

# ICRP

*Publication 120*

## 心臓病学における放射線防護

公益社団法人  
日本アイソトープ協会

# 心臓病学における放射線防護

2011年10月 主委員会により承認

公益社団法人  
日本アイソトープ協会

**ICRP**  
*Publication 120*

**Radiological Protection in Cardiology**

Editor

C.H. CLEMENT

Associate Editor

M. SASAKI

Authors on behalf of ICRP

C. Cousins, D.L. Miller, G. Bernardi, M.M. Rehani, P. Schofield,  
E. Vañó, A.J. Einstein, B. Geiger, P. Heintz, R. Padovani, K-H. Sim

---

Copyright © 2017 The Japan Radioisotope Association. All Rights reserved.  
Authorised translation from the English language edition published for  
the International Commission on Radiological Protection by Elsevier Ltd.  
Copyright © 2012 The International Commission on Radiological Protection  
Published by Elsevier 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 120*

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Yoshiharu YONEKURA

Translated by

Akira YAMASHINA, Masazumi AKAHOSHI, Hideo SASAKI

Editorial Board

The Committee for Japanese Translation of ICRP Publications,  
Japan Radioisotope Association

working in close collaboration with Japanese ICRP & ICRU members.

---

◆ Committee members ◆

Ohtsura NIWA (Chair; ICRP, MC)	Keiko IMAMURA (Vice-chair)	
Reiko KANDA	Michiya SASAKI	Yasuhito SASAKI*
Gen SUZUKI	Michio YOSHIZAWA	

◆ Supervisors ◆

Nobuhiko BAN (ICRP, C1)	Nobuhito ISHIGURE* (ICRP, C2)
Akira ENDO (ICRP, C2)	Yoshiharu YONEKURA (ICRP, C3)
Michiaki KAI (ICRP, C4)	Toshimitsu HOMMA (ICRP, C4)
Kazuo SAKAI (ICRP, C5)	Hideo TATSUZAKI† (ICRU)

---

\* Former ICRP member. † Former ICRU member.

## 邦訳版への序

本書はICRPの主委員会によって2011年10月に承認され2012年12月に刊行された、心臓病学における放射線防護に関する専門的助言

Radiological Protection in Cardiology  
(Publication 120. *Annals of the ICRP*, Vol. 42, No.1 (2013))

を、ICRPの了解のもとに翻訳したものである。

翻訳は、山科章（東京医科大学循環器内科）、赤星正純（恵寿病院）、佐々木英夫（安田女子大学家政学部）の3氏によって行われた。

この訳稿をもとに、ICRP 勧告翻訳検討委員会において推敲を重ね、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。原著の記述に対する疑問は原著者に直接確認し、誤りと判明した場合は修正した。

心疾患を持つ患者さんは放射線を使う診療を受ける機会が多い。特に診断や治療のために、心臓カテーテル手技を用いてX線透視や撮影を繰り返す患者さんでは、高線量の被ばくによる皮膚傷害の可能性を視野に入れて、放射線防護処置を考慮する必要がある。加えて、近年、循環器病診療で放射線を用いる手技は益々増加している。上記経皮冠状動脈介入治療（PCI）の他に、心房細動などの不整脈に対するカテーテル治療、ならびに先天性心疾患や弁膜疾患など構造的疾患の治療にX線透視ガイド下で複雑な手技が実施されている。さらに、CT血管撮影・核医学心筋血流シンチグラフィも加わっている。いきおい患者の医療被ばくは増加し、術者である循環器医や専門医療職の職業被ばくも看過できないレベルになり得る。

本書は「ICRP 85 IVRにおける放射線傷害の回避」（2003年、JRIA 翻訳・発行）の改訂新版とみなすことができ、同じく豊富な症例報告（カラー画像）を含んでいる。また、X線透視ガイド下のインターベンション治療の術前／術中／術後に考慮すべき患者の放射線防護について、具体的な記載がある。同時に放射線防護の基礎教育に加え、循環器専門医にはさらに高度な放射線防護管理の研修が必要と指摘している。

頭書の3氏が豊かな臨床経験を注がれた達意の翻訳に深く感謝するとともに、本書が心臓病学で扱う広範な診断治療手技における放射線防護の推進に貢献することを願っている。

平成 29 年 3 月

ICRP 勧告翻訳検討委員会

(公社)日本アイソトープ協会  
ICRP 勧告翻訳検討委員会

委員長 丹羽 太貫 (ICRP 主委員会, (公財)放射線影響研究所)  
副委員長 今村 恵子 (前 聖マリアンナ医科大学)  
委員 神田 玲子 ((国)量子科学技術研究開発機構)  
佐々木道也 ((一財)電力中央研究所)  
佐々木康人 (湘南鎌倉総合病院附属臨床研究センター)  
鈴木 元 (国際医療福祉大学クリニック)  
吉澤 道夫 ((国)日本原子力研究開発機構)

監 修 者

---

伴 信彦 (ICRP 第 1 専門委員会, 原子力規制委員会)  
石樽 信人 (前 ICRP 第 2 専門委員会, 名古屋大学)  
遠藤 章 (ICRP 第 2 専門委員会, (国)日本原子力研究開発機構)  
米倉 義晴 (ICRP 第 3 専門委員会, (国)量子科学技術研究開発機構)  
甲斐 倫明 (ICRP 第 4 専門委員会, 大分県立看護科学大学)  
本間 俊充 (ICRP 第 4 専門委員会, (国)日本原子力研究開発機構)  
酒井 一夫 (ICRP 第 5 専門委員会, 東京医療保健大学)  
立崎 英夫 (前 ICRU 委員, (国)量子科学技術研究開発機構)

## 抄 録

心臓核医学，心臓コンピュータ断層撮影（CT），心臓インターベンション手技および電気生理手技はますます増加しており，患者の医療放射線被ばくの中でも大きな割合を占めている。特に，複雑な経皮的冠動脈インターベンションや心臓電気生理手技では高線量となる。これらの手技では，放射線傷害を発生させ，がんリスクを増加させるほどの高線量が患者の皮膚に照射される可能性がある。これは子供の先天的心臓疾患治療に関して特に懸念されている。さらに心臓カテーテル検査室のスタッフも，放射線防護手段を適切に使用しないと高線量を受ける可能性がある。

委員会は透視ガイド下インターベンションについては *Publication 85* に，CTの放射線防護については *Publication 87* と *102* に，また放射線防護訓練については *Publication 113* にそれぞれ勧告を記載している（ICRP, 2000 b, c, 2007 a, 2009）。本報告書は特に心臓病学に焦点を当て，当委員会の発行済み文書から心臓病学に関係する情報を集めた。したがって，心臓病学に固有のイメージング手技やインターベンション手技に重点を置いた。また本文書の資料および勧告は当委員会の最新勧告を反映するよう更新した。

本報告書は心臓専門医が心臓CT検査，心臓核医学検査，透視ガイド下心臓インターベンションの正当化手順と防護の最適化を支援する手引きを提供する。これには放射線の生物学的影響，放射線防護原則，透視ガイド下インターベンション時のスタッフの防護，放射線防護訓練および心臓イメージングとインターベンションの品質保証計画の確立等に関する考察が含まれる。

透視ガイド下インターベンションでは，組織の損傷，主に皮膚損傷が危険因子となるため，心臓インターベンションによる放射線に関連する皮膚損傷，患者の放射線量低減法，研修に関する助言およびインターベンション透視法の品質保証計画に関係する臨床例に特に注意しなければならない。

キーワード：心臓病学，コンピュータ断層撮影法（CT），核医学，心臓カテーテル，放射線防護





# 目 次

	頁	項
抄 録 .....	(iii)	
招待論説 .....	(ix)	
序 文 .....	(xi)	
要 点 .....	(xiii)	
総 括 .....	(xv)	
用語解説 .....	(xxi)	
<b>1. 緒 論 .....</b>	<b>1</b>	<b>(1)</b>
1.1 緒 言 .....	1	(1)
1.2 透視ガイドによる手技 .....	1	(2)
1.2.1 経皮的冠動脈インターベンション .....	2	(3)
1.2.2 皮膚傷害 .....	3	(7)
1.2.3 心臓電気生理手技 .....	4	(10)
1.2.4 先天性心疾患と心臓弁膜症 .....	4	(12)
1.2.5 小児患者 .....	4	(14)
1.3 心臓CT .....	5	(16)
1.4 心臓核医学 .....	6	(17)
1.5 職業被ばくのリスク .....	6	(20)
1.6 要 約 .....	7	(21)
<b>2. 放射線の生物学的影響 .....</b>	<b>9</b>	<b>(22)</b>
2.1 放射線影響の種類 .....	9	(22)
2.2 背 景 .....	10	(31)
2.3 放射線影響と皮膚 .....	11	(33)
2.4 目の水晶体と放射線 .....	14	(44)
2.5 放射線被ばくの心血管系への影響 .....	17	(50)

2.6 職業放射線被ばくと頭蓋内腫瘍	17	(54)
3. 透視ガイド下循環器手技による組織反応の臨床例	21	(58)
3.1 序 論	21	(58)
3.2 事例1 (Vliestra ら, 2004)	22	(61)
3.3 事例2 (Koenig ら, 2001 a)	22	(63)
3.4 事例3 (Wagner と Archer, 1997)	23	(64)
3.5 事例4 (Vliestra ら, 2004)	23	(65)
3.6 事例5 (Vaňo ら, 1998 a)	25	(66)
3.7 事例6 (アルゼンチン, プエノスアイレスの Portas 博士提供)	25	(67)
4. 放射線防護原則の医療への適用	29	(68)
4.1 序 論	29	(68)
4.2 正 当 化	29	(69)
4.3 防護の最適化	30	(73)
4.4 線 量 限 度	31	(76)
5. 透視ガイド下インターベンション手技における患者の線量管理	33	(77)
5.1 序 論	33	(77)
5.2 手技の実施前	34	(82)
5.3 手技の実施中	35	(87)
5.4 手技の実施後	37	(93)
5.5 小児患者	40	(97)
6. インターベンション透視手技実施中のスタッフの防護	41	(99)
6.1 序 論	41	(99)
6.2 他のスタッフの放射線被ばくととの比較	42	(101)
6.3 職業被ばく防護の基本事項	42	(103)
6.4 個人防護具	44	(109)
6.5 装置設置型の遮へい	46	(120)
6.6 透視法による職業被ばく	47	(124)
6.7 個人の線量測定	48	(129)

7. 心臓核医学の放射線防護 .....	51 (135)
7.1 序 論 .....	51 (135)
7.2 放射性医薬品 .....	52 (137)
7.3 心臓核医学に関する線量測定 .....	53 (139)
7.4 現在の線量測定推定値 .....	54 (146)
7.5 線量測定の不確実性 .....	54 (147)
7.6 ICRP の線量測定と製造業者の情報との相違 .....	56 (148)
7.7 心臓核医学における患者の放射線防護 .....	56 (151)
7.7.1 正 当 化 .....	57 (152)
7.7.2 防護の最適化 .....	57 (154)
7.7.3 心臓核医学における診断参考レベル .....	58 (159)
7.7.4 妊娠中または授乳中の患者 .....	59 (161)
7.8 患者への助言 .....	60 (167)
7.9 現在の研究分野 .....	60 (168)
8. 心臓 CT に関する放射線防護 .....	61 (169)
8.1 序 論 .....	61 (169)
8.2 心臓 CT スキャナの種類 .....	61 (170)
8.3 線量測定量 .....	62 (171)
8.4 患者の線量に影響する要因 .....	63 (173)
8.4.1 管 電 流 .....	63 (174)
8.4.2 管 電 圧 .....	63 (175)
8.4.3 スキャンの長さ .....	63 (176)
8.4.4 スキャンモード .....	64 (177)
8.5 現在の線量測定推定値 .....	66 (182)
8.6 心臓 CT における患者の放射線防護 .....	68 (186)
8.6.1 正 当 化 .....	68 (187)
8.6.2 防護の最適化 .....	68 (189)
8.6.3 診断参考レベル .....	69 (193)
8.6.4 妊娠中の患者 .....	69 (195)
9. 心臓専門医のための放射線防護研修 .....	71 (196)
9.1 序 論 .....	71 (196)

(viii) 目 次

9.2 放射線防護の要求事項	72 (199)
9.3 インターベンション透視法	73 (202)
9.3.1 米 国	73 (206)
9.3.2 欧州委員会	75 (211)
9.3.3 国際原子力機関 (IAEA)	75 (212)
9.3.4 世界保健機関 (WHO)	75 (213)
9.3.5 認 定	75 (214)
10. 品質保証プログラム	77 (215)
10.1 序 論	77 (215)
10.2 施 設	78 (218)
10.3 受入試験と安定度試験	80 (221)
10.4 ス タ ッ フ	80 (226)
10.5 研 修	81 (228)
10.6 インターベンション透視手技による放射線誘発皮膚傷害の可能性に 関する経過観察	81 (229)
10.7 線 量 監 査	82 (231)
10.7.1 診断参考レベル	82 (234)
10.7.2 診断参考レベルのインターベンション透視手技への適用	83 (237)
10.7.3 高線量のインターベンション透視手技の評価	84 (242)
10.7.4 インターベンション透視手技に関する皮膚線量の評価	84 (246)
参考文献	87

## 招待論説

### — 心臓病学における放射線防護—技術に裏付けられた知識—

心臓病学は単一で医療用放射線を最も大量に使用する分野の1つである。放射線の適切な使用は診療に多大な臨床的有用性をもたらす。本報告書に記載する手引きは、臨床上不要な被ばくを最小化しながら患者の便益（利益）を最大化するのに役立つ。

医療行為では臨床上最適な目標を達成するため大量の電離放射線を使用せざるを得ない場合がある。一部の患者は現在、診断、治療、経過観察中に、発がん率の上昇が懸念されるほど高い放射線量を被ばくしている。少数の患者においては、軽微な、あるいは重篤な組織反応の原因となるほど皮膚線量が高い。個々の患者、臨床スタッフ、および社会全体が容認できるリスクの存在下で、患者に妥当な便益を提供するには、各医療被ばくの臨床的必要性の正当性を評価し（正当化）、放射線防護を最適化することが不可欠である。

最適な放射線防護を達成するには技術に裏付けられた知識が必要である。構造的遮へい、事前に計画されたイメージング手順および線量表示等の工学的制御は、適切に使用された時のみ安全性をさらに向上させる。患者のケアに直接または間接に関わる医療従事者は、放射線防護の知識を持ち、患者のケアと従事者の安全の両面を改善するため、その情報を積極的に活用しなければならない。必要な知識水準を保証するためには職務固有の教育資源と公式の資格認定過程が必要である。

医療関係者以外のすべてのステークホルダー（政府、規制者、装置の所有者、物理学者等）は医学的要件を理解するために必要な正式かつ実情的な情報を持つておくべきである。放射線防護責任者は定期的に臨床手技に立ち合うことが有効かもしれない。これは特に、インターベンションの領域で重要である。というのは、利用可能な装置、環境設定の選択、操作員の実際の作業方法、および患者の臨床的必要性等、多くの要素が瞬時に相互作用するためである。

正当化とは、手技を指示する医療提供者と実際の放射線業務提供者間で共有される責任である。イメージング手技を指示する者は、提案された手技の放射線学的リスクと他のリスクに対して期待される情報の利益を評価する十分な能力を有するとともに、評価の主要責任を有する。実際の放射線業務提供者は得られるであろう情報を考慮し、手技が妥当な適応をもつことを保証する責任を共有する。

防護の最適化は、統括する医師はもとより、（適切な装置の購入や保守計画を通じて）装置

(x) 招待論説

の所有者、(装置の試験や他の品質保証過程への参加を通じて) 医学物理士、そして(患者固有または手技固有の手順の選択を通じて) 放射線技師/技術者の責任である。できるだけ少量の放射線で必要な医学的情報を収集する蓋然性を最適化するため、手順は情報を解釈できる画像読影医師と協議しながら設定すべきである。

インターベンション手技の実施中に患者とスタッフ両者の防護を最適化する際も、実施者である医師が手技の過程で装置の設定と放射線の使用に十分な注意を払う必要がある。現在、多くのインターベンション手技でスタッフの被ばくは不可避である。それが患者を危険にさらさずに達成できる場合は、防護の最適化にスタッフの被ばくの最小化も含まれる。

本報告書では、インターベンション透視法、心臓核医学および心臓コンピュータ断層撮影(CT)用の実践的な放射線防護資料とともに必要な放射線生物学を簡潔に考察しながら、正当化と最適化の背景情報を紹介する。詳しい関連資料は、過去10年間にわたり国際放射線防護委員会と国際原子力機関が発行した文書や研修資料から入手可能である。本刊行物の参考文献一覧は上記の主題を包括的な各施設のプログラムに拡大するために利用できる参考文献の目録となっている。

長期にわたって放射線の適切な使用を保証するには正式な品質保証プログラムが必要である。また品質保証プログラムには、画像の質と手技の手順の定期的評価を含めるべきである。患者の線量モニタリングと評価は上記の行動計画に加えるべき必須要件である。すべてのモダリティによるすべての(診断および治療)手技について利用可能なあらゆる線量測定情報を事業体のデータベースに収集すべきである。これらの線量データについては事業体内の分散を統計的に評価し、外部の公開基準と比較すべきである。皮膚または他の臓器に大量の被ばく線量を生じさせる手技に関しては、個々の患者を詳細に監視し、連絡をとる必要がある。

本刊行物は表題が示すよりもはるかに広範囲の読者にとって有用かつ興味深いものである。その内容の大半はIVR、血管手術、および先進的なイメージングまたは透視ガイド下医療手技が実施される他のすべての臨床専門分野にも関係する。紹介医、医師、看護師、放射線技師および放射線技術者、医療業務管理者、医学物理士および保健物理学者、規制者、装置の供給業者等は本刊行物を熟読することで恩恵を受けると考える。

Stephen Balter

## 序 文

長年にわたり国際放射線防護委員会（ICRP）（以下「委員会」と記載する）は、医療における放射線防護と安全についての助言を提供する多くの報告書を発表してきた。*Publication 105*はこの分野における全般的な概説である（ICRP, 2007 c）。これらの報告書は放射線防護の一般原則を要約し、医学や生物学的医学研究におけるさまざまな電離放射線の使用に対してこれらの原則を適用するにあたっての助言を提供している。

一部の過去の報告書では、部分的に、心臓病学に関係する問題を扱っており、*Publications 85, 87, 102, 113*（ICRP, 2000 b, c, 2007 a, 2009）および *Supporting Guidance 2*（ICRP, 2001）として刊行されている。本報告書はこれら一連の簡潔かつテーマを絞った文書を引き継ぐものである。

心臓病学での患者の放射線被ばくのは半は、核医学、CT、経皮的冠動脈インターベンション、電気生理手技等によるものである。数においても、複雑性においても急速に拡大するこの医療分野には、実施者に対する手引きが必要である。

当委員会は2004年の北京会議で心臓専門医向けの放射線防護の手引きを作成する価値があると決定した。他の様々な優先事項のため本文書に関する作業は一時的に中断されたが、2010年本格的に再開された。

本文書作成中の課題グループのメンバーは以下のとおりである：

C. Cousins（共同議長）	D.L. Miller（共同議長）	G. Bernardi
M.M. Rehani	P. Schofield	E. Vañó

通信メンバーは以下のとおりである：

B. Geiger	P. Heintz	R. Padovani
K-H. Sim	A.J. Einstein	

さらに、主委員会の委員である Jacques Lochard と John Boice も批判的査読者として重要な貢献を果たした。

本報告書の最終作成期間中の第3専門委員会のメンバー構成は以下のとおりである：

E. Vañó（委員長）	M.M. Rehani（書記）	M.R. Baeza
--------------	-----------------	------------

(xii) 序 文

J.M. Cosset

J.W. Hopewell

S. Mattson

H. Ringertz

B. Yue

L.T. Dauer

P-L. Khong

D. L. Miller

M. Rosenstein

I. Gusev

P. Ortiz López

K.Åhlström Riklund

Y. Yonekura



## 要 点

- 心臓イメージング手技を依頼する者、実施する者、または読影する者は同手技の放射線リスクを理解しているべきである。
- 専門職者の団体の総意に基づく取組みを通じ、適切な使用方法に関する基準やガイドラインが策定されてきており、診療でこれらを使用すべきである。
- 他のすべての医療被ばく同様、心臓核医学検査、心臓 CT 検査、心臓インターベンション手技および電気生理手技を最適化し、可能な限り線量低減技術を適用すべきである。
- 放射線傷害リスクが大きいと考えられる場合は、インフォームドコンセントの手順に放射線リスクに関する情報を含めるべきである。
- 手技の実施後、患者の医療記録に放射線量データを記録すべきである。また品質保証の目的で、患者の線量報告書を保管すべきである。
- インターベンション手技による患者の放射線量が各施設のトリガー（注意喚起）レベルを超えた場合、皮膚傷害の早期発見と管理のため臨床的経過観察を実施すべきである。
- トリガー（注意喚起）レベルの推奨値は、皮膚線量が 3 Gy、カーマ面積の積が 500 Gy $\text{cm}^2$ 、また患者の入射基準点における空気カーマが 5 Gy である。
- 組織反応のリスクが存在する心臓手技を施行する者は、それらの皮膚傷害を認識できるべきである。
- 心臓インターベンション手技や電気生理手技を実施する者は、患者およびスタッフの放射線量低減法に精通しているべきである。
- イメージング手技（透視、CT およびシンチグラフィ）を補佐する看護師、X 線技師/技術者および他の医療専門職者は、彼ら自身と他者の被ばくを最小化するため、放射線のリスクと放射線防護原則について精通しているべきである。
- 職業被ばくのリスクが存在する場合、スタッフは適切な個人用防護遮へいを使用すべきである。
- インターベンション手技を行う専門医と電気生理手技実施者は、電離放射線を使用するすべての医師に推奨される研修に加え、第 2 のステップとしてより高度の放射線防護の研修を受けるべきである。
- 放射線防護研修プログラムは、新人スタッフへの初期研修と定期的な情報の更新および再研

(xiv) 要 点

修の両方で構成すべきである。

- 心臓専門医は、心臓手技における放射線防護の品質保証プログラムに管理責任を持ち、医学物理士の補佐を受けるべきである。
- 心臓病学における品質保証プログラムには、透視法、CT およびシンチグラフィに関する患者線量の監査を含めるべきである。
- 品質保証プログラムでは、個人線量計が常時使用されていることを確実にすべきであり、また、すべての異常な線量値について詳細に調べるべきである。

## 総 括

(a) 心臓病学において患者の放射線被ばくは主に核医学、心臓 CT、心臓インターベンション手技および電気生理手技によるものである。心臓核医学、心臓 CT、経皮的冠動脈インターベンションおよび電気生理手技はますます増加しており、患者の医療における放射線被ばくの中でも大きな割合を占めている。複雑な経皮的冠動脈インターベンションや心臓電気生理手技では線量が高くなる。これらの手技では、放射線傷害を発生させ、がんのリスクを増加させるほどの高線量が患者の皮膚に照射される可能性がある。これは子供の先天性心疾患治療に関して特に懸念されている。さらに心臓カテーテル検査室や電気生理学検査室のスタッフも、放射線防護用具を適切に使用しないと高線量を被ばくする可能性がある。

### 1. 放射線の生物学的影響

(b) 確率的影響（悪性疾患および遺伝性影響）とは、影響の重篤度ではなく、発生する確率が、しきい値がない線量の関数とみなされるような影響を意味する。確率的影響を誘発する可能性は線量とともに増すが、線量と影響の正確な関係は分かっていない。子供は成人よりも放射線の確率的影響に対して約2倍から3倍影響を受けやすい。また子供は成人よりも寿命が長いので、放射線関連の後遺症が発症する期間も長い。

(c) 組織反応（例えば皮膚傷害）は細胞集団の傷害によるものであり、しきい線量の存在と、線量が高いほど反応の発生率と重篤度が上昇することを特徴とする。組織反応は「確定的影響」とも呼ばれる。放射線誘発皮膚傷害は放射線照射後数か月先まで完全に発現しない可能性がある。放射線誘発皮膚傷害の診断は遅れることが多い。皮膚傷害はより深い組織へと広がる可能性があり、数年間続く症状の原因となり得る。組織反応には確率的影響のリスクの増大を伴う場合もある。

(d) 心臓の放射線傷害の仕組みには炎症過程が含まれる。高線量を被ばくとすると患者の毛細血管数が漸進的に減少し、最終的には虚血、心筋細胞死および線維化、大血管での進行性のアテローム性動脈硬化症、心臓機能の低下、および致命的なうっ血性心不全に至る可能性がある。心臓血管への放射線影響は線量が $>0.5$  Gyで発生すると報告されている。一部の複雑な透視ガイド下インターベンション手技では臓器線量がこの水準に達する可能性がある。低線量では潜伏期間が10-20年間と長い。

(e) 目の水晶体は放射線感受性の高い組織である。通常、電離放射線は目の水晶体に後嚢下白内障を発生させる。心臓専門医とカテーテル検査室に勤務する支援スタッフへの調査で

は、放射線防護服や装置が適切に使用されていない場合、また放射線防護原則が無視されている場合、職業被ばくに起因する水晶体混濁が高い割合で発見されている。

## 2. 放射線防護原則の医療分野への適用

(f) 委員会は、正当化、防護の最適化および線量限度の適用という放射線防護の3原則を推奨する (ICRP, 2007 b)。最初の2つは線源に関係し、あらゆる放射線被ばく状況に適用される。3番目の原則はスタッフに適用されるが、患者、介護者または介助者の医療被ばくには適用されない。

(g) 医療における正当化とは、特定の患者にとって適切な場合のみ医療手技を実施すべきであることを意味する；つまり予測される臨床的利益が、放射線のリスクを含めた手技がもたらすすべてのリスクを上回るべきであることを意味する。正当化とは、依頼医師と心臓撮影術者あるいはIVR術者が共有する責任である。

(h) 医療における最適化とは、患者の放射線線量が医療目的に対して適切で、臨床的に不要または効果のない放射線を回避することを意味する。患者の放射線防護は、十分な画質と診断情報を提供するために、また透視法の場合はイメージングを適切に誘導するために、必要な最低限の放射線でイメージングが実施されることで最適化される。

## 3. 透視ガイド下インターベンション時の患者の線量の管理

(i) 放射線傷害のリスクが大きいと考えられる場合、インフォームドコンセントの過程に放射線のリスクに関する情報を含めるべきである (ICRP, 2000 b)。放射線のリスクを推定する際に考慮すべき患者の医療履歴は、遺伝的要素、合併疾患、投薬内容、放射線履歴および妊娠である。

(j) 患者の放射線量に影響する要因の一部はX線装置に依存するが、他の多くの要因は術者のX線装置使用法に依存する。手技の実施中、心臓専門医は、透視時間、シネ撮影回数およびシネフレーム数、さらに患者の総線量を常に意識していなければならない。患者の放射線量が増加した場合、術者は患者に既に照射された放射線量と、手技を完了するために必要な追加放射線量を考慮すべきである。

(k) 手技終了時には患者の放射線量報告書を作成し、保管すべきである。また放射線量データを手技終了後患者の医療記録に記録すべきである。手技による患者の放射線量が施設のトリガー（注意喚起）レベルを超えた場合、皮膚傷害の早期発見と管理のため臨床的経過観察を実施すべきである。トリガー（注意喚起）レベルの推奨値は、皮膚線量が3 Gy、カーマ面積の積が500 Gy $\text{cm}^2$ 、また患者の入射基準点における空気カーマが5 Gyである。大量の放射線を照射された患者は、出現する可能性のある放射線傷害を検出するため、手技終了後2-4週間にわたり経過観察を受けるべきである。

#### 4. インターベンション透視中のスタッフの防護

(l) 職業被ばく防護の基本手段は時間、距離および遮へいである。心臓インターベンションおよび電気生理検査室では、個人用の防護遮へいを実施すべきである。職業被ばく線量は、天井吊り下げ式鉛遮へい体や検査台の側面から吊るされた防護用鉛カーテンの適切な使用により非常に低い程度まで低減することができる。一般的に、患者の線量の低減が術者の線量低減にもつながる。放射線防護装置および技術を適切に使用した場合、IVR 術者の実効線量は通常 2-4 mSv/y で、委員会が推奨する 5 年間の平均線量限度 20 mSv/y を大幅に下回る。

(m) 術者の放射線被ばくは均一でも対称的でもない。IVR 術者は眼に対する放射線防護を実施すべきである。心臓インターベンション検査室では、職業被ばく線量を監視し、監査するため、個人モニター用のバッジの適切な使用が必要である。

#### 5. 心臓核医学における放射線防護

(n) 専門学会の総意に基づく取組みを通じ適切な使用法に関する基準やガイドラインが策定されてきた。これらの基準やガイドラインは核医学手技の正当化基準の策定に役立つ。正当化は、個別化して、患者ごとに実施する必要がある。検討中の各イメージング検査の便益とリスク、ならびに検査を実施しない場合の便益とリスクを比較検討すべきである。放射線リスク評価はこの過程の一部である。

(o) 心臓核医学手技における防護の最適化には、患者の線量を最小化しながら診断用画像の質を保証するための放射線医薬品と投与量の賢明な選択が関係する。投与する放射性物質の量は、国際ガイドラインおよび国内ガイドラインに規定される通り、事前に明示された範囲内にとどめ、患者の体型を考慮すべきである。負荷時イメージングが正常な場合、総線量を最小化するため安静時イメージングを省略してもよい。SPECT に関しては<sup>99m</sup>Tc を基本とした薬剤は<sup>201</sup>Tl よりも実効線量が低いため、線量低減の観点から<sup>99m</sup>Tc を基本とした薬剤を使用することが望ましい。手技実施者は担当患者に適切な便益-リスク分析を実施するため高品質の線量測定データが必要となる。

#### 6. 心臓コンピュータ断層撮影法における放射線防護

(p) 心臓核医学同様、心臓 CT の適切な使用に関しても基準やガイドラインが策定され、同様に正当化する必要がある。心臓 CT の線量は撮影方法、管電流および管電圧に大きく依存する。心拍数が 65-70 拍/分未満で正常なリズムの患者に関しては、一般的に、アキシャルイメージング（体軸面撮像）や心電図（ECG）同期した管電流変調法等の線量低減方法を実施しながら、診断画像の質を維持することが可能である。また非肥満患者に関しては、一般的に、低電圧（例えば 100 kVp）スキャンを使用しても診断画像の質を維持することが可能であ

る。最大管電流は患者の体型に合わせるべきである。患者の放射線量を低減する方法を開発、検証するためさらなる研究が必要である。

## 7. 心臓専門医のための放射線防護研修

(q) ほとんどの国で、医療被ばくの責任を有する者は適切な放射線防護研修を受けなければならないと規定されている。通常、世界中の心臓専門医は放射線防護研修をあまり受けていないか、あるいはまったく受けていない。本委員会は、インターベンション手技を行う専門医と電気生理手技実施者は、電離放射線を使用する他の医師に推奨する研修に加え、より高度な放射線防護研修を受けるべきであると勧告している (ICRP, 2009)。

(r) 研修プログラムには新人スタッフへの初期研修と定期的な情報の更新および再研修を含めるべきである。学術集会には放射線防護に関する再教育コースを含めるべきである。またそのコースへの参加を生涯専門教育の要求事項とすることも考慮すべきである。

(s) 放射線防護研修の実施後は、研修プログラムで修得した知識の評価を行うべきである (正式な試験機構制度)。研修を終了した医師は、適切な認証試験に合格することで、教育課程に明示された知識を有することを実証できるようにする。

(t) 委員会は、透視手技の実施を補佐する看護師および他の医療専門職が、彼ら自身と他者の被ばくを最小化するため、放射線リスクと放射線防護原則について精通しているべきだと勧告している。また研修は各人の役割に相応のものとすべきである (ICRP, 2009)。

## 8. 品質保証プログラム

(u) 放射線防護の品質保証プログラム (QAP) の2つの基本目的は、患者の被ばく線量の定期的評価と、放射線を利用する循環器施設の従事者の職業被ばく線量の評価である。心臓専門医は心臓手技の放射線防護における QAP の面に管理責任を持ち、医学物理士の補佐を受けるべきである。職業被ばく線量のモニタリングには放射線防護アドバイザー/放射線安全責任者も関与すべきである。

(v) インターベンション透視検査室の新設、循環器施設の CT スキャナや核医学装置の設置、既存装置の性能改善等の計画過程には、医学物理士、上級 X 線技師および上級心臓専門医が参加すべきである。これらの者は新規装置を使用して実施される手技の経験を有しているべきである。

(w) QAP には画質と手技の手順の定期的評価を含めるべきである。また QAP は放射線誘発皮膚傷害のリスクがある場合に個人の臨床的経過観察を行うべきかどうかのトリガー (注意喚起) レベルを規定すべきである。QAP では個人線量計を必ず常時使用し、すべての異常な線量値について詳細に調べるべきである。

(x) 手技終了時には患者の線量報告書を作成、保管し、患者の医療記録に記録すべきであ

る。線量報告書が利用できない場合は、手技と患者の識別情報とともに、線量値を患者の医療記録に記録すべきである。患者の線量監査（診断参考レベルとの比較を含む）と報告は QAP の重要な要素である。





## 用語解説

〔見出し語は五十音順で配列。⇔ は参照先を示す。〕  
〔原著の配列順による見出し語訳は本項末尾を参照。〕

### ALARA [ALARA]

「合理的に達成可能な限り低く」の頭字語。「防護の最適化」を参照。

### 安定度試験 [Constancy test]

装置の機能性能が規定の基準に適合していることを保証するため、または装置の構成要素の特性変化を早期に認識するために実施する一連の試験 (IEC, 1993)。

### 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で、患者の支援やケアのために自発的に承知の上で受ける被ばく；および、自らの被ばくを含む生物医学的研究プログラムへの志願者の被ばく (ICRP, 2007 b)。

### インターベンション基準点 [Interventional reference point]

⇔ **患者の入射基準点** [Patient entrance reference point]

### 受入試験 [Acceptance test]

新しい装置の設置後あるいは既存装置の大規模な改造後に、製造業者の仕様書、契約時の仕様書および適用すべき国の規則または装置の基準の遵守を確認するために実施される試験。

### 介護者および介助者 [Carers and comforters]

スタッフ以外で患者を介護、ケアや付き添いをする人々。親やその他の家族または親しい友人等が含まれ、診断手技実施中に子供を抱いたり、放射性医薬品の投与後、または小線源療法実施中に患者のすぐそばに付き添う (ICRP, 2007 b)。

### 確定的影響 [Deterministic effect]

⇔ **組織反応** [Tissue reaction]

### カーマ ( $K$ ) [Kerma ( $K$ )]

質量  $dm$  の物質中で非荷電粒子により解放されたすべての荷電粒子の運動エネルギー  $dE_{tr}$  の総和を、その物質の質量  $dm$  で割った商。

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

(xxii) 用語解説

カーマは非確率的な量として定義され、 $dE_{tr}$  は運動エネルギーの総和の期待値である。カーマの単位は1 キログラム当たりのジュール (J/kg) である。またその単位の特別な名称はグレイ (Gy) である。「カーマ (Kerma)」は「物質に放出される運動エネルギー (kinetic energy released in a mass)」の頭文字をとった頭字語である。<sup>2)</sup>

**カーマ-面積の積 (KAP) [Kerma-area product (KAP)]**

(この量は通常空中で決定されるため、より正確には空気カーマ-面積の積) X線管から放出されるX線ビーム全体の空気カーマの積分。カーマ-面積の積はX線ビームから患者に与えられるエネルギーの総量の代用測定値である。カーマ-面積の積は  $Gycm^2$  の単位で測定する。国際放射線単位測定委員会 (ICRU) のこの量に関する表記法は  $P_{KA}$  である (ICRU, 2005)。古い刊行物では線量-空中の積に「DAP」という略語をあてていた。(Stecker ら, 2009)。(カーマの定義に付随する注意も参照せよ)。

**患者の入射基準点 [Patient entrance reference point]**

Cアーム透視装置等のアイソセントリック透視システムの場合、患者の入射基準点は焦点方向のアイソセンターから15 cm離れた中心X線ビームに沿って存在する (IEC, 2010)。この基準の初期のバージョンでは、この基準点を「インターベンション基準点」と呼んでいた (IEC, 2000)。心臓がガントリーのアイソセンターにある場合、患者の入射基準点は患者の入射皮膚表面に近い。

**吸収線量 (D) [Absorbed dose (D)]**

次式で与えられる基本的な線量：

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

ここで  $d\bar{\epsilon}$  は物質  $dm$  中に電離放射線によって与えられる平均エネルギーである。吸収線量のSI単位は1 キログラム当たりのジュール (J/kg) で、その特別な名称はグレイ

---

2) 空気カーマと空中線量に関する注意点。長年にわたり、診断放射線医学における空中線量測定値は空気に対する吸収線量の観点から求められてきた。二次的な電子の平衡が存在する場合には両者の数値は等しいが、そのような平衡が存在しなければ、両者の数値は空気と組織間または空気とファントム間の境界付近で異なる。この領域では空中の吸収線量は通常の方法では決定できない。一方、空気カーマは、線量測定装置は空気カーマの観点から校正されるため容易に測定できる。したがって、空中の吸収線量のすべての報告される値は実際には空気カーマの値である。さらに、臓器線量は空気カーマから臓器線量へ変換する利用可能な変換係数を使って求められる。そのため、空中の吸収線量を決定するための実際的な数値は存在しない。これらの理由から、空中で決定される量に関し、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) は、空気に対する吸収線量ではなく空気カーマを、入射表面線量ではなく入射表面空気カーマを、線量-面積の積ではなくカーマ-面積の積を、またコンピュータ断層診断線量指数ではなくコンピュータ断層診断空気カーマ指数を使用するよう勧告している (ICRU, 2005)。本報告書では歴史的な理由により、また多くの読者が文献に記載されてきている「線量」により馴染みがあり、「空気カーマ」に慣れていないことから空中の吸収線量の表現を使用している。

(Gy) である (ICRP, 2007 b)。分かりやすく言えば、吸収線量とは電離放射線から組織の単位質量が吸収したエネルギーの指標である。

#### 狭窄症 [Stenosis]

管腔構造の狭窄。冠動脈に関して言えば、これは冠動脈の内径の狭窄を意味する。

#### グレイ (Gy) [Gray (Gy)]

吸収線量の SI 単位の特別な名称：1 Gy=1 J/kg

#### 経皮的冠動脈インターベンション (PCI) [Percutaneous coronary intervention (PCI)]

経皮的冠動脈インターベンションには冠動脈疾患を持つ患者を治療するための様々な手段が含まれる。カテーテルは罹患した冠動脈に挿入され、冠動脈の狭窄部位でバルーンを膨らませる。この時しばしばステント（金網状の管）を恒久的に留置する。この手技は一般的に「冠動脈形成術」として知られている。

#### 高周波アブレーション [Radiofrequency ablation]

1つあるいは複数のカテーテルを透視ガイド下で血管に挿入し、心筋に誘導する心臓電気生理学の手技。高周波エネルギーの通電によりごく小さな面積の組織が破壊され、その部分の修飾により電気信号の発生、あるいは伝導異常を治す。

#### 雇用主 [Employer]

組織、法人、共同企業体、企業、協会、信託機構、不動産業者、公共または民間機関、グループ、政治団体または行政団体、もしくは国の法律によって指定されたその他の個人であって、彼または彼女の雇用において相互に合意した関係により、作業員に対して認知された責任、関与、および義務を負う。自営業者は雇用主と作業員の両方であると見なされる (ICRP, 2007 b)。

#### 最大皮膚線量 [Peak skin dose]

最も強く照射を受けた皮膚の局部領域（すなわち、透視法を用いた検査治療手技実施中に最も長く一次 X 線ビームの範囲内にあった皮膚の局部領域）の最大吸収線量。国際放射線単位測定委員会 (ICRU) はこの量を  $D_{\text{skin,local}}$  と表記している (ICRU, 2005)。一方、米国放射能防護測定委員会 (NCRP) はこの量を  $D_{\text{skin,max}}$  と表記している (NCRP, 2010)。

最大皮膚線量は Gy の単位で測定する (NCRP, 2010)。

#### 作業員 [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。放射線を扱う医療従事者は職業的に被ばくする (ICRP, 2007 b)。

#### 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：

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{または} \quad E = \sum_T w_T H_T$$

ここで、 $H_T$  または  $w_R D_{T,R}$  は組織または臓器 T の等価線量、 $w_T$  は組織加重係数である。実効線量の単位は吸収線量と同じ J/kg で、特別な名称はシーベルト (Sv) である (ICRP, 2007 b)。実効線量は、特に放射線防護の最適化原則や線量限度を確率的影響に適用する際に一般的な放射線防護システムで用いる実際的な量として開発された。

### 実体放射線量レベル (SRDL) [Substantial radiation dose level (SRDL)]

平均的な患者において臨床的な傷害を生じさせる可能性のある放射線レベルに対して注意喚起し、手技中にさらに慎重な線量管理とその後の医学的経過観察を必要とする基準として適切に選択された線量。放射線レベルが SRDL 以上になると常に傷害が発生するという意味ではない。また、放射線レベルが SRDL 以下なら傷害が決して発生しないわけではない (NCRP, 2010)。

### 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 単位の特別な名称。単位はジュール／キログラム (J/kg) である。

### 使用開始試験 [Commissioning]

新しい装置の設置後、当該装置が医療機関におけるその臨床利用上適切に設定されていることを確認するために実施する試験 (ICRP, 2010)。

### 小線源療法 [Brachytherapy]

患者の体内に設置した密封線源または非密封線源を用いる患者の放射線治療法。

### 職業被ばく [Occupational exposure]

作業者がその作業の過程で受けるすべての被ばくを意味する。しかし、放射線の遍在性を考慮し、当委員会は「職業被ばく」の使用を業務管理上の責任と合理的にみなすことができる状況下での作業の結果生じた放射線被ばくに限定する。除外された被ばく、および免除された行為または線源による被ばくは、一般的に職業上の防護の対象とする必要はない (ICRP, 2007 b)。

### 除細動器 [Cardioverter-defibrillator]

通常ペースメーカーと同様に植め込まれる装置で、心拍数と不整脈をモニターし、心臓専門医が指定した特定の頻拍に対しショック等の電気療法を行う。

### 徐脈 [Bradycardia]

60/分未満の心拍数。心拍数や基礎疾患の有無によって治療が必要な場合と不要な場合がある。

### 心筋症 [Cardiomyopathy]

常にではないが、しばしば心室のポンプ機能の低下につながる心筋の疾病。

**心筋灌流** [Myocardial perfusion]

心筋へ流れる血流。

**心臓弁膜症** [Valvular heart disease]

1つまたは複数の心臓弁の異常による心臓病。心臓弁の異常な狭窄または弁の逆流は、心臓が血液を心房から心室、さらには肺や全身に押し出す力を低下させる可能性がある。

**診断参考レベル (DRL)** [Diagnostic reference level (DRL)]

電離放射線を利用する医療用イメージングで用いる基準。通常の条件下で、特定の手技ごとの患者の線量または投与放射能（放射性物質の量）が当該手技にとって異常に高いかまたは低いかを示すために用いる（ICRP, 2007 b）。

**シンチグラフィ** [Scintigraphy]

核医学のイメージング手技。

**スタッフ** [Staff]

本文書に関しては、スタッフ<sup>1)</sup>は放射線医療手技実施中に患者のケアに参加する医療従事者（「作業者」の項、参照）（例えば、医師、看護師、放射線技師）、または自らの作業の過程で医療用イメージング装置の放射線を被ばくする可能性がある作業者（例えば、装置の保守要員、清掃員）を意味する。

**ストレステスト（負荷試験）** [Stress test]

心行動態、電気活動、灌流、および／または機能に対する負荷の影響を評価する標準化手技。ストレスは運動により誘発するか、または投薬により模擬する。

**静止期** [Diastasis]

血液が心室にゆっくり入る、または入らなくなる心臓拡張期の中間期。静止期間は心拍数に反比例し、心拍数が非常に早い時はなくなる。

**正当化** [Justification]

(1) 放射線に関係する計画された活動が総合的に見て有益であるかどうか、（すなわち、その活動の導入または継続が、活動の結果生じる害（放射線による損害を含む）よりも大きな便益を個人と社会にもたらすかどうか）；あるいは (2) 緊急時被ばく状況または現存被ばく状況において提案されている防護戦略が総合的に見て有益でありそうかどうか、（すなわち、その防護戦略の導入や継続によって個人または社会にもたらされる便益が（放射線による害の低減を含む）その費用およびその戦略に起因する何らかの害または損傷を上回るかどうかを決定するプロセス。

1) 委員会は *Publication 103* (ICRP, 2007 b) で「作業者」という用語を「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」と定義している。このような人は病院ではスタッフの一部である。本報告書では、対象読者が「スタッフ」という用語により馴染みがあるため、「スタッフ」を優先して使用する。

### 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ために用いられる。しかし、例えば、特定の放射性核種の単位面積当たりに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エネルギー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, 2007 b)。

### 線量限度 [Dose limit]

計画被ばく状況で個人が受ける、超えてはならない実効線量または等価線量の値。

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

吸収線量  $D_T$  を組織または臓器 T で平均化したもので、次式で与えられる：

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

ここで  $\epsilon_T$  は組織または臓器 T に与えられる平均総エネルギーで、 $m_T$  は当該組織または臓器の質量である (ICRP, 2007 b)。

### 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 (デトリメント) の全体に対する組織または臓器の総体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)。それは次のように加重される (ICRP, 2007 b)：

$$\sum_T w_T = 1$$

### 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。「確定的影響」とも呼ばれている。場合によっては、組織反応は生物反応修飾物質を含む照射後の手技により変化しうる (ICRP, 2007 b)。

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

組織反応が 1% 発生すると推定される線量 (ICRP, 2007 b)。

### 電気生理学 [Electrophysiology]

心臓電気生理学は心臓の電気伝導系の異常を評価し、治療することを目的とする医学分野である。心臓電気生理手技には心内電気信号記録や、心臓のプログラム電気刺激等がある。これらの手技は診断目的だけのために実施される場合も、診断・治療 (例えば、焼灼術アブレーション) など複合手技の一部として実施される場合もある。ペースングおよび記録用のカテーテルは血管経路で複数の心房・心室に進める。カテーテルの形とそれらの留置位置は検討対象の不整脈の性質にしたがって、決定される。

### 等価線量 ( $H_T$ ) [Equivalent dose ( $H_T$ )]

次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 J/kg である。またこの単位の特別な名称はシーベルト (Sv) である (ICRP, 2007 b)。透視法で用いられる X 線に関しては  $w_R=1$  であるため、等価線量は数値的に平均吸収線量 (mGy) と等しくなる。

### 透視ガイド下インターベンション手技 [Fluoroscopically guided interventions]

経皮または他の到達手段による透視ガイド下治療および診断インターベンションで構成される手技。通常、局部麻酔および／または鎮静剤を使用して実施され、透視画像を使用しながら損傷／治療部位を特定し、手技をモニターしつつ治療を管理、記録する (ICRP, 2000 b)。

### 基準空気カーマ (RAK) [Reference air kerma (RAK)]

特定の条件下で測定され、患者の入射基準点における等価値として表される一次 X 線ビームの空気カーマ (IEC, 2004, 2010)。これは手技の実施中に、透視法ガントリー (患者の入射基準点参照) に相対する空間中の特定の地点に累積した空気カーマである。基準空気カーマには後方散乱は含まれず、単位 Gy で測定される。ICRU では  $K_{a,i}$  で、NCRP では  $K_{a,r}$  で表記される例外的量である (ICRU, 2005; NCRP, 2010)。基準空気カーマは「基準線量」または「累積空気カーマ」と称される場合がある。過去の刊行物ではこの量を「累積線量」や略語「CD」と表していた (Stecker ら, 2009)。

### 頻 拍 [Tachycardia]

100/分以上の心拍数。心拍数と基礎心疾患の有無により、頻拍は治療が必要な場合と不要な場合がある。

### 不整脈 [Dysrhythmia]

心拍リズムの障害。不整脈は電氣的、循環障害または器質的疾患に起因する可能性がある。ある種の不整脈は無害だが、命にかかわるものもある。

### ベクレル (Bq) [Becquerel (Bq)]

放射能の SI 単位の特別な名称。1 Bq = 1/s ( $\approx 2.7 \cdot 10^{-11}$  Ci)

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

#### 防護原則 [Principles of protection]

当委員会は防護の最適化原則を、(被ばくするかどうか不明の状況では) 被ばくの発生可能性、被ばく者数および個人線量の規模を、経済的および社会的要因を考慮しつつ、合理的に達成可能な限り低く維持するためにとられる線源関連のプロセスと定義している。こ

れは、便益の有害性に対しての差を最大化しながら、一般の状況下で防護レベルが最善の状態にあるべきことを意味する (ICRP, 2007 b)。医療イメージングおよび放射線治療手技における防護の最適化は、患者の放射線量が医療目的に適切である前提で、医療上不要または非生産的な放射線は避けることを意味する。患者の放射線防護は、十分な画質と診断情報を提供するために、また透視法の場合はイメージングを適切に誘導するために、必要な最低限の放射線でイメージングが実施されることで最適化される。

制御可能な被ばく状況で放射線源と個人に適用される一組の原則。正当化の原則と防護の最適化原則は線源に関係し、すべての被ばく状況に適用される。線量限度の適用の原則は個人に関係し、計画被ばく状況だけに適用される (ICRP, 2007 b)。

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

低線エネルギー付与 (LET) 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, 2007 b)。

### **放射線技師** [Radiographer]

放射線技師は疾患または傷害の診断を補佐するため、医師の指示通り、人体の組織、臓器、骨および血管の画像を撮影する医療用 X 線装置を使用する。放射線技師は自らの責務を果たすため、解剖学、生理学、位置調整、X 線撮影法、放射線生物学および放射線防護の知識を利用する。「放射線技師」と「放射線技術者」は類義語である。

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

発生する影響の確率が、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または遺伝性影響 (ICRP, 2007 b)。



## 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
Acceptance test 受入試験	Myocardial perfusion 心筋灌流
ALARA ALARA	Occupational exposure 職業被ばく
Becquerel (Bq) ベクレル (Bq)	Optimisation of protection (and safety) 防護 (および安全) の最適化
Brachytherapy 小線源療法	Patient entrance reference point 患者の入射基準点
Bradycardia 徐脈	Peak skin dose 最大皮膚線量
Cardiomyopathy 心筋症	Percutaneous coronary intervention (PCI) 経皮的冠動脈インターベンション (PCI)
Cardioverter-defibrillator 除細動器	Principles of protection 防護原則
Carers and comforters 介護者および介助者	Radiation weighting factor ( $w_R$ ) 放射線加重係数 ( $w_R$ )
Commissioning 使用開始試験	Radiofrequency ablation 高周波アブレーション
Constancy test 安定度試験	Radiographer 放射線技師
Deterministic effect 確定的影響 ⇔ Tissue reaction 組織反応	Reference air kerma (RAK) 基準空気カーマ (RAK)
Diagnostic reference level (DRL) 診断参考レベル (DRL)	Scintigraphy シンチグラフィ
Diastasis 静止期	Sievert (Sv) シーベルト (Sv)
Dose coefficient 線量係数	Staff スタッフ
Dose limit 線量限度	Stochastic effects of radiation 放射線の確率的影響
Dysrhythmia 不整脈	Stenosis 狭窄症
Effective dose ( $E$ ) 実効線量 ( $E$ )	Stress test ストレステスト (負荷試験)
Electrophysiology 電気生理学	Substantial radiation dose level (SRDL) 実体放射線量レベル (SRDL)
Employer 雇用主	Tachycardia 頻拍
Equivalent dose ( $H_T$ ) 等価線量 ( $H_T$ )	Threshold dose for tissue reactions 組織反応のしきい線量
Fluoroscopically guided interventions 透視ガイド下インターベンション手技	Tissue reaction 組織反応
Gray (Gy) グレイ (Gy)	Tissue weighting factor ( $w_T$ ) 組織加重係数 ( $w_T$ )
Justification 正当化	
Interventional reference point インターベンション基準点 ⇔ Patient entrance reference point 患者の入射基準点	
Kerma ( $K$ ) カーマ ( $K$ )	
Kerma-area product (KAP) カーマ-面積の積 (KAP)	
Mean absorbed dose in a tissue or organ (T) ( $D_T$ ) 組織または臓器 (T) の平均吸収線量 ( $D_T$ )	



# 1. 緒 論

- 心臓病学において患者の放射線被ばくは、核医学、CT、診断的心臓カテーテル検査、経皮的冠動脈インターベンション、電気生理手技、先天性心疾患または後天性心臓弁膜症のカテーテル治療手技、および他の血管インターベンション手技等によって生じる。
- 心臓核医学、心臓CT、心臓インターベンション手技および電気生理手技はますます増加しており、患者の医療放射線被ばくの中でも大きな割合を占めている。
- 心臓インターベンション手技および電気生理手技では、放射線傷害を発生させ、がんリスクを増加させるほどの高線量が患者の皮膚に照射される可能性がある。
- 複雑な経皮的冠動脈インターベンションや心臓電気生理手技では放射線量が高くなる可能性がある。
- 小児は放射線に対する感受性が高いので、小児の先天性心疾患治療における放射線リスクには特に懸念する必要がある。
- また心臓カテーテル検査室のスタッフも、放射線防護服や装置を適切に使用しないと高線量を被ばくする可能性がある。

## 1.1 緒 言

(1) 心臓病学では、患者は、単純X線写真、透視撮影法（シネ血管造影法を含む）、コンピュータ断層撮影（CT）、および核医学等、様々なモダリティで電離放射線に被ばくする。各モダリティは、その実施頻度によって、患者の被ばく放射線量、患者への放射線照射方法、および術者とスタッフの放射線量は大きく異なる。本報告書では単純X線撮影法についてはこれ以上言及せず、その他の3つのモダリティについて記述する。

## 1.2 透視ガイドによる手技

(2) 心臓専門医は、様々な透視ガイド下インターベンション手技を実施する。それらには冠動脈疾患、不整脈、先天性心疾患および心臓弁膜症の診断治療手技のほか様々な血管インターベンション手技が含まれる。これらの手技は新生児から高齢者まであらゆる年齢の患者に実施される可能性がある。委員会は、以前、透視ガイド下インターベンション手技による放射線

傷害の回避を扱ったが (ICRP, 2000 b), この 10 年で技術は進歩し, 我々の放射線影響の理解も深まった。

### 1.2.1 経皮的冠動脈インターベンション

(3) 過去 10 年間で, 心エコー検査, 心臓 CT 検査, 心臓シンチグラフィ, 心臓 MRI など, 非侵襲的心臓イメージング技術が継続的に著しく進歩しているが, ますます多くの患者が透視ガイド下侵襲的心臓診断および治療手技を受けている。欧州では, 1992 年から 2001 年の間に, 主に冠動脈ステントの導入により, 冠動脈造影検査を受けた患者が 3 倍に, 経皮的冠動脈インターベンション (PCI) を受けた患者が 5 倍に増加した (Togni ら, 2004, 図 1.1)。1990 年から 2003 年における欧州での冠動脈血管形成術手技の年平均増加率は, オランダの 3.78% からフィンランドの 11.82% までで平均 6.73% だった (Faulkner と Werduch, 2008 a)。2007 年, 欧州では推定 3,043,000 件の冠動脈造影検査と 910,000 件の PCI, 690,000 件の冠動脈ステントの留置が実施された (Faulkner と Werduch, 2008 b)。

(4) 1990 年から 2000 年にかけて, 北米でも同様の増加が観察された (Laskey ら, 2000; Anderson ら, 2002)。しかし 2006 年から 2008 年には, 米国では侵襲的冠動脈手技の件数が約 2% 減少し (NCRP, 2010), 一部の欧州諸国でも減少傾向が見られる (Meier, 2000)。これに

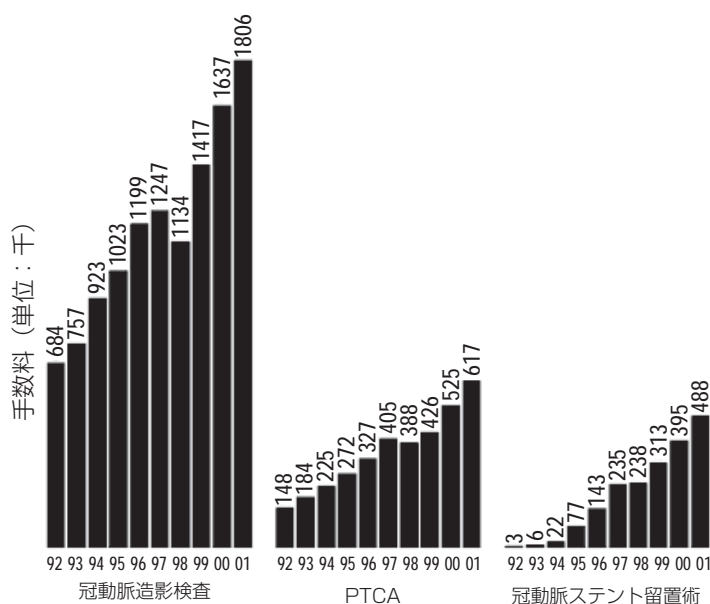


図 1.1

1992 年から 2001 年の間に欧州で実施された手技の内の冠動脈造影検査, PCI および冠動脈ステント留置術の推移 (単位: 千)。  
Togni ら (2004) の許可により掲載。

は、心臓 CT の使用の増加、COURAGE 研究の結果 (Boden ら, 2007), さらにこれらの手技への保険支払いの変更等いくつかの原因が考えられる。

(5) 米国ではインターベンション透視手技が 2006 年における患者の医療被ばくの第 3 位で、医療被ばく全体の 14% を占める (NCRP, 2009)。心臓手技数は全インターベンション透視手技数の 28% だが、インターベンション透視による被ばくでは 53% を占める。

(6) このような増加は主に西側諸国で見られるが、同様の傾向は他の国でも観察される。例えば中国では、PCI の年間増加率は約 40% である (Cheng, 2004)。手技の総件数は中国の総人口と比較すれば相対的に少なく、中国人に冠動脈疾患の患者数が少ないことを反映しているのかもしれない (3-7%, 欧米系の白人の患者数の約 1/4)。しかし、食習慣や生活様式の変化、喫煙等により今後患者数が増えると予測される (Cheng, 2004; Moran ら, 2010)。途上国での調査によれば、調査参加 20 か国のうち、約 30% が 2004 年から 2007 年までの 3 年間に手技量が倍増したことを明言した (Tsapaki ら, 2009)。同じ調査で、子供のインターベンション手技の実施件数は成人の実施件数と同じくらい多いことも分かった。

### 1.2.2 皮膚傷害

(7) PCI も電気生理インターベンション手技も、患者の皮膚に傷害を生じさせるほど高い皮膚線量を与える可能性がある (組織反応, 第 2 章および 3 章を参照) (Miller, 2008)。ある医療センターでは、皮膚傷害の発症頻度が 0.03% と推定された (Padovani ら, 2005)。心臓手技に起因する放射線傷害の発症件数はまだ少ないが、これらの傷害は患者に重大な影響を及ぼす。したがって、これらの手技に関する潜在的リスクについて、手技を実施する臨床医に提供し続けていくことが重要である。

(8) 複数の手技を受ける患者の数は引き続き増加している (Laskey ら, 2001)。複雑な症例は複数回の治療 (段階的手技) を受ける場合がある。再狭窄や疾患の進行もインターベンション手技の反復的实施を促す可能性がある。最近の 3332 名の患者に対する調査では (Padovani ら, 2005), そのほぼ 3 分の 1 が少なくとも 2 回の手技を受けている。Vaño ら (2001) は透視ガイド下冠動脈インターベンション手技を複数回受けた患者において、はるかに高い割合で皮膚への影響が発生していることを認めている。特に短期間で繰り返し手技が実施されると、皮膚傷害の発症リスクが高くなる (Balter ら, 2010)。複数回にわたる心臓透視手技は、放射線防護の観点から懸念されており、皮膚傷害のリスクを過小評価すべきではない。

(9) 患者の放射線量は手技の複雑性に関係する (Bernardi ら, 2000; Peterzoi ら, 2005; Balter ら, 2008; IAEA, 2009)。多枝冠動脈 PCI は複雑性の要因と考えられているが、常にこれが要因だとは限らない (Bernardi ら, 2000)。PCI の複雑性に影響すると考えられる他の要因には、病変の種類、慢性閉塞病変、血管の蛇行程度、血管の分岐部病変等が含まれる (Balter ら, 2008; IAEA, 2009)。

### 1.2.3 心臓電気生理手技

(10) 手技の件数と複雑性が増加している第2の領域は電気生理インターベンション手技である。徐脈に対する恒久的ペースメーカーの植込みは多数の患者で実施されている。1997年から2001年までの間に、新たなペースメーカーの植込み件数は世界中で約50%増加した(Mondら, 2004)。最近では、心不全や心筋症患者の治療に両心室ペースメーカー(心臓再同期療法)が導入されている(Salukheら, 2004)。また、突然の心臓停止リスクがある患者にとって救命の役割を果たすことを実証した研究の結果(Mossら, 2002; Salukheら, 2004)植込み型除細動器の使用も増加している。欧州では2007年に554,000件のペースメーカー植込み手術が行われ(FaulknerとWerduch, 2008b), 米国では2008年に推定189,000件の電気生理手技と361,000件のデバイスの植込み手術が実施された(NCRP, 2010)。

(11) 心臓電気生理手技にはリエントリー性頻脈の患者の治療も含まれる。これらの患者は冠動脈疾患の患者よりもはるかに若い場合が多く、診断的手技と高周波アブレーション治療の両方が必要である。透視法の技術的要素が最適化されないと、それらの患者は非常に高い線量の放射線を照射されることとなり、それらの手技には長い透視時間が必要なため、相当な組織反応のリスクに曝される可能性がある(Rosenthalら, 1998; McFaddenら, 2002)。

### 1.2.4 先天性心疾患と心臓弁膜症

(12) 先天性心疾患と心臓弁膜症も、カテーテル技術が導入され、新しいカテーテル技術が次々と開発されている心臓疾患の2つの分野であり、近い将来、経皮的インターベンションの実施増加が見込まれる。この分野は経皮的インターベンションを受ける患者全体の中での割合は小さいが、これらの疾患は成人にも小児にも見られる。小児は予測余命がより長いことと、成人と比較して放射線に対する感受性が高いので、確率的放射線影響、主にながりにリスクがより大きい(Hall, 2009)。

(13) これらの先天性心疾患と心臓弁膜症のカテーテル治療技術は、非常にリスクの高い外科的手技の代わりに実施できるため、広く実施されている。一部の透視法を経食道および心腔内超音波検査に替えることは可能だが(Riceら, 2002; ZanchettaとMaiolino, 2004)それでも放射線リスクの問題は残り、しばしば過小評価されている。肺動脈弁植込みには129分もの長時間透視を行う必要がある(Bonhoefferら, 2002)。乳児と小児に使用するこれらの新しい装置の安全問題については文献がほとんどない(Leviら, 2003)。

### 1.2.5 小児患者

(14) 心血管造影手技全体の約7%は0歳から15歳までの子供に対して実施されていると推定される(UNSCEAR, 2000)。もっとも広範に実施されている手技はバルーン弁形成術、心房中隔欠損、卵円孔開存または動脈管開存の器具を用いた閉鎖術、肺動脈狭窄または大動脈狭

窄のステント留置術、および電気生理検査である。これらの手技には長時間の透視が必要な場合がある。さらに、これらの十分に確立された手技に加え、経皮的肺動脈弁置換、心室中隔欠損閉鎖、肺動脈の血流を制限するための結紮装置の植込み、心室と血管の間に連続性を形成するための高周波穿孔術の新しい手技が導入されている (Levi ら, 2003)。左心低形成症候群等の複雑な疾病を治療するため、経皮的または複合的経皮/外科的方法が提案されている。胎児へのインターベンションも可能になっている。

(15) 2方向フラットパネル検出器 X線装置を用いた心臓診断手技を受けた1歳未満から16歳までの子供137人の患者線量を調査した結果、診断手技の平均線量は1.9-8.6 Gy $\text{cm}^2$ だった。小児年齢群の両極における治療手技の平均線量は2.4から17.8 Gy $\text{cm}^2$ だった (Martinez ら, 2007)。診断心臓カテーテル検査を受けた205人の子供(平均年齢4.1歳)では、平均線量は17 Gy $\text{cm}^2$ だった (Chida ら, 2010)。成人における透視ガイド下インターベンション手技に関する診断参考レベル (DRL) では、診断手技に関しては50 Gy $\text{cm}^2$ 、治療手技に関しては125 Gy $\text{cm}^2$ が提案されているが (Balter ら, 2008)、小児患者は一般的に成人患者が受ける線量の20%未満の線量を被ばくしている。それでもなお、小児心臓カテーテル検査手技による放射線量は懸念事項である (Andreassi ら, 2006; Andreassi, 2009)。小児カテーテル検査室でインターベンション手技を受けた体重30-40 kgの患者の90パーセントイル線量は200 Gy $\text{cm}^2$ にまで上っていた (NCRP, 2010)。

### 1.3 心臓CT

(16) 心臓CTは近年急速に進歩し、それにより様々な種類の心臓CT検査が実施できるようになった。今日、心臓CTには、冠動脈カルシウムスコアリング (冠動脈カルシウムスキャン)、冠動脈CT血管造影法 (冠動脈CT)、肺静脈CT造影法、心筋灌流CTおよび心臓核医学画像データのCT減衰補正等、いくつかの注目すべき手技が含まれる (Weigold ら, 2011)。最近の技術的進歩により実施される手技の数も増加しているが、現在のところ、世界全体の手技の実施件数に関する信頼できる統計値は入手できていない。米国では、2006年においてCTは医療被ばくの最大の原因であり、米国放射線防護測定委員会の報告書によれば、患者の医療被ばくの49%を占める (NCRP, 2009)。同報告書によれば、心臓CT (冠動脈CTおよび冠動脈カルシウムスキャンを含む) は件数でCT検査の4.7%を占めるが、CTによる患者被ばくの12.1%を占める。最新のスキャナには患者の線量を低減できる技術が導入されており、その結果この個体群に対する放射線負荷を低減することができる。

## 1.4 心臓核医学

(17) 世界中では年間推定 3,270 万件の核医学診断検査が実施されている (UNSCEAR, 2008)。この内、約 1400 万件が心臓核医学検査であり、この数値は急速に増加している (Davis, 2006)。心臓核医学検査の 90% 以上が心筋血流および／または心筋バイアビリティ (生存可能性) を評価するための心筋血流シンチグラフィ検査である。実施された心臓核医学検査の大半では単光子放出 CT (SPECT) が使用されている。一方、ポジトロン放出断層撮影 (PET) 検査を実施する検査施設も存在し、その数は増えつつある。

(18) 米国では核医学検査が 2006 年における患者の医療被ばくの 26% を占め、心臓検査が核医学被ばくの 85% を占めた (NCRP, 2009)。米国では、CT に次ぎ核医学手技が第 2 の医療被ばく源となっている。

(19) 米国では世界の他の国での総実施件数を上回る心臓核医学検査が実施されている。この不均衡の理由としては、検査の受けやすさ、訴訟対策として、あるいは検査をすることによる利益などがその理由と考えられる。しかし、妥当性を評価するのに十分なデータが存在する米国の調査結果ではこれらの手技は適切に行われており、不適切な適応で実施されたのは全体のわずか 15% 程度だったことが実証された (Gibbons ら, 2008; Hendel ら, 2010)。心臓専門医は、患者の個々の状況と診断的必要性に基づいて、臨床判断に正当化の原則を盛り込むべきである。また、負荷心エコー検査等の電離放射線を必要としない代替技法の使用を検討すべきである。

## 1.5 職業被ばくのリスク

(20) 放射線のリスクは患者だけに限られたものではない。透視ガイド下インターベンション手技の実施中に術者およびスタッフも相当の放射線被ばくを受ける可能性がある。心臓インターベンション手技の複雑性が増すなか、技術の改良による線量低減を相殺しているように思われる (Kim ら, 2008)。同種の手技に関しても術者の線量にはかなりのばらつきが観察されている。これは放射線防護上、行為が改善可能であることを意味している (Kim と Miller, 2009)。最近の調査では、放射線防護装置を適切に使用せず、放射線防護原則を遵守しない場合、インターベンションを実施する心臓専門医で放射線に関連する白内障の発症率が増加している (Ciraj-Bjelac ら, 2010; Vaňo ら, 2010)。残念ながら、スタッフの放射線量に対する適切なモニタリングは不十分であるし、職業被ばく線量に関する信頼性の高いデータも不足している (Padovani, 2011)。



## 1.6 要 約

(21) 電離放射線を用いる心臓手技の件数と複雑性は増している。患者の便益は明らかだが、患者とスタッフ双方の放射線被ばく量は重要であり、適切に管理しなければならない。これらの手技を最適化する際、若い患者に関してがんリスクの増加を考慮しなくてはならない。高齢患者に関しては、がんリスクはそれほど重要ではないが、組織反応（皮膚傷害）を回避すべきである。インターベンションを実施する心臓専門医は職業被ばくのリスクが最も高い従事者グループの1つであり、患者と自分自身の防護方法を知るべきである。本ICRP報告書はこの目標の達成に役立つことを目的としている。



## 2. 放射線の生物学的影響

- 組織反応は細胞群の損傷によるもので、しきい線量および線量がさらに増加した場合の反応の発生率と重篤度の増加によって特徴付けられる。組織反応は「確定的影響」とも呼ばれる。
- 確率的影響（悪性疾患および遺伝性影響）とは、重篤度ではなく、発生する確率が、しきい値がない線量の関数とみなされるような影響を意味する。
- 放射線誘発皮膚傷害は放射線照射後数か月先まで完全に発現しない可能性がある。
- 放射線誘発皮膚傷害の診断は遅れる場合も多い。
- 目の水晶体は放射線感受性の高い組織である。
- 通常、電離放射線は目の水晶体に後嚢下白内障を発生させる。
- カテーテル検査室に勤務する心臓専門医と支援スタッフの調査では、放射線防護手段が適切に使用されていない場合、職業被ばくに起因する水晶体混濁が高い割合で見られている。

### 2.1 放射線影響の種類

(22) 放射線の影響は組織反応（組織への有害な影響）と確率的影響（がんおよび遺伝性影響）の2群に分類できる。

(23) 組織反応（例えば皮膚傷害）は主に高線量被ばく後の細胞の再生機能の喪失によって生じる。組織反応の誘発は一般的にしきい線量によって特徴付けられる。このしきい線量が存在する理由は、傷害が臨床上問題とされるかたちで発現する前に、当該組織内の重要な細胞群に放射線によって再生生存機能の喪失が誘発されるに違いないからである。しきい線量を超えると、線量が増えるにつれ、組織の回復能力の低下を含む傷害の重篤度も増す（ICRP, 2007 b）。しきい値は被ばくした組織の性質と条件によって変化する（Balter ら, 2010）。

(24) 傷害は、細胞の分裂または分化に失敗した結果として細胞が死に、組織の通常の代謝回転の一部として失われるまで、臨床的には出現しない（Balter ら, 2010）。高線量の被ばくは、被ばくした個人に悲惨な結果をもたらす可能性がある（Balter ら, 2010）。

(25) 報告されている一連の大きな調査結果における放射線誘発皮膚傷害の80%は心臓手技によるものである（Koening ら, 2001 a）。しかし、心臓専門医は放射線傷害が心臓手技に関連していることを認識していないことが多い。それは彼らが、放射線が皮膚傷害の原因とな

りうることを認識していない、照射した放射線量の大きさに気付いていない、相当量の放射線を被ばくした患者の医学的経過を観察していない、皮膚傷害を発症した患者の来院時に放射線が原因である可能性を考慮しない等の理由からである。

(26) 一部の患者は高線量を被ばくしており、放射線傷害の事例数は増加している (NCI, 2005)。しかし、最近、インターベンションを実施する心臓専門医の多くは放射線傷害の事例の経験がない。放射線傷害の事例数は、世界中で実施されている透視ガイド下インターベンション手技の実施件数に比べればわずかである。

(27) 確率的影響については、1990年以降放射線発がんに関係する細胞および動物データの蓄積によって、単一細胞内のDNA損傷反応過程が放射線被ばく後のがんの発生にきわめて重要であるという見解が強化された。疫学および実験研究の結果、放射線リスクの証拠が示されたが、約100 mSv以下の線量に関しては不確実性を伴う (ICRP, 2007 b; Linet ら, 2012)。

(28) これらの影響は確率的である；つまり、影響を生じるための特定のしきい値は存在しない。確率的影響を発生させる可能性は線量が増加すると高まるが、線量と影響の正確な関係は不明である。約100 mSv以下の低線量領域では、がんまたは遺伝性影響の発生率は、関係する臓器および組織内の等価線量の増加に比例して増加すると想定することは科学的に妥当である（「直線しきい値なし」モデル） (ICRP, 2007 b)。線量は影響の重篤度には無関係である。

(29) 小児の放射線の確率的影響に対する感受性は成人の約2倍から3倍高い (ICRP, 1991)。さらに彼らは潜在的予測寿命が成人より長い。したがって、小児は、起こり得る放射線関連後遺症を発症する時間がより長い。小児の場合、透視ガイド下インターベンション手技1回当たりの致死的がん発生の確率は約0.07-0.08%と推定されるが、このリスクは患者の年齢、基本的な平均余命、手技の実施方法によって大きく異なる可能性がある (Bacher ら, 2005; Martinez ら, 2007)。

(30) 放射線が実験動物に遺伝性影響を発生させる明らかな証拠が存在するが、ヒトの放射線被ばくが子孫に過剰の遺伝疾患をもたらすという直接的な証拠は未だ存在しない (ICRP, 2007 b)。

## 2.2 背 景

(31) 1895年にX線が発見された数か月後、放射線誘発皮膚変化が観察された (Codman, 1896; Daniel, 1896)。一部の初期の放射線科医は重篤な皮膚炎、放射線誘発がんに罹患し、指趾切断を余儀なくされた。X線は目に見えず、被ばくしても何も感じないため、X線がそれらの原因であることを認識するまでに時間がかかった。Publication 103に記載する通り、これらの放射線傷害の防止が当委員会の設立の動機だった (ICRP, 2007 b)。

(32) PCI 件数の急増後、1990年代に患者の皮膚に深い潰瘍形成や壊死が発症する事例が報告されるようになった (ACR, 1992; Shope, 1996)。1994年、米国食品医薬品局 (FDA) は透視ガイド下インターベンション手技による皮膚傷害に関する助言を発表した (FDA, 1994)。放射線による皮膚傷害は、高周波カテーテルアブレーションの実施後にも報告されている (Vañoら, 1998 a)。患者の多くは若い成人で、一部は子供だったため、これは重大な関心を集めた。委員会は *Publication 85* (ICRP, 2000 b) でインターベンション透視手技による皮膚傷害を防止するよう注意を促し、*Publication 105* (ICRP, 2007 c) で皮膚傷害の防止の重要性を再度強調した。

## 2.3 放射線影響と皮膚

(33) 放射線に対する皮膚の反応は線量に関係し、この線量が1つの領域、すなわち、通常、X線が患者に入射する位置に集中すると発生する。「吸収線量」という用語は、組織の単位質量に吸収される放射線エネルギー量を評価するために用いられる (「用語解説」参照)。時間的経過は異なるが、皮膚の反応は特徴的な様式に従って発症する (Balterら, 2010)。しきい線量と各種の皮膚傷害の発現時間を表2.1に要約する。

(34) 毛細血管拡張性運動失調症に関与する *ATM* 遺伝子等の DNA 修復遺伝子の異常は、個人に放射線誘発がん罹患しやすくさせる、あるいは組織反応の発現しきい値を下げる (Hymesら, 2006; Allan, 2008)。その他にファンconi貧血や、ブルーム症候群、色素性乾皮症等の DNA 切断または修復に影響する遺伝的構成要素の障害も放射線感受性を高める。家族性ポリープ、ガードナー症候群、遺伝性悪性黒色腫、および異形成母斑症候群も放射線感受性を高める (Hymesら, 2006)。特定の家族性がん症候群も、神経線維腫症、リー・フラウメニ症候群、さらに遺伝性網膜芽腫等の放射線誘発がんに対する感受性を高める可能性がある (Allan, 2008)。

(35) 自己免疫疾患および結合組織疾患は、予測不可能なたちで、患者を重篤な皮膚放射線障害に罹患しやすくさせる。通常これらは放射線治療時に照射される高線量に伴って発生するが、その原因は明らかではない。これらの障害には強皮症、全身性エリテマトーデス、そしておそらく関節リウマチが含まれる (Wagnerら, 1999; Hymesら, 2006)。甲状腺機能亢進症および糖尿病も放射線感受性の上昇と関係がある (Koenigら, 2001 a)。糖尿病は、二次的な小血管疾患とその結果としての治癒機能の低下によって、放射線傷害を受けやすくすると考えられている (Haroldら, 1999)。アクチノマイシン D、ドキシソルピシン、プレオマイシン、5-フルオロウラシル、メトトレキサート等のいくつかの薬剤も放射線感受性を上昇させる (Koenigら, 2001 a)。この影響は通常放射線治療で照射される高線量でのみ観察される。

(36) 放射線感受性と放射線反応性は個人で異なるため、上記および表2.1から明らかな通

り、放射線誘発皮膚変化に関する線量と出現時期に確固たるしきい値は存在しない（Balterら、2010）。これらの範囲は図 2.1 に図として表した。以下の考察ではしきい線量は平均的個人に与えられると仮定するが、しきい線量は個人間で異なるということを理解しておく必要が

表 2.1 頸部、体幹、骨盤、臀部または腕の皮膚への単回放射線量照射による組織反応

集団	単一部位の急性皮膚-線量範囲 (Gy)*	NCI 皮膚反応等級	影響が出現するまでのおよその時間			
			即時<2 週間	早期 2-8 週間	中期 6-52 週間	長期>40 週間
A1	0-2	N/A	観察可能な影響は予測されない			
A2	2-5	1	一過性の紅斑	脱毛	脱毛の回復	予測されず
B	5-10	1	一過性の紅斑	紅斑, 脱毛	回復 より高い線量では、長期的な紅斑, 恒久的な部分脱毛	回復 より高い線量では、皮膚の萎縮/硬化
C	10-15	1-2	一過性の紅斑	紅斑, 脱毛 乾燥落屑または湿性落屑 落屑の回復	長期的な紅斑 恒久的な脱毛	毛細血管拡張症 <sup>†</sup> 皮膚の萎縮/硬化 皮膚が弱くなる可能性が高い。
D	>15	3-4	一過性の紅斑 非常に高い放射線量を被ばくした後、浮腫および急性潰瘍；長期間の外科的処置が必要な可能性が高い。	紅斑, 脱毛 湿性落屑	皮膚の萎縮 湿性落屑が治癒しなかったことによる二次的潰瘍形成；外科的処置が必要となる可能性が高い。 より高い線量では、真皮壊死；外科的処置が必要となる可能性が高い。	毛細血管拡張症 皮膚の萎縮/硬化 遅発性皮膚損傷の可能性 傷は持続的で、より深い損傷に進行。 外科的処置が必要となる可能性が高い。

出典：Balter ら（2010）および NCRP（2010）。

NCI：米国国立がん研究所，NA：非適用

\* 皮膚の線量測定精度が±50%以上の可能性は低い。

<sup>†</sup> 放射線誘発毛細血管拡張症を意味する。初期の湿性落屑領域または潰瘍の治癒に関係する毛細血管拡張症がそれ以前に存在する可能性がある。

この表は、物理学的または臨床的な緩和因子または悪化因子がない状態での、患者の放射線感受性の正常な範囲に該当する。皮膚線量は吸収された皮膚線量を意味する（後方散乱を含む）。この線量は米国食品医薬品局（電離放射線放出生成物に関する性能基準。透視装置。21 C.F.R. pt. 1020.32（2012）または国際電気標準会議（IEC, 2010）により報告された基準空気カーマ（ $K_{a,r}$ ）ではない。この表は、頭皮には該当しない。照射領域の皮膚擦過傷または感染は、放射線影響を悪化させる可能性が高い。線量と時間の帯域は厳密な境界ではない。症状や兆候は、皮膚線量が増加するほど早く出現すると予測される。

ある。ほとんどの患者では、臨床上重要な皮膚反応は吸収線量が $>5$  Gy の場合のみ生じる (Balter ら, 2010 ; ICRP, 2012)。

(37) 平均的な放射線感受性を持つ個人に検知可能な皮膚変化が生じるであろう最小線量は従来 2 Gy と考えられてきた。ヒスタミン様物質が活性化され、毛細血管を拡張させ皮膚を発赤させる (一過性の紅斑)。通常これは被ばく後数時間以内に発生し、24 時間後に消失する。この作用は期間が短いため過小報告される場合が多い。

(38) 6 Gy の線量被ばく後、約 10 日目に第 2 の充血段階 (主紅斑) が始まる。この段階は $>6$  Gy の線量被ばくでは早期に出現する可能性がある。これは表皮内の増殖型基底細胞が破壊された結果生じる。患者はひりひりした痛み、圧痛および痒みを訴え、皮膚は熱を帯び、浮腫状になる。紅斑は通常 2 週目にピークとなり、4 週間で消失する (Koenig ら, 2001 b)。

(39) 線量が 10 Gy 以上になると色素沈着過剰とともに紅斑が長期化する可能性がある。皮膚線量が $>14$  Gy の場合、炎症が乾燥性落屑に進行し、紅斑部の皮膚が角質層の鱗屑と薄片で覆われ、外観は日焼けに類似する。線量が約 18 Gy の場合は、湿性落屑が生じる。皮膚には水泡や瘡蓋 (かさぶた) が生じ、皮膚深層から漿液がしみ出る。これには相当の痛みが伴い、皮膚は感染しやすくなる。しばしば局所的に抗生物質が必要となる (Shack と Lynch, 1987)。表皮基底層の増殖細胞は損傷し、その数が減少する。通常、落屑は被ばく後 4 週間で出現するが、特に二次感染が生じると数週間続く場合もある。

(40) 紅斑の後期段階は約 15 Gy の放射線被ばく 8-10 週間後に出現する可能性がある。皮膚は薄紫色になり、浅黒くなる。皮膚線量が約 18 Gy の場合、真皮の血管不全が生じ、被ばくから 10-16 週後、虚血性真皮壊死に至る可能性がある。線量が高いほど損傷も大きくなる

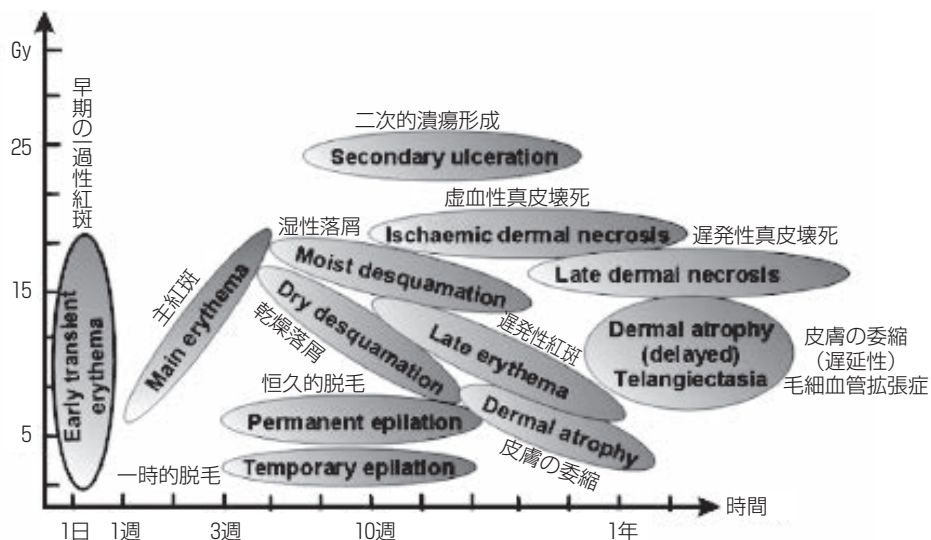


図 2.1

表 2.1 のグラフィック表示。皮膚における組織影響の線量と時間軸での重なりを示す。

(Koenig ら, 2001 a)。

(41) 長期間紅斑が続くと、特に湿性落屑に付随して皮膚が萎縮する。これは通常3か月後と1年後の2つの時期で見られる。>10 Gy の線量では、真皮の毛細血管の拡張により毛細血管拡張症も発症する可能性がある。これは通常被ばくから1年以上後の遅発現象だが、より早い時期に出現し時間とともに増加する可能性がある (Turreson と Notter, 1986)。外傷は、上記のような遅発変化を示す皮膚の遅発壊死を突然発症させる可能性がある。このしきい値は約12 Gy であり、初期の皮膚落屑が生じない場合に見られることがある。

(42) このような皮膚の損傷は比較的稀で、原因が分からない可能性があるため、放射線誘発皮膚傷害の診断は遅れることが多い。さらに、皮膚の損傷が完全に発現するまで何か月もの潜伏期間がある場合が多い (Balter ら, 2020)。そして患者はインターベンション手技を実施した医師ではなく、皮膚科医に治療を求めることが多い。その結果、透視手技の履歴が見過ごされたり、無関係と判断される可能性がある (Frazier ら, 2007)。皮膚の生検はよく実施されているが、その結果は放射線傷害に固有のものではなく、他の外傷同様、非治癒性の潰瘍となる場合がある。電極パッドによる接触性皮膚炎、粘着テープまたは皮膚消毒薬に対するアレルギー、薬疹、ウイルスまたは細菌感染あるいは虫さされとさえ誤診されることも多い。傷害に伴う深部痛のため胸部や腹部の広範囲な検査を受けることになる場合もある (Vliestra ら, 2004)。重篤な傷害は下層にある筋肉まで達することもある (Monaco ら, 2003)。

(43) インターベンション手技による放射線に直接関係する皮膚がんはまだ報告されていない。頭皮白癬のX線治療後の基底細胞がんの事例は記録されている (Shore ら, 2002)。この相対的リスクは頭皮線量4.8 Gy で3.6である。1950年から1995年までの期間、調査されたコホートで中国の医療X線従事者における皮膚がんの相対リスクは4.1と推定された (Wang ら, 2002)。

## 2.4 目の水晶体と放射線

(44) 白内障の有病率は白内障の定義によって異なるためある意味で推定が難しい。フラミンガム眼研究 (Kahn ら, 1977) は年齢が75-85歳では白内障の有病率が91%であるとしているが、この数値は白内障の定義に「軽い視覚障害」を追加すると46%まで減少する。スペインのグループが行った過去の調査についての最近の総説では、75歳以上の被験者における白内障と視力の低下の有病率は60%以上だった (Acosta ら, 2006)。

(45) 放射線に起因しない水晶体混濁の大半は、水晶体の外側細胞層内の皮質変化に関係する。水晶体は放射線感受性の高い組織である。電離放射線は一般的に後囊下 (PSC) 白内障を形成させる (図2.2)。主に視力を変化させる加齢による皮質白内障または核性白内障と異なり、PSC白内障は視力とコントラスト感度の両者を変化させる可能性が高い (Stifter ら,



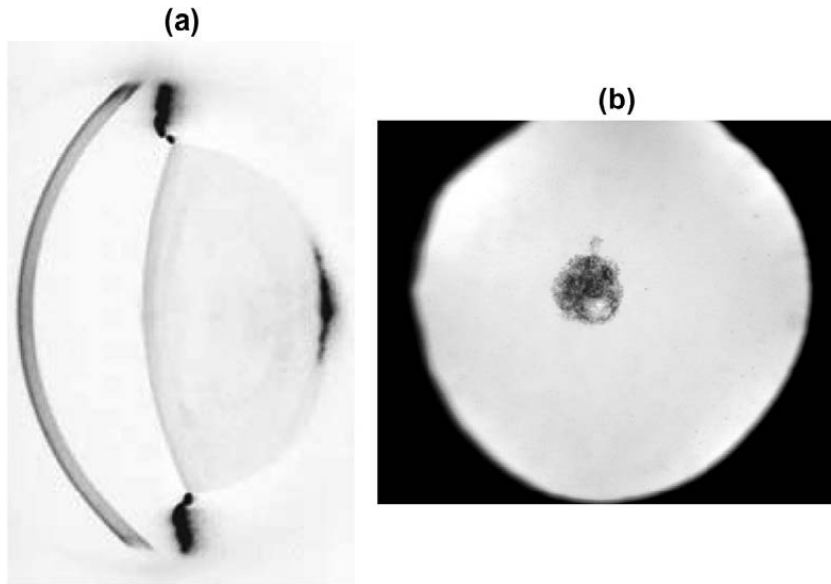


図 2.2

(a) このPSC水晶体領域中心部の明るい反射性のブランク（一番右）としての水晶体Scheimpflug画像には、典型的な放射線誘発後嚢下（PSC）白内障が映し出されている。角膜表面は一番左に示す。水晶体赤道頂部と底部の明るい反射は拡張した虹彩である。(b) 水晶体の後部視軸に沿ったPSC白内障の後方照明写真。この中央の混濁が明るい照明条件下での眩暈と視力低下、ならびに読書視力の低下の原因である可能性がある。

2006)。

(46) 従来、電離放射線被ばくに対する水晶体の反応は確定的組織反応とみなされてきた。最近まで、人体の検出可能な水晶体混濁のしきい線量は、1回の急性照射に関しては2 Gy、長期的照射に関しては5 Gyとされてきた。視力低下を伴う白内障に関しては、しきい値はそれぞれ5 Gyと8 Gyとみなされてきた(ICRP, 1991; NCRP, 1993)。より低い放射線量を被ばくした集団に関する最近のデータから、水晶体混濁は2 Gyよりもはるかに低い被ばくで発生し、線量しきい値は存在しない可能性があることが示された(Kleiman, 2007; Worgulら, 2007; NCRP, 2010; Shoreら, 2010; ICRP, 2012)。

(47) 長年手技を実施してきたIVR術者における放射線誘発白内障に関する報告書と、血管造影手技実施中に年間限度150 mSvに近い等価線量を被ばくした場合の水晶体に関する報告書が発表されている(図2.3)(Vañoら, 1998 b, 2010; Pages, 2000; Hidajatら, 2006)。最近の研究によれば、一般的に報告されているインターベンション手技の仕事量を考慮すると、放射線防護装置を使用せず、放射線防護原則に従わない場合、水晶体の放射線量は組織反応に関する現在のしきい値を数年間の勤務で超える可能性がある(Kimら, 2008; Vañoら, 2008 a)。国際原子力機関(IAEA)の協力の下、中南米とアジアで実施した心臓カテーテル検査室

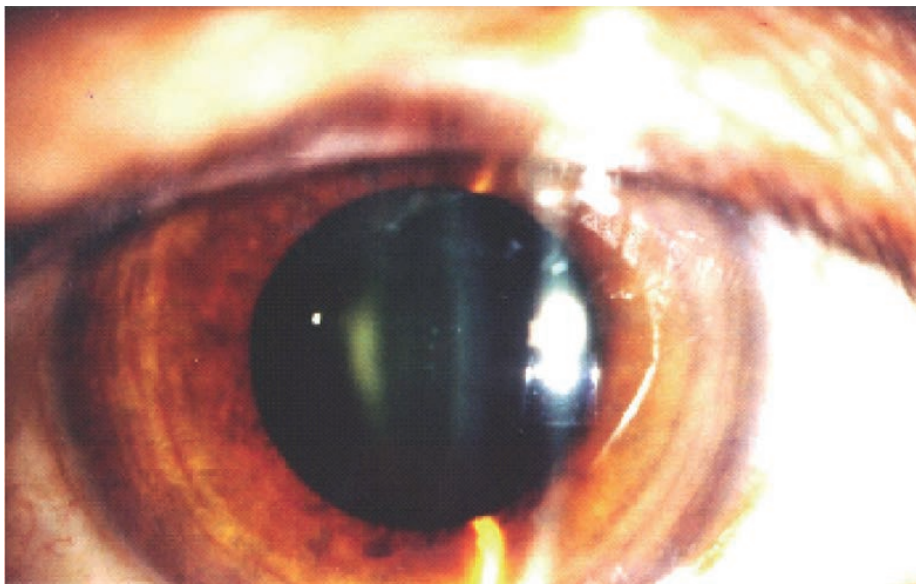


図 2.3

古いX線システムを使用し、不適切な作業条件により高い散乱放射線を被ばくしたIVR手技術者の目の後嚢下白内障。出典：Vaňoら（1998 b）。

に勤務する心臓専門医と補助スタッフに対する複数の調査では、職業被ばくに関連するタイプの水晶体混濁の有病率が高いことが分かった（Ciraj-Bjelacら、2010；Vaňoら、2010）。

（48） これらの最近のデータと白内障発生メカニズムの不確実性により、目の水晶体の放射線感受性について詳細な再評価が必要であることが強調された。この問題は *Publication 118* と委員会の組織反応に関する声明（ICRP, 2011, 2012）で考察されている。計画被ばく状況における職業被ばく（例えば、IVR術者の職業被ばく）の等価線量限度を 150 mSv/y とした過去の委員会の勧告（ICRP, 1991）は変更された。現在、委員会は慢性的な職業被ばくに関する水晶体の等価線量の限度を、1年で 50 mSv を超えることなく、特定の5年間の平均で 20 mSv/y とすべきだと勧告している（すなわち、作業者の年間全身限度と同じ）（ICRP, 2011, 2012）。これが心臓インターベンション手技と透視装置が現在ほど洗練されていなかった1984年から1988年のデータに基づいて実施された調査で、心臓専門医の頭部の年間等価線量が約 20-30 mSv と決定された点に留意されたい（Renaud, 1992）。

（49） 委員会は目の水晶体の吸収線量に関するしきい値を 0.5 Gy とすべきだと考えている（ICRP, 2011）。委員会は、既存の証拠に基づき、約 0.1 Gy（100 mGy）までの急性線量は、白内障に関する目の水晶体等の組織の機能を低下させないと判断する。ただし、この組織に関してはしきい値モデルの使用は引き続き不確実である（ICRP, 2011）。

## 2.5 放射線被ばくの心血管系への影響

(50) 心臓の放射線傷害の仕組みには炎症過程が含まれる。高線量を被ばくすると患者の開存した毛細血管の数が漸減し、最終的に虚血、心筋細胞死および線維症、大血管の進展したアテローム性動脈硬化症、心機能の低下および致命的なうっ血性心不全に至る。放射線誘発心疾患の既知の緩和剤はまだない (ICRP, 2011)。

(51) 原爆被爆者の解析から、放射線量が 0.5 Gy を超えると脳卒中と心疾患のリスクが上昇することが分かっている (Shimizu ら, 2010)。この知見は胸部の放射線治療後の心疾患リスクの上昇を実証した他の研究と一致する (Bhatti ら, 2008)。放射線治療に使用する線量範囲の電離放射線は心疾患のリスクを上昇させることの確かな証拠がある (McGale と Darby, 2008)。心疾患のリスクの上昇は、低線量の被ばく (1-2 Gy) から 10-20 年後によく明らかになる (ICRP, 2011)。放射線の心臓への影響に関する疫学研究については 2006 年の UNSCEAR 報告書 (UNSCEAR, 2008) の付属書 B で広範にわたり検討されている。

(52) 放射線誘発心疾患は、限局性心筋変性および線維化を引き起こす心筋の微小循環障害、および、大血管のアテローム性動脈硬化症の急激な進行によって、発症する可能性がある。心臓血管の放射線影響は  $>0.5$  Gy の線量で発生すると報告されている (ICRP, 2011)。不確実性は残るが、医師は循環器疾患の吸収線量しきい値は心臓での線量が 0.5 Gy と非常に低いことを認識すべきである (ICRP, 2011)。一部の複雑な透視ガイド下の心臓手技では、臓器線量が  $>0.5$  Gy になる可能性がある。防護の最適化プロセスではこれらの放射線影響を考慮する必要がある。

(53) 比較的低い線量では ( $<0.5$  Gy), 放射線量と心臓血管リスクの上昇との関係は不明である (Shimizu ら, 2010)。McGeoghegan らは、低線量を長期間被ばくした 42,000 人の放射線従事者を解析し、特に循環器系疾患等のがん以外による死亡率と電離放射線被ばくの関連性を示した (McGeoghegan ら, 2008)。他の研究では様々な相反する結果が示されている (McGale と Darby, 2008)。医療、職業、環境上比較的低い放射線に被ばくした個体群に関する最近の疫学研究を検証したところ、単位放射線量当たりのリスクに関して、放射線被ばくと循環器系疾患との関係には、おそらく交絡因子またはバイアスのために、相当の不均一性が存在することが示された (ICRP, 2011)。基本的な生物学的仕組みが明確に理解されていないため、これらの様々な結果を解釈することは難しい (Dauer ら, 2010 b)。

## 2.6 職業放射線被ばくと頭蓋内腫瘍

(54) 電離放射線は神経系腫瘍の数少ない実証済みの原因の 1 つである (Yonehara ら,

2004)。Prestonらは原爆生存者の神経系腫瘍の発生率について研究し（Prestonら，2002，2007），線量に関連して神経系腫瘍が大幅に増加することを発見した。彼らは等価線量で1 Sv未満の低い放射線への被ばくが神経系腫瘍の発症率増加に関係すると結論した（Prestonら，2002）。子供では，放射線被ばくが脳腫瘍の発現に関係しているのは明らかだが，成人として被ばくした個人における関係はそれほど明らかではない。良性の頭蓋内腫瘍と放射線の関係は，悪性腫瘍よりもはるかに強いと考えられる（UNSCEAR, 2000）。しかし，BEIR-VII報告書は脳腫瘍の発生率または死亡率に関する生涯寄与リスクを明示的に記載していない（NRC, 2006）。明らかなのは，脳が，透視ガイド下のインターベンション手術実施中の術者とスタッフにとって最も無防備な臓器の1つであるということである。

(55) 透視実施者の脳の放射線量はこれまで十分に研究されていなかった。Wenzlは，心臓専門医はインターベンション手技で透視法を用いる専門家の中で最も多量の放射線量を受けている可能性がある」と指摘している（Wenzl, 2005）。Renaudは心臓専門医の頭部の年間等価線量は約20-30 mSvだと決定した（Renaud, 1992）。Renaudの研究は，心臓インターベンション手技は今ほど複雑でないが，透視装置の防護機能が今より少ない1984年から1988年のデータを使ってなされた。この2つの傾向が様々な影響を及ぼしながら，それぞれ反対に作用している。Kimらは，診断的心臓カテーテル検査と電気生理手技に関しては，心臓専門医の1回の手技ごとの線量は徐々に減少しているが，PCIに関しては増加していることを認めている（Kimら，2008）。仕事量の変化も個人の年間等価線量に影響する。世界中で実施されている手技の総数は最近増加している（1.1.1）。

(56) Finkelsteinは，1年間でトロントの心臓専門医2名が脳腫瘍を発症したことは，それらの腫瘍が放射線によって誘発されたことを示していると指摘した（Finkelstein, 1998）。透視実施者の放射線誘発脳腫瘍に関する疫学的証拠は示唆に富むが，決して決定的ではない。1975年，Matanoskiらは米国の放射線技師における脳腫瘍による死亡率は，放射線を使用しない他の医療専門家の同死亡率のはほぼ3倍であることを発見した（Matanoskiら，1975）。スウェーデンで233人の脳腫瘍患者に対して実施した症例対照研究で，Hardellらは透視法を実施する医師の仕事は，脳腫瘍発症率のリスクをオッズ比で6.0（95%信頼区間0.62-57.7）上昇させた」と報告したが，233人の症例中それに該当する個人はわずか3人だった（Hardellら，2001）。他の医療従事者に関してはリスクの上昇は発見されていない。サンフランシスコ地区で1991年から1994年にグリオーマと診断された476人の個人に関する症例対照研究で，Carozzaらは医師および外科医においてリスクが高いことを観察した（オッズ比3.5, 95%信頼区間0.7-17.6）（Carozzaら，2000）。ただしこのグループには医師は6人しかいなかった。著者らはリスクの上昇は，放射線だけでなく多数の生物学的薬剤や化学薬品への職業被ばくによる可能性がある」と指摘している。

(57) 一方，Blettnerらはドイツで844人の脳腫瘍患者と1737人の対照被験者に対して，

自己報告医療データおよび職業データを使って症例対照研究を実施した (Blettner ら, 2007)。放射線に職業被ばくした 91 人の参加者の 2/3 以上が医療分野に従事していた (医師, 看護師, 放射線技師)。Blettner らは医療用電離放射線の被ばくによる脳腫瘍発症における重大なリスクは見つけられなかった。Karipidis らはオーストラリアで 416 人のグリオーマ患者と 422 人の対照被験者に対する症例対照研究を実施したが, グリオーマと電離放射線との関係を示す証拠は発見できなかった (Karipidis ら, 2007)。



### 3. 透視ガイド下循環器手技による組織反応の臨床例

- 心臓病学における皮膚放射線量レベルに対する懸念が高まっている。
- 本章で紹介する事例は臨床状況を提示し、放射線傷害による皮膚の変化を例証している。
- 組織反応はより深い組織へと拡大し、何年も続く症状の原因となり得る。
- 組織反応は確率的影響のリスクの増加を伴う可能性がある。

#### 3.1 序 論

(58) 心臓病学における皮膚放射線量レベルに対する懸念が高まっている。これは、放射線防護について十分な研修を受けていない術者が最適ではない装置を使って実施した手技を長期にわたって受けていた患者に、組織反応が発見されたことによる (UNSCEAR, 2010)。しかし、経験豊富で十分な研修を受けた術者が最新の十分保守された装置を使って手技を実施したとしても、肥満患者や複雑なインターベンション手技を受ける患者に高い皮膚線量が発生する可能性がある (Bryk ら, 2006; Suzuki ら, 2008)。

(59) 皮膚の放射線生物学に関する 2.3 節に記載した情報は、臨床状況なしには解釈することが難しい。本章で紹介する事例はその臨床状況を提示し、第 2 章で考察した皮膚の変化を例証するものである。これらの傷害は重大で、患者の活力を弱めると見るべきである。一部の患者は生涯にわたり治療と観察を受けなければならない。治療には専門治療施設での集学的なチーム医療が必要となる場合が多い。さらに痛みの管理と心理的サポートが治療の重要な要素となる。

(60) 患者の放射線量を最適化し皮膚線量を最小化する方法は第 5 章で説明し、表 5.1 に列挙するが、その重要性から以下にも重複して挙げておく。

- 透視時間とシネフレームの枚数は手技がうまく成功するための必要最小限にとどめる。
- 手技実施中は患者の放射線量をモニターする。
- パルス式透視法による透視装置を使用する。
- 十分な透視誘導ができる最小の透視パルスレートと最小の透視線量率を使用する。
- 手技の各段階について必要最小限の透視線量およびシネ線量を使用する。
- 可能な場合は、入射ビームを定期的に別の入射皮膚サイトに当てるため、ガントリーをわずかに回転させる。

- 受像器（イメージインテンシファイアまたはフラットパネル検出器）をできるだけ患者に近い位置に維持し、X線管を入射皮膚サイトからできるだけ遠い位置に維持する。

### 3.2 事例1 (Vliestra ら, 2004)

(61) 体重 141 kg (310 lbs) の 53 歳の男性は、3 年前 2 度にわたり PCI を受け、その後不安定狭心症と診断された。冠動脈造影を繰り返し撮影した直後に左冠動脈回旋枝の末梢部分に PCI を受けた。手技には、左前斜位投影法、2 方向 X 線撮影、高線量透視モードが含まれ、透視時間は合計 51.4 分だった。推定皮膚線量は 22 Gy である。

(62) 6 週後、患者の背下部に四角形の痛みと痒みを伴う発疹が現れた (図 3.1)。やがてこの部分は痛みを伴う潰瘍に発展した。PCI から 6 か月後、創面切除と皮膚移植が必要になった。現在も局所の不快症状は続いている。

### 3.3 事例2 (Koenig ら, 2001 a)

(63) 75 歳の女性はこれまで 2 度冠動脈造影を行い、右冠動脈の 90% 狭窄のため PCI を受けた。手技実施から 10 か月後、彼女は皮膚損傷を発症した (図 3.2)。皮膚線量の推定値は得られていない。



図 3.1

事例 1。詳細については本文参照。出典：Vliestra ら (2004)





図 3.2

事例 2。胸部の右側面に皮膚の萎縮と毛細血管拡張症とともに、皮膚の色素過剰と低色素沈着の両方が出現している。出典：Koenig ら (2001 a)

### 3.4 事例 3 (Wagner と Archer, 1997)

(64) 49歳の女性は、8年間上室頻拍に罹患しており、高周波カテーテルアブレーション手術を受けた。電気生理手技の実施されている間中、彼女の右腕はポート付近のX線ビーム内にあった。セパレータ（スパーサ）は管の収納庫（箱）から取り出されていた。透視時間は約20分である。皮膚線量のデータは得られていない。彼女は、3週間後に右ひじに皮膚損傷を発症した（図3.3）。患者の腕がX線ビームの外側にあれば、傷害を防止できていたか、あるいは重篤度を軽減できていたかもしれない。

### 3.5 事例 4 (Vliestra ら, 2004)

(65) 体重114 kg (250 lbs) の38歳の男性はWPW (Wolff- Parkinson-White) 症候群と診断された。2方向透視法による高周波アブレーションを試みたが失敗した。手技実施から数週間後、患者の背中に茶褐色の変色領域が出現したが消散した。2.5カ月後に2度目の電気生理アブレーション手技を実施したが、これも成功しなかった。それから1週間後に皮膚の変色が再び現れた。医師はこの皮膚損傷の原因は放射線ではなく、高周波アブレーションで使用した研磨パッドのためと考えた。3回目のアブレーション手技が実施され、不成功に終わった。その8日後に皮膚傷害が現れた（図3.4）。3回の手技の透視時間はそれぞれ100分以上だった。皮膚線量の推定値は得られていない。右腕の重篤な傷害は（透視中の）その位置による。腕がX線入射ビームから離れた位置にあれば腕の傷害は回避できたかもしれない。

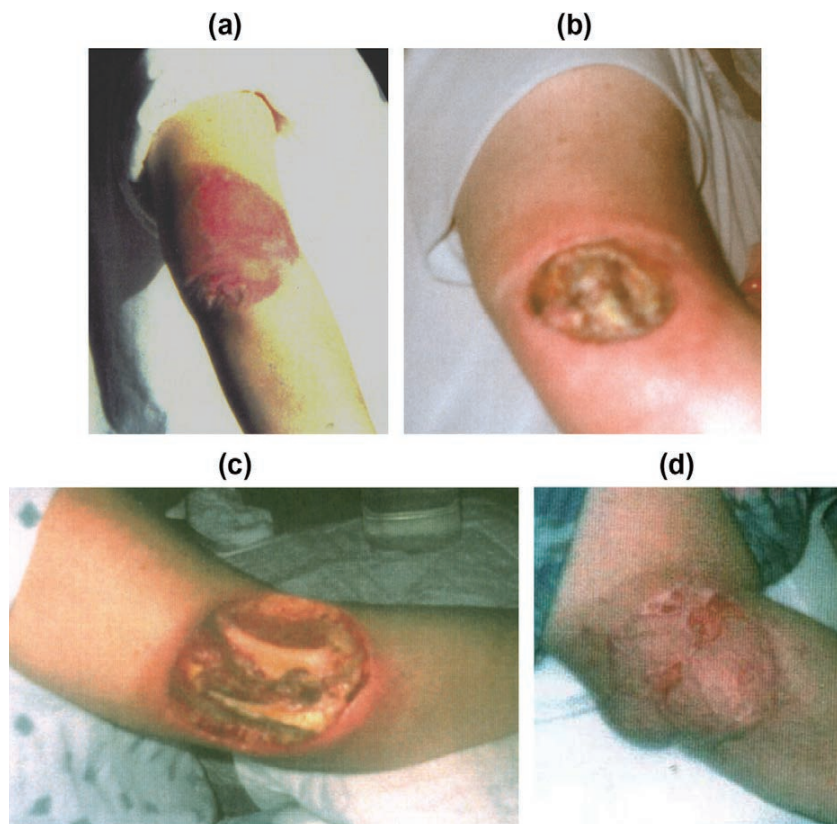


図 3.3

事例 3。詳細については本文参照。(a) 3 週間後：境界がきわめて明瞭な紅斑。(b) 5 か月後：組織の壊死。(c) 6.5 か月後：骨が露出した深い潰瘍。(d) フラップ手術後。  
出典：Wagner と Archer (1997)。



図 3.4

事例 4。右側の皮膚損傷は落屑を示している。背中の紅斑は変色した傷跡へと治癒した。X 線ビームに近かった右腕の皮膚損傷は壊死に至り、皮膚移植が必要となった。  
出典：Vliestra ら, (2004)。

### 3.6 事例5 (Vano ら, 1998 a)

(66) 17歳の女性は、後壁側に副伝導路を持つ早期興奮症候群のため、5時間に及ぶ電気生理アブレーション治療を受けた。その11か月後、再び5時間に及ぶ2度目の手技を受けた。いずれも2方向透視によった。外側面の透視時間は90-120分と推定される。皮膚線量の推定値は得られていない。2度目の手技実施から12時間後、右腋窩に紅斑が出現した。1か月後、右脇腹の赤い斑状の水疱を生じ皮膚科の診察を受けた。2度目の手技から26か月後、大きさが10×5 cm<sup>2</sup>で、先端部が線状の硬結を伴う萎縮したプラークが観察された(図3.5)。これは慢性放射線皮膚炎と診断された。彼女の右腕の筋肉も損傷し、可動範囲の低下が残った。患者の年齢と照射領域を考慮すると、今後彼女が乳がんを発症する確率も高くなった。

### 3.7 事例6 (アルゼンチン、ブエノスアイレスのPortas 博士提供)

(67) ヘビースモーカーの57歳の肥満女性がPCIを受けた。手技の実施時間は約6時間だった。放射線量に関するデータは入手できていない。最初の兆候は腰部の皮膚にできた水疱だった。皮膚科医はこれを帯状疱疹と診断した。2か月後同じ場所に深い潰瘍(放射線療法腫瘍学グループ/欧州癌研究治療機関、皮膚放射能毒性グレード4)が出現した。(この段階の傷害の写真は得られていない。)この潰瘍は非常に激しい痛みを伴った。翌年、患者は傷を塞ぐため2枚の回転フラップを用いた形成外科手術を受けた。回転フラップはその後壊死し、約



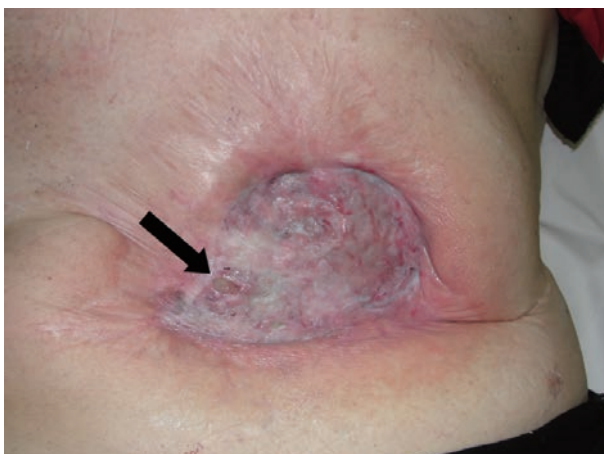
図 3.5

事例5。皮膚の色素過剰と低色素沈着領域を伴う線状の縁を持つ硬結性の萎縮したプラーク。  
出典：Vano ら, (1998 a)



**図 3.6**

事例 6。最初の手術と回転フラップの壊死後の患者の背中の様子。潰瘍の大きさは約 20×20 cm である（アルゼンチン、ブエノスアイレスの Portas 博士提供）。



**図 3.7**

事例 6。経皮的冠動脈インターベンション手技実施から 5 年後の患者の背中の様子。抗炎症性および抗菌性治療や高圧酸素療法とともに、豚の皮膚、皮膚同種移植および自家移植による治療を実施してから 3 年後、潰瘍の大きさは 3×1.5 cm（矢印）まで縮小した。それによって患者の生活の質は大幅に向上した（アルゼンチン、ブエノスアイレスの Portas 博士提供）。

20×20 cm の潰瘍を残した (図 3.6)。その後数年間, 熱傷治療施設で保存療法が実施された。抗炎症性および抗菌性治療や高圧酸素療法とともに, 豚の皮膚, 皮膚同種移植および自家移植で創傷の被覆を行った。この治療により傷は閉じ始めた。治療から3年後 (PCI から5年後), 潰瘍の寸法は3×1.5 cm まで縮小した (図 3.7)。放射線感受性インビトロ検査の結果, 患者の放射線感受性は正常だった。傷害の発生と回復の長期化は放射線被ばく, 肥満および多量の喫煙が原因である。



## 4. 放射線防護原則の医療への適用

- 医療における正当化とは、医学的な処置は、当該患者に適切である場合にのみ実施されるべきであるということである。予期する臨床的便益は、放射線リスクを含むすべての予期される手技のリスクを上回るべきである。
- 正当化は、依頼医と心臓撮影術者あるいはインターベンション術者が共有する責任である。
- 医療における防護の最適化とは、患者の放射線量が医療目的にとって適切であり、臨床的に不必要ないし新たな情報の得られない放射線照射は避けることを意味する。
- 他のすべての医療被ばく同様、心臓核医学検査、心臓 CT、心臓インターベンションおよび電気生理手技における防護は最適化すべきである。また可能な限り、線量を低減する技術を使用すべきである。
- 患者の放射線防護は、十分な画質と診断情報を提供するために、また透視法の場合はイメージングを適切に誘導するために、必要な最低限の放射線でイメージングが実施されることで最適化される。
- 線量限度は心臓専門医とスタッフの職業被ばくに適用される。
- 線量限度は患者、介護者または介助者の医療被ばくには適用されない。

### 4.1 序 論

(68) 委員会は、正当化、防護の最適化、および線量限度の適用の放射線防護の基本三原則を勧告する (ICRP, 2007 b)。最初の2つは線源に関係し、あらゆる放射線被ばく状況に適用される。第3の原則はスタッフに適用されるが、患者、介護者または介助者の医療被ばくには適用されない。

### 4.2 正 当 化

(69) 正当化の原則とは、一般的に、「放射線被ばくの状態を変化させるいかなる決定も、害より便益を大きくすべきである。この原則は、新たな放射線源を導入することにより、現存被ばくを減じる、あるいは潜在被ばくのリスクを減じることによって、それがもたらす損害を相殺するのに十分な個人的あるいは社会的便益を達成すべきである、ということの意味してい

る。」(ICRP, 2007 b,c)。医療被ばくの主たる目的は、放射線に関わるスタッフおよび他の個人の被ばくによる放射線の害を二次的な要因として考慮しながら、患者に害を与える以上に利益を与えることである (ICRP, 2007 b)。

(70) 医療行為はその患者にとって適切な場合にのみ実施すべきである。広く認識されている「適切性」の定義は、期待しうる健康上の利益（すなわち、寿命の延長、痛みの軽減、不安の低減、機能の改善）が予測される悪影響（すなわち、死亡、罹患、手技に対する不安、手技に起因する痛み、誤った方向へと導く診断または誤診、休業）を大きく上回り、手技に意義があることである (NHS, 1993 ; Siström, 2008)。言い換えれば、予測される臨床的利益が、放射線リスクを含む予測されるすべての、手技によるリスクを上回るべきであることを意味する。

(71) 米国では多くの臨床的シナリオに対して妥当性基準が策定されている (Brindis ら, 2005 ; Douglas ら, 2008 ; Patel ら, 2009 ; Hendel ら, 2009 a ; ACR, 2010 ; Taylor ら, 2010)。英国でも米国より利用度は低いけれども、同様のガイドラインが策定されている (RCR, 2007)。欧州のガイドラインも利用されている (Hesse ら, 2005 ; Schroeder ら, 2008)。これらの勧告は通常、標準化された文献レビューおよびエビデンスの収集とそれに続く様々な委員で構成される専門家委員会による各指標の評価に基づいている (Pater ら, 2005)。妥当性は国や地域の規範や慣行により、また患者および家族の価値観や選好によって異なる可能性がある (Wolk ら, 2004)。

(72) 特定の手技の使用を正当化する責任は、関係する医療実施者達が持つ (ICRP, 2007 b)。またこの責任は依頼医と心臓撮影術者あるいはインターベンション術者が共有する。依頼医においては、正当化の責任には放射線被ばくを含むそのリスクに対して検査がもたらす利益を検討することや、検査を実施しないという選択を含めたすべての代替案に対する検討が含まれる。心臓撮影術者やインターベンション術者においては、その手技の正当化には入手可能な情報に基づき、検査を行うことの合理的な理由があることの保証、およびその点に関して懸念があれば、その理由について依頼医と検討を行うことが含まれる。

### 4.3 防護の最適化

(73) 防護の最適化原則は「被ばくの発生可能性、被ばく者数および個人被ばく線量の規模を、経済的および社会的要因を考慮しつつ、合理的に達成可能な限り低く維持することと定義される。これは便益が有害性を上回る程度を最大化しながら、現状で防護レベルが最善の状態にあるべきことを意味する」(NCRP, 1993 ; ICRP, 2007 b,c)。これは「合理的に達成可能な限り低く」を意味する「ALARA」<sup>3)</sup>という頭字語で要約される場合が多い。

(74) 心臓の手技に関しては、この原則は電離放射線を使用する循環器診療施設の設計；



装置の適切な選定，設定および使用；および日々の作業手技に適用される。防護の最適化は，医療目的にかなった患者への放射線量と，臨床的に不必要，あるいは新たな情報の得られない被ばくの回避につながるプロセスだと言することができる。

(75) 防護の最適化は，臨床的関心の対象である臓器および組織へ，適切なイメージングに必要な量を超えない放射線量を照射し，他の組織構造（例えば，皮膚）への線量を最小化することを意味する。患者の放射線防護は，十分な画質を提供するために，また透視法の場合はイメージングを適切に誘導するために，必要な最低限の放射線でイメージングが実施されることで最適化される（NCI, 2005）。すべてのイメージング手技の目的は臨床目的に十分な画像を提供することである。イメージングの必要条件は特定の患者や特定の手技ごとに異なる。画像の質が不適切になるまで患者の放射線量を低減するのは逆効果である。すなわちこれは，臨床上の疑問に答えることなく患者に放射線量を照射することになる。一方，临床上必要とされる質以上に画質を向上させることは，臨床的利益が増えないまま患者への放射線量を増加させることになる。放射線管理の目的は，適切な装置を使い，特定の患者および特定の手技に関するイメージングの必要事項を満たしながら，患者の放射線量を可能な限り低く維持することである。

#### 4.4 線量限度

(76) 線量限度の適用原則には，「計画被ばく状況において規制されている線源からのいかなる個人への総線量も，患者の医療被ばく以外では，委員会が勧告している適切な限度を超えるべきではない」（ICRP, 2007 b,c）と述べられている。この原則は患者の医療被ばくには適用されない。*Publication 105*に記載されているとおり，「患者の医療被ばくが適切に正当化され，関係する被ばく線量が医療目的にふさわしいものであるとすれば，患者の医療被ばくへの線量限度や線量拘束値の適用は適切ではない。このような線量限度や線量拘束値はしばしば益よりも害を与えることがあるためである」（ICRP, 2007 c）。インターベンション手技に関しては，治療を受ける健康状態や手技での放射線以外のリスクの方が，放射線リスクよりも罹患率および死亡率に対して通常は非常に大きい（Miller, 2008 ; NCRP, 2010）。

3) 「ALARA」という頭字語は「防護の最適化」という用語と同等か，あるいはその代用としてしばしば使用される。しかし，「合理的に達成可能な限り低く」という表現は最適化原則の一部に過ぎない。全体的な概念は患者の被ばくを所定の医療目的（診断または治療）の達成に必要な最小限にとどめることを意味する。診断目的のイメージングやX線透視ガイド下でのインターベンションでは，画像の数や質が診断またはインターベンションに必要な情報を得るために妥当であることを意味する。放射線治療では標的への線量が合理的に達成可能な限り低い必要はなく，むしろ逆であり，ALARAは正常な組織のみに適用される。「ALARA」という略語のそれだけでの使用や上記の意味以外での使用は誤解や不要な論議の原因となる可能性がある。



## 5. 透視ガイド下インターベンション手技における患者の線量管理

- 心臓インターベンション手技や電気生理手技を実施する術者達は患者およびスタッフの放射線量低減法に精通しているべきである。
- 放射線傷害リスクが大きいと考えられる場合は、インフォームドコンセントにおいて放射線リスクに関する情報を含めるべきである。
- 放射線リスクを推定する際に考慮すべき患者の重要な病歴は、遺伝的要素、合併疾患、服薬内容、放射線履歴および妊娠である。
- 患者の放射線量に影響する要因の一部は X 線装置に依存するが、要因の多くは術者の X 線装置使用法に依存する。
- 手技の実施中、術者は、透視時間、シネ撮影回数およびシネフレーム数、さらに患者の総線量を常に認識していなければならない。
- 患者の放射線量が増加するに従い、術者は患者が既に受けた放射線量と、手技を完了するためにさらに必要な放射線量を考慮すべきである。
- 手技終了時には患者の放射線量を報告書に記録し、照射録として保管すべきである。
- インターベンション手技による患者の放射線量が医療機関のトリガー（注意喚起）レベルを超えた場合、皮膚傷害の早期発見とその管理のため、臨床的経過観察を実施しなければならない。
- トリガー（注意喚起）レベルの推奨値は、皮膚線量が 3 Gy、カーマ面積の積が 500 Gy $\text{cm}^2$ 、また患者の入射基準点における空気カーマが 5 Gy である。

### 5.1 序 論

(77) 透視ガイド下インターベンションは、経皮的またはその他の方法で、通常、局所麻酔下、および／または鎮静剤を使用した状態で、透視イメージングを使用しながら病変／治療部位を特定しながら行う治療的あるいは診断的手技である (ICRP, 2000 b)。本章では透視ガイド下インターベンション手技の実施前、実施中、実施後の臨床的放射線管理について述べる。

(78) 患者は透視ガイド下インターベンションで高線量を受ける可能性があり、一部の患者は比較的短期間に複数の手技を受ける場合がある。したがって、心臓専門医は放射線撮影技師や他のスタッフと協力して患者の放射線防護を最適化することが不可欠である (Chambers

ら、2011)。特定の線量しきい値を超えた場合は（第2章参照）、手技に起因する組織反応を発生させる可能性がある。透視ガイド下インターベンションに起因する典型的な組織反応は皮膚傷害である。放射線量が高いと確率的影響（がんおよび遺伝性影響）のリスクも増加する。

(79) 医療実施者は、循環器系疾患のしきい吸収線量が、不確実性があるとしても、心臓と脳について0.5 Gyと低い可能性を認識することが重要である（ICRP, 2011）。一部の複雑な透視ガイド下インターベンション手技では、臓器線量が0.5 Gyを超える可能性がある。この線量になると、局所的な心筋変性や線維化、さらに主要な血管のアテローム性動脈硬化の促進など心臓血管への影響が報告されている（ICRP, 2012）。心臓血管疾患のリスクの増加は、低めの線量（1-2 Gy）の被ばく後10-20年を経て初めて明らかになる（ICRP, 2011）。

(80) PCIを受ける患者の平均年齢は比較的高い。ほとんどのがんは発症までの潜伏期間が長く（10年以上）、高齢の患者は余命が短いため、確率的影響のリスクはそれほど大きな問題ではない。一方、電気生理手技を受ける患者は若い傾向がある。透視ガイド下インターベンション手技が10代後半の若者や子供に実施される場合、確率的影響のリスクはより大きな関心事となる。子供は成人よりも平均余命が長い上に、放射線影響に対する感受性が成人の2倍から3倍高い。

(81) 線量管理と放射線防護に関する初期研修と継続研修は、患者の線量に決定的な影響を及ぼす。これらの研修は特にIVR術者にとって必須事項である（Hirshfeldら、2005；Rehani, 2007；ICRP, 2009）。いくつかの最近の論文ではこの種の研修が患者の線量の最適化と術者の線量低減に役立つことを実証している（WhitbyとMartin, 2005；Vañoら、2006 a；Bernardiら、2008；Borら、2008；IAEA, 2010；Kimら、2010）。研修については第9章で詳しく考察する。

## 5.2 手技の実施前

(82) 放射線リスク要因があるか、または大量の放射線量が予測される場合、放射線リスクに関するインフォームドコンセントを行うことが適切である。ICRPは、放射線傷害のリスクが大きいと考えられる場合は、手技の実施前に患者に伝えるよう勧告する（ICRP, 2000 b）。放射線リスクを推定する際に考慮すべき患者の重要な病歴は、遺伝的要素、合併疾患、投薬内容、放射線履歴および妊娠である（Millerら、2010 a）。

(83) 肥満の患者は放射線が透過しにくく、X線源が患者により近くなるので、放射線誘発皮膚傷害の発症リスクが高くなる（Brykら、2006）。肥満患者の入射皮膚部位における吸収線量は、非肥満患者の10倍にも達する可能性がある（Wagnerら、2000）。透視手技に関連して記録されている多くの傷害は、大柄な患者において観察されている（Koenigら、2001 b）。透視台の高さを上げ、アイソセンターから逸れて撮影することで、皮膚線量を下げることがで

きる。肥満患者にはこれ以外にも手技の変更が必要な場合が多い (Bryk ら, 2006)。

(84) 医学物理士はインターベンション手技の最適化に役立つ有益な助言を提供することができる。手技の実施中、放射線撮影技師は有効な最適化戦略を提供することができる。防護の最適化に対する注意は、特に患者が肥満で、とりわけ手技が複雑な場合、あるいは手技が繰り返し実施される場合に重要である。過去の手技で皮膚線量が非常に高かった場合、可能ならば皮膚線量を低減するため同一患者に対するその後の実施手技の戦略を修正すべきである。手技を繰り返して実施する場合は、臨床的状況が許せば、手技と手技の間隔をあけることが望ましい。皮膚照射後、DNAの回復プロセスは基本的に被ばく後1日以内に完了する。一方、細胞再生は放射線量によっては最長数か月かかる場合がある (Balter ら, 2010)。

(85) 一刻を争う緊急の手技の実施以外では、透視ガイド下インターベンションを実施する前に妊娠状況を判定すべきである (ICRP, 2007 c; ACR, 2008)。妊娠中の患者に関しては、緊急でなければ、患者が妊娠状況でなくなるまで手技の実施を延期すべきである。医学的に透視ガイド下インターベンションを妊娠している患者に実施しなければならない場合、緊急を要する手技の実施を除き、委員会は、胎児への線量を最低限にとどめるための実現可能な改良、胎児への予測線量の推定、胎児の放射線リスク評価、および手技が患者と胎児の両者に与える利益と潜在的リスクのインフォームドコンセントを、手技計画に含めるよう勧告する (ICRP, 2000 a)。可能であれば、また時間に余裕があれば、前手技計画プロセスには認定された医学物理士が参加すべきである (Dauer ら, 2012)。

(86) 委員会は、一般的に、100 mGy 以下の胎児線量では、放射線リスクから判断して妊娠中絶は正当化されない、と述べてきた (ICRP, 2000 a)。参考として、冠動脈 CT による一般的な胎児線量は約 0.1 mGy で、腹部 CT の一般的な胎児線量は約 4 mGy である (McCullough ら, 2007)。

### 5.3 手技の実施中

(87) 患者の放射線防護を最適化する際のもっとも優先事項は、診断を可能にし、インターベンションを行うのに十分な品質の画像を必要な枚数撮影することである。これには透視時間と、シネシリーズの回数および長さを最低限にする必要がある。患者の線量の最適な管理には、最も広く利用されている運転モードにおける一般的な透視線量率とシネフレーム当たりの線量値に関する知識と管理が必要である。

(88) 中肉中背の患者における心臓インターベンション手技実施中の皮膚線量率 (皮膚表面の入射空中カーマ比率) の一般的な値は、「中程度」の透視モードで 15-45 mGy/min、「高」の透視モードで 50-150 mGy/min である。シネフレーム当たりの皮膚線量は通常 0.1 から 1.0 mGy の間である。ビーム強度は透視モードよりシネモードの方が 10 倍から 20 倍高い

(NCRP, 2010)。心臓インターベンション手技および電気生理手技における皮膚線量は、特に、複雑な手技、Cアーム角度が鋭角の場合、同様のCアーム角度で複数の投射が必要な場合、数Gyに達する可能性がある (Miller, 2008)。このような状況では重篤な皮膚傷害を発症する可能性がある (第3章)。臓器線量は10 Gy以上に達し、実効線量は50 mSv以上に達する場合もある (UNSCEAR, 1993; Sternら, 1995; Bogaertら, 2008)。医療センター間で患者線量は著しく異なっており、この差異の一部は、X線装置の設定が原因で生じる可能性が高い。IAEAが実施した各国のX線装置の比較調査によれば、同じ厚さのファントムを撮影した際の線量値に10倍もの差があった (Ortizら, 2004)。

(89) いくつかの操作上の要因が、患者が受ける放射線量を著しく変化させ、カーマー面積の積 ( $P_{KA}$  または KAP) と患者の皮膚線量に影響する可能性がある (ICRP, 2000 b)。これらの要因については画像診断部門以外での放射線防護を主題としたICRPの刊行物で考察、例証している (ICRP, 2010)。これらの要因の一部はX線装置に依存する (例えば、パルス式透視装置の利用可能性、仮想コリメーション、保存透視ループ、フィルターの追加、ウェッジフィルター、回転式およびコーン式ビームによるCT撮像モード等)。しかし、他の要因は、術者のX線装置使用法 (例えば、関心領域へのコリメーション、可能な限りの低透視モードの使用、可能な限りの12.5-15 フレーム/sでのシネシリーズの取得、画像検出器をできるだけ患者に近い位置に維持する、鋭角での投射を避ける、シネシリーズ当たりのフレーム数を少なくする) に依存する (NCRP, 2010)。放射線に関する文献に記載される防護の最適化に関する勧告は、心臓インターベンション手技に等しく該当する (Wagnerら, 2000; Millerら, 2002, 2010 a; Wagner, 2007)。表5.1に患者の線量の低減に役立つ実践的な勧告を記載する。

(90) 手技の実施中、心臓専門医は利用可能な線量測定値-基準空気カーマ (RAK)、KAP、透視時間、シネモード撮影でのシネフレームの数をモニターすべきである。(RAKとKAPは「用語解説」で定義されている。) 組織反応のしきい線量に近付いているか、またはそれを超えているか、リアルタイムでモニターすることが重要である (ICRP, 2007 c; NCRP, 2010)。インターベンション透視装置の国際基準に適合していれば、最新の透視装置は手技実施中の術者に放射線データを表示する (IEC, 2010)。国または地域の規則、あるいは医療機関の方針や必要性に基づいて、放射線量のモニタリングは、技師、看護師または他の人物に委託してもよい (NCRP, 2010)。この業務は特定の個人の責任で行う。線量モニタリングの目的は、どの程度の放射線を照射しているか術者に把握させることである。

(91) 術者は、患者の放射線量の増加に合わせ、当該患者に既に照射された放射線量と、手技を完了させるまでに必要な追加線量を検討すべきである。シネシリーズの数と長さを制限し、シネまたは透視の線量率を低減するとともに、照射範囲を絞リガントリー角度を少し変えることで、それ以上の放射線の使用を低減させ、皮膚線量を制御することが可能かもしれない。

表 5.1 患者の線量低減のための実践的助言

- 
- 可能であれば、低線量率の透視モードを使用する。
  - 可能であれば、低パルス率の透視モードを使用する。
  - 小さい子供に手技を実施する際はグリッドを取り外す。
  - 所定の画質に適合する画像（シネ）を取得できる最低の線量モードを使用する。
  - 透視時間をできる限り短くする——デバイスの誘導と動きの観察だけに透視を使用する。
  - 透視を続ける代わりに、可能ならば、最終ホールド画像をフリーズして使用する。
  - 可能であれば、シネ撮影をする代わりに、できるかぎり保存した透視ループを保存する。
  - 利用可能なら、透視をする代わりに、できるかぎり保存した透視ループを使う。
  - シネシリーズ数を最小化する。
  - シネシリーズごとのフレーム数を最小化する。
  - 決して透視法の代わりにシネを使用してはならない。
  - 放射線ビームを関心領域に絞る。
  - 利用可能であれば、仮想絞りを使用する。
  - 適切な場合はウェッジフィルターを使用する。
  - 画像検出器（イメージインテンシファイアまたはフラットパネル検出器）を患者のできるだけ近くに置く。
  - 患者を X 線管からできるだけ離す。
  - 鋭角での投射を避ける（特に LAO cranial 左前斜位）。
  - 患者の皮膚の一か所に放射線量が集中するのを避けるため、C アームの角度を少しずつ変える。
  - 必要時のみ拡大化する。
  - 大柄な患者や鋭角の投射では、患者への線量が大幅に増加することを忘れない。
  - 手術室内の患者の放射線量表示に注意する。
  - 患者が過去に同様の手技を受けたことがある場合は、その後の手技を最適化するため、過去の放射線量に関する情報を入手する。
- 

(92) 患者の皮膚線量分布の把握は、皮膚傷害のリスク回避に役立つ可能性があるが、透視ガイド下インターベンション手技における皮膚線量分布測定は容易ではない。この測定は、手技中に C アーム角度が大きく変わり、皮膚の照射領域も非常に多岐にわたる心臓の撮影で特に難しい。多様な C アーム角度を用い、特にコリメーションも併用すれば、ピーク皮膚線量の低減に役立つ可能性がある (Miller ら, 2002)。しかしこれにより最大の効果を得るためには手技の開始時から計画しなければならない (Pasciak と Jones, 2011)。図 5.1 はスローフィルムを使ってマッピングし、測定した皮膚線量分布の例を示す (Vaňo ーら, 1997 a)。同図は、照射野の重複がいかにか皮膚の特定の部分の線量を増加させるかを実証している。

## 5.4 手技の実施後

(93) インターベンション透視装置に関する国際基準に適合した最新の透視装置では、手技終了時に線量報告書が作成される (IEC, 2010)。一般的な線量報告書の例を図 5.2 に示す。

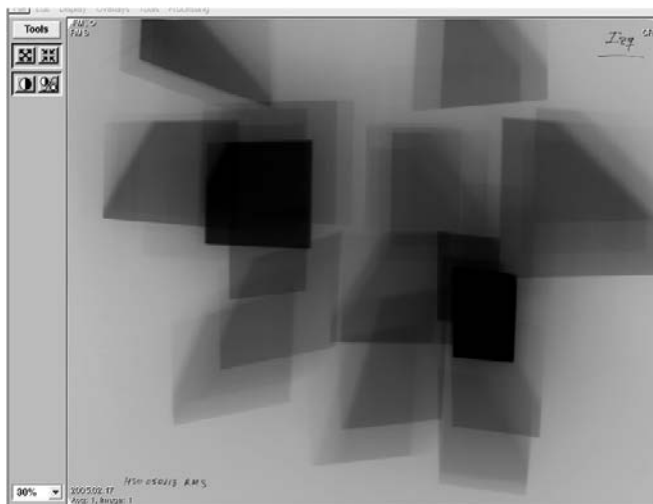


図 5.1

従来型 PCI（経皮的冠動脈インターベンション）における皮膚線量分布の例（マドリッドの San Carlos University Hospital におけるスローフィルムでの測定）。従来の PCI（経皮的冠動脈インターベンション）の実施中に測定された皮膚線量分布。この事例ではピーク皮膚線量は 0.4 Gy だった。

数社が皮膚線量分布に関する情報を含む透視ガイド下インターベンション手技用の線量報告書を提供している。手技終了時に患者の放射線量報告書を作成し、保存すべきである。手技の実施後、患者の医療記録に放射線量のデータを記録すべきである（Chambers ら，2011）。

(94) 心臓手技の報告書には放射線量を記載すべきである（Douglas ら，2012）。すべての入手可能な線量情報を記録すべきである（NCRP, 2010; Miller ら，2012）。心臓手技に関する患者の線量は KAP として記録されることが多い。特に、同じ患者に繰り返し手技を実施する場合、皮膚線量分布と特に RAK およびピーク皮膚線量（「用語解説」に定義されている）の方が重要になる場合がある（Miller ら，2002）。透視時間は、透視線量率の影響を含まない、またシネの放射線量を示していない。透視時間は患者の放射線量を表す有用な記録項目ではない（Fletcher ら，2002; Chida ら，2006）。透視時間以外の線量関連測定値も記録または監査すべきである（NCRP, 2010; Chambers ら，2011）。

(95) 高線量を受けた患者の管理と経過観察も重要である。放射線量のモニタリングを助手に任せる場合は、当該助手は手技終了時、実体放射線量レベル（SRDL）を超えたかどうか術者に知らせるべきである。SRDL は、平均的患者に臨床的に関連のある傷害を発生させる可能性のある放射線量に対し医学的経過観察を実施するトリガー（注意喚起）レベルである。（SRDL は「用語解説」に定義されており、10.6 節で詳しく考察する）。提案されている一部の SRDL の数値としては、皮膚線量が 3 Gy，KAP が 500 Gycm<sup>2</sup>，あるいはインターベンション



Patient Position: HFS		04-Apr-05 10:57:10								
1	CARD	FIXED	Coro LD	4s 15F/s	04-Apr-05 11:04:59					
A	80kV	806mA	7.0ms	200CL large	0.0Cu 20cm	219.5 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	37.9mGy	1RAO	36CRA	61F
2	CARD	FIXED	Coro LD	2s 15F/s	04-Apr-05 11:16:39					
A	75kV	799mA	7.0ms	400CL large	0.1Cu 20cm	56.8 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	7.7mGy	24LAO	5CAU	27F
3	CARD	FIXED	Coro LD	3s 15F/s	04-Apr-05 11:21:31					
A	76kV	799mA	7.0ms	600CL large	0.1Cu 20cm	97.3 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	14.1mGy	30LAO	1CAU	47F
4	CARD	FIXED	Coro LD	4s 15F/s	04-Apr-05 11:28:03					
A	76kV	799mA	7.0ms	***** large	0.1Cu 20cm	138.5 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	20.0mGy	30LAO	1CAU	67F
5	CARD	FIXED	Coro LD	5s 15F/s	04-Apr-05 11:28:36					
A	90kV	819mA	7.0ms	***** large	0.0Cu 20cm	359.2 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	57.2mGy	0LAO	31CRA	71F
***Accumulated exposure data***					04-Apr-05 11:34:29					
Phys:		Exposures:	0	Fluoro:	7.0min	Total:	1705.4 $\mu$ Gym <sup>2</sup>	246mGy		
=====										

図 5.2

Siemens 社の Axiom Artis X 線装置で作成した患者の線量報告書の例。項目 1 から 5 はシリーズの撮影順序である。それぞれ単独のシネシリーズを撮影した。CARD は撮影プロトコルの名称である。FIXED はシリーズ実施中フレームが一定速度だったことを意味する。Coro LD は撮影モードである。秒で表した時間はシリーズの継続時間である。シリーズのフレームレート、撮影時刻、kV、mA ピーク、パルス時間、焦点のサイズ、追加銅製フィルター、シリーズごとのカーマ面積の積 (KAP)、基準空中カーマ (RAK)、X 線ビームの角度、および (各シリーズの) フレーム数が報告される。報告書の最後には、総透視時間および総 KAP と RAK (透視線量とシネ撮影線量の両者を含む) も記載される。X 線装置の本来の印刷様式は維持される。

基準点における空気カーマが 5 Gy 等が挙げられる (NCRP, 2010)。心臓手技に関しては、照射野の大きさや特定のプロトコル次第で、125-250 Gy $\text{cm}^2$  の KAP がより適切かもしれない。これらの数値は 1 回の手技でピーク皮膚線量が >2 Gy だったことを示す可能性がある (Bogaert ら, 2009; Bor ら, 2009)。術者は患者の医療記録に、大量の放射線量が投与されたこととその理由を示す適切な記録を記入すべきである (Hirshfeld ら, 2005; NCRP, 2010)。この情報は手技終了後の記録に記載してもよい。

(96) SRDL を超えた場合は、皮膚傷害の早期発見と管理のため、臨床的経過観察が不可欠である (NCRP, 2010; Chambers ら, 2011)。患者に組織反応による皮膚傷害の発症可能性について知らせ、手技実施から 2~4 週後にビーム入射部位を観察するように伝える。術者に何らかの皮膚の変化があったかどうか知らせるべきである。術者に皮膚の変化について通知してこない患者には、手技実施からおおよそ 30 日後に術者が電話で連絡し、皮膚傷害について忘れていないかどうか確認すべきである。皮膚傷害が疑われる場合は、IVR 術者が患者を外来て診察し、適切な経過観察ケアを計画すべきである (NCRP, 2010; Chambers ら, 2011)。患者のケアに責任を持つ医師に放射線影響の可能性のあることを伝えるべきである。理想的には、反

復的な手技を特定し、モニターするシステムを確立すべきである (ICRP, 2000 b)。

## 5.5 小児患者

(97) 小児の心臓病学的な手技では特別な配慮が必要である。この種のインターベンションは困難かつ長時間を要し、高線量被ばくにつながる何段階もの手技を必要とする場合がある。この要因は心拍数の高さ、心臓血管構造の小ささ、体型の小ささに加え、子供には特異な解剖学的変異がより広範囲に存在するためである (Justino, 2006)。

(98) 小児の心臓インターベンション手技による患者の放射線量は、コリメータをきっちり絞る、パルス式透視フレームレートを 25-30 フレーム/s とする、シネフレームレートを 25-50 フレーム/s とする等、専用の X 線撮影プロトコルを使用することで低減可能である。小児イメージングにおける放射線安全連合 (Alliance for Radiation Safety in Pediatric Imaging) は Step Lightly キャンペーンの一環として、患者の線量低減に役立てるため小児のインターベンション透視法のチェックリストとガイダンスを出版している (Sidhu ら, 2009; Hermanz-Schulman ら, 2011)。

## 6. インターベンション透視手技実施中のスタッフの防護

- 一般的に、患者の線量の低減は術者の線量の低減につながる。
- 職業被ばく防護の基本的手段は、時間、距離および遮へいである。
- 心臓インターベンションおよび電気生理検査室では、個人の防護遮へいを実施すべきである。
- 術者は目の放射線防護が必要である。
- 職業被ばく線量は、天井から吊るした鉛遮へい体や検査台のそばに吊るした防護用鉛カーテンの適切な使用により非常に低いレベルまで低減することができる。
- 術者の放射線被ばくは均一的でも対称的でもない。
- 心臓インターベンションおよび電気生理検査室では、職業被ばく線量をモニターし監査するため、個人のモニタリングバッジの適切な使用が必要である。
- 心臓インターベンション手技や電気生理手技を行う者は、患者とスタッフの放射線量を低減するための方法に精通しているべきである。

### 6.1 序 論

(99) 職業被ばく線量に関する当委員会の勧告にもかかわらず、白内障、スタッフの手足への非常に高い放射線量、防護装置で遮へいしていなかった足の一部の脱毛等の報告が続いている (Balter, 2001 a)。術者の放射線誘発白内障の発症 (Vaño ら, 1998 b, 2010; ICRP, 2000 b; Ciraj-Bjelac ら, 2010) や心臓インターベンション専門医の脳腫瘍発症に関する議論 (Finkelstein, 1998; Klein ら, 2009) は、特に鉛エプロンで防護していない体の部分に関し、透視法を実施する心臓専門医の職業放射線被ばくの重大さを強調している。

(100) 術者は通常 X 線ビームに直接被ばくしないが、大量の散乱放射線に被ばくしている。第 5 章で述べたいくつかの技術や本章で考察する防護装置を適切に使用すれば、術者の年間実効線量は規制限度内に十分おさまるはずである。放射線防護装置、ツールおよび技術を適切に使用した場合、IVR 術者の実効線量は一般的に 2-4 mSv/y で、当委員会が勧告する 20 mSv/y を大きく下回る (Tsapaki ら, 2004; ICRP, 2007 b; Dendy, 2008; Miller ら, 2010 b)。職業被ばく線量をモニターし監査するために、心臓カテーテル検査室では個人のモニタリング用バッジを適切に使用することが不可欠である。しかし、個人のモニタリング用バッジは非常

に多くの場合装着されていないか、あるいは不適切に装着されている (Padovani ら, 2011)。第9章で考察する放射線管理と放射線防護の訓練が不可欠である (ICRP, 200 b, 2009)。

## 6.2 他のスタッフの放射線被ばくとの比較

(101) IVR 術者は、核医学や放射線治療科に勤務しているスタッフを含め、病院内のほとんどの他の医療スタッフや補助スタッフよりもはるかに多量の放射線を被ばくしている。この第1の理由は、IVR 術者の作業位置がX線源と散乱放射線源（患者）に非常に近い点である。第2の理由は、X線ビームの強度が核医学と放射線治療で観察される放射線強度の間にあるという点である。第3の理由は、インターベンション透視法では、術者とX線源の距離の多様性；術者、患者、X線源の相対的位置関係；および手技の長さゆえに、遮へいが放射線防護で重要な役割を果たすという点である。

(102) カテーテル検査室での術者と放射線技師の作業環境の相違——遮へいおよび患者に対する位置、カテーテル検査室での労働時間——を考えると、IVR 術者の被ばく係数は操作室で働くスタッフの1000倍である (Rehani と Ortiz-Lopez, 2006)。操作室にいるインターベンション検査室のスタッフはX線ビームから遮へいと距離の両方で保護されている。一般的に、適切に設計されているカテーテル検査室では、操作室内の放射線強度は術者の位置の放射線強度の数万分の1程度であろう (Rehani と Ortiz-Lopez, 2006)。

## 6.3 職業被ばく防護の基本事項

(103) 職業被ばく防護の手段は時間、距離および遮へいである。スタッフの放射線防護と患者の防護は多くの点で関連しているため、スタッフの防護を独立して扱うことはできない。患者の放射線防護と職業被ばく防護もイメージング部門外における放射線防護を主題にしたICRP刊行物で考察している (ICRP, 2010)。一般的に、患者の線量の低減が術者の線量の低減にもつながる。

(104) 時間、それは透視法とシネの両方においても放射線防護の基本的要素であるが、それはX線ビームの照射時間を短縮することで管理される。透視時間と透視線量率を低減すれば患者の線量が減少する。患者の線量の減少は散乱放射線を減少させ、その結果、術者の線量を減少させる。読者は第5章で考察したすべての要因を覚えておくように助言する。

(105) 距離は放射線防護の有効な手段である。放射線量は放射線源と術者の距離の2乗で減少する（逆2乗の法則）。線量は、個人がX線源から離れるに従い急速に減少する（散乱放射線に関しては、患者の照射部分からの距離がこれに当たる）。手技の実施中、通常、術者は患者から腕の長さ以上に離れることはできない。特に血管造影法で造影剤を手動で注入する場

合、これが術者の高線量につながる。しかし、血管造影法でインジェクタを使用すれば、術者は患者から離れて、理想的には遮へい体の後ろに、移動することができる。

(106) 一般的に、散乱放射線は患者の入射ビーム側が最も強力である (Balter, 2001 b; Schueler ら, 2006; Stratakis ら, 2006)。A アームを水平方向の投射に使用する場合、術者はできれば患者の受像機側に位置すべきである。C アームを前後方向からの投射に使用する場合は、X 線管を検査台の下に設置すれば床側が高放射線散乱域になり、術者の頭部と首への放射線を低減することができる。

(107) 遮へいには建築上の遮へい、装置に設置した遮へい、および個人の防護装置の3種類がある (Miller ら, 2010 b)。建築上の遮へいは施術室の壁面に組み込まれており、本論ではこれ以上考察しない。透明の鉛化プラスチック製で床に置ける回転式、固定式遮へいは、術者とスタッフ両者のために遮へいを追加する際に有効である。この種の装置は看護師や麻酔要員が使用するのに非常に適している場合が多い。IVR 術者は、治療台から吊るされた装置搭載式の遮へい；鉛エプロン、鉛製防護メガネおよび甲状腺遮へい等の個人防護具；および時には天井から吊るす遮へい等によって防護される。

(108) 検査台と患者から少し離れて立つ、照射野を絞る (コリメーション)、事例の複雑性に合わせて手技を迅速に行う等の単純な対策も職業放射線量の低減に非常に有効となり得る。表 6.1 はカテーテル検査室における職業被ばく防護を改善するための実践的な助言の一部

**表 6.1 スタッフの放射線防護を改善するための実践的助言**

(Vano, 2003 a; Miller ら, 2010 b; ORAMED [http://www.oramed-fp7.eu/] より)。

- 
- できる限り患者 (散乱放射線源) からの距離をあげる。言うまでもなく、これは血管造影における造影剤注入を手動で行っていない場合に限られる。散乱放射線レベルは患者の照射部分からの距離が増すほど非常に大きく減少する。
  - 低散乱領域にいるよう努力する。散乱放射線はガントリーの X 線管側で高く受像機側では低い。
  - 天井から吊るす遮へいスクリーン、検査台から吊るす遮へいスクリーン、および鉛エプロン、甲状腺カラー、側面も遮へいされた鉛メガネ等の他の防護遮へいをできる限り使用する。
  - 天井から吊るす遮へいはできるだけ患者に近い位置に設置すべきである。
  - 2 方向透視装置を使用する場合は、側面の遮へいの適切な使用が目の防護にとって非常に重要である。
  - それが適切であれば、手の線量を低減するためにカテーテル入射部位付近に線量低減用パッドまたはドレープを使用する。
  - 可能であれば透視の使用は最小限にとどめ、低線量透視モード (例えば、低線量率のパルス式透視法) を使用する。
  - シネシリーズの数と各シネシリーズのフレーム数をできるだけ少なくする。
  - 拡大機能をできるだけ使用しない。
  - X 線ビームのコリメーションをできるだけ絞る。
  - 手が一次放射線に直接被ばくするのを避ける。
  - 放射線管理と放射線防護の適切な研修を受ける。
  - 線量計を装着し、自分の線量を把握する。
  - さらに、究極的な一般概念：患者の放射線量を低減すれば、自分自身の線量の低減にもつながる。
-

**表 6.2 Philips 社の Integris 5000 X 線透視装置においていくつかの操作上の主要点を  
変えた場合のスタッフの線量の相対的増加 (Vaño ら, 2006 b)。**

とられた処置	スタッフの線量の増加
透視モードを低から高に変更 (体厚 20 cm の患者に対して)	2.6 倍
イメージレセプターのフォーマットを 23 cm から 17 cm に変更 (体厚 20 cm の患者に対して)	1.0 倍
患者の体厚を 16 から 28 cm に変更	4.2 倍
低透視モードからシネに変更 (体厚 20 cm の患者に対して)	8.3 倍

である。また、表 6.2 は一般的カテーテル検査室で測定した各技術の散乱線量率の相対的変化を示す。表 6.2 の数値は各技術と患者の体型の相違によって散乱線量に大きな違いがあることを明示している。

## 6.4 個人防護具

(109) 心臓カテーテル検査室では個人防護具の使用が不可欠である。過去には重量の増加に比例する減衰効果の増加が物理的測定で実証されていないにもかかわらず、鉛等量値の高い鉛エプロン (0.25, 0.3 または 0.35 mm ではなく 0.5 mm) を使用する傾向があった (表 6.3)。IVR 術者と規制者の両者において内在する保守的な安全要因が常に放射線防護慣行に影響を及ぼしてきた。

(110) 鉛は放射線防護に非常に有効だが重い。重量は、鉛エプロンを長時間着用するスタッフに問題を生じさせる可能性がある (Goldstein ら, 2004)。鉛エプロンを長年着用してきたスタッフの間に鉛エプロンによる腰椎障害が発生しているという報告がある (NCRP, 2010)。一部の新型のエプロンは減衰材として鉛の代わりに別の元素を使用し、ほぼ同等の鉛等量を維持しながら軽量化が図られている。新型エプロンは様々な方法で重量を分散させる設計となっている。エプロンの重量を分散させ着用者の背中を防護するツーピース (スカートとベスト) の巻きスカートが推奨される。

(111) 小柄な患者、特に子供に手技を実施する際は、スタッフの防護には鉛等量 0.25 mm の鉛エプロンで十分だが、仕事量の多い医師が大柄な患者に手技を実施する際は、鉛等量厚さがより大きい防護具の着用が適切かもしれない。鉛エプロンを使用する個人が適切に防護されていることを保証するため定期的な線量モニタリングを実施してもよい (NCRP, 2010)。

(112) 鉛エプロンは専用ハンガーに適切に掛け、決して畳んだり、しわを付けたり、丸めてはならない。鉛エプロンの上に座る、エプロンを畳む、または不適切に吊るすとエプロンに傷が付き、その効果が下がる。鉛エプロン、手袋および他の鉛製防護具は使用前に検査し、それらの設計意図に適した遮へい効果を提供できるかどうか見るため定期的に再検査すべきであ

表 6.3 厚さ 3 mm の Al でフィルターし、示された kVp で生成された X 線ビームに関する各種鉛エプロンの防護機能

kVp	防護エプロンの鉛等量 (mm)	透過したエネルギーの割合 (%)
90	0.25	8.3
90	0.35	4.9
90	0.50	2.4
80	0.25	5.7
80	0.35	3.0
80	0.50	1.3
70	0.25	3.3
70	0.35	1.5
70	0.50	0.5

る。防護衣の健全性を確認するため目視検査、物理的検査、透視検査を組み合わせ実施してもよい。不要な透視を最小化し、検査担当者の被ばくを最小化するよう配慮すべきである (NCRP, 2010)。

(113) 鉛エプロンは目、手、膝から足首、背中（巻きつけタイプのエプロンなら背中中は防護される）は防護できない。身体のこれらの部分の放射線被ばくが問題となっている。

(114) IVR 術者にとって目の放射線防護は不可欠である (Dauer ら, 2010 a)。天井から吊るすタイプの遮へい (6.3 節参照) は目だけでなく頭部全体を防護するため、できればこの種の防護装置を使用することが望ましい。しかし、この種の防護装置は術者が手技を行う妨げとなるため、天井から吊るすタイプの遮へいの使用が実際的でない手技も多く存在する (Miller ら, 2010 b)。このような状況では、鉛製の防護メガネを着用すべきである。防護メガネは側面も遮へいされ、顔面にぴったり合っていなければならない (NCRP, 2010)。メガネがぴったり合っていないと不快な上、ぴったり合ったメガネほどの防護効果がない。防護メガネの着用は術者の目の放射線量を大幅に減少させることが証明されている (Vaño ら, 2008 a; Thornton ら, 2010)。

(115) 鉛等量 0.5 mm の防護メガネのレンズに関する線量低減係数はおよそ 0.03 だが（すなわち、97% の放射線が減衰される）、通常の眼鏡レンズの放射線減衰係数は、それだけでは目の防護具の効果を正確に表す因子とはなりえない (NCRP, 2010)。レンズがカバーする面積が重要である。最大の効果を発揮するためには、目の防護具が、IVR 術者の目に向かう散乱放射線を最大限遮断しなければならない。IVR 術者は、手技の実施中、透視モニターを見るために通常一次ビームから顔を背けている。この結果、目は側面からの散乱放射線に被ばくしている。目の防護具は側面の遮へい、または両脇を内側に湾曲させる設計を施し、側面からの被ばくに対しても遮へいを提供すべきである (NCRP, 2010)。

(116) 目の防護具は、レンズと側面の遮へいが目を十分防護し、被ばくを最小化するために顔面にぴったり合っていなければならないし、防護具の重量からくる不快感をできるだけ小

さくしなければならない (Schueler ら, 2009)。適切に設計され、ぴったり合った眼の防護具でも散乱放射線を 1/2 か 1/3 しか減衰しない (Moore ら, 1980; Thornton ら, 2010)。防護メガネの正味の効果はメガネの設計, 臨床手技の性質および着用者の作業慣行によって決まる。

(117) 甲状腺防護カラーと防護エプロンの着用は, 防護エプロンのみの着用時に比べ実効線量を約 50% 低減する (Martin, 2009; Boetticher ら, 2009)。若年者の甲状腺は比較的放射線誘発がんに対する感受性が高い。発がんリスクは被ばくした時の年齢に大きく依存し, 男性では 30 歳以上, 女性では 40 歳以上ではごくわずかなリスクしかない (NRC, 2006)。甲状腺カラーの着用 (または甲状腺カバーを含む防護エプロンの着用) はリスク評価に基づいて行うべきである。一般的に, (未遮へいの) 襟付近の 1 か月の個人モニター測定値が 4 mSv [ $H_p(10)$ ] 以上の術者全員には甲状腺防護が必要である (Wagner と Archer, 2004; NCRP, 2004)。このグループには大半の IVR 術者が含まれる。多くの心臓検査室ではスタッフ全員が甲状腺遮へいを着用するように求めている。

(118) IVR 術者は手の被ばくを低減するため, 柔かくて殺菌済みの放射線減衰手術用手袋を利用できる。高被ばく状況では防護手袋を着用すべきだとする過去の勧告は再検討されている (NCRP, 2000, 2009)。散乱放射線だけであれば, 防護用の手袋を使用するとわずかながら遮蔽する可能性があるが, この種の手袋では一次ビームの中に手を入れる IVR 術者の安全性は保てない (NCRP, 2010)。

(119) これらの手袋を使用した際に IVR 術者の手の線量が高くなる要因はいくつかある (Miller ら, 2010 b)。IVR 術者の手と X 線一次ビーム管の距離をあけるための特別な装置の装着時と同様に, 放射線減衰手術用手袋によって手の感覚が鈍ることで, 繊細な手技では透視時間または CT の被ばく時間を長引かせる可能性がある。一次ビーム内に何らかの遮へいが置かれることによる線量の増加と, それらの手袋があたえる間違った安心感のため, 防護手袋は手袋をはめた手が一次ビーム内にある時には放射線量の増加につながる可能性がある (Wagner と Mulhern, 1996)。防護の有無にかかわらず患者の安全とケアのために不可欠な稀な状況を除いて, 手を X 線の一次ビーム内に置くべきではない。そうしなければならない時はできるだけ短時間で行うべきである。一般に, 術者の手がモニター上に見える場合には作業方法を変更すべきである (Limacher ら, 1998)。

## 6.5 装置設置型の遮へい

(120) 現在, 心臓検査治療室で使用される透視装置とともに供給される標準的遮へいは, 天井吊り下げ式の鉛スクリーンと検査台の側面から吊るす防護用の鉛カーテンである。これらの遮へいが適切に使用されれば放射線量を非常に低レベルまで減少させることが可能である。

(121) 鉛ガラスまたはプラスチック製のスクリーンを患者と術者の間に設置すると, 術者



の眼、頭部および頸部が防護される。(受像器にできるだけ近く、また、患者に対してできるだけ低く、さらに術者に対してできるだけ大きな影を落とすために、術者に対して若干傾斜させて) 遮へいを適切に設置すると、術者の目の線量を劇的に減少させることが証明されている (Maeder ら, 2006; Thornton ら, 2010)。これらのスクリーンは鉛の眼の防護具と甲状腺遮へいの両方の機能を効果的に代替することができる。スクリーンは術者に余計な重量負担を与えないため、それらが代替する防護器具の及ぼす人間工学的な影響をなくすることができる。

(122) 正面 (前後方向) 撮影法を実施し、X線管が検査台の下にある場合、台の下の散乱線量率は台の上の線量率の3倍から4倍に達する (Schueler ら, 2006)。このような状況では、IVR 術者の膝から足首までを防護するため検査台から鉛カーテンを吊るすべきである。現在、ほぼすべてのインターベンション手技実施室ではこの種の遮へいを使うことができる。

(123) 心臓インターベンション手技の実施中での散乱放射線の大幅な低減に向け、患者のためにドレープまたはパッド状で軽量、殺菌済み、無鉛の使い捨て放射線防護遮へいをビーム経路の外側に置くこともできる (Germano ら, 2005; Sawdy ら, 2009)。これらは金属元素 (通常ビスマスまたはタンゲステン-アンチモン) を含んでおり、患者の手術部位を準備し、ドレープした後に被う。これらは術者の線量を目に関しては1/12、甲状腺に関しては1/26、手に関しては1/29と大幅に削減することが示されている (King ら, 2002; Dromi ら, 2006)。これらを使用すると手技の費用は若干増すが、複雑な手技や術者が手を放射線領域付近に置かなければならない手技 (例えば、ペースメーカーの植込み) では、使い捨ての防護ドレープの使用を検討すべきである (Miller ら, 2010 b)。いくつかの施設ではこれらが日常的に使用されている (Kim ら, 2010)。この種のドレープは透視画像上では見えないはずである。もし、見える場合は患者の線量が増加していることになる。

## 6.6 透視法による職業被ばく

(124) 心臓専門医の1手技あたりの実効線量は0.2から18.8  $\mu\text{Sv}$ の間と報告されていた (Padovani と Rodella, 2001)。より最近の調査では0.02-38.0  $\mu\text{Sv}$ の間であることが実証されている (Kim ら, 2008)。このように線量の範囲が広いのは、手技の複雑性と遮へいおよび個人防護具の一貫性に欠ける使用状況が主な原因と考えられる。診断カテーテル検査とアブレーション手技では技術改良のおかげで術者の線量が長期間で中程度減少したが、PCIに関しては、線量は減少していない (Kim ら, 2008)。これは主にインターベンション手技の複雑性が増していることによると考えられる。

(125) 年間1000例の血管造影検査を実施するというかなり高い作業量を想定しても、年間実効線量限度の20 mSvを超えることはめったにない。ある調査では術者の実効線量をわずかに0.04-0.05 mSv/yと推定している (Efsthathopoulos ら, 2003)。ただし他の調査では2-4 mSv

と報告している (Tsapaki ら, 2004; Dendy, 2008)。先進的な心臓カテーテル検査室では技術の適切な選択と遮へい装置の利用により、術者は同種の術者が一般的に被ばくする放射線量のわずか 0.8% しか被ばくしないであろうことが Kuon らの広範な調査から分かっている (Kuon ら, 2002)。

(126) 側面方向の投射やガントリーを鋭角で使用する場合、C アームの X 線管側に立つと術者の線量が増加する。Kuon らは X 線管の角度が術者への散乱放射線の量に及ぼす影響を推定した結果、放射線レベルは左前斜位が最大となることが分かった (Kuon ら, 2004)。前後方向と右前斜位では放射線レベルははるかに低くなる (Kuon ら, 2002, 2003, 2004)。同時に頭尾方向に角度をつけると線量をさらに増加させる。この研究グループは左冠動脈主幹部の標準視野 (左前斜位  $60^\circ / -20^\circ$ ) では、あまりおこなわれない代替角度 (尾側から前後方向  $0^\circ / -30^\circ$ ) と比較して、術者の線量で 7.6 倍、患者の線量で 2.6 倍になることを示した。

(127) 実効線量は、感受性が高く防護されていない身体部分 (すなわち、手と目) の線量を反映しない。術者の放射線被ばくは均一的でも対称的でもない。右利きの術者が右大腿動脈から手技を実施する場合、彼/彼女の左側面は患者に向いている。したがって、術者の身体の左側が最も多量の散乱放射線を被ばくする (Maeder ら, 2005)。これは特に X 線ビームが患者を通り抜けて出てくる位置にある手に当てはまる。心臓カテーテル検査では左手が右手の 2 倍の線量を受けると報告されている (Vaño ら, ; 1988 c)。左目も右目よりも高い線量を受ける。当然ながら、術者の目と患者との距離がより離れているため、身長の高い術者は身長の高い術者よりも目の線量が低い。

(128) 個人のモニタリング装置を常時正しく装着していない限り、職業被ばく線量を正確に推定することは不可能である。個人のモニタリング装置を装着していないと、個人の職業被ばく線量が低いという誤った思い込みを持つ可能性がある。

## 6.7 個人の線量測定

(129) 委員会は、心臓カテーテル検査室では職業被ばく線量の測定用に 2 つの個人線量計を使用するよう勧告している。1 つはエプロンの下の胴体に装着し、もう 1 つはエプロンの上から襟または左肩の高さに装着する (ICRP, 2000 b)。少なくとも 1 つは (襟の線量計) 常用すべきである。エプロンの下に装着する線量計は遮へいされた領域の臓器への線量を推定する。エプロンの外に装着する線量計は、(それ以外に遮へいが無いとして) 甲状腺と目の水晶体を含む頭部と頸部の線量を推定する。しかし、胴体の臓器の線量に関しては非常に過大評価をする。X 線管が患者の下に設置されている場合、襟の線量計による水晶体の線量の推定値は通常受け入れられるものであるが (Kim ら, 2008)、防護メガネを着用している場合は目の線量を過大評価する。手用の線量計も有用である。

(130) モニタリング結果については医学物理士の助言を仰ぐべきである。両線量計から得た結果は、NCRPとICRPが勧告する職業実効線量の推定に使用することができる(NCRP, 1995)(ICRP, 2000 b)。実効線量( $E$ )は次の等式を使って、線量計の数値 $H_w$ (エプロンの下の胴、ただしこの位置はさして重要ではない)と $H_n$ (エプロンの上の首)から推定できる：

$$E = 0.5 H_w + 0.025 H_n$$

(131) NCRPの報告書122(NCRP, 1995)には、透視法を含む診断およびインターベンション医療手技の実施中に防護エプロンを着用している場合の実効線量を計算するための具体的な勧告が記載されている。上記の公式に加え、エプロンの上の首の部分に線量計を1つだけ装着している場合の実効線量は $H_n/21$ と推定できると述べている。

(132) 欧州委員会DIMONDプロジェクトは、職業被ばく線量の拘束値を提案する取組としてスタッフの防護の最適化に関連する問題を扱っている(Tsapakiら, 2004)。UNSCEAR(2000)は心臓専門医の被ばく線量が医療スタッフの中で最大である傾向があると報告している。30年という期間にわたる心臓検査手技による術者の放射線被ばくに関する最近の調査から、各研究の線量測定方法が著しく異なるため、報告されている線量測定結果の比較が困難であることが明らかになった(Kimら, 2008)。線量測定方法の適切な標準化が推奨される。

(133) 報告されている職業被ばく線量の値は驚くほど低い場合が多いが、その理由は放射線防護レベルが高いためではなく、個人線量計を装着していないためである。線量計の未装着は世界中の問題である(Vañóら, 1998 c; McCormickら, 2002; Padovaniら, 2011)。また、放射線バッジ装着方針の遵守の不徹底も多くの心臓インターベンションにおいて問題である(VañóとGonzalez, 2005)。例えば、McCormickらは放射線防護研修プログラムを義務づける以前、放射線バッジ装着方針を遵守していた医師および看護師は1999年でわずか36%だったと報告している。その後も遵守率は最大77%までしか達していない(McCormickら, 2002)。

(134) 線量計の使用は個人被ばくのモニタリングに加え、放射線防護意識の向上にも役立つ。心臓専門医に対する放射線防護面での正式な研修がない場合、研修医は上司の慣行を踏襲する傾向がある(RehaniとOrtiz-Lopez, 2006)。個人線量計の常用に関する厳格な方針を実施することを心臓カテーテル検査室の品質管理プログラムの一部にすべきである。モニタリング装置の未装着は雇用主の手続き、および／または地域の規制要件または法的要件に対する違反とすることができよう。



## 7. 心臓核医学の放射線防護

- 心臓核医学における正当化の基準を策定するため、専門職者団体（学会）の総意に基づく取組みを通じ適切な使用法に関する判定基準やガイドラインがつけられてきた。
- 心臓核医学検査における防護の最適化には、患者の線量を最小化しながら診断用画像の品質を保証するための放射性医薬品と投与放射能に対する慎重な選択が必要である。
- SPECT（単光子放出コンピュータ断層撮影）プロトコルに関しては<sup>99m</sup>Tc ベースの薬剤は<sup>201</sup>Tl よりも実効線量が低いため、線量の観点からは<sup>99m</sup>Tc ベースの薬剤を使用することが望ましい。
- 投与放射能は国際的ガイドラインおよび国のガイドラインに規定される通り、事前に明示された範囲内にとどめるべきである。また患者の体型を考慮すべきである。
- 負荷時イメージングが正常な場合、総線量を最小化するため安静時イメージングを省略してもよい。
- 手技の実施者が担当患者の便益について適切な分析を行うためには高品質の線量測定データが必要である。

### 7.1 序 論

(135) 心臓核医学検査の90%以上は心筋灌流、および／または心筋のバイアビリティ評価（生存可能性評価）のための心筋血流シンチグラフィ検査である。心臓核医学検査の大半はSPECTで実施される。PET検査を実施する施設もわずかだが増加している。

(136) 世界中で推定3,270万件の核医学診断検査が実施されている（UNSCEAR, 2008）。このうち約1,400万件が心臓核医学検査で、この数は急速に増えている（Davis, 2006）。また米国では、世界の他の国で実施されているすべての核医学検査の合計よりも多い数の核医学検査が実施されている。米国における核医学検査は2006年の患者の医療被ばくの26%を占め、心臓検査が核医学被ばくの85%を占める（NCRP, 2009）。タリウムの使用の減少は2006年以後、後者の数値を若干減少させているかもしれない。

## 7.2 放射性医薬品

(137) 心臓核医学検査で最も一般的に使用されている放射性医薬品を表7.1に要約する。欧州では、ほとんどの検査が<sup>99m</sup>Tcベースの薬剤を使って実施されている。一方、米国では少数派ではあるがかなりの数の検査が<sup>201</sup>Tlを使って実施されている。この検査は通常、安静時の<sup>201</sup>Tlイメージングとそれに続く運動負荷<sup>99m</sup>Tcイメージングによる2核種同時撮影検査という面から実施されている。タリウムの使用は患者の高線量被ばくにつながる (Einstein ら, 2007 a)。

(138) 心臓核医学検査に関して推奨される投与放射能は、各国の医学会や認証機関によって大きく異なる (Hesse ら, 2005)。プロトコルの詳細なガイドラインは、米国心臓核医学会 (ASNC) (DePuey, 2006; Henzlova ら, 2009), 欧州心臓核医学協会 (ECNC) (Hesse ら, 2005), および欧州核医学協会と欧州心臓病学会の共同グループが刊行している。これらのガイドラインに基づく注入放射能を表7.2に要約する。個々の放射性医薬品の投与放射能に関するいくつかの勧告は米国放射線医学会, 米国核医学会および米国小児放射線学会の共同文書に記載されている (ACR, 2009)。

表 7.1 心臓核医学で一般的に使用されている放射性医薬品

薬品名	モダリティ	役割			物理的半減期	単位放射能当たりの実効線量 ( $10^{-3}$ mSv/MBq)	ICRP の刊行物 (刊行年)
		灌流	機能	バイアビリティ			
<sup>99m</sup> Tc MIBI	SPECT	†††	††	†	6 時間	9.0 安静/7.9 負荷	80 (1998)
<sup>99m</sup> Tc テトロフォスミン	SPECT	†††	††	†††	6 時間	6.9 安静/6.9 負荷	106 (2008)
<sup>201</sup> Tl 塩化物	SPECT	†††	†	†††	73 時間	140	106 (2008)
<sup>99m</sup> Tc 赤血球	Planar または SPECT MUGA		††† ††	—	6 時間	7.0	80 (1998)
<sup>82</sup> Rb 塩化物	PET	†††	††	—	75 秒	3.4*	80 (1998)*
<sup>13</sup> N アンモニア	PET	†††	††	—	10 分	2.0	80 (1998)
<sup>18</sup> F フルオロデオキシグルコース	PET	—	—	†††	110 分	19	106 (2008)

SPECT, 単一光子放出型断層撮影; PET, 陽電子放出型断層撮影; MUGA, マルチゲート収集法。

\* *Publication 53* (ICRP, 1988) に記載され, *Publication 80* (ICRP, 1998) に再度記載された当委員会の<sup>82</sup>Rbの線量係数は*Publication 53*で述べた通り, 一部の臓器に関する「最悪のケース」の条件を反映しており, その結果この線量係数から導出した線量推定値は過度に保守的な可能性がある。最近3つの団体がこれより低い線量係数を提案している [Senthamizchelvan ら, 2010 (1.11 μSv/MBq); Hunter ら, 2010 (0.74 μSv/MBq); Stabin, 2010 (1.7 μSv/MBq)]; 当委員会は現在この<sup>82</sup>Rbの線量測定についての問題を再検討中である。

表 7.2 米国心臓核医学会 (ANSC), および欧州核医学協会 (EANM) と欧州心臓病学会 (ESC) の共同グループのガイドラインに沿った標準的な SPECT (単光子放出型断層撮影) と PET (陽電子放出型断層撮影) のための推奨する注入放射能 (MBq)

	ASNC	EANM/ESC
SPECT		
タリウム：1度の注入	92-148	74-111
タリウム：2度の注入	92-148(負荷), 37-74(再注入)	74-111(負荷), 37(再注入)
Tc-99m：1日	296-444(第1回投与)888-1332(第2回投与)	400-500(第1回投与) 1200-1500(第2回投与)
Tc-99m：2日	888-1332 各日	600-900 各日
2核種検査	92-148 (Tl), 888-1332 ( <sup>99m</sup> Tc)	指定なし
MUGA	925-1295*	指定なし
PET		
ルビジウム-82：2度の注入	投与当たり 148-2220 <sup>†</sup>	投与当たり 1100-2200
N-13 アンモニア：2度の注入	投与当たり 370-740	投与当たり 370-740
F-18 FDG	185-555	200-350

MUGA: マルチゲート収集法, FDG: フルオロデオキシグルコース

\* プラナー撮影に対しては 740-925。

<sup>†</sup> ゲルマニウム酸ビスマス (BGO) またはルテチウムオキシオルトケイ酸塩 (LSO) の結晶を用いたカメラを使った二次元収集に対して。

### 7.3 心臓核医学に関する線量測定

(139) 2種類の線量係数を決定することができる：(1) 特定の組織または臓器の線量を推定するために使用できる組織線量係数、および(2) 個人の実効線量を推定するために使用できる実効線量係数。しかし、実効線量は放射線防護のための量としての使用しか意図されていない点に注意する必要がある。実効線量を疫学的評価に使うことは望ましくないし、個人の被ばくおよびリスクの詳細かつ具体的な遡及的調査にも使用すべきではない (ICRP, 2007 b)。

(140) 患者の臓器線量と実効線量の推定値は、一般的に体内での放射性医薬品の分布と代謝を定量化する数学的な生物動力学モデルを使って求める。この種のモデルには人間および/または動物の生物動力学データを盛り込み、線量係数の決定を可能にする。

(141) 組織線量係数は、典型的な患者における単位投与放射能当たりの特定の臓器の吸収線量を定量化する。例えば、当委員会の PET トレーサである <sup>18</sup>F フルオロデオキシグルコースの成人に関する現行の肝臓線量係数は  $2.1 \times 10^{-2}$  mGy/MBq (ICRP, 1998) である。したがって、<sup>18</sup>F フルオロデオキシグルコースを 200 MBq 注入すると、肝臓の推定線量は 4.2 mGy になる。

(142) 実効線量係数は単位投与放射能当たりの実効線量を量化する。当委員会の <sup>18</sup>F フルオロデオキシグルコースの成人に関する現行の実効線量係数は  $1.9 \times 10^{-2}$  mSv/MBq (ICRP,

1998) である。したがって、 $^{18}\text{F}$  フルオロデオキシグルコースを 200 MBq 注入すると、推定実効線量は 3.8 mSv になる。

(143) *Publication 30* (ICRP, 1979), 核医学会の医療内部被ばく線量委員会 (MIRD) (Lovinger ら, 1988) および放射線量評価リソース作業部会 (Stabin ら, 2001) 等のいくつかの組織が線量係数を推定する数学モデルを提供している。これらのアプローチは基本的に同じである (Stabin, 2006)。これらは放射線量を単位質量当たりのエネルギーとして推定する。エネルギーは一般的に放射性医薬品の時間-放射能曲線の生物動力学モデル、核遷移当たりの平均エネルギー表、およびモンテカルロ計算モデルから決定される。臓器の質量は代表的個人のモデルから決定する。

(144) 特定の放射性医薬品の線量係数を集めたものが多数存在する。それを最も広範囲に編集したものは当委員会のもので、現行の推定値は *Publications 53* (ICRP, 1988), *80* (ICRP, 1998), および *106* (ICRP, 2008) に記載されている。心臓核医学で広く使用されている放射性医薬品に関する最新の ICRP の実効線量係数に基づくそれらの実効線量を表 7.1 に列挙する。これらの実効線量は *Publication 60* (ICRP, 1991) の組織加重係数を反映したものである。*Publication 103* (ICRP, 2007 b) の組織加重係数を反映した最新の实効線量係数は、次回の ICRP 刊行物に記載される予定である。多くの国では、放射性医薬品の製造業者によるパッケージへの挿入物/製品情報シートに線量係数を提示するようとの規制要件が存在する。

(145) これらの線量係数は患者の放射線被ばくについてであり、技師や医師等の心臓核医学医療従事者の放射線量を定める基本となる証拠については、より限られている。そのため、従事者の放射線量が合理的に達成可能な限り低く維持されることを保証することも重要である。従事者は放射線バッジの使用、線量限度、個人の妊娠、材料の漏出、および同様のその他の問題に関し、既知の放射線安全要求事項を遵守すべきである。また、放射線防護に関する継続教育を受けるべきである。

## 7.4 現在の線量測定推定値

(146) 核医学検査による典型的な患者の線量は、線量係数に投与放射能を乗じて推定することができる。これらの推定値を、各薬品に関する ICRP の最新の線量係数と表 7.2 に明記した範囲の中央の投与放射能を用いて図 7.1 に例示する。

## 7.5 線量測定の不確実性

(147) 線量係数を決定するために多くの条件が推定されてかけ合わされるので、これらの線量推定値には多数の潜在的な不確実性要因が存在する。通常の品質管理が実施されてい



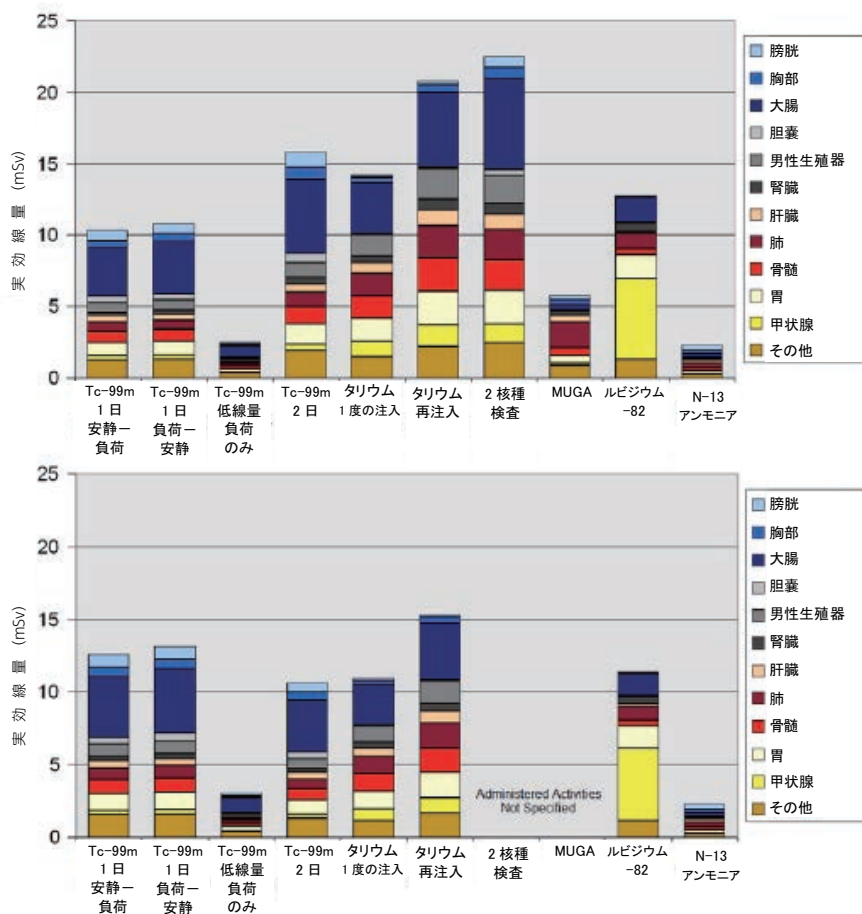


図 7.1 *Publication 103* (ICRP, 2007 b) に記載された最新の ICRP 線量係数と組織加重係数から推定した標準的心臓核医学検査手技の実効線量

積み上げられた横棒は実効線量に寄与する臓器加重等価線量を表す。 $^{99m}\text{Tc}$ の線量は $^{99m}\text{Tc}$  MIBIとテトロフォスミンの平均値を示す。上：米国心臓核医学会のガイドラインが推奨する平均投与放射能を使用：(Depuey, 2006；Henzlova ら, 2009)。下：欧州心臓核医学協会のガイドラインが推奨する平均投与放射能を使用：(Hesse ら, 2005)。*Publication 53* (ICRP, 1988) に記載され、*Publication 80* (ICRP, 1998) に再度記載された当委員会の $^{82}\text{Rb}$ の線量係数は *Publication 53* で述べたとおり、一部の臓器に関する「最悪のケース」の条件を反映しており、その結果この線量係数から導出した線量推定値は過度に保守的な可能性がある。最近3つの団体が、これより低い線量係数を提案している[Senthamizchelvan ら, 2010 (1.11  $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ )；Hunter ら, 2010 (0.74  $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ )；Stabin, 2010 (1.7  $\mu\text{Sv}/\text{MBq}$ )]；委員会は現在この $^{82}\text{Rb}$ の線量測定についての問題を再検討中である。

MUGA：マルチゲート収集法

ば、予定投与放射能と実際の投与放射能の相違は全体的な不確実性のわずかな寄与因子にすぎない (ICRP, 1988)。不確実性に対する3つの最大の寄与因子は、臓器質量の個人差、吸収率、および各臓器の総放射能である。臓器の放射能の不確実性は生物動力学における差異を反映している (Stabin, 2008 a)。計算された吸収線量を実験的に検証したところ 20-60% 以内に一致することが示されており、大きい方の数値は体型および体格が計算で想定したものとは大きく違う患者に当てはまる (Roedler, 1981)。より最近の刊行物では、放射性医薬品の特定の線量推定値に関する複合的な不確実性は一般的に少なくとも2倍だと論じられている (Stabin, 2008 a)。

## 7.6 ICRP の線量測定と製造業者の情報との相違

(148) 放射性医薬品に関する線量測定データの最も容易に入手できる情報源は、通常は製造業者が提供する情報である。いくつかのケースでは ICRP 刊行物に記載されている線量係数と製造業者が提供する線量係数は大幅に異なる。放射線リスクはリスク便益解析に採り入れるべき要素の1つなので、このような相違は診断試験の選択や放射性医薬品の選択に影響する可能性がある。

(149) 米国のパッケージ挿入物を評価したある最新報告書によれば、ある製造業者の情報から推定した  $^{201}\text{Tl}$  の実効線量は当委員会の表をもとに推定した実効線量の半分以下だった。一方、他の2社の製造業者のパッケージ挿入物から推定した線量は当委員会の実効線量以上かまたは同等だった (Einstein ら, 2007 a)。このような相違は、一部には線量係数に多くの不確実性要因が盛り込まれることによる。しかし同時に、製造業者の限られた比較的古いデータの使用に起因する可能性もある (Stabin, 2008 b; Gerber ら, 2009)。

(150) 当委員会は、各国の規制機関がパッケージ挿入物や製品情報の線量測定データの質を保証するためのプログラムを実施すべきだと勧告する。その質の要素としては(全身線量係数ではなく)実効線量係数の包含、入手可能な線量測定データを反映するための定期的な承認後更新、データ源の透明性、および線量係数を求めるために使用した個体数の大きさ等が含まれる。

## 7.7 心臓核医学における患者の放射線防護

(151) 放射線防護の一般原則(第4章)―正当化と最適化―は心臓核医学における患者の放射線防護にも適用できる。線量限度の適用は不適切だが、放射線量が臨床目的にかなうように放射線量管理のための防護の最適化の支援手段として診断参考レベル(DRL)(7.7.3と第10章)を使用すべきである。

### 7.7.1 正当化

(152) 心臓核医学検査は常に臨床的根拠により正当化されるべきである (Gerber et al., 2009)。高度に専門的な医療機関でさえ、行われた心臓核医学検査のうち相当数が標準化された適切性基準に適合していない可能性がある。このことは適切性基準のもつ限界をある程度反映しているかもしれない；つまり、特定の患者について検査の適応を決定する際のすべての情報を組み込んでいるわけではない。しかし、Mayo Clinic で行われた 284 名の負荷心筋シンチに関する最近の後ろ向き研究では 25% が不適正ないし不確実な適応で行われている (Gibbons et al., 2008)。その 88% が 4 種類の原因からなっており、最も不適切な検査施行は無症候の低リスク患者に対する負荷試験であった。

(153) 患者ごとに検査前に適応を分類し検査の妥当性を明確にさせることは、正当化されない負荷心筋シンチを減らす意味で有効なアプローチである (Hendel et al., 2009 b)。

当委員会は心臓イメージング検査の実施に関する国および地域での適切性基準の開発と有効性の確認を奨励する。臨床上の決定をサポートするために使われる適切性基準は根拠に基づいているべきであり、特定の業務と扱う疾病に関する必要な専門知識を持つ医師の組織によって厳格に策定され、審査されるべきである。イメージングに複数のモダリティを用いる可能性がある臨床例に関しては、適切性基準はこれら複数のモダリティを同時に扱うべきである (ACR, 2010)。イメージングに複数のモダリティを考慮する可能性がある臨床例に関しては、医師は各オプションの便益とリスクを比較検討しどのモダリティが診断情報の質の最適なバランスを提供すると見込めるかや個々の患者についてそれぞれの持つリスクを決定すべきである。

### 7.7.2 防護の最適化

(154) 心臓核医学における患者の線量の管理にはいくつかの方法を使用できる。最適な放射性医薬品の選定、注入放射能の最適化、負荷時イメージングが正常な場合の安静時イメージングの省略、および放射性医薬品投与後の水分補給と早期排尿の勧め等が含まれる。水分補給と早期排尿は膀胱壁の線量を半減させるであろう (Einstein ら, 2007 a)。

(155) プロトコルの選定は特に重要である。表 7.2 と図 7.1 に示した通り、心筋血流イメージングの実施には様々な標準プロトコルを利用することができる。それらの実効線量は 2 mSv から 30 mSv 近くまで多岐にわたる。線量が最低の心筋血流イメージングプロトコルでは  $^{13}\text{N}$  アンモニアを使用する。 $^{13}\text{N}$  アンモニアは半減期が 10 分のため検査の現場またはその近くにサイクロトロンが必要な PET トレーサである。これがその利用可能性を制限している。

(156) SPECT プロトコルは、放射性医薬品の 1 回または 2 回の注入が必要な場合がある。放射性医薬品は  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ベースの薬品 (MIBI または テトロフォスミン) のいずれかまたはその両方である。実効線量は放射性医薬品と選定した注入放射能によって決まる。一般的には線量測定の見点からは  $^{201}\text{Tl}$  よりも  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の方が好ましい。通常、実効線量は  $^{201}\text{Tl}$  を使用す

るプロトコルの方がはるかに高く、運動ないし薬剤による負荷時だけ（安静時を省いた）の<sup>99m</sup>Tcプロトコルが最も低い。代替のイメージングモダリティを使用しない場合、<sup>201</sup>Tlを使用するプロトコルは一部の患者（例えば、横隔膜下のトレーサ摂取の増加により<sup>99m</sup>Tc画像がぼやけた履歴のある患者）にとって最適かもしれない。血流欠損の検査前確率が低いかまたは低-中で、負荷像が正常と予測される患者に関しては、負荷像が正常の場合安静像を省略できるので負荷先行／負荷のみのプロトコルが推奨される（Hesseら、2005；Mahmarián, 2010）。このアプローチは、アーチファクトによる血流欠損を伴う検査の割合を減らす吸収補正を行うことで非常に有効になる可能性がある（Gibsonら、2002）。

（157）放射線防護はイメージング装置が目的通りに機能する時にのみ最適化されるので、核医学において装置の品質管理は他のすべての診断およびインターベンションモダリティ同様に非常に重要である。適切な医用物理学的監修を受けた品質管理プログラムは防護の最適化の一側面として推奨される。

（158）委員会は、医学の専門分野に関係なく、心臓核医学検査に関わるすべての医師は放射線防護の正式な研修を受けるよう勧告する。この正式な研修には、放射線防護原則に沿った患者の線量を最小化するための方法の適用を含めるべきである。推奨される研修については*Publication 113*（ICRP, 2009）に記載している。さらなる勧告はIAEAから入手可能である（IAEA, 2001）。

### 7.7.3 心臓核医学における診断参考レベル

（159）診断参考レベル（Diagnostic reference levels；DRL）は、日常的な条件下で、医療イメージングにおいてある指定されたイメージング手技による患者の線量レベルまたは投与放射能がその当該プロトコルに関して異常に高いまたは低いかを示すのに使われる（ICRP, 2007 b）。これについては第10章でさらに詳しく考察する。上記の場合には防護が十分最適化されているかどうか、または是正措置が必要かどうか決定するために、現場での見直しを開始すべきである。

（160）（国の保健当局および放射線防護当局とともに）専門的医学団体は、彼らが具体的に必要とするものに最もよく合っており、それらが適用される地域、国や地方に適合したDRLを設定するよう奨励する（ICRP, 2007 b）。核医学においては、参考レベルは通常受け入れられている習慣や慣行に基づく投与放射能の実際的な数値から導出されてきた（ICRP, 2007 b）。心臓核医学が抱えるDRLの情報源としては各プロトコルに関する一連の投与放射能を規定するASNC、ECNCおよび国のガイドラインが含まれる。特定の患者に投与する放射能は、患者の体格を反映させてこれらの範囲内で調整することができる。例えば、2日間のプロトコルでは注入ごとに最大1332 MBqまでの<sup>99m</sup>Tcが推奨されているが、この上限は体格がより大きな患者に限定すべきである。

#### 7.7.4 妊娠中または授乳中の患者

(161) 一刻を争う緊急の手技以外、すべての心臓核医学検査の実施前に妊娠状況を判定すべきである (ICRP, 2000 a; ACR, 2008)。患者には妊娠の可能性について評価するため慎重に聞き取り調査し、出産可能年齢にあるすべての女性には尿検査または血清検査を実施するよう勧告する。胚または胎児の不測の放射線被ばくの頻度を最小化するため、心臓核医学検査室内の数か所、特に受付付近に、注意書きを掲示すべきである。注意書きの例を以下に記す：

もし妊娠している可能性がある場合は、放射性物質の投与を受ける前に  
医師または技師にその旨を通知してください。

(162) 妊娠中の女性に心臓核医学検査を提案する場合は、早急な診断や治療が要求される健康状態にあり、その検査が確実に必要であることを確認するよう十分に注意しなければならない。その種の診断検査に関しては、検査を実施しないことによる母体へのリスクが胎児への放射線リスクを上回る。できるなら妊娠中の患者について、必須ではない手技は、患者の妊娠が終わるまで延期すべきである。

(163) すべての患者と同様、妊娠中の患者における心臓核医学検査は防護の最適化原則に従って慎重に実施する。妊娠中の患者においては低線量のプロトコル (例えば、 $^{99m}\text{Tc}$  ベースの放射性医薬品を用いた低線量の負荷先行イメージング) を使用し、負荷時イメージングで異常が認められた場合に限り2日目に2回目の低線量の安静時イメージングを実施することが望ましい。母体の組織内の放射性核種は胎児の線量の一因となるため、母体の水分摂取と頻繁な排尿で複数の放射性医薬品投与後の胎児の線量を低減することができる。

(164) 核医学検査を受けた後での妊娠の妥当性について質問されることがあるが、当委員会は、女性は残留放射性核種からの胎児の線量が1 mGy 以下になるまで妊娠すべきではないと勧告している。これは通常、心臓核医学検査を受けた患者は考慮しなくてもよい量である。

(165) 多数の放射性医薬品は母乳に分泌されるので、反証するデータが存在しない限り、放射性医薬品を授乳中の女性に投与したときには母乳中に一部の放射性化合物が入っていると仮定するのが最も安全である。母乳中の放射性医薬品による子供の実効線量が1 mSv 以下になったと推定されるまで、子供に母乳を与えるべきではない。したがって、授乳はいったん中断し、この期間中に分泌された母乳は $^{99m}\text{Tc}$  MIBI、テトロフォスミンおよび赤血球 (体外) に関しては4時間； $^{99m}\text{Tc}$  標識赤血球 (体内) に関しては12時間； $^{201}\text{Tl}$  に関しては48時間までのものについては廃棄すべきであると勧告している (ICRP, 2008)。 $^{13}\text{N}$  アンモニア等の半減期の短いPETトレーサに関しては、物理的半減期が短いため中断は不要である。詳細な放射性医薬品に関する勧告は *Publication 106* (ICRP, 2008) 付録Dに記載されている。

(166) 妊娠中の患者または妊娠の可能性のある患者における核医学手技に関する更なる詳細ガイドラインは *Publication 84* (ICRP, 2000 a) に記載されている。

## 7.8 患者への助言

(167) 近年、核テロリズムの脅威から、空港および他の公共施設のセキュリティスクリーニングで放射線探知機の使用が拡大している。心臓核医学検査用の放射性医薬品を投与された患者は、この種の探知機が作動するのに十分な放射能を保持している可能性がある (Dauer ら, 2007 a)。特に、 $^{201}\text{Tl}$  を投与された患者は、手技実施後最長2か月間この種の探知機を作動させる可能性がある (Dauer ら, 2007 b)。患者にはこの可能性について伝えるとともに、 $^{201}\text{Tl}$  または他の放射性医薬品を使用した心臓診断手技実施後にセキュリティ用放射線探知機を作動させうる期間を示す情報カードを与えるべきである (Dauer ら, 2007 b)。

## 7.9 現在の研究分野

(168) より洗練されたノイズ低減画像再構築アルゴリズムや、複数の半導体検出器を備えた新設計のカメラ等、核医学における最近の技術的進歩は、カメラ効率を改善させる可能性を示している。これらの技術を利用した研究は主に、画像獲得時間の短縮と画質の改善に焦点を置いている。さらにこれらの技術は、投与放射能の大幅な低減やそれによって従来のスキャナと比べて同等の診断性能を維持しつつも患者の線量を低減する可能性も示している。さらなる研究と臨床的有効性の確認が必要である (Patton ら, 2007)。

## 8. 心臓 CT に関する放射線防護

- 心臓 CT における正当化の基準を策定するため、専門職者の団体の総意に基づく取組を通じ適切な使用法に関する基準やガイドラインが策定されてきた。
- 正当化は、個人に合わせ、患者ごとに実施する必要がある、検討中の各イメージング検査の便益とリスク、ならびに検査を実施しない場合の便益とリスクを比較検討すべきである。放射線リスク評価はこのプロセスの一部である。
- 心臓 CT からの線量はスキャナモード、管電流および管電圧に大きく依存する。
- 心拍数が 65-70 回／分未満で正常なリズムの患者に関しては、一般的に、心電図 (ECG) に同期した管電流変調法やアキシャルイメージング (体軸面撮像) 等の線量低減方法を実施しながら、診断画像の品質を維持することが可能である。最大管電流は患者の体型に合わせるべきである。
- 新しいスキャンモード等、患者の放射線量を低減する方法を開発、検証するためさらなる研究が必要である。

### 8.1 序 論

(169) 冠動脈 CT の可能性は、CT スキャナの発明者である Godfrey Hounsfield 卿が 1979 年のノーベル賞受賞演説で、「今後有望な分野は冠動脈の描出かもしれない。冠動脈を特殊なスキャン条件下で描出することが可能かもしれない」と述べた時に示唆された (Hounsfield, 1979)。あまり進展が見られない心臓核医学技術と異なり、心臓 CT 技術は近年急速に進化してきた。その進歩により多種多様な心臓 CT 検査の実施が可能になった。今日、心臓 CT では冠動脈カルシウムスキャン、冠動脈 CTA、肺静脈 CT 血管造影法および心臓核医学画像データの CT 減衰補正等いくつもの注目すべき手技が実施されている。現在、世界での実施件数に関する信頼できる統計値は不明だが、最近の技術的進歩から手技の実施件数は増加している。

### 8.2 心臓 CT スキャナの種類

(170) 新世代の CT は技術的パラメータ (例えば、時間分解能、空間分解能、頭尾方向 (CC) の撮影範囲の広さ) において、また患者の放射線量において、旧世代の CT とは異なる

る。心臓を検査できる最初のスキャナであるダイナミック空間再構築装置は、患者の周辺を回転する 14 個の X 線源を使用していた。その結果、患者の線量は 100 mGy まで達した (Block ら, 1984)。時間分解能が非常に優れていたために「超高速」CT と呼ばれた電子ビーム CT スキャナがこの装置に取って代わった。電子ビーム CT により患者の線量は大幅に減少し、冠動脈カルシウムスキャンも冠動脈 CT も一般的な実効線量は約 1 mSv になった (Morin ら, 2003)。電子ビーム CT スキャナは空間分解能が低く、多列検出器 CT スキャナ (MDCT) に取って代わられた。MDCT の分解能が向上したことによって冠動脈狭窄のより正確な評価やプラークの視覚化が可能になった。初期の冠動脈 CT は、4 スライスのスキャナで実施されていた。その後のより高速の 16 スライスおよび 64 スライスのスキャナによってこの技術は普及した。そして、デュアルソース (2 重線源) スキャナやボリュームスキャナ等のより進化したスキャナの到来によってさらに広く普及した。Publication 102 はこの MDCT を主題としている (ICRP, 2007 a)。

### 8.3 線量測定量

(171) 現在 CT では 3 種類の線量測定量が使用されている。これらは：(1) 加重 CT 線量指標 ( $CTDI_w$ ) と体積 CT 線量指標 ( $CTDI_{vol}$ )、(2) 線量-長さの積 (DLP) および (3) 実効線量である。 $CTDI_w$  と  $CTDI_{vol}$  はスキャン体積の中心部分の平均線量の推定値である。DLP は  $CTDI_{vol}$  をスキャンした生体構造の長さに対して積分し、患者のより長い部分をスキャンする際、患者の線量の増加を反映する (例えば、胸部対心臓)。実効線量は均一的な全身被ばくの観点から見た身体の一部の放射線被ばくリスクを反映するために使用される計算量である。実効線量は放射線防護の量として作り出され、各種診断検査間の放射線リスクを比較するために使用されている (ICRP, 2007 b; McCollough, 2008)。

(172) 現在の MDCT は一般的に各検査の  $CTDI_{vol}$  と DLP について表示する。実効線量は DLP を身体-領域-固有変換係数 ( $k$  係数) を乗じて推定される。心臓検査に関しては、最も一般的に使用されている変換係数は  $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  である；欧州委員会の 2004 年の CT 品質基準胸部係数 (すなわち、実効線量は  $0.014 \times \text{DLP}$  で推定される) (Bongartz ら, 2004)。この変換係数はより最近の Publication 103 の組織加重係数を反映していない (ICRP, 2007 b)。さらに、この係数は単一スライススキャナのデータから導かれ、心臓スキャンではなく胸部スキャン用に作られた (Christner ら, 2010; Einstein ら, 2010)。この方法は、入手可能なデータに基づいて心臓 CT から実効線量を容易に概算するが、通常、実効線量を過小評価する。実効線量を決定する代替的な、より複雑なアプローチは、モンテカルロシミュレーションと人体形状モデル (ファントム) 内の器官線量の決定である。これらは Publication 102 で詳細に考察されている (ICRP, 2007 a)。



## 8.4 患者の線量に影響する要因

(173) 心臓 CT で患者の線量に影響する要素には、CT に固有の要素（例えば、CT の世代、モデルおよび製造業者）と術者が選定するパラメータ等がある。Hausleiter らは、冠動脈 CT を実施する 50 の機関の観察調査で、CT の製造業者間で実効線量が著しく異なることを発見した（Hausleiter ら、2009）。冠動脈 CT について報告されている線量は、どの世代の MDCT スキャナが使用されているかによって異なる（Einstein ら、2007 a）。最新のスキャナは患者の線量を大幅に低減する技術を採用している。線量に影響する術者が選択可能なパラメータには、X 線管電流 (mA) や管電流-時間の積 (mAs)、管電圧 (kV)、ピッチ (IEC, 2009) スキャン長さ（頭尾 CC 方向の撮影範囲）およびスキャンモード等が含まれる。

### 8.4.1 管電流

(174) 特定の検査に関する適切な管電流の選択は、画像ノイズと放射線量間の相殺を反映する。管電流を増加させると画像ノイズが減少し、放射線量は増加する。線量は管電流の増加に伴いほぼ直線的に増加する（Gerber ら、2005）。基本的な管電流は患者の体格に合わせて調整すべきである。患者が大柄になるほど、標準レベルのノイズの画像にするためにより高い管電流が必要になる。同じ管電流の場合、異なる CT、スキャンモード、再構築アルゴリズムを使用すると、ノイズ量の異なる画像が生成されるため、プロトコルを調整しなければならない。これには微妙なバランスが必要である；放射線量を過度に低減しようとする診断に利用できなくなる。反復的なノイズ低減法を採用入れた新しい画像再構築アルゴリズムを使用すれば、低い管電流で画質を維持することができるかもしれない。

### 8.4.2 管電圧

(175) 心臓 MDCT の実施においては、120 kV の管電圧が一般的である。多くの検査センターでは小柄な患者により低い電位（例えば、100 kV）を使用している。放射線量は管電圧の 2.5 乗に（近似的に）比例する。従って、管電圧がこれだけ低下すると 37% の線量低減が見込まれる。低電圧冠動脈 CT を支持する証拠（Abada ら、2006；Bischoff ら、2009；Hausleiter ら、2010）は 120 kV の冠動脈 CT を支持する証拠（Abdulla ら、2007）ほど強固ではない。しかし、多数の施設が低電圧で優れた画質を得ている（図 8.1）。

### 8.4.3 スキャンの長さ

(176) 患者の線量は、基本的にスキャンの長さと同じ身体の被照射部分の長さに直線的に比例する。一般的に、冠動脈 CT では、患者の動きを考慮し、両側に若干の誤差を盛り込み

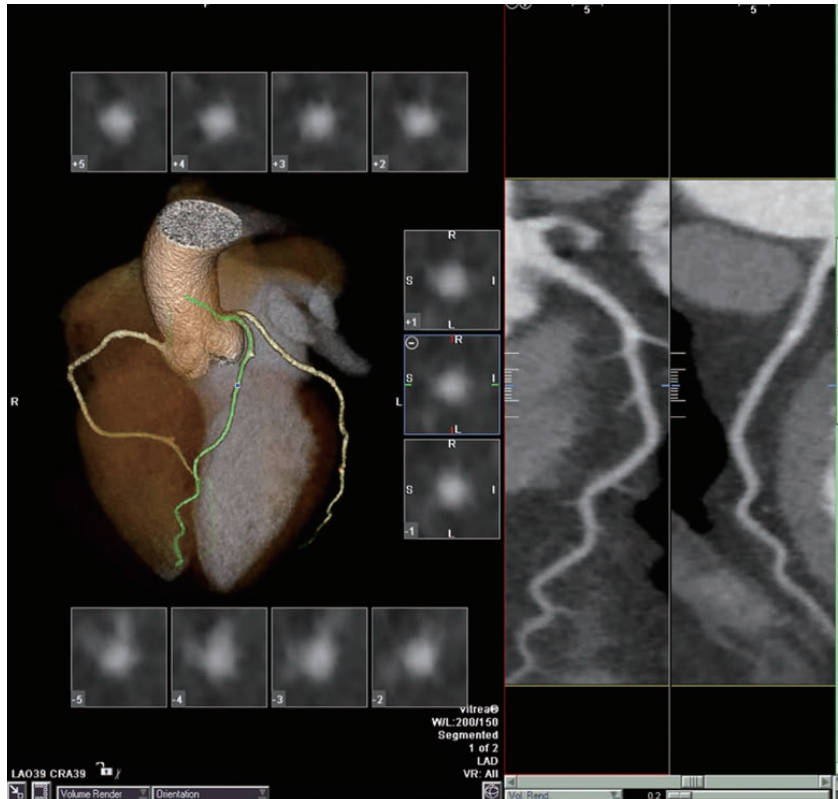


図 8.1

管電圧 100 kV，単一心拍ボリュームスキニングを用いて得た冠動脈 CT 血管造影像。  
 出典：A. J. Einstein, コロンビア大学医療センター(ニューヨーク, ニューヨーク州, 米国)

ながら，気管分岐部から心臓底部までスキャンする。一般的なスキャンの長さは 11–15 cm である。過度に大きな余裕を見込むと，診断情報が追加されず患者の線量だけが增加する。大動脈を含めなければならない場合，また患者が冠動脈バイパス術を受けた場合は，頭尾方向のより広い撮影範囲が必要である。この場合，スキャンの上限は大動脈弓より上になる。

#### 8.4.4 スキャンモード

(177) スキャンモードには，ステップアンドシュート方式とボリュームイメージングを含む管電流が一定である従来のヘリカル（らせん状）イメージング，心位相に応じた管電流変調法（EBTCM）を用いた従来のヘリカルイメージング，高速ヘリカルイメージング，およびアキシアルイメージング等がある（図 8.2）。MDCT を用いた冠動脈 CT は，当初，64 列 MDCT のスキャナで通常ピッチ 0.2，ヘリカルモード，一定の管電流で実施されていた（図 8.2 a）。現在すべての心臓 CT は，冠動脈の動きが一般的に最小化する心静止期に管電流を最大に維持し，残りの心周期中管電流を下げる EBTCM を実施する（図 8.2 b）。これは過度のノイズなしに画像を再構築できる心周期のフェーズ数を制限するが，心拍数が低く（<65 回/分），心調

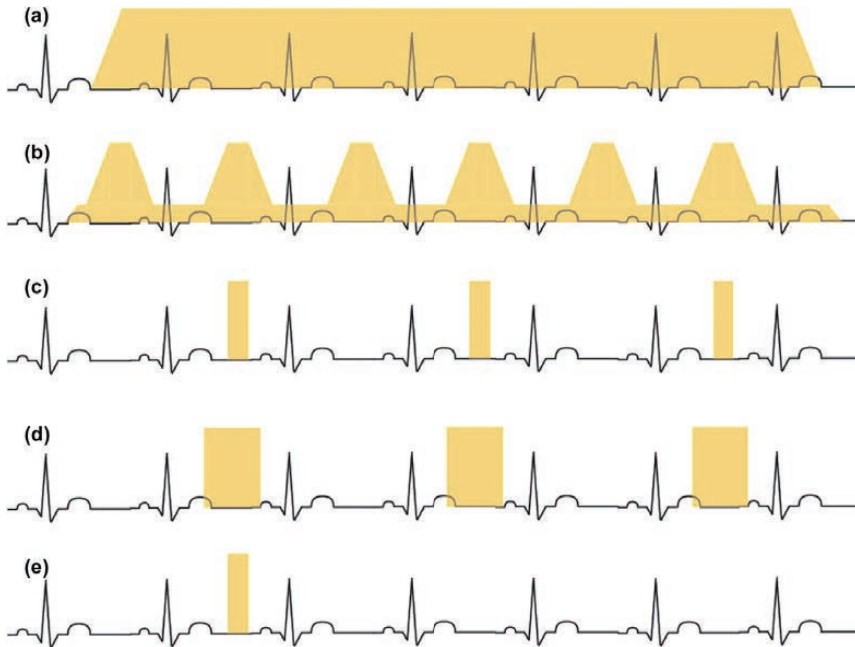


図 8.2

心臓 CT で使用するスキャンモード。黒い線は心電図 (ECG) 信号、網掛け部分は管電流を表す。(a) ヘリカルスキャン、(b) 心位相に応じた管電流変調法によるヘリカルスキャン、(c) (プロスペクティブ ECG ゲートによる) ステップアンドシュート方式のアキシャルスキャン、(d) 複数の心臓フェーズの再構築を可能にするステップアンドシュート方式のアキシャルスキャン (プロスペクティブ ECG ゲートによる) ; 照射ならびにデータ収集時間が拡大される、(e) アキシャル単一心拍スキャン (ここでは最低被ばく時間で例証したボリュームおよび高ピッチのヘリカルスキャン)。これらすべてのモードがあらゆる MDCT で利用できるわけではない。

律が正常な患者にとって通常、問題にはならない。心拍数を下げ、EBTCM の効果を上げるため、通常患者はベータ遮断薬またはカルシウムチャネル拮抗薬を服用すべきである。この種の条件に適合しない患者では、右冠動脈の近位および中間部を描出するために、収縮末期の再構築が有効である場合が多い (Sanz ら, 2005)。この種の患者に EBTCM を実施する場合は、管電流を最大値に維持する時間の期間を拡大することが望ましい。EBTCM は通常実効線量を約 3 分の 1 減少させる。単一ソーススキャナに関しては、この線量値の減少は心拍数が低い場合により顕著になる (Jakobs ら, 2002)。

(178) 最近、アキシャル冠動脈 CT のプロトコルが一部の MDCT に導入されている。このスキャンングアプローチは心周期の予め指定したフェーズのみ画像データを取得し、心周期の他の部分では X 線ビームをオフにする。(プロスペクティブ ECG ゲーティングによる) ステップアンドシュート方式のアキシャルスキャンングでは、X 線は 1 心周期に 1 回照射され、患者用撮影台は次の心周期中のビームがオフの間に前進する。心臓全体をスキャンするまでこ

のプロセスが繰り返される。64 スライススキャナでは、通常 3,4 回の反復が必要である [すなわち、5 から 7 回の心拍の間スキャンする (5 回の心拍を図 8.2 c に示す)]。評価可能な心臓画像を生成するためのステップアンドシュートイメージングに関しては、通常、心拍数は < 70 回/分で、心調律は一定であるべきだと考えられている。ただし、この点はまだ十分研究されていない。ステップアンドシュートイメージングの利点は、心周期の大半で放射線被ばくをなくし、ヘリカル冠動脈 CTA の特徴である照射領域の重複がないため、線量を低減できる点である。一方、その欠点としては、心周期全体を通し、追加フェーズで遡及的に画像再構築ができない点と心臓機能と心筋壁運動の動きを評価できない点等が挙げられる。

(179) アキシャルイメージングで調整可能な 1 つのパラメータは、X 線管をオンにする時間である。追加データを取得すれば、線量は増加するが、心周期のフェーズの範囲内で再構築が可能になる (図 8.2 d)。このように、1 つの心臓拡張期の画像しか取得できないのではなく、心臓拡張期の 1 つの範囲の画像を取得し、収縮末期から心拍静止期までを網羅する等、様々な方法をとれる。ただし、線量は被ばく時間に比例する。

(180) 最近導入された 2 つのスキャンモードは、大幅に線量を低減できる可能性がある。2 つの方法はいずれも 1 心拍の何分の 1 かの分画だけ照射される X 線で心臓全体を網羅する (図 8.2 e)。アキシャルイメージングの極端なケースは、撮影台を動かさずに心臓全体をカバーできるコーンビーム X 線源と大型検出アレイを用いるボリュームスキャンニングである (Einstein ら, 2010)。ヘリカルイメージングの極端なケースは、1 心拍の何分の一かの間に心臓全体を対象とするため高速で台を動かし、互いに約 90° の位置に設置された 2 つの X 線源を使用する高ピッチのヘリカルスキャンニングである (Achenbach ら, 2010)。現在、これらの各モードでは、最低限の放射線量で優れた画質を得るためには心拍数が低いことが必要である。

(181) アキシャル冠動脈 CT と単一心拍数モードを評価した臨床論文 (Sun と Ng, 2011) は、ヘリカル冠動脈 CT の論文よりも少なく、侵襲的血管造影法と比較した診断精度を評価する多施設研究が不足している。これらのスキャンモードのさらなる検証が望まれる (von Ballmoos ら, 2011)。

## 8.5 現在の線量測定推定値

(182) 冠動脈 CT による線量は多くの要因に依存しており、その結果プロトコルごとに著しい差がある。2007 年 Einstein らは、心臓 CT の実効線量に関する既発表文献を調査した (Einstein ら, 2007 a)。その結果、冠動脈カルシウムスキャンの実効線量は、ヘリカル技術を使用した場合 1.0 から 6.2 mSv で、アキシャル技術を使用した場合 0.5 から 1.8 mSv だった。ヘリカル 64 スライス冠動脈 CT の場合、実効線量は、EBTCM なしでは 8 から 21.4 mSv で、EBTCM ありでは 6.4 から 14 mSv だった。米国で実施された 15 か所の医療施設を対象とした

調査では、 $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  の  $k$  係数を使って推定した実効線量中央値は、ベストプラクティス線量低減教育の前に  $21 \text{ mSv}$  だった (Raff ら, 2009)。世界中の 50 か所の医療施設に関する調査では、実効線量中央値は  $12 \text{ mSv}$  だった (Hausleiter ら, 2009)。Hausleiter らの調査では、冠動脈 CT を実施する各施設における線量中央値においては 6 倍の差異があった。EBTCM は DLP において実効線量の 25% の低減 (95% 信頼区間 23-28%)、X 線管電圧 100 kV の使用は 46% の低減 (95% 信頼区間 42-51%)、そしてアキシャルステップアンドシュートスキニングの使用は 78% の低減 (95% 信頼区間 77-79%) になったと報告されている (Hausleiter ら, 2009)。2011 年現在最大のメタ分析では平均実効線量は約  $5 \text{ mSv}$  だったが (Sun と Ng, 2011)、他の単一施設研究ではアキシャルスキニングが評価されており、多数の施設が実効線量の範囲を  $2\text{-}4 \text{ mSv}$  と報告した (Earls と Schrack, 2009)。従来へのヘリカルスキニングに比べ、ボリュームスキニングは 84% の線量低減と報告され (Einstein ら, 2010)、高ピッチのヘリカルスキニングは心拍数が低く ( $\leq 60$  回/分) 体重が  $\leq 100 \text{ kg}$  の患者に関して、 $0.014 \text{ mSv mGy}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  の  $k$  係数を使用すると、実効線量が  $< 1 \text{ mSv}$  となったと報告されている (Achenbach ら, 2010)。

(183) 臨床業務で観察される実効線量の数値が非常に広範囲に及ぶため、一般的に使用される心臓 CT の「典型的な」実効線量値を求めることは不可能である。実効線量は使用する CT スキャナとプロトコルに依存する。表 8.1 に一連の典型的な推定値を示すが、これらの数値は特定の医療機関の臨床業務の目標値でもなければ、代表値でもない点に注意すべきである。

(184) CT プロトコルを評価した多くの研究により、実効線量は患者ごとに異なることが分かっている。CT の品質基準に関する欧州のガイドライン (Bongartz ら, 2000, 2004) の係数等、変換係数が存在することで、研究者がスキャナ上に報告される DLP から単一検査の「実効線量」を推定しやすくなっているが、これは実効線量の本来の使用法ではなく (ICRP, 2007 b; Einstein ら, 2008; Gerber ら, 2009)、実効線量は平均的な人に対して定義されており、個人のリスクを評価するために使用すべきではない。したがって、これらの研究を引用し

表 8.1 各種心臓 CT のおよその推定平均実効線量

検査	実効線量 (mSv) *
冠動脈 CT (ヘリカル)	19
冠動脈 CT (管電流変調)	13
冠動脈 CT (プロスペクティブゲーティング)	4
冠動脈カルシウムスキャン	2

\* 出典: Einstein (2009)。実効線量に関する他の推定値については Einstein ら (2007 a), Earls と Schrack (2009), Gerber ら (2009), Hausleiter ら (2009), Kim ら (2009), Raff ら (2009), Smith-Bindman ら (2009), および Sun と Ng (2011) 参照。

でも、委員会がこのアプローチを保証するわけではない。

(185) 冠動脈 CT による実効線量への最大の寄与は、肺と女性の胸部の加重等価線量である。冠動脈 CT による肺および胸部の吸収線量は、ヘリカルスキニングを使用する場合約 40-90 mGy と報告されているが、アキシアルスキニングを使用する場合わずか 10-12 mGy である (Einstein ら, 2007 b; Huang ら, 2010)。

## 8.6 心臓 CT における患者の放射線防護

(186) 放射線防護の一般原則 (第 4 章) - 正当化と防護の最適化 - は、心臓 CT の患者の防護にも適用できる。線量限度の適用は不適切だが、放射線量が臨床目的にかなうように、放射線量管理のための防護の最適化の支援手段として DRL (8.6.3 と第 10 章) を使用すべきである (ICRP, 2007 b,c)。

### 8.6.1 正当化

(187) 委員会は、心臓 CT の適切な使用に関する基準とガイドラインを作成し、適用するよう勧告している。心臓 CT の適切な使用に関する基準とガイドラインは専門組織から入手可能であり、それらを利用すべきである (Schroeder ら, 2008; Taylor ら, 2010)。

(188) 1 施設の調査では、冠動脈 CT は 46%、負荷 SPECT 検査の 11% が適正使用の点では分類不能であった。残りの分類可能な検査の内、冠動脈 CT の 51% と負荷 SPECT 検査の 72% は適切だった (Gibbons ら, 2008; Miller ら, 2010 c)。これらのデータから、「米国冠動脈 CT 適正使用基準」(初版) をあてはめると、モダリティによって、分類不能となるものが多く、この基準に限界があるのか、冠動脈 CT 検査が SPECT 検査に比べて適正使用が少ないのかは不明である。更なる調査が必要であり、適正使用に関する基準に最大限遵守できるようなプログラムも奨励される。

### 8.6.2 防護の最適化

(189) 8.3 節で述べた通り、放射線技師は患者の放射線量に影響する多数のスキャンパラメータをコントロールする。放射線技師には患者の体格に合わせた管電流と管電圧の選択に関する適切なガイドラインを提供すべきである。冠動脈プラークと狭窄の評価が主たる目的でない場合は、管電流と管電圧を下げるよう特に配慮すべきである (例えば、冠動脈奇形の可能性の評価、または再心臓手術の前の胸骨とバイパス血管経路の関係の評価)。スキャンの範囲は、目的とする対象を間違いなく撮像するために必要な程度に制限すべきである。

(190) 放射線技師にはスキャンモードの選択に関する適切なガイドラインを提供すべきである。適宜、線量を低減するスキャンモードを使用すべきである (Gerber ら, 2009)。冠動脈

カルシウムスキュンはアキシヤルイメージングを使ってを実施すべきで、冠動脈 CT 検査の実施前にあわせて検討すべきである。冠動脈の重度の石灰化が広範囲に存在する場合は、冠動脈の一部が評価できない可能性が高いため、冠動脈 CT 検査を実施すべきではない。可変ピッチの多重ソーススキュンでスキュンされる患者を除いて、画像の質を上げ、放射線量を下げたため、すべての患者に心拍数を約 60 回／分まで減少させるよう、必要に応じて心拍数をコントロールする薬剤を投与すべきである。

(191) 第 9 章で述べる通り、委員会は、心臓専門医、放射線技師、核医学の専門家、および内科医など、心臓 CT 検査を依頼、あるいは同検査を実施するすべての医師に対して、放射線防護に関する正式な研修を受けるよう勧告する (ICRP, 2011)。この正式な研修には検査実施の適正化と防護の最適化の原則に関する研修を含めるべきである。

(192) 品質向上プログラム (第 10 章) は冠動脈 CT 検査の放射線量を大幅に低減することが実証されているため (Raff ら, 2009)、その実施を奨励する。医学物理学の専門家は防護の最適化を支援することができる。

### 8.6.3 診断参考レベル

(193) 診断参考レベル (DRL) については第 10 章でさらに詳しく考察する。DRL は、日常的な条件下で、指定されたイメージング手技による患者の線量レベル、またはそのために投与された放射能が、その手技として異常に高いか低いを示すもので、医療イメージングで使用されている (ICRP, 2007 b)。その場合、防護が十分最適化されているかどうか、または是正措置が必要かどうか決定するため、診療施設ごとの評価を開始すべきである。

(194) (国の保健当局および放射線防護当局とともに) 専門的医学団体は、彼らの特定のニーズに最もよく適合し、それらが適用される地域、国または地方に合った DRL を設定するよう奨励する (ICRP, 2007 c)。現在、心臓 CT に関する DRL は存在しない。

### 8.6.4 妊娠中の患者

(195) 一刻を争う緊急の手技を除いて、CT 検査の実施前に妊娠状況を判定すべきである (ICRP, 2000 a; ACR, 2008)。可能であれば、妊娠中の患者に関する選択的な手技は、患者がもはや妊娠中でなくなるまで延期すべきである。冠動脈 CT 検査では、通常、スキュン範囲は尾側は横隔膜の辺りまでで、子宮は直接照射される領域外に位置する。このような状況から、妊娠中の患者においては、胎児は通常散乱放射線のみ被ばくする (例えば、0.1 mGy) (McCollough ら, 2007)。この程度の線量では、胎児の奇形や小児がんの寄与リスクはきわめて小さい。したがって、妊娠中の患者でも、必要でありかつ適応があれば冠動脈 CT を控えるべきではない。すべての患者同様、妊娠中の患者における冠動脈 CT 検査は、最適化原則に従って慎重に実施する。





## 9. 心臓専門医のための放射線防護研修

- 世界中の心臓専門医は通常、放射線防護研修をほとんど、あるいは全く受けていない。
- ほとんどの国で、医療被ばくの責任を有する者は適切な放射線防護研修を受けなければならないと法に規定されている。
- 放射線防護研修の実施後は研修プログラムで修得した知識の評価を行うべきである（正式な試験システム）。
- 研修を終了した医師は適切な認定試験に合格することで、カリキュラムで指定された知識を持っていることを実証できなければならない。
- インターベンションを実施する心臓専門医と電気生理学者は電離放射線を使用する他の医師に勤められている研修に加え、第2のより高度な放射線防護研修を受けるべきである。
- 透視手技の実施を補佐する看護師および他の医療関係者は、彼ら自身と他者の被ばくを最小化するため、放射線リスクと放射線防護原則について精通しているべきである。
- 医学物理士は地元の施設で実施される特定の手技の臨床的側面に精通しておくべきである。
- 研修プログラムには新人スタッフへの初期研修と定期的な情報の更新および再研修を含めるべきである。
- 学術集会には放射線防護に関する再教育コースを含めるべきである。またそのコースへの参加を生涯専門教育の要求事項とすることも考慮すべきである。

### 9.1 序 論

(196) 自らの臨床業務で電離放射線を広範囲かつ日常的に使用するにもかかわらず、一般的に心臓専門医は世界中を通して放射線防護研修をほとんど、あるいは全く受けていない。従来から医学生は医学部では放射線防護に関する研修を受けていない。その後、放射線診断、核医学、および放射線治療等の放射線医学を専門にする医師は専門分野の研修の一環として放射線物理や放射線防護について教えられる。しかし多くの国では、例えば内科や心臓病学といった他の専門分野の教育を行う際に放射線防護についての教育がなされていない。

(197) 従来は、X線や他の放射線源は放射線防護に関する研修を十分に積んだスタッフが放射線科で使用するだけだったため、放射線科医以外は放射線物理や放射線防護の研修は不要だった。X線透視法は既に1世紀以上使用されているが、その初期には人体の骨格、生体組織

構造の動き、または造影剤の体内の通過を可視化していた。放射線科医が通常これらの手技を実施していた。透視ガイド下インターベンション手技が導入され、他の専門家（心臓専門医やますます多くの他の医学分野の医師）がこれらの手技を実施するようになった。当初彼らは放射線科の放射線科医とともに手技を実施していたが、長年の間に他の臨床科や外来施設にも装置（CT、X線透視装置、核医学およびラジオグラフィ装置）が設置されるようになり、放射線科以外の医師が放射線科医の関与なしに実施するようになった。これらの放射線科以外の医師は放射線科医が必修すべき放射線物理や放射線防護の研修を義務付けられていなかった。現在ではこの研修は不可欠であることが明らかとなっており（Douglasら、2012）、今後は心臓病学にも具体的なガイダンスが必要である。

（198） 当委員会は、IVR術者、核医学専門医、医学物理士、看護師および放射線技師／技術者のための研修の詳細を *Publication 113* に記載している（ICRP, 2009）。

## 9.2 放射線防護の要求事項

（199） IAEA および食糧農業機関（FAO）、国際労働機関（ILO）、全米保健機構、世界保健機関（WHO）が共同で発行した「電離放射線に対する防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準」（IAEA, 1996）は、放射線に関わる診断または治療手技の安全な実施に向け、任じられた仕事を履行するのに十分な適切な研修を求めている。

（200） ほとんどの国で、医療被ばくの責任を有する者は適切な放射線防護研修を受けなければならないと法に規定されている。しかし多くの国では、研修システムや認定の仕組みが整備されていない。

（201） 放射線防護の研修が終了した後は研修プログラムで修得した知識を評価すべきである。個人の修了認定を行う前に、そのコンピテンシー（実践能力）を正式な評価法で試験を行い、放射線防護の教育および研修を補完すべきである。いずれかの専門分野（例えば、心臓インターベンション、電気生理学）で放射線防護に関する認証が必要な場合、個人がその専門分野での医療の実践を許可される前に認証を受けるべきである。研修プログラムには新人スタッフへの初期研修と定期的な情報の更新および再研修を含めるべきである。医学会および専門家組織は手法の一貫性を保証し、教育と研修を支援し促進するため、研修プログラムの講義要項の作成に協力すべきである。学術集会には放射線防護に関する再教育コースを含めるべきであり、そのコースへの参加を電離放射線を使用する専門家の生涯専門教育の要求事項とすることも考慮すべきである（ICRP, 2009）。

### 9.3 インターベンション透視法

(202) 当委員会は、*Publication 85* (ICRP, 2000 b) においてインターベンション手技は複雑かつ難しい作業で、放射線量は術者によって決まると述べた。この種の手技を実施する個人が臨床的技術と放射線防護の両面で十分な研修を受けていることが非常に重要である。当委員会はさらに、医療施設に新しいX線装置または技術が導入された場合、特別な追加研修を計画すべきだと述べた。放射線防護の基本研修と継続的研修をこの教育の必須不可欠な部分とすべきである。研修要求事項については *Publication 113* で扱っている (ICRP, 2009)。

(203) 医療被ばくに関する EU 理事会指令 (97/43/EURATOM) は、IVR (第9条) を、高線量を伴う患者への特別な医療行為と位置付けている (EU, 1997)。第7条によれば、加盟国は実施者が放射線業務の目的のために十分な理論的および実践的研修を受けていること、また放射線防護に関し十分な能力を有することを保証しなければならない。心臓インターベンションについての特別な言及はない。

(204) 委員会は *Publication 85* と *113* で、電離放射線を使用するすべての医師に勧告されている研修に加え、IVR 術者には第2次レベルの放射線防護研修を行うよう勧告した (ICRP, 2000 b, 2009)。さらに委員会は、透視手技の実施を補佐する看護師および他の医療関係者は彼ら自身と他者の被ばくを最小化するため、放射線リスクと放射線防護原則について精通するよう勧告した。医学物理士が提供する実践的助言は、それらが臨床手技およびそのイメージングにおける必要事項の実際的な知識に基づいていればいるほど高められるので、医学物理士は現場の施設で実施される手技の臨床的側面に精通しておくべきである。

(205) インターベンション手技を受けた患者の間で、近年多数の放射線誘発傷害が報告されていることを考慮し (ICRP, 2000 b; Koenig ら, 2001 a; Vañó と Gonzalez, 2005; Rehani と Ortiz-Lopez, 2006)、多数の組織が研修要求事項に関する勧告を提供し始めた。既発表のガイドラインは本来インターベンション放射線科医向けのもだったが、心臓病学会からのガイドラインも徐々に利用できるようになっている。

#### 9.3.1 米 国

(206) 米国 FDA は 1994 年の勧告 (FDA, 1994) で各施設に適切な研修を保証するよう警告した。侵襲的な手技を実施する施設に対する FDA の具体的な勧告には次のような内容が含まれる：

- 透視法を実施する医師が適切な資格を持ち、研修を受けていることを保証する。
- 装置の操作を行うすべての者は、各操作モードにおける放射線被ばくの影響を含め、透視装置の操作について研修を受け、その内容を理解していなければならない。

- 施設は透視手技を実施する医師が、患者の年齢、ビームの方向、ビーム内に入る組織、過去の透視手技や放射線治療の履歴等の可変要素を考慮しながら、ケースバイケースで、個々の患者のリスクと利益を評価できるような教育がなされていることを保証すべきである。

(207) 1995年、米国心臓病学会心臓カテーテル委員会は、スタッフの適切な研修は必須事項であること、また「放射線物理および放射線安全原則の適切な指導をすべての心臓専門医の教育の一部とすべきである」という声明書を発表した（米国心臓病学会心臓カテーテル委員会、1995）。米国心臓病学会の総意に基づく文書は、心臓専門医のための放射線安全に関する知識基盤の必要性をさらに明確に説明している（Limacherら、1998）。

(208) 2004年、米国心臓病学会／米国心臓病協会／米国内科学会（ACC/AHA/ACP）の特別委員会は、ACCの1998年報告書の手引きとして臨床的能力と研修に関するもう1つの報告書を発表した（Limacherら、1998；Hirshfeldら、2004）。2004年の文書で提案されているカリキュラム（教科課程）は資格を持つ医師がX線透視装置の使用を認定されるために知っておくべき知識を特定しているが最低研修時間は明記していない。研修を終了した医師は適切な認定試験に合格することで、カリキュラムで指定された知識を持っていることを実証できなければならない。

(209) 必要な知識の深さは個々の医師が実施する透視法に基づく手技の種類によって異なる。ACC/AHA/ACPの文書は基本と上級の2つのカリキュラムの概要をまとめている。基本のカリキュラムは、右心カテーテル検査、一時的ペースメーカーの挿入、大動脈内バルーンポンプの挿入等の比較的単純な救急治療室で行われるような透視ガイド下手技に携わる医師に適している。上級のカリキュラムは、様々な目的のため複雑な状況下でもっと大量の放射線を利用し、患者とスタッフの傷害リスクが大きい血管造影法、インターベンション、および電気生理学手技を実施する医師を対象としている。

(210) 米国では、最近NCRPが透視ガイド下インターベンション医療手技における放射線量管理についての報告書を発表した（NCRP, 2010）。この報告書は下に挙げるようないくつかの具体的勧告を行っている：

- 透視ガイド下インターベンションの実施中に同じ室内にいる者は適切な放射線防護研修を受けていなければならない。
- 透視ガイド下インターベンションの実施中に装置を操作するか、または装置の使用を監督するすべての者は当該装置の安全な使用法に関する最新の研修を受けていなければならない。
- 透視ガイド下インターベンションや患者が高線量に被ばくする可能性がある他の手技の実施者には、その業務が低線量の透視ガイド下インターベンションに限定されているIVR術者に必要なもの以上に、さらなる知識と研修が必要である。
- 臨床での研修と経験は放射線管理の正式な研修に代わるものとしては承認されない。

### 9.3.2 欧州委員会

(211) 欧州委員会の要求事項に従い、IVRに関する放射線防護の具体的研修概要が作成された (Vañoら, 1997 b; EC, 2000)。専門家グループでは心臓インターベンションの具体的な言及はなかったが、研修時間を提案した表には心臓インターベンション専門家には20-30時間の研修と記載した欄があった。これらのガイドラインに基づくスペインでの最初の経験が報告されている (Vañoら, 2003)。これには研修用CDの作成が含まれている [MARTIR (IVRにおける放射線防護研修用マルチメディア視聴覚教材), 2002]。

### 9.3.3 国際原子力機関 (IAEA)

(212) IAEAは特に心臓インターベンション医を対象とした教育目的を持つカリキュラムを作成した。これは主に、独自の放射線防護分野の基本および上級カリキュラムを開発するには心臓病学会がまだ十分強固でない途上国向けに作成された。これらの国に関しては、特に診断イメージングにおける放射線防護分野に十分な専門知識を持つ者がいない状況を鑑みると、「サンドイッチ」モジュールが理想的である。IAEAもCDに電子プレゼンテーションのかたちで教材を作成した。心臓病学における放射線防護についてのこのIAEAの教材は無料で入手が可能で、[patient.protection@iaea.org](mailto:patient.protection@iaea.org)に文書で請求するか、またはウェブサイト <http://rpop.iaea.org> からダウンロードすることができる。

### 9.3.4 世界保健機関 (WHO)

(213) WHOはIVRには基本的研修に加え特定の研修が必要であると述べており、研修要求事項を策定している (WHO, 2000)。さらにWHOは新しい技術が導入された時、新しい放射線装置が設置された時、新人スタッフが任命された時には研修プロセスを継続しなければならないと述べている。またWHOは一定の間隔で、継続研修と再研修を実施するよう勧告している。ただし、心臓インターベンションについてはこの文書の取扱いの範囲外であった。

### 9.3.5 認 定

(214) 手技を技術的に実施できるとして医師を認定するのと、同じ医師を、透視装置を安全に使用できる放射線防護上十分な能力を持っていると認定することには違いがある。心臓インターベンション専門医または電気生理学専門医が扱う放射線量は、患者ごと、および年間あたりについても、インターベンション放射線科医が使用する放射線量に劣らず多いので、心臓インターベンションにおける放射線物理と放射線防護に関する研修基準は他のIVR術者の研修基準と同じにすべきである (ICRP, 2009)。



## 10. 品質保証プログラム

- 放射線防護の品質保証プログラムの2つの基本目的は、患者の放射線量の定期的評価と、放射線を利用する循環器施設の従事者の職業放射線量の監視である。
- 放射線防護に関する研修（初期研修と再研修を含む）は、イメージング手技と心臓インターベンション手技に関わるすべてのスタッフに関する品質保証プログラムに盛り込まれるべきである。
- 心臓専門医は、心臓手技の放射線防護品質保証プログラムの側面に管理責任を持ち、医学物理士の補佐を受けるべきである。
- 新しい心臓インターベンション透視検査室、CT、X線または核医学装置の計画または設置、または既存装置の更新には、上級IVR術者と医学物理士を含めるべきである。
- 心臓病学の品質保証プログラムには、透視法、コンピュータ断層撮影およびシンチグラフィに関する患者の線量監査を含めるべきである。
- 品質保証プログラムには画質と手技のプロトコルの定期的評価を含めるべきである。
- 品質保証プログラムでは、個人線量計が常時使用されていることを確実にすべきであり、また、すべての異常な線量値について詳細に調べるべきである。
- 品質保証プログラムは、放射線誘発皮膚傷害のリスクがある場合、個人の臨床的経過観察を実施するトリガー（注意喚起）レベルを規定すべきである。
- 手技終了時には患者の線量報告書を作成し、保存し、患者の医療記録に記録すべきである。線量報告書が利用できない場合は、手技と患者の識別情報とともに、線量値を患者の医療記録に記録すべきである。
- 品質保証プログラムには、透視法、CT撮影およびシンチグラフィに関する患者の線量監査（診断参考レベルとの比較を含む）を含めるべきである。

### 10.1 序 論

(215) 心臓領域における品質保証プログラム（QAP）は、診断プロセス全体で最適な質が達成されること（すなわち、患者とスタッフの被ばくは許容可能な最低限にとどめながら、十分な診断情報が継続的に生成されること）を保証するために必要な、すべての計画的および体系的措置を網羅すべきである（WHO, 1982）。

(216) 心臓領域の QAP には通常の臨床的側面に加え、患者とスタッフの放射線防護に関する全側面が含まれる。ここでは放射線防護に関する側面だけを考察する。QAP の 2 つの基本目的は、患者の放射線量の定期的評価と、放射線を使用する循環器施設の従事者の職業被ばく線量の監視である。心臓病学の QAP の放射線防護の部分は、個々の医療施設内の X 線および核医学装置の一般的 QAP から独立させるべきである。以下のリストは放射線防護 QAP に盛り込むべき 10 項目の主要点を要約したものである：

- 施設的设计
- X 線装置 (選定基準)
- 放射線防護ツール
- 線量計の利用可能性
- スタッフの利用可能性および彼らの責任
- 放射線防護に関する (初期および継続) 訓練
- 患者の線量監査と報告
- 患者の高線量に対する臨床的経過観察
- 画質と手技の評価
- スタッフの放射線量

(217) 心臓専門医は、心臓手技に関する放射線防護における QAP の面に管理責任を持ち、医学物理士の補佐を受けるべきである。職業被ばく線量のモニタリングには放射線防護アドバイザー／放射線安全責任者も関与すべきである。心臓手技に関する放射線防護の QAP は、情報の更新と定期的経過観察を実施できるよう最低年 1 回審査すべきである。QAP の自己監査を行うのもよい。以下のリストは QAP の内部監査の一環として回答されるべき質問の一部である：

- 患者の放射線量の数値を前年から報告できるか？
- 患者の高線量に対する臨床的経過観察の手順を整備しているか？
- X 線装置の品質管理試験結果を把握しているか？
- スタッフの放射線量値を継続的に把握しているか？
- 放射線防護に関する継続的研修プログラムを策定しているか？

## 10.2 施設

(218) 新しいインターベンション透視検査室の設計、新しい X 線または核医学装置の選定と設置、さらに既存装置の更新はすべて複雑かつ費用のかかる過程である。これらの過程の計画には放射線防護を含めるべきである。上級医師 (IVR 術者、電気生理手技実施者、核医学専門家、または CT イメージングの専門家が該当)、医学物理士、および上級放射線技師／技術



者をこの計画に含めるべきである。新しい検査室を使用するすべての医学分野を代表する医師は、室内の装備の指定に関与すべきである。検討すべき重要な側面を表 10.1 に記載する。

(219) カテーテル検査室の望ましい建築上の仕様が医学会から発表されている (ACC/AHA, 1991)。これには適切な広さ (50 m<sup>2</sup>)、広い鉛ガラス窓を備えた十分に広い操作室、十分な天井高 (3 m、天井から C アームや監視装置等の支持材を吊るせる高さ)、適切な放射線遮へい (窓と扉を含む)、および要員と患者の入りやすさ等が含まれる。新しい X 線撮影室は、手技の実施中に要員が X 線室内にいる際患者から十分離れて位置できるよう十分な広さにすべきである。設備には他の医師および他の要員が被ばくせずに手技を観察できるように広い遮へいガラス窓のある操作室を含めるべきである。

(220) 適切な遮へい、X 線室への入室、放射線防護具 (エプロン、甲状腺保護具、防護手袋と眼鏡、防護スクリーン、天井から吊るす型と治療台下に置く型の遮へい材) をカテーテル検査および電気生理学検査室の計画の一部に加えるべきである。患者の線量データを測定、記録し、医療記録に転送する技術を含む線量低減技術は新しい透視および CT 装置を選定する

表 10.1 施設調達に関する検討事項 (ICRP, 2000 b)

臨床的要求の分析	作業内容
装置の仕様	一般的要求事項 主要な設備構成機器 機能的要求事項
コンピュータの能力	特定の設備要求事項 画像表示マトリックス 処理時間 メモリ／画像保存 PACS リンク HIS リンク
装置の能力	画質 患者の線量 線量管理対策 線量設定と手順を最適化する利用者の能力
ユーザーマニュアル	技術的訓練 運転面の訓練
国内および国際基準の遵守	電氣的安全 機械的安全 放射線安全 室内の設計／遮へい
サービスと保証	保守行動計画 品質管理行動計画 サービスソフトウェア手順への利用機会／サービス日程の理論的根拠
運転価格	導入後 5 年間の消耗品価格予測

PACS：画像保管通信システム、HIS：病院情報システム

際の重要な要素とみなすべきである。適切な基準を考慮に入れるべきである (IEC, 2010)。

### 10.3 受入試験と安定度試験

(221) 受入試験は、装置を購入した施設からの技術要員、あるいは施設の技術要員の立合いの下、装置を供給する会社が実施する。これには装置の放射線安全機能の作動性を決定するための試験を含めるべきである。新装置の臨床的な使用開始試験は、医療施設の要員の責任とすべきである。

(222) 国際基準、地域の規制要求事項、地域の勧告およびX線装置製造業者の勧告を考慮しながら、線量計の校正を含む定期的な品質管理を計画すべきである。心臓専門医による患者の線量の適切な管理を支援するため、この計画には実地的な結果 (例えば、各透視モードの線量率、シネ収集中のフレーム当たりの線量、CTスキンのプロトコル) も含めるべきである。

(223) QAPには画質と手技手順の定期的な評価も含めるべきである。画質は受入試験および安定度試験中にファントムを使って測定すべきである。デジタル式イメージング検出器に関しては、所定の画質水準を達成するため、広範囲の線量値を選択することが可能である。線量率が高ければ画質は低下せず、また画像の点検から容易に検知できないので過度の線量率を安易に指定しやすい。心臓専門医は放射線技師/技術者、医学物理士、およびメーカー技術者と協力して、画質と線量の適切なバランスを図るよう透視またはCT装置の線量を設定すべきである。

(224) この画質の定期評価を臨床的基準に基づいて実施することが可能である。例えば、欧州 DIMOND (コンソーシアム ([http://www.diamond3.org/WEB\\_DIMOND3/home.htm](http://www.diamond3.org/WEB_DIMOND3/home.htm))) は一連の心臓透視イメージング評価基準を提案している (Bernardi ら, 2001 a,b)。

(225) 心臓専門医は使用する各イメージングモダリティに関し、妥当な程度の診断情報を取得するために必要な線量を把握すべきである。インターベンション透視法に関しては、第5章で適切な係数を考察した。核医学線量に関係する関心事項は第7章で考察されている。CTスキンの手順、方法、撮影条件、およびそれらが患者の線量に及ぼす影響については第8章で考察されている。

### 10.4 スタッフ

(226) QAPの重要な側面は、スタッフの役割と責任の説明である。専門家1人当たりの手技が過剰にならないよう十分なスタッフを配置し、十分な看護および技術的支援を提供すべきである。(新しいデジタル装置に関しては) ネットワーク専門家、保守サービス要員、およ

び医学物理学の専門家の支援を受けることが望ましい。放射線を使用している循環器科では、医学物理士が積極的に参加すべきである。彼らは適切な装置を購入、使用できるように心臓専門医と協力すべきである。医学物理士は心臓専門医が線量と画質の適切な均衡をとれるよう指導し、循環器科のメンバー全員の研修を監督すべきである。

(227) QAPにはスタッフの被ばく量分析を含めるべきである。スタッフ用の校正済み線量計が利用可能でなければならない。患者の線量評価用のX線装置内の線量計に加え、透視検査室で作業する要員は適切な線量計を装着し、使用を義務付ける厳格な方針を実施すべきである。特に医学生や経験の浅いスタッフの放射線防護研修時は、電子線量計の追加も有用である。QAPでは個人線量計が常時使用されていることを確実にすべきであり、また、すべての異常な線量値について詳細に調べるべきである。

## 10.5 研 修

(228) QAPには放射線防護研修(第9章参照)を含めるべきである。放射線防護に関する初期認定は地域の要求事項に従うべきである。特別研究員や研修医に対する放射線防護研修には特別な注意を払うべきである。患者およびスタッフの線量結果に関するセミナーは優れた教材になり得るとともに、有効な品質保証活動ともなり得る。訓練については *Publication 113* (ICRP, 2009) で詳細に考察されている。

### 10.6 インターベンション透視手技による放射線誘発皮膚傷害の可能性に関する経過観察

(229) 放射線誘発皮膚傷害のリスクがある場合は、QAPで個人の臨床的経過観察のトリガー(注意喚起)レベルを規定すべきである(ICRP, 2000b; WHO, 2000; NCRP, 2010)。SRDLは患者の経過観察を含む追加的線量管理措置を開始するために使用するしきい値である(NCRP, 2010)。SRDLは、放射線量がSRDL以下の場合には完全に安全である、あるいはSRDL以上の場合には常に傷害を発生させる、という意味ではない。提案されている数値は、皮膚線量が3 Gy、KAPが500 Gy $\text{cm}^2$ 、インターベンション基準点の空気カーマが5 Gyである(NCRP, 2010)。心臓手技の場合、照射野の大きさと特定の手順によっては、150から250 Gy $\text{cm}^2$ の範囲のKAPがより適切かもしれない。これらの数値は1度の手技で最大皮膚線量が $>2$  Gyとなることを示す可能性がある。SRDLの数値は、平均的な患者に臨床上有意な傷害を発生させる可能性がある放射線量に対して経過観察を開始する目的で設定されている。特に過去にも照射を受けた皮膚に関しては、施設の判断でより低い値を使用してもよい(NCI, 2005)。

(230) トリガー(注意喚起)レベルを超えた場合、患者の主治医に患者の放射線量と電離

放射線の影響が出る可能性について報告し、適切な臨床的経過観察を計画すべきである。手技実施後の線量推定値が組織反応のしきい値に近い場合、IVR術者またはスタッフは考えうる兆候または観察されうる皮膚への影響を患者に伝えるべきである。それらの影響が出現した場合に患者が取るべき行動に関する情報も提供すべきである。SRDLを超えた事例のその後の評価は、問題の患者の経過観察とともに、QAPの一部に含めるべきである(10.7.3)。

## 10.7 線量監査

(231) 患者の線量監査と報告はQAPの重要な要素である。手技終了時には患者の線量報告書を作成し、保存し、患者の医療記録に記録すべきである。患者の線量報告書を図5.2に示した。線量報告書が利用できない場合は、手技と患者の識別情報とともに、線量値を患者の医療記録に記録すべきである(Millerら, 2012)。報告書をハードコピーでしか作成できない場合は、その後の解析のため、関連データを電子データベースに転送すべきである。報告書が電子フォーマットで作成可能な場合は、ファイルを画像と共に保存すべきである。

(232) インターベンション透視法に関し、大多数の患者について定期的に測定、記録すべきものには以下が含まれる：KAP、(X線装置から入手可能な場合)基準点空気カーマ、透視時間、シリーズの数、およびフレームの数(NCRP, 2010)。2006年中頃以降に製造された透視装置では、基準点空気カーマ測定機能が広く利用可能になっている。CT検査に関してはCTDI<sub>w</sub>、CTDI<sub>vol</sub>またはDLPである(8.3節参照)。核医学検査に関しては投与放射能である。

(233) 線量監査には既定の参考レベルの観点から当該施設の実績評価を含めるべきである(10.7.1)。心臓インターベンション手技も組織反応の発生リスクがあるため、この手技の線量監査には追加解析が必要である(10.7.3と10.7.4)。

### 10.7.1 診断参考レベル

(234) 米国と英国では1980年代後半から1990年代初頭に線量ガイドラインが最初に導入された(WallとShrimpton, 1998)。これらは*Publication 60*(ICRP, 1991)で「調査レベル」として、また*Publication 73*(ICRP, 1996)で「診断参考レベル」(DRL)としてICRP勧告に導入された。現在DRLは胸部放射線写真や乳房撮影等の実施件数の非常に多い検査のフィードバックレベルを定義する確立されたツールとなっている。委員会は引き続きそれらの利用を勧告している(ICRP, 2000 b, 2007 b,c)。

(235) DRLは医療用イメージングの目的に寄与しない患者への放射線量を回避するために使用されている。実施者はDRLを使用することで彼らが照射した放射線量と彼らの同僚が照射した放射線量を容易に比較することができる。DRLは良い診療への手引きとなるが、線量限度ではなく、術者または装置の優れた遂行能力を定義するしきい値でもない。DRLは最

適な遂行能力ではなく現在の良い診療で達成可能な遂行能力に関する手引きを提供し、異常に高い放射線量または被ばくレベルの特定に役立つよう設定されている。手技の平均線量が参考レベル以下だとしても、その手技が最適に実施されたことの保証にはならない。

(236) DRLを品質改善ツールとして使用するため、医療機関または個人開業医は彼ら自身の医療業務で実施した手技事例の放射線量データを収集する。推奨される事例数は10から50以上まで異なる。透視ガイド下インターベンション手技の事例では患者の線量の個人差が大きいため、インターベンション透視手技に関して後者の数値が提案されている(WallとShrimpton, 1998; Vañóら, 2008 b)。次に手技の平均放射線量をDRLと比較する。その部屋で実施される検査の結果、平均放射線量がDRLを上回った場合、装置を検査すべきである。装置が正常に機能し、仕様の範囲内だった場合は、手技の手順と術者の技術を検査すべきである(VañóとGonzalez, 2001)。非常に線量が低いと画質が低下する可能性があるため、この数値がDRLより大幅に低い場合も、調査が適切である。

### 10.7.2 診断参考レベルのインターベンション透視手技への適用

(237) 現在、心臓インターベンションおよび電気生理インターベンションにおいて線量レベルが減少していることを示す証拠はほとんどない。もしあるとすれば、透視ガイド下手技の複雑性が増すことで線量レベルは増加している。委員会が指摘している通り、原則として参考レベルはインターベンション透視手技における防護の最適化に有効な可能性がある(ICRP, 2007 c)。しかし、インターベンション透視手技に関する患者の線量分布は広範囲に広がり、手技の複雑性の相違、患者の体型の相違、実施方法の相違により多種多様である。委員会はこの問題の解決に向けて取り得る方法は、手技の相対的「複雑性」を考慮することだと提案した(ICRP, 2007 c)。他の方法も提案されている(NCRP, 2010)。

(238) 最近の研究では心臓血管手技に関するDRLが提案されている(Neofotistouら, 2003; Peterzolら, 2005; Balterら, 2008; D' Helftら, 2009)。一部の侵襲的診断手技(例えば、日常的な冠動脈造影法)は、比較的標準化された方法で、十分な検査件数に対して実施されているので、有効なDRLを構築することが可能かもしれない。

(239) 欧州SENTINELコンソーシアムは、冠動脈造影法と経皮経管的冠動脈形成法(PTCA)の2種類の侵襲的心臓手技の実施中に患者に照射される放射線量の参考レベルを提案した(Padovaniら, 2008)。冠動脈造影法とPTCAに関して提案されたDRLは、KAPの値がそれぞれ45 Gy $\text{cm}^2$ と85 Gy $\text{cm}^2$ 、透視時間が6.5分と15分、シネモードで700フレームと1000フレームである。コンソーシアムは、手技の複雑性と患者の体格を考慮し、提案したレベルの「許容範囲」を規定するためにさらなる研究が必要だと結論している。

(240) Bernardiらはイタリアのウディネ(Bernardiら, 2000)とその後欧州の複数の病院で研究を実施し(Neofotistouら, 2003)、患者の放射線被ばくに関係する複雑性の定量的評価

を行った。いくつかの臨床的要因，解剖学的要因，技術的要因対透視時間の間の関係を PTCA について評価した。採点方法を開発し，2つの複雑性指標を考案し，それに基づいて手技を単純，中程度，複雑の3群に分類した。一般的な患者の線量を参考レベルと比較する際は，各医療施設で実施された手技の相対的複雑性を考慮すべきである。

(241) IAEA は心臓カテーテル検査と PCI のガイドラインレベルを規定する実行可能性を決定するため国際プロジェクトを実施した (IAEA, 2009)。IAEA の報告は別の刊行物に要約されている (Balter ら, 2008)。同報告書は，PTCA 手技に関する KAP の値として，単純な手技では 100 Gy $\text{cm}^2$ ，若干複雑な手技では 125 Gy $\text{cm}^2$ ，複雑な手技では 200 Gy $\text{cm}^2$  の参考レベルの使用を勧告している。残念ながら，電気生理学アブレーションやペースメーカーの挿入等の他の心臓インターベンション手技に関しては複雑性の定量化技法がまだ開発されていない。

### 10.7.3 高線量のインターベンション透視手技の評価

(242) 参考レベルは手技ごとの平均線量を評価するために使用する。透視ガイド下インターベンションの特徴である線量の対数正規分布により，高線量の「上限」を評価するには追加手順が必要である。この上限は患者の線量が組織反応を引き起こすほど高い可能性がある事例を代表するため，特に興味深い。

(243) SRDL 以上の放射線量が必要な事例 (10.6 節) を特定し，定期的に検査室の所長または施設の品質管理責任者に報告すべきである。高放射線量の患者が必ず適切な指導と経過観察を受けるようにするために月次報告が有効である。

(244) この種の各手技に関し，報告書には患者の識別因子，手技の実施中に照射された線量，手技の種類，手技が実施された部屋，術者の氏名，患者の過去の侵襲的手技の数 (総皮膚線量の推定に不可欠)，および他の特別な注意事項を記載すべきである。この報告書の目的は高線量を受けたすべての患者が必ず十分な情報を提供されていること，また適切な経過観察が計画，実施されているようにすることである (Miller ら, 2010 a)。

(245) 放射線傷害を誘発する可能性がある事例が出た場合，すぐ次の検査室の品質保証会議で検討すべきである。この検討には，入手可能なすべての診断，計画されている患者の経過観察，およびその結果を含めるべきである。傷害が放射線誘発によるものでないことが明らかでない場合を除き，臨床学的見地から放射線の適切な使用について手技を再検討すべきである (Miller ら, 2010 a)。

### 10.7.4 インターベンション透視手技に関する皮膚線量の評価

(246) 患者の防護の基本的側面が守られていることを確認するため (例えば，適切な絞り，ウェッジフィルターの使用，皮膚の同一部位内への照射野の高度の集中の回避)，患者集団における皮膚線量分布を測定し (Vaňoř ら, 1997 a; Guibelalde ら, 2003)，KAP と施設で実

施される手技の皮膚線量との関係を規定することが有効である (IAEA, 2010)。皮膚線量は、患者の皮膚に線量計を直接装着させ、特殊フィルムで測定することができる。他の方法でも測定可能である (Miller ら, 2012)。これらの測定については認定医学物理士に相談すべきである。近い将来、自動化された方法を使って皮膚線量の推定値と皮膚線量の分布図をリアルタイムで取得することが可能になるかもしれない (Khodadadegan ら, 2010 ; Miller ら, 2012)。





## 参考文献

- Abada, H.T., Larchez, C., Daoud, B., et al., 2006. MDCT of the coronary arteries : feasibility of low-dose CT with ECG-pulsed tube current modulation to reduce radiation dose. *AJR Am. J. Roentgenol.* 186, S 387-S 390.
- Abdulla, J., Abildstrom, S.Z., Gotzsche, O., et al., 2007. 64-multislice detector computed tomography coronary angiography as potential alternative to conventional coronary angiography : a systematic review and meta-analysis. *Eur. Heart J.* 28, 3042-3050.
- Achenbach, S., Marwan, M., Ropers, D., et al., 2010. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition. *Eur. Heart J.* 31, 340-346.
- Acosta, R., Hoffmeister, L., Roman, R., et al., 2006. Systematic review of population-based studies of the prevalence of cataracts. *Arch. Soc. Esp. Oftalmol.* 81, 509-516.
- ACR, 1992. Proceedings of the ACR/FDA Workshop on Fluoroscopy. Strategies for Improvement in Performance, Radiation Safety and Control. American College of Radiology, Reston, VA.
- ACR, 2008. ACR Practice Guideline for Imaging Pregnant or Potentially Pregnant Adolescents and Women with Ionizing Radiation. Practice Guidelines and Technical Standards 2008. American College of Radiology, Reston, VA, pp. 23-37. Available at : <[http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality\\_safety/guidelines/dx/Pregnancy.aspx](http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/guidelines/dx/Pregnancy.aspx)> (last accessed 11 August 2010).
- ACR, 2009. ACR-SNM-SPR Practice Guideline for the Performance of Cardiac Scintigraphy. American College of Radiology, Reston, VA. Available at : <[http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality\\_safety/guidelines/nuc\\_med/cardiac\\_scintigraphy.aspx](http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/guidelines/nuc_med/cardiac_scintigraphy.aspx)> (last accessed 16 September 2011).
- ACR, 2010. American College of Radiology ACR Appropriateness Criteria. Clinical Condition : Chronic Chest Pain-High Probability of Coronary Artery Disease. American College of Radiology, Reston, VA. Available at : <[http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality\\_safety/app\\_criteria.aspx](http://www.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/app_criteria.aspx)> (last accessed 2 January 2011).
- Allan, J.M., 2008. Genetic susceptibility to radiogenic cancer in humans. *Health Phys.* 95, 677-686.
- American College of Cardiology/American Heart Association Ad Hoc Task Force on Cardiac Catheterization (ACC/AHA), 1991. ACC/AHA guidelines for cardiac catheterization and cardiac catheterization laboratories. *J. Am. Coll. Cardiol.* 18, 1149-1182.
- American College of Cardiology Cardiac Catheterization Committee, 1995. Use of radiographic devices by cardiologists. *J. Am. Coll. Cardiol.* 25, 1738-1739.
- Anderson, H.V., Shaw, R.E., Brindis, R.G., et al., 2002. A contemporary overview of percutaneous coronary interventions. The American College of Cardiology-National Cardiovascular Data Registry (ACC-NCDR). *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 1096-1103.
- Andreassi, M.G., 2009. Radiation risk from pediatric cardiac catheterization : friendly fire on children with congenital heart disease. *Circulation* 120, 1847-1849.
- Andreassi, M.G., Ait-Ali, L., Botto, N., et al., 2006. Cardiac catheterization and long-term chromosomal damage in children with congenital heart disease. *Eur. Heart J.* 27, 2703-2708.
- Bacher, K., Bogaert, E., Lapere, R., et al., 2005. Patient-specific dose and radiation risk estimation in pediatric cardiac catheterization. *Circulation* 111, 83-89.

- Balter, S., 2001 a. *Interventional Fluoroscopy. Physics, Technology and Safety*. Wiley-Liss, New York.
- Balter, S., 2001 b. Stray radiation in the cardiac catheterization laboratory. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 183–188.
- Balter, S., Miller, D.L., Vañó, E., et al., 2008. A pilot study exploring the possibility of establishing guidance levels in x-ray directed interventional procedures. *Med. Phys.* 35, 673–680.
- Balter, S., Hopewell, J.W., Miller, D.L., et al., 2010. Fluoroscopically guided interventional procedures : a review of radiation effects on patients' skin and hair. *Radiology* 254, 326–341.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2000. Clinical and technical determinants of the complexity of percutaneous transluminal coronary angioplasty procedures : analysis in relation to radiation exposure parameters. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 51, 1–9, discussion 10.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2001 a. A method based on DIMOND quality criteria to evaluate imaging in diagnostic and interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 167–172.
- Bernardi, G., Padovani, R., Morocutti, G., et al., 2001 b. Quality criteria for cardiac images in diagnostic and interventional cardiology. *Br. J. Radiol.* 74, 852–855.
- Bernardi, G., Padovani, R., Trianni, A., et al., 2008. The effect of fellows' training in invasive cardiology on radiological exposure of patients. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128, 72–76.
- Bhatti, P., Sigurdson, A.J., Mabuchi, K., 2008. Can low-dose radiation increase risk of cardiovascular disease? *Lancet* 372, 697–699.
- Bischoff, B., Hein, F., Meyer, T., et al., 2009. Impact of a reduced tube voltage on CT angiography and radiation dose : results of the PROTECTION I study. *JACC Cardiovasc. Imag.* 2, 940–946.
- Blettner, M., Schlehofer, B., Samkange-Zeeb, F., et al., 2007. Medical exposure to ionising radiation and the risk of brain tumours : Interphone study group, Germany. *Eur. J. Cancer* 43, 1990–1998.
- Block, M., Bove, A.A., Ritman, E.L., 1984. Coronary angiographic examination with the dynamic spatial reconstructor. *Circulation* 70, 209–216.
- Boden, W.E., O'Rourke, R.A., Teo, K.K., et al., 2007. Optimal medical therapy with or without PCI for stable coronary disease. *N. Engl. J. Med.* 356, 1503–1516.
- Bogaert, E., Bacher, K., Thierens, H., 2008. A large-scale multicentre study in Belgium of dose area product values and effective doses in interventional cardiology using contemporary x-ray equipment. *Radiat. Prot. Dosimetry* 128, 312–323.
- Bogaert, E., Bacher, K., Lemmens, K., et al., 2009. A large-scale multicentre study of patient skin doses in interventional cardiology : dose-area product action levels and dose reference levels. *Br. J. Radiol.* 82, 303–312.
- Bongartz, G., Golding, S.J., Jurik, A.G., et al., 2000. European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography. EUR 16262. The European Commission's Study Group on Development of Quality Criteria for Computed Tomography. Available at : <<http://www.dr.dk/guidelines/ct/quality>> (last accessed 4 October 2012).
- Bongartz, G., Golding, S.J., Jurik, A.G., et al., 2004. CT Quality Criteria. European Commission. Available at : <[http://www.msct.eu/CT\\_Quality\\_Criteria.htm](http://www.msct.eu/CT_Quality_Criteria.htm)> (last accessed 4 October 2012).
- Bonhoeffer, P., Boudjemline, Y., Qureshi, S.A., et al., 2002. Percutaneous insertion of the pulmonary valve. *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 1664–1669.
- Bor, D., Sancak, T., Toklu, T., et al., 2008. Effects of radiologists' skill and experience on patient doses in interventional examinations. *Radiat. Prot. Dosimetry* 129, 32–35.
- Bor, D., Olgar, T., Toklu, T., et al., 2009. Patient doses and dosimetric evaluations in interventional cardiology. *Phys. Med.* 25, 31–42.
- Brindis, R.G., Douglas, P.S., Hendel, R.C., et al., 2005. ACCF/ASNC appropriateness criteria for single photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging (SPECT MPI) : a report of the American College of Cardiology Foundation Quality Strategic Directions Committee Appropriateness Criteria Working Group and the American Society of Nuclear Cardiology endorsed by the American Heart Association. *J. Am. Coll. Cardiol.* 46, 1587–1605.

- Bryk, S.G., Censullo, M.L., Wagner, L.K., et al., 2006. Endovascular and interventional procedures in obese patients : a review of procedural technique modifications and radiation management. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 27-33.
- Carozza, S.E., Wrensch, M., Miike, R., et al., 2000. Occupation and adult gliomas. *Am. J. Epidemiol.* 152, 838-846.
- 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.
- Cheng, T.O., 2004. The current state of cardiology in China. *Int. J. Cardiol.* 96, 425-439.
- Chida, K., Saito, H., Otani, H., et al., 2006. Relationship between fluoroscopic time, dose-area product, body weight, and maximum radiation skin dose in cardiac interventional procedures. *AJR Am. J. Roentgenol.* 186, 774-778.
- Chida, K., Ohno, T., Kakizaki, S., et al., 2010. Radiation dose to the pediatric cardiac catheterization and intervention patient. *AJR Am. J. Roentgenol.* 195, 1175-1179.
- Christner, J.A., Kofler, J.M., McCollough, C.H., 2010. Estimating effective dose for CT using dose-length product compared with using organ doses : consequences of adopting International Commission on Radiological Protection Publication 103 or dual-energy scanning. *AJR Am. J. Roentgenol.* 194, 881-889.
- 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.
- Codman, E.A., 1896. The cause of burns from x-rays. *Bos. Med. Surg. J.* 136, 610-611.
- Daniel, J., 1896. The x-rays. *Science* 3, 562.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., St. Germain, J., et al., 2007 a. Nuclear granny-reply. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 904-905.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., St. Germain, J., et al., 2007 b. Tl-201 stress tests and homeland security. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 582-588.
- Dauer, L.T., Thornton, R.H., Solomon, S.B., et al., 2010 a. Unprotected operator eye lens doses in oncologic interventional radiology are clinically significant : estimation from patient kerma-area-product data. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 21, 1859-1861.
- Dauer, L.T., Brooks, A.L., Hoel, D.G., et al., 2010 b. Review and evaluation of updated research on the health effects associated with low-dose ionising radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry* 140, 103-136.
- Dauer, L.T., Thornton, R.H., Miller, D.L., et al., 2012. Radiation management for interventions using fluoroscopic or computed tomographic guidance during pregnancy : a joint guideline of the Society of Interventional Radiology and the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe with endorsement by the Canadian Interventional Radiology Association. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 19-32.
- Davis, W., 2006. Mapping improvements in molecular imaging. *Med. Imag.* Available at : <[http://www.imagingeconomics.com/issues/articles/MI\\_2006-05\\_01.asp](http://www.imagingeconomics.com/issues/articles/MI_2006-05_01.asp)> (last accessed 31 December 2010).
- Dendy, P.P., 2008. Radiation risks in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* 81, 1-7.
- DePuey, E.G., 2006. Imaging guidelines for nuclear cardiology procedures : a report of the American Society of Nuclear Cardiology Quality Assurance Committee. *J. Nucl. Cardiol.* 13, e 21-e 171.
- D' Helft, C.J., Brennan, P.C., McGee, A.M., et al., 2009. Potential Irish dose reference levels for cardiac interventional examinations. *Br. J. Radiol.* 82, 296-302.
- Douglas, P.S., Khandheria, B., Stainback, R.F., et al., 2008. ACCF/ASE/ACEP/AHA/ASNC/SCAI/SCCT/SCMR 2008 appropriateness criteria for stress echocardiography : a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriateness Criteria Task Force, American Society of Echocardiography, American College of Emergency Physicians, American Heart Association, American Society of Nuclear Cardiology, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Cardiovascular Computed Tomography, and Society for Cardiovascular Magnetic Resonance en-

- dorsed by the Heart Rhythm Society and the Society of Critical Care Medicine. *J. Am. Coll. Cardiol.* 51, 1127–1147. Available at : <<http://content.onlinejacc.org/cgi/content/full/51/11/1127>> (last accessed 1 January 2011).
- Douglas, P.S., Carr, J.J., Cerqueira, M.D., et al., 2012. Developing an action plan for patient radiation safety in adult cardiovascular medicine : Proceedings from the Duke University Clinical Research Institute/American College of Cardiology Foundation/American Heart Association think tank held on February 28, 2011. *J. Am. Coll. Cardiol.* 59, 1833–1847.
- Dromi, S., Wood, B.J., Oberoi, J., et al., 2006. Heavy metal pad shielding during fluoroscopic interventions. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 1201–1206.
- Earls, J.P., Schrack, E.C., 2009. Prospectively gated low-dose CCTA : 24 months experience in more than 2,000 clinical cases. *Int. J. Cardiovasc. Imag.* 25, 177–187.
- EC, 2000. Guidelines on Education and Training in Radiation Protection for Medical Exposures. Radiation Protection 116. European Commission, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg. Available at : <[http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation\\_protection/doc/publication/116.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/116.pdf)> (last accessed 2 January 2011).
- Efstathopoulos, E., Makrygiannis, S.S., Kottou, S., et al., 2003. Medical personnel and patient dosimetry during coronary angiography and intervention. *Phys. Med. Biol.* 48, 3059–3068.
- Einstein, A.J., 2009. Medical imaging : the radiation issue. *Nat. Rev. Cardiol.* 6, 436–438.
- Einstein, A.J., Moser, K.W., Thompson, R.C., et al., 2007 a. Radiation dose to patients from cardiac diagnostic imaging. *Circulation* 116, 1290–1305.
- Einstein, A.J., Henzlova, M.J., Rajagopalan, S., 2007 b. Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA* 298, 317–323.
- Einstein, A.J., Sanz, J., Dellegrottaglie, S., et al., 2008. Radiation dose and cancer risk estimates in 16-slice computed tomography coronary angiography. *J. Nucl. Cardiol.* 15, 232–240.
- Einstein, A.J., Elliston, C.D., Arai, A.E., et al., 2010. Radiation dose from single heartbeat coronary CT angiography performed using a 320 detector-row volume scanner. *Radiology* 254, 698–704.
- EU, 1997. Council Directive 97/43 Euratom, on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure, and repealing Directive 84/466 Euratom. Official Journal of the European Communities L 180, 22–27. Available at : <<http://eur-lex.europa.eu/LexUri-Serv/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1997:180:0022:0027:EN:PDF>> (last accessed 4 October 2012).
- Faulkner, K., Werduch, A., 2008 a. An estimate of the collective dose to the European population from cardiac x-ray procedures. *Br. J. Radiol.* 81, 955–962.
- Faulkner, K., Werduch, A., 2008 b. Analysis of the frequency of interventional cardiology in various European countries. *Rad. Prot. Dosimetry* 129, 74–76.
- FDA, 1994. Public Health Advisory. Avoidance of Serious X-ray Induced Skin Injuries to Patients during Fluoroscopically Guided Procedures. Center for Devices and Radiological Health, US Food and Drug Administration, Rockville, MD. Available at : <<http://www.fda.gov/MedicalDevices/Safety/AlertsandNotices/PublicHealthNotifications/ucm063084.htm>> (last accessed 29 July 2010).
- Finkelstein, M.M., 1998. Is brain cancer an occupational disease of cardiologists? *Can. J. Cardiol.* 14, 1385–1388.
- Fletcher, D.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2002. Comparison of four techniques to estimate radiation dose to skin during angiographic and interventional radiology procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 13, 391–397.
- Frazier, T.H., Richardson, J.B., Fabre, V.C., et al., 2007. Fluoroscopy-induced chronic radiation skin injury : a disease perhaps often overlooked. *Arch. Dermatol.* 143, 637–640.
- Gerber, T.C., Stratmann, B.P., Kuzo, R.S., et al., 2005. Effect of acquisition technique on radiation dose and image quality in multidetector row computed tomography coronary angiography with submillimeter collimation. *Invest. Radiol.* 40, 556–563.

- Gerber, T.C., Carr, J.J., Arai, A.E., et al., 2009. Ionizing radiation in cardiac imaging. A Science Advisory from the American Heart Association Committee on Cardiac Imaging of the Council on Clinical Cardiology and Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention of the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention. *Circulation* 119, 1056–1065.
- Germano, J.J., Day, G., Gregorious, D., et al., 2005. A novel radiation protection drape reduces radiation exposure during fluoroscopy guided electrophysiology procedures. *J. Invasive Cardiol.* 17, 469–472.
- Gibbons, R.J., Miller, T.D., Hodge, D., et al., 2008. Application of appropriateness criteria to stress single-photon emission computed tomography sestamibi studies and stress echocardiograms in an academic medical center. *J. Am. Coll. Cardiol.* 51, 1283–1289.
- Gibson, P.B., Demus, D., Noto, R., et al., 2002. Low event rate for stress-only perfusion imaging in patients evaluated for chest pain. *J. Am. Coll. Cardiol.* 39, 999–1004.
- Goldstein, J.A., Balter, S., Cowley, M., et al., 2004. Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 63, 407–411.
- Guibelalde, E., Vanñó, E., Gonzalez, L., et al., 2003. Practical aspects for the evaluation of skin doses in interventional cardiology using a new slow film. *Br. J. Radiol.* 76, 332–336.
- Hall, E.J., 2009. Radiation biology for pediatric radiologists. *Pediatr. Radiol.* 39(Suppl. 1), S 57–S 64.
- Hardell, L., Mild, K.H., Pählson, A., et al., 2001. Ionizing radiation, cellular telephones and the risk for brain tumours. *Eur. J. Cancer Prev.* 10, 523–529.
- Hausleiter, J., Meyer, T., Hermann, F., et al., 2009. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography. *JAMA* 301, 500–507.
- Hausleiter, J., Martinoff, S., Hadamitzky, M., et al., 2010. Image quality and radiation exposure with a low tube voltage protocol for coronary CT angiography. Results of the PROTECTION II Trial. *JACC Cardiovasc. Imaging* 3, 1113–1123.
- Hendel, R.C., Berman, D.S., Di, C.M.F., et al., 2009 a. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the American Society of Nuclear Cardiology, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and the Society of Nuclear Medicine. *Circulation* 119, 561–587.
- Hendel, R.C., Berman, D.S., Di, C.M.F., et al., 2009 b. ACCF/ASNC/ACR/AHA/ASE/SCCT/SCMR/SNM 2009 appropriate use criteria for cardiac radionuclide imaging: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the American Society of Nuclear Cardiology, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and the Society of Nuclear Medicine. *J. Am. Coll. Cardiol.* 53, 2201–2229.
- Hendel, R.C., Cerqueira, M., Douglas, P.S., et al., 2010. A multicenter assessment of the use of single-photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging with appropriateness criteria. *J. Am. Coll. Cardiol.* 55, 156–162.
- Henzlova, M.J., Cerqueira, M.D., Hansen, C.L., et al., 2009. ASNC Imaging Guidelines for Nuclear Cardiology Procedures. Stress Protocols and Tracers. American Society of Nuclear Cardiology, Bethesda, Maryland. Available at: <<http://www.asnc.org/imageuploads/ImagingGuidelines-StressProtocols021109.pdf>> (last accessed 2 January 2011).
- Hernanz-Schulman, M., Goske, M.J., Bercha, I.H., et al., 2011. Pause and pulse: ten steps that help manage radiation dose during pediatric fluoroscopy. *AJR Am. J. Roentgenol.* 197, 475–481.

- Herold, D.M., Hanlon, A.L., Hanks, G.E., 1999. Diabetes mellitus : a predictor for late radiation morbidity. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 43, 475–479.
- Hesse, B., Tagil, K., Cuocolo, A., et al., 2005. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 32, 855–897. Available at : <[http://www.eanm.org/scientific\\_info/guidelines/gl\\_cardio\\_myocard\\_perf.pdf](http://www.eanm.org/scientific_info/guidelines/gl_cardio_myocard_perf.pdf)> (last accessed 1 January 2011).
- Hidajat, N., Wust, P., Felix, R., et al., 2006. Radiation exposure to patient and staff in hepatic chemoembolization : risk estimation of cancer and deterministic effects. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 29, 791–796.
- Hirshfeld Jr., J.W., Balter, S., Brinker, J.A., et al., 2004. ACCF/AHA/HRS/SCAI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures : a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 2259–2282.
- Hirshfeld Jr., J.W., Balter, S., Brinker, J.A., et al., 2005. ACCF/AHA/HRS/SCAI clinical competence statement on physician knowledge to optimize patient safety and image quality in fluoroscopically guided invasive cardiovascular procedures : a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association/American College of Physicians Task Force on Clinical Competence and Training. *Circulation* 111, 511–532.
- Hounsfield, G.N., 1979. Computed Medical Imaging. Available at : <[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/medicine/laureates/1979/hounsfield-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/hounsfield-lecture.pdf)> (last accessed 4 October 2012).
- Huang, B., Li, J., Law, M.W., et al., 2010. Radiation dose and cancer risk in retrospectively and prospectively ECG-gated coronary angiography using 64-slice multidetector CT. *Br. J. Radiol.* 83, 152–158.
- Hunter, C., Ziadi, M., Etele, J., et al., 2010. New effective dose estimates for rubidium-82 based on dynamic PET/CT imaging in humans. *J. Nucl. Med.* 51 (Suppl. 2), 1429. Available at : <[http://jnumedmtg.snmmjournals.org/cgi/content/meeting\\_abstract/51/2\\_MeetingAbstracts/1429](http://jnumedmtg.snmmjournals.org/cgi/content/meeting_abstract/51/2_MeetingAbstracts/1429)> (last accessed 2 January 2011).
- Hymes, S.R., Strom, E.A., Fife, C., 2006. Radiation dermatitis : clinical presentation, pathophysiology, and treatment. *J. Am. Acad. Dermatol.* 54, 28–46.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2001. Training in Radiation Protection and the Safe Use of Radiation Sources. Safety Report Series No. 20. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2009. Establishing Guidance Levels in X-ray Guided Medical Interventional Procedures : a Pilot Study. Safety Reports Series No. 59. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2010. Patient Dose Optimization in Fluoroscopically Guided Interventional Procedures. IAEATECDOC-1641. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* 1(3).
- ICRP, 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 1). *Ann. ICRP* 2(3/4).
- ICRP, 1988. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. *Ann. ICRP* 18(1–4).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1–3).
- ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. *Ann. ICRP* 26(2).
- ICRP, 1998. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals (Addendum to ICRP Publication 53). ICRP Publication 80. *Ann. ICRP* 28(3).
- ICRP, 2000 a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. *Ann. ICRP* 30(1).

- ICRP, 2000 b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30(2).
- ICRP, 2000 c. Managing patient dose in computed tomography. ICRP Publication 87. Ann. ICRP 30(4).
- ICRP, 2001. Radiation and your patient—a guide for medical practitioners. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
- ICRP, 2007 a. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP Publication 102. Ann. ICRP 37(1).
- ICRP, 2007 b. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2007 c. 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, 2009. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. Ann. ICRP 39(5).
- ICRP, 2010. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures outside the imaging department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40(6).
- ICRP, 2011. Statement on Tissue Reactions. ICRP. Seoul, Korea. Available at : <<http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Statement%20on%20Tissue%20Reactions.pdf>> (last accessed 9 May 2011).
- ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- ICRP, forthcoming. Radiological protection in pediatric and diagnostic interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann. ICRP.
- ICRU, 2005. Patient dosimetry for X rays used in medical imaging. ICRU Report 74. J. ICRU 5, 1-113.
- IEC, 1993. Medical Electrical Equipment. Part 1-61223. Evaluation and Routine Testing in Medical Imaging Departments. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2000. Medical Electrical Equipment. Part 2-43. Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Interventional Procedures. IEC 60601-2-43. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2004. Medical Electrical Equipment. Technical Report 60788. Glossary of Defined Terms. IEC TR 60788, second ed. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2009. Medical Electrical Equipment. Part 2-44. Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Computed Tomography. International Standard IEC 60601-2-44, third ed. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC, 2010. Medical Electrical Equipment. Part 2-43 : Particular Requirements for the Safety of X-ray Equipment for Interventional Procedures. IEC 60601-2-43, second ed. International Electrotechnical Commission, Geneva. Jakobs, T.F., Becker, C.R., Ohnesorge, B., et al., 2002. Multislice helical CT of the heart with retrospective ECG gating : reduction of radiation exposure by ECG-controlled tube current modulation. *Eur. Radiol.* 12, 1081-1086.
- Justino, H., 2006. The ALARA concept in pediatric cardiac catheterization : techniques and tactics for managing radiation dose. *Pediatr. Radiol.* 36, 146-153.
- Kahn, H.A., Liebowitz, H.M., Ganley, J.P., et al., 1977. The Framingham Eye Study. I. Outline and major prevalence findings. *Am. J. Epidemiol.* 106, 17-32.
- Karipidis, K.K., Benke, G., Sim, M.R., et al., 2007. Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and the risk of glioma. *Occup. Med. (Lond.)* 57, 518-524.
- Khodadadegan, Y., Zhang, M., Pavlicek, W., et al., 2010. Automatic monitoring of localized skin dose with fluoroscopic and interventional procedures. *J. Digit. Imaging* 24, 626-639.
- 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. Dosimetry* 133, 227–233.
- Kim, K.P., Einstein, A.J., Berrington de Gonzalez, A., 2009. Coronary artery calcification screening : estimated radiation dose and cancer risk. *Arch. Intern. Med.* 169, 1188–1194.
- Kim, C., Vasaiwala, S., Haque, F., Pratap, K., Vidovich, M.I., 2010. Radiation safety among cardiology fellows. *Am. J. Cardiol.* 106, 125–128.
- King, J.N., Champlin, A.M., Kelsey, C.A., et al., 2002. Using a sterile disposable protective surgical drape for reduction of radiation exposure to interventionalists. *AJR Am. J. Roentgenol.* 178, 153–157.
- Kleiman, N.J., 2007. Radiation Cataract. Working Party on Research Implications on Health and Safety Standards of the Article 31 Group of Experts. Radiation Protection 145 EU Scientific Seminar 2006. *New Insights in Radiation Risk and Basic Safety Standards.* European Commission, Brussels, pp. 81–95. Available at : <[http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/publication/doc/145\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/publication/doc/145_en.pdf)> (last accessed 28 July 2010).
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2009. Occupational health hazards in the interventional laboratory : time for a safer environment. *Heart Rhythm* 6, 439–444.
- Koenig, T.R., Wolff, D., Mettler, F.A., et al., 2001 a. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 1. Characteristics of radiation injury. *AJR Am. J. Roentgenol.* 177, 3–11.
- Koenig, T.R., Mettler, F.A., Wagner, L.K., 2001 b. Skin injuries from fluoroscopically guided procedures. Part 2. Review of 73 cases and recommendations for minimizing dose delivered to patient. *AJR Am. J. Roentgenol.* 177, 13–20.
- Kuon, E., Schmitt, M., Dahm, J.B., 2002. Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding. *Am. J. Cardiol.* 89, 44–49.
- Kuon, E., Birkel, J., Schmitt, M., et al., 2003. Radiation exposure benefit of a lead cap in invasive cardiology. *Heart* 89, 1205–1210.
- Kuon, E., Dahm, J., Empen, K., et al., 2004. Identification of less-irradiating tube angulations in invasive cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 1420–1428.
- Laskey, W.K., Kimmel, S., Krone, R.J., 2000. Contemporary trends in coronary intervention : a report from the Registry of the Society for Cardiac Angiography and Interventions. *Cathet. Cardiovasc. Intervent.* 49, 19–22.
- Laskey, W.K., Williams, D.O., Vlachos, H.A., et al., 2001. Changes in the practice of percutaneous coronary intervention : a comparison of enrollment waves in the National Heart, Lung, and Blood Institute (NHLBI) Dynamic Registry. *Am. J. Cardiol.* 87, 964–969.
- Levi, D.S., Alejos, J.C., Moore, J.W., 2003. Future of interventional cardiology in pediatrics. *Curr. Opin. Cardiol.* 18, 79–90.
- Limacher, M.C., Douglas, P.S., Germano, G., et al., 1998. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 31, 892–913.
- Linet, M.S., Slovis, T.L., Miller, D.L., et al., 2012. Cancer risks associated with external radiation from diagnostic imaging procedures. *CA Cancer J. Clin.* 62, 75–100.
- Loevinger, R., Budinger, T., Watson, E., 1988. *MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations.* Society of Nuclear Medicine, New York.
- Lundberg, T.M., Gray, P.J., Bartlett, M.L., 2002. Measuring and minimizing the radiation dose to nuclear medicine technologists. *J. Nucl. Med. Technol.* 30, 25–30.
- Maeder, M., Verdun, F.R., Stauffer, J.C., et al., 2005. Radiation exposure and radiation protection in interventional cardiology. *Kardiovaskuläre Medizin.* 8, 124–132.
- Maeder, M., Brunner-La Rocca, H.P., Wolber, T., et al., 2006. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Catheter Cardiovasc. Interv.* 67, 18–23.
- Mahmariyan, J.J., 2010. Stress only myocardial perfusion imaging : is it time for a change? *J. Nucl. Car-*



- diol. 17, 529–535.
- Martin, C.J., 2009. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat. Prot. Dosimetry* 136, 140–157.
- Martinez, L.C., Vanñó, E., Gutierrez, F., et al., 2007. Patient doses from fluoroscopically guided cardiac procedures in pediatrics. *Phys. Med. Biol.* 52, 4749–4759.
- MARTIR (Multimedia and Audiovisual Radiation Protection Training in Interventional Radiology), 2002. CD-ROM. Radiation Protection 119. European Commission. Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg. Available at: <[http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation\\_protection/publications\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/publications_en.htm)> (last accessed 4 October 2012).
- Matanoski, G.M., Seltser, R., Sartwell, P.E., et al., 1975. The current mortality rates of radiologists and other physician specialists: specific causes of death. *Am. J. Epidemiol.* 101, 199–210.
- McCollough, C.H., 2008. CT dose: how to measure, how to reduce. *Health Phys.* 95, 508–517.
- McCollough, C.H., Schueler, B.A., Atwell, T.D., et al., 2007. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? *Radiographics* 27, 909–918.
- McCormick, V.A., Schultz, C.C., Hollingsworth-Schuler, V., et al., 2002. Reducing radiation dose in the cardiac catheterization laboratory by design alterations and staff education. *Am. J. Cardiol.* 90, 903–905.
- McFadden, S.L., Mooney, R.B., Shepherd, P.H., 2002. X-ray dose and associated risks from radiofrequency catheter ablation procedures. *Br. J. Radiol.* 75, 253–265.
- McGale, P., Darby, S.C., 2008. Commentary: a dose-response relationship for radiation-induced heart disease—current issues and future prospects. *Int. J. Epidemiol.* 37, 518–523.
- McGeoghegan, D., Binks, K., Gillies, M., et al., 2008. The non-cancer mortality experience of male workers at British Nuclear Fuels plc, 1946–2005. *Int. J. Epidemiol.* 37, 506–518.
- Meier, B., 2010. Cardiac Catheterization Interventions: European Statistics 2007/2008. Presented at Euro PCR, Paris, France. May 25–28, 2010. Available at: <<http://www.escardio.org/communities/EAPCI/Documents/Cardiac-catheterization-Interventions-stats-07-08-EAPCI-Assembly-may-2010.pdf>> (last accessed 22 February 2011).
- Miller, D.L., 2008. Overview of contemporary interventional fluoroscopy procedures. *Health Phys.* 95, 638–644.
- Miller, D.L., Balter, S., Noonan, P.T., et al., 2002. Minimizing radiation-induced skin injury in interventional radiology procedures. *Radiology* 225, 329–336.
- Miller, D.L., Balter, S., Schueler, B.A., et al., 2010 a. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. *Radiology* 257, 321–332.
- Miller, D.L., Vanñó, E., Bartal, G., et al., 2010 b. 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. Interv. Radiol.* 33, 230–239.
- Miller, J.A., Raichlin, E., Williamson, E.E., et al., 2010 c. Evaluation of coronary CTA appropriateness criteria in an academic medical center. *J. Am. Coll. Radiol.* 7, 125–131.
- Miller, D.L., Balter, S., Dixon, R.G., et al., 2012. Quality improvement guidelines for recording patient radiation dose in the medical record for fluoroscopically guided procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 11–18.
- Monaco, J.L., Bowen, K., Tadros, P.N., et al., 2003. Iatrogenic deep musculocutaneous radiation injury following percutaneous coronary intervention. *J. Invasive Cardiol.* 15, 451–453.
- Mond, H.G., Irwin, M., Morillo, C., et al., 2004. The world survey of cardiac pacing and cardioverter defibrillators: calendar year 2001. *Pacing Clin. Electrophysiol.* 27, 955–964.
- Moore, W.E., Ferguson, G., Rohrmann, C., 1980. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med. Phys.* 7, 8–12.
- Moran, A., Gu, D., Zhao, D., et al., 2010. Future cardiovascular disease in China: Markov model and risk factor scenario projections from the coronary heart disease policy model—China. *Circ. Cardio-*

- vasc. Qual. Outcomes 3, 243–252.
- Morin, R.L., Gerber, T.C., McCollough, C.H., 2003. Radiation dose in computed tomography of the heart. *Circulation* 107, 917–922.
- Moss, A.J., Zareba, W., Hall, W.J., et al., 2002. Prophylactic implantation of a defibrillator in patients with myocardial infarction and reduced ejection fraction. *N. Engl. J. Med.* 346, 877–883.
- NCI, 2005. *Interventional Fluoroscopy: Reducing Radiation Risks for Patients and Staff*. NIH Publication No. 05–5286. National Cancer Institute, Bethesda, MD. Available at: <[http://www.cancer.gov/images/Documents/45\\_bae\\_965-697\\_a-4\\_de\\_8-9\\_dae-b\\_77222\\_e\\_0\\_e\\_79\\_d/InterventionalFluor.pdf](http://www.cancer.gov/images/Documents/45_bae_965-697_a-4_de_8-9_dae-b_77222_e_0_e_79_d/InterventionalFluor.pdf)> (last accessed 1 January 2011).
- NCRP, 1993. *Limitation of Exposure to Ionizing Radiation*. NCRP Report No. 116. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1995. *Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Effective Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation*. NCRP Report No. 122. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2000. *Radiation Protection for Procedures Performed Outside the Radiology Department*. NCRP Report No. 133. 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.
- Neofotistou, V., Vanñó, E., Padovani, R., et al., 2003. Preliminary reference levels in interventional cardiology. *Eur. Radiol.* 13, 2259–2263.
- NHS, 1993. *What do we mean by appropriate health care? Report of a working group prepared for the Director of Research and Development of the NHS Management Executive*. *Qual. Health Care* 2, 117–123.
- NRC, 2006. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR-VII Phase 2*. National Academy Press, Washington, DC.
- Ortiz, P., Vanñó, E., Padovani, R., et al., 2004. Influence of the Interventional Equipment Performance on Patient Dose and Image Quality. Results of a Survey under the IAEA International Action Plan for the Radiological Protection of Patients. *ECR (European Congress of Radiology)*, Vienna.
- Padovani, R., Rodella, C.A., 2001. Staff dosimetry in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 99–103.
- Padovani, R., Bernardi, G., Quai, E., et al., 2005. Retrospective evaluation of occurrence of skin injuries in interventional cardiac procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry* 117, 247–250.
- Padovani, R., Vano, E., Trianni, et al., 2008. Reference levels at European level for cardiac interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry* 129, 104–107.
- 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. Dosimetry* 144, 437–441.
- Pages, J., 2000. Effective dose and dose to the crystalline lens during angiographic procedures. *JBR-BTR: Organe de la Societe Royale Belge de Radiologie* 83, 108–110.
- Pasciak, A.S., Jones, A.K., 2011. Does ‘spreading’ skin dose by rotating the C-arm during an intervention work? *J. Vasc. Interv. Radiol.* 22, 443–452.
- Patel, M.R., Spertus, J.A., Brindis, R.G., et al., 2005. ACCF proposed method for evaluating the appropriateness of cardiovascular imaging. *J. Am. Coll. Cardiol.* 46, 1606–1613.
- Patel, M.R., Dehmer, G.J., Hirshfeld, J.W., et al., 2009. ACCF/SCAI/STS/AATS/AHA/ASNC 2009 appropriateness criteria for coronary revascularization: a report by the American College of Cardiology Foundation Appropriateness Criteria Task Force, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Thoracic Surgeons, American Association for Thoracic Surgery, American

- Heart Association, and the American Society of Nuclear Cardiology Endorsed by the American Society of Echocardiography, the Heart Failure Society of America, and the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 53, 530–553. Available at : <<http://content.online-jacc.org/cgi/content/full/53/6/530>> (last accessed 1 January 2011).
- Patton, J.A., Slomka, P.J., Germano, G., et al., 2007. Recent technologic advances in nuclear cardiology. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 501–513.
- Peterzol, A., Quai, E., Padovani, R., et al., 2005. Reference levels in PTCA as a function of procedure complexity. *Radiat. Prot. Dosimetry* 117, 54–58.
- Preston, D.L., Ron, E., Yonehara, S., et al., 2002. Tumors of the nervous system and pituitary gland associated with atomic bomb radiation exposure. *J. Natl. Cancer Inst.* 94, 1555–1563.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors : 1958–1998. *Radiat. Res.* 168, 1–64.
- Raff, G.L., Chinnaiyan, K.M., Share, D.A., et al., 2009. Radiation dose from cardiac computed tomography before and after implementation of radiation dose–reduction techniques. *JAMA* 301, 2340–2348.
- RCR, 2007. Making the Best Use of Clinical Radiology Services : Referral Guidelines, sixth ed. Royal College of Radiologists, London.
- Rehani, M.M., 2007. Training of interventional cardiologists in radiation protection—the IAEA’s initiatives. *Int. J. Cardiol.* 114, 256–260.
- Rehani, M.M., Ortiz-Lopez, P., 2006. Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions—keeping them under control. *Int. J. Cardiol.* 109, 147–151.
- Renaud, L., 1992. A 5–y follow-up of the radiation exposure to in-room personnel during cardiac catheterization. *Health Phys.* 62, 10–15.
- Rice, M.J., McDonald, R.W., Li, X., et al., 2002. New technology and methodologies for intraoperative, perioperative, and intraprocedural monitoring of surgical and catheter interventions for congenital heart disease. *Echocardiography* 19, 725–734.
- Roedler, H.D., 1981. Accuracy of Internal Dose Calculations with Special Consideration of Radiopharmaceutical Biokinetics, Third International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium, HHS Publication FDA 81–8166. Department of Health and Human Welfare, Bureau of Radiological Health, Rockville, MD.
- Rosenthal, L.S., Mahesh, M., Beck, T.J., et al., 1998. Predictors of fluoroscopy time and estimated radiation exposure during radiofrequency catheter ablation procedures. *Am. J. Cardiol.* 82, 451–458.
- Salukhe, T.V., Dimopoulos, K., Francis, D., 2004. Cardiac resynchronisation may reduce all-cause mortality : meta-analysis of preliminary COMPANION data with CONTAK-CD, InSync ICD, MIRACLE and MUSTIC. *Int. J. Cardiol.* 93, 101–103.
- Sanz, J., Rius, T., Kuschnir, P., et al., 2005. The importance of end-systole for optimal reconstruction protocol of coronary angiography with 16-slice multidetector computed tomography. *Invest. Radiol.* 40, 155–163.
- Sawdy, J.M., Gocha, M.D., Olshove, V., et al., 2009. Radiation protection during hybrid procedures : innovation creates new challenges. *J. Invasive Cardiol.* 21, 437–440.
- Schroeder, S., Achenbach, S., Bengel, F., et al., 2008. Cardiac computed tomography : indications, applications, limitations, and training requirements : report of a Writing Group deployed by the Working Group on Nuclear Cardiology and Cardiac CT of the European Society of Cardiology and the European Council of Nuclear Cardiology. *Eur. Heart J.* 29, 531–556.
- Schueler, B.A., Vrieze, T.J., Bjarnason, H., et al., 2006. An investigation of operator exposure in interventional radiology. *RadioGraphics* 26, 1533–1541.
- Schueler, B.A., Sturchio, G., Landsworth, R., et al., 2009. Does new lightweight leaded eyewear provide adequate radiation protection for fluoroscopists? *Med. Phys.* 36, 2747–2748.
- Senthamizhchelvan, S., Bravo, P.E., Esaias, C., et al., 2010. Human biodistribution and radiation dosime-

- try of  $^{82}\text{Rb}$ . *J. Nucl. Med.* 51, 1592–1599.
- Shack, R.B., Lynch, J.B., 1987. Radiation dermatitis. *Clin. Plast. Surg.* 14, 391–401.
- Shimizu, Y., Kodama, K., Nishi, N., et al., 2010. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950–2003. *BMJ* 340, b 5349.
- Shope, T.B., 1996. Radiation-induced skin injuries from fluoroscopy. *Radiographics* 16, 1195–1199.
- Shore, R.E., Moseson, M., Xue, X., et al., 2002. Skin cancer after x-ray treatment for scalp ringworm. *Radiat. Res.* 157, 410–418.
- Shore, R.E., Neriishi, K., Nakashima, E., 2010. Epidemiological studies of cataract risk at low to moderate radiation doses: (not) seeing is believing. *Radiat. Res.* 174, 889–894.
- Sidhu, M.K., Goske, M.J., Coley, B.J., et al., 2009. Image gently, step lightly: increasing radiation dose awareness in pediatric interventions through an international social marketing campaign. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, 1115–1119.
- Sistrom, C.L., 2008. In support of the ACR appropriateness criteria. *J. Am. Coll. Radiol.* 5, 630–635.
- Smart, R., 2004. Task-specific monitoring of nuclear medicine technologists' radiation exposure. *Radiat. Prot. Dosimetry* 109, 201–209.
- Smith-Bindman, R., Lipson, J., Marcus, R., et al., 2009. Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer. *Arch. Intern. Med.* 169, 2078–2086.
- Stabin, M., 2006. Nuclear medicine dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 51, R 187–R 202.
- Stabin, M.G., 2008 a. Uncertainties in internal dose calculations for radiopharmaceuticals. *J. Nucl. Med.* 49, 853–860.
- Stabin, M.G., 2008 b. Radiopharmaceuticals for nuclear cardiology: radiation dosimetry, uncertainties, and risk. *J. Nucl. Med.* 49, 1555–1563.
- Stabin, M.G., 2010. Proposed revision to the radiation dosimetry of  $^{82}\text{Rb}$ . *Health Phys.* 99, 811–813.
- Stabin, M., Siegel, J., Hunt, J., et al., 2001. RADAR: the radiation dose assessment resource—an online source of dose information for nuclear medicine and occupational radiation safety. *J. Nucl. Med.* 42 (Suppl.), 243.
- Stecker, M.S., Balter, S., Towbin, R.B., et al., 2009. Guidelines for patient radiation dose management. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 20, S 263–S 273.
- Stern, S.H., Renaud, L., Zankl, M., 1995. Handbook of Selected Tissue Doses for Fluoroscopic and Cineangiographic Examination of the Coronary Arteries (in SI Units). HHS Publication FDA 95–8288. Food and Drug Administration, Rockville, MD.
- Stifter, E., Sacu, S., Thaler, A., et al., 2006. Contrast acuity in cataracts of different morphology and association to self-reported visual function. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 47, 5412–5422.
- Stratakis, J., Damilakis, J., Hatzidakis, A., et al., 2006. Occupational radiation exposure from fluoroscopically guided percutaneous transhepatic biliary procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 17, 863–871.
- Sun, Z., Ng, K.H., 2011. Prospective versus retrospective ECG-gated multislice CT coronary angiography: a systematic review of radiation dose and diagnostic accuracy. *Eur. J. Radiol.* 81, e 94–100.
- Suzuki, S., Furui, S., Isshiki, T., et al., 2008. Patients' skin dose during percutaneous coronary intervention for chronic total occlusion. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 71, 160–164.
- Taylor, A.J., Cerqueira, M., Hodgson, J.M., et al., 2010. ACCF/SCCT/ACR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 appropriate use criteria for cardiac computed tomography: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the American Society of Nuclear Cardiology, the North American Society for Cardiovascular Imaging, the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J. Am. Coll. Cardiol.* 56, 1864–1894. Available at: <<http://content.onlinejacc.org/cgi/content/full/56/22/1864>> (last accessed 1 January 2011).

- 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.
- Togni, M., Balmer, F., Pfiffner, D., et al., Group Interventional Cardiology and Coronary Pathophysiology of the European Society of Cardiology, 2004. Percutaneous coronary interventions in Europe 1992–2001. *Eur. Heart J.* 25, 1208–1213.
- Tsapaki, V., Kottou, S., Vanñó, E., et al., 2004. Occupational dose constraints in interventional cardiology procedures: the DIMOND approach. *Phys. Med. Biol.* 49, 997–1005.
- 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. *AJR Am. J. Roentgenol.* 193, 559–569.
- Tureson, I., Notter, G., 1986. The predictive value of skin telangiectasia for late radiation effect in different normal tissues. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 12, 603–609.
- UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation: Volume I, Sources: Annex D, Medical Radiation Exposure. Report to the General Assembly. United Nations, New York. Available at: <[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html)> (last accessed 31 December 2010).
- UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2010. Sources of Ionizing Radiation: Volume I. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York. Available at: <[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html)> (last accessed 31 December 2010).
- Vañó, E., 2003. Radiation exposure to cardiologists: how it could be reduced. *Heart* 89, 1123–1124.
- Vañó, E., Gonzalez, L., 2001. Approaches to establishing reference levels in interventional radiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 94, 109–112.
- Vañó, E., Guibelalde, E., Fernandez, J.M., et al., 1997 a. Patient dosimetry in interventional radiology using slow films. *Br. J. Radiol.* 70, 195–200.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Faulkner, K., et al., 1997 b. Specific Training Objectives in Radiation Protection for Medical Staff in Interventional Radiology Installations. Draft document. DIMOND European Concerted Action.
- Vañó, E., Arranz, L., Sastre, J.M., et al., 1998 a. Dosimetric and radiation protection considerations based on some cases of patient skin injuries in interventional cardiology. *Br. J. Radiol.* 71, 510–516.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Beneytez, F., et al., 1998 b. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71, 728–733.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Guibelalde, E., et al., 1998 c. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br. J. Radiol.* 71, 954–960.
- Vañó, E., Goicolea, J., Galvan, C., et al., 2001 a. Skin radiation injuries in patients following repeated coronary angioplasty procedures. *Br. J. Radiol.* 74, 1023–1031.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Canis, M., et al., 2003. Training in radiological protection for interventionalists. Initial Spanish experience. *Br. J. Radiol.* 76, 217–219.
- Vañó, E., Gonzalez, L., 2005. Accreditation in radiation protection for cardiologists and interventionalists. *Radiat. Prot. Dosimetry* 117, 69–73.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., et al., 2006 a. Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15 year follow-up. *Br. J. Radiol.* 79, 383–388.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, J.M., et al., 2006 b. Influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient doses in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 118,

- 325–330.
- Vañó, E., Gonzalez, L., Fernandez, M., et al., 2008 a. Eye lens exposure to radiation in interventional suites : caution is warranted. *Radiology* 248, 945–953.
- Vañó, E., Järvinen, H., Kosunen, A., et al., 2008 b. Patient dose in interventional radiology : a European survey. *Radiat. Prot. Dosimetry* 129, 39–45.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Duran, A., et al., 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 174, 490–495.
- Vliestra, R.E., Wagner, L.K., Koenig, T., et al., 2004. Radiation burns as a severe complication of fluoroscopically guided cardiological interventions. *J. Interv. Cardiol.* 17, 131–142.
- von Ballmoos, M.W., Haring, B., Juillerat, P., et al., 2011. Meta-analysis : diagnostic performance of lowradiation-dose coronary computed tomography angiography. *Ann. Intern. Med.* 154, 413–420.
- von Boetticher, H., Lachmund, J., Hoffmann, W., 2009. Cardiac catheterization : impact of face and neck shielding on new estimates of effective dose. *Health Phys.* 97, 622–627.
- 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., McNesse, M.D., Marx, M.V., et al., 1999. Severe skin reactions from interventional fluoroscopy : case report and review of literature. *Radiology* 213, 773–776.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., 1997. *Minimizing Risks from Fluoroscopic Radiation*, fourth ed. R.M. Partnership, The Woodlands, TX.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., Cohen, A.M., 2000. Management of patient skin dose in fluoroscopically guided interventional procedures. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 11, 23–33.
- Wagner, L.K., Archer, B.R., 2004. *Minimizing Risks from Fluoroscopic X-rays : Bioeffects, Instrumentation, and Examination*, fourth ed. The Woodlands, TX.
- Wagner, L.K., 2007. Radiation injury is a potentially serious complication to fluoroscopically-guided complex interventions. *Biomed. Imag. Intervent. J.* 3, e 22. Available at : <<http://www.bijj.org/2007/2/e22/>> (last accessed 9 August 2010).
- Wall, B.F., Shrimpton, P.C., 1998. The historical development of reference doses in diagnostic radiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 80, 15–19.
- Wang, J.X., Zhang, L.A., Li, B.X., et al., 2002. Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1955. *Health Phys.* 82, 455–466.
- Weigold, W.G., Abbara, S., Achenbach, S., et al., 2011. Standardized medical terminology for cardiac computed tomography : a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 5, 136–144.
- Wenzl, T.B., 2005. Increased brain cancer risk in physicians with high radiation exposure. *Radiology* 235, 709–710, author reply 710–711.
- 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.
- WHO, 1982. *Quality Assurance in Diagnostic Radiology*. World Health Organization, Geneva.
- WHO, 2000. *Efficacy and Radiation Safety in Interventional Radiology*. World Health Organization, Geneva.
- Wolk, M.J., Peterson, E., Brindis, R., et al., 2004. President's page : the appropriate cardiologist : responsible stewardship in a golden era of cardiology. *J. Am. Coll. Cardiol.* 44, 933–935.
- Worgul, B.V., Kundiyevev, Y.I., Sergiyenko, N.M., et al., 2007. Cataracts among Chernobyl clean-up workers : implications regarding permissible eye exposures. *Radiat. Res.* 167, 233–243.
- Yonehara, S., Brenner, A.V., Kishikawa, M., et al., 2004. Clinical and epidemiologic characteristics of first primary tumors of the central nervous system and related organs among atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki, 1958–1995. *Cancer* 101, 1644–1654.
- Zanchetta, M., Maiolino, P., 2004. Intracardiac echocardiography. Do we need a new ultrasonographic window? *Ital. Heart. J.* 5, 173–177.

ICRP Publication 120  
心臓病学における放射線防護

---

2017年3月31日 初版第1刷発行

監修 米倉義晴

翻訳 山科章・赤星正純・佐々木英夫

編集 ICRP 勧告翻訳検討委員会

発行 公益社団法人日本アイソトープ協会

〒113-8941 東京都文京区本駒込二丁目28番45号

電話 代表 (03)5395-8021

URL <http://www.jrias.or.jp>

© The Japan Radioisotope Association, 2017

Printed in Japan

組版 株式会社 恵友社

ISBN 978-4-89073-262-3 C3347

【非売品】