量計の誤った使用と不定期な使用

(56) 調査から、個人線量計が誤って、あるいは一貫性なく使用されていることが明らかになっている。IAEA ISEMIR (IAEA, 2014b) の調査から、線量計を常時使用していると報告した心血管 IVR 術者は 76% に過ぎず、2 つの線量計を使用していると報告した者は 45% であることが示された。Sánchez ら (2012) は、50% もの医師が線量計を装着していなかったか、装着頻度が低かったか、または身体の間違った部位に装着していたことを示した。さらに Sánchez ら (2012) は、線量計の月ごとの測定値で信頼できると判断されたものは 33% に過ぎなかったと報告した。医師は看護師に比べ、線量計を正しく使用している割合が少なかった。米国の線量測定サービス業者が提供した、米国内の透視時の線量計データからも同様に、多くの測定値に信頼性がないことが明らかにされた。信頼できるモニタリングデータがなければ、放射線防護の専門家は、被ばくを低減して防護を最適化するためのツールの提供や提案を行う

ために必要な情報を得ることができない可能性がある。

(57) 同様に、眼科研究 (RELID 研究) から得られた重要な結果は、個人線量計が本来の使い方から外れた用法で使用されていること、ならびに、2つの線量計を使用し1つはエプロン外の襟の高さに装着して、そこから眼の水晶体の線量を推測できるようにするという ICRP の勧告を遵守できていないことである。Vaño ら (2013b) の研究から、個人線量計を使用していると報告した IVR 術者は約 50%に過ぎず、日常的に使用していると報告した者は 30%に過ぎないことが示された。看護師と技師の約 90%は個人線量計の使用を報告していたが、日常的な使用を報告した者は約 40%のみであった。使用していたとしても、ほとんどの場合で線量計はエプロン内に装着されており、これらの装置を用いた眼の線量の後向き評価を行っても結果は不正確であると思われる。過去の1つの研究において Niklason ら (1993) は、作業者の半数はその個人線量計を日常的に使用していないことを示した。

(58) 循環器科で15年間の追跡調査を行った後向き研究において、循環器専門医の20～30%が日常的には線量計を使用していないことが認められた (Vaño et al., 2006)。さまざまな放射線防護の訓練コースにおいて IAEA が行った調査 (56 カ国以上の国々の循環器専門医が含まれた) において、線量測定用バッジを日常的に使用しているのは心血管 IVR 術者の 33～77%であることが示された (IAEA, 2014b)。

(59) エプロン内外に装着した2つの線量計で同等の測定値が示された場合、その着用位置がランダムに入れ替わっていた可能性を示している。一部の手技についてのみ防護メガネを使用していた場合、さらに違いが生じる可能性がある。したがって、防護具の一貫した使用と合わせて線量計の一貫した着用を重視する必要がある。作業には、何個の線量計を使用すべきか、また最も拘束される業務と被ばくリスクに応じてどこに装着すべきかという、一連の指示が与えられる必要がある。委員会 (ICRP, 2000b) とその他の機関 (NCRP, 2010) は、作業者が2つの線量計を装着するという方針と適切な習慣を IVR 部門が確立することを勧告している。

2.5.2 モニタリング手法を遵守しないことについて考えられる理由

(60) 線量計を装着すると個人の累積実効線量が線量限度に近づくという印象があり、そのことが仕事や患者の治療の制約となるかもしれないと考えることや、または、高いもののまだ職業被ばくの線量限度内である線量測定値によって、時間のかかる調査が行われることになるかもしれないという印象があると、線量計の使用を渋ることになる可能性がある。

2.5.3 実効線量の評価

(61) 単一あるいは複数の線量計からの実効線量の評価には、複数のアプローチがある。線量の空間分布が透視と同じくらい変化する状況では、線量評価には大きな不確実性を伴う。

一連の保守的な仮定をした場合、真の値の数倍の線量推定値が生じる可能性がある。さまざまな単純被ばく（すなわち前方-後方、側方、回転、等方、および後方-前方の入射）の仮定の下では、人体を数学的に表現したファントムに対する保守的な実効線量の推定量として、個人線量当量である $H_p(10)$ が推奨される。不均等被ばく状況を説明するために個人線量当量を使用する際は、さらなる保守性が導入される。光子フルエンスが最も高い領域に線量計を着用した場合、さらに過大評価されるかもしれない。被ばくモニタリングのための方策は4章に示す。また、胎児に対する線量の評価に関しては、4.3.6項に示す。

2.5.4 眼の水晶体のモニタリングにおける課題

(62) 原則的には4章に示すように、エプロン外で襟の高さに装着した線量計の測定値が、防護メガネを装着しなかったときの眼の水晶体の線量を合理的に示す指標であるが、防護メガネを使用した場合は、襟の高さの線量計は眼の水晶体の線量を大幅に過大評価する可能性がある。さらに、眼の水晶体の線量測定は不確実性が大きく、眼の水晶体の実際の線量は線量限度とほぼ同じかもしれないという事実から、線量限度の遵守状況の評価は重要な課題である。

3. 職業上の放射線防護体系の IVR への適用

- 放射線防護の目的は、電離放射線による被ばくを管理して制御し、それによって組織反応（確定的影響）を防止し、社会のおよび経済的要因を考慮して確率的影響のリスクを合理的に達成できる程度に減少させることである。IVR に関与する専門職員において最も関連する組織反応（確定的影響）は、眼の水晶体混濁と末端部の脱毛の可能性である。
- 上記の目的を達成するため、委員会は防護の三原則を勧告している。すなわち放射線を扱う行為の正当化、防護の最適化、および個人の線量限度の適用である（本書における個人とは、IVR に係る専門職員である）。
- さらに、職業上の放射線防護の管理には、防護が最適化されていない可能性があれば被ばくと作業状況の調査を行うべきであるという警告を発するための指標が必要である。IVR に適切な指標は、調査レベルである。
- 調査レベルは、線量計が適切に装着されていないかもしれないという警告を発するための、エプロン外装着の線量計の最小線量値として選択することもできる。
- 女性作業者が妊娠を申告した後、その作業条件としては、妊娠の残りの期間中の胎児への追加線量が 1 mSv を超えないことを保証すべきである。
- 胎児に対する線量制限は、妊娠中の作業者は放射線作業を避ける必要があるという意味ではない。ただしこれは、雇用主が、医学物理士または放射線防護の専門家の助言を受け、妊娠中の作業者の被ばくの状況を慎重に見直す必要があることを意味する。現在得られているデータは、妊娠中の医師またはその他妊娠中の作業者を、IVR 室内の手技から自動的に除外することを正当化してはいない。

3.1 放射線防護の諸原則

3.1.1 全般

(63) 委員会の放射線防護体系は、第一に人の健康を防護することを目的としている。その目的は、電離放射線による被ばくを管理して制御し、それにより組織反応（確定的影響）を防止し、社会のおよび経済的要因を考慮して確率的影響のリスクを合理的に達成できる程度に減少させることである（ICRP, 2007a）。これらの目的を達成するため、委員会は防護の基本三原則を勧告している。すなわち、正当化、防護の最適化および個人線量の制限である（ICRP, 2007a）。正当化と最適化の原則はあらゆる種類の被ばく（職業、公衆、医療）に適用されるが、

線量制限の原則は作業者と公衆にのみ適用され、患者、介護者または介助者、ならびに生物医学研究の志願者の医療被ばくには適用されない。

3.1.2 放射線を扱う行為と手技の正当化

(64) 正当化の原則とは、放射線被ばくの状況を変化させるようなあらゆる決定は、害よりも便益が大となるべきであるというものである。つまり、新たな放射線源を導入する際、または既存被ばくあるいは潜在被ばくのリスクを低減させるための作業を導入する際は、それが引き起こす損害を相殺するのに十分な個人または社会の便益がもたらされるべきである (ICRP, 2007a)。医療被ばくにおける正当化の目的は、放射線の作業者その他の者の被ばくによる放射線損害を補助的に考慮に入れながら、患者に対し害よりも便益を多く与えることである (ICRP, 2007a)。

3.1.3 防護の最適化

(65) 防護の最適化の原則は、「防護のレベルは一般的な事情の下において最善であるべきであり、害を上回る便益の幅を最大にすべきである」、ということの意味している (NCRP, 1993; ICRP, 2007a)。より具体的には、これは、被ばくする可能性、被ばくする人の数、およびその人たちの個人線量の大きさは、すべて、経済的および社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきであることを意味している。放射線画像ガイド下のインターベンションによる医療被ばくにおいては、防護の最適化とは、IVR の臨床目的を達成しながら、患者と作業者に対する線量を可能な限り低く保つことを意味する。これは電離放射線を使用する施設の設計、装置の選択、セットアップと使用、ならびに日々の作業手順に適用する必要がある。

3.1.4 線量制限

(66) 線量制限の原則については、「患者の医療被ばくを除く計画被ばく状況においては、規制された線源からのいかなる個人への総線量も、委員会が勧告する適切な限度を超えるべきでない (ICRP, 2007a)」と述べられている。この原則は医療従事者の被ばくに適用される。

(67) IVR において職業上被ばくする作業者の場合、ICRP が推奨している作業者の線量限度を適用する。計画被ばく状況における作業者の推奨される線量限度は *Publication 103* (ICRP, 2007a) で定められており、その後 ICRP の組織反応に関する声明 (ICRP, 2012) において眼の水晶体の限度値が改定されている。

(68) 以下の限度値を適用する：

- 全身：実効線量で 5 年という一定期間の平均値として年間 20 mSv。ただし、いずれの 1 年の実効線量も 50 mSv を超えないこととする。

- 末端部：手足の等価線量で年間 500 mSv。
 - 皮膚：皮膚面積 1 cm^2 の平均値として等価線量で年間 500 mSv。被ばく部位は問わない。
 - 眼の水晶体：眼の水晶体の等価線量限度で 5 年という一定期間の平均値として年間 20 mSv。ただし、いずれの 1 年の眼の水晶体の等価線量も 50 mSv を超えないこととする。
- (69) 推奨された限度の目的は、確率的な健康影響の発生を容認できないレベルより下に維持し、また組織反応（確定的影響）の回避を確実にすることである。

3.1.5 線量拘束値

(70) 防護の最適化における予測線量に境界値を設定することが、最適化に役立つ（ICRP, 2007a）。計画被ばく状況において、そのような境界値は「線量拘束値」と呼ばれ、現在の被ばくの分布を考慮しながら、最適化のプロセスを効果的に促進することができるように、計画立案という目的のために選択される。後に、この「線量拘束値」を超えたことが確認された場合、その状況を理解するための調査を実施する必要がある。また、この場合、防護が最適化されているとは考えにくい。したがって、線量拘束値は関連する年間線量限度よりも低い。線量拘束値は最適化のプロセスで前もって確立され、また、これは線源に関連している。スタッフが複数の施設で作業している場合には、線量限度と線量拘束値は各施設で受ける個々の線量の総和に適用されるべきである。眼の水晶体の線量拘束値は、国際放射線防護学会（International Radiation Protection Association：IRPA）により提案されている（IRPA, 2017）。

3.1.6 異常線量の調査

(71) 年線量限度または線量拘束値を超えて、防護が最適化されていないと気づくまで待つ必要はない。1 ヶ月に受ける実効線量または等価線量に関して、あるいは関連パラメータの数値（襟の高さに付けるエプロン外装着の線量計の測定値など）に関して調査レベルを設定することで、防護が最適化されていないことを見つけられる。

(72) 月別の調査レベルを超えた場合は、その期間、防護が最適化されていなかったという警告となり、現状の放射線防護の見直しが必要となる。線量測定値の増加は、IVR の件数が顕著に増えたこと、または 1 回の手技当たりの線量が顕著に高かったこと（これは手技が複雑化したため、または防護措置を遵守しなかったために生じる可能性がある）が原因である可能性がある。

(73) 2000 年、世界保健機関（WHO）は、月別の被ばく量が実効線量で 0.5 mSv、眼の水晶体の線量で 5 mSv、手または末端部の線量で 15 mSv に達したとき、調査を行うべきであると勧告した（WHO, 2000）。眼の水晶体に対する等価線量の年間限度値が新たに設定されたことを受けて、それに応じて調査レベルを下げるべきである。心血管 IVR 術者には、襟の高さの線量計の測定値を用いた月間 2 mSv という調査レベルが提案されている [Durán et al.,

2013。太平洋心血管インターベンション学会 (Asian Pacific Society of Interventional Cardiology), 欧州経皮的な心血管インターベンション協会 (European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions), 南米心血管インターベンション学会 (Latin American Society of Interventional Cardiology) ならびに心血管撮影インターベンション学会 (Society for Cardiovascular Angiography and Interventions) による承認を得ている]。

(74) 月別の線量に関する調査レベルは、年間線量に当てはめたとき、関連する線量限度と線量拘束値を超えないものであるべきである。さらに2章に述べたように、個人線量計は常に装置されていないことも、不適切に装着されることもある (Padovani et al., 2011; Sánchez et al., 2012)。このような場合の調査レベルは、エプロン外装着の線量計と手の線量計の最小線量値を設定すれば、それにより、線量計装着の手順に遵守不良があった可能性について警告を発することができ、役立つ可能性がある。

3.2 区域および作業場の分類

(75) *Publication 57* (ICRP, 1990, 129 項) では、個人モニタリングの必要性に関して作業者をカテゴリ分類できるであろうと論じている。また、IVRを行う放射線科医や循環器内科医はカテゴリ A に入るであろうとも述べている。しかし *Publication 60* (ICRP, 1991) では作業者の分類は支持されておらず、*Publication 103* (ICRP, 2007a) の 184 項には「委員会は作業者の分類よりも作業場の分類を引き続き勧告する」と述べられている。したがって、個人モニタリング装置の割り当ては、作業場および作業者の職務、放射線場内での被ばく部位と時間、ならびに使用する防護具による遮蔽状況に基づいて分析する必要がある。

3.3 胚および胎児

(76) 委員会は、妊娠中の医師およびその他の作業者の管理に関する助言を、*Publication 84* (ICRP, 2000a) に示している。妊娠の初期 (妊娠が申告される前) は、通常の作業者の防護により対応する。胎児の防護に関する第一の責任は作業者自身にあり、妊娠が確認された後、できるだけ速やかに雇用主に対して妊娠を申告しなければならない (ICRP, 2000a)。妊娠が申告され雇用主に通知された後、妊娠中の作業者の作業条件は、妊娠の残りの期間中の胎児への追加線量が 1 mSv を超えないようにすべきである (ICRP, 2000a)。

(77) 妊娠中の作業者に対する不必要な差別は避ける必要がある。胎児への線量の制限は、妊娠中の作業者が放射線を取り扱う作業を完全に避ける必要があるという意味ではなく、または彼女らが指定された放射線区域に入ること、あるいはその中で作業することを防止しなければならないという意味でもない (ICRP, 2000a)。しかし、この制限は、その雇用主が妊娠中の

作業者の被ばくの状態を調べるべきであることを意味している。特に妊娠中の作業者の作業は、偶発的な高い放射線被ばくの確率がほとんどないようにすべきである（ICRP, 2000a）。

（78） 妊娠中または妊娠の可能性のある作業者の IVR における職業上の放射線防護に関する診療ガイドラインが、米国 IVR 学会（Society for Interventional Radiology）と欧州心血管 IVR 学会（Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe）の合同ガイドラインとして作成されている。これには、胎児の放射線リスクのみに基づいて、妊娠中の作業者を透視手技から除外することは、科学的根拠に基づいて正当化できないと述べられている（Blake et al., 2006; Best et al., 2011; Dauer et al., 2015）。

4. 個人モニタリングと線量評価

- 個人モニタリング装置の必要性は、作業場と作業者の職務、放射線場内での被ばく部位と時間、ならびに使用する防護具の遮蔽状況に基づいて分析する必要がある。
- 放射線診療従事者が個人線量計を正しく装着することは必須である。
- 2つの線量計を装着し、1つはエプロンで遮蔽し（エプロン内）、もう1つは襟の高さで遮蔽しない（エプロン外）ことで、実効線量を最も適切に推定できる。エプロン内の線量計によって、エプロンが正しく着用されていたことを確認し、またその遮蔽状況がエプロン内の線量を低下させるのに十分であることも確認できる。エプロン外装着の線量計からは、眼の水晶体線量を推定することもできる。
- 高い線量測定値や非常に低い線量測定値は、線量計の誤使用や装着の不履行を示している可能性がある。
- 個人線量計には、使用者自身の線量計であることと、その装着部位を確認できる手段が備えられている必要がある。
- スタッフメンバーが複数の雇用主の下で作業している場合には、雇用主間の協力が不可欠である。各施設の個人線量の総計を入手し、完全な線量記録を保管する必要がある。
- 最適化のモニタリング、教育目的、手技ごとの線量の特殊な研究、ならびに手技の特定の局面について、アクティブ型電子式個人線量計が有用であることが証明されている。
- 電子式個人線量計とエリアモニタの校正および型式試験には、高線量率のパルスモードを含む、IVRで典型的な放射線場を含める必要がある。
- 環境モニタ（Cアーム上など）は、散乱放射線場の連続的な評価や個人線量評価のバックアップ、個人線量計装着不遵守の発見、ならびに個人線量計を装着していなかったときの職業被ばく線量推定に有用である。
- 調査研究の枠組みにおいてモンテカルロ計算と測定を組み合わせた研究が多数行われているが、高線量の手技については、眼の水晶体の線量を含む職業被ばく線量を評価するためのより良い評価方法を開発することが必要である。
- これらの手法は、個人線量計の日常的かつ適切な使用の監査に役立ち、また、追加的な防護（防護メガネ等）の必要性の評価に役立つと考えられる。眼の線量を含めた個人線量評価のための個人の立ち位置検知と共に、（線量計を必要としない）線量計算技術の開発を追求した研究プログラムを進める必要がある。

4.1 個人被ばく線量モニタリング

4.1.1 被ばくモニタリングと線量限度の遵守状況の検証

(79) 年線量限度の遵守の実証および防護の最適化のために、被ばくモニタリングが必要である。線量限度の遵守をモニタリングするためには、実効線量、ならびに皮膚、眼の水晶体および手足に対する等価線量を評価する必要がある。等価線量と実効線量は、体組織上で直接測定することはできず、被ばくモニタリングにおける数量として直接使用することもできない。防護体系には、測定が可能で、等価線量と実効線量が評価できる実用量が含まれている (ICRP, 2007a)。環境線量の実用量と外部被ばくの個人線量はこれまで ICRU により定義されており、IVR に関連するものを付属書 B に要約している。

(80) 職業被ばくは、線量計で測定された値と個人が受ける線量が関係するという、一連の前提に基づいている。基準値には、線量計測体系の正確度の要件と不確実性が含まれることから、これらの前提は、実用量と防護量の間にも適用できる。作業者は作業時間中、常に線量計の正しい装着を確実にすることが、この一連の前提と関連性の中で最も重要な要素である。変動が大きい放射線場において、作業者の全被ばく時間で何らかの個人モニタリングを行うことなしには、個人に対する線量を合理的に推定することはできない。作業者が日常的に正しく線量計を装着していることを確認するためには、手順の遵守状況を監査することが重要である。

4.1.2 被ばくモニタリングと防護の最適化

(81) 遵守状況の検証は、個々の IVR 手技による線量の確認によってではなく、規定のモニタリング期間に実施される多数の IVR での線量を統合することで行われる。モニタリングの期間は規制当局により規定されるが、通常は1ヵ月である。この期間は年線量限度の遵守を確認するために十分なものであるが、特定の手技に対する防護の最適化のためには十分ではないかも知れず、そのような場合には同一の手技に関する情報を、ときに複数のモニタリング期間で収集する必要があるかもしれない。したがって遵守状況の検証は、防護の最適化のためのモニタリングと組み合わせて相補的に実行されることがあり、これには放射線防護の取組みの有効性の評価が含まれる。

4.2 個人線量計の特性とその使用

4.2.1 線量計の種類：パッシブ型線量計とアクティブ型線量計

(82) 線量計は種々の被ばく条件下で十分な正確度を持ち、また容易に使用できるほど十

分に小型で軽量であり、スタッフの業務遂行を妨げるものであってはならない。パッシブ型線量計は通常小型、軽量で、電源を必要としない。そのため、スタッフの作業や快適性を妨げないパッケージに簡単に組み込むことができ、特に線量限度の遵守状況を示す目的で広く選択され、最も多用されている。しかし、瞬時に測定値を読み取れないことは、最適化のモニタリング、特に IVR 手技に関わる従事者の教育にとってすべてのパッシブ型線量計の欠点である。

(83) 手のモニタリングには、手術用手袋の下に比較的簡単に装着できることから、小型のリング型線量計が用いられている。リング型線量計はサイズ調整が可能*だが、長時間の手技中に指が膨らむことがあるということに注意する必要がある。さらに、耐滅菌性や、装着感によって術者のカテーテルや器具の正確な操作を妨げないなどの特徴も重要である。リング型線量計に代わるものとして、指先にフィットするサック状のものも使われており、これを用いて、最高線量が予想される手の最も近位に放射線センサーをおく。装着感の支障を低下させるもう1つの解決法は、患者の照射体積に最も近い指に TLD 型線量計を装着する、というものである。

(84) 線量計の物理的構造は、意図した装着部位に適合しなければならない。リング型線量計では、感染管理が特に問題となる。これは、滅菌作業に耐えられないことがあり、また、通常は感染管理が不可欠な手技中に装着されるためである。

(85) 身体に装着される線量計は、重い鉛エプロンと使用者の衣服の間に置かれたとき不快感を引き起こす、強い圧迫点を作るようなものではあるべきでない。全身線量計を鉛エプロンの上部の頸部近く、または防護甲状腺シールドの上におき、遮蔽されていない部分の線量を評価する場合は、頸部または下顎部分を刺激するようなエッジがあるべきでない。すべての付着方法は、激しく使用している間にずれないように十分な強さをもつべきであるが、防護エプロンの位置を変えたり、線量計が異物に引っ掛かったときに衣類を破損したりすべきではない。

(86) アクティブ型個人線量計 (APD) または電子式線量計は最適化のモニタリングに、または手技別の線量解析あるいは手技中の各局面を区別する特殊な研究 (例えばシネ撮影線量と透視線量の比較など) のために用いられる。APD は線量率に関する情報を迅速に提供できるため、線量率の低下をもたらし、それによる累積線量の低下につながる行動変更の評価に対して、スタッフに迅速なフィードバックが提供される。1 回の手技中に措置が必要な場合は、直接的に手技の変更につながるため、線量率の情報が必要である。さらに APD からは各被ばく時間に関する情報も得られ、これにより職業被ばくと患者被ばくの関連付け、および IVR 中の APD 装着の監査が容易となる。

(87) 電子式線量計はスタッフの教育に有用である。例えば天井吊り下げ式のシールドを設置したとき線量率が大幅に低減することは、非常に良い事例となり、これらのシールドを日

*訳注 2023 年 10 月現在、国内市販品はフリーサイズのみであり、術者により適切な指への装着に困難が生じている。

常的に使用することを臨床医に促すものとなる。

(88) 最近まで、電子式線量計のサイズはあまりに大きく、鉛エプロンの内側で使用するには都合の悪いものであった。旧式の装置ではその所要電力のため、長時間の手技中に装置の電源が切れないよう、電源バッテリーの充電を保証する操作部がオーバーヘッドに取り付けられていた。しかし、電力管理と、電子式線量計からベースステーションまでの信号のワイヤレス伝送が進歩したことで、電子式線量計の使用のデメリットが一部克服されている。複数の製造業者は、ワイヤレスデータ伝送の電子モニタを IVR システムに搭載し、術者用モニター近傍またはモニターの一部で線量率と線量を確認できるようにしている。

(89) 最適化のモニタリングでは、遵守状況のモニタリングで要求される種類の線量を必ずしも用いなくても構わない。最適化では、線量低減に対する種々の措置の有効性を評価するため、状態を変化させることで生じる相対値を比較することを目指す。電子式線量計は通常、IVR 中の身体への照射の不均一性を考慮することなく、実用量を評価するために校正される。電子線量計は 1 点での線量を示し、実効線量または線量計から一定距離の線量を推測することはない。概念的には、複数の電子式線量計を装着し、データを組み合わせて遵守に関する線量情報を得ることはできない、という技術的根拠はない。しかし、実用的な問題から、電子式線量計の使用は調査目的と最適化のモニタリングに限定される傾向がある。

(90) 電子式線量計は、手指または眼の周囲での日常使用に向けて開発されていない。指に小型の電子センサーを装着させようという試みがあったが、電源と電子機器を接続する電気ケーブルは不便で、日常的に使用するには実用的でなかった。

4.2.2 線量計の特異性

(91) 線量計測体系は、関連する実用量、20 ~ 150 keV の光子エネルギーの範囲、また IVR に使用するスペクトルにおいて、正確度、精度および再現性に関する標準要件を満たす必要がある。この要件は例えば、IEC 規格 62387 (IEC, 2012) のほか、国際的に認められているガイダンス (ICRP, 2010b; IAEA, 2014a) に示されているものである。

4.2.3 線量計の信頼性および簡易性

(92) 線量測定システムは信頼でき、かつフェールセーフでなければならない (例えば、放射線場を継続的に測定できる能力を有していなければならない)。加えて、使用者に求められる操作は単純で効率的であるべきである。使用者によって線量計への電源供給が必要となる電子式線量計の場合、線量計装着のプロセスにそのことを想起させる項目が、スタッフの手順に含まれている必要がある。スタッフに必要とされる作業と判断が少ないほど、適切に使用される可能性は高まる。線量積算式のパッシブ型線量計 (例えば、フィルム、熱蛍光素子 (TLD)、光刺激蛍光素子 (OSL)、蛍光ガラスを含むものなど) は通常、遵守状況をモニタリングする

ため透視室内で用いられる。

4.2.4 線量計の交換期間

(93) パッシブ型線量計は使用期間内で蓄積された総線量を示すものであり、使用期間の終了時点で新たな線量計と交換しなければならない。この交換時期は、スタッフにおける日常的な習慣として植え付けるため、所定のスケジュールに従う必要がある。通常、IVRのスタッフは月ごとにモニタリングされ、異常な線量およびイベントを検出し適切な対応を実施できるような十分な頻度で、線量データを提供する必要がある。したがって、放射線検知材料（それが熱蛍光素子、光刺激蛍光素子、またはフィルムであったとしても）は、使用が予想される最短期間の最低限関連する線量を検知する感度をもつ必要があり、使用が予想される最長期間の線量情報を保持できる必要がある。

4.2.5 IVRにおける線量計の誤った装着を検出するためのアプローチ

(94) 線量計装着に問題があった場合、線量測定値は非常に高くなるだけでなく、非常に低くなることもある。これは線量計の誤使用または装着不履行を示唆するであろう。誤使用の例として、エプロン内装着用の線量計をエプロン外で装着した、誤った手指にリング型線量計を装着した、自分用でない他者の線量計を装着した、線量計を紛失したなどもある。間接的アプローチが、個人線量計装着の遵守不良の特定に役立ち、また個人線量計を使用しなかった場合の職業被ばく線量の推定に役立つ可能性がある。これらのアプローチには、患者近傍（例えばCアームの位置）の散乱放射線量を測定するための空間線量計の使用のほか、患者関連の量（例えば面積空気カーマ積）からさまざまな手技や配置に応じて作業員の目の水晶体等価線量を推定できるようにする換算係数が含まれる。エプロン外の線量計をストラップに付けて装着するのは、身体の前で動いたり襟の高さより下に下がることがあり、エプロンに入射する放射線との差がさらに増えると思われるため、推奨されない。

4.2.6 型式試験および校正と、実際のIVRにおける散乱状態の違い

(95) 実効線量評価のためのモニタリングは、1つないしは2つの線量計を用いて試みられてきた。線量測定値を調節するアルゴリズムは、本章の後半に論じるが、ここで数点を述べておかねばならない。線量計は、遮蔽材料の効果を考慮することなく、校正され試験される。型式試験の標準は、組織等価ファントムの平らな表面上に線量計を置いた単純な条件下で、性能評価を定義する傾向がある。IVR室において線量計は、原子番号が高い遮蔽元素を含むエプロンの外側または内側に置く。線量計が、遮蔽材料のごく近傍にある場合、型式試験中に通常想定される散乱環境とは異なる環境におかれる。実用量の測定値が予想される線量計の性能内にあり、通常使用と同様の条件にあることを確認するためには、供給業者からの保証を求めるべ

きである。

4.2.7 眼の水晶体用の線量計

(96) 線量計を取り付ける装置を眼の付近に置くことが困難であるため、眼の水晶体のモニタリングは特に難しい。眼の水晶体の線量限度を低減できることから、防護メガネは広く普及してきている。これにより、眼の付近かつ防護レンズに覆われた範囲に線量計をおく機会が広がっている。眼の線量は、鉛エプロンの上の襟または頸部の高さにおいた線量計から、または、ヘッドバンドに取り付けてX線管に最も近いテンブル近傍にセンサーが来るようにしたプラスチック片上の別の線量計から評価することができる。ゴムバンドにTLDチップを巻き、このバンドを頭部の眼の近くに付けて眼のモニタリングをしようという取組みが、いくつかなされている (Bilski et al., 2011)。その他、メガネの内側に線量計を取り付けようと、頭部に巻く形の装置も使用されている (IRSN, 2014)。いずれの場合でも、眼の付近におかれる線量計は装着者の視界を妨げてはならない。メガネに覆われた範囲に線量計を取り付けることは、1つはエプロン内、1つはエプロン外、そしてもう1つは眼用線量計という3つの線量計を使用することを意味している。3つの線量計に基づく配置は、信頼性および一貫した使用という点で困難を伴う。しかし、短期間の比較目的には使用できるかもしれない。鉛メガネを実際に装着し、第一IVR術者が天井吊り下げ式のシールドを使用した場合は、眼用線量計の必要性は重要ではないが、シールドおよび鉛メガネが実際に使用されるよう保証するため、品質管理が必要である。メガネをいつ装着すべきか、また装着できるかは、重要な問題となっている。

4.2.8 線量計および作業者の特定

(97) 個人線量計には、使用者自身の線量計であることを確認できる方法が備えられているべきである。線量計の結果を特定の個人に適用する場合は、線量計と使用者の間の1対1の関係が不可欠である。ラベルなどの特定方法は、他者の線量計を使用しないように、読みやすいものである必要がある。適切なアプローチとしては、非使用時に線量計をラックに保管し、自身のラックと線量計を視覚的に特定することなどがある。

4.2.9 装着部位

(98) 線量計の装置部位は視覚的要素によって示されるべきであり、特に線量計の形状のために適切な位置に取り付けられない場合、線量計を正しい位置に装着させることに役立つ。実効線量の評価に2つの線量計を(1つはエプロン外、もう1つはエプロン内に)使用する場合、術者はエプロン外とエプロン内用の線量計を取り違え、報告される線量が2値の平均値に近似する結果となることがよくある。このような非一貫性の結果、報告される実効線量が高くなり、術者を失望させ、両方または一方の線量計さえも使う気を鈍らせることがある。さらに、高い

再現性で結果を得るためには、線量計はエプロン内外の正確な位置に装着する必要がある。正しい位置の遵守は、個人用エプロンの特定のポケットを使用することで保証できる。適切な行為に改善するため、線量計をどこに装着するかを示すアイコンや画像を、色とラベルを組み合わせて示すことが試みられている。同様の状況が両手を個々にモニタリングする場合にも生じる。判別用の特性がない場合、左右の指リング型線量計を取り違える可能性がある。リング上に必要な全情報を印刷するために利用できるスペースが限られているため、手または指リング型線量計のラベリングは難しい。左右の区別には色を変えることが有効な方法である。末端部線量計と混同する可能性があることから、1つの線量計を使用することが一般的であり、X線ビームに最も近い手に装着する。通常、左手の小指である (Martin, 2009)。

4.2.10 アクティブ型個人線量計の校正

(99) European ORAMED プロジェクトにおいて、Clairandら (2011) および Sánchezら (2014) は、APDの反応に対する、線量率の影響およびパルス頻度と時間の影響を検討した。(パルスモードでの信号を送らない) ガイガー-ミュラー管式のAPDを除き、APDは個人線量当量率によって影響されるという反応を示した。このことは、補正係数を導入した場合に限り、APDを日常のモニタリングに使用できることを意味している。APDとエリアモニタの型式試験手順ならびに校正には、IVRを代表する放射線場を含めるべきである。これには高線量率のパルスモードでの試験も含まれる (Chiriotti et al., 2011; Clairand et al., 2011; Sánchez et al., 2014)。

4.3 職業被ばくの評価

4.3.1 実効線量の評価

(100) 一般に、比較的均一な全身被ばくの場合、個人線量当量 $H_p(10)$ に関して校正した個人線量計の測定値から実効線量进行评估する。このような実効線量の評価は、その被ばくを代表する身体部位に線量計を装着していた場合に限り、放射線防護の目的では十分な正確度と精度をもつ (ICRP, 2007a)。しかし、IVRにおいては、身体の一部は防護されているが、その他の部分は防護されていない。したがって、防護エプロン外に装着した1つの線量計の測定値は、エプロンで防護された体幹部の臓器の線量を反映していないため、実効線量を過大評価している。一方でエプロン内に装着した1つの線量計の測定値は、防護されていない身体部位 (例えば、頭部、頸部、そでぐりを介して被ばくする肺やその他の胸郭内臓器など) のより高い被ばくを反映していないため、実効線量を過小評価している (Franken, 2002; Siiskonen et al., 2007)。このように、単一の線量計の測定値から実効線量を推定するためには、 $H_p(10)$ 値に補正を加える必要がある。エプロン外装着の線量計の場合の補正係数は1未満であり、エプロン

内装着の線量計の場合の補正係数は1を上回る。

4.3.1.1 2つの線量計によるアプローチの考察

(101) *Publication 85* (ICRP, 2000b) では、実効線量を適切に推定するためには、1つはエプロン外に、1つはエプロン内にという2つの線量計を用いるべきであると勧告している。また米国放射線防護測定審議会 (NCRP, 2010) も、2つの線量計を用いる方法を勧告している。これは、確率的影響に関する線量限度との比較について、実効線量を最も適切に推定できるため、また、防護エプロンによる遮蔽状況を（胴部または胸部の防護エプロン内装着の線量計から）適切に示すことができるためである。

(102) 2つの線量計の $H_p(10)$ に関する測定値は通常、次式のような単純な線形アルゴリズムにより統合される：

$$E = \alpha H_u + \beta H_o$$

ここで E は実効線量、 H_u と H_o は個人線量当量 $H_p(10)$ である。 H_u は胸部または胴部のエプロン内の測定値であり、 H_o はエプロン外で通常は襟の高さで測定される。 α と β は、線量測定値に適用される対の加重係数である。

(103) α 値と β 値の対には長年、多数の数値が提案されてきたが、全種類の手技の職業被ばくを適切に表す α 値と β 値の対がこれと違って存在しない事実により、どれを使用すべきかという国際的な合意は得られていない。規格によって支持されている国際的な合意がないこと、また2つの線量計を間違いなく装着させる手段がないことから、実効線量の推定値は信頼性のあるものにも、また比較可能なものにもならない。

(104) European Coordinated Network for Radiation Dosimetry (CONRAD) プロジェクトにおいて、欧州13カ国で使用されている線量測定法が比較された。5カ国ではエプロン外に1つの線量計を装着し、7カ国ではエプロン内に1つの線量計を装着することが勧告され、2つ（エプロン内外）を装着していたのは1カ国であった (Järvinen et al., 2008)。一部の国では規制機関からの勧告がなく、各病院はさまざまな手法を採用している (IAEA, 2014b)。

(105) また、CONRAD 研究の中で Järvinen ら (2008) は、2つの線量計についてさまざまな著者から提案されている11の α 値と β 値の対を、さらに1つの線量計のアプローチに関する4つの値を、包括的に比較した。本研究は、モンテカルロシミュレーションと、 H_o の補正目的で入手した Rando-Alderson ファントム上の複数の測定値から構成されている。実験とモンテカルロ計算のために、ファントムに巻タイプの0.35 mm 鉛エプロンと、別途ネックガードも取り付けられた。 α 値と β 値の対から適切な推定値を求めるための特定の判断基準は、一般的な照射ジオメトリーについてモンテカルロシミュレーションから得られる実効線量が過少評価されないこと、しかも過大評価が僅かであることとした。

(106) CONRAD 研究から、考えられるすべてのジオメトリーに対する適切なアルゴリズム

表 4.1 α 値と β 値 [Järvinen et al. (2008) より引用] は、典型的な照射ジオメトリーについて過小評価がなく過大評価が最低限度であるという判断基準を満たしたアルゴリズムの値と、*Publication 103* (ICRP, 2007a) による実効線量のための加重係数に基づくアルゴリズムの値である

アルゴリズム	甲状腺の遮蔽あり		甲状腺の遮蔽なし	
	α	β	α	β
スイス政令 (2008)	1	0.05	1	0.1
McEwan (2000)			0.71	0.05
Von Boetticher et al. (2010)	0.84*	0.051	0.79*	0.100

*訳注 ICRP による正誤表を反映している。

ムというものはなく、したがって選択する際には妥協せざるを得ない、という結論が得られた。2つの線量計が用いられたすべての検討対象アルゴリズムのうち2つのアルゴリズムが、最適な推定値を決める判断基準に比較的近かった。この2つはスイス政令(2008)と McEwan(2000)による α 値と β 値のセットで、これらを表 4.1 に示す。より最近では、*Publication 103* (ICRP, 2007a) からの実効線量のための加重係数に基づくアルゴリズムが開発されている (Von Boetticher et al., 2010)。これらの数値も表 4.1 に示す。

(107) ただし、推定された実効線量が年線量限度に近いとき (例えば > 15 mSv) は、何らかの α 値と β 値を用いた単純なアプローチではなく、特定のジオメトリーと照射パラメータを考慮した、より正確な推定を行う必要がある (Järvinen et al., 2008)。

4.3.1.2 1つの線量計によるアプローチの考察

(108) 2つの線量計使用を一般化させることについて異議を唱えている著者もいる (Kuipers et al., 2008; Martin, 2012)。また IVR 術者に対する線量評価に関して、エプロン外に1つの線量計を装着することの有用性についての研究が行われている (Stranden et al., 2008)。複数の研究から、2つ使用と1つ使用 (エプロン外) による線量測定アルゴリズムの正確度に、有意差はないと結論付けられている (Schultz and Zoetelief, 2006; Järvinen et al., 2008; Kuipers et al., 2008; Kuipers and Velders, 2009)。2つの線量計アプローチは、原則として正確度が高いものの、これには以下のような複数の欠点があると著者は論じている：(1) 組み合わせアルゴリズムに関する国際的合意が得られていないため、実効線量を比較しても解釈が困難である。(2) 臨床医が2つの線量計を正しく一貫して装着するという信頼性は疑わしい。(3) 2つの線量計ではコストが高くなる。実際、インターベンション医師はときどき2つの線量計の場所を取り違えることがある。また、遮蔽されていないエプロン外装着の線量計の被ばくは、エプロン内装着の線量計の10倍になることもあるため、実効線量が著しく過大評価されるおそれがある。臨床医は2つ目の装着を忘れてたり、1つ目の装着さえ忘れてたりすることがある。

(109) 加えて、被ばくジオメトリーは変わりやすく、放射線は不均一に分布し、身体の一部は遮蔽されている。したがって、実効線量の評価において高い正確度を達成することは不可能である。線量がそれぞれの線量限度を大きく下回るときは、容易に実施され、線量を合理的に表示するという目的を果たす実的な線量計測体系で、線量限度の遵守の確保に十分である。

(110) エプロン内に装着した1つの線量計から、エプロンで遮蔽された体幹内の放射線感受性臓器が受ける線量が分かる。しかし、エプロン内装着の線量計の月別測定値は検出レベルを下回ることが多いことから、この手法は正確度に乏しく、情報提供という点での価値は限られる。

(111) Martin (2012) は、エプロン外の襟の高さに付けた1つの線量計を用いた、実際的なアプローチを提案した。襟の高さの線量計の測定値が、1年間（より短い期間に設定してもよい）に設定された線量を超えた場合にのみ、2つ目の線量計を装着する必要がある。襟の高さの線量計の測定値を、防護される臓器を考慮した加重係数で補正することで、実効線量が表示される可能性がある。また襟の高さの線量計は、眼の水晶体の線量の指標として用いることもできる。

(112) エプロン外の襟の高さの線量計から得られた $H_p(10)$ と、モンテカルロシミュレーションまたは人体形状ファントムの TLD 測定値から求められた実効線量との関係に関する研究から、エプロンを着用したが甲状腺防護具を着用しなかった場合の補正係数は 0.011 ~ 0.18 であり、エプロンと甲状腺防護具の両方を着用した場合は 0.02 ~ 0.083 であることが示唆されている (Martin and Magee, 2013)。Martin と Magee (2013) は、防護エプロンを着用している放射線手技に係わるスタッフの合理的な実効線量 (E) は、以下のような簡単な相関式から得られると提案している。

$$E = 0.1H_0$$

(113) ここで提案されている 0.1 という係数は、IVR と心血管インターベンションに係わる者を含め、放射線科で働く大半のスタッフについて、適切な実効線量に関する保守的な評価であると思われる。もし H_0 の測定値が 20 mSv に近いかこれを超える（1 ヶ月の実効線量が約 2 mSv）場合は、防護エプロン内に2つ目の線量計を装着し、特定のアルゴリズムの使用を検討すべきである。NCRP (2010) はまた、もし1つの線量計を使用する場合、これはエプロン外に装着すべき（すなわち、線量計が1つだけのとき、放射線防護衣の内側に装着することは認容できない）と結論付けている。

4.3.1.3 実効線量評価に推奨される選択肢

(114) 襟の高さでエプロン外に装着した1つの線量計から、実効線量の合理的な推定が得られ、また1つの線量計による方法は2つの線量計のアプローチよりも簡単で線量計の位置の間違いが生じにくいとはいえ、 $E = 0.1H_0$ という式は、すべての IVR 中にエプロンを装着して

おり、かつすべてのエプロンがその減衰について同様であるという仮定に基づいている。とはいえ、すべての国と施設において全スタッフがエプロンを着用している、または、各エプロンが同様に十分な減衰を示すという仮定は、必ずしも真実とはいえない。軽量の防護エプロンは鉛以外の減衰材料を含んでいるように、さまざまな鉛当量が利用されている。エプロンの実際の鉛当量が、エプロンのラベルに表示されている鉛当量と異なる可能性もある (Lichliter et al., 2017)。したがって委員会は、基準を満たすことが確認され CONRAD 研究で提案されているような単純なアルゴリズムによる、2つの線量計アプローチを使用することを主な勧告として継続して発している (表 4.1 参照)。

(115) もし、ある施設について、すべての専門職員が全 IVR 中に十分な減衰をもつ防護エプロンを着用していると確実に仮定できる場合、エプロン外装着の線量計はその被ばくの評価に十分であるため、IVR チームの大半のスタッフについてエプロン内装着の線量計は省略することができる。しかし、通常は IVR 術者が最も高い職業被ばく線量を受けるため、また IVR 術者のエプロンの実際の減衰が確認されることは稀であるため、手技を行う IVR 術者には2つの線量計の装着を推奨する。

(116) 複数の雇用主のためにスタッフが作業している際は、雇用主間の協力が不可欠である。1つの線量計を用いることを選択した場合、作業者が各雇用主から異なる線量計を提供される可能性があるが、施設ごとの個人線量の総計を入手し、完全な線量記録を保管する必要がある。

4.3.2 眼の水晶体に対する等価線量の評価

4.3.2.1 眼の水晶体の線量をモニタリングするための実用量の使用

(117) ICRP (2010b, 付属書 F) は、2つの線量計測アプローチを用いて、眼と眼の水晶体の吸収線量の算出を検討している：1つ目は *Publication 110* (ICRP, 2009a) の標準計算ファントムを用いた方法であり、2つ目は Behrens ら (2009) および Behrens (2012a) が開発した、様式化された眼のモデルを用いた方法である。眼への外部照射における高い線量勾配を記録するため、この様式化された眼のモデルを用いて、*Publication 110* (ICRP, 2009a) の低入射粒子エネルギーでのファントムから導いた水晶体の線量換算係数を補足した。ICRP (2010b) はまた、眼球前方の上皮細胞層から下層の無核水晶体線維細胞が生じることに注目し、水晶体全体の平均線量と、前方の上皮細胞層に対する線量とを比較した。比較した結果、最低エネルギーのものを除くすべての光子と電子について、この2つのジオメトリーに関する同様の線量が算出された。Bolch ら (2015) は、眼と眼の水晶体の線量評価モデルと、眼の被ばくに関する線量係数の算出へのその利用について、詳細を示している。

(118) ICRU (1992) は眼の水晶体の線量測定に、実用量と個人線量当量 $H_p(3)$ を勧告していた。しかし、眼の水晶体の線量評価には $H_p(3)$ が非常に適している一方で、 $H_p(3)$ によ

線量計の校正は多くの国々で用いられていない(Cantone et al., 2017)。Publication 103(ICRP, 2007a, 付属書 B)と 116(ICRP, 2010b)において、光子被ばくに関する眼の水晶体のモニタリングには、実用量 $H_p(0.07)$ が適当であると勧告されている。Behrens と Dietze (2010, 2011) および Behrens (2012b) は、眼の水晶体の等価線量と、これに対応する実用量を、推奨される 3つの深度 (0.07 mm, 3 mm, および 10 mm)、光子および β 線の現実的な放射線場を用いて比較した。その結果、後方散乱をシミュレートするためにスラブファントム上で校正された X 線場には、 $H_p(0.07)$ および $H_p(3)$ の両方が適当であると著者らは結論付けた。同様の結果が Vanhavere ら (2012) と Sánchez ら (2014) によって報告されている。

(119) 眼の水晶体の線量測定に関する $H_p(10)$ の適切性に関しては、Sánchez ら (2014) による測定から、光刺激蛍光素子を用いた線量計で測定された $H_p(10)$ と $H_p(0.07)$ の差は、透視および CT ガイド下の手技で一般的に用いられる、平均エネルギーが 44 keV を超える 4 つの異なるスペクトルについて 10% 未満であるが、光子スペクトルの平均エネルギーが 36 keV のときは約 17% にまで増加することが明らかになっている。IAEA (2013) および国際標準化機構 (ISO, 2015) は、光子放射線については概して、 $H_p(0.07)$ を $H_p(3)$ の近似値として用いることができ、そして、線量計に到達する光子スペクトルの平均エネルギーが 40 keV を上回り、かつ光子が主に前面から入射する場合に限り $H_p(10)$ を使用できることも示唆している。眼の水晶体のモニタリング手順は、ISO, IAEA および IRPA から提供されている (IAEA, 2013, 2014b; ISO, 2015; IRPA, 2017)。

4.3.2.2 防護メガネを着用していないときの眼の水晶体の線量評価

(120) 実験および計算によるモデリングを介した眼の水晶体の線量評価方法について、最新の研究が文献に報告されている (Vanhavere et al., 2012; Carinou et al., 2015)。管電流と管電圧が一定のとき、眼の水晶体が受ける線量は複数の要因により影響される。これは主に次のものである：患者の体格、照射角度、X 線管焦点から患者までの距離、患者から IVR 術者までの距離、ビームコリメーション、および術者の手技 (Vaño, 2015)。

(121) 防護メガネを使用しないとき眼用線量計をどこに装着すべきかを調査する、多数の研究が行われている。通常、頭部の左眉弓の上、または額中央に線量計を装着したときに、眼の線量が最も適切に評価される。複数の研究が、X 線源に隣接した側の眉弓に TLD をおいたときに測定された線量は、線量計を両眼の間においたときに比べて 3 ~ 5 倍高いことを報告しているが、他の研究は、後者の位置に線量計をおいた方が高い線量を記録する傾向があったとしている (Efstathopoulos et al., 2011; Vanhavere et al., 2012; Principi et al., 2014)。このように最適な位置は、手技の種類および術者の行為により異なるようである。

(122) 襟の高さの線量計を、X 線管に隣接する側のエプロン外に装着した場合、これは防護メガネを使用しなかった場合に眼が受ける線量を適切に示すはずである。眼の水晶体の線量

を過大評価する可能性があるが、結果は文献によってまちまちであった (Martin and Magee, 2013)。IVR 術者に対する合理的な近似値 (Clerinx et al., 2008; Martin, 2009) は、 $H_{\text{eye}} = 0.75H_0$ として得られる。また X 線管からより離れた位置にいるスタッフの被ばくについては $H_{\text{eye}} \cong H_0$ である。ここで H_0 は、襟 (エプロン外) の高さで装着した線量計からの個人線量当量 $H_p(3)$ または $H_p(0.07)$ である。

(123) ただし、襟の高さの線量計は正確な測定というより、眼の線量の 1 指標に過ぎない。線量計の累積測定値が一定の値 (例えば 10 mSv) を超えることが予想され、かつ防護メガネを着用しない場合、最も被ばくを受ける眼の近くに眼用線量計を装着することで、評価の正確度を改善することが望ましいと考えられる。

(124) IVR 術者が手技中、日常的に線量計を使用しない場合があり、この期間についてはやや保守的な線量の推定を行う必要がある。こういった状況における眼線量の合理的な推定値を得る方法を検討する中で、Vaňo ら (2013b) は、心血管インターベンションからの面積空気カーマ積と、眼の水晶体の線量の代替値として、C アーム (アイソセンタから 95 cm の距離) にセットしたアクティブ型線量計の測定値の比率を調べた。1,969 件の IVR に基づく本研究から、C アームでの散乱線量と面積空気カーマ積の比率は $10.3 \sim 11.3 \mu\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ であることが確認された。この比率は、検討した種類の手技と当該施設の特定の状況について当てはまる 1 例に過ぎない。他の情報が得られていない場合、放射線防護の担当者は、手技の種類と大まかな件数が判明している場合に限り、推定として、そのような間接的アプローチを使用することができる。線量が限度に近い場合は、より詳細な調査が必要かもしれない。

4.3.2.3 メガネを着用しているときの眼の水晶体の線量評価

(125) 眼の水晶体の線量を直接評価するため、メガネで覆われた範囲に線量計を配置する装置を用いた水晶体線量測定がいくつか試みられている (Bilski et al., 2011; IRSN, 2014)。しかし、世界中の多くのスタッフは、エプロン外の襟の高さに付けた個人線量計によってモニターリングされ続けていたであろう。したがって、眼の水晶体の被ばくの評価において、いつ、どのようにメガネによる減衰が考慮されるべきかという疑問が生じる。

(126) Magee ら (2014) は、ランドファントムを使用して、30 セットの防護メガネに関する測定結果を報告し、線量低減係数 (DRF; メガネなしのときの線量を、メガネありのときの線量で除した比率) を求めた。

(127) 鉛メガネにより得られる防護は、患者からの散乱線が頭部に入射する角度によって異なる (McVey et al., 2013; Magee et al., 2014; Van Rooijen et al., 2014)。放射線科医や循環器内科医が IVR 手技を行うとき、大半の場合は、X 線が照射されている時点で患者の方を見ておらず、モニター上に表示された画像を見ることになる。したがって、眼の水晶体の線量評価に DRF を用いる際は、側面と頭部より下の高さからの X 線ビームの入射を考慮すべきである。

(128) さらに、鉛メガネの研究から、防護メガネを着用したときの眼の線量は、主に IVR 術者の眼の周辺組織から散乱した放射線によるものであることが結論付けられている (Moore et al., 1980; Day and Forster, 1981; Cousin et al., 1987; McVey et al., 2013; Magee et al., 2014)。レンズの大きさ、フラットレンズのついたメガネでのサイドシールドの使用、顔の輪郭とのフィッティングの隙のなさといったすべてが、もたらされる防護の程度を決めるうえで重要である。散乱放射線は術者の頭部の下から側面に入射するため、眼の下と顔の側面の領域を防護するレンズの装着距離および範囲が、DRF を決定する重要な要素である。

(129) Magee ら (2014) は、大半の場合、鉛当量 0.75 mm の多くの鉛メガネから、実地臨床において生じる被ばくについて 3～6 という DRF が得られる、と結論付けている。これらの結果に基づき、0.75 mm の鉛当量をもつ鉛メガネによって得られる防護効果を考慮するには、日常的に DRF = 2 で除すことが合理的かつ保守的なアプローチになるであろう。この係数は、襟の高さの線量計の測定値にも適用されるはずであるが、防護メガネが適切なデザインをもち、サイドシールドまたはラップアラウンド型のデザインであり、フレーム内の防護を含み (Martin, 2016)、かつ一貫して着用されている場合に限る。加えて、DRF が適用されるためには、関係する IVR 術者が常に防護メガネを着用していることを確認するための定期的な文書化されたチェックによる、品質保証プログラムを整備しておく必要がある。

(130) モンテカルロシミュレーションと測定値を用い、メガネの鉛当量と大きさの影響を検討したもう一つの研究が、Hu ら (2017) によって実施された。この研究によれば、20 cm² の大きさで、鉛当量が 0.1～1.0 mm の鉛メガネを着用したとき、眼の水晶体の線量は 3 分の 1 から 9 分の 1 に低減したという。鉛当量を 0.35 mm 以上に増加させたとき、DRF は顕著に増加しなかったものの、同じ鉛当量でもメガネのレンズサイズを 6 cm² から 30 cm² に大きくしたとき、DRF はレンズサイズに比例した。また彼らは、0.5 mm の鉛当量と大きいレンズサイズのメガネ (レンズ 1 枚当たり 27 cm² 以上) によって、合理的かつ有効な防護が達成されると結論付けた。

(131) より高い DRF が適切と考える施設では、実地臨床における一次 X 線と散乱 X 線の方法 (水平面と垂直面の両方における角度設定を含む) を考慮した包括的な測定を行い、これらの測定値を完全に記録するべきである。ISEMIR は、鉛メガネを着用したときを含む、眼の水晶体の線量を評価するための方法を改善し策定することを勧告している (IAEA, 2014b)。

4.3.3 手の等価線量に関する評価

(132) 皮膚の線量限度は、最も被ばくした部位における 1 cm² の平均値として適用される。したがって、手の最大の被ばく部位に適用される。IVR 術者の手は X 線ビームの近くにくる可能性があり、手技の種類とアクセス経路によって決定される IVR 術者の位置は、線量推定に重要なひとつの要素である。

(133) X線ビームの側面にあり患者の照射体積に比較的近い手の内側は、より高い線量を受ける。したがって、線量計は小指か、またはX線管に最も近い手首の側面に装着するべきである (Whitby and Martin, 2005; Vanhavere et al., 2012)。

(134) 手の線量を評価するための適切な線量測定は、実地臨床においては容易ではない。IVRにおける手の線量の推定方法は手首線量計であるが、患者の付近の放射線場は不均一であり、直接ビームに手の一部が入り込む可能性があることから、手首線量計により測定される線量は、実際の手の線量に比べてはるかに低い可能性がある。

(135) CT透視における手の線量の評価には、特別な課題がある。CTスキャナから発生する一次ビームからは、数秒以内に何百 μGy という線量が照射される可能性があるためである。2章に示したように、もし術者の手が直接ビーム内におかれる場合、数分以内に 500 mSv という年線量限度に達するおそれがある (Buls et al., 2003; Saidatul et al., 2010)。また、CTビームは比較的狭く、約 5 mm 幅であるため、指の付け根に線量計を装着した場合、指の他の部分の一次ビームに対する被ばくを記録できない可能性があり、ほとんどの場合、散乱放射線のみが測定されることになる。したがってこのような場合、CT透視における末端部のモニタリングは意味がなく、さらに誤った安心感を与えるおそれがある。

(136) CT画像から、術者は手の一部が一次ビーム内に入っているという警告が得られるはずである。加えて、CT画像を検討するための能力は、これらの被ばくを制御して調査を円滑に行うための手段となる。線量評価は、被ばくが生じた実際の位置でそれに対応する時間を測定することにより、行うことができる。CTビームの線量は測定できることから、線量データも評価に含めるべきである。

4.3.4 下肢と足の等価線量に関する評価

(137) X線管が治療台の下側におかれるとき、一次ビームは患者と治療台の足元から下側にも散乱することから、下肢が受ける線量は相当なものになる可能性がある。寝台付属のシールドを使用しない場合、下肢の線量は手の線量よりも大きくなる可能性がある (Whitby and Martin, 2003)。防護エプロンまたは鉛/ゴムのドレープにより遮蔽されていない下肢の部分に照射される線量を評価することを検討すべきである。

4.3.5 選択的内部放射線療法における被ばくの評価

(138) SIRTのIVRに β 線放射体を用いるときの未解決の問題は、スタッフの手指の線量測定である。TLD指リング型線量計を、放射線源に近い手の人さし指に装着するべきである。 β 線源と皮膚との距離は非常に短く、それと同時に線量勾配が大きいことから、線量は過小評価される可能性がある。RimplerとBarth(2007)は指先の局所皮膚線量 $H_p(0.07)$ を測定し、その結果、防護レベルが低い状況で作業したとき、スタッフの被ばくは年線量限度である

500 mSv を超えることがあることを確認した。もし指先が遮蔽されていないバイアルまたはシリンジと接触する可能性がある場合、指サック型の線量計 (fingertip sachet) を装着する必要があるかもしれない。

4.3.6 胚および胎児の被ばくの評価

(139) 透視手技を行う、またはこれをサポートする妊娠中の作業者については、通常、胎児の線量を、放射線防護衣を着用した母親の腹部のウエストレベルにおいた線量計を用いて推定している (Miller et al., 2010; NCRP, 2010)。この線量計は、母体組織による放射線の減衰を考慮していないことから、実際の胎児の線量を過大評価することになる。胎児線量は通常、作業者が装着する線量計で記録された線量の 50% 以上にならない (Dauer et al., 2015)。これは、母体の腹壁と子宮前壁による減衰があるためである (Trout, 1977; Faulkner and Marshall, 1993; NCRP, 2010)。したがって、2つの線量計を使用するとき、もし防護エプロン内の線量計から 0.2 mSv/月未満の個人線量当量 $H_p(10)$ が示された場合は、9 ヶ月間にわたる胎児の等価線量は限度未満になると思われる。線量計は毎月評価するべきである。迅速なデータアクセスのためには、電子式線量計を使用することができる (Balter and Lamont, 2002)。

4.3.7 リアルタイムモニタリングのための数値計算法

(140) Badal ら (2013) は、加速モンテカルロコード、詳細な解剖学的ファントム、および撮影室内の物理的センサーを用いた線量モニタリングシステムを記述している。このシステムは、透視下の IVR における患者とスタッフ双方に関する、正確なリアルタイムの線量推定値を、現在の線量計測体系よりも高い正確度で示すことができる。これらの手法は、個人線量計の日常的かつ適切な使用の監査に役立ち、また、追加的な防護 (防護メガネなど) の必要性の評価に役立つと考えられる。眼の線量を含めた個人線量評価のための、個人の位置検知と合わせた (線量計を必要としない) 計算技術の開発を追求する研究プログラムを進める必要がある (IAEA, 2014b; NCRP, 2016)。

5. 放射線防護方法とプログラム

- **IVR**における職業被ばくは、患者の被ばくと密接に関連している。したがって職業放射線防護は、患者の防護と合わせた統合的アプローチにおいて管理されるべきである。スタッフの防護策は臨床の診療結果に影響を与えてはならず、また患者の被ばくを高めるべきではない。
- 室内の全スタッフが防護エプロンを着用するべきである。**IVR**術者は可能であれば天井吊り下げ式のスクリーン、寝台吊り下げ式のカーテン、およびシールドドレープにより防護されるべきである。看護師や麻酔医など、患者のそばに留まる必要があるその他のスタッフには、可動式スクリーンによる防護が有効なことがある。またその他の職員には、距離をとることが防護に有益なこともある。
- 天井吊り下げ式の含鉛アクリル板は頭頸部の線量を2分の1～10分の1に低減できるため、**IVR**の設備にはこれを必ず含めるべきである。
- 寝台上から鉛カーテンが吊り下げられていたとしても、特に寝台を高い位置に設定する必要がある高身長の場合、術者の足が被ばくすることがある。
- **SIRT**を行うとき、⁹⁰Y放射能を含有するすべてのバイアル、すべての機器、および投与の準備と機器の流し込みに用いる使い捨ての物品は、ピンセットで取扱い、手の線量を低減するための適切な遮蔽を行うべきである。高エネルギーのベータ線が放出されることから、遮蔽には原子番号が小さいアクリルなどの材料を用いるべきである。
- 防護メガネを着用する際、眼の被ばくは、**IVR**術者の周辺組織から放射線が散乱する結果としても生じることがある。レンズの大きさ、サイドシールドの使用、顔の輪郭とのフィッティングの際のなさといったすべてが、もたらされる防護の程度の決定に重要である。
- 職業放射線防護を担当する病院スタッフには、全般的な放射線防護に関する知識が必要である。しかし同様に、実地臨床、**IVR**、および放射線画像ガイド下のインターベンションに使用するX線装置についても精通している必要がある。

5.1 患者の防護とスタッフの防護との関係

5.1.1 患者とスタッフの被ばくを低減する措置

(141) 患者の被ばくの低減は、同様の割合で散乱放射線も低減することから、職業被ばくも低減する。したがって、以下の措置は患者のみならず作業員も防護することになる：透視時間の短縮、画像取得ランの数と1回のラン当たりの画像数の削減、低線量モードの透視と撮像

の利用、パルス周波数の低減、ラストイメージホールド画像とループ再生の利用、患者の近くに受像器をおく、必要な撮像視野に絞る、傾きの大きい斜め照射およびウェッジ減衰器は必要な場合に限り慎重に使用する、小児の手技では散乱X線除去用グリッドを外す。

5.1.2 スタッフの被ばくのみを低減するための追加措置

(142) 以下の職業放射線防護の装置および措置では、患者の被ばくは低減されないが、スタッフの被ばくが低減される：防護エプロンとネックガード、天井吊り下げ式のシールド、防護メガネ、寝台吊り下げ式の鉛カーテン、患者のシールドドレープ、可能な限り患者から離れる、X線管側よりも受像器側にいる。

5.1.3 患者とスタッフの被ばくに関するその他の問題

(143) イメージインテンシファイアで拡大することで、患者の照射体積における線量は増加するが、照射体積のサイズは縮小する。したがって、散乱放射線量とそれによるスタッフの線量は変わらないと考えられる。これは、自動輝度制御センサーの設計と、装置に使用されているアルゴリズムに依存する。フラットパネルで拡大する場合、撮像視野内の組織の線量増加はイメージインテンシファイアを用いた場合よりもおおむね低くなる。したがって、スタッフへの散乱放射線は低減する (Srinivas and Wilson, 2002)。

(144) 複雑で長時間のインターベンションにおいて、常に同じ皮膚領域が被ばくすることを避けるためにビーム照射角度を変えることで、患者の皮膚損傷を避けることができるかもしれない。しかし、それがスタッフの被ばくにどのように影響するかは、ガントリの角度設定の範囲と、IVR術者の位置に対するX線管の位置によって異なる。患者の照射体積に対して、X線管がIVR術者と同じ側にあるとき、散乱放射線からのスタッフの線量は増加する。

5.2 散乱放射線の分布

(145) これまでの章では、IVRに従事する医療スタッフはX線撮像に係わる他の職業グループに比べ、比較的高い放射線線量を受ける可能性があることを述べてきた (Kim et al., 2008, 2012; Martin, 2009; Koukorava et al., 2011; Vanhavere et al., 2012; Jacob et al., 2013; ICRP, 2013a,b; Vañó et al., 2015a)。加えて、IVRでは多くの場合、カテーテルや他の装置を操作するためにIVR術者が患者の近くに留まる必要がある。サポートするその他のスタッフも、患者の至近距離にいる必要があるかもしれない。

(146) 透視X線室内では患者から散乱されて戻ってくる放射線があることから、患者周辺では線量率が比較的高い。もしX線管が治療台の下側にある場合、この配置ではスタッフに向かう散乱放射線は患者の体を透過して照射され、それによって減衰するため、IVR術者の頭

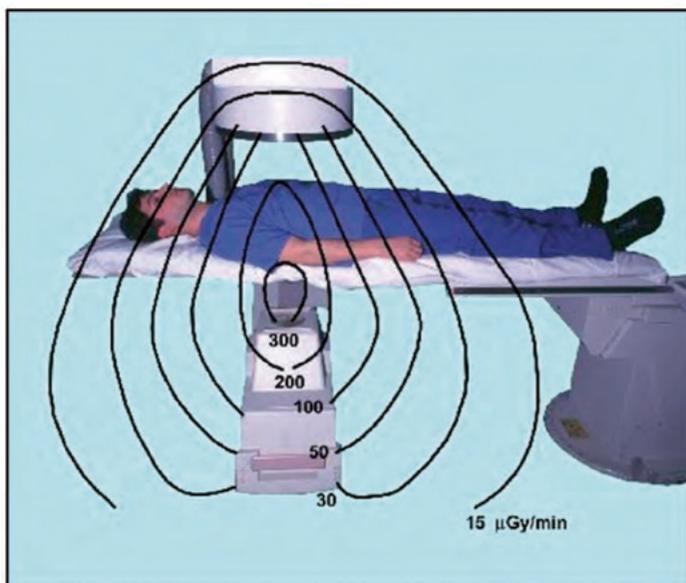


図 5.1 X線管が治療台の下側にある場合のX線管からの空気カーマ率分布 (Whitby and Martin, 2003) (British Journal of Radiology より許可を得て再掲)

部、上半身と手の線量は大幅に低減することになる (図 5.1)。したがって、大半の手技にはこの配置が推奨される (ICRP, 2013a,b)。

(147) Cアームの角度が垂直ではないとき、治療台に対してX線管と同じ側に立っているスタッフは、患者側から散乱するX線のため比較的高い線量を被ばくすることになる。一方で、X線管の反対側に立っているスタッフに散乱する放射線は、患者を通して減衰する (図 5.2) (Balter, 1999; Whitby and Martin, 2003; Schueler et al., 2006; Morrish and Goldstone, 2008)。X線管の角度を大きくすると、治療台の両側における線量率の比率が変化する。X線ビームが垂直面から10度の方向に傾いているとき、X線管に近い側の線量率は遠い側の2倍となり、角度を30度に上げると線量率は遠い側の5倍となると考えられる。したがって、IVRを行っている、またはサポートしている間に治療台の近くに立っているスタッフは、斜め照射および側方照射についてはX線管の近くの領域にはいないようにすべきである。

(148) 体幹の検査において、X線管の角度を側方に向けて大きくするとき、X線が組織を通過する距離は長くなる。このとき、満足な画像を作成するには比較的高いX線強度が必要になるため、患者とスタッフの両方に照射される線量がさらに増加する。したがって、患者の皮膚の一部が過剰な線量を受けないようにするためX線場を移動させることが重要ではあるものの、ガントリの角度を大きくすることは控えるべきである。

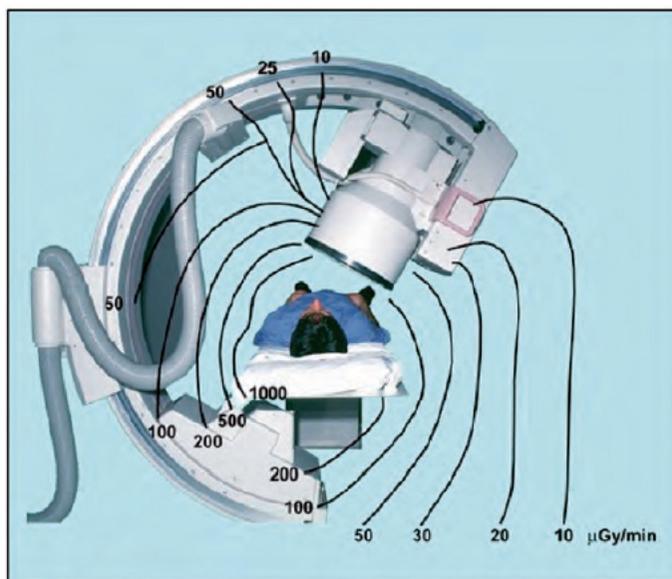


図 5.2 X線管の角度可変のIVR用X線装置周囲の空気カーマ率分布 (Whitby and Martin, 2003) (British Journal of Radiology より許可を得て再掲)

5.3 身体の防護

5.3.1 散乱放射線の知識

(149) 散乱放射線とそれに伴う職業被ばくの量は、手技の複雑性、患者の体格、X線装置で利用できる操作モード、および術者の技能により決定される (Vaño et al., 2015a)。患者周囲の散乱放射線レベルの分布を知り、さまざまな因子がこれにどのように影響するかを理解し、さらに防護具を有効に使用することが、IVRに係わるすべてのスタッフに対して、自身を防護するために不可欠である (2009b)。

(150) 多数の専門学会、放射線防護機関、およびその他の組織が、IVR行為に関して従うべきガイドラインを発行し、防護具の使用について勧告している (Miller et al., 2010; NCRP, 2010; Chambers et al., 2011; Sauren et al., 2011; Durán et al., 2013; ICRP, 2013a,b; Hiles et al., 2016)。

5.3.2 防護エプロン

(151) X線室内で透視に係わるすべてのインターベンションスタッフは、エプロンなどの個人防護具を着用する。これらのエプロンには通常 0.25, 0.35 mm または 0.5 mm の鉛当量が含まれ、一部のデザインでは前面で重ねて 0.5 mm の鉛当量に、その他の部位では 0.25 mm の

鉛当量となるようになってきている。透過率は通常、70～100 kV の範囲で 0.5～5% である (Marx et al., 1992)。エプロンは散乱放射線から体幹を防護するが、頭、腕、手および下肢を含むその他の身体部分はエプロンで防護されず、放射線防護プログラムにおいて考慮する必要がある。エプロンの鉛当量およびそれによる減衰は、スタッフの線量が規制上の線量限度を満たし、防護が最適化されるために、十分なものである必要がある。本章の後半に示すように、スタッフの実際の線量は多数の因子に左右される。したがって放射線防護は、エプロンの厚さのみではなく、それらをすべて考慮して最適化されるべきである。加えて、エプロンの重量による筋骨格系の損傷リスクも、最適化において配慮する必要がある。

(152) 実効線量の低減のためには、エプロンの鉛当量よりも、防護エプロンが体にフィットしていることの方が重要であることが多い (Detorie et al., 2007)。術者がエプロンのそでぐりを通して側方から被ばくを受けるとき、肺や食道などの胸郭内臓器は、より高レベルの被ばくを受ける可能性がある (Franken, 2002)。このことは、女性の乳房の腋窩部分を防護するために特に重要である。一部の施設ではこのような被ばくを低減するため、肩も防護するエプロンを推奨している (Guersen et al., 2013)。

5.3.3 軽量エプロン

(153) 鉛エプロンの重量はスタッフに不快感を引き起こすことが多い。例えば、疲労、脊椎を含む筋骨格系の問題であり、これらには特定の配慮が必要である (Papadopoulos et al., 2009; NCRP, 2010; Klein et al., 2015)。防護エプロンにはさまざまなデザインが販売されている。その中には、背部損傷のリスクを最小限にするために人間工学的ハザードの低減を目指したものもある。ベストとスカートからなるツーピースエプロンの場合、重量の一部は腰にかかることから背部への負荷が軽減される (Klein et al., 2009)。

(154) 鉛ではなく、ズズやビスマス等の高い原子番号の元素からなる複合層または二重層の軽量エプロンもある。これら代替金属は、40～88 keV のエネルギーをもつ X 線光子の単位質量当たりに吸収される効率が鉛よりも高いことから、軽量エプロンで同様の減弱を得ることができる。これらのエプロンは、70～80 kV の管電圧からの散乱 X 線の減弱には有効性が高いが、100 kV を超える管電圧については有効性が低いかもしれない (Christodoulou et al., 2003)。背部または頸部の問題を緩和するために軽量化が必要な場合、これは合理的な代替案である。軽量または「無鉛」エプロンの X 線透過は鉛エプロンと異なっており、X 線スペクトルによって違う。

(155) 製造業者は多くの場合、鉛当量 (例えば 0.5 mm 鉛当量など) という用語で減衰特性を特徴づけている。減衰は光子エネルギースペクトル全体にわたって大きく変動し、画像診断に用いられる範囲で変動が最も大きいことから、詳細な但し書きがないこれらのデータは、誤解を招く可能性がある (Finnerty and Brennan, 2005; Schlattl et al., 2007; Eder et al., 2010)。

また製造業者は、スタッフの実際の状況である、散乱放射線を用いたブロードビームの形状での試験ではなく、一次放射線を用いたナロービームの形状で、防護衣の透過を試験しているかもしれない。これらのエプロンは、そのラベルと製造業者による証明書に示されているよりも低い鉛当量になると結論付けている研究がある (Papadopoulos et al., 2009)。無鉛の X 線防護衣を使用している使用者と患者は、そうとは知らずに、一般に想定されている線量よりも高い線量を被ばくしている可能性がある。

(156) 防護衣の防護値の表示には、放射線ビームの特性の規格 (IEC, 2014)、減衰の測定に使用した照射ジオメトリー、その防護衣を使用する状況を反映するためにさまざまなビーム特性で行った測定の組合せを併記する必要がある。Jones と Wagner (2013) は、単一のビーム特性での減衰または鉛当量の測定は不十分であると結論し、防護衣の防護値の規格は、それが使用されるであろうビーム特性の範囲全体で得られる防護を、正確に反映しているべきであり、またこれらの規格はエンドユーザーにより比較的容易に確認されるべきと示唆していた。さらに彼らは、選択すべき 4 つの標準的なビーム特性を提案していた。また、防護衣を通したこれら 4 つのビーム特性の透過は臨床で使用されるのと同様の配置で測定すべきであること、さらに、この 4 つのビーム特性に関する仕事量の分布によって防護衣を評価する指数を重み付けすべきであることを提案していた (Jones and Wagner, 2013)。

(157) 使用者は、特定の防護衣について鉛当量のラベリングを理解することが重要である。例えば、ある製造業者が「0.35 mm 鉛当量」と記載していた場合、これはその服のすべての部分で 0.35 mm 鉛当量であるのではなく、2 枚の布片が重なっているときにのみ 0.35 mm 鉛当量になるかもしれない。この場合、使用者は、布片が重なったときに 0.7 mm 鉛当量になると間違えて考えるかもしれない。

5.3.4 エプロンの重さに対する独立した支え

(158) 鉛エプロンに伴う人間工学的ハザードは、術者が容易に動かせるようエプロンを独立して支えることでも低減できる (Klein et al., 2009)。ある製造業者はこれを「無重力放射線防護装置」と呼んでいる。これは独立した床据付型フレーム (Pelz, 2000) によって、または天井から吊り下げることによって (Savage et al., 2009) 行われることがある。最新バージョンのものは頭部から下肢まで伸び、天井から吊り下げられたレール上を移動する。

5.4 甲状腺の防護

(159) エプロンは頸部を防護しない。甲状腺を防護するネックガードを着用しないと、無防護の甲状腺 (若者では放射線の影響を受けやすい臓器) の線量が実効線量を倍増させることもある (Niklason et al., 1993; Mateya and Claycamp, 1997; Theocharopoulos et al., 2006; Siiskonen

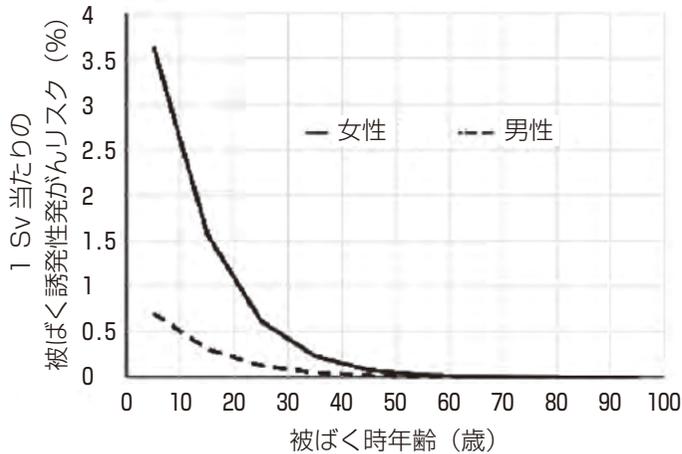


図 5.3 甲状腺等価線量 1 Sv 当たりの被ばく誘発性甲状腺がんリスク *Publication 103* (ICRP, 2007a) に定義されている国際放射線防護委員会—混成集団のデータに基づく。

et al., 2007, 2008; Martin, 2009)。しかし、*Publication 103* (ICRP, 2007a) のデータに基づく図 5.3 に示しているように、発がんリスクは被ばく時の年齢に強く依存し、30 歳を超える男性および 40 歳を超える女性のリスクは小さい (NA/ NRC, 2006; NCRP, 2010)。NCRP (2010) では、若い作業員、および襟の高さの (遮蔽されていない) 個人線量計の測定値が 1 ヶ月以内に 4 mSv [$H_p(10)$] を超えるすべての者には、甲状腺防護具または甲状腺もカバーする防護エプロンの使用を推奨している (Wagner and Archer, 2004)。

(160) モンテカルロシミュレーション (Marshall et al., 1992) から、0.5 mm の鉛を含むネックガードにより甲状腺の等価線量は 12 分の 1 に低減し、0.35 mm の鉛を含むネックガードにより 7 分の 1 に低減することが明らかになっている。しかし、甲状腺防護具は頸部にきつく着用すると不快なことがあり、快適にするため緩く着用することが多い。ネックガードが喉頭周囲の高さまで下がった場合、甲状腺の上部約 10 mm は防護されていない可能性がある。これにより、前述の 2 つの鉛の厚さの防護効果はそれぞれ 6 分の 1 および 5 分の 1 まで低下する。この計算は、患者の被ばくをシミュレートした人体形状ファントムで得られた測定値と概ね一致しており、防護効果は 6 分の 1 と示されている (Marx and Balter, 1995)。したがって総合的には、実地臨床においてネックガードの着用により等価線量は 5 分の 1 から 10 分の 1 に低減する。

(161) IVR を行う放射線科医や循環器内科医に加え、外科医およびその他のグループの臨床医も、標準的な手術室内で、可動式の C アーム透視装置のガイド下で診断または治療を行う (ICRP, 2010a)。場合によっては、頭部と甲状腺に対する線量が顕著になりえるが、手術室における防護具の利用可能性は多くの場合限られている。使用する手法の評価や、スタッフが防護エプロンに加えて甲状腺防護具も着用すべきかの判断には、リスク評価が必要である

(Vaño et al., 2016)。

(162) 大半の整形外科的処置による線量は低い。しかし、整形外科医は患者の照射体積の近くで作業することがあり、一部の手技についてはオーバーチューブ型の配置でX線管を使用する必要があるだろう。この場合、頭部と上半身への散乱線量が大きくなる。寝台吊り下げ式の鉛カーテンと天井吊り下げ式のシールドが利用できることは稀である。しかし、患者の四肢に係わる手技では、患者の体幹部がビーム内にある手技に比べて、線量が比較的低いはずである。脊椎固定のため椎骨にセメントを注入する、(IVRを行う放射線科医が実施することもある)椎体形成術や椎骨形成術など少数の整形外科手術では、術者の眼と手が高線量にさらされる可能性がある (Struelens et al., 2013)。

(163) 患者の身体の輪郭に密着できるよう切り抜きが入っている、独立型の調節可能なオーバーテーブル型のシールドは、IVR術者を適切に防護できるかもしれないが、IVRのスタッフは邪魔に感じることが多い。必要な操作を妨げ、手技の時間を延長し、患者とスタッフの線量を増加させるようなものは避けるべきである。

5.4.1.1 使い捨てドレープ

(164) 散乱放射線の線量を軽減するため、一次ビームの放射線場外に、タングステン-アンチモンまたはビスマスを含む軽量、使い捨てで無鉛のドレープまたはパッドを置くことができる (King et al., 2002; Dromi et al., 2006; Thornton et al., 2010; Politi et al., 2012; Ordiales et al., 2015; Martin, 2016)。そのようなドレープには、皮膚にカテーテルを挿入するための開口部や、患者からの散乱放射線を低減する、遮蔽された縁取りがあることがある。これらは、手術部位の準備が終わった後に、X線ビームの照射野外におかれる。術者が患者の照射体積のごく近くにいる必要がある手技には、この種の防護を検討するべきである。これらのドレープは頭部、手と上半身を防護し、眼の線量を5分の1～25分の1に低減することが明らかになっている (Thornton et al., 2010)。経皮的腎瘻造設に使用する、滅菌済みで使い捨ての無鉛ドレープの評価を King ら (2002) が報告している。使用のために必要な時間は短く、追加コストも比較的少ないため、彼らは使用してみる価値があると結論づけた。再使用可能なドレープも、廃棄された防護エプロンやシールドから加工することができる (Miller et al., 1985)。天井取り付け型の上半身用シールドを有効に使用できないときは特に、使い捨てドレープは術者の被ばくを大幅に低減することができる (Fetterly et al., 2017)。ただし、患者に使い捨てドレープをおく場合、ドレープが一次ビーム内に入らないように注意が必要であり、入った場合は患者と術者の被ばく量が増す可能性がある。

5.5 頭部と眼の防護

5.5.1 天井吊り下げ式のシールド

(165) 眼の線量は、1.1節で考察しているように、X線管の角度、術者の位置、およびビームのコリメーションにより影響される。頭部の防護において最も重要な要素は、シールドの適切な使用である (Vaño et al., 1998; ICRP, 2013a; Vaño, 2015)。天井吊り下げ式の鉛アクリル板は頭頸部全体の線量を2分の1～10分の1に低減できる (Martin, 2016) ため、IVRの施設にはこれを必ず用意するべきである。

(166) 天井吊り下げ式のシールドまたは鉛メガネにより得られる眼の防護は、線量低減係数 (DRF) を用いて数値化することができる。天井吊り下げ式のシールドの使用により達成される眼の線量低減に関しては、さまざまなDRFが報告されている。IVRに関して臨床で測定した大規模な報告からは、1.3～7というDRFが得られている (Vanhavere et al., 2012)。また、同様の手技を行ったさまざまなセンター間で線量を比較したレビューでは、0.7～2.5のDRFが示されている (Jacob et al., 2013)。また、放射線科医がシールドを使用した場合と使用しなかった場合で線量率を比較した研究からは、シールド使用によるDRFは5であったとされている (Magee et al., 2014)。ただし、天井吊り下げ式のシールドを正確に配置したファントムシミュレーションでは、より高い数値が得られている。あるファントム研究において Galsterら (2013) は、経頸静脈性肝内門脈大循環短絡術 (TIPSS)、腹部出血の塞栓術、および骨盤塞栓術に関するDRFを8.5～17.6と報告している。天井吊り下げ式のシールドは鉛メガネに比べて大幅に線量を低減し、眼のみならず頭頸部全体を防護することが実証されている (Galster et al., 2013)。経皮的冠動脈形成術についてシールドを慎重に設置したある臨床研究からは、19というDRFが認められている (Maeder et al., 2006)。

(167) 天井吊り下げ式のシールドの使用が可能な場合、達成される線量低減のレベルはシールドを使用するか否かと、いかに有効に配置できたかに左右される。シールドは患者のすぐ上に置き、術者からシールドを介して患者の照射領域が見えるように配置する。これはIVR術者に対する放射線防護の訓練の重要な要素である (Vanhavere et al., 2012)。ただし、X線管から側方または斜め照射する場合、これらのシールドを有効に利用できないことが多い。シールドを有効に利用するためには、X線管と治療台を動かすたびに配置しなおす必要がある。したがって、原則的にはシールドは高い防護をもたらすが、臨床手技に使用する照射範囲で有効に配置することの難しさにより、日常使用において達成できる全体の防護レベルは制限されると考えられる。とはいえ、努力すれば2～5というDRFを達成できるはずである。このような低減によってIVR術者は眼の線量を限度未満に維持でき、低減しなければ専門職員としての就業期間の間に線量が蓄積して生じるかもしれない水晶体混濁を避けられるはずである。

(168) Vañó ら (2015b) は、エプロン外の襟の高さの線量計から眼の水晶体の線量を推定するという保守的なアプローチを用い、天井吊り下げ式の防護シールドが適切に使用されたと仮定した場合、3つのインターベンションの専門領域である循環器、脳神経および放射線科について、眼の水晶体の新しい線量限度に到達するためには、術者1人当たり年間800件を超える手技が必要であろうと推定している (Vañó et al., 2015b)。

(169) 放射線吸収性の手術帽を用いることで減衰が得られ、IVR術者の脳の線量が低減することを明らかにしている著者もいる (Alazzoni et al., 2015; Uthoff et al., 2013)。一方で、ランドファントム上でラジオクロミックフィルムを用い、頭部内の線量分布の測定に注目し、放射線吸収性の手術帽は基本的にIVR術者の脳を防護しないと報告した研究者もいる (Fetterly et al., 2017)。著者らはこの理由を、照射ジオメトリーによる (すなわち、散乱線はIVR術者の尾側から発生し、また、帽子は下からの放射線から脳を防護できないという事実による) ものと説明していた。

(170) この知見は、スタッフが実際に受ける線量は、多数の要因によって左右されるという事実と一致しており、天井吊り下げ式のシールドの有効利用を含め、放射線防護はそれらをすべて理解し配慮することで、体系的に最適化される必要がある。公表されているデータから、IVRのスタッフでは脳の線量による脳腫瘍の発生率が増加していることを示すエビデンスはないことを踏まえ (2章で考察)、まず脳に対するシールドを追加する必要があるかを検討すべきである。スタッフは、追加的な防護措置を取る前に、医学物理士、または脳の被ばくの評価を含めIVRと放射線防護に関する問題に精通している放射線防護の専門家に相談できるようにしておくべきである。

5.5.2 その他の可動式シールド

(171) 患者の近くに留まるべきスタッフ (看護師や麻酔医など) には、彼らとX線源の間に置くことができる可動式 (ロール状) シールドにより得られる付加的な防護が有益かもしれない。

5.5.3 防護メガネ

(172) 散乱放射線からの眼の防護には、鉛メガネが重要な要素である。防護メガネの使用は、眼の水晶体の線量を大幅に低減することが証明されている。鉛当量0.75mmで、すべての管電圧について線量を85%超低減できる鉛メガネが市販されている (Sandblom, 2012; Magee et al., 2014; Martin, 2016)。

(173) 眼と同じ水平面で正面から入射するX線の防護について、種々の鉛メガネを用いた実験の測定値から (Moore et al., 1980; Marshall et al., 1992; Thornton et al., 2010; McVey et al., 2013; Van Rooijen et al., 2014)、およびモンテカルロシミュレーションから (Carinou et al.,

2011; Koukorava et al., 2014), DRF は 5 ~ 10 と報告されている。

(174) しかし、実地臨床では、患者からの散乱放射線が頭部に到達する角度に応じて DRF が異なり (McVey et al., 2013; Magee et al., 2014; Van Rooijen et al., 2014), また、IVR 術者の眼が側面および下から、水平面の 20 ~ 90 度の範囲で照射を受けることが多い。通常の視力調整用メガネを着用したまま使用するために、鉛ガラスと頭部の間に大きい隙間が残されると、側面からの照射について DRF 値が低くなる傾向がある (Magee et al., 2014)。IVR 術者が手技を行う際、X 線が放射されている大半の時間は患者の方ではなく、モニター上の画像を見ている。すると散乱放射線は、レンズの後のギャップと防護されていないフレームの部分を通過することができ、眼を直接照射することになる。

(175) また、防護メガネを着用しているときも、眼の近くの組織には減衰されていない X 線が入射し、これら組織からの散乱線が眼の水晶体の主な被ばく源となる (Moore et al., 1980; Cousin et al., 1987; Marshall et al., 1992; McVey et al., 2013; Koukorava et al., 2014; Magee et al., 2014)。正面からの被ばくの場合、メガネの種々のカテゴリー間の差はレンズの大きさ、無防護組織からの近さ、したがって、照射組織からの近さと関連する。側面からの被ばくの場合、眼の線量は、顔の輪郭とのフィッティングの近さと側面からの防護の程度によって異なる。患者からの散乱放射線が下から眼に入射するとき、これはさらに散乱することなしに、メガネのレンズ下側のギャップを通り直接入ると考えられる。

(176) 大半の鉛メガネの防護は鉛当量 0.75 mm または 0.5 mm であり、その多くには鉛当量 0.5 mm または 0.3 mm のサイドシールドが取り付けられている。このデザインは、以下のようないくつかのカテゴリーに分けることができる。

- (A) 目的に合うよう設計された大型のフラットレンズとサイドシールドをもつ鉛メガネ。
- (B) 正面にレンズが付いたラップアラウンド型の鉛メガネ。側面からの放射線の入射に対し、より防護できるよう、角度が付けられている。
- (C) 通常のメガネを改良した鉛メガネで、鉛ガラスのサイドシールドが付いているもの。
- (D) 「フィットオーバー」型メガネ。カテゴリー(A)と類似しているが、通常のメガネの上にかけられるようアレンジされている。
- (E) 低鉛当量のフェイスマスク。ヘッドバンドによってセットされる。

(177) カテゴリー(A)および(B)のカスタムデザインの鉛メガネで鉛当量 0.75 mm の場合、眼の防護に関する DRF は 3.5 ~ 6 である (Cousin et al., 1987; Vanhavere et al., 2012; Koukorava et al., 2014; Magee et al., 2014; Principi et al., 2015; Martin, 2016)。また鉛当量 0.50 mm の場合、DRF は 3 ~ 4 となり得る。ラップアラウンド型の鉛メガネでは、フレームと頭部の間のギャップが小さくなる傾向があるため、側面および下からの放射線入射に対する防護が強くなる。標準的なメガネを改良したメガネで、鉛当量 0.75 mm、サイドシールド付きの場合、ガラスと頭部の間のギャップが大きくなる傾向があるため、DRF は 3 ~ 4 である (Magee et al., 2014)。

(178) 通常のメガネの上から着用するようデザインされている「フィットオーバー」型メガネはかさばり、通常のメガネを着用できるように下側のギャップが大きくなっている。一部のモデルでは、特に重い「フィットオーバー」型メガネの場合、軽量化を維持するためにフレームに防護材料を使用していないことがあるため、重要パーツであるフレームが防護材料で出来ていることを確認することが重要である。

(179) Galster ら (2013) は、天井吊り下げ式スクリーンの陰に頭部がある場合、鉛メガネにさらに 1.8 ~ 5.8 の DRF が加わったことを報告した。

(180) 0.1 mm など鉛当量が低いフェイスマスクまたはバイザーは、顔全体を覆うことから、後方散乱からの眼への線量に大きく寄与するであろう眼の周辺の頭部領域の被ばくを低減する (Martin, 2016)。これらの鉛当量は低いものの、鉛メガネに代わる実行可能な代替物である。しかしサイズが大きく曇りやすいことから、ときとして医師に好まれないことがある。

(181) 鉛メガネによる防護効果の測定によって得られる有用なデータを用いると、遮蔽されていない眼用線量計で記録された線量測定値を補正し、防護メガネを一貫して着用していたと保証できるすべての IVR 術者のために、眼の水晶体の線量を導き出し得る。しかしどのような計算も、すべての手技に鉛メガネを着用していたことを前提としている。したがって、減衰係数の適用には、関係する IVR 術者が常に防護メガネを着用していることを確認するための定期的な文書化されたチェックによる、品質管理を運用する必要がある。

(182) 適用される係数は、関係するメガネの測定に基づくものかもしれないが、実地臨床で生じ得る角度での X 線からの被ばくを考慮する必要がある。測定方法およびその結果を記録する必要があり、適用される DRF は 4 を超えるべきではない。

(183) DRF を確認するための測定法はないが、メガネがカテゴリー(A)または(B)で、鉛当量 0.5 mm 以上を含む場合は、メガネによる防護の考慮には DRF を 2 とするのが保守的なアプローチである (Magee et al., 2014)。

(184) ほぼすべてのモデルの鉛メガネでは、X 線源に近い側の眼に対する防護に比して遠い側の眼に対する防護の効果は低く、遠い側の眼の DRF は 1.5 ~ 2 である (Geber et al., 2011; Galster et al., 2013; Van Rooijen et al., 2014; Fetterly et al., 2017)。これは、鼻腔に相当するギャップを通して放射線が透過するためであり (頭部がビームの方向に対してある角度を成しているとき)、また、線量の大半は周辺組織からの散乱によるためである。ただしそれでも、遠い側の眼の水晶体の線量は、線源に近い方の眼よりもまだ低い。

(185) 以上のように、種々の鉛メガネを利用することができるが、それを選択する際には注意する必要がある。メガネは下または側面からの被ばくも防護も提供すべきであるため、特にメガネの下側周囲を顔の輪郭に密着させることは、鉛当量よりも重要となる場合がある。

5.5.4 防護対策の併用

(186) 眼の水晶体および末端部に対する線量に対する、さまざまな防護具の影響を明らかにするため、ORAMED プログラムの枠組みの中で、臨床的な状態と照射ジオメトリのモンテカルロシミュレーションと測定が行われた。その結果は以下のものであった：天井吊り下げ式のシールドは眼の線量を2分の1～7分の1に低減できる。防護メガネは眼の線量を最大で10分の1（90%）まで低減できる。寝台からの遮蔽カーテンは下肢の線量を2分の1～5分の1に低減できる。X線管を寝台下に配置したとき寝台上に配置した場合に比べ、眼の線量を2分の1～27分の1に、手の線量を2分の1～50分の1に低減できる。動脈系への大腿動脈アクセスによって橈（とう）骨動脈アクセスに比べ、線量を2分の1～7分の1に低減できる（適切な遮蔽を行ったとき）。後ろに下がる、あるいはシネ撮影のための部屋から退室することで、線量を4分の1～7分の1に低減できる（Vanhavere et al., 2012; Martin, 2016）。

(187) Thornton ら（2010）は透視時の術者の眼の散乱線量に対して、一般的な放射線遮蔽戦略を単独で使用したときと併用したときの影響を評価した。術者ファントムの水晶体の放射線線量率を、寝台に取り付ける鉛カーテン、鉛メガネ（0.75 mm 鉛当量）と鉛を含まないメガネ、使い捨てのタングステン-アンチモン製のドレープ（0.25 mm 鉛当量）、および吊り下げ式（0.5 mm 鉛当量）の透明鉛シールドの使用／非使用下で記録した。左右水晶体の線量は、左右斜め前方から15度の角度で照射して測定し、術者の上腹部で、およびデジタルサブトラクション血管造影法（DSA）（1秒間に2画像）の間に患者の鼠径部でも測定した。各戦略の遮蔽効率は、遮蔽しなかった条件と比べた眼の線量の低減係数として表した。鉛メガネのみを使用した場合、水晶体の線量率は5分の1～10分の1に低減した。また、散乱シールドドレープのみを使用した場合、線量率は5分の1～25分の1に低減した。2つを併用したときは常に単独使用時に比べて防護が大きく、線量率は25分の1以上低減した（Thornton et al., 2010）。

5.6 末端部の防護

5.6.1 手

(188) IVR 術者の手はX線の一次ビームの近くにくることがある。もし、術者の手が患者を透過したビーム内に入り込んだ場合、患者上方の吸収線量率は通常2～5 $\mu\text{Gy}/\text{秒}$ であり、したがって1分間の被ばくで100～300 μGy の線量を受けることになる。治療台の側方にX線管をおいたとき、患者の表面から散乱する一次X線の線量はさらに高くなり、入射一次ビームの直接被ばくは50倍にもなり得る。

(189) インターベンションにおけるアクセス経路は手技中の術者の手の位置に影響し、線量レベルにも著しい影響を与える（図5.4*）。循環器専門医にとって、経大腿動脈よりも経

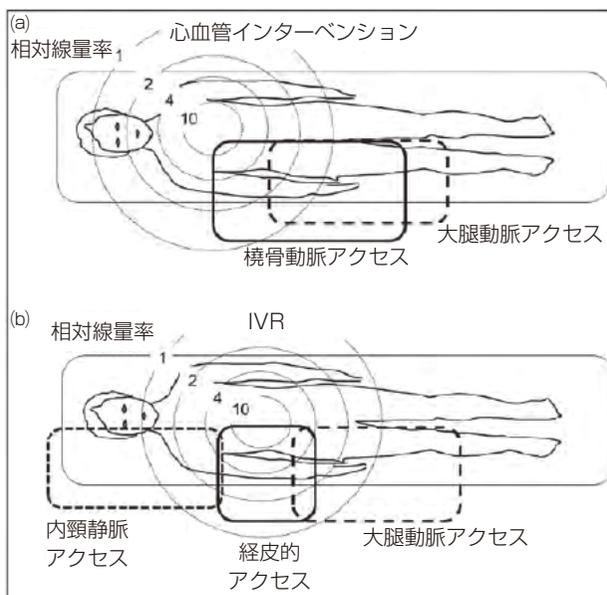


図 5.4 カテーテルを操作するときの術者の手の位置。(a) 橈骨動脈および大腿動脈アクセス経路による心血管インターベンション (b) 内頸静脈、経皮的および大腿動脈アクセスによる IVR (Martin and Sutton, 2014) (Oxford University Press から許可を得て再掲)。

橈骨動脈でカテーテルを挿入した方が患者の離床をより早く達成できるというメリットがあるが、循環器専門医の手は X 線ビームに近くなることから、特に手の側面で受ける線量が高くなる (Mann et al., 1996)。

(190) 放射線科領域の IVR ではほとんどの場合、大腿動脈アクセスが用いられているが、経皮的胆汁ドレナージ、腎瘻チューブ留置および胃瘻留置など経皮的な手技では、術者は、撮影するエリア近くで挿入カテーテルを操作する必要があるため、指先の線量が比較的高くなり得る (Whitby and Martin, 2005)。

(191) 放射線科医が経内頸静脈的にアクセスする TIPSS などの手技では、手は撮影部位から離れるが、TIPSS 術は技術的に難しい場合があるため、透視時間は長く、線量は比較的高い (図 5.4)。

(192) カテーテルを保持する手は通常、操作を行うもう一方の手と比べて X 線ビーム外縁部に近く、高い線量を受けている (図 5.5 と図 5.6)。

(193) 天井吊り下げ式のシールドは頭部と上半身の防護に有効だが、手は通常シールドの下側に位置するため、防護は比較的弱い。ただし、慎重な行為をすることによって若干の低減は達成できる (Maeder et al., 2006)。一部の手技では、シールドの下端に取り付けられた鉛／

*訳注 原文は図 5.3 を参照しているが、図 5.4 が正。ICRP による正誤表は、2023 年 12 月時点で未公表である。



図 5.5 大腿動脈アクセスによる手技のためカテーテルを操作しているときの手の位置
(Whitby and Martin, 2005) (British Journal of Radiology から許可を得て再掲)

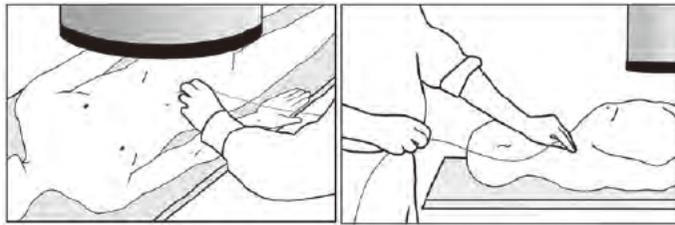


図 5.6 経皮的アクセスと内頸静脈アクセス経路における手の位置の例
(Whitby and Martin, 2005) (British Journal of Radiology から許可を得て再掲)

ゴムドレープが手の防護に有効かもしれない (Vanhavere et al., 2012)。

(194) 独立式の調節可能なオーバーテーブル型シールドでは、術者の手を遮蔽できるが、手がシールドの下まで伸びて、あまり防護されないこともある。防護ドレープやパッドも手の防護に有効である可能性があり、ある研究では、29分の1まで手の線量低減が達成されることが示されている (King et al., 2002)。

(195) 薄い防護手袋も利用できるが、その防護に関する報告結果はさまざまである (15～60%)。手袋で防護した手がX線場に入り込んだ場合、それによる減衰を補償するため線量率は自動的に高くなることから、IVR術者の手の防護を達成することもなく患者の被ばくが増加する (Wagner and Mulhern, 1996)。手の防護のため新たな遮蔽材料 (例えばピスマスなど) をハンドクリームとして使用し、これを手術用手袋でカバーしてクリーム剤を封じ込めることも提案されている (McCaffrey et al., 2012)。しかし、このクリームも、手がX線場に入った場合、同様に線量を増加させる可能性がある。さらに繊細な手技では、放射線減衰材料により触覚的フィードバックが減ることで、透視時間またはCT照射時間が延長するおそれがある (NCRP, 2010)。

5.6.2 下肢および足

(196) X線管が治療台の下側におかれるとき、一次ビームからの放射線が治療台の足元から散乱するため、下肢が受ける線量は相当なものになる可能性がある。もしシールドを利用

きない場合、下肢の線量は手のそれよりも大きくなることもある。防護しなかった場合、IVR術者の足の線量は面積空気カーマ積に密接に関連する。面積空気カーマ積が $100 \text{ Gy}\cdot\text{cm}^2$ の手技では、下肢の吸収線量は約 1 mGy となる (Whitby and Martin, 2003)。

(197) 治療台の側面に鉛カーテン (通常は鉛当量 0.5 mm) を取り付けることで、術者には最も適切な防護が得られる (Whitby and Martin, 2003; Shortt et al., 2007)。これらのドレープは、手技の実施中正しく配置されていた場合、下肢の線量を10分の1～20分の1に低減することができるが (Martin, 2009)、実際には通常2分の1～7分の1程度である (Vanhavere et al., 2012)。すべてのIVR施設でそのようなドレープを指定するべきである。

(198) 鉛カーテンを寝台に取り付け、そこから垂れ下げることには、線源にできるだけ近づけるといいうメリットがあり、また常設されることからこの使用の有無について意識的な判断は不要である。IVR術者が寝台の横に立つ大半の手技では、寝台に鉛ドレープを取り付けることは適切な選択肢である。しかし、足を完全に防護できることは稀である。

(199) 通常、寝台に取り付けた鉛カーテンは寝台の全長まで伸びていないため、術者とアシスタントの双方の防護にはその位置決めが重要である。寝台の横に立つ術者は適切に防護されるが、例えばTIPSSのようにIVR術者が寝台の頭部またはその付近に立った場合、ドレープが寝台の頭部へ動かせなければ防護に役立てることができない。これらのシールドは、IVR術者が寝台の頭部または足元付近に立つ手技にはあまり有効でないかもしれない。そのような手技では、他のスタッフが寝台の横に立つ必要がある場合もあり、彼らには下肢の防護が必要となる。

(200) 下肢の防護には、可動式の独立型シールドを利用できる。無菌環境を維持するためには、手技を開始する前にそれらの設置について意識的に判断する必要がある。これを上下にしたり、傾けたり、角度を付けたりする際には、治療台やCアームと接触するリスクがある。そのようなシールドは、手技のその他のアシスタントスタッフの防護にも使用できる。

(201) X線撮影中に治療台から後ろに下がることは、職業被ばく線量の低減に有効な1つの手段である。しかし、術者は手技を行うために十分に患者の近くにいる必要があるため、透視中にこれを行うことはほぼ不可能である。ただし、一連の画像取得中および自動注入器による造影剤注入中には可能である。

5.7 陽電子放出断層撮影 (PET) / コンピュータ断層撮影 (CT) のIVRにおける防護

(202) 通常の透視ガイド下のインターベンションのための防護エプロンや防護メガネなどの個人防護具は、 511 keV というPET光子の陽電子消滅エネルギーに対しては有効ではない (Ahmed et al., 2007)。患者に放射性医薬品を注射した後は、患者から放出される放射線に対

してIVR術者が制御できることはわずかであり、X線の量と質が術者によって直接制御される透視やCTガイド下の手技とは異なる。したがって、PET-CTガイド下IVRでは、スタッフと隣接する部屋の遮蔽を最適化し防護を確保するために、PET-CT室を慎重に設計する必要がある(Madsen et al., 2006; Cruzate and Discacciatti, 2008; IAEA, 2008; Elschot et al., 2010)。2章に示したように、PET-CTガイド下IVRによる術者の放射線被ばくを主に決定する因子は患者のそばにいる時間であり、この時間を短縮することが職業放射線防護の1つの重要な要素である。PET/透視ガイド下のIVRについても同様の配慮が適用される。

5.8 選択的内部放射線療法における防護

(203) ^{90}Y 放射能を含有するすべてのバイアル、すべての機器、および投与の準備と機器の流し込みに用いる使い捨ての物品は、ピンセットで取扱い、手の線量を低減するための適切な遮蔽を行うべきである。高エネルギーのベータ線が放出されることから、遮蔽には原子番号が小さいポリ化合物(例えば、ポリメチルメタクリレート)などの材料が最適である。SIRT sphereの販売会社は、スタッフ、患者および部屋の汚染リスクを最小限に抑えるための助言を示し、訓練資料を提供している(SIRTEX, 2016)。これには、調製および注射のためには特殊な遮蔽ボックスを使用することが含まれている。さらに、二重の手袋を推奨している。これは外側の手袋が汚染されたとき、手袋をした手でそれを外すことができるためである。マイクロスフェアの注入のため、販売会社はアクリル製のデリバリーボックスとデリバリーセットを提供している。これにより、 ^{90}Y バイアルと、すべての活栓およびチューブとの直接の接触が阻止される。マニュアル操作の前には、すべてのチューブとカテーテルを注射用水または生理食塩水でフラッシュすることが不可欠である。表5.1には、1回のSIRT術に関するさまざまなスタッフメンバーの典型的な被ばくについて、代表的な概要を示している。

(204) 放射線防護措置のあらゆる技術面に加え、手技の全段階のスピードアップのための

表 5.1 典型的な患者投与の準備をしている技師または薬剤師、ならびに調製された投与率を注入している医師における代表的な被ばく (SIRTEX, 2016 より引用)

		体 幹 (mSv)	眼の水晶体 (mSv)	手 (mSv)
薬剤師	$H_p(0.07)$	0.027	0.026	0.35
	$H_p(10)$	0.003	0.004	
IVR 術者	$H_p(0.07)$	0.038	0.12	0.32
	$H_p(10)$	0.004	0.054	
放射線安全管理者	$H_p(0.07)$	< 0.02	0.04	0.2
	$H_p(10)$	0.01	0.017	

表 5.2 2 GBq の ^{90}Y 放射能を注射して 6 時間後のさまざまな距離における典型的な周辺線量当量率 (SIRTEX, 2016 より引用)

線源からの距離	周辺線量当量率
0.25 m	$18.8 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
0.5 m	$9.2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
1 m	$1.5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
2 m	$0.4 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
4 m	$< 0.1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$

訓練を行うことが、職業被ばくの大幅な低減をもたらす。Aubert ら (2003) は、 ^{90}Y 注射法を最適化することで末端部の線量を低減できることを実証している。彼らによれば、手技の最適化の後には末端部の線量は 10 分の 1 以上低減する。

(205) SIRT の後、患者には経過観察、一般的な看護と収容が必要である。多くの施設において、患者は核医学部門の個室に移されるが、スタッフ、来訪者とその他の患者の放射線被ばくは比較的低い。143 件の SIRT 手技 (124 件は樹脂マイクロスフェア、19 件はガラスマイクロスフェア) を検討した McCann ら (2012) は、1 m の距離における平均等価線量率は樹脂マイクロスフェアで $1.1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 、ガラスマイクロスフェアで $2.4 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ であることを明らかにした。2 GBq の ^{90}Y 放射能を注射して 6 時間後のさまざまな距離における典型的な線量当量率 (SIRTEX, 2016) を表 5.2 に示す。

5.9 防護衣の取扱い、保管および検査

(206) 施設では受入基準を確立して、それを適用する必要がある。防護衣の購入、検査および補充を行えるよう、十分な資源が必要である。防護エプロンは、折りたたむと防護用の裏地に亀裂が入ることがあるため、折りたたんではならない。防護エプロンは毎回の使用前に、破損または不具合、ねじれ、異常な点がないかを目視して確認するべきである。

(207) 防護衣の受領時には、防護材料について何らかの不具合がないか X 線検査を行い、その後は劣化がないかを年 1 回検査するべきである。Clements ら (2015) は、評価時間を短縮し、スタッフの被ばくを低減し、画像を保管することで検査が実施されたという証拠を示すことができる、CT を用いた新たな評価法を開発した。アーカイブされた画像を将来の比較に用いることもできる。防護エプロンについては、実際の減衰値がものによって大きく異なることから、標準化された受入検査法が必要である (CRCPD, 2001; Christodoulou et al., 2003; Finnerty and Brennan, 2005)。無鉛の防護エプロンに関しては、透過の測定にブロードバンドの X 線ビームを使用するべきである。また、Pasciak ら (2015) が提案しているように、エプロンを着用する施設で実施されるインターベンションに伴う放射線場で認められたもの (例え

ば散乱 X 線スペクトルなど) と、類似した X 線スペクトルを含めるべきである。

(208) 防護具の破損を避けながら洗浄するための指示および手順を、品質保証プログラムに含めるべきである (Vaño et al., 2016)。

5.10 教育と訓練

(209) IVR に係わるスタッフは、放射線防護と品質保証プログラムの適用に関して、教育と訓練を受ける必要がある。訓練には、患者周囲の散乱放射線レベルの分布、さまざまな要素がどのように線量分布に影響するかという理解、被ばくモニタリングと線量評価の戦略、ならびに天井吊り下げ式のシールド、鉛メガネ、遮蔽カーテンとドレープなど防護具の有効な使用についての習熟を含めるべきである。このような知識は、初期訓練によって習得され、技術の進歩に相応する継続教育を通じて維持、更新されるべきである。

(210) IVR 施設をサポートしている医学物理士または放射線防護の専門家は、放射線防護の最高レベルの訓練を受ける必要がある。これは、彼らが IVR 術者およびインターベンションに係わるその他の医療従事者の講師として、さらに大きい責任をもっているためである (ICRP, 2009)。

(211) IVR における患者防護と職業放射線防護の間の密な関連を踏まえ、職業放射線防護を担当する職員、規制当局、線量測定業者のスタッフ、および装置納入業者からの臨床応用の専門家は、全般的な放射線防護の知識のみならず、IVR における医療慣行と使用する放射線装置に関する知識も必要である。さらに線量測定業者のスタッフは、線量計の校正と異常線量値の調査のために、パルス放射線を含め、線質および散乱放射線場についての背景的知識を備えている必要がある。

5.11 職業放射線防護に関する記録

(212) 保管すべき記録は、基準および法令の中の要件として制定される。職業被ばくの記録には以下のものが含まれる：作業者が職業被ばくを受けることになる作業の内容に関する情報、異常被ばく値の調査結果を含む、被ばくモニタリングと線量評価の結果、放射線被ばくと関連する他の作業者の作業に関する情報、健康調査の結果、放射線防護に関する初期ならびに定期的な教育と訓練、再訓練講習。防護メガネを着用し、防護について眼の線量計の測定値を補正する場合は、個々の IVR 術者が鉛メガネとその眼用線量計の両方を装着していたことを証明するため、その記録を保管する必要がある。雇用主はスタッフに対し、スタッフ自身の職業被ばくの記録を閲覧できるようにしなければならない。

(213) 仕事量 (1 年間当たりの手技) に関する情報は、防護の最適化、および異常被ばく

の比較と調査に役立つ。

5.12 品質保証システムの必要性

(214) 組織により包括的品質保証プログラムが確立される必要がある。このプログラムは、適切な職業被ばく制御を確保するために最適な放射線防護行為を維持することを目指す必要がある (ICRP, 2007; IAEA, 2014a)。計画被ばく状況に関する委員会の勧告を考慮し、放射線の使用に係わるスタッフが積極的に参加することが望ましい。このプログラムは、定期的な (内部と外部の) 独立監査を含む、施設レベルで実施される管理システムの一部とするべきである。

(215) 以下のことを保証するため、放射線画像ガイド下のインターベンションに係わるものが予想される新規スタッフを採用するための手順を確立しておくべきである：放射線防護における教育と訓練、新規スタッフの過去の線量計測結果を入手し、評価するための手配、採用前の健康調査、そのスタッフが複数の場所で働く場合は、他の雇用主と情報を共有するための手配。

(216) 適切な放射線検出器と線量測定装置を選択するための手順を確立しておくべきである。これらの手順は、国際的な勧告に従って策定し、かつ、広く認められている品質基準を遵守しているべきである。スタッフの放射線防護および健康調査の手配を確立しておく必要がある。これには、放射線防護プログラムに記述されているように、身体、眼および手の被ばくのモニタリング、ならびに作業場のモニタリングを含める。エプロン、甲状腺シールドおよび鉛メガネ等の個人防護具、ならびに天井吊り下げ式のシールドと寝台取り付け型カーテンを設置し、その機能を定期的に管理する必要がある。

(217) 個人被ばくモニタリングと作業場のモニタリング結果はこのプログラムの一部とし、異常な結果に対して必要な是正措置をとる。個人線量測定業者は、供給した個人線量計の認定書および線量評価の結果を記録し、その情報を規制当局が勧告している期間、安全に記録・保管する必要がある。

(218) 手順書には、調査、報告および記録の結果、職業被ばく線量の監査、インシデントまたは事故の場合の是正措置を含めるべきである。

(219) 手順書では、インターベンションの実施と両立できるよう、可能な限り防護具着用の要件および指示を示すべきである。これには天井吊り下げ式のシールドと防護メガネの使用を含める。さらに手順書では、防護メガネの着用の監査とその記録も含める。これは、減衰を考慮するため DRF を線量測定値に適用する場合、特に必要である。

(220) IVR のスタッフの放射線防護に関する訓練と資格認定を記録し、予め定めた間隔ごと、または重大な変更があった場合に検討する。品質保証システムの運用における初任者訓練は、組織の戦略の一部とするべきである。品質保証活動、および放射線防護措置の全般的有効

性の検討と評価の責任の割り当てを含む運用手順を、品質保証マニュアルの一部として策定する必要がある。

(221) 職業放射線防護は患者の防護と密接に関連することから、全体的な品質保証プログラムには、放射線装置の品質管理、受入検査と試運転、放射線装置の徹底した特性評価、面積空気カーマ積の計器（面積線量計）の校正、および个人防护具の品質管理を含める必要がある。

6. 勧告の要約

6.1 全 般

(222) 本章で要約している勧告は、3～5章に示した勧告を統合したものである。患者の被ばくを低減するための大半の措置は作業者の防護にも寄与し、IVRにおける職業被ばくは患者の被ばくと密接に関連している。加えて、職業放射線防護には防護衣とシールドを適切に使用する必要がある。スタッフの防護措置はIVRの臨床結果を損なったり、患者の被ばくを増加させたりすべきではない。したがって、職業放射線防護は、患者の防護と合わせた統合的アプローチの中で管理する必要がある。IVRにおける放射線防護に責任を有する病院スタッフは、これらの手技に精通している必要がある。

6.2 個人被ばくのモニタリング

(223) IVRにおける職業被ばくのモニタリングには、線量限度の遵守状況の確認と職業放射線防護の最適化という、2つの主要な目的がある。

(224) 遵守状況のモニタリングには実効線量の評価のみならず、エプロンで防護されていない眼の水晶体や末端部などの臓器・組織が受けるであろう線量も含める。最近の研究から、IVR術者において放射線に関連した眼の水晶体混濁の発生率が高いことが明らかにされており、このことは眼の水晶体の被ばくを評価する必要性を強く示している。

(225) 委員会は、IVRの線量計について、1つはエプロンで遮蔽されているもの（エプロン内に装着）、1つはエプロン外で襟の高さでの遮蔽されていないもの、という2つの線量計を用いるべきと勧告している。これは、入手できる最良の実効線量の推定値が得られるのみならず、眼の水晶体と頭部への線量の合理的な指標を示すものであり、また、防護エプロンを実際に着用していたことを確認することにもなるためである。

(226) 使用者が自身の線量計を正しい位置に装着できるよう、視覚的な要素も整えるべきである。2つの測定値の一貫した解析を行うことで、線量計を適切に使用したことを示すことができ、モニタリングシステムをより強固なものにできる。

(227) モニタリングの最適化では、手技の成功を損なわずにスタッフの線量を低減するための、防護措置の効果を評価する。最適化の影響は、時間とともに職業被ばく線量の低減となって現れてくる。APD（アクティブ型個人線量計）は、最適化の目的に、手技の種類別の放射

線被ばくまたは手技の特定局面の放射線被ばくの試験に、および教育目的に有用であることが証明されている。

(228) APD とエリアモニタの型式試験手順ならびに校正には、IVR 手技で良く用いる照射野を含めるべきである。これには高線量率のパルスモードでの試験も含める。

(229) 鉛メガネを着用しているときの眼の水晶体の線量を評価するためには、その技術と手法を改善する必要がある。

(230) 委員会は、適切な線量計を常に装着し、手順により規定される正しい位置につけ、手順の遵守に関する監査を実施すべきであると勧告している。加えて、散乱放射線場を継続的に評価するため、および個人線量評価のバックアップとするためには、空間線量計が有用である。空間線量計は、特に遮蔽されていない眼の水晶体の線量など、職業被ばくの合理的な推定を行うことができるため、個人線量計の測定値と患者付近（C アーム上など）の空間線量計の測定値を比較することは、個人線量計の装着手順の不遵守を発見するために役立つと考えられる。防護の最適化を管理するためには、放射線被ばくが通常より高いときに警告を発し、作業関係の検討が必要となる、調査レベルを設定する必要がある。加えて、エプロン外装着の線量計と手の線量計の測定値について線量が低いときの調査レベルを設定することも可能である。すなわち、これらの線量計の測定値が想定を下回った場合、線量計を一貫して適切に装着していたか否かの検討を始める。

(231) 放射線医学に通常使用されるすべてのエネルギーの光子放射線について、実用量 $H_p(0.07)$ は $H_p(3)$ の概算として用いることができる。 $H_p(10)$ も同様の目的に使用できるが、光子スペクトルの平均エネルギーが 40 keV を上回る場合に限る。

(232) 手指の一部が X 線ビームに非常に近い場合や、さらには直接 X 線ビーム内に入ってしまうと、手首線量計では実際の手指の線量を反映できないと考えられる。

(233) 防護エプロンまたは寝台吊り下げ式のカーテンによる遮蔽から外れた部分の下肢に照射される線量を、評価することを検討すべきである。

(234) 線量計を必要としない、個人の位置検知も併用して、眼の線量も含めた個人線量を算定する計算技術の開発を追求する研究努力が必要である。

(235) 放射線防護プログラムには、職業被ばく線量の監査、異常被ばくの調査、結果の報告と記録、さらに適切な場合は是正措置を含める必要がある。

6.3 職業放射線防護の方法および装置

(236) 患者防護のための措置は一般に、スタッフも同程度に防護する。加えて、以下の方法および措置は職業放射線防護に特化して適用される：防護エプロンとネックガード、天井吊り下げ式のシールドと鉛メガネ、寝台吊り下げ式の鉛カーテン、患者から後に下がって距離を

とること、X線管側よりも受像器側よりにいること。

(237) 鉛ではなく、スズやビスマス等の高い原子番号の元素からなる複合層または二重層の軽量エプロンもある。「鉛当量」という表現のみで減衰特性を表現することは誤解を招くおそれがある。なぜなら、光子エネルギーが異なれば光子の減衰も大きく変動し、その変動は、光子のスペクトルの中でも特に画像診断で用いられる範囲において最も大きいからである。減衰係数は、防護衣が使用される状況を反映するため、減衰の測定に使用した複数の線質の情報、および複数の線質で得られた測定値の重み付け方法の情報と共に規定されるべきである。

(238) 眼の防護措置を使用しない場合、通常の仕事量のスタッフは、線量限度を超え得る線量を眼の水晶体に受けることになり、それによって長期的には水晶体混濁が生じ得る。IVR術者は作業中、できる限り天井吊り下げ式のシールドを活用するべきである。これらのシールドの有効性は、それらの位置と適切な使用によって左右される。

(239) 防護のための鉛メガネを着用したとき、眼の線量は主に、IVR術者の頭部の周辺組織から後方散乱した放射線によるものである。加えて、透視の間はIVR術者は通常画像モニターを見ているので、眼の水晶体は側方および頭部より下方からの放射線による被ばくを受ける。したがって、鉛メガネは、着用者の顔の輪郭に密にフィットしているべきである。眼の水晶体の線量は、鉛メガネを使用することで2分の1～7分の1に低減することができる。

(240) X線ビームおよび患者の照射体積に近いIVR術者の手は、より高い線量を受ける。天井吊り下げ式のシールドの下端に取り付けた鉛ドレープのほか、患者にドレープおよびパッドを適用することも、多数の手技を手がける術者の手の防護に有効であろう。そのようなドレープには、そこからカテーテルを挿入できる開口部が付いていることがある。

(241) 寝台上から鉛カーテンが吊り下げられているときでも、カーテンと床面に隙間があることで、術者の足が被ばくすることがある。これは、治療台が比較的高い位置にあるとき特に当てはまる。IVR術者は、シネまたはデジタルサブトラクション血管造影法(DSA)の撮影中は可能な限り、また自動注入器による造影剤注入中にも、治療台から後に下がるべきである。

(242) 防護衣の防護値の規格には、減衰の測定に使用した放射線ビームの特性を併記するべきである。さまざまな線質で行う測定の組合せは、その防護衣を使用する状況を反映させる必要がある。

6.4 妊娠中の作業者の防護

(243) 妊娠の初期(妊娠が申告される前)は、通常の作業者の防護により対応する。妊娠が申告され雇用主に通知された後、胎児の追加的な防護を検討するべきである。妊娠の申告の後、妊娠中の作業者の作業条件は、例えば、妊娠の残りの期間中の胎児の追加線量がおよそ1 mGyを超えないようにすべきである。

(244) 妊娠中の作業者に対する不必要な差別は避けるべきである。現在得られているデータは、妊娠中の IVR 術者またはその他の作業者を、IVR 室内の手技から自動的に除外することを、正当化してはいない。

(245) 個人線量計を2つ使用する際は、胎児の線量をモニタリングするため、エプロン内の線量計を腹部に装着するべきである。線量計から個人線量当量 $H_p(10)$ が 0.2 mSv/月未満を示した場合、胎児の等価線量は線量限度を下回ると考えられる。

6.5 防護衣の保管および品質管理

(246) 防護衣の購入、検査および補充を行えるよう、十分な資源が必要である。施設では受入基準を確立して適用する必要がある。

(247) 防護エプロンは、折りたたむと防護用の裏地に亀裂が入ることがあるため、折りたたんではならない。防護エプロンは毎回の使用前に、破損または不具合、ねじれ、異常な点がないかを目視して確認するべきである。その受領時には、防護材料について何らかの不具合がないか X 線検査を行い、その後は劣化がないかを年1回検査するべきである。

(248) 防護具の破損を避けながら洗浄するための手順書を品質保証プログラムに含め、慎重に従うべきである。

6.6 品質保証プログラム

(249) 組織により包括的品質保証プログラムが確立される必要がある。このプログラムは、適切な職業被ばく制御を確保するために最も適切な放射線防護行為を維持することを目指す必要がある。このプログラムには、特に線量計の装着、防護具の着用、職業放射線防護の最適化に関連するものなどの手順に従うことを確保するための、適切な監査を含めるべきである。

6.7 教育と訓練

(250) IVR に係わるスタッフは、品質保証プログラムの適用に関して、初期および定期的な教育と訓練を受ける必要がある。これには被ばくモニタリングと線量評価のための戦略、防護方法および防護衣を含める。

(251) 患者の防護と IVR に係わるスタッフの防護には緊密な関係があることから、職業放射線防護を担当する職員、線量測定業者のスタッフ、装置納入業者の臨床応用の専門家および規制当局には、一般的な放射線防護の知識のみならず、IVR の臨床業務および使用する X 線装置の特性の知識が必要である。

(252) IVR 施設をサポートしている医学物理士または放射線防護の専門家は、放射線防護の最高レベルの訓練を受ける必要がある。これは、彼らが IVR 術者と IVR に係わるその他の医療従事者の講師としてのさらなる責任ももっているためである (ICRP, 2009)。線量測定業務のスタッフは、線量計の校正のため (例えば線質、散乱放射線場、パルス放射線など)、および異常線量値の調査において使用者と協力するために、実地臨床についての背景的知識を備えている必要がある。

6.8 記 録

(253) 職業被ばくに関する記録には、作業の内容、他の雇用主のための作業による被ばく、健康調査の結果、放射線防護の教育と訓練 (再訓練講習を含む)、被ばくモニタリングと線量評価の結果 (異常被ばく値の調査結果を含む) を含めるべきである。雇用主はスタッフに対し、スタッフ自身の職業被ばくの記録を閲覧できるようにしなければならない。

参考文献

- Ahmed, S., Zimmer, A., McDonald, N., et al., 2007. The effectiveness of lead aprons in reducing radiation exposures from specific radionuclides. *J. Nucl. Med. Meet. Abstr.* **48**, 470.
- Alazzoni, A., Gordon, C.L., Syed, J., et al., 2015. Randomized controlled trial of radiation protection with a patient lead shield and a novel, nonlead surgical cap for operators performing coronary angiography or intervention. *Circ. Cardiovasc. Interv.* **8**, e002384.
- Andrews, C., Walker, S., Ackermann, R., et al., 1994. Hepatic radioembolization with yttrium-90 containing glass microspheres: preliminary results and clinical follow-up. *J. Nucl. Med.* **35**, 1637–1644.
- Aparici, C.M., Win, A.Z., 2014. Use of positron emission tomography/CT to perform biopsy of a mesenteric mass. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **25**, 1609.
- Aparici, C., Aslam, R., Win, A., 2014. Initial experience of utilizing real-time intraprocedural PET/CT biopsy. *J. Clin. Imag. Sci.* **4**, 54.
- Artschan, R.E.R., Brettle, D.S., Chase, K., et al., 2014. An investigation of the radiation doses to the lower legs and feet of staff undertaking interventional procedures. *Br. J. Radiol.* **87**, 20130746.
- Aubert, B., Guilabert, N., Lamon, A., Ricard, M., 2003. Which protection against radiation for new protocols of internal radiotherapy by yttrium-90? 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23–25 October (2002), Madrid, Spain, pp. 47–49.
- Badal, A., Zafar, F., Dong, H., Badano, A., 2013. A real-time radiation dose monitoring system for patients and staff during interventional fluoroscopy using a GPU-accelerated Monte Carlo simulator and an automatic 3D localization system based on a depth camera. *Proc. SPIE* 8668.
- Balter, S., 1999. Radiation safety in the cardiac catheterization laboratory: basic principles. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* **47**, 229–236.
- Balter, S., 2001. *Interventional Fluoroscopy: Physics, Technology, Safety*. Wiley-Liss, New York.
- Balter, S., Lamont, J., 2002. Radiation and the pregnant nurse. *Cath. Lab. Digest.* **10**, e1. Available at <https://www.cathlabdigest.com/articles/Radiation-and-Pregnant-Nurse> (last accessed 30 September 2023).
- Behrens, R., Dietze, G., Zankl, M., 2009. Dose conversion coefficients for electron exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* **54**, 4069–4087 (corrigendum at *Phys. Med. Biol.* **55**, 3937–3945).
- Behrens, R., Dietze, G., 2010. Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate? *Phys. Med. Biol.* **55**, 4047–4062.
- Behrens, R., Dietze, G., 2011. Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* **56**, 415–437.
- Behrens, R., 2012a. Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for a new cylindrical phantom for photon reference radiation qualities. *Radiat. Prot. Dosim.* **151**, 450–455.
- Behrens, R., 2012b. On the operational quantity $H_p(3)$ for eye lens dosimetry. *J. Radiol. Prot.* **32**, 455–464.
- Beijst, C., Elschot, M., Viergever, M.A., De Jong, H.W.A.M., 2016. Toward simultaneous realtime fluoroscopic and nuclear imaging in the intervention room. *Radiology* **278**, 232–238.
- Benatar, N.A., Cronin, B.F., O'Doherty, M.J., 2000. Radiation dose rates from patients undergoing PET: implications for technologists and waiting areas. *Eur. J. Nucl. Med.* **27**, 583–589.

- Berrington de González, A., Ntowe, E., Kitahara, C.M., et al., 2016. Long-term mortality in 43763 U.S. radiologists compared with 64990 U.S. psychiatrists. *Radiology* **281**, 847–857.
- Best, P.J., Skelding, K.A., Mehran, R., et al., 2011. SCAI consensus document on occupational radiation exposure to the pregnant cardiologist and technical personnel. *EuroIntervention* **6**, 866–874.
- Bester, L., Meteling, B., Pocock, N., et al., 2012. Radioembolization versus standard care of hepatic metastases: comparative retrospective cohort study of survival outcomes and adverse events in salvage patients. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **23**, 96–105.
- Bilski, P., Bordy, J.-M., Daures, J., et al., 2011. The new EYE-D dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff. *Rad. Measur.* **46**, 1239–1242.
- Blake, M.E., Oates, M.E., Applegate, K., Kuligowska, E., 2006. Proposed program guidelines for pregnant radiology residents: a project supported by the American Association of Women Radiologists and the Association of Program Directors in Radiology. *Acad. Radiol.* **13**, 391–401.
- Bolch, W.E., Dietze, G., Petoussi-Hens, N., Zankl, M., 2015. Dosimetric models of the eye and lens of the eye and their use in assessing dose coefficients for ocular exposures. *Ann. ICRP* **44**(1S), 91–111.
- Buls, N., Pagés, J., de Mey, J., Osteaux, M., 2003. Evaluation of patient and staff doses during various CT fluoroscopy guided interventions. *Health Phys.* **85**, 165–173.
- Cantone, M.C., Ginjaume, M., Miljanic, S., et al., 2017. Report of IRPA task group on the impact of the eye lens dose limits. *J. Radiol. Prot.* **37**, 527–550.
- Carlson, S.K., Felmlee, J.P., Bender, C.E., et al., 2005. CT fluoroscopy-guided biopsy of the lung or upper abdomen with a breath-hold monitoring and feedback system: a prospective randomized controlled clinical trial. *Radiology* **237**, 701–708.
- Camacho, J.C., Moncayo, V., Kokabi, N., et al., 2015. ^{90}Y radioembolization: multimodality imaging pattern approach with angiographic correlation for optimised target therapy delivery. *Radiographics* **35**, 1602–1620.
- Carinou, E., Ferrari, P., Koukorava, C., Krim, S., Struelens, L., 2011. Monte Carlo calculations on extremity and eye lens dosimetry for medical staff at interventional radiology procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **144**, 492–496.
- Carinou, E., Ferrari, P., Bjelac, O.C., et al., 2015. Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: dosimeters, calibration and practical aspects of $H_p(3)$ monitoring. A 2015 review. *J. Radiol. Prot.* **35**, R17–R34.
- Chambers, C.E., Fetterly, K.A., Holzer, R., et al., 2011. Radiation safety program for the cardiac catheterization laboratory. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* **77**, 546–556.
- Chiesa, C., 1997. Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67, and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. *Eur. J. Nucl. Med.* **24**, 1380–1389.
- Chiriotti, S., Ginjaume, M., Vañó, E., et al., 2011. Performance of several active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology. *Rad. Measur.* **46**, 1266e1270.
- Christodoulou, E.G., Goodsitt, M.M., Larson, S.C., et al., 2003. Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Med. Phys.* **30**, 1033.
- Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Sim, K.H., et al., 2010. Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern? *Catheter. Cardiovasc. Interv.* **76**, 826–834.
- Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Minamoto, A., et al., 2012. Radiation-induced eye lens changes and risk for cataract in interventional cardiology. *Cardiology* **123**, 168–171.
- Clairand, I., Bordy, J.-M., Carinou, E., et al., 2011. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: tests in laboratory conditions and recommendations-ORAMED project. *Radiat. Meas.* **46**, 1252–1257.
- Clements, J., Moirano, J., Sherry, C., Barr, P., Berg, J., 2015. Best practices for evaluating and

- tracking protective garments. *J. Am. Coll. Radiol.* **12**, 531–532.
- Clerinx, P., Buls, N., Bosmans, H., De Mey, J., 2008. Double-dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **129**, 321–327.
- CRCPD, 2001. Quality Control Recommendations for Diagnostic Radiography. Vol. 3 Radiographic or Fluoroscopic Machines. Conference of Radiation Control Program Directors, Inc. in Cooperation with Center for Devices and Radiological Health of the Food and Drug Administration, Frankfort, KY.
- Cousin, A.J., Lawdahl, R.B., Chakraborty, D.P., Koehler, R.E., 1987. The case for radioprotective eyewear/facewear. Practical implications and suggestions. *Invest. Radiol.* **22**, 688–692.
- Cruzate, J., Discacciatti, A., 2008. IRPA Refresher Course 18: Shielding of Medical Facilities. Shielding Design Considerations for PET-CT Facilities. International Radiation Protection Association, Buenos Aires. Available at: <https://www.irpa.net/members/54302/%7BEF74BEF9-6C7E-4DFC-9B4E-DD9EC8813764%7D/RC%2018%20Shielding%20of%20Medical%20Facilities.%20Shielding%20Design%20Considerations%20for%20PET-CT%20Facilities%20PPT.pdf> (last accessed 10 October 2023)
- Daly, B., Templeton, P.A., 1999. Real-time CT fluoroscopy: evolution of an interventional tool. *Radiology* **211**, 309–315.
- Dauer, L.T., Miller, D.L., Schueler, B., et al., 2015. Occupational radiation protection of pregnant or potentially pregnant workers in IR: a joint guideline of the Society of Interventional Radiology and the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **26**, 171–181.
- Day, M.J., Forster, E., 1981. Protective effect of spectacles. *Br. J. Radiol.* **54**, 137–138.
- Demir, M., Demir, B., Sayman, H., et al., 2010. Radiation protection for accompanying person and radiation workers in PET/CT. *Radiat. Prot. Dosim.* **147**, 528–532.
- Detorie, N., Mahesh, M., Schueler, B.A., 2007. Reducing occupational exposure from Fluoroscopy. *J. Am. Coll. Radiol.* **4**, 335–337.
- Dromi, S., Wood, B.J., Oberoi, J., Neeman, Z., 2006. Heavy metal pad shielding during Fluoroscopic interventions. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **17**, 1201–1206.
- Durán, A., Hian, S.K., Miller, D.L., et al., 2013. Recommendations for occupational radiation protection in interventional cardiology. *Catheter. Cardiov. Interv.* **82**, 29–42.
- EC, 2015. Medical Radiation Exposure of the European Population. Radiation Protection No. 180. European Union, Luxembourg.
- Eder, H., Schlattl, H., Hoeschen, C., 2010. X-ray protective clothing: does DIN 6857-1 allow an objective comparison between lead-free and lead-composite materials? *Fortschr. Röntgenstr.* **182**, 422–428.
- Efstathopoulos, E.P., Pantos, I., Andreou, M., et al., 2011. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology. *Br. J. Radiol.* **84**, 70–77.
- Elschot, M., De Wit, T., De Jong, H., 2010. The influence of self absorption on PET and PET/CT shielding requirements. *Med. Phys.* **37**, 2999–3007.
- Faulkner, K., Marshall, N.W., 1993. Personal monitoring of pregnant staff in diagnostic radiology. *J. Radiol. Prot.* **13**, 259.
- Felmlee, J.P., McGough, P.F., Morin, R.L., Classic, K.L., 1991. Hand dose measurements in interventional radiology. *Health Phys.* **60**, 265–267.
- Fetterly, K., Schueler, B., Grams, M., et al., 2017. Head and neck radiation dose and radiation safety for interventional physicians. *JACC Cardiovasc. Interv.* **10**, 520–528.
- Fischman, A.M., Ward, T.J., Patel, R.S., et al., 2014. Prospective, randomized study of coil embolization versus Surefire infusion system during yttrium-90 radioembolization with resin microspheres. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **25**, 1709–1716.
- Finnerty, M., Brennan, P.C., 2005. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. *Eur. Radiol.* **15**, 1477–1484.
- Franken, Y., 2002. Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology protection

- efficiency and correction factors for personal dosimetry. Proc. 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23–25 October 2002, Madrid, Spain, pp. 135–139.
- Galster, M., Guhl, C., Uder, M., Adamus, R., 2013. Exposition of the operator's eye lens and efficacy of radiation shielding in fluoroscopically guided interventions. *RoFo* **185**, 474–481.
- Geber, T., Gunnarsson, M., Mattsson, S., 2011. Eye lens dosimetry for interventional procedures—relation between the absorbed dose to the lens and dose at measurement positions. *Radiat. Measur.* **46**, 1248–1251.
- Gianfelice, D., Lepanto, L., Perreault, P., Chartrand-Lefebvre, C., Milete, P.C., 2000a. Effect of the learning process on procedure times and radiation exposure for CT fluoroscopy-guided percutaneous biopsy procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **11**, 1217–1221.
- Gianfelice, D., Lepanto, L., Perreault, P., Chartrand-Lefebvre, C., Milete, P.C., 2000b. Value of CT fluoroscopy for percutaneous biopsy procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **11**, 879–884.
- Goodney, P.P., Beck, A.W., Nagle, J., Welch, H.G., Zwolak, R.M., 2009. National trends in lower extremity bypass surgery, endovascular interventions, and major amputations. *J. Vasc. Surg.* **50**, 54–60.
- Guersen, J., Cassagnes, L., Mechin, G., et al., 2013. Interventional radiologists: a necessary evolution of leaded protective aprons design. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **24**, 443.
- Hagspiel, K.D., Nambiar, A., Hagspiel, L.M., Ahmad, E.A., Bozlar, U., 2013. Temporary arterial balloon occlusion as an adjunct to yttrium-90 radioembolization. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **36**, 809–813.
- Harris, T.J., Zafar, A.M., Murphy, T.P., 2011. Utilization of lower extremity arterial disease diagnostic and revascularization procedures in Medicare beneficiaries 2000–2007. *Am. J. Roentgenol.* **197**, W314–W317.
- Haskal, Z.J., 2004. Interventional Radiology Carries Occupational Risk for Cataracts. *RSNA News.* **14**, 5–6.
- Häuser, U., Czarwinski, R., Brix, G., 2009. Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study. *Eur. Radiol.* **19**, 2000–2008.
- Heckathorne, E., Dahlbom, M., 2008. Radiation dose to surgical staff from positron-emitter-based localization and radiosurgery of tumors. *Health Phys.* **95**, 220–226.
- Hiles, P.A., Hughes, H., Arthur, D., Martin, C.J., 2016. Personal Protective Equipment. British Institute of Radiology, London.
- Hippelainen, E., Nikkinen, P., Ihalainen, T., Uusi-Simora, J., Savolainen, S., 2008. Personal radiation doses in PET/CT facility: measurements vs. calculations. *Radiat. Prot. Dosim.* **132**, 57–63.
- Hoang, J.K., Yoshizumi, T.T., Toncheva, G., et al., 2011. Radiation dose exposure for lumbar spine epidural steroid injections: a comparison of conventional fluoroscopy data and CT fluoroscopy techniques. *Am. J. Roentgenol.* **197**, 778–782.
- Holland, J., Williamson, M., Lewis, J., 2010. Unconventional nuclides for radiopharmaceuticals. *Mol. Imag.* **9**, 1–20.
- Hu, P., Kong, Y., Chen, B., et al., 2017. Shielding effect of lead glasses on radiologists' eye lens exposure in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **174**, 136–140.
- IAEA, 2008. Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: PET/CT. Safety Reports Series No. 58. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye. IAEA-TECDOC-1731. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014a. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Series No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014b. Recommendations of the Working Group on Interventional Cardiology on Occupational Doses to the Lens of the Eye in Interventional Cardiology: the Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR). IAEA-

- TECDOC-1735. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2016. Radiation Protection of Patients. Retrospective evaluation of lens injuries and dose study. International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPOP/Content/News/reliid-activities.htm> (last accessed 30 September 2023).
- ICRP, 1990. Radiological protection of the worker in medicine and dentistry. ICRP Publication 57. *Ann. ICRP* **20**(3).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* **21**(1–3).
- ICRP, 1998. Genetic Susceptibility to Cancer. ICRP Publication 79. *Ann. ICRP* **28** (1–2).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. *Ann. ICRP* **30**(1).
- ICRP, 2000b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. *Ann. ICRP* **30**(2).
- ICRP, 2003. Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). ICRP Publication 90. *Ann. ICRP* **33**(1–2).
- ICRP, 2005. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. ICRP Publication 99. *Ann. ICRP* **35**(4).
- ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. *Ann. ICRP* **37**(6).
- ICRP, 2008. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. *Ann. ICRP* **38**(1/2).
- ICRP, 2009a. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP* **39**(2).
- ICRP, 2009b. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. *Ann. ICRP* **39**(5).
- ICRP, 2010a. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. ICRP Publication 117. *Ann. ICRP* **40**(6).
- ICRP, 2010b. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. *Ann. ICRP* **40**(2–5).
- ICRP, 2011. Statement on Tissue Reactions. International Commission on Radiological Protection, Ottawa.
- ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. *Ann. ICRP* **41**(1/2).
- ICRP, 2013a. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. *Ann. ICRP* **42**(1).
- ICRP, 2013b. Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. ICRP Publication 121. *Ann. ICRP* **42**(2).
- ICRU, 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations (Report 47). International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- IEC, 2012. Radiation Protection Instrumentation – Passive Integrating Dosimetry Systems for Personal and Environmental Monitoring of Photon and Beta Radiation. IEC-62387. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2014. Protective Devices Against Diagnostic Medical X-Radiation – Part 1: Determination of Attenuation Properties of Materials. IEC 61331-1. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IRPA, 2017. IRPA Guidance on Implementation of Eye Dose Monitoring and Eye Protection of Workers. International Radiation Protection Association, Paris. Available at: [http://www.irpa.net/docs/IRPA%20Guidance%20on%20Implementation%20of%20Eye%20Dose%20Monitoring%20\(2017\).pdf](http://www.irpa.net/docs/IRPA%20Guidance%20on%20Implementation%20of%20Eye%20Dose%20Monitoring%20(2017).pdf) (last accessed 30 September 2023).
- IRSN, 2014. Le dosimètre cristallin DOSIRIS. Institut de Radioprotection, Sureté Nucleaire, Croissy Sur Seine. Available at: http://dosimetre.irsrn.fr/fr-fr/Documents/Fiches%20produits/IRSN_Fiche_dosimetre_Cristallin.pdf (last accessed 30 September 2023).

- ISO, 2015. Radiological Protection: Procedures for Monitoring the Dose to the Lens of the Eye, the Skin and the Extremities. ISO 15382, second ed. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jacob, S., Boveda, S., Bar, O., et al., 2012. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int. J. Cardiol.* **167**, 1843–1847.
- Jacob, S., Donadille, L., Maccia, C., et al., 2013. Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses. *Radiat. Prot. Dosim.* **153**, 282–293.
- Jakobs, T.F., Hoffmann, R.T., Poepperl, G., et al. 2007. Mid-term results in otherwise treatment refractory primary or secondary liver confined tumours treated with selective internal radiation therapy (SIRT) using ^{90}Y trium resin-microspheres. *Eur. Radiol.* **17**, 1320–1330.
- Järvinen, H., Buls, N., Clerinx, P., et al., 2008. Overview of double dosimetry procedures for the determination of the effective dose to the interventional radiology staff. *Radiat. Prot. Dosim.* **129**, 333–339.
- Joemai, R.M., Zweers, D., Obermann, W.R., Geleijns, J., 2009. Assessment of patient and occupational dose in established and new applications of MDCT fluoroscopy. *Am. J. Roentgenol.* **192**, 881–886.
- Jones, A.K., Wagner, L.K., 2013. On the (f)utility of measuring the lead equivalence of protective garments. *Med. Phys.* **40**, 063902.
- Junk, A.K., Haskal, Z., Worgul, B.V., 2004. Cataract in interventional radiology – an occupational hazard? *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **45** (Suppl. 1), U178.
- Kemerink, G.J., Vanhavere, F., Barth, I., Mottaghy, F.M., 2012. Extremity doses of nuclear medicine personnel: a concern. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* **39**, 529–532.
- Kicken, P.J.H., Kemerink, G.J., van Engelshoven, J.M.A., 1999. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic and interventional arteriography. Part I: Assessment of entrance doses. *Radiat. Prot. Dosim.* **82**, 93–103.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2008. Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* **94**, 211–227.
- Kim, K.P., Miller, D.L., 2009. Minimising radiation exposure to physicians performing fluoroscopically guided cardiac catheterisation procedures: a review. *Radiat. Prot. Dosim.* **133**, 227–233.
- Kim, G.R., Hur, J., Lee, S.M., et al., 2011. CT fluoroscopy-guided lung biopsy versus conventional CT-guided lung biopsy: a prospective controlled study to assess radiation doses and diagnostic performance. *Eur. Radiol.* **21**, 232–239.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Berrington de González, A., et al., 2012. Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys.* **103**, 80–99.
- Kitahara, C.M., Linet, M.S., Balter, S., et al., 2017. Occupational radiation exposure and deaths from malignant intracranial neoplasms of the brain and CNS in U.S. radiologic technologists, 1983–2012. *Am. J. Roentgenol.* **208**, 1278–1284.
- King, J.N., Champlin, A.M., Kelsey, C.A., Tripp, D.A., 2002. Using a sterile disposable protective surgical drape for reduction of radiation exposure to interventionalists. *Am. J. Roentgenol.* **178**, 153–157.
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2009. Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **20**, 147–152, quiz 153.
- Klein, L.W., Tra, Y., Garratt, K.N., et al., 2015. Occupational health hazards of interventional cardiologists in the current decade: results of the 2014 SCAI membership survey. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* **86**, 913–924.
- Kong, Y., Struelens, L., Vanhavere, F., et al., 2015. Influence of standing positions and beam projections on effective dose and eye lens dose of anaesthetists in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **163**, 181–187.

- Korir, G.K., Ochieng, B.O., Wambani, J.S., Korir, I.K., Jowi, C.Y., 2012. Radiation exposure in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **152**, 339–344.
- Koukorava, C., Carinou, E., Simantirakis, G., et al., 2011. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* **144**, 482–486.
- Koukorava, C., Farah, J., Struelens, L., et al., 2014. Efficiency of radiation protection equipment in interventional radiology: a systematic Monte Carlo study of eye lens and whole body doses. *J. Radiol. Prot.* **34**, 509–528.
- Kuipers, G., Velders, X.L., De Winter, R.J., Reekers, J.A., Piek, J.J., 2008. Evaluation of occupational doses of interventional radiologists. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **31**, 483–489.
- Kuipers, G., Velders, X.L., 2009. Effective doses to staff from interventional procedures: estimations from single and double dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* **136**, 95–100.
- Leng, S., Christner, J.A., Carlson, S.K., et al., 2011. Radiation dose levels for interventional CT procedures. *Am. J. Roentgenol.* **197**, W97–W103.
- Lichliter, A., Weir, V., Heithaus, R.E., et al., 2017. Clinical evaluation of protective garments with respect to garment characteristics and manufacturer label information. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **28**, 148–155.
- Lie, Ø.Ø., Paulsen, G.U., Wøhni, T., 2008. Assessment of effective dose and dose to the lens of the eye for the interventional cardiologist. *Radiat. Prot. Dosim.* **132**, 313–318.
- Linnet, M.S., Kitahara, C.S., Ntowe, E., et al., 2017. Mortality in U.S. physicians likely to perform fluoroscopy guided interventional procedures compared with psychiatrists, 1979 to 2008. *Radiology* **284**, 482–494.
- Madsen, M.T., Anderson, J.A., Halama, J.R., et al., 2006. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT shielding requirements. *Med. Phys.* **33**, 4–15.
- Maeder, M., Brunner-La Rocca, H.P., Wolber, T., et al., 2006. Impact of a lead glass shield on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* **67**, 18–23.
- Magee, J.S., Martin, C.J., Sandblom, V., et al., 2014. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *J. Radiol. Prot.* **34**, 811–823.
- Mann, J.T. 3rd, Cubeddu, G., Arrowood, M., 1996. Operator radiation exposure in PTCA: comparison of radial and femoral approaches. *J. Invas. Cardiol.* **8** (Suppl. D), 22D–25D.
- Marshall, N.W., Faulkner, K., Clarke, P., 1992. An investigation into the effect of protective devices on the dose to radiosensitive organs in the head and neck. *Br. J. Radiol.* **65**, 799–802.
- Martin, C.J., 2009. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat. Prot. Dosim.* **136**, 140–157.
- Martin, C.J., 2012. Personnel dosimetry in UK radiology: is it time for a change? *J. Radiol. Prot.* **32**, E3–E6.
- Martin, C.J., 2016. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* **169**, 286–291.
- Martin, C.J., Magee, J.S., 2013. Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. *J. Radiol. Prot.* **33**, 445–460.
- Martin, G.J., Sutton, D.G., 2014. *Practical Radiation Protection in Healthcare* (2 ed.). Oxford University Press, Oxford.
- Marx, D.L., Balter, S., 1995. The distribution of stray radiation in a cardiac catheterization laboratory. *Med. Phys.* **22**, 1018.
- Marx, M.V., Niklason, L., Mauger, E.A., 1992. Occupational radiation exposure to interventional radiologists: a prospective study. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **3**, 597–606.
- Mateya, C.F., Claycamp, H.G., 1997. Phantom-derived estimation of effective dose equivalent from x-rays with and without a lead apron. *Health Phys.* **72**, 842–847.
- McCaffrey, J.P., Tessier, F., Shen, H., 2012. Radiation shielding materials and radiation scatter

- effects for interventional radiology (IR) physicians. *Med. Phys.* **39**, 4537–4546.
- McCann, J.W., Larkin, A.M., Martino, L.J., et al., 2012. Radiation emission from patients treated with selective hepatic radioembolization using yttrium-90 microspheres: are contact restrictions necessary? *J. Vasc. Interv. Radiol.* **23**, 661–667.
- McEwan, A.C., 2000. Assessment of occupational exposure in New Zealand from personal monitoring records. *Rad. Prot. (Australasia)* **17**, 60–66.
- McVey, S., Sandison, A., Sutton, D.G., 2013. An assessment of lead eyewear in interventional radiology. *J. Radiol. Prot.* **33**, 647–659.
- McLoney, E., Isaacson, A., Keeting, P., 2014. The role of PET imaging before, during, and after percutaneous hepatic and pulmonary tumor ablation. *Semin. Intervent. Radiol.* **31**, 187–192.
- Miller, D.L., Vucich, J.J., Cope, C., 1985. A flexible shield to protect personnel during interventional procedures. *Radiology* **155**, 825.
- Miller, D.L., Vañó, E., Bartal, G., et al., 2010. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **33**, 230–239.
- Minot, D.M., Jaben, E., Aubry, M.C., et al., 2012. Evolution of transthoracic fine needle aspiration and core needle biopsy practice: a comparison of two time periods, 1996–1998 and 2003–2005. *Diagn. Cytopathol.* **40**, 876–881.
- Moore, W.E., Ferguson, G., Rohrmann, C., 1980. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med. Phys.* **7**, 8–12.
- Morrish, O.W.E., Goldstone, K.E., 2008. An investigation into patient and staff doses from X-ray angiography during coronary interventional procedures. *Br. J. Radiol.* **81**, 35–45.
- NA/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. BEIR VII, Phase 2. National Academies Press, Washington, DC.
- NCRP, 1993. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Report No. 116. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2009. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report No. 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2010. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2016. Guidance on Radiation Dose Limits for the Lens of the Eye. Commentary No. 26. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Niklason, L.T., Marx, M.V., Chan, H.P., 1993. Interventional radiologists: occupational radiation doses and risks. *Radiology* **187**, 729–733.
- Nye, A., Dubose, M., Votaw, J., 2009. A comparison of AAPM TG-108 PET/CT shielding recommendations and measurements in an oncology center. *Med. Phys.* **36**, 5017–5021.
- Ordiales, J.M., Nogales, J.M., Sánchez-Casanueva, R., et al., 2015. Reduction of occupational radiation dose in staff at the cardiac catheterisation laboratory by protective material placed on the patient. *Radiat. Prot. Dosim.* **165**, 272–275.
- Padovani, R., Le Heron, J., Cruz-Suarez, R., et al., 2011. International project on individual monitoring and radiation exposure levels in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **144**, 437–441.
- Papadopoulos, N., Papaefstathiou, C., Kaplanis, P.A., et al., 2009. Comparison of lead-free and conventional x-ray aprons for diagnostic radiology. International Federation of Medical and Biological Engineering (IFMBE) proceedings 25/III, 544–546.
- Pasciak, A.S., Kyle, J.A., Wagner, L.K., 2015. Application of the diagnostic radiological index of protection to protective garments. *Med. Phys.* **42**, 653–662.
- Paulson, E.K., Sheafor, D.H., Enterline, D.S., McAdams, H.P., Yoshizumi, T.T., 2001. CT fluoroscopy-guided interventional procedures: techniques and radiation dose to radiologists. *Radiology* **220**, 161–167.

- Pelz, D.M., 2000. Low back pain, lead aprons, and the angiographer. *Am. J. Neuroradiol.* **21**, 1364.
- Politi, L., Biondi-Zoccai, G., Nocetti, L., et al., 2012. Reduction of scatter radiation during transradial percutaneous coronary angiography: a randomized trial using a lead-free radiation shield. *Catheter Cardiovasc. Interv.* **79**, 97–102.
- Principi, S., Ginjaume, M., Duch, M.A., et al., 2014. Influence of dosimeter position for the assessment of eye lens dose during interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **164**, 79–83.
- Principi, S., Soler, C.D., Ginjaume, M., et al., 2015. Eye lens dose in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **165**, 289–293.
- Purandare, N., Rangarajan, V., Shah, S.A., et al., 2011. Therapeutic response to radiofrequency ablation of neoplastic lesions: FDG PET/CT findings. *Radiographics* **31**, 201–213.
- Quinn, B., Dauer, Z., Pandit-Taskar, N., Schoder, H., Dauer, L.T., 2016. Radiation dosimetry of ¹⁸F-FDG PET/CT: incorporating exam-specific parameters in dose estimates. *BMC Med. Imag.* **16**, 41.
- Rehani, M.M., Vañó, E., Ciraj-Bjelac, O., Kleiman, N.J., 2011. Radiation and cataract. *Radiat. Prot. Dosim.* **147**, 300–304.
- Rimpler, A., Barth, I., 2007. Beta radiation exposure of medical staff and implications for extremity dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* **125**, 335–339.
- Roguin, A., Goldstein, J., Bar, O., Goldstein, J.A., 2013. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am. J. Cardiol.* **111**, 1368–1372.
- Ryan, E.R., Sofocleous, C.T., Schoder, H., et al., 2013a. Split-dose technique for FDG PET/CT-guided percutaneous ablation: a method to facilitate lesion targeting and to provide immediate assessment of treatment effectiveness. *Radiology* **268**, 288–295.
- Ryan, E.R., Thornton, R., Sofocleous, C.T., et al., 2013b. PET/CT-guided interventions: personnel radiation dose. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **36**, 1063–1067.
- Saidatul, A., Azlan, C., Megat, A.M., Abdullah, B., Ng, K., 2010. A survey of radiation dose to patients and operators during radiofrequency ablation using computed tomography. *Biomed. Imag. Interv. J.* **6**, e1.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., et al., 2011. A national programme for patient and staff dose monitoring in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry.* **147** 57–61.*
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., et al., 2012. Staff doses in interventional radiology: a national survey. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **23**, 1496–1501.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., Ginjaume, M., Duch, M.A., 2014. Measurements of eye lens doses in interventional cardiology using OSL and electronic dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* **162**, 569–576.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., Ginjaume, M., Carreras, J.L., 2015. Evaluation of an automated FDG dose infuser to PET-CT patients. *Radiat. Prot. Dosim.* **165**, 457–460.
- Sandblom, V., 2012. Evaluation of Eye Lens Doses Received by Medical Staff Working in Interventional Radiology at Sahlgrenska University Hospital. MSc Thesis. Department of Radiation Physics University of Gothenburg, Gothenburg.
- Sauren, L.D., Van Garsse, L., Van Ommen, V., Kemerink, G.J., 2011. Occupational radiation dose during transcatheter aortic valve implantation. *Cathet. Cardiovasc. Interv.* **78**, 770–776.
- Savage, C., Carlson, L., Clements, J., Rees, C., 2009. Comparison of the zero gravity system to conventional lead apron for radiation protection of the interventionalist. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **20**, S53.
- Schlattl, H., Zankl, M., Eder, H., Hoeschen, C., 2007. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses. *Med. Phys.* **34**, 4270.
- Schueler, B.A., Vrieze, T.J., Bjarnason, H., Stanson, A.W., 2006. An investigation of operator exposure in interventional radiology. *Radiographics* **26**, 1533–1541.
- Schultz, F.W., Zoetelief, J., 2006. Estimation effective dose for a cardiac catheterisation procedure

*訳注 原文で抜けているが参考文献に含まれている。

- with single and double dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* **118**, 196–204.
- Seierstad, T., Strandén, E., Bjerding, K., et al., 2006. Doses to nuclear technicians in a dedicated PET/CT centre utilizing 18F fluorodeoxyglucose (FDG). *Radiat. Prot. Dosim.* **123**, 243–249.
- Shatila, O.H., 2015. Occupational Radiation Dose During the Trans-Catheter Aortic Valve Replacement Procedure. Thesis for the Degree of Master of Science. Colorado State University, Fort Collins, CO. Available at: https://dspace.library.colostate.edu/bitstream/handle/10217/167256/Shatila_colostate_0053N_13242.pdf (last accessed 20 October 2023).
- Shortt, C.P., Al-Hashimi, H., Malone, L., Lee, M.J., 2007. Staff radiation doses to the lower extremities in interventional radiology. *Cardiovasc. Interv. Radiol.* **30**, 1206–1209.
- Siiskonen, T., Tapiovaara, M., Kosunen, A., Lehtinen, M., Vartiainen, E., 2007. Monte Carlo simulations of occupational radiation doses in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* **80**, 460–468.
- Siiskonen, T., Tapiovaara, M., Kosunen, A., Lehtinen, M., Vartiainen, E., 2008. Occupational radiation doses in interventional radiology: simulations. *Radiat. Prot. Dosim.* **129**, 36–38.
- SIRTEX, 2016. SIR-Spheres (yttrium-90 resin microspheres), SIRTEX Medical, Sydney. Available at: <https://www.sirtex.com/media/155127/pi-ec-12.pdf> (last accessed 25 January 2018).
- Smilowitz, N.R., Balter, S., Weisz, G., 2013. Occupational hazards of interventional cardiology. *Cardiovasc. Revasc. Med.* **14**, 223–228.
- Srinivas, Y., Wilson, D.L., 2002. Image quality evaluation of flat panel and image intensifier digital magnification in x-ray fluoroscopy. *Med. Phys.* **29**, 1611–1621.
- Strandén, E., Widmark, A., Sekse, T., 2008. Assessing doses to interventional radiologists using a personal dosimeter worn over a protective apron. *Acta Radiol.* **49**, 415–418.
- Struelens, L., Schoonjans, W., Schils, F., De Smedt, K., Vanhavere, F., 2013. Extremity and eye lens dosimetry for medical staff performing vertebroplasty and kyphoplasty procedures. *J. Radiol. Prot.* **33**, 635–645.
- Swiss Ordinance, 2008. Eidgenössisches Departement des Inneren und Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: Verordnung über die Personendosimetrie (Dosimetrieverordnung) vom 07.10.1999. SR 814.501.43. Swiss Ordinance, Bern (in German).
- Teeuwisse, W.M., Geleijns, J., Broerse, J.J., Obermann, W.R., van Persijn van Meerten, E.L., 2001. Patient and staff dose during CT guided biopsy, drainage and coagulation. *Br. J. Radiol.* **74**, 720–726.
- Theocharopoulos, N., Damilakis, J., Perisinakis, K., et al., 2006. Occupational exposure in the electrophysiology laboratory quantifying and minimising radiation burden. *Br. J. Radiol.* **79**, 644–651.
- Thornton, R.H., Dauer, L.T., Altamirano, J.P., et al., 2010. Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **21**, 1703–1707.
- Tosi, G., 2003. Report on one accident occurred in a nuclear medicine department in Italy. 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23–25 October 2002, Madrid, Spain.
- Trout, E.D., 1977. Isodose curves in a phantom due to diagnostic quality X-radiation. *Health Phys.* **33**, 359–367.
- Trumm, C.G., Pahl, A., Helmberger, T.K., et al., 2012. CT fluoroscopy-guided percutaneous vertebroplasty in spinal malignancy: technical results, PMMA leakages, and complications in 202 patients. *Skel. Radiol.* **41**, 1391–1400.
- Tsapaki, V., Ahmed, N.A., AlSuwaidi, J.S., et al., 2009. Radiation exposure to patients during interventional procedures in 20 countries: initial IAEA project results. *Am. J. Roentgenol.* **193**, 559–569.
- Uthoff, H., Peña, C., West, J., et al., 2013. Evaluation of novel disposable, light-weight radiation protection devices in an interventional radiology setting: a randomized controlled trial. *Am. J. Roentgenol.* **200**, 915–920.

- Van Rooijen, B.D., de Haan, M.W., Das, M., et al., 2014. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **37**, 1149–1155.
- Vanhavere, F., Carinon, E., Gualdrini, G., et al., 2012. ORAMED: Optimisation of Radiation Protection for Medical Staff. 7th EURADOS Report. EURADOS, Braunschweig.
- Vañó, E., 2015. Occupational radiation protection of health workers in imaging. *Radiat. Prot. Dosim.* **164**, 126–129.
- Vañó, E., 2016. Personal communication. See also IAEA training material. Available at: [https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/AdditionalResources/Training/1_Training Material/Non-radiologistsNon-cardiologists.htm](https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/AdditionalResources/Training/1_Training%20Material/Non-radiologistsNon-cardiologists.htm) (last accessed 30 September 2023).
- Vañó, E., González, L., Beneytez, F., Moreno, F., 1998. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* **71**, 728–733.
- Vañó, E., González, L., Fernandez, J.M., Alfonso, F., Macaya, C., 2006. Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15-year follow-up. *Br. J. Radiol.* **79**, 383–388.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., Haskai, Z.J., 2008a. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology* **248**, 945–953.
- Vañó, E., Järvinen, H., Kosunen, A., et al., 2008b. Patient dose in interventional radiology: a European survey. *Radiat. Prot. Dosim.* **129**, 39–45.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Durán, A., et al., 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* **174**, 490–495.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Durán, A., Romano-Miller, M., Rehani, M.M., 2013a. Radiation associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments. *J. Vasc. Interv. Radiol.* **24**, 197–204.
- Vañó, E., Fernández, J.M., Sánchez, R.M., Dauer, L.T., 2013b. Realistic approach to estimate lens doses and cataract radiation risk in cardiology when personal dosimeters have not been regularly used. *Health Phys.* **105**, 330–339.
- Vañó, E., Sanchez, R.M., Fernandez, J.M., et al., 2015a. A set of patient and staff dose data for validation of Monte Carlo calculations in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **165**, 235–239.
- Vañó, E., Sanchez, R.M., Fernandez, J.M., 2015b. Estimation of staff lens doses during interventional procedures. Comparing cardiology, neuroradiology and interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **165**, 279–283.
- Vañó, E., Fernandez, J.M., Resel, L.E., Moreno, J., Sanchez, R.M., 2016. Staff lens doses in interventional urology. A comparison with interventional radiology, cardiology and vascular surgery values. *J. Radiol. Prot.* **36**, 37–48.
- Venkatesan, A., Kadoury, S., Abi-Jaoudeh N., et al., 2011. Real-time FDG PET guidance during biopsies and radiofrequency ablation using multimodality fusion with electromagnetic navigation. *Radiology* **260**, 848–856.
- Von Boetticher, H., Lachmund, J., Hoffmann, W., 2010. An analytic approach to double dosimetry algorithms in occupational dosimetry using energy dependent organ dose conversion coefficients. *Health Phys.* **99**, 800–805.
- Wagner, L.K., Mulhern, O.R., 1996. Radiation-attenuating surgical gloves: effects of scatter and secondary electron production. *Radiology* **200**, 45–48.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., 2004. Minimizing Risks from Fluoroscopic X-rays: Bioeffects, Instrumentation and Examination, fourth ed. Partners in Radiation Management, Woodlands, TX.
- Wenzl, T.B., 2005. Increased brain cancer risk in physicians with high radiation exposure. *Radiology* **235**, 709–710.
- Werner, M.K., Aschoff, P., Reimold, M., Pfannenber, C., 2011. FDG-PET/CT-guided biopsy of bone metastases sets a new course in patient management after extensive imaging and multiple futile biopsies. *Br. J. Radiol.* **84**, e65–e67.
- Whitby, M., Martin, C.J., 2003. Radiation doses to the legs of radiologists performing

- interventional procedures: are they a cause for concern? *Br. J. Radiol.* **76**, 321–327.
- Whitby, M., Martin, C.J., 2005. A study of the distribution of dose across the hands of interventional radiologists and cardiologists. *Br. J. Radiol.* **78**, 219–229.
- White, S., Binns, D., Johnston, V.V., et al., 2000. Occupational exposure in nuclear medicine and PET. *Clin. Posit. Imag.* **3**, 127–129.
- WHO, 2000. Efficacy and Radiation Safety in Interventional Radiology. World Health Organization, Geneva.
- Williamson, M., Dauer, L., 2014. Activity thresholds for patient instruction and release for positron emission tomography radionuclides. *Health Phys.* **106**, 341–352.
- Wiper, A., Katira, R., Roberts, D.H., 2005. Interventional cardiology: it s a hairy business. *Heart* **91**, 1432.
- Yoder, C., Salasky, M., 2016. A review of the use of two methods practiced in the United States to assess the effective dose equivalent for fluoroscopic-based radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* **170**, 307–310.

付属書 A. 放射線防護のための生物学的基礎のまとめ

(A1) 放射線の生物学的影響は、組織反応（確定的影響）と確率的影響（がんおよび遺伝性影響）の2種類にグループ分けすることができる。これらの影響をここに簡単に記述する。放射線防護の生物学的基礎は2007年勧告（ICRP, 2007a）およびその他のICRP刊行物に詳述されている。

A.1 確定的影響（有害な組織反応）

(A2) 1つの臓器または組織中の多数の細胞が傷害されたときにのみ影響が生じる場合、その影響は、線量が一定のしきい値を超えたときにのみ臨床的に認められる。このしきい値の大きさは、放射線の線量率（すなわち単位時間当たりの線量）と線エネルギー付与、被ばくする臓器・組織、臓器・組織の照射部位の容積、および対象とする臨床効果により異なる。線量がしきい値を超えて増加すると、その発現率は急激に増加して100%に至り（すなわちすべての被ばく者に影響が現れる）、影響の大きさは線量に伴って増加する。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）についての詳細な考察と情報は *Publication 103*（ICRP, 2007a）に記載されている。このような影響は、放射線治療とIVRにおいて電離放射線を照射した際に生じることがあり、特に、透視ガイド下のIVRが複雑で、透視時間が長く取得画像数が多いときに生じ得る。

A.2 確率的影響（がんおよび遺伝性影響）

(A3) 細胞生物学および分子生物学から、単一細胞における放射線によるDNA損傷は、まだ複製能をもつ形質転換細胞を生じさせることがある。細胞の修復機構は通常は非常に有効であるが、わずかな確率でこの損傷が生じており、必ずしも放射線とは関係のない他の作用因子の影響によって促進され、悪性の状態に至る可能性がある（身体的影響）。この確率は低いことから、被ばくされたほんのわずかな細胞でのみこれが生じる。この初期損傷が性腺内の生殖細胞に及んだ場合、遺伝性影響が生じることがある。

(A4) 確率的影響の場合、放射線防護の目的から単純な直線しきい値なしの線量反応関係を想定し、これは現在の知識の合理的な解釈とみなされている。線量および線量率が高いとき、その確率は単純な比例よりも著しく顕著に、線量に伴って上昇すると考えられる。さらに線量

が高く、確定的影響（組織反応）のしきい値に近いときは、この確率はより穏やかに上昇し、細胞傷害の競合的な影響により低下し始めることがある。これらの身体的および遺伝性の影響は双方とも「確率的」と呼ばれる。

(A5) 身体的影響および遺伝性影響に関する詳細な考察と情報は *Publication 103* (ICRP, 2007a) に記載されている。また、低線量での発がんリスクに関する委員会の見解は、*Publication 99* (ICRP, 2005) に示されている。公衆について、約 100 mGy またはそれ未満の吸収線量に伴い発がんリスクが高まるか、または高まらないかを、疫学的根拠のみに基づいて判断することはできない。直線しきい値なしモデルは依然として、低線量および低線量率での放射線防護という実用的な目的のための慎重な基礎である。

(A6) 委員会はまた、遺伝的ながんのなりやすさというテーマも検討し、現在得られている情報は、この問題について意味のある定量的な判断をするには不十分であるという暫定的な見解を *Publication 79* (ICRP, 1998) に示した。委員会は今後も引き続き、放射線防護に対するその意義に関して、この問題を監視していく。

A.3 子宮内照射の影響

(A7) 妊娠中には放射線に関連した胚／胎児に対するリスクがあり、これは妊娠の段階と胚／胎児の吸収線量と関係している。致死的影响、器官形成異常（奇形）、中枢神経系の影響、白血病と小児がんといったテーマについて、以下に簡単に記述する。委員会は出生前照射の影響を、*Publication 90* (ICRP, 2003) において詳細に評価している。

A.3.1 致死的影响

(A8) 胚発生の着床前期間には、胚は照射による致死的影响を受けやすい。100 mGy 未満の線量では、そのような致死的影响は非常に低頻度であり、出生後に健康に対する重大なリスクが現れると信じる理由はない。

A.3.2 器官形成異常（奇形）

(A9) 主要器官形成期（通常は受胎後 3 週から 8 週と考えられている）には、特にその被ばく時に発生していた臓器において器官形成異常が生じることがある。この影響のしきい値は約 100 mGy である。

A.3.3 中枢神経系

(A10) *Publication 84* (ICRP, 2000a) では、中枢神経系は特に、受胎後 8～25 週に放射線の影響を受けやすいと示されている。100 mGy 未満の胎児線量では、知能指数の低下は臨床

的に確認できない。同じ期間に、約 1 Gy の胎児線量によって重度精神遅滞の確率が高くなる。受胎後 8 ～ 15 週に最も影響を受けやすく、妊娠 16 ～ 25 週には低くなる。

A.3.4 白血病と小児がん

(A11) 成人と小児の両方において、放射線によって白血病および多くの種類のがんの確率が高まることが示されている。胚／胎児が発がんの影響を受けるリスクは、ほとんどの妊娠期間を通じて小児とほぼ同じであると想定されている（すなわち全体集団の約 3 倍）。

(A12) 妊娠中の患者が電離放射線を用いた診断検査、IVR および放射線治療を受ける際、ならびに妊娠中のスタッフが IVR に従事する際には、上記の影響を考慮することが重要である。患者の治療と、特定の放射線を用いた手技に伴う胚／胎児の健康への有害な影響の可能性の間のバランスをとる必要がある。

付属書 B. 数量と単位

(B1) 放射線防護体系の実施には、個人の被ばく線量を評価する必要がある。防護量は、確率的影響の発生を容認できないレベル未満に維持し、また組織反応の回避を確実にするため、被ばくの限度を明確に示す目的で使用される。

B.1 吸収線量 (D)

(B2) 吸収線量は、電離放射線により一定質量の物質に与えられた平均エネルギーを、その質量で除した商、と定義される。吸収線量は基本的な物理的線量で、あらゆる種類の電離放射線および材料に適用することができる。吸収線量は、そのための一次標準が存在する測定可能な量である。

(B3) 国際単位系では、吸収線量の単位は $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、その固有の名称はグレイ (Gy) である。

B.2 線量の平均化：臓器線量

(B4) 吸収線量という量を実際の防護に適用するには、線量を組織の体積にわたって平均する。低線量の場合、特定の臓器・組織について平均された吸収線量の値は、放射線防護の目的に照らして十分な正確さをもってその組織における確率的影響の放射線損害に関連付けることができると仮定される。

(B5) 外部放射線の場合、平均吸収線量が臓器・組織全体の線量の分布をどの程度表しているかは、被ばくの均一性およびその透過性に左右される。透過性の弱い放射線（例えばX線からの散乱放射線）と広く分布している組織（皮膚など）の場合、吸収線量の分布は非常に不均一になり得る。この場合、インターベンションの作業に係わる個々のスタッフメンバーの職業被ばくについて、臓器・組織中の平均線量を評価する際、特別な考察が必要となる。身体の部分被ばくが極端な場合（例えばIVRにおける指の被ばくなど）、その組織の線量は組織反応のしきい値を超えるかもしれないが、平均皮膚線量は低いままである。*Publication 103* (ICRP, 2007a) によれば、組織反応の評価に適用すべき数量は、等価線量と実効線量よりも、吸収線量とその分布である。

B.3 等価線量と放射線加重係数

(B6) 防護量の定義は、放射線のタイプ R による、特定の臓器・組織 T 全体の平均吸収線量 $D_{T,R}$ に基づいている。そのとき、ある臓器・組織の防護量である等価線量 H_T は、その特定の臓器または組織 T における平均吸収線量 $D_{T,R}$ に関するすべての種類の放射線 R の加重和と定義される。すなわち $H_T = \sum w_R D_{T,R}$ である。

(B7) 線量当量、等価線量および実効線量の単位は $J \cdot kg^{-1}$ であり、またその固有の名称はシーベルト (Sv) である。

(B8) 放射線の種類とエネルギーに関する放射線加重係数 w_R は、主に、さまざまな種類の放射線に関する低線量での生物効果比の実験結果に基づき、その数値は委員会により割り当てられている。光子と β 線照射の場合、 w_R は「1」の値をとる。より重い荷電粒子、陽子、アルファ粒子、重イオンおよび中性子の場合の w_R は最大で「20」の値をとる。

B.4 実効線量と組織加重係数

(B9) 実効線量 E は、以下のように組織等価線量の加重平均により定義される：

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

ここで w_T は、組織 T の組織加重係数である。*

(B10) 合計は、確率的影響の誘発に対し感受性があると考えられる人体のすべての臓器・組織にわたって行う。組織加重係数は年齢と性別について平均化され、両性およびすべての年齢の集団に概数として適用するように意図されている。

(B11) 実効線量の単位は $J \cdot kg^{-1}$ で、その固有の名称はシーベルト (Sv) である。その単位は等価線量と実効線量、ならびに一部の有用線量に関する同じである。どの線量を用いているか、常に明記するよう注意しなければならない。

B.5 損害および損害で調整された名目リスク係数

(B12) 放射線による損害とは、あるグループが放射線源に被ばくした結果、被ばくグループとその子孫が受ける健康上の害の全体を数量化するために用いられる概念であり、致死がんの寄与確率、非致死がんの加重された寄与確率、重篤な遺伝性影響への加重された寄与確率、ならびに害が発生した場合の寿命短縮期間を考慮する。

*訳注 ICRP による正誤表を反映している。

(B13) 損害は名目リスク係数を用いて決定される。全損害は、身体各組織・臓器に関する損害の合計である。

(B14) 放射線誘発がんリスクおよび遺伝性影響に関する情報から、委員会は、成人（作業員）に関する損害で調整された発がんリスクの名目確率係数を改訂し、 $4.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ とすることを提案している（ICRP, 2007a）。遺伝的リスクについての係数は $0.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ とされ、以前に *Publication 60*（ICRP, 1991）で勧告されていた成人に関する係数から8分の1に大きく引き下げられた。

(B15) 防護体系の単純性と堅牢性のため、委員会は、名目リスク係数は男女で、また被ばく時の年齢に関しても顕著な差があると認識しているが、個人に対してではなく（この場合は成人作業員の）全集団に適用するべきであるという方針を固守している。委員会は依然として、全体の致死リスク係数である $5\% \cdot \text{Sv}^{-1}$ は、放射線防護の目的において適切であると考えている。

B.6 実用量

(B16) 等価線量と実効線量は人体の組織中で直接測定することができない。したがって防護体系には、測定が可能で、等価線量と実効線量が評価できる実用量が含まれている（ICRP, 2007a）。放射線モニタリングに用いる線量計と測定機器は、これらの実用量で校正される。IVRに関連する実用量を以下に要約する。詳細は *Publication 103*（ICRP, 2007a）の付属書Bに記述されている。

B.7 線量当量と線質係数

(B17) 線量当量は、組織中のある点における D と Q との積として定義される。ここで D は吸収線量、また Q はその点における特定の放射線の線質係数であり、次の式で表される： $H = QD$ 。透視ガイド下の IVR における散乱光子のエネルギー範囲において、 Q は「1」の値を取る。

B.8 環境モニタリングに対する実用量

(B18) 環境モニタリングの実用量は、周辺線量当量 $H^*(10)$ と方向 Ω における方向性線量当量 $H'(0.07, \Omega)$ である。周辺線量当量は、整列場の方向と反対の半径ベクトル上の深さ 10 mm における ICRU 球体内の対応する拡張整列場によって生成される放射線場内の 1 点における線量当量である。周辺線量当量の単位は $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ で、その固有の名称はシーベルト（Sv）である。

B.9 個人モニタリングに対する実用量

(B19) 個人モニタリングの実用量は個人線量当量 $H_p(d)$ であり、これは人体の特定の点の、ある適切な深さ d (mm 単位) における ICRU 軟組織中の線量当量である。この特定点は、通常、個人線量計を装着している部位とされる。

(B20) 実効線量のモニタリングには実用量 $H_p(d)$ が用いられる。皮膚および手足に対する線量の評価には、個人線量当量 $H_p(0.07)$ が用いられる。

(B21) 眼の水晶体の線量のモニタリングには、深さ $d = 3$ mm が適切である。ただし実際は多くの国で、 $H_p(3)$ に関する線量計の校正は実施されていないが、光子放射線の同じモニタリング目的に $H_p(0.07)$ を使用でき、これは放射線画像ガイド下のインターベンションにも適用される。

ICRP Publication 139

IVR における職業被ばくの放射線防護

2024年2月7日 初版第1刷発行

監修 米倉 義晴
翻訳 赤羽 正章 隈丸加奈子
竹井 泰孝 前田恵理子
松原 孝祐

編集 ICRP 刊行物翻訳委員会

発行 原子力規制委員会

連絡先 〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9
六本木ファーストビル16F
原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
放射線・廃棄物研究部門

電話 03-5114-2225 (部門代表)

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

© Nuclear Regulation Authority, Japan, 2024

Printed in Japan

DTP 株式会社フォレスト

【非売品】

ICRP

Publication 139