

IAEA 技術文書シリーズ

技術文書 NO. 1731

眼の水晶体の新しい線量限度の 職業上の放射線防護の意味合い について

国際原子力機関

2021年6月

原子力規制庁 翻訳

注意

A：本翻訳版は非売品である。

B：本翻訳版は、[Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA TECDOC Series No. 1731] ©International Atomic Energy Agency, [2013] の日本語訳である。

本翻訳版は、原子力規制委員会により作成されたものである。本翻訳版に係る IAEA 出版物の正式版は、国際原子力機関 (IAEA) 又はその正規代理人により配布された英語版である。IAEA は、本翻訳版に係る正確性、品質、正当性又は仕上がりに関して何らの保証もせず、責任を持つものではない。また、本翻訳版の利用により生じるいかなる損失又は損害に対して、これらが当該利用から直接的又は間接的・結果的に生じたものかを問わず、何らの責任を負うものではない。

C：著作権に関する注意：本翻訳版に含まれる情報の複製又は翻訳の許可に関しては、オーストリア国ウィーン市 1400 ウィーン国際センター (私書箱 100) を所在地とする IAEA に書面により連絡を要する。

D：本翻訳版は、原子力規制庁が IAEA との合意に基づき発行するものであり、唯一の翻訳版である。

E：原子力規制庁は、本翻訳版の正確性を期するものではあるが、本翻訳版に誤記等があった場合には、正誤表と合わせて改訂版を公開する。また、文法的な厳密さを追求することで難解な訳文となるものは、分かりやすさを優先し、本来の意味を損なうことのない範囲での意識を行っている箇所もある。

なお、本翻訳版の利用により生じるいかなる損失又は損害に対して、これらが当該利用から直接的又は間接的・結果的に生じたものかを問わず、原子力規制庁は何らの責任を負うものではない。

IAEA（国際原子力機関）安全基準と関連出版物

IAEA 安全基準

IAEA は、その憲章第三条の規定によって、健康を守るため及び生命や財産に対する危険を最小限に抑えるために安全基準を策定又は採択する権限、及び基準を適用する権限を有している。

IAEA の安全基準となる出版物は、IAEA 安全基準シリーズとして発行される。本シリーズは、原子力安全、放射線安全、輸送安全及び廃棄物安全を対象としている。本シリーズは、安全原則、安全要件及び安全指針に分類されている。

IAEA の安全基準プログラムに関する情報は、以下の IAEA インターネットサイトで入手できる。

<http://www-ns.iaea.org/standards>

このサイトは、発行された安全基準や安全基準草案の英語版文書を提供している。アラビア語、中国語、フランス語、ロシア語及びスペイン語で発行された安全基準文書、IAEA の安全用語集及び策定中の安全基準の状況報告書も利用できる。更に情報が必要な場合は、PO Box 100, 1400 Vienna, Austria の IAEA まで問い合わせ頂きたい。

IAEA 安全基準の全ての利用者は、安全基準が利用者のニーズに継続して適っていることを確実なものとする目的のために、安全基準を使用した経験（国内規制、安全評価及び研修コースの基盤とした経験など）を IAEA に提供して頂きたい。情報の提供は IAEA インターネットサイト経由又は上記宛への郵送、あるいは e メール（Official.Mail@iaea.org）を利用できる。

他の安全関連出版物

IAEA は基準を適用するとともに、IAEA 憲章第三条及び第 VIII.C 条の規定によって、平和利用の原子力活動に関する情報の交換及びその促進を行っており、この目的のために加盟国間の仲介機関としての役割を果たしている。

原子力活動の安全に関する報告書は、安全基準を維持するために使用できる実用的な事例と詳細な手法を提供する安全レポートシリーズとして発行されている。

他の安全関連の IAEA 出版物は、緊急時の準備と対応出版物、放射線評価レポート、国際原子力安全グループの INSAG レポート、技術レポート及び TECDOC として発行されている。また、IAEA は放射線事故、研修マニュアルや実用マニュアル、及び他の特別な刊行物も出版している。

セキュリティ関連の刊行物は IAEA 核セキュリティシリーズとして出版されている。

IAEA 原子力シリーズは、平和的利用のための原子力に関する研究、及びその開発と実用を促進、支援するための情報を提供する出版物として発行されている。これには、原子力

発電、核燃料サイクル、放射性廃棄物の管理及び廃止措置の分野の技術進展や、経験、良
好事例や実例に関するレポートや指針が含まれている。

眼の水晶体の新しい線量限度の
職業上の放射線防護の意味合いについて

国際原子力機関（IAEA）憲章は、ニューヨーク、国連本部において開催された IAEA 憲章採択会議において 1956 年 10 月 23 日に承認され、1957 年 7 月 29 日に発効した。本機関の本部はウィーンに在する。その主たる目的は、「世界の平和、健康及び繁栄への原子力の貢献を加速、拡大すること」である。

IAEA-TECDOC-1731

眼の水晶体の新しい線量限度の 職業上の放射線防護の意味合いについて

使用及びコメントのための暫定ガイダンス

国際原子力機関
ウィーン, 2013

著作権の表示

全ての IAEA の科学的、技術的出版物は、1952 年にベルンで採択され、1972 年にパリで改訂された万国著作権条約の条項で保護されている。それ以来、著作権には電子的、仮想的知的財産も含めるように、ジュネーブの世界知的所有権機関により拡張されてきた。IAEA 出版物の印刷媒体若しくは電子媒体に含まれるテキストの全文若しくは一部を使用するには、許可を取得しなければならず、通常は著作権使用料の協定書に従わなければならない。非営利目的の複製、翻訳の提案は歓迎され、ケースバイケースで考慮される。問合せは以下の IAEA 出版部へ願いたい。

Marketing and Sales Unit, Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
fax: +43 1 2600 29302
tel.: +43 1 2600 22417
email: sales.publications@iaea.org
<http://www.iaea.org/books>

For further information on this publication, please contact:

Radiation Safety and Monitoring Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
Email: Official.Mail@iaea.org

© IAEA, 2013
Printed by the IAEA in Austria
December 2013

IAEA Library Cataloguing in Publication Data

Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2013.

p. ; 30 cm. — (IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289; no. 1731)

ISBN 978-92-0-115213-8

Includes bibliographical references.

1. Radiation — Safety measures. 2. Ionizing radiation — Dosage — Measurement. 3. Eye — Effect of radiation on. I. International Atomic Energy Agency. II. Series.

緒言

IAEA の安全要件・安全基準シリーズ No. GSR Part 3（暫定版）「放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準」は、2011 年 9 月の IAEA 理事会会合において承認され、2011 年 11 月に発行された。計画被ばく状況における職業被ばくの場合の眼の水晶体の等価線量限度は、年に 150 mSv から、単一年におけるいかなる年線量も 50 mSv を超えない条件で、定められた 5 年間の平均で 20 mSv へと引き下げられた。眼の水晶体の線量限度におけるこの引き下げは、ICRP（International Commission on Radiological Protection：国際放射線防護委員会）の組織反応に関する 2011 年 4 月 21 日付の声明に含まれている勧告に従うものである。

GSR（General Safety Requirements：一般安全要件）Part 3 のドラフトが安全基準委員会によって承認されたとき、事務局は、新たな線量限度の遵守に関して加盟国を支援するために可能な限り早期にガイダンスを作成するよう求められた。

より長期的には、この TECDOC に示されているガイダンスは、現在作成中の 2 つの安全指針、すなわち「職業上の放射線防護」及び「電離放射線の医療利用における放射線安全」に示されることになる、眼の水晶体の新たな線量限度に関するコンセンサスガイダンスの基礎となるだろう。これらの安全指針は、2015～2016 年に発行されることが見込まれている。適切な対応を実施するとともに眼の水晶体の新たな線量限度の導入に備える機会を加盟国に提供するために、これら 2 つの安全指針が最終的な形となる前にガイダンス資料が必要になると認識されている。

この出版物の目的は、眼の水晶体の新しい線量限度の職業上の放射線防護の意味合いについて助言を提供するとともに、安全指針に組み込まれるかもしれない詳細な勧告に関するコメントを可能にすることである。

IAEA は、この出版物の作成における A. Wrixon（英国）及び R. Behrens（ドイツ）の貢献に謝意を表したい。この出版物の IAEA 担当者は、放射線・輸送・廃棄物安全部の T. Boal であった。

編集上の注記

この出版物は、著者によって提出された原データから作成されている。述べられている見解は、必ずしも IAEA、特定の加盟国の政府若しくは特定の機関の見解を反映するものではない。

この出版物は、IAEA の編集スタッフによって編集されたものではない。IAEA は、いかなる人物の側の作為又は不作為についても、法的であるかないかを問わず、責任の問題に対処することはない。

国又は領土の特定の呼称の使用は、そのような国又は領土の、それらの当局及び諸機関の、若しくはそれらの境界設定の法的状態に関する、発行者すなわち IAEA によるいかなる判断を含意するものでもない。

特定の企業又は製品の名称の言及（登録されたものとして示されているか否かにかかわらず）は、所有権を侵害するいかなる意図を含意するものでもなく、IAEA 側の支持又は推奨と解釈されるべきでもない。

著者には、著作権によってすでに保護されている原典からのデータを IAEA が複製、翻訳又は使用するために必要な許諾を得ている責任がある。

IAEA は、この著作に言及されている外部又は第三者のインターネットウェブサイトに係る URL の不変性又は正確性について何ら責任を負わず、そのようなウェブサイト上のいかなる内容が正確又は適切であると、若しくはそうであり続けると保証することもない。

目次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 範囲	2
1.4 構成	3
2. 線量限度変更の科学的根拠	4
3. 眼の水晶体の新しい線量限度の意味合い	6
3.1 安全評価	6
3.2 眼の水晶体の被ばくが重要となる作業員	7
3.3 防護の最適化	11
3.4 外部放射線による眼の水晶体に対する線量のモニタリング	15
3.5 健康サーベイランス	25
3.6 緊急作業員の被ばく	26
添付資料 I. 計画被ばく状況における職業被ばくの場合の線量限度	34
添付資料 II. IVR における手技あたりの眼の水晶体に対する等価線量の典型的な値	35
添付資料 III. 画像誘導インターベンション手技においてスタッフが患者に極めて接近して作業する医療行為に関するガイドライン	37
ドラフト作成及びレビューに寄与した人々	39

1. はじめに

1.1 背景

「放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準」は、2011年9月のIAEA（International Atomic Energy Agency：国際原子力機関）理事会会合において承認され、2011年11月に一般安全要件パート3、すなわちGSR Part 3（暫定版）として発行された¹[1]。同出版物は、1996年に発行された以前の国際基本安全基準[2]に取って代わるものである。

GSR Part 3（暫定版）に含まれている要件は、基本安全原則[3]の目的、概念及び原則によって構成されており、以前の国際基本安全基準[2]の要件の適用における各国の経験から導き出された情報を利用している。これらの要件は、放射線被ばくへの健康影響に関する広範な研究、特にUNSCEAR（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation：原子放射線の影響に関する国連科学委員会）の所見及びICRP（International Commission on Radiological Protection：国際放射線防護委員会）の勧告も利用している。さらに、IAEA理事会が1960年3月に放射線防護と安全対策を初めて承認したとき[4]、「IAEAの基本安全基準...は可能な限り、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告に基づくことになる」と述べられた。

以前の国際基本安全基準のレビュー及びその結果としての改訂は、新たなICRP勧告[5]の作成時に開始された。2007年に最終的な形となったこれらの勧告は、放射線防護に関するICRPの3つの一般原則を繰り返し述べるものだったが、これは被ばくへの正当化、防護の最適化及び線量限度の適用に関係する。これらの原則は、基本安全原則[3]にも見出されるものである。ICRP勧告はまた、以前の勧告[6]及び以前の国際基本安全基準[2]に含まれていた線量限度の数値も維持するものだった。しかし、ICRPはそのとき、眼の水晶体の年等価線量限度は、眼の放射線感受性に関する新たなデータを視覚障害の点で考慮に入れて、ICRPのタスクグループが現在レビュー中であると指摘した。ICRPはその後、放射線被ばくへの確定的影響²、特に、しきい線量があらかじめ考えられたものを下回るまたは又は下回るかもしれない場合、発現が極めて遅い確定的影響がいくつかあることを示唆する最近の疫学的証拠のレビューを発表している[7]。眼の水晶体の場合、吸収線量のしきい値は今では0.5 Gyとみなされており、ICRPはこれに基づいて、眼の水晶体の線量限度の勧告を下方修正している。修正された線量限度はその後、GSR Part 3（暫定版）[1]に組み込まれた。

¹ GSR Part 3の合同名義版は2014年に発行される予定である。

² 確定的影響とは、それを超えると線量が高いほど影響の重篤度が高くなるしきいレベルの線量が一般に存在する場合の放射線の健康影響である[1]。ICRPは今では、「有害な組織反応」[5]又は単に「組織反応」[7]という用語を用いている。

GSR Part 3（暫定版）が安全基準委員会によって承認されたとき、IAEA 事務局は、眼の水晶体のこの新たな線量限度の遵守に関して加盟国を支援するために可能な限り早期にガイダンスを作成するよう求められた。そのようなガイダンスの作成に向けた最初のステップとして、IAEA 事務局は 2012 年 10 月に、2013 年における TECDOC 作成を先導するものとして、「眼の水晶体の新たな線量限度—意味合いと実施」に関する技術会合を開催した。より長期的には、この TECDOC に示されている暫定ガイダンス及びその適用において得られた経験は、現在改訂中のいくつかの安全指針—職業上の放射線防護に関するもの及び、電離放射線の医療利用における放射線安全に関するもの—への投入情報として利用されることになる。これらの安全指針は、2015～2016 年に発行されることが見込まれている。これらの安全指針はいくつかの既存の安全指針[8～13]及び安全報告書[14～16]に取って代わることになる、というのがその趣旨である。

1.2 目的

職業上の放射線防護を扱ういくつかの安全指針が完成するまで、この TECDOC は、GSR Part 3（暫定版）[1]に定められている眼の水晶体の新たな線量限度による職業上の放射線防護の意味合いについて暫定ガイダンスを提供する。この TECDOC はまた、現在起草中の安全指針に含まれる事柄について示されるべきガイダンスに関するコンセンサスの確立を導くことになる議論を惹起することも意図されている。

1.3 範囲

この TECDOC は、計画被ばく状況に適用しうる職業上の放射線防護の場合の眼の水晶体の新たな線量限度の意味合いに関する暫定ガイダンスを提供するものである。この TECDOC はまた、緊急作業員の眼の水晶体の防護に関するガイダンスも提供する。これは、いくつかの既存の安全指針、特に RS-G-1.1[8]及び RS-G-1.3[10]に示されている眼の水晶体の防護に関するガイダンスを修正するものであるが、その他の点ではこれらの指針を補完するものである。

この暫定ガイダンスは、航空機搭乗員の宇宙線被ばく³には適用されない。

この暫定ガイダンスは、規制機関、病院、一般産業及び原子力施設における許認可取得者並びに雇用者、また、放射線防護担当者、産業 X 線撮影技師、医学物理士、心臓学者、**IVR**

³ 電離放射線への被ばくは航空機搭乗員にとっては避けられないものであり、GSR Part 3（暫定版）[1]では、線量限度が適用されない現存被ばく状況とみなされている。しかし、放射線場の均一性ゆえに、眼の水晶体に対する線量は、通常は年に数ミリシーベルトの規模である実効線量とほとんど同じであると想定することができる。

科医並びに、画像誘導インターベンション手技に関わるその他の医療専門家及び保健専門家など、そのような施設における管理者及び職員による利用が意図されたものである。また、現在起草中の関連安全指針に示されることになる眼の水晶体の防護に関するガイダンスについてコンセンサスを形成する際に加盟国が利用することも意図されている。

1.4 構成

この TECDOC の 2 章では、眼の水晶体の新たな線量限度に関する生物学的関連情報の要約を示す。3 章では、この線量限度の変更によって影響を受けるかもしれない作業員及びこの変更を実施するために講じるべき措置に関するガイダンスを示す。これには、防護の最適化（研修を含む）、モニタリング並びにこれらの作業員の健康サーベイランスが含まれる。添付資料 I には、眼の水晶体の被ばくに係る職業上の線量限度の要約を示す。添付資料 II には、IVR における手技あたりの眼の水晶体に対する等価線量の典型的な値を示す。添付資料 III には、その際にスタッフが眼の水晶体に有意な線量を受けるかもしれない医療行為に関するガイダンスを示す。

2. 線量限度変更の科学的根拠

計画被ばく状況における職業被ばくの場合、眼の水晶体の修正された等価線量限度は、連続する5年間の平均で年に20 mSvであり（すなわち、5年間で100 mSv）、いかなる単一年においても50 mSvである[1]。これらの限度は、年に150 mSvという以前の等価線量限度[2]に取って代わるものである。

眼の水晶体（並びに四肢及び皮膚）の等価線量限度は、確定的影響の回避を確実なものとするために必要とみなされてきた。実効線量限度は、特に局部放射線被ばくの場合、この目的のためには十分でないと考えられた。

年に150 mSvという眼の水晶体の以前の等価線量限度は、検知可能な混濁について単一の急性（又は短時間）被ばくの場合で0.5～2 Gy、長期被ばくの場合で5 Gy並びに、視覚障害（白内障）について単一の急性（又は短時間）被ばくの場合で5 Gy、分割又は長期被ばく後で8 Gyという線量しきい値に基づくものだった[6]。しかし、この限度の根拠とされた以前の疫学的研究のいくつかは、放射線に誘発された水晶体変化又は白内障手術を必要とする視覚障害のいずれかを検知するのに十分な追跡調査を伴うものではなかったかもしれない。さらに、放射線関連の水晶体変化を早期に検知、定量化、記録するための手法の向上並びに線量測定の上昇は、低線量被ばくにおける放射線誘発白内障に関するより新しい所見に寄与する因子となったかもしれない。

ICRPは、ICRP刊行物118[7]の中で、確定的影響の誘発に関する最近の疫学的証拠のレビューを示すとともに、しきい線量があらかじめ考えられたものを下回る又は下回るかもしれない場合、確定的影響、特に、発現が極めて遅い確定的影響がいくつかあると結論づけた。しきい線量は、実際には、特定の組織又は臓器反応（すなわち、確定的影響）の発生率1%に帰着する線量と定義された[5, 7]。

以下に、ICRP刊行物118[7]から要旨の関連部分を転載する：

「急性被ばくによって引き起こされる眼の水晶体における白内障の場合、しきい線量の正式な推定が長期間の追跡調査後に行われている最近の研究は、ゼロ線量を含めた90～95%信頼区間で約0.5 Gyという値を示している。これは、以前の研究において導き出された値の10分の1である。以前の研究は概して、追跡調査期間が短く、線量の低下に伴う潜伏期間の増大を考慮せず、採用された手法を用いて水晶体変化を早期に検知するのに十分な感度を持たず、線量が数Gyを下回る研究対象が比較的少ないものだった。分割及び長期被ばくの場合も、約0.5 Gyという値が同様に、最近の研究によって導き出されている。しかし、

後者の被ばくに関する証拠は主として、視覚を損なう白内障よりもむしろ混濁にあてはまる。それらの研究においては追跡期間がより短いためである。数年から何年にも及ぶ慢性被ばくの場合、証拠の多くは軽症の水晶体混濁にあてはまる。それでもなお、このシナリオにおいてはしきい蓄積線量がより高いという徴候はない。これらは混濁又は白内障につながる水晶体放射線障害の確立された緩和因子ではないが、水晶体の交換は十分に確立された外科的処置である。」

約0.1 Gyまでの急性線量は組織のいかなる機能障害も引き起こさないという以前の判断は、ICRPによって維持された[7]。したがって、放射線誘発がん及び遺伝性影響の確率的リスクが引き続き、職業上の状況における GSR Part 3（暫定版）[1]のほとんどの適用の場合に考慮すべき主たるリスクである。しかし、0.5 Gyを上回る急性又は蓄積された線量のあとでは、放射線被ばくから極めて長い時間を経て、確定的影響のリスクが眼の水晶体にとってますます重要になる。長期にわたる線量付与の方が急性被ばくよりも損害が少ないという徴候はない。

GSR Part 3（暫定版）[1]に示されている職業被ばくの場合の線量限度は、添付資料 I に転載してある。

3. 眼の水晶体の新しい線量限度の意味合い

本章に示す眼の水晶体の線量限度変更の意味合いは、GSR Part 3（暫定版）[1]並びに現在適用しうる安全指針、特に RS-G-1.1[8]及び RS-G-1.3[10]に示されている職業上の放射線防護に関する全般的なガイダンスと合わせて理解されるべきである。そのガイダンスのうちこの新たなガイダンスによって修正されるのは、眼の水晶体の防護と関連する部分のみである。これらの安全基準に示されている関連要件及びガイダンスは、修正されたガイダンスとの適切な関連を示すために必要な限りにおいてのみ繰り返し述べてある。

3.1 安全評価

規制機関は、安全評価に関する要件を定めて実施することを要求されており、放射線リスクを生じさせる施設又は活動の責任を負う者又は組織は、当該施設又は活動の適切な安全評価を実施しなければならない（参考文献[1]の要件 13）。これらの評価は、行為のうち防護と安全に関連するあらゆる側面を扱うものとすべきであり、特に以下のために、施設又はその部分の立地、設計、製造、建設、組み立て、試運転、運転、保守及びデコミッショニング（又は閉鎖）の段階を含めたさまざまな段階において実施することが要求される：

- どのように被ばくがもたらされるかを確認する；
- 通常運転における被ばくの予想される大きさと可能性を決定するとともに、合理的かつ実行可能な限り、潜在被ばくの評価を行う；
- 防護と安全のための規定の適切性を評価する⁴。

安全指針 RS-G-1.1[8]に示されているように、事前の放射線学的評価及び安全評価は、行為又は施設に係る放射線防護プログラムの定義に向けた最初のステップである⁵。そのようなプログラムは、行為若しくは施設の寿命、すなわち設計から試運転及び運転を経てデコミッショニングに至るまでのあらゆる段階に関係するかもしれない。眼の水晶体の防護には、これらの段階すべてにおいて考慮が払われるべきである。

⁴ これらの要件は RS-G-1.1[8]においては、運転との関連では以下のように表現が若干異なっている：

「事前の放射線学的評価は、運転のあらゆる側面について以下の事項を含むものとすべきである：

- (a) 日常被ばく及び合理的に予見しうる潜在被ばくの原因の確認；
- (b) 関連する線量及び確率の現実的な推定；
- (c) 最適化の原則を満たすために必要とされる放射線防護策の確認。」

⁵ GSR Part 3（暫定版）[1]の要件 24 は、職業被ばくに係る放射線防護プログラムの場合、管理区域及び監視区域の指定、現場規則及び作業場モニタリングのための組織上、手順上及び技術上の準備の確立及び維持を要求していることを指摘しておく。

主当事者（例えば、雇用者、登録者及び許可取得者）は、安全文化を促進し維持することを要求される（参考文献[1]、2.51 項）。これを行うために確認された一つの方法は、「防護と安全を扱う方針、規則及び手順の策定と実施における作業員及びその代表者並びにその他の関係者の関与を奨励すること」によるものである。したがって、既存の放射線防護プログラム、特に運転段階に係るプログラムは、関係する作業員及びその代表者とともに、必要に応じて更新すべきである、ということになる。放射線防護プログラムの更新は、以下の各節に示すガイダンスに基づくものとすべきである。

したがって、登録者又は許可取得者はそれぞれ、以下を目的として安全評価をレビューすべきである：

- ・眼の水晶体に有意な線量（例えば、年に数 mSv 規模）を受ける作業員はいるのかどうかを、特に、例えば局部被ばく若しくは低エネルギーのベータ粒子及び／又は光子などの弱透過性放射線による被ばくのために、眼の水晶体の線量限度の方が実効線量限度よりも制限的となる作業員を確認する；
- ・眼の水晶体の被ばくをしかるべく考慮に入れて防護が最適化されるように機器及び設備が設計されることを確実なものとする；
- ・眼の水晶体の被ばくをしかるべく考慮に入れて防護が最適化されることを確実なものとするために、必要に応じて運転手順を定める；
- ・眼の水晶体の被ばくをしかるべく考慮に入れて防護が最適化されることを確実なものとするには機器及び設備の設計並びに運転手順では不十分な場合、作業員による個人用防護具の利用を要求する。

安全評価のレビューにおいて、登録者及び許可取得者は、一リスクにさらされて曝されている作業員のグループおよび及びそれらの作業員が受けるかもしれない線量を確認するために、文献で利用できるかもしれないいかなる一般安全評価も考慮に入れるべきである。

3.2 眼の水晶体の被ばくが重要となる作業員

眼の水晶体が日常的に有意な線量を受けるかもしれない作業員については、以下の 3 つのカテゴリーを考慮することが必要である：

- ・比較的均一な全身（透過性）放射線場に曝される作業者；
- ・眼の水晶体が優先的に被ばくを受ける極めて不均一な放射線場に曝される作業者；
- ・低エネルギー（約 15 keV 未満）のベータ粒子や光子など、実効線量ではなく眼の水晶体に対する線量に大きく寄与する弱透過性放射線に曝される作業者。

組織におけるその限られた飛程の点で、アルファ粒子又はその他の高 LET 放射線にのみ曝される作業者は、考慮する必要がない。中性子被ばくは評価するのは最も複雑であると思われるが、眼の線量に対する最も重要な寄与因子にはなりそうにないと認識される。

第 1 カテゴリーの作業者の場合、たとえば、頭部ではなく体幹に対する線量（若しくは線量を受ける確率）を低減する遮蔽の利用により、防護策が放射線場の不均一化に帰着するならば、眼の水晶体に対する線量のモニタリングを含めて、眼の水晶体の防護に特定の考慮が必要とされるべきである。この状況は、第 2 カテゴリーの作業者によって包含される。

第 2 カテゴリーの作業者には、以下が含まれる：

- ・その体幹は遮蔽されるかもしれないが頭部はそうでない作業者；
- ・その頭部が透過性線源に近い作業者；
- ・ベータ線に曝される作業者。

これら 3 つのグループは、実質的には部分的に重なり合う。注意を払う必要があるかもしれない状況の種類を単に示すことがその趣旨である。

第 3 カテゴリーの作業者は、作業者が多かれ少なかれ均一な弱透過性放射線被ばくを受け、むしろまれなケースを包含する。このカテゴリーはある程度理論的な性質のものかもしれないが、完全さのためにここに言及してある。

眼の水晶体の線量限度が年に 150 mSv であった頃は、眼の水晶体の日常的なモニタリングはまれであった。新たな線量限度の導入とともに、眼の水晶体に対する線量の特定期間モニタリングを必要とする作業者の数は増加すると思われる。以下にはモニタリングが考慮されるべき場合の例をいくつか示すが、これらの例は包括的なものとみなされるべきではない。

医療作業者

眼の水晶体の線量限度の引き下げによって潜在的に影響を受けるような作業者の最大グループは、医療分野に属する[17]。これらの作業者には以下が含まれる：

- ・ X 線透視誘導インターベンション手技において患者に極めて接近して作業するスタッフ；
- ・ 線源／放射性医薬品の調製や PET/CT など、核医学におけるいくつかの職務を行うスタッフで、特にベータ線源が用いられる場合；
- ・ 手動式の小線源療法に関わるスタッフ；
- ・ 生検を含めた CT 誘導インターベンション手技に関わるスタッフ；
- ・ サイクロトロンを用いて作業するスタッフ。

ICRP は、ICRP 刊行物 113[18]の中で、放射線防護が最適化されていない心臓カテーテル法研究室における作業の間では水晶体混濁リスクの証拠があることに言及した。ICRP は特に、IVR 及びインターベンション心臓病学においては眼の水晶体に対するリスクが考慮されるべきである、と指摘した。ICRP はさらに ICRP 刊行物 120[19]の中で、カテーテル法研究室で作業する循環器専門医及び補助スタッフの調査は、放射線防護手段が適切に利用されておらず、放射線防護原則が無視されている場合、職業放射線被ばくに帰せられる水晶体混濁の割合が高いことを認めている、と指摘した。150 mSv の年限度にはほぼ等しい眼の水晶体に対する等価線量を何年か受けたインターベンション医における放射線誘発白内障について、報告がいくつか出されている[20, 21, 22, 23, 24, 25]。中南米及びアジアにおける、カテーテル法研究室で作業する循環器専門医及び補助スタッフの調査は、職業放射線被ばくと関連する種類の水晶体混濁の罹患率が高いことを認めている[21, 26]。

Padovani ら[27]は、200 人を超えるインターベンション心臓学者のサンプルのうち約 10%は、エプロン上側の線量計又は水晶体固有の線量計のいずれかに基づくと、眼の水晶体に対する新たな線量限度を超過する推定線量を受けている、と報告している。さまざまなインターベンション手技における眼の水晶体に対する等価線量の典型的な値の例は、添付資料 II に示してある。ISEMIR (Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research：医療、産業及び研究における職業被ばくに関する情報システム) プロジェクトの中で IAEA の WGIC (Working Group on Interventional Cardiology：インターベンション心臓病

学に関する作業グループ) によって作成された、インターベンション心臓病学における眼の水晶体に関する防護策の最適化の必要性を強調する勧告は、添付資料 III に示してある。IVR 及び心臓病学の処置に関わるオペレータの眼の水晶体に対する典型的な線量の指摘は、ORAMED プロジェクト報告書[28]にも見出すことができる。

原子力施設における作業者

原子力分野において、提案された眼の水晶体の線量限度によって影響を受ける主たる作業者は、以下の作業者であると考えられている[29]：

- ・グローブボックスを用いる作業者；
- ・原子力施設のデコミッショニングにおいて作業する作業者；
- ・プルトニウム又は劣化ウランを取り扱う作業者。

その他の作業者

これまでに確認された他の唯一の作業者グループは、産業 X 線撮影技師である。ISEMIR プロジェクトに基づいて設置された IAEA の WGIR (Working Group on Industrial Radiography：産業 X 線撮影に関する作業グループ) は、産業 X 線撮影における職業上の放射線防護の現在の慣行について報告している[30]。2009 年については、33 の規制機関が産業 X 線撮影技師の年実効線量データを提供した。モニタリングが行われた約 18,000 人の産業 X 線撮影技師の平均年実効線量は 2.9 mSv、報告された最大年線量は 158 mSv であった。産業 X 線撮影技師の大部分 (86%) について報告された線量は 2009 年には 5 mSv 未満であり、20 mSv を上回る実効線量を受けた産業 X 線撮影技師は約 350 人 (2%)、50 mSv を上回る線量を受けたのは約 50 人 (0.3%) であった。

WGIR は、眼の水晶体に対する等価線量の入手可能性については規制機関、産業 X 線撮影技師又は NDT を実施している企業に要請しなかった。産業 X 線撮影技師は比較的均一な放射線場で作業するため、眼の水晶体に対する線量の別個のモニタリングは通常は必要とみなされていない。

偶発的な被ばく

いくつかの産業における作業者は、偶発的な被ばくによって眼の水晶体に対する線量が高

められるリスクに曝されている。

産業 X 線撮影の場合、Le Heron ら[30]は、WGIR のアンケートに回答した 31 カ国の産業 X 線撮影技師 432 人のうち 82 人（約 20%）が放射線に関する事故、ニアミス又は逸脱を過去 5 年間に経験したと述べたことを報告している。11 件の事故は、雇用者（NDT（non-destructive testing：非破壊検査）会社）によって規制機関に報告された年線量限度を上回る個人被ばくに至った。事故が起こると、X 線撮影技師がいる場所における放射線場は均一ではなくなるかもしれない、作業者が装着した全身個人線量計の示度はもはや、眼の水晶体が受ける線量の代わりにはならなくなるかもしれない。

核医学部門においては、その調製時の放射性医薬品による眼の偶発的な汚染のために、スタッフが有意な線量を受けるかもしれない。

3.3 防護の最適化

放射線被ばくによって引き起こされる損害の低減に伴うコストと得られる利益のバランスをとることは、防護と安全を最適化するプロセスの一部となって久しい[31]。結果として、特定の行為によって引き起こされる特定の臓器に対する等価線量よりもむしろ、実効線量を低減することに重点が置かれてきた。特定の臓器に対する線量に関する主たる関心事は、確定的影響の誘発を防止するためにそれらの線量が関連等価線量限度未満にとどまることを確実なものとするのであった。

防護と安全の最適化の概念は今や、より一般的に考えられており、「防護と安全のレベルが、個人線量の大きさ、被ばくを受ける個人（作業員及び公衆の構成員）の数及び被ばくの可能性を経済的及び社会的要因を考慮に入れて合理的に達成できる限り低くなるように決定するプロセス」と定義されている[1]。その意味合いは、実効線量か等価線量かにかかわらず、あらゆる線量は合理的に達成可能な限り低く保たれるべきである、ということである⁶。これは、眼の水晶体に対する等価線量との関連では不合理ではない。線量限度は、放射線誘発白内障は本来確定的であるという仮定に基づくものであるとはいえ、そのような影響は結局、確率的プロセスによって左右されるかもしれない、線量しきい値は存在しないかもしれないという強化された論拠があるためである[7]。その証拠は、確定的影響の典型的なケースほどの急勾配では上昇しない、より高い線量において観察された白内障誘発の線量－リスク関係に由来する[32, 33, 34]。

⁶ たとえそうだとしても、実効線量を制限する方が眼の水晶体に対する等価線量を制限するよりも重要である。がんの誘発の方が白内障の誘発よりも重大な放射線被ばくの影響とみなされるべきだからである。

雇用者、登録者及び許可取得者は、以下のような予防策の階層に従い、十分な工学的管理及び十分な作業条件を実現することによって、防護と安全のため運営管理及び個人用防護具に依存する必要性を最小化することを要求される：

- ・ 工学的管理；
- ・ 運営管理；
- ・ 個人用防護具（参考文献[1]、3.93 項）。

注意すべきは、作業者の防護の最適化は、他の作業者又は公衆の構成員の被ばく増大若しくは、医療分野においては患者の被ばく増大又は臨床処置の効力低下につながりうることもある、ということである。そのような影響は、用いるべき適切な計画を決定する際に、特に運営管理及び個人用防護具の利用を定める際に考慮に入れるべきである。特に、スタッフの防護計画は、他の作業者、公衆の構成員及び患者の被ばく並びに臨床結果を適切に考慮に入れるものとすべきである。

工学的管理

一般に、眼の水晶体の被ばくをしかるべく考慮に入れた防護の最適化は、ある程度の柔軟性がなお有効な機器及び設備の設計段階において真っ先に考慮すべきである。RS-G-1.1 に言及されているように、事前の放射線学的評価又は安全評価は、「工学的特質の利用によって十分な作業条件を確立するために設計段階においては何が達成されうるのかを決定するのに役立つことになる」（参考文献[8]、5.6 項）。RS-G-1.1[8]に示されているそのような工学的特質の一例は、例えば鉛ガラス遮蔽⁷など、設備の一部である遮蔽の実現であり、これは眼の水晶体の防護との関連で重要である。診断治療用 X 線に対する遮蔽に関するガイダンスは、IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）が作成中である[35, 36]。

運営管理

機器及び作業場の設計が眼の水晶体の被ばくをしかるべく考慮に入れた最適化された防護レベルを達成するのに十分ではない場合、運転手順及び制限の確立（運営管理）に考慮を払うべきである。これらは、作業者との又はその代表者を通じた協議によって作成される、書面による現場規則及び手順として表されるべきである。

⁷ 一部の行為においては、2つの天井吊り下げ遮蔽が考慮されるべきである[37]。

通常運転において眼の水晶体の被ばくを管理するため若しくは想定運転事象において被ばくの可能性及び大きさを制限するために特定の措置が必要とされる場合、管理区域を指定すべきである。管理区域としてすでに指定されているのではないが、たとえ防護と安全のための特定の措置が通常は必要とされないとしてもその職業被ばく条件をレビューし続けることが必要であるいかなる区域も、監視区域として指定すべきである。これらの事項はすべて、影響を受ける作業者に伝達すべきである放射線防護プログラムの一部となる。

個人用防護具

上記の措置が適切なレベルの防護と安全を達成するのに十分ではない場合、個人用防護具の利用が必要かもしれない。特に、適切な防護眼鏡を用いて眼の水晶体を防護することに考慮を払うべきである。被ばくが主としてベータ線によるものである場合、パースペックス製の眼鏡で十分かもしれない。しかし、高エネルギーベータ線によって生み出されるいかなる制動放射も考慮に入れるべきである。被ばくが主として透過性放射線（ガンマ又はX線）によるものである場合、鉛を含有する防護眼鏡の利用に考慮を払うべきである。

例えばベータ線被ばくに対して防護するために従来の産業用安全眼鏡が用いられることになる場合、それらの遮蔽特性を事前に評価すべきである。同様に、鉛を含有する防護眼鏡も、透過性放射線に対する防護における利用の前に評価すべきである。鉛を含有する防護眼鏡は、低エネルギーX線に対する防護にはおそらく十分であろうが、より高エネルギーのガンマ線に対する防護には完全に不十分だろう。X線の場合のそのような評価方法は、IECによって開発されている[36]。

眼鏡レンズの放射線減衰係数は、それだけでは放射線被ばくを低減する保護メガネの有効性を十分表すものではない[19]。レンズによって防護される面積も考慮すべきである。眼鏡は側面遮蔽を備えるべきであり、適切にフィットすべきである[19, 34, 38]。作業場における特定の条件、すなわち放射線場、被ばく及び眼の水晶体に関する放射線の入射角を解析すべきである。IECは、そのような個人用防護具の設計に関するさらなるガイドラインを提供している[39]。

防護眼鏡などの個人用防護具の利用が作業を過度に妨げはしない若しくは実効線量の大幅な増大につながりはしないことを確実なものとするよう、取り計らうべきである（参考文献[1]、3.95項(e)）。

安全評価、放射線防護プログラム及び機器の効力のレビュー

眼の水晶体の新たな線量限度を考慮に入れるために修正された安全評価は、技術仕様又は使用条件が引き続き満たされることを確実なものとするために、レビューし続けることが要求される（参考文献[1]、3.35 項）。さらに、現場規則及び手順を含めた放射線防護プログラム並びに個人用防護具の利用もレビューし続けるべきであり、作業員（及び、必要ならば患者）の防護が最適化されることを確実なものとするために、適宜修正すべきである。

防護眼鏡などの防護具の性能は、必要な防護レベルが維持されていることを確実なものとするために、適切な間隔でチェックすべきである。

情報、指導及び研修

規制機関は、防護と安全に関する規則及び指針を定める又は採用するとともに、それらの実施を確実なものとするためのシステムを確立することを要求される（参考文献[1]の要件 3）。規制機関は特に、その決定によって影響を受ける当事者への情報提供及び当事者との協議を規制システムに含めることを要求される。したがって、眼の水晶体の放射線被ばくの生物学的影響に関する新たな情報並びにその結果として生じる規制要件及び指針の変更が雇用者、登録者及び許可取得者に適切に伝達されることを確実なものとするべきである。

雇用者、登録者及び許可取得者は、防護と安全に関する十分な情報、指導及び研修を作業員に提供することを要求される（参考文献[1]の要件 26）。さらに、雇用者は登録者及び許可取得者と協力して、職業被ばくによる健康上のリスクに関する十分な情報を作業員に提供することを要求される（参考文献[1]、3.10 項）。したがって、雇用者は登録者及び許可取得者と協力して、この新たな情報並びに関連する規制要件及び指針を、影響を受けるかもしれない作業員に提供すべきである。また、放射線防護プログラム、現場規則や運転手順などの関連するいかなる変更についても、これらの作業員に情報を提供し続けるべきである。この情報を必要とする人々、そして、適宜、研修を必要とする人々には以下が含まれる：

- ・ 有資格専門家；
- ・ 放射線防護担当者；
- ・ 医学物理士；
- ・ 眼の水晶体に対する有意な線量を受けるリスクに曝されているかもしれない作業員（医師や看護師などを含む）；

- ・機器のサービスエンジニア。

研修プログラムの中で扱われるべきテーマに関するガイダンスは、RS-G-1.1 に示されている（参考文献[8]、5.95 項）。眼の水晶体の防護との関連では、以下のことを指摘しておく：

- ・作業者の研修は、自分自身及びその作業によって影響を受けるかもしれない他人を放射線被ばくから防護する方法を扱うものとすべきである。特に、医療分野では、研修は患者の防護に関する研修と関連づけられるべきである；

- ・研修は、眼の水晶体に対する線量を推定するために線量計を装着すべき場所を扱うものとすべきである（次節を参照）；

- ・研修は、用いるべき個人用防護具の種類（防護眼鏡、天井吊り下げ遮蔽やその他の遮蔽）、その有効性並びにそれを用いる場合及び方法を扱うものとすべきである；

- ・X線透視インターベンションを行うスタッフの研修は、放射線場の方向が眼の水晶体の被ばくに及ぼす影響を扱うものとすべきである。

3.4 外部放射線による眼の水晶体に対する線量のモニタリング

眼の水晶体に対する等価線量 H_{lens} の最も正確なモニタリング方法は、可能な限り眼の近くに装着され、頭部を代表するファントムに基づいて校正された線量計を用いて、深さ 3 mm における個人線量当量 $H_p(3)$ を測定することである。この手順は実際的ではないかもしれないため、体幹に装着された線量計又は眼の近くに装着された $H_p(0.07)$ 線量計若しくは $H'(0.07)$ 、 $H'(3)$ 又は $H^*(10)$ を測定するためのモニターを用いていずれも測定された $H_p(10)$ 又は $H_p(0.07)$ によって $H_p(3)$ を評価するなど、他の方法を用いてもよい。

モニター及び線量計に関する性能要件

適切な個人モニタリングを確実なものとするために、モニター及び／又は線量計は国際的に合意を得た性能要件に従うものとすべきである。現在のところ、 $H_p(3)$ のために設計された線量計は広範には利用可能でないため、他の量に対応するモニター及び線量計を用いてもよい。これらの要件は、IEC 及び ISO（International Organization for Standardization：国際標準化機構）の基準に述べられている。表 1 は、これらの基準の概要を示したものである。

四肢線量計が $H_p(3)$ に関して型式試験を通るならば、それに応じて校正することが可能である。もう 1 つの方法は、 $H_p(3)$ を直接測定するために $H_p(0.07)$ に対応する線量計を修正することである。これに関する一例は発表されている[40]。そのような場合、たとえ線量計が性能向上を必要とするかもしれないとしても、眼の水晶体の線量評価のための線量測定性能は明白である。すなわち、 $H_p(3)$ 応答はわかっており、眼の水晶体に対する線量の推定は、作業場の放射線場情報（すなわち、エネルギー及び入射角）を考慮に入れることなしに直接行われる。しかし、保守的な $H_p(3)$ 値を推定するために $H_p(0.07)$ 又は $H_p(10)$ に関して型式試験済かつ校正済の線量計を用いることができるのは、作業場の放射線場に関する情報が利用可能な場合のみである。そのような場合、測定の精度は低くなり、限度に近い眼の水晶体に対する線量を導くような測定された線量値は慎重に考慮されるべきであることを知っておくべきである。

受動形線量計とは対照的に、能動形線量計（特に、主として放射線防護目的のために設計された電子装置）は、例えば IVR の場合に存在するようなパルス放射線場においては性能が劣る可能性がある[41] [42] [43]。表 1 に示した基準に加えて、IEC[44]によって発表されている、電子モニター及び線量計に対するパルス放射線に関する性能試験を用いるべきである。「パルス放射線」という用語は、ISO[45]に由来する技術仕様に定義されている。

深さ 3 mm における方向性線量当量 $H'(3)$ を測定するエリアモニターについては、現在のところ利用可能な基準はない。光子及び中性子の場合、基本量の空気カーマ K_a から $H'(3)$ への換算係数は国際的に合意を得ておらず、したがって、ICRU（International Commission on Radiation Units and Measurements：国際放射線単位測定委員会）報告書 57[46]や ICRP 刊行物 74[47]などの ICRU 又は ICRP 刊行物には含まれておらず、文献においても利用可能でない。

表 1. モニター及び線量計に関する国際基準の概要

放射線の種類	エリアモニター		個人線量計	
	能動形	受動形	能動形	受動形
光子及び ベータ粒子	IEC 60846-1[48] $H'(0.07)$ 及び $H^*(10)$	IEC 62387[49] $H'(0.07)$ 及び $H^*(10)$	IEC 61526[50] $H_p(0.07)$ 及び $H_p(10)$	IEC 62387[49] $H_p(0.07)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(10)$
中性子	IEC 61005[51] $H^*(10)$	---	$H_p(10)$	ISO 21909[52] $H_p(10)$

日常モニタリングに先立つ線量レベルの推定

日常個人モニタリングを行う前に、もしあればどのような方法を、また日常モニタリングのどのような間隔を用いるべきなのかを決定するために、作業場の放射線場状況における眼の水晶体に対する線量を推定すべきである。眼の水晶体に対する線量の日常モニタリングは、水晶体に対する年等価線量が 5 mSv 規模の線量を超えそうなことを暫定推定が示している場合に行うべきである。

線量は、以下の方法の 1 つ以上によって推定してもよい：

- ・ 作業場モニタリング；
- ・ 文献データの利用；
- ・ シミュレーションの利用；
- ・ 確認測定すなわち、限られた期間にわたる個人モニタリングの利用。

作業場モニタリング

長期間（少なくとも数カ月）にわたって予見しうる放射線場及び確立した手順を伴う作業状況においては、関連する場所における作業場モニタリングを用いて、作業者が受けることになる線量を推定することが可能である。 $H'(3)$ に対応するエリアモニターは現在のところ利用可能でないため、測定器の選択においては特に注意を払うべきである。表 3 及び 4 は、適切な線量計及び量の選択方法に関するガイダンスを示したものである（周囲線量が考慮されている場合、これらの表における H_p は H' によって置き換えられるべきである）。測定場所は、個人がその下で被ばくを受けることになる条件を代表するものとすべきである。

線量の推定は、その推定がもはや妥当ではないほど作業条件又は作業量が変化する場合に繰り返す必要がある。

文献データの利用

さまざまな作業場状況について、線量に関する何らかの情報が文献に示されているかもしれない[53]。これらは基本的に、モニタリングは必要とされるのかどうかを判断するために利用することができる。データは、放射線源（例えば、放射性核種や X 線管の電圧）及び

ジオメトリ（例えば、放射線医学における寝台下方又は上方設置）に関する作業場条件を適切に反映するものとすべきである。文献から引用されたデータの例は、添付資料 II に見出すことができる。

シミュレーションの利用

数値シミュレーションは極めて有効でありうるし、所定の被ばくシナリオにおいて受けられると思われる線量に影響を及ぼすパラメータに関する重要な情報を得るために利用することができる[28, 54]。オペレータの眼の水晶体に対する線量の迅速な推定を得るために利用しうる容易に利用可能なパッケージはないが、汎用数値コード[55, 56, 57]を特定の状況に適用することは可能である。状況にもよるが、シミュレーションは複雑かつ時間を消費することがよくある。シミュレーションの利用による結果は、サンプル測定によって検証すべきである。

確認測定すなわち、限られた期間にわたる個人モニタリングの利用

個人モニタリングは必要とされるのかどうかを決定するためのもう 1 つの方法は、個人線量計を用いて確認測定を実施することによるものである。そのような確認測定は、以下のようなものとすべきである：

- ・ 日常モニタリングを模倣するものであり、次節に述べるように実施される；
- ・ 最低 3 つの連続期間にわたって実施される。その目的は、年線量の代表的なサンプルを得ることである。線量計は、存在する放射線の種類にふさわしいものとすべきであるため、その選択には特に注意を払うべきである。作業活動が極めて不規則である場合（月ごとの変動が大きい）、より長いモニタリング期間が必要とされる。場合によっては、1 年全体にわたる確認測定が必要とされるかもしれない。

日常モニタリング

眼の水晶体に対する線量のモニタリング方法は主として、作業者が曝される放射線の種類に左右される。すなわち、この TECDOC では中性子、光子及びベータ線を扱う。それぞれの種類の放射線について、眼の水晶体に対する線量のモニタリングにおいて考慮に入れるべき、以下のような 3 つの主たる影響因子がある：

- (a) 入射放射線のエネルギー及び角度；

(b) 放射線場のジオメトリ（モニタリング期間中に変化するかもしれない）；

(c) 個人用防護具又は十分に厚い遮蔽の使用法及びその正しい利用。

3種類の放射線それぞれについて、眼の水晶体に対する線量のモニタリングに関するガイダンスとなる、これらの影響因子それぞれを扱った別個の表を示してある。表2~4を参照されたい。行A~Cは論理的な順に読むべきである。すなわち、最初に影響因子A、次にB、そして最後にCを適用すること。そうすることによって、考えうるあらゆるケースが扱われる。

作業者は、2種類以上の放射線に被ばくすることがよくある。したがって、モニタリングは、安全指針RS-G-1.1における勧告に沿って（参考文献[8]、5.64項）、しかし、眼の水晶体に対する総線量が5 mSvを超えると推定されるような場合にのみ、年に約1 mSv超の寄与をするすべての種類の放射線について行うべきである。混合放射線場においては、2つ以上の線量計が必要かもしれない（表5を参照）。

線量計は、適切なファントムを用いて、 $H_p(3)$ に関して型式試験及び校正を行うべきである。放射線場がよくわかっている場合、 $H_p(3)$ は、他の量すなわち $H_p(0.07)$ 及び $H_p(10)$ に関して型式試験済かつ校正済の線量計を用いることによって推定することができる。多くの場合、それらは眼の水晶体に対する線量の十分な推定をもたらさうするためである。しかし、そのような場合、有資格専門家は、眼の水晶体に対する線量の推定の正確さは低下し、眼の水晶体に対する線量の測定の不確かさは増大すると思われることを承知しておくべきである。表2~4には、 $H_p(0.07)$ 又は $H_p(10)$ に関して型式試験済かつ校正済の線量計が使用できるケース並びに $H_p(3)$ に関して型式試験済かつ校正済の線量計を使用しなければならない場合を知らせるケースについて、ガイダンスが示されている。しかし、作業場の放射線場は必ずしも事前にわかっているとは限らないことを承知しておくべきである。

状況によっては、1つはエプロン下側（胸の上）、1つはエプロン上側（襟の近く）の、少なくとも2つの線量計が用いられていることを指摘しておく。襟の近くの線量計の示度から眼の水晶体に対する線量を決定する場合、表2~4を考慮に入れるべきである。

表3は光子放射線を扱っている。注意すべきは、量 $H_p(0.07)$ に対応する四肢線量計が量 $H_p(3)$ に対応する線量計の代わりに用いられる場合、線量計は以下のようなものとすべきである、ということである：

- ・ 適切なファントムに基づく型式試験と校正のいずれも済んでいる（量 $H_p(10)$ に対応する全身線量計の場合にそうであるように）；
- ・ 若しくは、身体（すなわち頭部）から戻る散乱線を正しく検出する。これは通常、線量計の背壁上に厚い材料を持たない四肢線量計の場合にあてはまる。例えば、厚さ約 1～3 mm のプラスチック製背壁が適切でありうるだろう [58]。

そこでは最大ベータエネルギーが 0.7 MeV を上回り、作業者の眼をベータ線から遮蔽することができない（これは通常、厚さ数 mm の透明プラスチック製眼鏡を用いて可能であるはずとはいえ）光子／ベータ混合放射線場に曝される場合、量 $H_p(3)$ に対応する線量計を用いるべきである（表 4 及び 5 を参照）。そのような線量計は通常、光子及びベータ線のいずれも検出するため、同じ方法を用いて、すなわち、同じ量について同じ校正用ファントムに基づいて、型式試験及び校正を行うべきである。過去、量 $H_p(3)$ についてはスラブファントム（量 $H_p(10)$ に対応する全身線量計の場合に用いられるような）が提言された [59]。最近では、円筒ファントムが提言されている [60, 61, 62]。調査は、確立したスラブファントムの代わりに新しい円筒ファントムを用いることは、入射角が大きい場合（75°超。90°では、型式試験に用いることができるのは円筒ファントムのみである）を除いて、測定品質を大幅に向上させはしないことを示している [63]。したがって、円筒ファントムがない場合は、その利用可能性及び校正実験室における使用歴ゆえに、75°までの入射角に対応するスラブファントムを用いることが推奨される。

表 2. 中性子による線量

影響因子	コメント	
<p style="text-align: center;">A (エネルギー及び角度)</p>	<p>一定の中性子エネルギー及び入射角においては、全身モニタリングは眼の水晶体に対する線量に関して保守的であるとは思われない[64]。したがって、眼の水晶体の中性子線量測定は一部の作業場状況においては必要になるかもしれない[64]が、これはさらに調査を必要とする。</p>	
<p style="text-align: center;">B (ジオメトリ)</p>	均一な放射線場は存在するか？	
	<p>yes の場合 ↓ 体幹におけるモニタリングを用いてもよい。</p>	<p>no の場合 ↓ 眼の近くにおけるモニタリングが必要である。</p>
<p style="text-align: center;">C (防護具)</p>	<p>用いられているいかなる個人用防護具も、中性子放射線から十分には防護しないかもしれない。</p>	

表 3. 光子放射線による線量

影響因子	コメント		
A (エネルギー 及び角度)	平均光子エネルギーは約 40 keV を下回るか？		
	yes の場合 ↓ $H_p(0.07)$ を用いてもよいが、 $H_p(10)$ を用いてはならない (参考文献[65]における図 6 及び参考文献[66]における図 1 を参照)。	no の場合 ↓ 放射線は主として前方から来ているのか、若しくは当該人物は放射線場の中を移動しているのか？	
		yes の場合 ↓ $H_p(0.07)$ 又は $H_p(10)$ を用いてもよい (参考文献[66]における図 1 を参照)。	no の場合 ↓ $H_p(0.07)$ を用いてもよいが、 $H_p(10)$ を用いてはならない (参考文献[66]における図 1 を参照)。
	B (ジオメトリ)	均一な放射線場は存在するか？	
yes の場合 ↓ 体幹におけるモニタリングを用いてもよい。		no の場合 ↓ 眼の近くにおけるモニタリングが必要である。	
C (防護具)	鉛ガラス、天井、テーブル遮蔽や側方吊り下げ遮蔽などの防護具は用いられているか？		
	眼のために用いられている場合 ↓ 眼の近く及び防護具の下又は同等の材料層の下におけるモニタリングが必要である。さもないければ、遮蔽を考慮に入れるための適切な補正係数を適用すべきである。	体幹のために用いられている場合 (例えば、鉛エプロン) ↓ 眼は体幹遮蔽によって防護されないため、遮蔽の下におけるモニタリングは眼の水晶体に対する線量を過小評価する。 ↓ 眼の近くにおける別個のモニタリングが必要である。	

表 4. ベータ線による線量

影響因子	コメント	
<p style="text-align: center;">A (エネルギー及び角度)</p>	最大ベータエネルギーは約 0.7 MeV を上回るか？	
	<p style="text-align: center;">no の場合 ↓ ベータ線は眼の水晶体まで透過しないため、そのためのモニタリングは必要でない。</p>	<p style="text-align: center;">yes の場合 ↓ 行 B 及び C に述べられているようにモニタリングが必要である。</p>
<p style="text-align: center;">B (ジオメトリ)</p>	<p>ベータ線場は通常、むしろ不均一であるため、眼の近くに配置された線量計を用いて、眼の水晶体に対する線量のモニタリングが必要である。しかし、十分に厚い遮蔽が用いられる場合、これは必要ではないかもしれない。影響因子 C を参照。</p>	
<p style="text-align: center;">C (防護具)</p>	ベータ線を吸収するのに十分厚い遮蔽やガラスなどの防護具は用いられているか？	
	<p style="text-align: center;">眼のために用いられている場合 ↓ ベータ線は完全に遮蔽に吸収されるため、「光子放射線」を考慮すること。しかし、制動放射を考慮に入れなければならない—遮蔽外部と遮蔽内部の両方で生じるものによる寄与。</p>	<p style="text-align: center;">用いられていない場合 ↓ $H_p(3)$が唯一の適切な量である。</p>

表 5. 表 2～4 にあてはまる線量計の種類及び位置についての、混合放射線場⁸における眼の水晶体に対する線量のモニタリングのために必要な線量計の選択に関するガイダンス

場における放射線			必要な種類の線量計
中性子	光子	0.7 MeV を 上回る ベータ	
x ¹			中性子に対応する 1 つの $H_p(10)$ 線量計
	x		光子に対応する 1 つの $H_p(0.07)$ 線量計 及び／又は 1 つの $H_p(10)$ 線量計
		x	ベータ線に対応する 1 つの $H_p(3)$ 線量計
x	x		中性子に対応する 1 つの $H_p(10)$ 線量計並びに 光子に対応する 1 つの $H_p(0.07)$ 線量計 及び／又は 1 つの $H_p(10)$ 線量計
x ¹		x	中性子に対応する 1 つの $H_p(10)$ 線量計並びに ベータ線に対応する 1 つの $H_p(3)$ 線量計
	x	x	光子及びベータ線に対応する 1 つの $H_p(3)$ 線量計
x	x	x	中性子に対応する 1 つの $H_p(10)$ 線量計並びに 光子及びベータ線に対応する 1 つの $H_p(3)$ 線量計

¹ 中性子放射線はほとんど常に光子放射線を伴うが、完全さのためにここには中性子放射線のみの可能性を挙げてあることに言及しておく。

⁸ さらに、実効線量及び／又は皮膚線量のモニタリングのためにさらなる線量計が必要かもしれない。

3.5 健康サーベイランス

作業者の健康サーベイランスのためのプログラムは、以下であることが要求される：

- ・労働衛生に関する一般原則に基づいている；
- ・意図されたその職務に対する作業者の当初の適性及び適性の継続を評価するように立案されている（参考文献[1]、3.108 項）。

安全指針 RS-G-1.1（参考文献[8]、7.2 項）は、さらなる目的は、特定の有害薬品への偶発的な曝露の場合に、また、作業者が曝される又は曝されるかもしれない放射線のリスクに関する作業者の特定のカウンセリングのために利用することができる情報のベースラインをもたらすこと並びに、過剰被ばくを受けた作業者の管理を支援することである、と述べている。

RS-G-1.1（参考文献[8]、7.5 項）は、「放射線作業の開始前の検査と、その後の定期的な再検査を行うべきである」と述べている。同指針はさらに、当初の検査は、作業中に特定の予防措置を必要とするかもしれない健康状態にあるような作業者を確認するために利用すべきである、と述べている。同指針は、作業環境の放射線要素が、放射線を用いる作業を行う作業者の適性に関する決定に著しい影響を及ぼすこと若しくは業務の一般条件に影響を及ぼすことはまれであるべきである、と指摘している。定期的な再検査に関する限りでは、同指針は、それらの再検査では、放射線を用いる作業の間に作業者の健康を害する可能性のあるいかなる臨床症状も発現していないことを確認することに焦点を当てるべきである、と述べている。

眼の水晶体の線量限度の基礎となっている線量しきい値は 0.5 Gy であるため、以下のことを指摘しておく：

- ・意図した職務に対する作業者の適性を判断する目的を除いて、放射線作業を開始する前に眼の検査を行う必要はない；
- ・就労生活を通して平均で年に 20 mSv を上回る眼の水晶体に対する線量を受けてはいない作業者は、労働衛生に関する上記の一般原則によって要求されるものを超えるいかなる追加の診察を受ける必要はない；
- ・0.5 Gy を上回る眼の水晶体に対する累積線量をすでに受けている若しくは、現在新たな

線量限度に従うとして、あと数年後にはこのレベルを超える線量を累積するかもしれない作業員は、定期的な視覚検査を受ける必要があるかもしれない。これは、意図された職務（例えば、IVRにおける）を果たす作業員の能力に関係するものであり、放射線防護策そのものとみなすべきではない。

0.5 Gy を多少上回る累積線量における視覚障害のリスクは小さいとみなされるとはいえ、それでもなお、そのような健康影響は確認すべきであり、時間に伴うその進展を決定するために適切に監視すべきである。たとえ作業員に混濁が見つかったとしても、その作業員が職務を行うのに適任であるならば（すなわち、その作業員の視覚は、もはや作業を適切に行うことができないほどには損なわれてはいない）、これは放射線を用いる作業からその作業員を排除する理由とみなすべきではない。雇用者は、0.5 Gy 以上の累積線量を受けうるとされる作業員が関連する健康上のリスクを事前に知らされており監視されていることを確実なものとするべきである。

3.6 緊急作業員の被ばく

GSR Part 3（暫定版）は、以下の場合を除いていかなる緊急作業員も 50 mSv を超える緊急時被ばくを受けないことを確実なものとするよう、対応組織及び雇用者に要求している：

- (a) 人命を救助する又は重傷を防止する目的の場合；
- (b) 重篤な確定的影響を防止するための活動並びに人及び環境に著しい影響を与え得る壊滅的状態への進展を防止するための活動を行う場合；若しくは
- (c) 大規模な集団線量を回避するための活動を行う場合（参考文献[1]、4.15 項）。

これらの例外的な状況においては、対応組織及び雇用者は、緊急作業員に対する線量 ($H_p(10)$) を、最初の 2 つの活動の場合は 500 mSv 未満に、そして 3 つ目の活動の場合は 100 mSv 未満に保つために、合理的なあらゆる努力をすることを要求される（参考文献[1]の表 IV-2、また、参考文献[67]の表 4 と一致）。

$H_p(10)$ は $H_p(3)$ の代わりにもなるが、最大エネルギーが約 0.7 MeV を上回るベータ線若しくは平均エネルギーが約 40 keV を下回る光子放射線への被ばくの場合は除く（表 3 及び 4 を参照）。後者のこれらの場合、 $H_p(10)$ に対する制限は、眼の水晶体の防護のためには十分でない。

緊急作業者が有意なレベルのベータ線又は低エネルギー光子放射線に曝されそうな場合、状況にもよるが、眼の水晶体に対する線量を少なくとも 500 mSv 未満（上記(a)及び(b)の場合）若しくは 100 mSv 未満（上記(c)の場合）に低減するために眼の遮蔽（例えば、低 Z 材料製の眼鏡による）を用いるべきである。

参考文献

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna (2011).
- [2] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).
- [3] EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Agency's Health and Safety Measures, INFCIRC/18, IAEA, Vienna (1960).
- [5] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP, 37(2-4), Elsevier, (2007).
- [6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3), Elsevier, (1991).
- [7] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 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), Elsevier, (2012).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.1, IAEA, Vienna (1999).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.2, IAEA, Vienna (1999).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation, IAEA Safety Standards Series No. RSG-1.3, IAEA, Vienna

- (1999).
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials, IAEA Safety Standards Series No. RSG-1.6, IAEA, Vienna (2004).
 - [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.5, IAEA, Vienna (2002).
 - [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Technical Services in Radiation System, IAEA Safety Standard Series No. GS-G-3.2, IAEA, Vienna (2008).
 - [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Applying Radiation Safety Standards in Radiotherapy, IAEA Safety Reports Series No. 38, IAEA, Vienna (2006).
 - [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Applying Radiation Safety Standards in Diagnostic Radiology and Interventional Procedures Using X Rays, IAEA Safety Reports Series No. 39, IAEA, Vienna (2006).
 - [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine, IAEA Safety Reports Series No. 40, IAEA, Vienna (2005).
 - [17] MARTIN, C.J., A 20 mSv dose limit for the eye: sense or no sense?, *J. Radiol. Prot.*, 31 (2011) 385-387.
 - [18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures, ICRP Publication 113, *Ann. ICRP*, 39(5), Elsevier, (2009).
 - [19] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiological protection in cardiology, ICRP Publication 120, *Ann. ICRP*, 42(1), Elsevier, (2013).
 - [20] VANO, E., GONZALEZ, L., BENEYTEZ, F., MORENO, F., Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71 (1998) 728–733.
 - [21] VANO, E., et al., Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 174 (2010) 490–495.
 - [22] PAGES, J., Effective dose and dose to the crystalline lens during angiographic procedures, *JBR-BTR: Organe de la Societe Royale Belge de Radiologie*, 83, 108–110, (2000).
 - [23] HIDAJAT, N., WUST, P., FELIX, R., SCHRODER, R.J., Radiation exposure to patient and staff in hepatic chemoembolization: risk estimation of cancer and deterministic effects. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*, 29 (2006) 791–796.
 - [24] KIM, K.P., et al., Occupational Radiation Doses to Operators Performing Cardiac Catheterization Procedures, *Health Phys.* 94 (2008) 211–227.

- [25] VANO, E., GONZALEZ, L., FERNANDEZ, M., HASKAL, Z.J., Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted, *Radiology* 248 (2008) 945–953.
- [26] CIRAJ-BJELAC, O., et al., Risk for radiation induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern? *Catheter Cardiovasc Interv.* 76 (2010) 826–834.
- [27] PADOVANI, R., et al., ISEMIR – an international project to optimise occupational radiation exposure in interventional cardiology. In: *Proceedings of the Bonn Conference, IAEA*, (in preparation)
- [28] VANHAVERE, F., et al., ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, EURADOS Report 2012-02, Braunschweig, (2012). (http://www.eurados.org/~media/Files/Eurados/documents/EURADOS_Report_201202.ashx)
- [29] EL-SABBAHY, H., Health and Safety Executive, United Kingdom, private communication (2013).
- [30] LE HERON, J., et al., Current Practice of Occupational Protection in Industrial Radiography, *Proceedings of the IRPA13 conference, paper TS6d.5, Glasgow*, (2012).
- [31] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable, ICRP Publication 22, Pergamon Press, (1973).
- [32] BOUFFLER, S., AINSBUTY, E., GILVIN, P., HARRISON, J., Radiation-induced cataracts: the Health Protection Agency’s response to the ICRP statement on tissue reactions and recommendations on the dose limit for the eye lens, *J. Radiol. Prot.* 32 (2012) 479-488.
- [33] NERIISHI, K., et al., Radiation dose and cataract surgery incidence in atomic bomb survivors, 1986-2005 *Radiology* 265 (2012) 167-174.
- [34] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures, NCRP Report No. 168, Bethesda, MD., NCRP (2010).
- [35] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Protective Devices against Diagnostic Medical X-radiation: Part 1: Determination of Attenuation Properties of Materials, IEC 61331-1, (in preparation)
- [36] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Protective Devices against Diagnostic Medical X-radiation: Part 2: Translucent Protective Plates, IEC 61331-2, (in preparation).
- [37] DUMONCEAU, J.M., et al., Radiation protection in digestive endoscopy: European Society of Digestive Endoscopy (ESGE) guideline, *Endoscopy* 44 (2012) 408-421
- [38] STURCHIO, G.M., et al., Protective Eyewear Selection for Interventional Fluoroscopy, *Health Physics* 104 (Supplement), S11-S16, (2013).
- [39] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Protective Devices against

- Diagnostic Medical X-radiation: Part 3: Protective Clothing, Eyewear and Protective Patient Shields, IEC 61331-3, (in preparation).
- [40] MARIOTTI, F., et al., ENEA extremity dosimeter based on LiF(Mg,Cu,P) to evaluate Hp(3, α), Radiat. Prot. Dosim. 144 (2011) 187-191
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Intercomparison of Personal Dose Equivalent Measurements by Active Personal Dosimeters, IAEA TECDOC 1564 (2007).
- [42] ANKERHOLD, U., HUPE, O., AMBROSI, P., Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields, Rad. Prot. Dosim. 135 (2009) 149-153.
- [43] CLAIRAND I., et al., Use of personal dosimeters in interventional radiology and cardiology. Test in laboratory condition and recommendations - ORAMED project, Radiat. Meas. 46 (2011) 1252-1257.
- [44] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Electronic Counting Dosimeters for Pulsed Fields of Ionizing Radiation, IEC 62743 (2012).
- [45] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION, Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation – Part 1: Photon radiation, ISO/CD 18090-1 (in preparation).
- [46] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRU Report 57, Bethesda, MD, ICRU (1998).
- [47] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4), ICRP (1996).
- [48] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Ambient and/or Directional Dose Equivalent (Rate) Meters and/or Monitors for Beta, X and Gamma Radiation - Part 1: Portable Workplace and Environmental Meters and Monitors, IEC 60846-1 (2009).
- [49] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Passive Integrating Dosimetry Systems for Environmental and Personal Monitoring of Photon and Beta Radiation, IEC 62387 (2012).
- [50] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Measurement of Personal Dose Equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, Gamma, Neutron and Beta Radiations – Direct Reading Personal Dose Equivalent Meters and Monitors, IEC 61526 (2010).
- [51] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Neutron Ambient Dose Equivalent (Rate) Meters (currently under revision),

- IEC 61005 (2003).
- [52] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION, Radiation Protection – Passive Personal Neutron Dosemeters – Performance and Test Requirements (currently under revision), ISO 21909 (2005).
- [53] VANHAVERE, F., et al., Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: final results of ORAMED project, *Radiat. Meas.* 46 (2011) 1243-1247.
- [54] KOUKORAVA, C., CARINOU, E., FERRARI, P., KRIM, S., STRUELENS, L., Study of parameters affecting operator doses in interventional radiology using Monte Carlo simulations, *Radiat. Meas.* 46 (2011) 1216-1222.
- [55] LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, RSICC Code Package CCC-740 (Distributed by the Radiation Safety Information Computing Center, Oak Ridge National Laboratory) (2008).
- [56] KAWRAKOW, I., MAINEGRA-HING, E., ROGERS, D.W.O., TESSIER, F., WALTERS, B.R.B., The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, NRCC Report PIRS-701, (2011).
- [57] AGOSTINELLI, S., et al., GEANT4—A Simulation Toolkit, *J. NIMA*, 506 (2003) 250-303.
- [58] BEHRENS, R., ENGELHARDT, J., FIGEL, M., HUPE, O., JORDAN, M., SEIFERT, R., Hp(0.07) Photon Dosemeters for Eye Lens Dosimetry: Calibration on a Rod vs. a Slab Phantom, *Rad. Prot. Dosim.* 148 (2012) 139-142.
- [59] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION, Individual Thermoluminescence Dosemeters for Extremities and Eyes, ISO 12794 (2000).
- [60] GUALDRINI, G., MARIOTTI, F., WACH, S., A new cylindrical phantom for eye lens dosimetry development, *Radiat. Meas.* 46 (2011) 1231–1234.
- [61] GUALDRINI, G., et al., Air kerma to Hp(3) conversion coefficients for photons from 10 keV to 10 MeV, calculated in a cylindrical phantom, *Radiat. Prot. Dosim.* 154 (2013) 517-521.
- [62] DAURES, J., GOURIOU, J., BORDY, J.M., Monte carlo determination of the conversion coefficients Hp(3)/Ka in a right cylinder phantom with ‘PENELOPE’ code. Comparison with ‘MCNP’ simulations, *Radiat. Prot. Dosim.* 144 (2011) 37-42.
- [63] BEHRENS, R., On the operational quantity Hp(3) for eye lens dosimetry, *J. Rad. Prot.* 32 (2012) 455-464.
- [64] G. GUALDRINI, P. FERRARI, AND R. TANNER, Fluence to Hp(3) conversion coefficients for neutrons from thermal to 15 MeV., *Radiat. Prot. Dosim.* (2013) doi:10.1093/rpd/nct126.
- [65] BEHRENS, R., DIETZE, G., Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate?, *Phys. Med. Biol.* 55 (2010) 4047-4062.
- [66] BEHRENS, R., Monitoring the Eye Lens, Proceedings of the IRPA13 conference, paper TS7e.3, Glasgow, (2012). http://www.ptb.de/en/org/6/63/f_u_e/ts7e_3.pdf
- [67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Criteria for Use in Preparedness and

Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GSG-2,
IAEA, Vienna (2011)

添付資料 I.

計画被ばく状況における職業被ばくの場合の線量限度⁹

18 歳を超える作業者の職業被ばくの場合、線量限度は以下のとおりである：

- (a) 連続する 5 年間¹⁰の平均で年あたり 20 mSv (5 年間で 100 mSv)、いかなる単一年においても 50 mSv の実効線量；
- (b) 連続する 5 年間の平均で年あたり 20 mSv (5 年間で 100 mSv)、いかなる単一年においても 50 mSv の眼の水晶体に対する等価線量；
- (c) 年に 500 mSv の四肢（手足）又は皮膚¹¹に対する等価線量。

妊娠を告知した若しくは授乳している女性の作業者の場合、職業被ばくには追加の制限が適用される。

放射線に関わる職業のために研修を受けている 16～18 歳の見習生の職業被ばく若しくは学校教育課程において線源を使用する 16～18 歳の学生の被ばくの場合、線量限度は以下のとおりである：

- (a) 年に 6 mSv の実効線量；
- (b) 年に 20 mSv の眼の水晶体に対する等価線量；
- (c) 年に 150 mSv の四肢（手足）又は皮膚¹¹に対する等価線量。

⁹ これらの線量限度は GSR Part 3[1]の別表 III から引用されている。

¹⁰ 平均する期間の開始は、これらの基準の発効日後の関連する 1 年の期間の初日と一致しなければならない、遡及的な平均は行わない。

¹¹ 皮膚の等価線量限度は、皮膚のうち最も高い照射を受けた領域の 1 cm²にわたる平均線量に適用される。皮膚に対する線量は実効線量にも寄与し、この寄与は、皮膚全体に対する平均線量に皮膚の場合の組織加重係数を乗じたものである。

添付資料 II.

IVR における手技 7 当たりの眼の水晶体に対する等価線量の典型的な値

IVR における手技あたりの眼の水晶体に対する等価線量の典型的な値を表 II-1 に示す。表 II-1 における結果は、眼の水晶体に対する線量はかなり変動することを示している。これらの線量は、防護手段の利用並びに、検査手法及びアイソセンターからの距離を含めた、適用される作業慣行に左右される。手技あたりの眼の水晶体に対する線量は、10 μSv から数 mSv の範囲である。最大値は、寝台上方 X 線管のジオメトリ並びに天井吊り下げ遮蔽及び眼鏡がない場合と関連する。

表 II-1. さまざまな X 線手技における手技あたりの眼の水晶体の典型的な線量

手技	眼の線量 (mSv)	備考
肝臓化学塞栓術 ¹² [1]	0.27~2.1 (範囲)	遮蔽なし
	0.016~0.064 (範囲)	遮蔽あり
腸骨血管形成術 ¹² [1]	0.25~2.2 (範囲)	遮蔽なし
	0.015~0.066 (範囲)	遮蔽あり
神経塞栓術 (頭部、脊椎) ¹² [1]	1.4~11 (範囲)	遮蔽なし
	0.083~0.34 (範囲)	遮蔽あり
肺血管造影[1]	0.19~1.5 (範囲)	遮蔽なし
	0.011~0.045 (範囲)	遮蔽あり
TIPS 形成[1]	0.41~3.7 (範囲)	遮蔽なし
	0.025~0.11 (範囲)	遮蔽あり
脳血管造影 (CA)		
[2]	0.046 (平均)	遮蔽なし
[2]	0.025 (平均)	遮蔽あり
[3]	0.014 (平均)	遮蔽あり
[4]	0.013 (平均)	遮蔽あり
血管内動脈瘤修復 (EVAR) [5]	0.010 (平均)	遮蔽なし
泌尿器科 [6]	0.026 (平均)	遮蔽なし
整形外科 ¹³ [7]	0.05	遮蔽なし
子宮卵管造影 (HSG) [8]	0.14 (平均)	遮蔽なし

¹² 患者をシミュレートするファントムを用いて推定された線量。

¹³ 204 人の患者について記録された患者の被ばくデータから数学的にシミュレートされたスタッフの被ばく。

手技	眼の線量 (mSv)	備考
内視鏡的逆行性 胆管膵管造影 (ERCP)		
[9]	0.094 (平均)	寝台下方 X 線管
[10]	0.55 (平均) 2.8 (最大)	寝台上方 X 線管

添付資料 II の参考資料

- [1] VANO, E., GONZALEZ, L., FERNÁNDEZ, J.M., HASKAL, Z.J., Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted, *Radiology* 248 (2008) 945-953.
- [2] JACOB, S., et al., Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses, *Radiat. Prot. Dosim.* 153 (2013) 282-293.
- [3] MARSHALL, N.W., NOBLE, J., FAULKNER, K., Patient and staff dosimetry in neuroradiological procedures, *Br. J. Radiol.* 68 (1995) 495-501.
- [4] EFSTATHOPOULOS, E.P., et al., Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures, *Br J Radiol.* 84 (2011) 70-77.
- [5] HO, P., et al., Ionizing radiation absorption of vascular surgeons during endovascular procedures, *J. Vasc. Surg.* 46 (2007) 455-459.
- [6] SAFAK, M., OLGAR, T., BOR, D., MERKMEIN, G., GOGUS, C., Radiation doses of patients and urologists during percutaneous nephrolithotomy, *J. Radiol. Prot.* 29 (2009) 409-415.
- [7] TSALAFOUTAS, I.A., et al., Estimation of radiation doses to patients and surgeons from various fluoroscopically guided orthopaedic surgeries, *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (2008) 112-119.
- [8] SULIEMAN, A., et al., Radiation dose optimisation and risk estimation to patients and staff during hysterosalpingography, *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (2008) 217-226.
- [9] OLGAR, T., BOR, D., BERKMEIN, G., YAZAR, T., Patient and staff doses for some complex X-ray examinations, *J. Radiol. Prot.* 29 (2009) 393-407.
- [10] BULS, N., PAGES, J., MANA, F., OSTEALUX, M., Patient and staff exposure during endoscopic retrograde cholangiopancreatography. *Br. J. Radiol.* 75 (2002) 435-443.

添付資料 III.

画像誘導インターベンション手技においてスタッフが患者に極めて接近して作業する医療行為に関するガイダンス

IVR における眼の水晶体に対する職業線量についての、IVR に関する作業グループの勧告¹⁴

ICRP は 2011 年 4 月に、眼の水晶体の場合、組織反応のためのしきい値は今や 0.5 Gy とみなされる、という声明を発表した。結果として、ICRP は、年に 20 mSv という眼の水晶体の新たな職業線量限度を勧告した。この勧告は、2011 年 11 月に発行された IAEA の国際基本安全基準暫定版に組み込まれている。

引き下げられた新たな限度には、IVR を含めた職業被ばくのいくつかの分野にとって、眼の水晶体に関する防護策の最適化の必要性を強調する重要な意味合いがある。

IVR の現実には、眼に対する防護策が IVR 研究室において何ら用いられないならば、作業量が典型的な職員は、線量限度を大きく超過することになり、時間とともに水晶体混濁に帰着しうるのであろう、眼の水晶体に対する線量を受けることになると思われる、というものである。

逆に、IVR の機器が正しく機能しており、処置計画が最適化されており、眼に対する防護手段が用いられているならば、眼の水晶体に対する線量は線量限度を下回ることになり、典型的な作業量の場合で年に数 mSv であると思われる。

ISEMIR 調査の結果は、防護手段及び個人線量計の利用は一様でなく、職業線量モニタリングの品質は劣っており、結果として、実際の線量に関する知識は限られていることを示唆している。これには、専門家、病院又は診療所の管理者及び規制機関にとって意味合いがある。

ISEMIR の WGIC は以下のように勧告する。

- ・あらゆる IVR 職員に対する放射線防護に関する研修には、実際的な訓練又は実演とともに、眼の水晶体に対する線量を低減するための方法が含まれるべきである。研修では能動形線量計を用いるべきである。
- ・患者の近くで作業する IVR 専門家は、適切に配置された天井吊り下げ防護遮蔽を用い

¹⁴ 以下のアドレスからダウンロードすることができる：
<http://www-ns/iaea.org/tech-areas/communication-networks/documents/recommendations-doses-eye-lens.pdf>

なければならない。そのような遮蔽の利用が所定の処置については実行できない場合、側面遮蔽を備えた鉛ガラス眼鏡を着用しなければならない。

・照射された患者のボリュームからもっと離れて作業する IVR 専門家に対する防護策は、現場の放射線防護専門家（例えば、放射線防護担当者や医学物理士）によって指定されるべきである。

・ IVR 専門家は常に、現場規則に従って個人線量計を装着しなければならない。

・ 病院管理者は、職員の職業被ばくの継続的なレビューを実施しなければならない。

・ 個人線量測定モニタリング計画は、眼の水晶体に対する線量の評価を含むものでなければならない。

・ モニタリング計画の要素には以下が含まれるべきである：

○ 二重線量測定の利用（エプロン上側の襟レベル及びエプロン下側の胸／ウエストレベルにおける）

○ 個人線量計の装着における不適合を確認する際の、また、個人線量計が用いられていない場合に職業線量を推定するのを助けるための、周囲線量計の利用（C アームにおけるものなど）

○ 放射線防護慣行を改善する手段を確認するための、線量計の利用¹⁵

・ 鉛ガラス眼鏡を着用する場合を含めて、水晶体線量を評価するための改善された方法論を開発することが必要である。

・ 産業界は、眼の線量を含めた個人線量を評価するための、職員の位置検出を用いる計算技術（線量計を必要としない）の開発を追求すべきである。

・ 介入心臓病学機器の製造者は、職員がテーブルの両側で作業している状況の場合に防護を提供するための2つ目の天井吊り下げ遮蔽を備えることが可能なようにシステムを設計すべきである。

・ 国の線量登録簿には、眼の水晶体の線量評価に関する記録が含まれるべきである。そのような記録には、当該人物の職業及び職務が含まれるべきである。

・ 開発中の ISEMIR 国際データベースは将来、IVR における眼の職業線量のベンチマーキングに際してどの IVR 施設及び規制機関にとっても有用なツールとなる予定であり、参加が推奨される。

¹⁵ パルス放射線場においては注意すべきである。眼の水晶体に対する線量のモニタリングに関する節を参照。

ドラフト作成及びレビューに寄与した人々

Artificio, T.	Philippine Nuclear Research Institute, Philippines
Behrens, R.	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany
Bladh-Johansson, C.	Swedish Radiation Safety Authority, Sweden
Boal, T.	International Atomic Energy Agency
Budzanowski, M.A.	Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Poland
Chen, B.	China Institute of Radiation Protection
Chumak, V.	National Research Centre for Radiation Medicine, Ukraine
Colgan, P.A.	International Atomic Energy Agency
Cruz-Suarez, R.	International Atomic Energy Agency
El-Sabbahy, H.	Health & Safety Executive, United Kingdom
Fantuzzi, E.	Radiation Protection Institute, Italy
Ferrari, P.	Radiation Protection Institute, Italy
Flannery, C.	Nuclear Regulatory Commission, United States of America
Gusev, I.	International Atomic Energy Agency
Harris, W.	Exelon Generation, United States of America
Hendry, J.H.	United Kingdom
Hiswara, E.	National Nuclear Energy Agency, Indonesia
Hopponen, C. Mirion	Technologies (GDS), Inc., United States of America
Jimenez, P.	Pan American Health Organization
Karinou, E.	Greek Atomic Energy Commission, Greece
Kashirina, O.	Federal Medical and Biological Agency of Russia, Russian Federation
Kopec, R.	Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Poland
Lai Tien, T.	Vietnam Agency for Radiation and Nuclear Safety, Vietnam
Le Heron, J.	International Atomic Energy Agency
Lips, M.	Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG, Switzerland
Lorenz, B.	European Nuclear Installation Safety Standards Initiative
Magnusson, S.	Icelandic Radiation Protection Institute, Iceland
Mundigl, S.	European Commission
Nikodemova, D.	Slovak Medical University, Slovakia
Nilsson, V.	Swedish Radiation Safety Authority, Sweden
Pappinisseri, H.	International Atomic Energy Agency
Passmore, C.N.	Landauer Incorporated, United States of America
Paulsen, G.U.	Norwegian Radiation Protection Authority, Norway

Perez, M.	World Health Organization
Perrin, M-L.	Autorité de sûreté nucléaire, France
Piccone, J.	Nuclear Regulatory Commission, United States of America
Pinak, M.	International Atomic Energy Agency
Ragan, P.	Public Health Authority of the Slovak Republic, Slovakia
Rickard, M	Canadian Nuclear Safety Commission, Canada
Ringertz, H.	Karolinska Hospital, Stockholm, Sweden
Saleem, K.	Pakistan Atomic Energy Commission, Pakistan
Serenaite, D.	Ministry of Health; Radiation Protection Centre, Lithuania
Shannoun, F.	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
Struelens, L.	Nuclear Research Centre, Belgium
Townes, J.	World Nuclear Association
Van Bladel, L.A.K.	Federal Agency for Nuclear Control, Belgium
Van Sonsbeek, R.	Applus RTD Group, Netherlands
Vano, E.	Complutense University, Spain
Vogel, J	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Germany
Wallace, A.B.	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Australia
Wikan, K.	Norwegian Radiation Protection Authority, Norway
Wrixon, A.	United Kingdom
Yokoyama, S.	Fujita Health University, Japan

※この協力者一覧は、正本に記載のあるものを転記したものであり、これらの協力者は日本語翻訳版の作成には一切関係はありません

技術会合

ウィーン、オーストリア、2012年10月2-4日

コンサルタント会合

ウィーン、オーストリア、2013年2月18-22日、2013年5月6-8日

国際原子力機関
ウィーン