

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.9 No.3

水晶体の放射線防護に関する専門研究会

報告書

2016年10月

一般社団法人 日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ ISSN 1881-7297
Vol. 9, No. 3, 水晶体の放射線防護に関する専門研究会報告書

2016年10月

発行者 日本保健物理学会企画委員会
発行所 一般社団法人 日本保健物理学会
〒105-0004 東京都港区新橋 3-7-2 吉松ビル 3階
日本保健物理学会事務局
TEL : 03-6205-4649
FAX : 03-6205-4659
E-mail : exec.off@jhps.or.jp
<http://www.jhps.or.jp/>

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

水晶体の放射線防護に関する専門研究会報告書

2016年10月

一般社団法人 日本保健物理学会

目 次

第 1 章 専門研究会活動概要.....	1
1.1 設立趣旨.....	1
1.2 専門研究会活動概要.....	2
1.3 活動成果の報告.....	2
第 2 章 専門研究会合開催日時及び議題.....	3
2.1 専門研究会会合.....	3
2.2 ワークショップ等.....	4
第 3 章 発表論文及び概要.....	6
第 4 章 最後に.....	9
参考文献.....	11
付録 発表論文.....	12
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (I) -水晶体, 白内障, ICRP が勧告した新たな水晶体等価線量限度の概要-.....	13
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (II) -わが国の水晶体被ばく線量測定及び評価方法の変遷-.....	21
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (III) -海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究-....	25
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV) -ICRP 及び ICRU の水晶体線量評価法-.....	34
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V) -わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状-.....	43
水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (VI) -ISO, IAEA 及び IRPA の動向-.....	57
水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I) -わが国における水晶体線量評価に関する研究と原子力発電所の線量管理の現状-	67
水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II) -いつどのように β 線 3 ミリメートル線量当量を測定・評価すべきか?	75
水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (III) -最近の国外動向-.....	80

「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」 研究会員

専門研究会員：

主査 赤羽 恵一	(独) 放射線医学総合研究所*
飯本 武志	東京大学
伊知地 猛	(一財) 電力中央研究所
岩井 敏	(一社) 原子力安全推進協会
大口 裕之	(株) 千代田テクノル
大野 和子	京都医療科学大学
川浦 稚代	名古屋大学
立崎 英夫	(独) 放射線医学総合研究所*
辻村 憲雄	(国研) 日本原子力研究開発機構
浜田 信行	(一財) 電力中央研究所
堀田 豊	日本原燃 (株)
山崎 直	中部電力 (株)
幹事 横山 須美	藤田保健衛生大学

議論・論文執筆協力者：

黒澤 忠弘	(国研) 産業技術総合研究所
林田 敏幸	東京電力 (株)
藤通 有希	(一財) 電力中央研究所

* 現：(国研) 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

第1章 専門研究会活動概要

1.1 設立趣旨

2011年4月、国際放射線防護委員会（ICRP）は、水晶体の組織等価線量に関する新しい線量限度を示すとともに、組織反応についてのICRP声明に関連したPublication（Publication 118）を2012年に発刊した¹⁾。この声明では、最近の疫学知見より、放射線誘発白内障のしきい線量は0.5 Gyであるとし、それまで水晶体の等価線量限度として、150 mSv/年としてきたものを大きく引き下げ、水晶体の新しい等価線量限度として、5年間の年間平均線量を20 mSv、単一年度あたり50 mSvを超えないようにすべきとした。

放射性誘発白内障発症メカニズムや等価線量限度の科学的根拠となるデータが十分ではないといった議論もなされる中、このICRPの線量限度の引き下げを踏まえ、同年、国際原子力機関（IAEA）は、改定作業を進めていた国際基本安全基準（BSS）に即座に取り入れるとした²⁾。このBSSへの取入れに関しては、IAEA加盟国の関心が非常に高かったことから、この改定作業と並行して、2012年にはIAEA加盟国や関連している国際的な機関を集め、会合を開催し、技術文書（TECDOC）作成作業を進めた³⁾。国際放射線単位・測定委員会（ICRU）及びICRPにおいても、水晶体の線量評価法に関して検討が進んでおり、国際標準化機構（ISO）や国際電気標準化会議（IEC）においても水晶体のモニタリング方法に関するガイダンス策定作業が行われていた^{4,5)}。さらに、2013年には、欧州連合（EU）が、各国の法令にICRPの新しい水晶体の等価線量限度の取入れを2018年までに完了するよう指令を出すなど⁶⁾、国際機関や各国において、一気にICRPの新しい水晶体の等価線量限度の取入れの検討が進められてきた。

研究面においても、ICRPがこのような水晶体の等価線量限度引き下げを発表する以前から、EUは水晶体の線量測定・評価に関して、医療従事者の放射線防護の最適化の観点からOptimization of Radiation protection for Medical staff（ORAMED）プロジェクトを設立する等、3 mm線量当量の評価についての研究を進めていた⁷⁾。

一方、わが国では、2011年に放射線審議会が、ICRP 2007年勧告の法令への取り入れに関する中間報告書⁸⁾を発表しているものの、同年3月に東京電力福島第一原子力発電所事故が発生したことから、ICRP 2007年勧告⁹⁾取入れに関する議論に関しては、中断を余儀なくされた。しかしながら、今後、わが国においても、水晶体の新しい線量限度の法令取り入れに関する議論が必要になる。議論を行うためには、まずは、わが国の水晶体被ばく及びその防護に関する現状の把握が必要となる。

わが国の水晶体の線量評価、測定の現状については、Interventional Radiology（IVR）及びInterventional Cardiology（IC）に携わる医療従事者や患者の放射線防護の観点から、評価・測定データの報告もあるが、さまざまな分野における放射線業務従事者の水晶体の線量の実態は十分に把握されているとは言い難い。

したがって、水晶体線量限度の検討に関するこれまでの経緯、国際的動向、わが国の水晶体の被ばくと防護の実態について、現状の把握及び課題の抽出をしておくことは、重要かつ有用である。そこで、日本保健物理学会は、2013年4月に水晶体の放射線防護に関する専門研究会を設立し、これらの項目について検討することとした。

1.2 専門研究会活動概要

本専門研究会は、2013年4月から2015年3月まで、2年間の活動を行った。この間、9回の会合及び2回の公開シンポジウムを開催した。

会合では、ICRPが線量限度を変更する際の根拠となった疫学研究や放射線誘発白内障メカニズム、国際機関が現在検討している水晶体線量評価法や測定技術に関する技術文書や基準、ガイドライン、国内外の水晶体被ばく及びその防護の現状等について、会員が情報提供を行うとともに、必要に応じて、外部講師、オブザーバー等にも会合に参加いただき、関連情報を提供していただいた。会合及びシンポジウムの開催日時及び議題については第2章に一覧を示す。

このほかの活動としては以下のとおりである。専門研究会が立ち上がる前年の2012年12月には、国際放射線防護学会（IRPA）がタスクグループを設立し、「新しい水晶体の線量限度の適用に関する社会的影響について」のアンケート（フェーズ1）について、加盟国への回答要請があった。日本保健物理学会は、IRPAの加盟学会として、このアンケートへ回答することとした。本専門研究会は、その国内とりまとめを担うとともに、IRPAに集約された各国のアンケート取りまとめ作業部会メンバーとしても協力するなどの活動を行った。

1.3 活動成果の報告

本専門研究会会合で収集した情報や議論した内容については、専門研究会の活動成果報告の一環として、6報の中間報告書及び3報の追加報告書として取りまとめ、「保健物理」に発表した。論文タイトル、巻、発行年、概要等を第3章に示す。

第2章 専門研究会合開催日時及び議題

2.1 専門研究会合

第1回会合

日 時： 2013年5月25日（土）9：15～9：45

- 議 題： (1) 水晶体の放射線防護に関する専門研究会の設置について
(2) 今後の専門研究会の進め方について
(3) ワークショップ開催について
(4) その他

第2回会合

日 時： 2013年6月24日（月）12：00～13：05

- 議 題： (1) 水晶体の放射線防護に関する課題整理
(2) 専門研究会（公開講演会）の開催について
(3) その他

第3回会合

日 時： 2013年9月27日（金）14：00～17：00

- 議 題： (1) ICRU/ICRP での水晶体線量評価の取組の現状
(2) ORAMED で使用しているファントムについて
(3) 原子力分野での現状
(4) 水晶体の放射線防護の現状に関する報告書内容進捗状況について
(5) その他

第4回会合

日 時： 2014年2月6日（木）9：30～12：30

- 議 題： (1) 専門委員会委員の追加について
(2) チェルノブイリ事故における水晶体の被ばく・影響の現状について
(3) 原子力発電所作業者の線量の現状について
(4) 中間報告書内容について（審議）
(5) その他

第5回会合

日 時： 2014年3月25日（火）13：30～16：00

- 議 題： (1) 中間報告書案の検討
(2) その他

第6回会合

日 時： 2014年7月28日（月）13：30～16：00

- 議 題： (1) 産総研での水晶体線量評価技術開発の現状
(2) 東京電力福島第一原子力発電所における作業環境及び管理について
(3) 本専門研究会での検討課題抽出

(4) その他

第7回会合

日時： 2014年10月26日（日）13：30～16：00

- 議題： (1) 非血管系 IVR 術者・介護者の線量評価に関する多施設共同研究の概要
(2) IVR 診療従事者の被ばく実態調査
(3) β 線 3 mm 線量当量の測定の必要性
(4) 本専門研究会での検討課題抽出
(5) その他

※ (1)については、松原孝祐氏(金沢大学)を外部講師として招聘、講演いただいた。

第8回会合

日時： 2014年12月11日（木）9：30～11：30

- 議題： (1) 水晶体線量限度に関する英国保健省（PHE）、米国放射線防護審議会（NCRP）、米国原子力規制委員会（NRC）での検討と ICRP の対応などについて
(2) β 線 3 mm 線量当量の測定の必要性～放射線管理学会での議論～
(3) 東京電力福島第一原子力発電所における作業環境及び管理について（続報）
(4) 専門研究会最終報告書について
(5) その他

第9回会合

日時： 2015年3月13日（木）13：30～16：30

- 議題： (1) 前回会合からの進捗状況
(2) 最終報告書について
(3) その他

2.2 ワークショップ等

日時： 2013年5月25日（土）

場所： 東京大学小柴ホール

演題： 「日本保健物理学会ワークショップ～水晶体の新たな限度の適用について考える～」

- | | |
|----------------------------------|-------|
| ・専門研究会設置について | 赤羽 恵一 |
| ・水晶体の放射線影響に関する疫学的知見と ICRP の動向 | 丹羽 太貫 |
| ・水晶体の線量計測・評価の観点から（ISO、ICRP/ICRU） | 大口 裕之 |
| ・IAEA での検討状況（TECDOC を中心に） | 横山 須美 |
| ・IRPA アンケートについて | 赤羽 恵一 |
| ・医療分野における水晶体の放射線防護の現状 | 大野 和子 |

日 時： 2013年6月24日（月）

場 所： ホテルポートプラザちば C会場

演 題： 「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」（公開講演会）

司 会 横山 須美

・水晶体の等価線量限度に関する科学的根拠 浜田 信行

・国際放射線防護学会（IRPA）の水晶体の新線量限度適用
への影響に関するアンケートについて 赤羽 恵一

第3章 発表論文及びその概要

水晶体の放射線防護に関する専門研究会の活動成果については、「保健物理」に解説記事として取りまとめ公表した。これら論文のタイトル、概要等を以下に示す。なお、本章で紹介した解説記事については、報告書の最後にまとめて添付した。

1. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (I) -水晶体, 白内障, ICRP が勧告した新たな水晶体等価線量限度の概要-, 保健物理, 49 (3), 145-152 (2014).

日本保健物理学会が「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」を立ち上げることになった経緯、水晶体の機能・構造・特徴、白内障の概要、ICRP が新たな水晶体等価線量限度を勧告した経緯と科学的根拠、科学的側面から見た放射線白内障の検討課題について報告した。

2. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (II) -わが国の水晶体被ばく線量測定及び評価方法の変遷-, 保健物理, 49 (3), 153-156 (2014).

外部被ばくによる水晶体線量の測定及び評価方法の歴史的な変遷を紹介した。ICRP 1977 年勧告¹⁰⁾の実効線量当量の概念と水晶体の線量限度の法令取入れ(1989年)に伴い、鉛エプロンを着用する作業者は、エプロンの内側の胸腹部と外側の頸部(襟付近)にそれぞれ個人線量計を装着し、そのうち後者の線量計から水晶体の線量が評価されることになった。この方法論は、ICRP 1990 年勧告¹¹⁾の取入れに伴う法改正(2001年)においても踏襲された。

3. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (III) -海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究-, 保健物理, 49 (4), 171-179 (2014).

主に欧米で実施された医療従事者を対象にした大規模な放射線誘発白内障に関する疫学調査研究、医療従事者の放射線防護の最適化を目的とした水晶体の線量評価・測定技術開発に関する研究、チェルノブイリ原子力発電所事故の作業員に対する水晶体被ばくに関する調査等の内容を紹介した。

4. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV) -ICRP 及び ICRU の水晶体線量評価法-, 保健物理, 50 (1), 67-75 (2015).

ICRP 及び ICRU が築いてきた放射線防護体系では実用量と防護量が用いられる。これらの概念は時代とともに発展してきた。その変遷も踏まえ、水晶体に適用される実用量と防護量、その導入に用いられる計算方法及び使用するファントムについて報告した。

5. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V) -わが国の各分野におけ

る従事者の水晶体被ばく及び防護の現状-, 保健物理, 50 (1), 76-89 (2015).

医療分野では、IVR、核医学、密封小線源治療施設において、原子力分野では、燃料加工施設や使用済み再処理工場等において、不均等もしくは水晶体の高線量の被ばくを伴う可能性がある。そこで、わが国におけるこれらの施設での水晶体線量レベルや防護、研究の現状についてとりまとめた。また、2008年度から2012年度の産業分野（医療を含む）の作業者の職種別水晶体等価線量の分布、わが国特有の課題である東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う作業者の水晶体被ばく線量レベルを報告した。

6. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書(VI)-ISO, IAEA 及び IRPA の動向-, 保健物理, 50 (2), 128-137 (2015).

ICRP が新しい水晶体の等価線量限度の勧告を発表するとともに、その他の国際機関においても、この限度を取入れるべく、さまざまな動きがあった。このうち、関係の深い ISO、IAEA 及び IRPA における検討状況や発刊された技術報告書等^{3, 4, 5, 12)}の内容について報告した。

7. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I) -わが国における水晶体線量評価に関する研究と原子力発電所の線量管理の現状-, 保健物理, 50 (4), 249-256 (2015).

ICRP、IAEA 等における水晶体の等価線量限度の変更に伴い、わが国の国家標準施設である産業技術研究所においても 3 mm 線量当量の標準開発が進められている。その開発の現状及び線量評価・測定の問題を報告した。また、原子力施設が公表している各発電所作業者のデータから、水晶体の等価線量の程度を推測するとともに、実際の原子力発電所における水晶体の線量管理の現状を報告した。さらに、東京電力福島第一原子力発電所における事故後の β 線放射線場における線量管理の現状と課題をとりまとめた。

8. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II) -いつどのように β 線 3 ミリメートル線量当量を測定・評価すべきか?-, 保健物理, 50 (4), 257-261 (2015).

一般に、皮膚に対する 70 μ m 線量当量と同じ値は、3 mm 線量当量の代わりとして水晶体の線量に割り当てられる。しかしながら、この方法は、 β 線被ばくを伴う場合、3 mm 線量当量の過大評価をもたらす。どのような状況下にどのような方法で β 線 3 mm 線量当量を測定・評価すべきかについて実用的な提案をした。

9. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (III) -最近の国外動向-, 保健物理, 50 (4), 262-268 (2015).

欧州での放射線白内障や水晶体線量測定に関する研究の取り組み、NCRP での水

晶体線量限度に関する議論、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、ICRP、経済協力開発機構／原子力機関／放射線防護・公衆衛生委員会（OECD/NEA/CRPPH）、IRPA の動向について報告した。

第4章 最後に

第3章で示したこれらの記事から、国際機関や欧米各国においては、ICRPが新しい水晶体の等価線量限度を発表してから、数年間に大きな動きがあったこと、合わせて、この線量限度に関する多くの議論や課題があることがわかる。

EUでは欧州原子力共同体(EURATOM)のDirectiveが発行され⁶⁾、各国が新しいICRPの水晶体の等価線量限度を自国の法令へ取入れを進める一方、水晶体に関連した大規模なプロジェクト研究が継続されている。これは、白内障のしきい線量や放射線誘発白内障のメカニズムがまだ十分に解明されておらず、多くのデータが必要であること、また、解析手法等についても検討の余地があることを示している。米国においても、水晶体の線量限度を変更すべきかどうかの検討が進められているが、しきい線量の根拠となる白内障の誘発と進行に関する基礎的な知見の不足や白内障デトリメントをどう評価するかといった点が議論されている。

水晶体の線量評価法については、ICRPがPublication 116¹³⁾において、水晶体の防護量として、眼球モデルを組み込んだ頭部ファントム(電子は眼球モデルのみ)を用い、水晶体に対するフルエンスあたりの吸収線量換算係数を示している。この中では、光子・電子だけではなく中性子等他の粒子に対する換算係数も示されている。水晶体の等価線量の実用量である $H_p(3)$ (3 mm線量当量)についても、光子及び中性子に対しては学術文献には実用量を算定するための値が示されているが、ICRPまたはICRUが発刊している文書内には記載されていないといった問題が明らかとなった。水晶体の線量測定方法としても、ORAMEDプロジェクト等において、いくつかの水晶体線量測定方法が示されていることがわかった⁷⁾。しかし、実際に各国が法令施行にともない、どのような方法を採用するのかは明確になっていない。したがって、このようないくつかの課題があることを知ったうえで、水晶体の測定・評価を行う必要がある。

IRPAの現状として、中間報告書では2012年から2013年に実施されたアンケートの結果¹⁷⁾を紹介した。その後、2015年12月には、2011年にICRPが新しい水晶体の等価線量限度を発表してから5年が経過したことを踏まえ、各国の対応状況がどのように変わったかを調査するために新たなタスクグループを立ち上げ、2回目のアンケート調査を実施したところである。この調査・分析結果は2016年中には公表される予定である。

わが国の水晶体被ばくの現状としては、これまでに報告されている放射線業務従事者のデータから、多くの放射線業務従事者は実効線量も低く、全身均等に被ばくすることが推測された。したがって、水晶体の等価線量についても、ICRPの新しい線量限度を大きく下回ると考えられる。しかし、欧米各国と同様に、一部の医療従事者、特に、IVRに携わるような医療従事者については、他の放射線業務従事者に比べて実効線量も高く、不均等な被ばくをともなう傾向が認められる。このため、これまでと同様な作業を、防護策を講じずに継続するならば、ICRPの示す新しい水晶体の等価線量限度を超える可能性があることが示唆された。わが国においては、これらの医療従事者に対して水晶体の等価線量を詳細に評価した例は少ない。現状を把握するためには、今後もデータ収集及び関連研究が必要不可欠であると考えられる。また、専門研究会での

議論において、医療分野では、患者の放射線防護を念頭にしたガイドライン等があるものの、医療従事者は、自らの被ばくには比較的関心が低く、水晶体の被ばくの現状についても十分に把握していない傾向があることが指摘された。放射線業務従事者が水晶体の被ばくとその放射線防護について理解し、現状把握をしてもらうよう教育を行うことも重要であろう。

原子力従事者については、使用済み再処理工場のセル内作業において、不均等被ばくの事例が取り上げられた。セル内の線源と作業者の位置関係によっては、不均等被ばくが生じるものの、最も高くなる部位は線源に近い手指であり、頭部が胸部に比べて極端に高くなる事例はほとんどない。一方、福島第一原子力発電所の作業者については、セシウム吸着装置を通過後の汚染水に $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ が含まれるため、これが β 線源として水晶体の等価線量評価に影響を与えることが懸念された。しかし、そのような場所は、 β 放射線管理対象エリアとして、全面マスクの着用等、厳しい管理が徹底されるとともに、水晶体の線量評価については $70\ \mu\text{m}$ 線量当量値を採用し、保守的な評価を行っているとのことであった。また、現在は、高濃度ストロンチウム汚染水の処理が完了しており、水晶体の等価線量を評価する上で、問題となるようなエリアが大幅に縮小されている。今後は、多くの原子力関連作業者が、長期にわたり福島第一原子力発電所の廃炉作業に携わることが予想される。このような作業者については、十分な被ばく低減を図りつつ過度な防護を避け、十分に最適化された実行容易な方法で防護が行われる必要がある。これは水晶体の被ばく管理に関しても例外ではない。

福島第一原子力発電所の事故復旧時の現場のような高線量率 β 線場における $H_p(3)$ を適切に評価するには、どのようにすればよいかということについても専門研究会において議論を行った。過去に実施していた水晶体の測定及び評価から考察し、合わせて測定及び評価の必要性と具体的な対応について言及した。ICRPの新しい水晶体の等価線量限度を超える可能性のある放射線業務従事者が1%にも満たない現状を考えると、すべての放射線業務従事者が、水晶体専用の線量計をつけて作業をすることは現実的ではない。一方、水晶体の等価線量をどのように評価・測定すれば、適切に管理できるのかは、大きな課題である。

現在、わが国では、水晶体の線量評価技術の開発についても進められている。しかし、規制当局等においては、水晶体の等価線量限度だけでなく、ICRP 2007年勧告⁹⁾の取入れについても本格的な検討は始まっていない。このような現状を考えると、引き続き、水晶体の等価線量限度に関する欧米各国の動向を追跡するとともに、本専門研究会で取りまとめたわが国の現状等を広く情報発信をしていくことも重要である。そこで、今後もこれらの活動を本専門研究会から引き継ぐ形で、日本保健物理学会に「水晶体の線量限度に関する専門研究会」の設置を提案、2015年4月に承認され、2年間の予定で活動を行っている¹⁴⁾。

参考文献

- 1) ICRP; ICRP Statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organsthreshold doses for tissue reactions in a radiation protection context, ICRP Publication 118, Ann. ICRP, 41 (1/2) (2012).
- 2) IAEA; Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 (2014).
- 3) IAEA; Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye, TECDOC1731 (2014).
- 4) ISO; Radiological protection — Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities, ISO 15382 (2015).
- 5) IEC; Radiation protection instrumentation-Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC62387 (2012).
- 6) EU; Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union [online]. Available at: <http://faolex.fao.org/docs/pdf/eur130004.pdf>, Accessed 7 June 2016.
- 7) F. Vanhavere, E. Carinou, G. Gualdrini et al.; Optimization of radiation protection of medical staff, EURADOS report 2012–02 (2012).
- 8) 放射線審議会基本部会; 国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007 年勧告 (Publ. 103) の国内制度等への取入れに係る審議状況について [online]. Available at: http://www.inaco.co.jp/isaac/shiryo/pdf/ICRP2007kankoku_Pub103_shingi.pdf, Accessed 7 June 2016.
- 9) ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP, 37 (2-4) (2007).
- 10) ICRP; Recommendations of the ICRP, ICRP Publ. 26, Ann. ICRP 1 (3) (1977).
- 11) ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publ. 60, Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
- 12) J. Broughton, M. C. Cantone, M. Ginjaume and B. Shah; Report of Task Group on the implications of the implementation of the ICRP recommendations for a revised dose limit to the lens of the eye, J. Radiol. Prot., 33, 855–868 (2013).
- 13) ICRP; Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116. Ann. ICRP, 40 (2–5) (2010).
- 14) 日本保健物理学会ホームページ ; <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/news/page.cgi>

付 録 発 表 論 文

解説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (I) —水晶体, 白内障, ICRP が勧告した新たな水晶体等価線量限度の概要—

赤羽 恵一*1, 飯本 武志*2, 伊知地 猛*3, 岩井 敏*4, 大口 裕之*5, 大野 和子*6,
川浦 稚代*7, 立崎 英夫*1, 辻村 憲雄*8, 浜田 信行*3, 藤通 有希*3, 堀田 豊*9,
山崎 直*10, 横山 須美*11

(2014年7月8日受理)

(2014年9月30日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (I)

—Overview of the Lens, Radiogenic Cataract, and Equivalent Dose Limit for the Lens Newly Recommended by the ICRP—

Keiichi AKAHANE,*1 Takeshi IMOTO,*2 Takeshi ICHII,*3 Satoshi IWAI,*4 Hiroyuki OHGUCHI,*5 Kazuko OHNO,*6
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*7 Hideo TATSUZAKI,*1 Norio TSUJIMURA,*8 Nobuyuki HAMADA,*3 Yuki FUJIMICHI,*3
Yutaka HOTTA,*9 Tadashi YAMASAKI*10 and Sumi YOKOYAMA*11

In April 2011, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) issued the statement on tissue reactions. This stimulated interest in many countries. The Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye was established in the Japanese Health Physics Society, and in April 2013, started discussion about the international developments and recent studies related to the dosimetry of the lens of the eye. This committee now publishes the interim report consisting of parts I-VI. Of these, this Part I overviews the structure of the eye and lens, cataract types and the scientific evidence of its new dose threshold and equivalent dose limit newly recommended by the ICRP.

KEY WORDS: lens of the eye, ICRP, new dose limit, tissue reaction, radiation protection, cataract, threshold dose, 0.5 Gy, 20 mSv, 150 mSv.

*1 (独) 放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財) 電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*4 (一社) 原子力安全推進協会; 東京都港区芝 5-36-7 (〒108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 千代田テクノロ (株); 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒113-8681)
Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市中区大幸南 1-1-20 (〒461-8637)
Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (独) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*9 日本原燃 (株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字沖付 4-108 (〒039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnfl.co.jp

*10 中部電力 (株); 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒437-1695)
Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*11 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyooka-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

I はじめに

2011年4月、国際放射線防護委員会（ICRP）は、組織反応（確定的影響）に関する声明（ソウル声明）を出した。この中で、作業者の水晶体等価線量限度について、これまで年間150 mSvであったものを、大きく引き下げ、5年間の年間平均を20 mSv、ただし年間50 mSvを超えないこととした¹⁾。これを受け、国際原子力機関（IAEA）は2011年の改訂中（最終稿）及び2014年の最終版の国際基本安全基準で、この限度を取り入れている²⁾。また、欧州共同体（EU）の改訂 Directive である Council Directive 2013/59/EURATOM にも、新限度の記載がある³⁾。

眼の水晶体に対する放射線の生物学的影響に関し、ICRPは、2012年8月に出版した Publication 118¹⁾の中で、この線量限度の決定に至った科学的根拠について、近年の原爆被爆者やその他の疫学的調査に基づき示している。しかし、その根拠となるデータは限られており、白内障発症のメカニズムについても十分に明らかになっていない⁴⁾。

線量評価の観点からも、実用量である3 mm線量当量、Hp(3)の換算係数の算出にどのようなファントムを用いるのか、防護量である水晶体の組織等価線量算出のための放射線荷重係数として、確率的影響に対して与えられているものを使用するのか、さらには、中性子等の線エネルギー付与（LET）の高い放射線に対しては、どのような値を使用するのか等の問題があり、現在、国際的に検討が進められている最中である。

ICRPが新しい線量限度を明示したことにより、わが国の水晶体の放射線防護の考え方に対しても影響を受けられないわけにはいかない。例えば、現在のわが国における職業人の水晶体の等価線量については、1 cm線量当量と70 μ m線量当量とで管理していれば、水晶体の等価線量を超えることはほとんどないことから、いずれか高い方を水晶体の線量とするとしていた。しかし、 β 線のような透過率の低い放射線による水晶体の正確な線量を算出するためには、70 μ m線量当量で評価すると、過大評価しすぎてしまう。このように、線量限度の科学的根拠や線量評価法について、現在もおさまぎまな課題を抱えているが、ICRPの示した新しい線量限度に近い被ばく、または、線量限度を超えるおそれのある被ばくをしている作業員に対しては、過度な安全側の評価を避け、適切な評価を行うとともに、ALARAの原則に基づき、現場で混乱することなく、いかに実状に則した被ばく低

減対策を講じるかは重要な課題であり、早急に検討しておく必要がある。

保健物理分野の専門家として、このような課題のうち重要度が高く、優先的に取り組むべき課題を明確にし、日本保健物理学会として解決に導く方策を打ち出しておくことは、今から取り組んだとしても決して早いというものではない。そこで、2013年度に日本保健物理学会の専門研究会として、「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」が立ち上げられ、検討を開始した次第である。

その第一歩として、まず、現状を把握する必要がある。中間報告として、「水晶体、白内障、ICRPの新たな水晶体の等価線量限度の概要」、「わが国の水晶体被ばく線量測定及び評価方法の変遷」、「海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究」等について整理し、取りまとめたので、6回に分けて報告をする。その第一部として本稿では、水晶体と放射線白内障についての概要を述べるとともに、水晶体等価線量限度に関する課題について述べる。

II 水 晶 体

1. 水晶体の機能と構造

眼の水晶体は、外から入ってきた光を屈折させ、網膜上に焦点をあわせる凸レンズの役割を果たしている。水晶体は、チン小帯という線維によって、房水を産生する毛様体と繋がっている。近くを見るときは、毛様体筋の収縮とチン小帯の弛緩により、楕円体の水晶体が球体になる（厚くなる）。遠くを見るときは、毛様体筋の弛緩とチン小帯の緊張により、水晶体は平らになる（薄くなる）。眼と水晶体の構造を Fig. 1 に示す。

水晶体は、前面一層の水晶体上皮細胞とそれが分化した水晶体線維細胞が、水晶体嚢という被膜に包まれた構造をしている。水晶体嚢の前半分は前嚢、後ろ半分は後

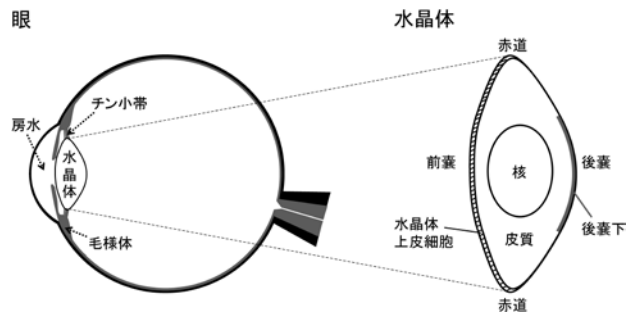


Fig. 1 眼（左）と水晶体（右）の構造。
図は参考文献⁴⁾を改変。

囊、前囊と後囊の境界は赤道部と呼ばれる。後囊下とは、後囊の中央部の内側のことで、水晶体上皮細胞層は前囊下にある。水晶体の中心部は、古い水晶体線維細胞が硬い核を形成している。核の外側は皮質と呼ばれ、新しい水晶体線維細胞によって形成される。水晶体線維細胞は規則的に整列している。

2. 水晶体の特徴

水晶体は、生体のなかでもかなり特殊な組織であり、ここでは、代表的な4点の特徴を例として挙げる。第一に、透明である。その主な理由としては、水晶体上皮細胞から水晶体線維細胞に終分化する過程で、光の散乱体となる全ての細胞内小器官（例：細胞核、ミトコンドリア、小胞体）が分解されることによって、水晶体線維細胞の中身はクリスタリン多量体を主成分とするタンパク質水溶液となることが挙げられる。第二に、血管がない。そのため、ブドウ糖などの栄養と酸素は、水晶体と虹彩との間を満たす房水から補給される。糖の代謝には、酸素をあまり使わずに済む嫌氣的解糖系が基本となっている上に、房水には抗酸化物質が豊富に含まれていることで、活性酸素による攻撃から守るための優れた抗酸化機構が備わっている。第三に、水晶体上皮のうち赤道部近傍の増殖帯で水晶体上皮細胞が生涯増殖を続けるため、水晶体の体積が生下時の3倍にも成長するのにも関わらず、ヒトで初発がんが報告されていない唯一の組織である。がん抑制遺伝子やDNA損傷修復遺伝子が異常になると白内障が生じやすくなること⁵⁾と、シミアンウイルス40大型T抗原を発現させると水晶体上皮細胞はがん化すること⁶⁾から、水晶体には他の組織よりも遥かに優れた発がん抑制機構があるに違いない。最後に、水晶体囊によって包まれていることと水晶体内部にはマクロファージなどの貪食細胞が存在しないことから、水晶体を構成する全ての細胞が、細胞の生死に関係なく、生涯を通じて水晶体内部に留まる。以上のように、水晶体は、生物学的にも非常に興味深い組織である⁷⁾。

3. 白内障

白内障とは、本来透明な水晶体が灰白色や茶褐色に混濁することであり、混濁する部位と程度によって、光の乱反射や網膜への不達などによって、視覚が障害される。白内障は、発症部位によって、主に、後囊下白内障、皮質白内障、核白内障の3つに分類され、原因によって発症部位が異なる。白内障の主因は加齢であり、日本人における進行した水晶体混濁の自然発症率は、50歳代

で10-13%、60歳代で26-33%、70歳代で51-60%、80歳以上では67-83%である⁸⁾。このような加齢白内障は、主に皮質白内障であるが、核白内障や後囊下白内障も観察されている。電離放射線への被ばくによって誘発される白内障（以下、放射線白内障）は、後囊下白内障が最も多く、次に皮質白内障が多いが、核白内障については電離放射線との関連性が認められていない（RAFANSSONら⁹⁾は飛行機パイロットで核白内障のオッズ比が放射線被ばくによって有意に上昇すると報告しているが、核白内障の誘発因子である紫外線の交絡を勘案しておらずリスク上昇を示す証拠として不十分である¹⁰⁾）。後囊下白内障の原因には、電離放射線の他に、ステロイド薬の内服、糖尿病、アトピー性皮膚炎などがある。白内障は、世界における失明原因の第一位であるが、先進国では、大半の症例について、混濁した水晶体を人工的な眼内レンズで再建する日帰り手術によって治癒が可能であるため、日本における失明原因の第一位は緑内障である。白内障の発症機構は不明であるが、水晶体上皮細胞から水晶体線維細胞への分化の不全による細胞内小器官の残存、水晶体線維細胞の配列の乱れ（誤整列）、クリスタリンタンパク質の異常凝集が、主な機構として考えられている。放射線白内障の発症機構については、III 3.(2)項で述べる。

III 国際放射線防護委員会が新たな水晶体等価線量限度を勧告した経緯と科学的根拠

線量限度の目的は、実効線量限度によって確率的影響を容認されるレベルのリスクに制限して、かつ、等価線量限度によって水晶体と皮膚への組織反応（かつての非確率的影響、確定的影響）を防ぐことである。放射線を被ばくした水晶体に生じる組織反応は、小さな混濁と視覚障害性白内障であり、水晶体等価線量限度は視覚障害性白内障の発症を防ぐために設定されている。本章では、このような水晶体線量限度の経緯とその根拠について述べる。

1. 20世紀の主な出来事

放射線白内障は、実験動物では1897年¹¹⁾、ヒトでは1903年¹²⁾から報告されていた。しかし、1940年代後半になり、加速器の作業者と原爆被爆者において白内障が認められたこと^{13,14)}を受けて、ICRPは、1950年に白内障を放射線影響に初めて含めるとともに¹⁵⁾、1954年に作業者に0.3 rem/週（3 mSv/週）、公衆に0.03 rem/週（0.3 mSv/週）とする水晶体への最大許容線量を初めて

勧告した¹⁶⁾。その後、最大許容線量が、週単位から四半期単位、年単位へとかわり、Publication 6¹⁷⁾では2011年のソウル声明まで長期間に渡って使用されることとなる15 rem/年(150 mSv/年)が勧告された。最大許容線量は、作業員にはPublication 26¹⁸⁾、公衆にはPublication 9¹⁹⁾が刊行されるまで勧告されたが、それ以降は年単位の線量限度に変更され、現在に至る。最大許容線量の根拠は、白内障に関するものではなく、皮膚紅斑線量であった。白内障は、Publication 14²⁰⁾で3編の疫学論文²¹⁻²³⁾にもとづいてしきい値型の線量応答を示すとし、Publication 26¹⁸⁾では非確率的影響(後の確定的影響、組織反応)に分類されるとして、しきい線量の概念にもとづいて線量限度が勧告されるようになった。Publication 60²⁴⁾とPublication 103²⁵⁾での150 mSv/年という作業員への水晶体等価線量限度の根拠は、分割・遷延被ばくによる視覚障害性白内障へのしきい線量を >8 SvとしたPublication 41²⁶⁾である。1954年からソウル声明以前は、線量限度(もしくは最大許容線量)が、作業員に対して50 mSv/年から300 mSv/年、公衆には5 mSv/年から15 mSv/年の間で上下に変動してきた。このような水晶体線量限度の変遷とその根拠については、別の文献²⁷⁾に総説しているので、そちらを参照されたい。

2. ソウル声明に至った経緯

Publication 92²⁸⁾で、白内障のしきい線量が0.5 Gy程度であるかもしれない可能性、そもそもしきい線量がなく確定的影響ではないのかもしれない可能性が触れられるとともに、新しい疫学的知見を踏まえて水晶体等価線量限度を再考するためのタスクグループ(TG)の設立が提案された。2004年10月に中国で開催された主委員会で、“組織損傷とその他の非がん影響”に関するTGの重要性が確認された。TGの設立は、2005年3月にフランスで開催された主委員会では活動内容に関する議論が不十分であるとして承認されなかったが、同年9月にスイスで開催された主委員会で承認された。これを受けて、2006年に、オランダがん研究所のFiona STEWART氏を議長とした“組織反応とその他の非がん影響”に関するTG63が第一委員会に設立され、報告書を2010年に刊行するための議論が開始された^{29,30)}。このTG63の目的は、線エネルギー付与(LET)が低い放射線への被ばくによって正常組織に生じる非がん影響に関する文献を調査・評価することとされた¹⁾。2010年10月に南アフリカで開催された主委員会で、報告書草案が承認されるとともに、2010年末あるいは2011年始に公開意見募集

を行い、その後に改訂した水晶体線量限度を勧告する声明を発表するという結論が出された³¹⁾。報告書草案³²⁾は2011年1月20日にICRPのホームページで公開され、同年4月1日を締切として意見募集が実施された。この間、22の個人もしくは団体から意見が提出され³³⁾、そのうち、本邦からは2人の個人(東京保健医療大学の伴信彦氏、ニュークリアエンジニアリングの宮崎振一郎氏)と2つの団体(日本原子力技術協会、電力中央研究所)が水晶体・白内障について意見を提出した。2011年4月17日から21日にソウルで開催された主委員会にて、「視覚障害性のしきい線量を >8 Gyから0.5 Gyに下げるとともに、作業員の水晶体等価線量限度を150 mSv/年から20 mSv/年(正確には、連続5年平均で20 mSv/年、ただし単年で50 mSvを越えないこと)に下げること」を勧告する声明が承認され³⁴⁾、21日にICRPのホームページで声明が公開された¹⁾。

3. ソウル声明の科学的根拠

ソウル声明の科学的根拠となるTG63の報告書案は、2011年10月に米国で開催された主委員会で承認され³⁵⁾、最終的にはPublication 118¹⁾として2012年8月に刊行された。これによって、低LET放射線については、前身のPublication 41²⁶⁾が28年ぶりに更新されることとなった。ここでは、Publication 118¹⁾で述べられているしきい線量の根拠と放射線白内障の発症機構に焦点を絞って概説する。

(1) しきい線量の根拠

Publication 118¹⁾では、白内障に関する約70編の疫学論文が引用されているが、急性被ばくと分割・遷延被ばくにおけるしきい線量を推定するための最終的な根拠になった論文は3編である。急性被ばくによる視覚障害性白内障のしきい線量は、0.5 Gyと判断された。その根拠は、2000-2002年に実施された原爆被爆者の成人健康調査に関する2つの論文である。ひとつは、730人の原爆被爆者における水晶体混濁を調査することによって、後囊下白内障と皮質白内障のしきい線量を示した中島らの論文である³⁶⁾。もうひとつは、線量評価可能な3,761人の原爆被爆者における白内障手術歴のしきい線量を示した鎌石らの論文である³⁷⁾。分割・遷延被ばくのしきい線量は、被ばくから12-14年後にチェルノブイリ事故の清掃員8,607人を対象として調査して、全白内障、後囊下白内障、皮質白内障等のしきい線量を示したWORGULらの論文³⁸⁾にもとづいて、0.5 Gyより高くないと判断された。慢性被ばくのしきい線量は、視覚障害性白内障よ

りも微小な混濁を解析している研究が多い、小さい混濁が白内障に進行するか定かでない、被ばく時年齢依存性があるかもしれない、など疫学的知見の不確実性から、しきい線量の判断は困難とされた。そのうえで、慢性被ばくの影響は急性被ばくと同じであると仮定して、しきい線量は0.5 Gyと判断された。以上から、全ての被ばく状況に対して、名目しきい線量は0.5 Gyと判断された。なお、Publication 118¹⁾では、しきい線量が下がった理由として、「線量が低くなると潜伏期間が長くなるため、従来の短期間追跡調査では初期の水晶体の変化を十分な感度で検出できなかった」ことを挙げているが、潜伏期間に関する根拠は示されていない。

(2) 放射線白内障の発症機構

水晶体上皮の増殖帯(II.1 参照)だけを照射すると白内障になるが、増殖帯を遮蔽して照射、あるいは、増殖帯の水晶体上皮細胞の増殖を阻害して照射すると白内障にならないことを示す動物実験結果³⁹⁻⁴²⁾から、増殖帯の水晶体上皮細胞の増殖が放射線白内障の誘発に重要であると考えられている。上述の急性被ばくのしきい線量の根拠となった2編の論文^{36,37)}において、しきい線量に対する90%信頼区間もしくは95%信頼区間の下限値が0 Gyを含んでいたこと(つまり、しきい線量がないことを示していたこと)、また、水晶体混濁は線量とともに直線的に増加する動物実験結果⁴³⁾があることなどから、白内障が確率的影響である可能性が議論されたが、最終的には、白内障は、1個の損傷細胞に起因して発症する証拠がないため、しきい線量は小さいとしてもある組織反応であると結論された。

IV 科学的側面から見た放射線白内障の検討課題

Publication 14²⁰⁾では、水晶体線量限度は疫学的知見にもとづいて設定できるとした一方で、ヒトと実験動物では放射線白内障の感受性が異なるため生物実験結果を放射線防護に使うには注意が必要であるとした。それ以来、白内障のしきい線量は、疫学的知見にもとづいて推定されてきた。その一方、Publication 60²⁴⁾では、放射線影響がしきい線量型の確定的影響(現在の組織応答)かどうかという結論は、生物学的機構による裏付けがなければ正当化できないと述べている。従って、今後も、疫学的知見を充実させ、そこから仮定される線量応答関係を生物研究によって機構的に裏付けることが必要である。ここでは、科学的側面から見た今後の検討課題について、ごく手短かに触れておく。議論の詳細については、文献^{4,5,7,27,44-46)}を参照されたい。

(1) 疫学

混濁と白内障の区分について明確な眼科的定義がない、診断画像取得や水晶体混濁度分類に用いられる方法が論文によってまちまちである、診断法に定量性が低いことから診断結果の客観性が低いといったことなどから、既報の疫学的知見をまとめて解析するプール解析が困難である。既報のデータのプール解析、今後の客観性の高い疫学データの蓄積にむけて、白内障と混濁の区分を定義し、診断画像取得法や水晶体混濁度分類法を含めた評価法の標準化が必要である。

慢性被ばくに関する疫学的知見はとても限られているので、高自然放射線地域住民などの疫学研究に関する知見が必要である。

(2) 生物学

Publication 118¹⁾では、全ての混濁が視覚障害性の白内障に進行すると仮定されているが、水晶体混濁の一過性を示唆する原爆被爆者のデータ⁴⁷⁻⁵⁰⁾もあることから、進行性と潜伏期間などについて更なる検討が必要である。

ATMは、毛細欠陥拡張性運動失調症の責任遺伝子で、DNA損傷に応答して活性化する。このようなATMなどのDNA損傷修復に関わる遺伝子を欠損すると放射線白内障の発症が加速するという結果が実験動物⁵¹⁾でも原爆被爆者⁵²⁾でも報告されており、その機構解明が必要である。

放射線白内障が1個の損傷細胞に起因するかは、放射線を照射した1個の水晶体幹細胞に由来して形成される水晶体様構造体(いわゆるレントイド)が混濁するか否かを解析すれば解明できるであろう。

(3) 防護

現在の防護体系では、日帰り手術で治癒可能な白内障を1%/0.5 Svで防止することと、がん死亡リスクを約2%/0.5 Svのレベルに抑えることには不整合があり、検討が必要である⁴⁾。

放射線荷重係数は、染色体異常にもとづく確率的影響のための値であり、白内障に限らず組織反応に用いられるべきではない。Publication 118¹⁾では高LET放射線が取り扱われなかったが、白内障の生物学的効果比は1桁から数100という動物実験結果も報告されていること、水晶体は組織固有の線質係数が設定された唯一の組織であること、Publication 92²⁸⁾が具体的な放射線荷重係数を示せなかった経緯もあるので、検討が必要である⁷⁾。

放射線白内障には早発性と遅発性があり、早発性の後囊下白内障にはしきい線量があり、遅発性の後囊下白内障

障と皮質白内障にはしきい線量がない可能性がある⁴⁵⁾。これが本当であれば、Publication 26¹⁸⁾から40年間弱、全ての放射線健康影響は確率的影響か組織反応のいずれかに区分されてきたが、そもそも、この区分自体に限界が近づいてきているのかもしれない²⁷⁾。

参 考 文 献

- 1) ICRP; 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) (2012).
- 2) IAEA; Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards Interim Edition. General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 [online]. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf, Accessed 23 September 2014.
- 3) EU; Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union [online]. Available at: <http://faolex.fao.org/docs/pdf/eur130004.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 4) 藤通有希, 小佐古敏荘, 吉田和生, 浜田信行; 新たな水晶体等価線量限度に関する放射線防護の課題, *保健物理*, **48**, 86–96 (2013).
- 5) N. HAMADA, Y. FUJIMICHI, T. IWASAKI, N. FUJII, M. FURUHASHI, E. KUBO, T. MINAMINO, T. NOMURA and H. SATO; Emerging issues in radiogenic cataracts and cardiovascular disease, *J. Radiat. Res.*, **55**, 831–846 (2014).
- 6) K. A. MAHON, A. B. CHEPELINSKY, J. S. KILLAN, P. A. OVERBEEK, J. PIATIGORSKY and H. WESTPHAL; Oncogenesis of the lens in transgenic mice, *Science*, **235**, 1622–1628 (1987).
- 7) N. HAMADA; What are the intracellular targets and intratissue target cells for radiation effects? *Radiat. Res.*, **18**, 9–20 (2014).
- 8) 佐々木洋; 人種, 生活環境の異なる4地域での白内障疫学研究, *日本白内障学会誌*, **13**, 13–20 (2001).
- 9) V. RAFNSSON, E. OLAFSDOTTIR, J. HRAFNKELSSON, H. SASAKI, A. ARNARSSON and F. JONASSON; Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study, *Arch. Ophthalmol.*, **123**, 1102–1105 (2005).
- 10) E. A. AINSBURY, S. D. BOUFFLER, W. DOÖRR, J. GRAW, C. R. MUIRHEAD, A. A. EDWARDS and J. COOPER; Radiation cataractogenesis: a review of recent studies, *Radiat. Res.*, **172**, 1–9 (2009).
- 11) H. CHALUPECKY; Über die wirkung der röntgenstrahlen auf das Auge und die haut, *Zentralbl. Augenheilkd.*, **21**, 234–271 (1897).
- 12) W. ROLLINS; Notes on x-light. The effect of x-light on the crystalline lens, *Boston Med. Surg. J.*, **148**, 364–365 (1903).
- 13) D. G. COGAN, S. F. MARTI and S. J. KIMURA; Atom bomb cataracts, *Science*, **110**, 654–655 (1949).
- 14) P. H. ABELSON and P. G. KRUGER; Cyclotron-induced radiation cataracts, *Science*, **110**, 655–657 (1949).
- 15) ICRP; International recommendations on radiological protection, *Br. J. Radiol.*, **24**, 46–53 (1951). *Radiology*, **56**, 431–439 (1951). (n.b., the same contents were published in two different journals)
- 16) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Br. J. Radiol.*, **28** Suppl 6, 1–92 (1955).
- 17) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 6 (1964), Pergamon Press, Oxford.
- 18) ICRP; Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 26, *Ann. ICRP*, **1**(3) (1977).
- 19) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9 (1966), Pergamon Press, Oxford.
- 20) ICRP; Radiosensitivity and spatial distribution of dose, Publication 14 (1969), Pergamon Press, Oxford.
- 21) D. G. COGAN and K. K. DREISLER; Minimal amount of X-ray exposure causing lens opacities in the human eye, *Arch. Ophthalmol.*, **50**, 30–34 (1953).
- 22) M. J. A. BRITTEN, K. E. HALNAN and W. J. MEREDITH; Radiation cataract-new evidence on radiation dosage to the lens, *Br. J. Radiol.*, **39**, 612–617 (1966).
- 23) G. R. MERRIAM Jr. and E. F. FOCHT; A clinical study of radiation cataracts and the relationship to dose, *Am. J. Roentgenol.*, **77**, 759–85 (1957).
- 24) ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, **21**(1–3), (1991).
- 25) ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication

- 103, *Ann. ICRP*, **37**(2–4) (2007).
- 26) ICRP; Nonstochastic effects of ionizing radiation, ICRP Publication 41, *Ann. ICRP*, **14**(3) (1984).
- 27) N. HAMADA and Y. FUJIMICHI; Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects, *J. Radiat. Res.*, **55**, 629–640 (2014).
- 28) ICRP; Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (w_R), ICRP Publication 92, *Ann. ICRP*, **33**(4) (2003).
- 29) ICRP; ICRP Report 2006–2008 [online]. Available at: http://www.icrp.org/docs/ICRP_Report_2006-2008_rev_1.pdf, Accessed XX March 2014.
- 30) ICRP; ICRP 2009 Annual report [online]. Available at: <http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Annual%20Report%202009.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 31) ICRP; ICRP Main Commission Meeting 2010 October 25–28 - Cape Town, South Africa, ICRP ref: 4826-6054-8359 [online]. Available at: <http://www.icrp.org/admin/ICRP%20Main%20Commission%20Meeting%20October%202010%20Cape%20Town.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 32) ICRP; Draft report for consultation. Early and late effects of radiation in normal tissues and organs: threshold doses for tissue reactions and other non-cancer effects of radiation in a radiation protection context [online]. Available at: <http://www.icrp.org/docs/Tissue%20Reactions%20Report%20Draft%20for%20Consultation.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 33) ICRP; Comments received during the consultation period [online]. Available at: http://www.icrp.org/consultation_view.asp?recommendation=8ED14080-935A-4280-B07A-41342787B313, Accessed 23 September 2014.
- 34) ICRP; Summary of April 2011 ICRP Main Commission Meeting [online]. Available at: <http://www.icrp.org/docs/Summary%20of%20April%202011%20Main%20Commission%20Meeting.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 35) ICRP; Summary of October 2011 ICRP Main Commission Meeting [online]. Available at: <http://www.icrp.org/docs/Summary%20ICRP%20MC%20Meeting%20Oct%202011%20Bethesda%20USA.pdf>, Accessed 23 September 2014.
- 36) E. NAKASHIMA, K. NERIISHI and A. MINAMOTO; A reanalysis of atomic-bomb cataract data, 2000–2002: a threshold analysis, *Health Phys.*, **90**, 154–160 (2006).
- 37) K. NERIISHI, E. NAKASHIMA, A. MINAMOTO, S. FUJIWARA, M. AKAHOSHI, K. MISHIMA, T. KITAOKA and R. E. SHORE; Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold, *Radiat. Res.*, **168**, 404–408 (2007).
- 38) B. V. WORGUL, Y. I. KUNDIYEV, N. M. SERGIYENKO, V. V. CHUMAK, P. M. VITTE, C. MEDVEDOVSKY, E. V. BAKHANOVA, A. K. JUNK, O. Y. KYRYCHENKO, N. V. MUSIACHENKO, S. A. SHYLO, O. P. VITTE, S. XU, X. XUE and R. E. SHORE; Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposure, *Radiat. Res.*, **167**, 233–243 (2007).
- 39) H. GOLDMANN and A. LIECHTI; Experimentelle untersuchungen über die genese des röntgenstars, *Albrecht von Graefes Arch. Ophthalmol.*, **138**, 722–736 (1938).
- 40) A. J. ALTER and P. J. LEINFELDER; Roentgen-ray cataract. Effects of shielding of the lens and ciliary body, *Arch. Ophthalmol.*, **49**, 257–260 (1953).
- 41) B. V. WORGUL and H. ROTHSTEIN; Radiation cataract and mitosis, *Ophthalmic. Res.*, **7**, 21–32 (1975).
- 42) J. H. HAYDEN, H. ROTHSTEIN, B. V. WORGUL and G. R. MERRIAM Jr; Hypophysectomy exerts a radioprotective effect on frog lens, *Experientia*, **36**, 116–118 (1980).
- 43) M. D. I. PAOLA, M. BIANCHI and J. BAARLI; Lens opacification in mice exposed to 14-MeV neutrons. *Radiat. Res.*, **73**, 340–350 (1978).
- 44) 藤通有希, 小佐古敏荘, 吉田和生, 浜田信行; 放射線白内障に対するしきい線量の科学的根拠と課題, *保健物理*, **48**, 97–103 (2013).
- 45) 藤通有希, 小佐古敏荘, 浜田信行; 放射線白内障には発症機構が異なる早発性白内障と遅発性白内障があるかもしれない, *保健物理*, **49**, 131–138 (2014).
- 46) Y. FUJIMICHI and N. HAMADA; Ionizing irradiation not only inactivates clonogenic potential in primary normal human diploid lens epithelial cells but also stimulates cell proliferation in a subset of this population, *PLOS ONE*, **9**, e98154 (2014).
- 47) M. D. NEFZGER, R. J. MILLER and T. FUJINO; Eye findings in atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki: 1963–1964, *Am. J. Epidemiol.*, **89**, 129–138 (1969).
- 48) D. D. DONALDSON; Observations in Japan. Third conference on radiation cataracts: abstracts and proceedings (1952),

National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D. C.

- 49) W. T. HAM JR; Radiation cataract, *Arch. Ophthalmol.*, **50**, 618–643 (1953).
- 50) K. CHOSHI, I. TAKAKU, H. MISHIMA, T. TAKASE, S. NERIISHI, S. C. FINCH and M. OTAKE; Ophthalmologic changes related to radiation exposure and age in Adult Health Study sample, Hiroshima and Nagasaki, *Radiat. Res.*, **96**, 560–579 (1983).
- 51) B. V. WORGUL, L. SMILENOV, D. J. BRENNER, A. JUNK, W. ZHOU and E. J. HALL; Atm heterozygous mice are more sensitive to radiation-induced cataracts than are their wild-type counterparts, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **99**, 9836–9839 (2002).
- 52) K. NERIISHI, T. HAYASHI, E. NAKASHIMA, K. IMAI and K. NAKACHI; ATM haplotypes and radiosensitivity in A-bomb survivors - preliminary trial using existing data at RERF. Abstract Book of Radiation Cataractogenesis Workshop 2009 (2009), RERF, Hiroshima.



赤羽 恵一 (あかはね けいいち)

1987年3月東北大学理学部物理学第二学科卒業。国立公衆衛生院放射線衛生学部研究員，大分県立看護科学大学環境科学研究室助手を経て，現在は放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト

医療被ばく研究推進室室長。専門は医療放射線防護。

E-mail: akahane@nirs.go.jp



藤通 有希 (ふじみち ゆき)

2012年3月に東京大学で修士(工学)を取得。2012年度より電力中央研究所研究員。現在，東京大学大学院博士後期課程3年。興味がある分野は放射線防護と放射線生物。2014年に，本論文の内容について日本保健物理学会第47回研究発表会優秀ポスター賞を受賞。

E-mail: f-yuki@criepi.denken.or.jp



浜田 信行 (はまだ のぶゆき)

2004年3月に長崎大学で博士(薬学)を取得。群馬大学COE准教授等を経て，2010年度より現所属(主任研究員)。専門分野は放射線生物。関心分野は放射線影響。査読付学術英語論文77編，日本語論文14編，受賞16件(米国放射線影響学会マイケルフライ研究賞など)。現在，ICRP科学秘書官補佐，OECD/NEA/CRPPH/EGRPS委員，NCRP SC1-23顧問，日本保健物理学会水晶体の放射線防護に関する専門研究会委員などを務めている。

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp

解 説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (II) —わが国の水晶体被ばく線量測定及び評価方法の変遷—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
川浦 稚代*⁷, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁸, 浜田 信行*³, 藤通 有希*³, 堀田 豊*⁹,
山崎 直*¹⁰, 横山 須美*¹¹

(2014年7月8日受理)

(2014年9月30日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (II) —The Dosimetry Method for the Lens of the Eye of Workers in Japan—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IMOTO,*² Takeshi ICHIJI,*³ Satoshi IWAI,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁷ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁸ Nobuyuki HAMADA,*³ Yuki FUJIMICHI,*³
Yutaka HOTTA,*⁹ Tadashi YAMASAKI*¹⁰ and Sumi YOKOYAMA*¹¹

A brief review is given of the history and methodology of external dosimetry for the lens of the eye. Under the 1989 revision to domestic radiological protection regulations, the concept on the effective dose equivalent and the dose limit to the lens of the eye (150 mSv/y) both introduced in the ICRP 1977 recommendations has changed nationwide the external monitoring methodology in non-uniform exposure situations to the trunk of a radiological worker. In such situations, which are often created by the presence of a protective apron, the worker is required to use at least two personal dosimeters, one worn on the trunk under the apron and the other, typically, at the collar over the apron. The latter dosimeter serves the dual purpose of providing the dose profile across the trunk for improved effective dose equivalent assessment and of estimating the dose to lens of the eye. The greater or appropriate value between $H_p(10)$ and $H_p(0.07)$, given by the dosimeter, is generally used as a surrogate of $H_p(3)$ for recording the dose to the lens of the eye. The above-mentioned methodology was continued in the latest 2001 revision to the relevant regulations.

KEY WORDS: ICRP, the lens of the eye, dosimetry method, radiation monitoring, localised exposure, personal dose equivalent at 3 mm depth, 1 cm depth, 0.07 mm depth.

*¹ (独) 放射線医学総合研究所: 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒 263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuzaki@nirs.go.jp

*² 東京大学: 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*³ (一財) 電力中央研究所: 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒 201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*⁴ (一社) 原子力安全推進協会: 東京都港区芝 5-36-7 (〒 108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*⁵ 千代田テクノロ (株): 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒 113-8681)

Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*⁶ 京都医療技術大学: 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒 622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*⁷ 名古屋大学: 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20 (〒 461-8637)

Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*⁸ (独) 日本原子力研究開発機構: 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒 319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*⁹ 日本原燃 (株): 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付 4-108 (〒 039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnl.co.jp

*¹⁰ 中部電力 (株): 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒 437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*¹¹ 藤田保健衛生大学医療科学部: 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒 470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

I はじめに

ICRP1977年勧告¹⁾ (Publication 26) 導入以前のわが国の放射線防護関係法令は、ICRP 1962年勧告²⁾ (Publication 6) を基礎とし、全身、皮膚及び手足等の線量限度を規定する一方で、水晶体の線量限度を特に規定しなかった。このため、個人線量計の着用部位は、胸部又は腹部及び(必要に応じて)手足等とされ、被ばく防止用の保護具をつけているときは、その内側に線量計を着けることとされていた³⁾。皮膚の被ばくについては β 線がそのモニタリングの主たる測定対象線種であったが、高エネルギーの β 線による高線量被ばくがあった場合に水晶体の被ばく線量を評価するとする考え方³⁾もあった。これに対して、実効線量当量⁴⁾の概念とその限度ならびに水晶体の組織線量当量限度(300 mSv/年、のちに150 mSv/年)を導入するなど従来の基本勧告から内容が大きく変更されたPublication 26が関係法令に取り入れられた1989年以降、水晶体のモニタリングの実施は必須のものとなり、以下に記述するように個人線量計の着用位置や設計・構造、さらに校正方法は大きく変更されることとなった。

本稿では、わが国における水晶体の被ばく線量評価方法の変遷について述べる。

II 水晶体被ばく線量測定及び評価方法

1. 着用位置

まず、着用位置についてであるが、個人線量計はその測定の対象とする身体領域の広さによって「全身」用と「局部」用とに便宜的に区分され、前者は胸部又は腹部に、後者は局所的に高い被ばくを受ける部位(例えば手指等の末端部)に着用される。水晶体のモニタリングは、範囲が明確に定められた部位を測定するという意味において後者の局部のモニタリングに該当し、したがって、水晶体が胸部等に着用した全身線量計の位置に比べてより多くの放射線にさらされる恐れがある場合、当該部位の被ばくを代表する位置に別の線量計を追加着用してそのモニタリングを行うことは至極まっすぐな方法論である。一方、このとき、実効線量当量(体内のいくつかの臓器の線量当量とそれらの臓器の放射線感受性に対応する相対リスクの積の総和として表現される)の概念が導入されたことに伴って、個人線量計による測定を、体内の臓器線量の分布の測定にある程度まで関連付けることも併せて必要になった。特に全身が外部放射線に一樣ではなくさらされる場合、中でも例えば作業者が鉛エプロンを着用することによってエプロンの内外で線量当

量(率)に大きな差異が生じる場合は、鉛エプロン内側の胸部に着用した線量計による測定だけでは実効線量当量を過小評価⁴⁾してしまうため、エプロンの外側にも別の線量計を着用するなどの対応が必要となった。これは、いふならば二個の「全身」線量計を使用するものであり、特に上着の襟部分は、鉛エプロン外側の部位を代表する位置であると同時に水晶体に近い位置でもあったため、当該位置に取り付けた個人線量計は、実効線量当量の評価だけではなく水晶体の組織線量当量の評価にも兼用されることとなった。体表面に着けた複数の個人線量計の測定に基づき体内の線量分布を推定し実効線量当量の評価に利用するというこの方法論は、Publication 26刊行後に改定されたPublication 35「作業者の放射線防護のためのモニタリングの一般原則」⁵⁾においても推奨された方法である。わが国では、「放射線障害防止に関する技術的指針検討会」⁶⁾での検討を経て、体幹部を頭頸部、胸部及び上腕部、腹部及び大腿部に三区区分すること、Publication 26の示す組織荷重係数をそれぞれの区分に割り振った荷重係数をそれぞれの区分に着用した個人線量計の測定値に乗じて総和することによって実効線量当量を算出することが法令告示に規定された。なお、どのような被ばく条件のときに全身線量計として複数の線量計を使用するかについては、法令等では特に規定されていなかったが、(財)原子力安全研究協会「国際放射線防護委員会1977年勧告の法令取入れについて(法令改正に関する質問に答えて)」⁷⁾によれば、「複数の線量計を着けるかどうかの判断は、不均等の程度と線量当量の大きさの両方に依存する。仮に頭頸部/胸腹部=10であっても線量当量が限度に比べて非常に小さな値であれば、頭頸部のみに線量計を着け、その指示値を実効線量当量としてもよいだろう。反対に、頭頸部/胸腹部=2にすぎなくても、その値が限度に近ければ、複数の線量計を着用せざるを得ないだろう。管理担当者がケースバイケースで判断すべきである。」とある。

2. 線量計の設計・校正方法

水晶体のモニタリングの実施にあたって、実効線量当量等の導入と併せて導入された実用量(1 cm線量当量、3 mm線量当量及び70 μ m線量当量、換算係数はICRP Publication 51⁸⁾に基づく)のうち、水晶体の組織線量当量に対応する3 mm線量当量の測定が必要となった。しかし、その測定は上述した経緯から全身線量計で兼用して行われたこと、また特に γ 線については、1 cm線量当量、3 mm線量当量及び70 μ m線量当量の間で数値

的に大きな差異がなかったことから、水晶体専用に変化した設計のものではなく、全身線量計として従来から使用していたものがそのまま、あるいは頭頸部に着用しやすくするため不要な素子を取り除くなどして小形化したものが使用された。個人モニタリングに当時広く使用されていたフィルムバッジや熱ルミネセンス線量計 (TLD) は、複数個の放射線検出素子と材質・厚さの異なるフィルタの組み合わせからなり、1989年の法改正以前から (1 cm 線量当量等の前身に当たる) 深部線量当量や表層部線量当量を線種毎に分離して算出できるよう線量計算アルゴリズムの構築準備が進められていたため、法改正後にそれを 1 cm 線量当量、3 mm 線量当量及び 70 μm 線量当量に対応するよう変更することは容易であった。個人線量計の校正には、メタクリル樹脂からなる $40 \times 40 \times 15 \text{ cm}^3$ 平板が統一的なファントムとして導入され⁹⁾、線量計の着用位置が胸腹部であるか頭頸部であるかに関係なく使用された。単一の放射線検出素子からなる線量計 (例えばシリコン半導体を使うもの) は、1 cm 線量当量に対応すべくエネルギー補償フィルタの再設計がなされ、1 cm 線量当量と 3 mm 線量当量及び 70 μm 線量当量の間で数値的に大きな差異のないエネルギー範囲においては、1 cm 線量当量指示値は 3 mm 線量当量及び 70 μm 線量当量と運用において読み替えられた。また、 β 線 3 mm 線量当量については、校正データ等に基づき β 線 70 μm 線量当量から 3 mm 線量当量に換算するか、値の大きな 70 μm 線量当量を 3 mm 線量当量と同値として取扱い記録するかどちらかの方法が取られた。なお、LiF のような生体等価 TLD はそれを厚さ 300 mg/cm^2 相当の物質で覆うことによって、線質に関係なく 3 mm 線量当量の近似値を測定することができる。1970 年代に主として米国で広く使用されていた 2 エレメント式 TLD バッジ (2 個の LiF チップがそれぞれ約 35 mg/cm^2 と約 250 mg/cm^2 のフィルタで覆われる) はそうした設計コンセプトに基づくものであったが、TMI 事故後の復旧作業の際に遭遇した高エネルギー β 線と γ 線の混在条件場において β 線による線量寄与と γ 線による線量寄与を分離して評価することができないという問題が生じたため¹⁰⁾、 β 線による被ばくの可能性があり、かつ胸腹部に取り付ける個人線量計については β 線と γ 線を分離評価するようフィルタの厚さが調節された構造のものがその後、一般に使用された。

3. 水晶体の線量管理

ICRP1990 年勧告¹¹⁾ (Publication 60) の取り入れに伴う法令改正 (2001 年) 以降も、水晶体のモニタリングに係る基本的な考え方は踏襲された。ただし、3 mm 線量当量については、1 cm 線量当量と 70 μm 線量当量とで管理していれば水晶体の等価線量を超えることはほとんどないことから、法令ではその測定の義務が課されなかった。とはいえ、水晶体の等価線量が線量限度を超えていないことを確認する目的での評価は必要であるので、実務上の対応として 1 cm 線量当量あるいは 70 μm 線量当量のうち適切な値 (一般には値の大きい方を) を 3 mm 線量当量とみなす管理が行われることとなった。この背景になる考え方は、例えば原子力安全技術センター「被ばく線量の測定・評価マニュアル」¹²⁾ の付録 3 に示されておりここでは詳細は省くが、1 cm 線量当量と 3 mm 線量当量、あるいは 70 μm 線量当量と 3 mm 線量当量を比較したとき、放射線の線質、エネルギーによっては両者に数値的な相違がほとんどない、もしくは 1 cm 線量当量 (70 μm 線量当量) を測定しそれらの値があるレベルを超えないよう管理さえすれば自動的に水晶体の線量限度も担保されるという理由に基づく。また、同マニュアルでは、頭頸部に個人線量計を取り付ける場合の要件として、水晶体の線量が実効線量の 3 倍 (両者の線量限度の比に相当する) を超えるかどうかを一つの目安としてあげている¹²⁾。

4. 現在の個人モニタリング

現在、個人モニタリングには、蛍光ガラス線量計 (ガラスバッジ)、光刺激ルミネセンス線量計 (クイクセルバッジ)、TLD などのパッシブタイプのほか、シリコンダイオード等を検出素子に使用する電子式個人線量計が使用される。不均等被ばく管理の一環として頭頸部に取り付けられる、すなわち水晶体近傍でのより直接的な線量測定に使用される個人線量計は、もっぱら前者のもので、商業サービスによる利用が可能であり、胸腹部用のものと混同しないよう表面ラベルに着用位置のマーキングが施されている。これら個人線量計の指示値から線量当量への換算は、外寸 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ のメタクリル樹脂ファントム又は水ファントム (メタクリル樹脂からなるケースに水を封入したもの)¹³⁾ での校正を基本とし、2001 年以降は ICRP Publication 74¹⁴⁾ に換算係数が与えられる実用量 1 cm 線量当量等に対するレスポンスに基づいている。

III 結 論

わが国における水晶体の被ばく線量評価方法の変遷について紹介した。

わが国では、ICRP1977年勧告の受け入れに伴って関連法令が改定された1989年以降、体幹部が不均一な放射線にさらされる場合には、複数の個人線量計を使用し、そのうち眼に最も近い位置に着けた個人線量計から水晶体の線量当量を評価するという個人モニタリング手法が25年の長きにわたり実施されてきた。この方法論は、被ばく形態だけでなく管理方式の名称をもさし表す「不均等被ばく」という用語とともに、従事者の間で広く定着してきたように思われる。

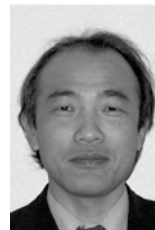
一方、技術的な側面、特に個人線量計の設計と校正に関しては、1 cm 線量当量や70 μm 線量当量の測定で3 mm 線量当量の測定を代用するものが現在広く使用されており、例えば、70 μm 線量当量であれば例外なく過大すなわち保守的な水晶体線量の評価を与える。この過大評価は、現在の水晶体の線量限度(150 mSv/年)のもとでは十分に容認できるものとして認識されているが、例えば線量限度が大きく下がるなどする場合には、管理における望ましくない影響をもたらすかもしれない。

参 考 文 献

- 1) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, *Ann. ICRP*, **1(3)** (1977).
- 2) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (as amended 1959 and revised 1962), ICRP Publication 6 (1964).
- 3) 労働省安全衛生部労働衛生課(編); 改定電離性放射線障害防止の手引—作業主任者必携—, 中央労働災害防止協会(1975).
- 4) 例えば、菊地 透, 伊勢孝雄; 実効線量当量を用いた医療用 X 線防護エプロンの評価, 日本保健物理学会第 18 回研究発表会要旨集 A10 (1983).
- 5) ICRP; General Principles of Monitoring for Radiation Protection for Workers, ICRP Publication 35, *Ann. ICRP*, **9(4)** (1982).
- 6) 放射線障害防止に関する技術指針検討会報告書, 科

学技術庁原子力安全局(1987).

- 7) 浜田達二他; 国際放射線防護委員会 1977 年勧告の法令取入れについて(法令改正に関する質問に答えて), 原子力安全研究協会(1988).
- 8) ICRP; Data for Use in Protection against External Radiation, ICRP Publication 51, *Ann. ICRP*, **17(2/3)** (1987).
- 9) JIS; X 線及び γ 線個人線量計校正用ファントム, JIS Z 4331-1989 (1989).
- 10) S. SHERBINI and S. W. PORTER; A Review of the Current Deficiencies in Personnel Beta Dosimetry, with Recommendations, NUREG/CR-3296 (1983).
- 11) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, **21(1-3)** (1977).
- 12) 原子力安全技術センター; 被ばく線量の測定・評価マニュアル(2000).
- 13) JIS; 個人線量計校正用ファントム, JIS Z 4331-2005 (2005).
- 14) ICRP; Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, *Ann. ICRP*, **26(3/4)** (1996).



大口 裕之(おおぐち ひろゆき)

1957年大阪市生まれ。1982年に千代田保安用品(株)(現、千代田テクノル(株))に入社。現在、個人線量計(ガラスバッジ、D-シャトル等)全般の計測技術統括業務及び開発業務に従事。

E-mail: ohguchi-h@c-technol.co.jp



辻村 憲雄(つじむら のりお)

平成5年4月から動力炉・核燃料開発事業団、二度の改組を経て現在に至る。博士(工学)東北大学。外部被ばくによる線量の測定評価を中心に個人線量計から臨界警報装置まで幅広く研究を進めている。「保健物理」誌への登場は約10年ぶり。

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

解 説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (III) —海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
川浦 稚代*⁷, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁸, 浜田 信行*³, 藤通 有希*³, 堀田 豊*⁹,
山崎 直*¹⁰, 横山 須美*¹¹

(2014年7月8日受理)

(2014年10月15日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (III)

—Recent Study Related to Radiation Dose Level and Radiation Protection for the Lens of the Eye of Workers in Other Countries—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IMOTO,*² Takeshi ICHII,*³ Satoshi IWAI,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁷ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁸ Nobuyuki HAMADA,*³ Yuki FUJIMICHI,*³
Yutaka HOTTA,*⁹ Tadashi YAMASAKI*¹⁰ and Sumi YOKOYAMA*¹¹

Many studies have been internationally reported as part of projects regarding the radiation exposure for the lens of the eye of medical staff members under various conditions, methods of dosimetry and development of dosimeters for the lens of the eye. Recently conducted studies include the Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose (RELID) of the International Atomic Energy Agency, Occupational Cataracts and Lens Opacities in interventional Cardiology (O'CLOC) study in France, Optimization of Radiation Protection of Medical Staff (ORAMED) project in European countries, and a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists. Given the newly implemented dose limit for the lens of the eye by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), we summarized these studies as the necessary information for reconsideration of the Japanese dose limit for the lens of the eye. In addition, this article also covers the exposures for the lens of the eye of clean-up workers in the Chernobyl accident as shown in ICRP Publication 118 and the results of a hearing survey with specialists of the Academy of Medical Science of Ukraine.

KEY WORDS: epidemiological study, exposure of the lens of the eye, radiation-induced cataract, Interventional Radiology, RELID, O'CLOC study, ORAMED project, Chernobyl accident, clean-up workers.

*¹ (独) 放射線医学総合研究所: 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒 263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuzaki@nirs.go.jp

*² 東京大学: 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*³ (一財) 電力中央研究所: 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒 201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*⁴ (一社) 原子力安全推進協会: 東京都港区芝 5-36-7 (〒 108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*⁵ 千代田テクノロ (株): 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒 113-8681)

Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*⁶ 京都医療技術大学: 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒 622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*⁷ 名古屋大学: 愛知県名古屋市中区大幸南 1-1-20 (〒 461-8637)

Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*⁸ (独) 日本原子力研究開発機構: 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒 319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*⁹ 日本原燃 (株): 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付 4-108 (〒 039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnl.co.jp

*¹⁰ 中部電力 (株): 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒 437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*¹¹ 藤田保健衛生大学医療科学部: 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒 470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

I はじめに

近年、放射線を用いた治療や診断技術の普及に伴い、患者の被ばくだけでなく、術者である医療従事者の被ばくも増加傾向にある。とくに、インターベンショナルラジオロジー（IVR, IR: Interventional Radiology/IC: Interventional Cardiology（循環器））に携わる術者の間では、水晶体被ばくによる白内障の発症への関心が高まっている。これに伴い、医療従事者の水晶体被ばくに関する研究が数多く実施されており、国連科学委員会（UNSCEAR）等からも報告がなされている。また、国際放射線防護委員会（ICRP）は、緊急時の水晶体の被ばくについて、1986年に起きたチェルノブイリ事故の清掃員に関して取りまとめている。

ICRPが新しい水晶体の等価線量限度を発表したことにより、わが国の水晶体の放射線防護にも影響を与えると考えられる。日本保健物理学会・水晶体の放射線防護に関する専門研究会では、優先的に取り組むべき課題を明確にし、課題解決に導く方策を打ち出すことを目的として検討を行っており、その基礎となる現状を整理し、取りまとめた。

本報告では、海外における水晶体の放射線防護研究として医療従事者の被ばくに関する疫学調査研究や線量評価研究、並びに、チェルノブイリ事故の清掃員の疫学調査研究について、プロジェクト的に実施された研究を中心にそれらの内容を紹介する。

II 医療従事者の水晶体の放射線被ばく及び線量測定技術

UNSCEAR2000年レポート¹⁾に示されているとおり、医療従事者の被ばくは、職業被ばくの中でもっとも高い割合を占める。とくに、X線透視下で血管にカテーテルを挿入して治療等を行うIVRに携わる術者やX線を取り扱う放射線技師の線量が高いことが報告されている。

1990年代に入り、IVRの件数が増加するとともに、患者の皮膚障害に関する報告が増加し始め、2000年に発刊されたICRP Publication 85²⁾では、血管造影室において、患者で発生した散乱線によりIVR術者（2人）と看護師（2人）に水晶体の混濁（後嚢下白内障（PSC））が確認されたことが報告された。VANOらは論文³⁾で、これらの医療従事者の水晶体の等価線量は手技あたり1.5 mSv程度、年間450 mSvから900 mSvを数年間にわたって被ばくしたと推定した。これらの高線量の原因として、IVRの作業量（手術）が増加したことを挙げてい

る。また、防護具の不備（天井固定の遮へい板の使用率は37%、防護メガネ使用率は53%）とともに、術者が高レベルの被ばくを伴うにもかかわらず、IVRの手順が明確に計画されていないことが指摘された。さらに、手術台の上部からX線を照射するタイプの装置の使用は散乱線量が高くなることから、被ばく線量の増加の原因になるとしている。

UNSCEAR 2008年レポートのANNEX Bにも作業者の被ばくとして、医療分野における従事者の被ばくについて手技別の記述がある⁴⁾。この中に眼の近傍で測定した結果がいくつか報告されている。たとえば、Table 73のCT透視では、ニードルホルダーを使用しないで肺生検を実施した術者の1分間あたりの右眼の外側の吸収線量が 93 ± 44 mGy、補助者が 15.0 ± 10.4 mGyといった報告がある。IVRに携わる第一術者に対して、冠動脈造影の平均透視時間は7.8分、眼の等価線量は平均0.14 mSv（範囲：0-0.82 mSv）、血管形成術では平均透視時間は13分、眼の等価線量平均は0.05 mSv（0-0.33 mSv）であった。なお、動脈造影及び弁形成では、眼の等価線量は検出されていない。この他、IVR術者についての眼の等価線量として、数十 μ Svから1 mSv程度までの被ばくが報告されている。一方、診断のためのCT検査や単純X線撮影の80%以上で計測できる量の被ばくはないとしている。歯科X線検査についても従事者の年間実効線量は0.05 mSv（2007年）、核医学検査、放射線治療（遠隔放射線治療及びブラキセラピー）の年間実効線量としては1 mSv以下となることを報告している。ただし、核医学検査では皮膚の被ばくが500 mSvを超える可能性を示唆している。

さらに、ICRP Publication 118⁵⁾では、さまざまな作業者の水晶体被ばくに関する研究が報告されている。本項では、ICRP Publication 118等に記載されている代表的な医療従事者に対する水晶体被ばくに関する研究を中心に、諸外国での近年の水晶体の放射線被ばくの実態調査の現状及び被ばく線量低減の取り組みについて述べる。

1. RELID 調査 (Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose)

2008年にはIAEAが医療従事者の水晶体の放射線障害と線量を評価するため、Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose (RELID)を開始した^{5,6)}。コロンビアのBogotaやウルグアイのMontevideoでの調査においては、The Latin American Society of Interventional Cardiology (SOLACI)の協力支援のもとで実施された。また、マレー

シア、ブルガリア、タイ、アルジェリアのIVRに携わる医師、看護師等の眼科検診の結果についても報告されている。

この調査では、IVRに携わった従事年数、防護具の使用、透視時間等のさまざまな情報を調査対象者から提供してもらい、放射線量を推定した。水晶体の放射線による障害の程度は、眼科医によって細隙灯顕微鏡検査及び改良型Merriam-Focht法によりPSCを判別後に、年齢、性別、放射線以外の要因等を考慮して評価された。この研究では、116人のICに携わる医師、看護師、放射線技師等に対して調査を実施した。結果、PSCと診断された人の割合は、対照群（放射線による職業被ばくをしていない人）では12%であったのに対し、IC術者では38%、その他関連医療従事者では21%であった。水晶体の平均推定累積等価線量はIC術者では6 Sv、その他関連医療従事者では1.5 Svであった。

CIRAJ-BJELACらによるマレーシアにおける調査では、PSCと診断された人の割合は、対照群では9%（2人/22人中）、IC術者では52%（29人/56人中）、看護師では45%（5人/11人中）であった。なお、IVR術者の水晶体の平均累積吸収線量は3.7 Gy（範囲：0.02から43 Gy）、看護師の累積吸収線量は平均1.8 Gy（範囲：0.01から8.5 Gy）と推定されている。改良されたMerriam-Focht法によって細隙灯を用いた眼科検診により後囊下の混濁を評価した結果と医療従事者の線量を比較したところ、線量増加に伴い障害も増加し、非常に強い相関を示したとしている⁷⁾。

このIAEAの調査においては、カテーテル検査を実施している施設での事前調査を実施している⁸⁾。調査では、循環器の血管造影時に術者が眼の防護を行っていない場合、1回の手技で水晶体の等価線量は0.5 mSv以上になることが推定された。これは、実際の手術（透視時間10分間、撮影数：800 cine frames）において、防護具を使用しない場合の値に一致すると報告している。また、54人のIC術者（平均年齢：45±10歳、）及び69人のPP（paramedical personnel（医療補助者）：放射線技師55%、看護師36%、その他9%、平均年齢：39±11歳）に対して眼科検診を実施したところ、IC術者の50%（推定累積吸収線量：8.3±5.4 Gy）、PPの41%（推定累積吸収線量：2.7±2.0 Gy）は、水晶体に何らかの混濁を伴っており、IC術者の50%（推定累積吸収線量：3.0±2.9 Gy）、PPの59%（推定累積吸収線量：1.8±1.9 Gy）は混濁が検出されなかったと報告している。線量と水晶体混濁の程度との関係としては、累積吸

収線量が2.0 Gyから20 Gyの範囲で水晶体混濁の程度と比例関係にあるとしている（ $R^2=0.420$ ）。

また、DURANらは、110人のIC術者（30-69歳、平均年齢47±8歳、経験年数：1から40年）、123人のPP（30から69歳、平均年齢41±9歳、経験年数1から30年）に対して調査した結果、IC術者の45%及びPP術者の32%からPSCが検出されたと報告している⁹⁾。

2. O'CLOC スタディ

フランスでは、2009年より2011年に国内のIC術者の水晶体に対する放射線リスクを推定するためにOccupational Cataracts and Lens Opacities in interventional Cardiology (O'CLOC)の疫学調査が実施された¹⁰⁾。O'CLOC疫学調査では40歳以上のIC術者を対象とし、年齢、性別、白内障のリスク要因（糖尿病歴の有無、視力度合い等）が同程度のIC術者の集団に対して、被ばく集団と非被ばく集団に分類し、個人情報聞き取る方法で実施された。被ばく者集団に対する質問項目としては、手技のタイプ、頻度、防護方法等を含めた職業歴等があり、取得した情報をもとに累積線量を推定した。すべての対象者の水晶体の白内障診断を実施し、水晶体の混濁を発生位置の違いにより3つに分類した後、色や混濁の範囲を点数化したLOCS IIを進展させたLOCS IIIにもとづき、白内障の程度を決定した。これらの解析は、放射線以外のリスク要因も考慮しており、被ばく者及び非被ばく者を比較するとともに、被ばくのレベルとリスクの関係についても明らかにした。106人のIC術者（平均年齢51±7歳）及び99人の被ばくしていない対照群（平均年齢50±7歳）に対して、白内障検査を実施したところ、核混濁が61%対69%、皮質混濁は23%対29%であり、IC術者と対照群に差はほとんど見られなかった。一方、後囊下の混濁は、17%対5%でIC術者の方が高かった。業務の継続時間とともに水晶体のリスクは増加するが、仕事量との関係は明確ではないとしている。

JACOBらは、O'CLOC調査対象者のカテーテル検査に従事している40歳以上の129人のIC術者（平均年齢51歳、平均経験年数22年）に、どのような手技に携わっているかというアンケートに回答してもらうとともに、後述するIR、IC及び複雑な放射線場に対して線量の評価法を改善、低減策方法を検討したORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) プロジェクトで開発された方法（可動式の遮へい材を用いて、水晶体の集積線量を推定）を用いて、線量と水晶体のリスクの関係を明らかにしている¹⁰⁻¹²⁾。その結果、水

晶体の累積等価線量は 25 mSv から 1,600 mSv となり、平均値は 423 ± 359 mSv であった。JACOB らは、眼を防護しない場合、数年後に ICRP の新しい線量限度を超えることになることを指摘している。なお、JACOB らは論文の中で、原爆被爆生存者、チェルノブイリ事故で被ばくした小児、台湾におけるビルの汚染により被ばくした人、治療及び診断により放射線を受けた人、チェルノブイリ事故の清掃員、宇宙飛行士、航空機乗務員、放射線科医及び放射線技師の白内障の疫学調査結果についても参考として合わせて記載し、比較している。

3. ORAMED プロジェクト

(1) ORAMED プロジェクト概要

EURADOS の FP6 CONRAD (欧州線量評価委員会の線量評価のための総合ネットワーク第 6 プログラム) プロジェクトにおいて実施された現状解析では四肢の線量が高いこと、IR、IC 及び核医学 (NM) の医療従事者の体系的データ解析が不足していることが浮き彫りにされた。そこで、IVR 及び NM 検査に携わる医療従事者の詳細な線量を評価するための手法及び線量低減を目的とした実効的なガイドラインの策定、教育訓練方法の確立、線量計の開発等のため、2008 年 1 月から 2011 年 2 月まで FP7 プログラム内で ORAMED プロジェクトが実施された¹³⁾。ORAMED には、Belgian Nuclear Research Center (ベルギー)、Greek Atomic Energy Center (ギリシャ)、ENEA Radiation Protection Center (イタリア)、Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, Laboratoire National Henri Becquerel at the Commissariat à l'Energie atomique 及び MGP Instruments (フランス)、University Hospital Center Vaudois (スイス)、Institute of Energy Technology-Universitat Politècnica de Catalunya (スペイン)、Slovak Medical University (スロバキア)、Nofer Institute of Occupational Medicine 及び RADCARD (ポーランド)、Federal Office for Radiation Protection (ドイツ) が参加した。個々の機関の調査及び研究内容は、2011 年 11 月の Radiation Measurements に ORAMED ワークショップのプロシーディングとして発刊された¹⁴⁾。

ORAMED では、以下の 5 項目 (work package) について調査が実施された。

- (i) IR/IC の四肢及び眼の水晶体の被ばく線量評価 (WP1)
- (ii) 実用的な眼の水晶体の線量評価法の開発 (WP2)
- (iii) IC/IR 用個人線量計の利用の最適化 (WP3)
- (iv) 核医学検査における四肢(手指)の線量評価 (WP4)

- (v) 教育訓練とその普及 (WP5)

(2) 水晶体の被ばく線量評価

IVR に携わる医療従事者の水晶体の被ばく線量評価は、おもに WP1 において調査、報告された。以下に手技の分類項目を示す。

- (i) 冠動脈撮影／経皮的冠動脈形成術 (CA/PTCA)
- (ii) 高周波アブレーション (RFA)
- (iii) ペースメーカー／細動除去器の移植 (PM/ICD)
- (iv) アンギオグラフィ (デジタル・サブトラクション血管造影法 (DSA))
- (v) 下肢の血管形成術 (PTA_LL)
- (vi) 脳の血管形成術 (PTA_C/B)
- (vii) 腎臓の血管形成術 (PTA_R)
- (viii) 塞栓形成術及び内視鏡的逆行性膵胆管造影 (ERCP)

測定結果の記録については、全機関で統一した測定プロトコールを使用している。このプロトコールの記載事項としては、撮影条件 (管電圧、使用フィルタ、透視時間等の撮影・透視時のパラメータ等)、術者の熟練度や身長、医療スタッフの立ち位置、防護具使用の有無、種類等としている。線量計としては、熱ルミネッセンス線量計 (TLD) を 8 個、左右の指にリングバッジを各 1 個、リスト (手首) 線量計が使用された。調査は全体で 1,329 手技に対して実施された。

調査結果は以下のとおりである。

測定プロトコールから撮影条件として以下のことが明らかにされた。IVR の装置の約 90% で撮影台の下方に X 線管が設置されていた。また、バイプレーン (2 管球) システムが使用されていたのは IR で 4% 及び IC で 8% であった。一方、ERCP では、46% が撮影台の上方に X 線管が設置されたものを使用していた。

防護具の使用については、個人用防護具を使用していない IR 術者は全体の 2% のみであった。防護メガネの使用は 30 ~ 35% であったが、ERCP 時の使用率はわずか 6% であった。

等価線量評価結果は以下のとおりである。手技ごとに $H_p(0.07)$ を示し (水晶体の等価線量評価についても $H_p(0.07)$ の値を使用)、これらを KAP 値 (Kerma Area Product: 面積空気カーマ積) で除した値が分析に用いられている。DSA/PTA_LL (デジタル・サブトラクション血管造影法下での下肢の血管形成術) において、水晶体の等価線量は平均 0.052 mSv (最大 0.664 mSv)、DSA/PTA_C/B では平均 0.048 mSv (最大 0.276 mSv)、DSA/PTA_R では平均 0.057 mSv (最大 0.595 mSv)、塞栓形

成術では、平均 0.193 mSv (最大 2.441 mSv) であった。また、CA/PTCA では平均 0.052 mSv (最大 0.820 mSv), RFA では平均 0.044 mSv (最大 0.880 mSv), PM/ICD では平均 0.06 mSv (最大 1.083 mSv), ERCP では平均 0.146 mSv (最大 4.072 mSv) であった。DSA/PTA_LL, DSA/PTA_C/B, DSA/PTA_R 及び塞栓形成術については、眼の水晶体の等価線量が他の手技に比べて高く、注目すべきであるとしている。塞栓形成術において、各部位の線量限度に対する比が最大となる部位の出現頻度についても述べている。水晶体の線量比が最大を示す頻度は、調査結果全体の 12% であり、他の部位に比べてそれほど高くない。これは、四肢等の皮膚の等価線量限度は 500 mSv/年であり、水晶体の等価線量限度 (150 mSv/年) に比べて高いためである。しかし、水晶体の線量は ICRP の新等価線量限度 (20 mSv/年) となると、この割合が増える可能性があり、水晶体の等価線量低減が重要であると指摘している。

また、測定結果はいずれも X 線源に近い部位の線量が高く、循環器疾患の治療では KAP は比較的低いが、PM/ICD の実施において、線量が他の循環器疾患の治療時 (RFA 及び CA/PTCA) よりも高い。ERCP については、水晶体を除き 0.1 mSv 未満であり、水晶体に関しては PM/ICD の 2 分の 1 程度であるとしている。

(3) 水晶体の線量測定技術開発

WP2「実用的な眼の水晶体の線量評価法の開発」では、水晶体被ばく評価に用いられる実用量である $H_p(3)$ を評価可能な線量計開発が行われた。このプロジェクトにおいて RADCARD 社は、水晶体線量計 EYE-D™ を開発した¹⁵⁾。EYE-D™ の検出部分には TLD が採用され、線量計本体は、TLD を格納するカプセル型容器部分と、眼の近くにそのカプセルを固定するためのホルダー部分の二つのパーツに分離が可能な構造となっている。この線量計の開発過程では、主に TLD 素子タイプ、TLD 素子サイズ、カプセル素材、カプセルサイズについて、モンテカルロシミュレーション計算と実測により検討が行われた。

モンテカルロ計算には、MCNP-X コード¹⁶⁾ が採用され、 $H_p(3)$ の算出には、GUALDRINI ら¹⁷⁾ の方法が参照された。模擬頭部ファントムとして、水を満たした直径 20 cm、高さ 20 cm の円柱型アクリルファントム (0.5 cm 厚ポリメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA) 製) を設定し、その表面に取り付けられた線量計モデルに 1 m 離れた位置に設置した正方形板状線源 (24 × 24 cm) からパラレルビームで照射するというシミュレーション体系を

用い、X 線スペクトルには、International Organization for Standardization (ISO) の Narrow N シリーズと International Electrotechnical Commission (IEC) の RQR (Radiation Qualities in a Conventional Radiodiagnostic) シリーズを使用している。

TLD を覆うカプセル部分の素材には、PMMA、ポリウレタン、ポリスチレン、ポリアミド、ポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリテトラフルオロエチレン (テフロン) 等が検討され、結果、ポリアミド樹脂製の容器が妥当であると判断された。ポリアミド樹脂は、密度が 1.13 g/cm³ と人体組織よりも高い密度を持ち、低エネルギー光子の吸収による感度増加があるが、TLD 素子に Li : Mg, Cu, P (MCP-N) を採用することで、MCP-N のわずかな過度応答によりその感度増加分が補償された。また、ポリアミド樹脂は、注型成形加工に適しているため、加工がしやすい点も線量計開発において都合がよかったとしている。最終的に、TLD 素子として直径 4.5 mm、厚み 0.9 mm のペレット状の MCP-N を使用し、その素子を厚み 3 mm のポリアミド樹脂製の半球体形状カプセル容器内部に設置して使用するという形態が水晶体線量評価においてもっとも適していると判断された。最終形態におけるエネルギー応答の変動は、シミュレーション、実測ともに、ISO Narrow スペクトルでは約 20% 以内、RQR スペクトルでは 10% 以内であった。また、 $H_p(3)$ 相対感度は最大で 1.05 (RQR-4, 入射角 0°), 最小で 0.81 (RQR-9, 入射角 75°) であった。

現在市販されている EYE-D™ では、付属のヘッドバンドにより、コールド滅菌済みの線量計ホルダーを眼の近くに簡便に固定できるようになっており、IVR における術者の被ばく管理においてその有用性が期待されている。

4. 米国のコホート研究

CHODICK らは、低線量被ばくによる水晶体のリスクを明らかにするため、米国において過去 20 年間の放射線取扱技術者 (医療スタッフを含む。ただし、明確には医療スタッフが区分されていない。) のコホート研究を実施している¹⁸⁾。この研究では、1983 年から 2004 年まで、24 歳から 44 歳の白内障を発症していない 35,705 人を対象に約 20 年間の追跡調査が実施された。この間、2,382 人に白内障が発症し、647 人が手術を実施したことが報告されている。また、放射線以外の要因として、年間 5 箱以上の喫煙、肥満度 (BMI) 25 kg/m² 以上、糖尿病や高血圧の履歴の有無により白内障の発症率 (hazard

ratio) は 1.25 (95% 信頼区間: 1.06, 1.47) となり, リスクが増加することが明らかにされた。また, 水晶体の吸収線量が平均 60 mGy の高線量作業者と平均 5 mGy の低線量作業者を比較し, 調整された白内障発症率は 1.18 (95% 信頼区間: 0.99, 1.40) となることが報告されている。

5. その他

上記に示したプロジェクト研究のほか, MRENA らがフィンランドの外科医の職業被ばくによる水晶体混濁についてのパイロットスタディの結果を報告している¹⁹⁾。この研究では, 全国の 1,312 人のデータをもとに, 45 歳から 70 歳, 経験年数 15 年以上, 累積線量が 10 mSv 以上の 57 人 (男性 28 人, 女性 29 人, 平均年齢: 58 歳, 平均経験年数: 24 年) に対して, 調査を実施している。眼科検診は, 眼科医によって LOCS II の分類方法にもとづき実施された。結果, 42% に混濁が見つかり, 核の混濁が 14%, 皮質の混濁が 7%, 後囊下の混濁が 5% であったと報告している。これらの有病率は, 年齢, 喫煙及び累積線量とともに増加しており, 年齢, 性別, 喫煙等の因子で調整したところ, 水晶体混濁のオッズ比は 10 mSv あたり 0.13 であったとしている。

Kim らは, 診断及び IC 術者の被ばく線量について体系的かつ総合的なデータを取りまとめるため, 英文誌に発表された 1970 年代から 2006 年までのデータを分析し, 各検査数, 撮影条件, 手技あたりの等価線量 (眼, 甲状腺, 防護衣の外側及び内側, 手指) 及び各実効線量のとりまとめを行っている²⁰⁾。この結果として, 実効線量は, カテーテル検査において 0.02 から 38.0 μ Sv, PCI において 0.17 から 31.2 μ Sv, アブレーションにおいて 0.24 から 9.6 μ Sv, ペースメーカーまたは除細器の移植において 0.29 から 17.4 μ Sv であった。甲状腺 (防護衣の外側) と各組織の位置の等価線量の比としては, 眼に対して 0.9 ± 1.0 , 体幹部で 1.0 ± 1.5 , 手指で 1.3 ± 2.0 であった。これらの結果は一般的に X 線管側となる左側が高くなる傾向があることを指摘している。また, 線量の大きな違いは, 防護衣の使用, 手技の手順の最適化等がなされているかどうかに関係しているとしている。

6. まとめ

欧米諸国では, 医療従事者, とくに線量が高くなる可能性のある IVR 術者や看護師, 放射線技師等に対する数多くの疫学調査や臨床現場や臨床現場を模擬した場での線量測定の結果が報告されている。また, 被ばく低減策に関する検討を示した論文も数多い。これらの結果は,

距離や透視時間等に配慮し, 遮へい板や防護メガネを使用することにより, 術者等の水晶体の等価線量を ICRP の新しい水晶体の線量限度以下にすることが可能であることを示している。

線量測定技術の開発としては, ORAMED プロジェクトにおいて, 水晶体線量評価用の線量計が開発されている。しかしながら, エリアモニタや個人線量計の国際規格については, まだ検討中である。とくに中性子線の測定に関しては, ICRP や ICRU に実用量に関する記述がない。また, どのような場合に水晶体用の線量計を着用するのか, IAEA 等が示した基準にしたがい, 十分に検討する必要があるだろう。一方, 線量計を用いて, 実際の水晶体の線量を測定する必要があるなら, 簡便な水晶体線量計測システムの開発が必要となるかもしれない。

III チェルノブイリ原子力発電所事故による水晶体被ばくに関する知見

1. 清掃員の水晶体被ばく

チェルノブイリ原子力発電所事故による水晶体被ばくに関する知見として, ICRP Publication 118 ((274) ~ (277)) に清掃員の記述がある⁹⁾。その概要は,

(i) UACOS (ウクライナ/米国合同の眼に関するチェルノブイリ調査研究) の成果によれば, 白内障に関して従前の知見より低いしきい値を追加的に支持する所見あり。

(ii) その基盤となった情報は, 8,607 人の清掃員 (ほとんど男性, 被ばく時年齢は平均 33 歳) の様式化された細隙灯顕微鏡検査を実施したデータである。これらは事故後 12 年または 14 年の適切に文書化された低線量被ばく情報である。

(iii) 年齢, 喫煙, 糖尿病, コルチコステロイドの使用, 有害化学物質や紫外線への職業上の暴露, 等の結果を変動する要因についても分析時に考慮している。

(iv) PSC ステージ 1 と皮質白内障のしきい値は 0.35 Gy 程度である。信頼区間としては 0.7 Gy を超える部分を排除。この分析結果は従前のガイドラインにある多分割・遷延被ばくにおける検出可能な水晶体混濁のしきい値 5 Gy 及び視覚障害性白内障のしきい値 > 8 Gy を支持してはいない。

(v) 放射線による白内障の潜伏期が被ばく線量に関して逆関数的であることから, これまでより低い白内障のしきい値の存在についてより詳細に議論するきっかけになるだろう。

(vi) 対象となっている清掃員の平均年齢は現在 53

歳であり、その94%を占めるメンバーの被ばく線量は0.4 Gy未満である。今後数十年、眼科検診を継続することにより、より精度の高い統計を以って放射線白内障のしきい値の評価がなされる可能性があるとしている。

2. ウクライナ医学アカデミーにおけるヒアリング調査

チェルノブイリ原子力発電所事故後の健康影響調査に関連して、ウクライナ医学アカデミー・放射線医学研究センター（NRCRM）の関係者に、現時点での見解を個別にヒアリングする機会を得た（2012年2月5日）。その目的は、国際的に評価の定まっていない健康影響について指摘した論文、文献等について、新たな科学的知見を見逃すことがないように、論文の背景を調査し、論点を整理することであった。放射線医学研究センターはウクライナにおける放射線影響研究の基軸として機能している機関である。先方の対応者は、Dimitry BAZYKA氏（NRCRM 所長）、Larysa YANOVYCH氏（NRCRM 企画分析研究調整室）、Petro VITTE氏（ウクライナ医学アカデミー・労働衛生研究所）、Illya LIKHAROV氏（ウクライナ技術科学アカデミー・放射線防護研究所）であった。（聴取り側は、飯本武志（東大）、松本正喜（JANUS）、通訳（Etery SAKONTIKOVA））。このヒアリングでは、さまざまな健康影響について調査されたが、以下にウクライナにおける水晶体影響に関する彼らの見解を紹介する。

(1) ウクライナにおける関連の研究

ウクライナにおける関連の研究は、線量評価チーム、眼科医チーム、疫学者チームが共同して実施したものである。眼科医チームは使用した機器や診断方法に関するマニュアルを事前に整備し、白内障の診断を安定的に実施できるように工夫している。調査期間としては5から6年間という比較的短い期間で実施されたものであり、この調査期間中に躍進的な白内障診断法の開発や普及があったとはいえ、一定の方法で診断した結果が得られているものといえるだろう。

(2) 疫学研究

疫学者チームは、白内障に影響を及ぼす交絡因子、たとえば飲酒、喫煙などの影響を調整して解析を行っている。疫学的な解析には、当初、米国のプログラムEPICUREを使用していた。このプログラムは使いやすいプログラムであるが、不確実性についての考慮がなされていなかった点が弱点である。現在は、不確実性までも考慮して解析可能なプログラムに切り替えて解析を試みているが、EPICUREと比較すると扱いが難しいとの

印象がある。

(3) 線量評価研究

清掃員の水晶体被ばくに関する線量評価に関しては、大きく分類して3つの方法（論文²¹⁾では6つのカテゴリ分類）が採用されている。それらは、①個人線量計による被ばく線量測定結果に基づく方法、②EPR（歯を用いた線量評価法）による方法、③作業員の行動に基づき、作業の場所と滞在時間から推定する方法、である。個人被ばく線量の評価には、可能な限り、複数の方法が組み合わされている。各方法の誤差範囲や相互の推定値の比較なども実施してきた。

(4) これらの研究に対する問題点

これらの解析に関して、各作業員の実際の行動記録が十分には整備されていないため、線量の絶対値としての必要な精度が確保されているとは言えない。個人の線量を後に精査するには、個々の行動記録（活動した場所と時間）が重要となる。作業員の行動から被ばく線量を適切に評価するためのプログラムが今後必要となるだろう。

3. まとめ

ここでは、チェルノブイリ原子力発電所事故による水晶体被ばくに関する知見として、ICRP Publication 118（(274)～(277)）の清掃員に関する知見と、ウクライナ医学アカデミー・放射線医学研究センター（NRCRM）の関係者に、現時点での見解を個別にヒアリングして得た知見を紹介した。慢性被ばくにおける検出可能な水晶体混濁の従前からのしきい値5 Gyよりもかなり低い線量での影響を示唆した結果が示されている。

IV 結 論

医療従事者の水晶体の被ばく及び防護に関するデータについては、従事者の数、被ばく線量レベルともに他の産業分野に比べて高い傾向にあることから関心も高く、疫学研究、線量評価法の開発、実測及びシミュレーションによる推定、計測技術開発等、多岐にわたっている。また、各分野の専門家が国際的なプロジェクトのもとで、系統立てられて研究がなされている。これらの研究成果は、わが国の医療従事者の被ばく線量を推定する上でも参考となる。

一方、使用する放射線発生装置の性能も日々進展しており、装置の種類、配置、術者の立ち位置、術者の熟練度、手技内容、防護手段等、国や地域、施設によっても大きく異なる。わが国の各施設において、実際の作業に

伴う線量を得るためには、施設の特徴も合わせて、より多くのデータの蓄積が必要不可欠であろう。

チェルノブイリ事故の清掃員に対して実施された疫学研究については、ウクライナ医学アカデミーにおいて実施された健康調査のヒアリング調査結果についても合わせて紹介した。これらの健康調査では、行動記録等が十分に整備されていない等、データの信頼性に関する問題点についても合わせて指摘した。

疫学研究については、母集団の大きさ、交絡因子の影響、エンドポイントの設定等、さまざまな要因を考慮する必要がある。とくに、緊急時における被ばく線量を評価する場合には、事故直後の混乱した中で十分精度の高いデータを得ることは難しい。東京電力（株）福島第一原子力発電所事故後、初期被ばく線量の推定・評価に対する開発が進められたが、時間を遡って線量を推定・評価できるような線量再構築手法を確立しておくことは、水晶体への影響を評価する上でも重要である。一方、これらのデータは、放射線誘発白内障のしきい線量の科学的根拠を示す一つの貴重なデータとなる可能性もあることから、慎重に取り扱う必要があろう。

参 考 文 献

- 1) UNSCEAR; Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report Vol. I (2000).
- 2) ICRP; Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedure, ICRP Publication 85, *Ann. ICRP*, **30** (2) (2000).
- 3) E. VANO, L. GONZALEZ, F. BENEYTES and F. MORENO; Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories, *Br. J. Radiol.*, **71**, 728–733 (1998).
- 4) UNSCEAR; Sources of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 Report Vol. I (2010).
- 5) ICRP; ICRP Statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs-threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context, ICRP Publication 118, *Ann. ICRP*, **41** (1/2) (2012).
- 6) IAEA; IAEA cataract study, Available at <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPOP/Content/News/reliid-cataract-study.htm>, Accessed 26 February 2014.
- 7) O. CIRAJ-BJELAC, M. M. REHANI, K. H. SIM, H. B. LIEW, E. VANO and N. J. KLEIMAN; Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology: Is there reason for concern?, *Cardiovasc. Interv.*, **76**, 826–834 (2010).
- 8) E. VANO, N. KLEIMAN, A. DURAN, M. ROMANO-MILLER and M. REHAI; Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments, *J. Vasc. Interv. Radiol.*, **24**, 197–204 (2013).
- 9) A. DURAN, E. VANO, N. K. KLEINMAN, D. E. ECHEVERRI, M. C. CABRERA and M. R. MILLER; Retrospective evaluation of lens injuries and dose : relid study, *J. Am. Coll. Cardiol.*, **57**, E1951, i2 SUMMIT, (2011).
- 10) S. JACOB, M. MICHEL, C. SPAULDING, S. BOVEDA, O. BAR, A. P. BREZIN, M. STREHO, C. MACCIA, P. SCAFF, D. LAURIER and M. O. BERBIER; Occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology (O'CLOC study): are X-rays involved?, *BMC Public Health*, **10**, 1–8 (2010).
- 11) S. JACOB, S. BOVEDA, O. BAR, A. BRÉZIN, C. MACCIA, D. LAURIER and M. O. BERNIER; Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study, *Int. J. Cardiol.*, **167** (5), 1843–1847 (2013).
- 12) S. JACOB, L. DONADILLE, C. MACCIA, O. BAR, S. BOVEDA, D. LAURIER and M. O. BERBIER; Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses, *Radiat. Prot. Dosim.*, **153** (3), 282–293 (2013).
- 13) F. VANHAVERE, E. CARINOU, G. GUALDRINI, I. CLAIRAND, M. SANS MERCE, M. GINJAUME, D. NIKODEMOVA, J. JANKOWSKI, J-M. BORDY, A. RIMPLER, S. WACH, P. MARTIN, L. STRUELENS, S. KRIM, C. KOUKORAVA, P. FERRARI, F. MARIOTTI, E. FANTUZZI, L. DONADILLE, C. ITIÉ, N. RUIZ, A. CARNICER, M. FULOP, J. DOMIENIK, M. BRODECKI, J. DAURES, I. BARTH and P. BILSKI; Optimization of radiation protection of medical staff, EURADOS report 2012–02 (2012).
- 14) M. GINJAUME, F. VANHAVERE, E. CARINOU, G. GUALDRINI, I. CLAIRAND and M. SANS-MERCE (Ed); International workshop on optimization of radiation protection of medical staff, ORAMED 2011, *Radiat. Meas.*, **46** (11), 1195–1334 (2011).
- 15) P. BILSKI, J-M. BORDY, J. DAURES, M. DENOZIERE, E. FANTUZZI, P. FERRARI, G. GUALDRINI, M. KOPEČ, F. MARIOTTI, F. MONTEVENTI and S. WACH; The new EYE-D™ dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff, *Radiat. Meas.*, **46** (11), 1239–1242 (2011).

- 16) D. B. PELOWITZ (Ed.); MCNPX User's Manual, Version 2.5.0, Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369 (2005).
- 17) G. GUALDRINI, F. MARIOTTI, S. WACH, P. BILSKI, M. DENOZIERE, J. DAURES, J-M. BORDY, P. FERRARI, F. MONTEVENTI, E. FANTUZZI and F. VANHAVERE; A new cylindrical phantom for eye lens dosimetry development, *Radiat. Meas.*, **46** (11), 1231-1234 (2011).
- 18) G. CHODICK, N. BEKIROGLU, M. HAUPTMAN, B. H. ALEXANDER, D. M. FREEDOMAN, M. M. DOODY, Li. C. CHEUNG, S. L. SIMON, R. M. WEINSTOCK, A. BOUVILLE and A. J. SIGURDSON; Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologist, *Am. J. Epidemiol.*, **168**, 620-631 (2008).
- 19) S. MRENA, T. KIVELA, P. KURTIO and A. AUVINEN; Lens opacities among physicians occupationally exposed to ionizing radiation-a pilot study in Finland, *Environ. Health.*, **37** (3), 237-243 (2011).
- 20) K. P. KIM, D. L. MILLER, S. BELTER, R. A. KLEINERMAN, M. S. LINET, D. KWON and S. L. SIMON; Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures, *Health Phys.*, **94** (3), 211-227 (2008).
- 21) V. V. CHUMAK, B. V. WORGUL, Y. I. KUNDIYEV, N. M. SERGIYENKO, P. M. VITTE, C. MEDVEDOVSKY C, E. V. BAKHANOVA, A. K. JUNK, O. Y. KYRYCHENKO, N. V. MUSIJACHENKO, S. V. SHOLOM, S. A. SHYLO, O. P. VITTE, S. XU, X. XUE and R. E. SHORE; Dosimetry for a study of low-dose radiation cataracts among Chernobyl clean-up workers, *Radiat. Res.*, **167** (5), 606-614 (2007).



飯本 武志 (いimoto たけし)

東京大学環境安全本部准教授。早稲田大学大学院理工学研究科(物・応物)博士後期課程修了。博士(工学)。専門は「放射線防護」「放射線計測」「環境放射線(能)」「放射線管理」。東大全学の環境安全、労働安全に関する業務総括の職務に就く一方で、安全管理分野の専門家育成のみならず、広く、環境・安全・リスクをキーワードに、学校教員育成、児童生徒への教育にも力を入れている。

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp



川浦 稚代 (かわうら ちよ)

2000年名古屋市立大学大学院博士課程薬学研究科修了、2008年同大学院で医学博士取得。薬学・医学博士。日本の乳幼児医療被ばくの実態解明のため、年齢・体型に即した被ばく評価システムの開発に取り組んでいる。

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp



横山 須美 (よこやま すみ)

1994年に日本原子力研究所入所。2008年に藤田保健衛生大学へ。環境放射線、加速器施設の空气中放射性ガス・粒子挙動、医療従事者の被ばく防護に関する研究等に取り組んでいる。最近はリスクコミュニケーションに関心あり。

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV) —ICRP 及び ICRU の水晶体線量評価法—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
川浦 稚代*⁷, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁸, 浜田 信行*³, 藤通 有希*³, 堀田 豊*⁹,
山崎 直*¹⁰, 横山 須美*¹¹

(2014年7月8日受理)

(2014年12月22日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (IV) —Current Activities of ICRP and ICRU: External Dosimetric Concepts for the Lens of the Eye—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IMOTO,*² Takeshi ICHIJI,*³ Satoshi IWAI,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁷ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁸ Nobuyuki HAMADA,*³ Yuki FUJIMICHI,*³
Yutaka HOTTA,*⁹ Tadashi YAMASAKI*¹⁰ and Sumi YOKOYAMA*¹¹

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) have been defined operational quantities and protection quantities. Dose limits have been also recommended by the ICRP using protection quantities. These quantities and some related values for main radiation such as photons, electrons, and neutrons, are summarized in this article with some historical considerations. The ICRP indicated conversion coefficients for the lens of the eye as absorbed dose per fluence as protection quantities. Equivalent dose is not used because a protection quantity that uses radiation weighting factors is not intended to be calculated for tissue reactions. So far, the ICRP has not indicated a specific RBE value for cataract formation. Operational quantities are used for measurements. There have been three types of phantoms, namely a slab phantom, a reduced phantom, and a cylindrical phantom, but none of them has been definitely recommended for the lens of the eye by the ICRP or the ICRU. Although conversion coefficients to personal dose equivalent, $H_p(3)$, for electrons have been recommended, no other conversion coefficients to personal dose equivalent for the lens of the eye has been indicated by the ICRP or the ICRU. However, there have been several studies described personal dose equivalent. Ambient dose equivalent, $H^*(3)$, and directional dose equivalent, $H'(3, \alpha)$, have been indicated in several limited conditions by the ICRP and the ICRU. These status are overviewed in this article.

KEY WORDS: ICRP, ICRU, protection quantity, operational quantity, conversion coefficients for the lens of the eye, $H_p(3)$, $H^*(3)$.

I はじめに

日本保健物理学会の専門研究会として、2013年度に「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」が立ち上げられ、わが国の放射線防護における問題を検討しているが、この度その中間報告として、一連の論文をまとめることとなった。これらの検討の基礎としては、まず現状を把握する必要がある。その中で国際機関である国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection; ICRP) 及び国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiation Units and

Measurements; ICRU) でのこれまでの検討状況及び現状を本稿で取りまとめる。

ICRP 及び ICRU の築く放射線防護の線量体系については、IV. 1. 項で詳述するが、実用量と防護量がそれぞれの目的に使用され、防護量によって線量限度が決められている。実用量と防護量についての概念も時代とともに発展してきているので、その変遷も踏まえて、本稿では水晶体に適用される実用量と防護量と、さらにその導出に用いられる計算方法やファントムについても取りまとめることとした。

II 水晶体の線量限度

1980年のBrighton声明¹⁾で職業人の水晶体の線量限度が300 mSvから150 mSvに引き下げられた。1990年のICRP Publication 60²⁾では水晶体の線量限度は、職業人は150 mSv、公衆は職業人の1/10である15 mSvという値が勧告されている。2007年のICRP Publication 103³⁾では、ICRP Publication 60と同じ線量限度が引き継がれた。しかし、ICRP Publication 103では、水晶体は従来考えられていたよりもっと放射線感受性が高い可能性が懸念されており、放射線感受性の再評価が検討されていることを(A80)項で記述している。

2011年4月に発表されたICRPの「組織反応に関する声明」^{4,5)}では、眼の水晶体の白内障のしきい値は生涯線量で0.5 Gyとされ、職業人の計画被ばく状況の線量限度は5年間平均で20 mSv(ただし50 mSvを越えない)に引き下げられた。眼の水晶体の混濁と白内障のしきい値は2012年に採択されたICRP Publication 118⁵⁾で詳しく論じられている。

III 水晶体の防護量

1987年に採択されたICRP Publication 51⁶⁾では光子入射に対する水晶体の線量当量がAP, PA, LAT, ROT, ISOの5照射条件[†]について単位フルエンスあたりの値として示されている。ICRPが評価した値は、カーマ近似[‡]計算に基づくため、低エネルギー光子の線量当量をAP条件で若干過大評価していることも示している。1995年

に採択されたICRP Publication 74⁷⁾/ICRU Report 57⁸⁾の付録Aには光子入射に対する水晶体の吸収線量がAP, PA, LAT, ROT, ISOの5照射条件に対して、空気カーマからの換算係数として示されている。

2010年に採択されたICRP Publication 116⁹⁾の付録Fには眼の水晶体の防護量が、眼の水晶体(の有感部分)に対する単色エネルギー粒子フルエンス吸収線量換算係数として示されている。入射粒子は光子、電子、中性子である。照射条件は光子と中性子はAP, PA, LAT, ROT, ISOの5条件であり、電子はAP, PA, ISOの3条件である。計算は電子入射AP条件を除けば眼球モデルを組み込んだ頭部ファントムを用いている(詳細はTable 1参照)。電子入射AP条件では眼球以外からの後方散乱の影響が無視できるため、眼球ファントムのみで計算している。電子入射については0.8 MeVまではISO照射条件の換算係数にはAP照射条件の値を用いている。その理由はAP照射条件の換算係数の信頼度は高いことと、ISO照射条件に比べて保守的な値を示すためである。水晶体の防護量評価値の作成に使用したデータ等についてはTable 1にまとめを示す。

中性子について放射線加重係数を使用した等価線量を水晶体の防護量として用いない理由は、放射線加重係数

[†] AP(前方—後方ジオメトリ)、PA(後方—前方ジオメトリ)、LAT(側方ジオメトリ)、ROT(回転ジオメトリ)、ISO(等方ジオメトリ)。

[‡] カーマ近似: 発生した荷電粒子の挙動を考慮せずに、発生した位置で全エネルギーが沈着するという仮定。

*1 (独)放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1 (〒263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷7-3-1 (〒113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財)電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北2-11-1 (〒201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*4 (一社)原子力安全推進協会; 東京都港区芝5-36-7 (〒108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 千代田テクノ(株); 東京都文京区湯島1-7-12 (〒113-8681)

Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北1-3 (〒622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市長区大幸南1-1-20 (〒461-8637)

Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (独)日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松4-33 (〒319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*9 日本原燃(株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付4-108 (〒039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsu-cho, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jfnl.co.jp

*10 中部電力(株); 静岡県御前崎市佐倉5561 (〒437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*11 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市香掛町田楽ヶ窪1-98 (〒470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

Table 1 ICRP 及び ICRU が示した眼の水晶体の防護量の評価手法のまとめ

文献	年	ファントム	放射線の種類	計算方法 (またはコード名)	照射条件
ICRP Publication 51	1987	人体数学ファントム (MIRD 型ファントム)	光子	モンテカルロコード	AP, PA, LAT, ROT, ISO
ICRP Publication 74 / ICRU Report 57 の付録 A	1995	人体数学ファントム (MIRD 型ファントム)	光子	モンテカルロコード	AP, PA, LAT, ROT, ISO
ICRP Publication 116 の付録 F	2010	眼球ファントム付 UF-ORNL ファントム ³⁶⁾ 眼球ファントム付 Adam, Eve 平均サイズファントム ³⁷⁾ 標準コンピュータファントム (AP 入射電子は眼球ファントムのみ ³⁷⁾)	中性子 光子 電子	中性子： MCNPX/V2.6.0 ³⁹⁾ 光子、電子：EGSnrc	AP, PA, LAT, ROT, ISO (ただし電子のみ AP, PA, ISO)

はがんなどの確率的影響に適用する係数であり、確定的影響に分類されている白内障を考慮した係数でないためである。中性子入射に関する白内障の防護量としては白内障の生物効果比 (RBE) で加重した吸収線量を用いる必要がある。中性子に関する白内障発症の RBE は ICRP Publication 92¹⁰⁾ にマウスによる動物実験データ等及び原爆被爆生存者⁸⁾ のデータが示されている。しかし、ICRP としては中性子によるヒトの白内障の RBE の評価値を示していないのが現状である。

IV 水晶体の実用量

1. 実用量と防護量の関係

放射線防護に使用される線量概念には、大きく分けて 2 種類の量がある。一つは ICRP が定義する「防護量」(protection quantity) であり、もう一つは ICRU が定義する「実用量」(operational quantity) である。防護量は、人の放射線健康リスクと関連付けた指標[#]として、放射線防護のための線量限度に用いられている量であり、必ずしも直接測定できる量ではない。一方、実用量はモニタリングのための測定の対象と考えられている量であり、場のモニタリングのために周辺線量当量及び方向性線量当量が、また個人モニタリングのために個人線量当量が用いられる。

防護量は照射条件がわかればシミュレーション計算で求めることができる量である。しかし、防護量は物理量ではないため実測可能な量とは考えられておらず、入射放射線の方向依存性が大きいため、放射線モニタリングには直接使用できない。そのため、防護量の評価のために実用量が、ICRP の 1977 年の勧告 (ICRP Publication 26¹¹⁾) に応じて開発された。この実用量の目的は、防護量の推定値を提供すること (ICRU Report 39¹²⁾ と ICRU Report 43¹³⁾) と、モニタリングに用いる線量計の校正目標量として使用されることである^{7,8)}。

実用量は、場のモニタリング用 (エリアモニタリング) として周辺線量当量と方向性線量当量が使用され、人体に装着する個人線量計を用いる個人モニタリングには個人線量当量が用いられる。実用量は、防護量の推定値を適切に表わすことができ、かつ近似的に測定可能な量であり、防護量をほぼ下回らないように設定されている。しかし、人体の後方から放射線が入射するような場合には、実用量である個人線量当量は防護量である実効線量よりも明らかに小さな値を示すことがあることにも注意が必要である。放射線防護に直接係わる防護量と同様に測定に係わる実用量は、放射線に関する基本物理量 (フルエンス、空気カーマなど) と換算係数によって関連付けられている。防護量、実用量、放射線に関する基本物理量の関係を Fig. 1 に示す。

2. 水晶体の個人線量当量 $H_p(3)$

水晶体の等価線量に対応する個人線量当量 $H_p(3)$ は軟組織の深さ 3 mm の点の線量当量として ICRU Report 47¹⁴⁾ で定義された。しかし上記の定義のままでは、個人線量当量を測定することは現実的にはできないため、ICRU Report 47 では適切な組織等価物質で覆われ、かつ体表面に装着した検出器で測定することが可能であることを示した。そして検出器の校正は、一般に適切なファ

⁸⁾ ICRP Publication 92 の (327) 項では、しきい値のない線量応答モデルで解析した OTAKE と SCHULL の論文⁴⁰⁾ を引用してヒトの推定値としては 32 (信頼範囲: 12 ~ 89) を紹介しているが、 γ 線に対して L-Q (線形-二次) モデルを用いれば、もっと大きな値となることを述べている。

[#] 防護量は放射線疫学や放射線生物学データを考慮に入れて構築された線量概念ではあるが、LNT (しきい値なし無限直線) モデル仮定にしたがっており、性別、年齢別などに依存する感受性のある人口集団分布を仮定して平均化しており、あくまでも放射線防護計画や対策を立案する目的で使用される指標である。個人や特定の集団の健康影響発症を推定するために使用することは適切ではない。

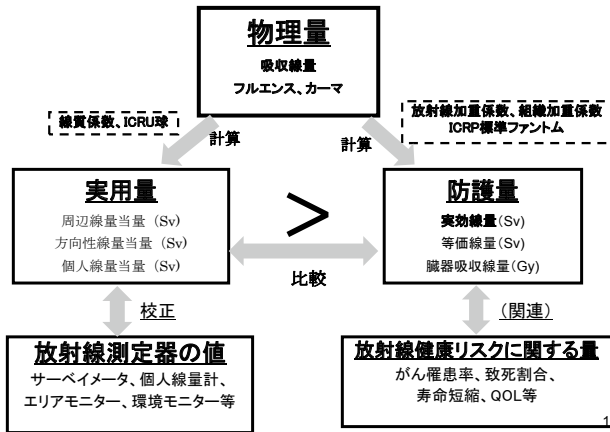


Fig. 1 ICRP 及び ICRU における放射線防護の線量評価体系

ントムを用いて単純化された状況で実施されることを示した。個人線量当量の評価に使用するファントムを規定し、評価点を規定することにより単一の値である $H_p(3)$ への換算係数が計算可能となり、線量計の校正も可能となる。

しかし、 $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ と異なり $H_p(3)$ への単一の換算係数を計算できるようにするためのファントムは ICRP 及び ICRU では定義されてこなかった^{††}。したがって、空気カーマからの $H_p(3)$ への換算係数は ICRP Publication 74/ICRU report 57 には示されておらず、その後、ICRP Publication 74 の改定版として出された ICRP Publication 116 にも示されていないのが現状である。

ICRU Report 47 の定義に準拠すれば、 $H_p(3)$ は、適切な軟組織のファントムの深さ 3 mm の点の線量当量として評価できる。1991 年に GROSSWENDT¹⁵⁾ は ICRU 組織等価物質及び PMMA (メタクリル酸メチル樹脂) で作成したスラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm)^{‡‡} を用いて光子の $H_p(3)$ を、電子輸送を考慮しない近似計算であるカーマ近似を用いたモンテカルロコードで計算した。その結果は IEC 62387-2012¹⁶⁾、ISO 4037-3¹⁷⁾、及び ISO 12789-2¹⁸⁾ に引用されている。1995 年に TILL ら¹⁹⁾ によって、標準スラブファントムで、電子輸送を考慮しないカーマ近似を用いたモンテカルロ計算により、光子の $H_p(3)$

が計算された。ISO 12974²⁰⁾ は中に水が入った PMMA 材質のスラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm) を $H_p(3)$ 用の線量計較正に使用することを提案した。しかし、ICRP Publication 74 に記載されているように、標準スラブファントムは、体幹部に線量計を装着することを前提にして使用されるものである。したがってスラブファントムの後方散乱特性を考慮すると眼の防護量評価への適用の妥当性については慎重な検討が必要となる。2007 年に ENEA^{§§} の FERRARI ら²¹⁾ は ICRU 等価物質からなる 20 cm × 20 cm × 15 cm のスラブファントム (reduced phantom: 以後、「小型スラブファントム」と記す。) を用いて MCNP-4C コード²²⁾ でカーマ近似を用いたモンテカルロ計算及び実験で $H_p(3)$ を評価した。この値は標準スラブファントムを用いた $H_p(3)$ よりも後方散乱が小さく、ICRP Publication 74 /ICRU Report 57 の付録 A に示された MIRD 型ファントム (米国 Medical Internal Radiation Dose Committee のファントムであり、2 次不等式を用いて人体及び臓器・組織を表現した数学ファントム) を用いた水晶体の吸収線量の安全側の近似値として優れていることが分かった。

$H_p(3)$ の評価に使用されるファントムはスラブファントムだけでなく、人体の頭部形状を近似した円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm: ICRU 組織等価物質) が欧州共同体と欧州原子力共同体 (EU-EURATOM) の基金で行われている ORAMED プロジェクト^{***}ワーキングパーティ 2 (WP2) で提案された。そしてその円筒ファントムを用いた光子の空気カーマから $H_p(3)$ への換算係数が 2009 年 DAURES ら²³⁾ によってモンテカルロコード PENEROPE²⁴⁾ を用いて評価された。電子のエネルギー沈着はカーマ近似を用いたケースと電子輸送を考慮したケースの 2 種類の計算が実施された。ORAMED プロジェクトの結果、円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm) は上記 2 種類のスラブファントムよりも MIRD 型ファントムを用いた水晶体の吸収線量の値に近く、安全側の評価が可能であることが分かった²⁵⁾。また 1 MeV 以上の光子ではカーマ近似は正確な値を示さないことが明確となった。2013 年に GUALDRINI ら²⁶⁾ によって光子 10 keV から

^{††} ICRP 及び ICRU の文書では、 $H_p(10)$ は ICRU Report 47 に初めて換算係数が記載され、 $H_p(0.07)$ は ICRP Publication 74/ICRU Report 57 に初めて換算係数が示された。使用されたファントムは 30 cm × 30 cm × 15 cm、ICRU 組織等価物質のファントムである。

^{‡‡} ICRU 組織等価物質のスラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm) を ICRU 標準ファントムともいう。ここでは以降、標準スラブファントムと記す。

^{§§} 新技術エネルギー環境機関 (イタリア)

^{***} Optimisation of Radiation Protection of Medical Staff 計画 (project)。EU-EURATOM 共同研究計画の一つであり、医療スタッフの放射線防護の品質向上計画である。課題の一つとして診断、IVR (Interventional Radiology)、核医学等に従事する医療スタッフの放射線防護に関する眼の水晶体防護のための線量制限、 $H_p(3)$ 評価と $H_p(3)$ の応答を持つ線量計開発に関する研究計画があり、WP2 が担当している。

Table 2 光子の個人線量当量 $H_p(3)$ の評価手法のまとめ

放射線	文献	年	ファントム	計算方法 (またはコード名)	エネルギー 沈着計算	その他
光子	GROSSWENDT ¹⁵⁾	1991	スラブ (ICRU ^{†††} , PMMA) ^{§§§} 30 cm × 30 cm × 15 cm	モンテカルロ	カーマ近似	IEC62387-2012, ISO4037-3, 及び ISO 12789-2 で引用
光子	TILL ら ¹⁹⁾ GSF-Bericht 27/95,	1995	スラブ (ICRU) 30 cm × 30 cm × 15 cm	モンテカルロ	カーマ近似	-
光子	FERRARI ら ²¹⁾	2007	スラブ (ICRU) (reduced phantom) 20 cm × 20 cm × 15 cm	モンテカルロ (MCNP-4C)	カーマ近似	実験でも検証
光子	DAURES ら ²³⁾ CEA-R-6235	2009	円筒 (ICRU) 20 cmφ × 20 cm	モンテカルロ (PENEROPE)	電子輸送と カーマ近似	円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm) は ORAMED 計画で提案
光子	GUALDRINI ら ²⁷⁾	2013	円筒 (ICRU) 20 cmφ × 20 cm	モンテカルロ (PENEROPE と MCNP5)	電子輸送と カーマ近似	エネルギー 10 keV ~ 10 MeV, 入 射角 0 ~ 180 度 (約 15 度間隔)

†††ICRU 組織等価物質を示す。

§§§() 内は材質名称を示す。

10 MeV までの入射エネルギーで入射角 0 度から約 15 度おきに 180 度までの入射条件で、円筒ファントムを用いた $H_p(3)$ の計算が MCNP5²⁷⁾ と PENEROPE コードを用いて行われ、カーマ近似と電子輸送を考慮して計算した両者の結果が表で示された。

以上の光子の $H_p(3)$ の調査結果を Table 2 にまとめる。電子入射に対しては、1995 年に ICRP Publication 74/ICRU Report 57 の表 7 に標準スラブファントムを用いた深さ 3 mm の点の線量当量が示されており、ICRP Publication 74/ICRU Report 57 の (279) 項で、この値は個人線量当量 ($H_p(3)$) に使用できると記載されている。しかし、それ以降の ICRP 及び ICRU の文書には改訂は出されておらず、新たな計算値は発表されていない。

中性子入射については、2013 年に GUALDRINI ら²⁸⁾ が ICRU 組織等価物質の標準スラブファントムと円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm) を用いて、熱中性子から 15 MeV までの $H_p(3)$ の評価値を示した。この計算も ORAMED 計画の一環として実施された。計算方法はモンテカルロコード MCNPX²⁹⁾ と MCNP5 で求めた中性子フラックスと 2 次光子フラックスに平均線質係数を考慮したカーマ近似を用いている。平均線質係数を用いた理由は、白内障の RBE の評価値が確定していないためである。FERRARI らはこれらの中性子の個人線量当量を用いて、IAEA が調査してまとめた作業場の代表的な中性子スペクトル場で、線質係数 Q(L) を用いて GUALDRINI ら²⁸⁾ が計算した $H_p(3)$ と $H_p(10)$ を比較して、必ずしも $H_p(10)$ が保守的な値を示すわけではないことを示した³⁰⁾。

しかし、眼の水晶体の白内障に対する防護に係る実用

量 $H_p(3)$ の評価に、がんなどの晩発性の確率的影響の防護に用いることを目的とした Q(L) に関連する平均線質係数を検討もなく使用することは妥当ではない。以上の電子・中性子の $H_p(3)$ の調査結果を Table 3 にまとめる。

3. 水晶体の周辺線量当量 $H^*(3)$ または方向性線量当量 $H'(3, \alpha)$

厳密に言えば、水晶体の周辺線量当量 $H^*(3)$ または方向性線量当量 $H'(3, \alpha)$ ^{†††} は ICRP や ICRU で評価されていない。1985 年に採択された ICRP Publication 51⁶⁾ は、表 4.1-7 に光子入射に対する ICRU 球の主軸上 3 mm の深さの点の線量当量に対する空気カーマからの換算係数を、PAR (主軸平行入射)、OPP (主軸反対方向からの平行入射)、ROT (回転入射)、ISO (等方入射) の 4 照射条件で示した。ICRP Publication 116 では ICRP Publication 51 の表 7 の、PAR (主軸平行入射) の換算係数を $H^*(3)$ として使用している。そして ICRP Publication 51 の表 7 の換算係数の計算にはカーマ近似が使用されていることは ICRP Publication 51 には記載が無いが、ICRP Publication 116 に明記されている。ICRP Publication 51 には ICRU 球の主軸上 3 mm の深さの中性子線量当量が PAR 及び ISO 入射条件に対して示されている。ただしこの値は中性子の線質係数に関するバリ声明³¹⁾ を反映した値ではなく、バリ声明を反映する場合は係数 2 を乗ずることが必要である。

ICRP Publication 74/ICRU Report 57 では、電子の方向性線量当量 $H'(3, \alpha)$ を、標準スラブファントムの深さ

††† $H^*(d)$ と $H'(d, 0)$ は同じものである。(ICRP Publication 74/ICRU Report 57 の (76) 項)

Table 3 電子及び中性子の個人線量当量 $H_p(3)$ の評価手法のまとめ

放射線	文献	年	ファントム	計算方法 (またはコード名)	エネルギー 沈着計算	その他
電子	ICRP Publication 74 /ICRU Report 57	1995	スラブ 30 cm × 30 cm × 15 cm	モンテカルロ (PTB-BG)	電子輸送	$H_p(3)$ は $H'(3, 0)$ と同じ値を使用
中性子	GUALDRINI ら ²⁸⁾	2013	円筒 (20 cmφ × 20 cm) スラブ (30 cm × 30 cm × 15 cm) (ICRU)	モンテカルロ (MCNP と MCNP5)	中性子・2次光 子輸送とカーマ 近似	エネルギー $1 \times 10^{-9} \sim 15\text{MeV}$, 入射角 $0 \sim 75$ 度 (15 度間隔)

Table 4 光子, 電子, 及び中性子の周辺線量当量 $H^*(3)$ または方向性線量当量 $H(3, \alpha)$ の評価手法のまとめ

放射線	文献	年	ファントム	計算方法 (またはコード名)	エネルギー 沈着計算	その他
光子	ICRP Publication 51	1987	ICRU 球	—	カーマ近似 (ICRP 51 に は記載はないが, ICRP 116 にカーマ近似である ことが記載されている。)	PAR (主軸平行入射), OPP (主軸反対方向からの平行入 射), ROT (回転入射), ISO (等方入射) の 4 条件
電子	ICRP Publication 74 /ICRU Report 57	1995	スラブ 30cm × 30cm × 15cm	モンテカルロ (PTB-BG)	電子輸送	電子入射角 $0 \sim 89$ 度の $H'(3, \alpha)$ が示されている。
中性子	ICRP Publication 51	1987	ICRU 球	—	—	PAR 及び ISO の 2 条件

3 mm の線量当量として表 A. 44 及び A. 45 に示している^{***}。以上に記載した光子, 電子及び中性子の $H^*(3)$ 及び $H(3, \alpha)$ の調査結果を **Table 4** にまとめる。

4. 水晶体の個人線量当量評価に使用するファントム

Table 3 及び **Table 4** からわかるように, 体幹部に装着する個人線量計のために使用されてきた標準スラブファントムが, 水晶体の個人線量当量評価に使用するファントムとして使用された。しかし, ORAMED プロジェクトでは人体頭部の後方散乱を考慮した小型スラブファントムが検討され, その後, より人体頭部を模擬した円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm) が提案され, $H_p(3)$ が計算された。IAEA の TECDOC のドラフト 1³²⁾ では従来から校正用に使われてきた標準スラブファントムの使用を $H_p(3)$ にも推奨したが, ドラフト 5³³⁾ では円筒ファントム (20 cmφ × 20 cm) についても言及した。円筒ファントムを使用しても, 入射角が 75 度を超えなければ, スラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm) を使用した場合と比べても, 有意な改善はないと評価した。そして円筒ファントムがない場合は, 入射角 75 度以内では入手の容易さと今まで広く校正施設で使われてきた

経緯からスラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm) を使用するべきであることを勧告している。このことは暗に円筒ファントムを使用すれば, 入射方向性の問題を考慮しないという点で望ましいが, 従来から $H_p(10)$ と $H_p(0.07)$ 校正用に使われてきたスラブファントム (30 cm × 30 cm × 15 cm) も入射角 75 度以内では十分に使用できるということを述べており, 入射角度の範囲は限定しているが, 使用するファントムの優劣の評価を示さない表現となっている。そしてドラフト 5 の考え方が公刊された IAEA TECDOC No. 1731³⁴⁾ にそのまま記載されている。

ICRU は $H_p(3)$ に使用するファントム形状として正円柱とスラブが考えられるが, 正円柱は入射角依存性からスラブより望ましいと考えており, 文献に基づき, 電子, 光子, 中性子についての $H_p(3)$ の校正のための reference conversion coefficients (換算係数) を提供することも検討している³⁵⁾。放射線場がよくわかっていて, $H_p(3)$ の推定も可能な条件下では, $H_p(10)$ や $H_p(0.07)$ を眼の水晶体に使用することも考えられるが, そのような方法を用いれば不確実性が大きくなると考えている³⁵⁾。

V ま と め

眼の水晶体の防護量及び実用量の値が ICRP または ICRU の文書に記載があるもの, 及び ICRP または ICRU 文書には記載が無いが学術論文等に示されているものを分類して **Table 5** に示す。今後の課題として, 中性子被

^{***} ICRP Publication 74/ICRU Report 57 の (268) 項によれば, 方向性線量当量 $H'(d, \alpha)$ は ICRU 球中で定義されるが, 10 MeV 以下の電子では線量当量値が実質的に一致するという理由で, 標準スラブファントムの深さ d (mm) の線量当量が用いられている。

Table 5 眼の水晶体の防護量, 実用量の値のICRP またはICRU 文書等への記載の有無

放射線の種類 線量 防護量		光子	電子	中性子
		○	○	○
実用量	個人線量当量 $H_p(3)$	△	○	△
	周辺線量当量 $H^*(3)$	○	○	○
	または 周辺線量当量 $H'(3,a)$			

○：眼の水晶体の防護量, 実用量の値のICRP またはICRU 文書等に記載がある。

△：眼の水晶体の防護量, 実用量の値のICRP またはICRU 文書等に記載はないが, 学術誌に記載がある。

ばくの場合, 白内障の防護が目的である水晶体の実用量として発がんとの関連性を考慮した $Q(L)$ に基づく値を使用することの妥当性についての検討が必要である。そして $H_p(3)$ の評価のためのファントムについては, 現在2種類のスラブファントムと1種類の円筒ファントムが提案されている。ファントムの選定についても実用上の観点ならびに他の実用量との整合性等から検討することが必要である。

参 考 文 献

- 1) ICRP; Statement and Recommendations of 1980 Brighton Meeting of the ICRP, *Ann. ICRP*, **14** (1), i-iii, Pergamon Press, Oxford.
- 2) ICRP; The 1990 Recommendations of the International Commission on the Radiological Protection, ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, **21** (1-3) (1991).
- 3) ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on the Radiological Protection, ICRP Publication 103, *Ann. ICRP*, **37** (2-4) (2007).
- 4) ICRP; Statement on Tissue Reactions, Approved by the Commission on April 21, 2011, ICRP ref 4825-3093-1464 (2011).
- 5) ICRP; 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) (2012).
- 6) ICRP; Data for Use in Protection against External Radiation, ICRP Publication 51, *Ann. ICRP*, **7** (2-3) (1987).
- 7) ICRP; Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, *Ann. ICRP*, **26** (3-4) (1996).
- 8) ICRU; Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRU Report 57 (1998).
- 9) ICRP; Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, *Ann. ICRP*, **40** (2-5) (2010).
- 10) ICRP; Relative Biological Effectiveness, Radiation Weighting and Quality Factor, ICRP Publication 92, *Ann. ICRP*, **33** (4) (2003).
- 11) ICRP; Recommendations of the International Commission on the Radiological Protection, ICRP Publication 26, *Ann. ICRP*, **1** (3) (1977).
- 12) ICRU; Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Report 39 (1984).
- 13) ICRU; Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 2, ICRU Report 43 (1988).
- 14) ICRU; Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47 (1992).
- 15) B. GROSSWENDT; The angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalent for photons in slab phantoms of tissue-equivalent material and PMMA, *Radiat. Prot. Dosim.*, **35**, 221-235 (1991).
- 16) IEC; Radiation protection instrumentation-passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC 62387-2012 (2012).
- 17) ISO; International Organization for Standardization, X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence, ISO 4037-3 (1993).
- 18) ISO; International Organization for Standardization, Reference neutron radiation, Part 2: Calibration fundamentals related to the basic quantities characterising simulated workplace neutron fields, ISO 12789-2 (2005).

- 19) E. TILL, M. ZANKL and G. DREXLER; Angular dependence of depth doses in a tissue slab irradiated with monoenergetic photons, GSF-bericht 27/95 (1995).
- 20) ISO; International Organization for Standardization, Individual thermoluminescence dosimeters for extremities and eyes, ISO-12974 (2000).
- 21) P. FERRARI, G. GUALDRINI, R. BEDOGNI, E. FANTUZZI, F. MONTEVENTI, and B. MORELLI; Personal dosimetry in terms of $H_p(3)$: Monte Carlo and experimental studies, *Radiat. Prot. Dosim.*, **127**, 145–148 (2007).
- 22) J. F. BRIESMEISTER, (ed.); MCNP6, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M (2000).
- 23) J. DAURES, J. GOURIOU and J. M.J. BORDY; Conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent $H_p(3)$ for eye-lens dosimetry, CEA-R-6235 (2009) CEA Saclay.
- 24) F. SALVAT, J. M. FERNÁNDEZ-VAREA and J. SEMPÁU; PENELOPE 2006: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. Int. Workshop Proceedings Barcelona, Spain, 4–7 July 2006, OECD 2006 NEA No. 6222, Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development (2006).
- 25) G. GUALDRINI, F. MARIOTTI, S. WACH, P. BILSKI, M. DENOZIERE, J. DAURES, J. M. BORDY, P. FERRARI, F. MONTEVENTI and E. FANTUZZI; Eye lens dosimetry: Task 2 within the ORAMED project, *Radiat. Prot. Dosim.*, **127**, 145–148 (2007).
- 26) G. GUALDRINI, J. M. BORDY, J. DAURES, E. FANTUZZI, P. FERRARI, F. MARIOTTI and F. VANHAVERE; Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for photons from 10 keV to 10 MeV, calculated in a cylindrical phantom, *Radiat. Prot. Dosim.*, **144**, 473–477 (2011).
- 27) X-5 Monte Carlo Team; MCNP-a general Monte Carlo N-particle transport code. Version 5, April 24 (2003) (revised 10/3/2005) LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory.
- 28) G. GUALDRINI, P. FERRARI and R. TANNER; Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutron from thermal to 15 MeV, *Radiat. Prot. Dosim.*, 1–13 (2013), Advance Access published June 3, 2013.
- 29) D. B. PELOWITZ, (ed); MCNPX User's Manual, version 2.5.0. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369. LANL (2005).
- 30) P. FERRARI, G. GUALDRINI, R. TANNER and E. FANTUZZI; $H_p(3)/\phi$ Conversion coefficients for neutrons: Discussion on the basis of the new ICRP recommend limit for the eye lens, *Radia. Prot. Dosim.*, first published online 14, October 2013 doi:10.1093/rpd/nct246.
- 31) ICRP; Statement from the 1985 Paris Meeting of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 45, *Ann. ICRP*, **15** (3) (1985).
- 32) IAEA; Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye Interim guidance for use and comment: IAEA Technical documentation Draft 1-March 2013 (2013).
- 33) IAEA; Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye Interim guidance for use and comment: IAEA Technical documentation Draft 5-June 2013 (2013).
- 34) IAEA; Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, TECDOC No. 1731 (2014)
- 35) H. TATSUZAKI; private communication (2013).
- 36) R. P. MANGER, M. B. BELLAMY and K. F. ECKERMAN; Dose conversion coefficients for neutron exposure to the lens of the human eye, *Radiat. Prot. Dosim.*, **148** (2), 507–513 (2012)
- 37) R. BEHRENS and G. DIETZE; Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens, *Phys. Med. Biol.*, **56**, 415–437 (2011).
- 38) P. NOGUEIRA, M. ZANKL, H. SCHLÄTTL, et al.; Dose conversion coefficients for monoenergetic electrons incident on a realistic human eye model with different lens cell populations, *Phys. Med. Biol.*, **56** (21), 6919–6934 (2011).
- 39) D. B. E. PELOWITZ; 2008. MCNPX User's Manual, Version 2.6.0. LA-CP-07-1473 (2008).
- 40) M. OTAKE and W. J. SCHULL; Radiation-Related Posterior Lenticular Opacities in Hiroshima and Nagasaki Atomic Bomb Survivors Based on the DS86 Dosimetry System, *Radiat. Res.*, **121** (1), 3–13 (1990).

**立崎 英夫**（たつざき ひでお）

1983年筑波大学医学専門学群卒。同大学院博士課程医学研究科修了。その後、マサチューセッツ総合病院、筑波大学、IAEAに放射線腫瘍学を専門として勤務。2002年より（独）放射線医学総合研究所国際室、同研究所被ばく医療部障害診断室を経て、現在同研究所 REMAT（緊急被ばく医療支援チーム）医療室室長。国際協力、研修企画を含め、被ばく医療業務全般に従事。2007年より ICRU 主委員会委員。

E-mail: tatsuza@nirs.go.jp

**岩井 敏**（いわい さとし）

三菱原子力、三菱重工、三菱総研等を経て原子力安全推進協会（JANSI）に勤務。経験業務はPWR放管実務、ISS搭載中性子測定器、宇宙飛行士放射線管理システム、もんじゅ遮蔽設計など。最近興味のあるテーマ：線量概念と健康リスク

E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

解 説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V) —わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状—

赤羽 恵一*1, 飯本 武志*2, 伊知地 猛*3, 岩井 敏*4, 大口 裕之*5, 大野 和子*6,
川浦 稚代*7, 立崎 英夫*1, 辻村 憲雄*8, 浜田 信行*3, 藤通 有希*3, 堀田 豊*9,
山崎 直*10, 横山 須美*11

(2014年7月8日受理)

(2014年12月23日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (V) —Current Occupational Radiation Exposure of the Lens of the Eye in Japan.—

Keiichi AKAHANE,*1 Takeshi IMOTO,*2 Takeshi ICHIJ,*3 Satoshi IWAI,*4 Hiroyuki OHGUCHI,*5 Kazuko OHNO,*6
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*7 Hideo TATSUZAKI,*8 Norio TSUJIMURA,*8 Nobuyuki HAMADA,*3 Yuki FUJIMICHI,*3
Yutaka HOTTA,*9 Tadashi YAMASAKI*10 and Sumi YOKOYAMA*11

For many Japanese radiation workers in the medical, nuclear and other industrial fields, the equivalent dose of the lens of the eye will be sufficiently lower than the new ICRP dose limit. However, the dose of the lens of the eye for medical staff members who are engaged in interventional radiology and cardiology may exceed the new ICRP dose limit, especially when they are exposed closely to higher scatter radiation for a long time. In addition, the radiation dosimetry and radiation protection for emergency and recovery workers in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FNPP1) are important issues. Thus gathering information related to the radiation dose and protection for Japanese radiation workers is important to a discussion regarding implementation of the new ICRP dose limit for the lens of the eye for Japanese regulations and planning radiation dose reduction measures. In this paper, recent studies and issues regarding radiation exposure and protection in the medical, nuclear and other industrial fields, as well as for emergency and recovery workers in the FNPP1 were summarized.

KEY WORDS: radiation exposure, radiation protection, the lens of the eye, medical staff members, nuclear facilities workers, industrial field, interventional radiology and cardiology, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, emergency and recovery workers.

I はじめに

放射線を取り扱う業務に携わる作業員としては、大きく三つに分けることができる。まず、その一つとして、X線診断、核医学、放射線治療等に携わる医療業務従事者が挙げられる。胸部X線検査やCT検査等に携わる従事者の多くは、他の分野の作業員と同様に国際放射線防護委員会 (ICRP) の新しい線量限度 (5年間の平均が20 mSv/年、単一年度の線量が50 mSvを超えない。) をわが国の法令に導入したとしても線量限度を大幅に下回ると考えられる。しかし、一部の医療従事者、たとえば線源の近くで長時間診断や治療に携わるもしくは1日に複数件の診断・治療に携わるインターベンショナルラジ

オロジー (IVR) の術者、核医学検査に携わる従事者、密封小線源治療の術者等については、水晶体の線量が高くなる可能性がある。したがって、これらの作業員に対して精度よく水晶体の被ばく線量を推定しておくことは今後重要となってくる。また、水晶体の被ばくを低減するためには、施設設計や立ち位置、十分な放射線防護教育もさることながら、防護板、防護メガネ等を使用する必要があるかもしれない。これらの防護具の着用によりどれだけ被ばく低減できるのかについても把握しておく必要がある。

次に、原子力発電所や再処理施設等の原子力施設作業員であるが、これらの作業員のうち、特にグローブボックス等で核燃料を取り扱う作業員については、遮へいが

しっかりとなされているものの、ゴム手袋等を装着した部分の遮へい能力は低くなり不均等被ばくをすることとなるので注意が必要であると考えられる。

原子力施設作業者を除いた産業分野において、放射線業務従事者の数、線量とも多いのは、上記に示した医療従事者であると考えられるが、その他に、非破壊検査、教育や研究のための放射性同位元素の使用、一般工業、獣医師といったさまざまな職種の作業者が放射線を取り扱っている。

さらに、わが国において、重要な課題の一つとして、2011年に起こった東京電力(株)(以下「東電」という。)福島第一原子力発電所事故の初期段階の緊急時被ばく状況下において復旧作業に当たった作業員、そして、今後除染や廃炉といった作業に携わる作業員もあり、その被ばく管理が大変重要となる。

本稿では、上記3分野における各職種の特徴、水晶体の被ばく及びその防護の現状について、過去の研究や報告等をもとにとりまとめた。

II 医療分野

1. インターベンショナルラジオロジー (IVR)

X線透視下で体内にカテーテル(細い管や針等)を入れて血管や胆管を拡張したり、血液の異常な流れを止めたりする治療を行うIVRは、長時間のX線透視や撮影を行う場合には、線量が高くなり、患者に放射線による皮膚障害が発生するおそれがある。IVRによる患者の皮膚障害については、1994年に米国食品医薬品局から

公表され¹⁾、わが国においても学会等から警告が発せられた²⁾。また、ICRPが2000年にICRP Publication 85を発表し、患者だけでなく、IVR術者の皮膚及び水晶体への放射線影響についても報告されたが、それ以降もIVRによる患者の皮膚障害が散見した。このため、2001年に国内のIVR関連学会により「IVR等に伴う患者の放射線皮膚障害とその防護対策検討会」が組織され、ガイドラインが作成された³⁾。このガイドラインでは、患者の皮膚線量の管理目標値等が設定された。

富樫は1995年～1999年に起きたわが国の皮膚障害事例をIVRに伴う患者を中心に集約しているが、水晶体の放射線影響に関する事例は示されていない。ただし、水晶体混濁のしきい線量は皮膚障害よりも低く、状況によっては注意が必要であるとしている⁴⁾。

2004年から2005年には、循環器診療における放射線被ばくに関するガイドラインが策定された⁵⁾(2011年に改訂⁶⁾)。このガイドラインの中では、米国やチェルノブイリ事故の作業員に対する水晶体の放射線障害に関する事例が示されているが、わが国の患者及び医療従事者の水晶体の被ばく及び放射線障害に関する記述はない。しかし、この中でも患者への照射に関して、冠動脈形成術を行う際には線量分布を考慮し、水晶体等の感受性の比較的高い臓器に対する線量を制御して全体のリスクを低減すること、医療従事者は適切な部位へ線量計を着用し、線量低減策として遮へい板、防護衣、ネックガード、防護メガネ等を利用することが推奨されている。

わが国の医療従事者の水晶体の線量に関する報告と

*1 (独)放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1 (〒263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.
E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷7-3-1 (〒113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.
E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財)電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北2-11-1 (〒201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.
E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*4 (一社)原子力安全推進協会; 東京都港区芝5-36-7 (〒108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.
E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 千代田テクノ(株); 東京都文京区湯島1-7-12 (〒113-8681)
Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北1-3 (〒622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市東区大幸南1-1-20 (〒461-8637)
Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (独)日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松4-33 (〒319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*9 日本原燃(株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字沖付4-108 (〒039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnfl.co.jp

*10 中部電力(株); 静岡県御前崎市佐倉5561 (〒437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*11 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市杏掛町田楽ヶ窪1-98 (〒470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyooka-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

しては、山岸らがIVRを実施している4施設に対して、医療従事者（術者）の被ばく線量を3か月間にわたり熱ルミネッセンス線量計（TLD）を用いて測定し、いくつかの手技（リザーバー設置術（血管内にカテーテルを留置し目的箇所薬剤を注入するための装置を皮下に埋め込む手術）；14症例、頭部塞栓術；12症例、経皮的冠動脈形成術（PTCA）；11症例）に分類・比較した報告がある⁷⁾。この研究では、医療従事者の眉間、プロテクタ内側、プロテクタ外側左胸、左第3指（リングバッジ）に線量計を装着して、線量を測定した。その結果、リザーバー設置術における実効線量は0.07 mSv（最大0.25 mSv）、手指の皮膚の等価線量（左第3指位置の70 μ m線量当量）は0.3 mSv（最大0.7 mSv）、水晶体の等価線量（眉間位置の70 μ m線量当量）は0.1 mSv（最大0.4 mSv）であったとしている。頭部塞栓術における実効線量は0.08 mSv（最大0.39 mSv）、手指0.2 mSv（最大1.0 mSv）、水晶体の線量は0.2 mSv（最大1.3 mSv）、PTCAにおける実効線量は0.2 mSv（最大2.7 mSv）、手指の皮膚の線量は0.7 mSv（最大12.0 mSv）、水晶体の線量は0.3 mSv（最大2.1 mSv）であった。

また、石口らは5施設において、39症例の肝細胞がんの治療のために実施された肝動脈塞栓術時の患者及び術者の被ばく線量について報告している⁸⁾。患者及び術者の線量モニタリングの結果、患者の背中皮膚の平均等価線量及び標準偏差は973 \pm 681 mSv（範囲：185–3,543 mGy）、術者の頭部（眉間）の皮膚の等価線量は0.04 \pm 0.04 mSv、腹部（防護エプロン外部）線量は0.15 \pm 0.19 mSvであった。

盛武らは、頭頸部領域のIVRによる患者及び術者の被ばくの実態調査やIVR用頭頸部被ばく線量計や線量評価システムの研究開発を行っている⁹⁻¹¹⁾。実態調査では、患者及び術者の頭部に50個以上の線量計（蛍光ガラス線量計）を装着して線量を測定した。32人の患者（平均年齢61.5歳）のX線入射側の入射皮膚線量（ESD）を測定したところ、頭部右側でもっとも高く、平均線量及び標準偏差は1,124 \pm 1,349 mGy（最大5,373 mGy）、左眼及び右眼の線量はそれぞれ79 \pm 173 mGy及び380 \pm 593 mGyであったと報告している⁹⁾。また、医療従事者のEDSは、X線管球側の左眼、照射内に入る左指及び右指が高く、それぞれ0.254 \pm 0.338 mGy、0.208 \pm 0.341 mGy及び0.110 \pm 0.156 mGyであった。

2011年に開催された第25回全国循環器撮影研究会においては、今関らが「脳IVRにおける被ばく線量の実態調査」と題して、2010年の1年間に脳IVRを実施し

ている施設において、施設概要、スタッフ構成、被ばく管理、手技時間、透視時間等のアンケートを行った結果を発表している¹²⁾。回答を得た29施設、1,028例について、局所線溶療法、頸動脈血管拡張術（CAS）及び動注化学療法の平均治療時間は約2時間であり、このうち透視時間は40分以下であった。脳動脈瘤塞栓術、脳動脈奇形（AVM）塞栓術、硬膜動静脈瘻（AVF）塞栓術及び内頸動脈海綿静脈洞瘻（CCF）塞栓術では、平均治療時間は約3時間、透視時間は80分以上であったと報告している。中には、治療時間が14時間、透視時間が約10時間となる症例も報告されている。患者の水晶体の防護には、全体の65%の施設がコリメータや鉛遮へい板を使用し、水晶体を利用線錐から外す等の低減策をとっていた。患者の防護をしない施設の理由としては、病変部と重なる、医師からの要望がない等が挙げられている。この他にも、患者の線量に関する報告があるが、水晶体の線量に関するまとまった論文、特に術者に対する報告は少ない。

CT透視下での術者の被ばく線量について、高塚らが臨床を模擬した実験によりハンドル部分を含鉛アクリルで覆ったデバイスの使用・未使用時の術者の指、水晶体、皮膚の線量を明らかにしている¹³⁾。実験では、術者が腹部バイオプシトレーニングファントムに穿刺を開始し、生検針が模擬的な腫瘍にあたるまでの組織吸収線量を各部位に装着したガラス線量計により測定した。この結果、手指では、デバイス未使用時には300から800 μ Gyであった線量がデバイス使用時には、100 μ Gy以下に低減できるとしている。実効線量及び水晶体の等価線量については、デバイス未使用時にはそれぞれ0.007 mSv及び0.02 mSv、デバイス使用時には0.008 mSv及び0.025 mSvであり、デバイスの有無は関係なく、CT透視下での術者の実効線量及び水晶体の等価線量は低かったとしている。一方、深谷らも術者立ち位置にファントムを設置して、CT透視下での経皮肺生検を模擬した実験を実施している¹⁴⁾。管電圧140 kV、透視時間600秒間（うち、撮影3回）の条件下で、術者（ファントム）の眼、頸部及び手指の吸収線量をTLDで測定した結果、防護具なしの場合、透視時間100秒当たりの水晶体の吸収線量は29.2 mGy、頸部は31.6 mGy、手指は351.4 mGyであった。一方、フェイスガードの着用により、水晶体の吸収線量が5.1 mGyまで低下することが確認された。富田らはOSL（光刺激ルミネッセンス）線量計を用い、通常の胸部撮影を想定し、3回スキャンを行った場合のCT室内における線量（1 cm線量当量）を50 cm、100 cm及び

150 cm の高さで測定した¹⁵⁾。その結果、ガントリ近傍の150 cm の高さ（頭部高さ）で1.5 mSvであり、最大線量を示したとしている。

2. 核医学治療・検査

放射性医薬品を利用した治療として、バセドウ病及び甲状腺がんの治療に対しては¹³¹I、前立腺がん、乳がんなどの骨転移患者の疼痛緩和治療としては⁸⁹Sr、非ホジキンリンパ腫の放射免疫療法としては⁹⁰Y等が用いられている。放射性医薬品を投与された患者の退出に関する指針では、これらの核種を使用する病院内の診療放射性同位元素室または放射線治療室からの患者の退出基準として、公衆の実効線量は1 mSv、介護者は1件当たり5 mSvになるようにすることが定められている^{16,17)}。

医療従事者の被ばく線量については、患者への¹³¹Iの投与量を3,700 MBqとし、投与、準備ともに作業時間を各5分、線源からの距離を50 cmとして計算した場合、実効線量は各0.8 mSvとなるとしている¹⁸⁾。また、皮膚の等価線量は、作業時間1分、線源からの距離を20 cmとすると0.1 mSvと低く、内部被ばくについても作業時間を10分とした場合、 1.83×10^{-3} mSvと外部被ばくに比べて非常に小さいと報告している。水晶体の等価線量や防護に関する記述はない。

核医学診断・検査としては、単一光子放射線断層撮影（SPECT）及び陽電子放出断層撮影（PET）検査がある。薬剤として使用される放射性核種としては、SPECTでは⁶⁷Ga、^{99m}Tc、¹¹¹In、¹²³I、¹³¹I、²⁰¹Tl等であり、PET検査では、¹⁸Fがもっとも多く使用されており、他に¹⁵O、¹³N、¹¹Cが使用される。これらの放射性核種を患者の体内に投与すると、単一光子または511 keVの消滅光子が体外へ放出される。このような検査での患者の全身被ばく線量は、検査内容によって異なるが0.5–15 mSv程度とされている¹⁹⁾。

医療従事者の被ばくとしては、金谷らが心臓検査に携わる医療従事者の被ばく線量を推定している²⁰⁾。脳SPECT担当放射線技師の月平均実効線量は0.12 mSv、肺血流検査（^{99m}Tc：185 MBq）で $0.21 \pm 0.17 \mu\text{Sv}$ 、骨シンチ（^{99m}Tc：740 MBq）で $0.28 \pm 0.33 \mu\text{Sv}$ 、脳血流検査（^{99m}Tc：740 MBq）で $2.84 \pm 1.48 \mu\text{Sv}$ 、腫瘍検査（⁶⁷Ga：74 MBq）で $0.18 \pm 0.13 \mu\text{Sv}$ 、甲状腺腫瘍（¹³¹I：370 MBq）で $0.56 \pm 0.50 \mu\text{Sv}$ 、心筋（²⁰¹Tl：110–140 MBq）で $0.13 \pm 0.10 \mu\text{Sv}$ 、心筋（^{99m}Tc：296–740 MBq）で $0.47 \pm 0.27 \mu\text{Sv}$ であった。一方、静注時の医師の実効線量は、^{99m}Tc製剤を185 MBq投与した場合は $0.10 \pm 0.05 \mu\text{Sv}$ 、740 MBqの場

合は $0.33 \pm 0.13 \mu\text{Sv}$ 、⁶⁷Ga製剤を100 MBq投与した場合は $0.30 \pm 0.11 \mu\text{Sv}$ であるとした。また、プロテクタ装着により50–70%遮へい可能であると述べている。この中でも水晶体の被ばく線量に関する記述はない。しかし、術者の実効線量から考えると、年間の水晶体の等価線量も数 μSv と十分低い値と考えられる。

PET検査については、¹⁸F-FDG投与量は患者の体格等によって異なるが、成人患者へ¹⁸Fを185 MBq投与した場合の患者の実効線量は、ICRPの線量換算係数や体内移行モデルをもとに計算されており3.5 mSv程度である²¹⁾。FDG-PETがん検診ガイドライン（2004年）では、⁶⁸Ge–⁶⁸Ga線源に対する通常トランスミッションスキャンでの患者の実効線量は0.25 mSv、PET-CTにおける吸収補正用X線CT撮像では1.4–3.5 mSv、画像重ね合わせ用高質CT（広範囲撮影）では10 mSvとなる可能性もあるとしている²²⁾。

わが国のPET検査の手順書及び行動基準としては、海外の事例を参考に1年間につき5 mSv程度をPET検査に携わる医療従事者の被ばく目標値とすることが望ましいとしている²³⁾。線量低減策としては、①PET製剤投与後の患者に必要以上に近づかない。②患者との接触時間を減らす。（検査内容、手順、検査室の位置、待機室からの移動方法等を事前に説明。）③FDG製剤の移動は、十分な遮へい能力を有する容器を使用。④FDG薬剤操作は手際よく行う等を挙げている。特に分注時に被ばく線量が高まる可能性があることから、自動分注装置を取り入れることが望ましいとしている。また、患者への¹⁸F-FDG投与時や撮影時には、勤務体制や遮へい、時間の短縮を図ることで十分に被ばく低減が可能であるとしている。これは水晶体の被ばく低減にも有効であると考えられる。

PET検査においては、薬剤以外にも装置に装填されている外部線源（400–500 MBq）からの被ばくも注意する必要があるとしている²¹⁾。線源使用時の実効線量はガントリ前面において40–50 $\mu\text{Sv/h}$ 、背面：80–100 $\mu\text{Sv/h}$ 、線源格納時の漏えい線量：5–10 $\mu\text{Sv/h}$ である。PET装置の操作場所の線量として計算により算出した結果が示されているが、これによると、患者への投与量が185 MBq/人で投与50分後に40分の検査を実施とした場合（線源から評価点は1 m、遮へい体なし）、患者一人当たりの医療従事者の実効線量は11.1 μSv となるとされている。さらに、1日8人、週5日検査を行った場合の年間線量としては22.2 mSvとなり、年実効線量を超える。この場合、水晶体についてもICRPの新しい線量限度を

超える可能性があるため、被ばく低減のための防護が必要となるかもしれない。

日本アイソトープ協会の医学・薬学部会ポジトロン核医学利用専門委員会では、PETに携わる作業員の被ばく線量について、2007年1月から12月までアンケート調査を実施している²⁴⁾。回答のあった90施設のRI製造、薬剤合成、品質管理、分注（自動）の全工程に携わる作業員の被ばく線量（実効線量）を算出した結果、1か月あたり平均160 μ Sv（最大511 μ Sv/月）となった。これら作業のうち、もっとも線量が高いのはRI製造であり、60–90 μ Sv/月であった。分注作業においては、手動の場合、自動分注に比べて60–100 μ Sv/月の線量が増加する可能性があるとして述べている。職種、業務と被ばく線量の関係としては、投与・説明をする医師は25–40 μ Sv/月、患者誘導やPET操作に携わる放射線技師は110 μ Sv/月、薬剤合成、装置管理、品質検査、分注等に携わる薬剤師は25 μ Sv/月、サイクロトロンオペレータは100 μ Sv/月、合成技術者は35 μ Sv/月、患者誘導に携わる看護師は100 μ Sv/月となり、放射線技師、サイクロトロンオペレータ、看護師の線量が高くなる可能性があるとして報告されている。この中でも水晶体の等価線量についての記述はないが、上述の線量から放射線技師等の年間の実効線量を推定すると、1 mSv程度であり、新しいICRPの水晶体の等価線量限度を大きく下回る。

その他、江尻らは²⁰¹Tlや¹²³I等の放射性医薬品を投与した患者周辺の実効線量の測定を実施している^{25–27)}。²⁰¹Tlを投与した患者から0.5 m離れた胸部高さで測定した場合、3.5 μ Sv/hであった。また、加藤らは、核医学検査では陽電子による水晶体の等価線量は低いとされているが、モンテカルロシミュレーションコードにより、ICRUスラブファントムや眼球モデルを用いた水晶体の等価線量（3 mm線量当量）等の算定を実施している^{28, 29)}。この計算では、患者投与チューブ内の近傍（数cm）においては¹⁸F-FDG製剤から陽電子によって被ばくするおそれがあるが、50 cm離れば消滅光子の影響のみを考慮すればよいとしている。

3. 密封小線源治療

シード線源による前立腺永久挿入密封小線源治療の安全管理に関するガイドライン第5版では、術者の実効線量として安全側を見込み、線源1個当たり13.1 MBqの¹²⁵Iシード線源100個（通常は多くても80個程度）を60分間で挿入した場合、プレローディングをする医師の場合は0.0229 mSv、挿入時の医師の場合は0.0033 mSv、

看護師の場合は0.0015 mSvになるとしている³⁰⁾。この際の皮膚の等価線量は、それぞれ0.203 mSv、0.041 mSv及び0.007 mSvである。上記のプレローディングや挿入を行う医師の皮膚等価線量は、年間100件程度の手術を実施した場合、20 mSvを超える。一方、実効線量はこれよりも十分に低い。線源が¹²⁵I（光子の平均エネルギー：28.4 keV）であること、水晶体が指先よりも胸部に近いこと、空気カーマから水晶体の等価線量への換算係数が皮膚の換算係数より小さいと考えられること等を考慮すれば水晶体の等価線量は、実効線量に近いと考えられる。

4. ま と め

医療分野において、放射線による水晶体のリスクが高まる可能性のあるIVR、核医学検査、密封小線源治療のような診断・治療に着目し、これまでの知見を取りまとめた。

わが国においても2000年ごろから医療分野における水晶体の被ばくに関して調査がなされ、特に患者に対して適切な線量を付与することが心がけられてきた。これにともない医療従事者の線量低減も試みられている。

わが国においても多くの医療従事者はICRPの新しい水晶体の等価線量限度を上回るおそれはないと考えられる。しかし、防護具未使用の場合や線源との接触時間の長期化や件数の増加にともない、IVRや核医学検査に携わる医療従事者については注意が必要である。水晶体の等価線量は、照射時間や立ち位置への配慮、防護メガネ等の比較的簡易的な防護具の使用等により、効果的に低減できる。これまでも多くの実験や研究が実施されているが、論文として利用できるまとまったデータが少ない。今後、わが国における水晶体被ばくの現状や防護に関する実態を把握するためには、これらに関連したデータの蓄積が必要不可欠である。

III 原子力分野

1. 原子力施設全般

(1) 原子炉施設

原子炉施設における作業員の外部被ばくは、炉心及び一次冷却系等に含まれる放射化生成物からの放射線と放射性廃棄物からの放射線による。運転中の主たる線源は、一次冷却材中に存在する放射化生成物である¹⁶N等であり、沸騰水型原子力発電所のタービン発電機周りではその影響によって高線量率の場が形成される。ただし、これらの核種は概して半減期が短いため、原子炉停止後ごく短時間で減衰消滅する。これに対して、一次冷却材中

に同様に存在し、かつ比較的半減期の長い ^{60}Co 、 ^{58}Co や ^{54}Mn 等の放射化生成物は、系統配管等の内面に付着するため、原子炉運転停止期間中の定期点検時における外部被ばくの主たる線源となる。作業環境中における γ 線の平均エネルギーは運転中も含め $0.6 \sim 1.3 \text{ MeV}^{31)}$ であるとされる。

作業者の個人被ばく管理には、かつてはフィルムバッジ等が使用されていたが、近年は電子式個人線量計が主に使用される。電子式個人線量計には、 γ 線用、 β 線・ γ 線、 γ 線+ β 線+中性子用などいくつかの機種があり、放射線場の状況によって使い分けがなされる。ただし、このうち β 線と中性子による被ばくが有意な値として記録されることは稀である。放射線の身体への入射方向は、定期検査期間中に作業者の身体表面のさまざまな向きにいくつかの個人線量計を装着して調べた結果³²⁾によれば、ほぼ等方的な被ばく（前方からの寄与がやや大きい）である。また、一部の特殊な作業（ダイバーによる潜水作業：底部に堆積した放射性クラッドから放射線被ばくを受ける）において、不均等被ばく管理を行った事例³³⁾が報告されているが、これは胸部に比べて腹部や足の線量が高いケースであった。原子力発電所においては、眼の水晶体を含む頭部が胸部に比べてとりわけ高い被ばくを受けると想定される作業はほとんどなく、水晶体の等価線量は、胸部に装着した個人線量計の1 cm線量当量指示値から算出した実効線量と等価であるとして現在評価される。

(2) 核燃料の成型・加工施設

核燃料の成型・加工施設においては、燃料そのものが外部被ばくの線源であり、その製造から燃料体の成型加工までの機器はセルやグローブボックス等の封じ込め設備内に据え付けられる。軽水炉ウラン燃料では、ウラン同位体及びその壊変生成物から放出される γ 線と β 線が外部被ばくの要因である。前者 γ 線の線量率は一般に低く、むしろ後者 β 線（主に $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ）による被ばくに留意する必要があるが、ペレット検査等でウランを直接扱う工程等における手などの局所的な被ばくに留まる。一方、プルトニウムを取り扱う施設（MOX燃料を製造する施設や使用済み燃料再処理施設のうち混合転換工程）では、主に ^{241}Pu から生じる ^{241}Am の γ 線（60 keV）と、Pu同位体の自発核分裂及びPu等からの α 線と酸素の核反応によって生じる中性子が外部被ばくの線源となる。グローブボックス等封じ込め設備は、その構造自身が60 keV γ 線に対して有効な遮へいとして機能するが、設備内機器の保守作業等においてグローブボックス内に手

を差し込む必要があるため前腕から手にかけての末端部が、さらに手を差し込むその開口部から漏洩する γ 線によって体幹部の一部が、 γ 線の被ばくを受ける。特に被ばく低減対策の一環として鉛エプロンを作業者が着用する場合は、エプロン内外の線量率に顕著な差が生じ体幹部不均等被ばくとなるため、エプロンの内側と外側にそれぞれ個人線量計を装着する。このとき、水晶体の等価線量はエプロン外側（襟付近）につけた個人線量計から評価される。このような管理は、現在、日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）のMOX燃料施設や日本原燃（株）六ヶ所再処理工場のうちプルトニウムを取り扱う一部の工程等で行われている^{34,35)}。

(3) 使用済み燃料再処理工場

使用済み燃料再処理工場では、原子力発電所から受け入れた使用済み燃料集合体をプール水中で一時的に貯蔵した後、それを剪断・溶解し、溶媒抽出法によってウランとプルトニウムを分離精製する。線源となる主な核種は、使用済み燃料貯蔵プールでは ^{60}Co 、それ以降の工程では ^{137}Cs 等の核分裂生成物である。これら工程機器の多くは、コンクリートで覆われたセル内に設置され、遠隔操作によって運転が行われる。作業による外部被ばくのはほとんどは、定期点検等で工程機器の保守作業に従事する際に、特に補修・改修等の大型工事の際に生じる。こうしたセル内作業時における γ 線の身体への入射方向は、作業者の身体の各部（胸部、背部、手及び足首）に個人線量計を取り付けて調べた結果^{36,37)}によれば、各部位の線量計の指示値間に大きな差は見当たらず、ほぼ均等な被ばくである。したがって、通常は、胸部に付けた個人線量計の指示値をもって末端部を除く各部位の等価線量を代表させる。また、線源となる機器類と作業者の相対的な位置関係によっては、こうしたセル内作業においても体幹部が γ 線被ばくを不均等に受ける場合が少数ながらあり、その事例の報告³⁸⁾がある。この事例（設備の改造工事の際に作業者がセル内に上半身だけを入れることによって頭頸部が線源に近接した状態で作業が行われた）では、胸部に加えて顔にも個人線量計が装着された。また、セル内作業においては、 ^{90}Sr 等による β 線被ばくも生じる場合があるが、顔全体をカバーする呼吸保護具（全面マスク）によって顔面（水晶体）は防護されること、むしろ線源に近接する手の指がより高い被ばくを受けるケースが多いことからまっぱら手指のモニタリングが行われる。

原子力施設においては、グローブボックス等の一部の作業を除き、水晶体を含む頭部が胸部に比べてとりわ

け高い被ばくを受けると想定される作業はあまりない。また、 β 線被ばくが生じる作業場所は限られる。このため、水晶体の等価線量は、胸部等に装着した個人線量計の1 cm線量当量指示値から算出した実効線量と等価であるとして現在評価される。

2. 原子力機構核燃料サイクル工学研究所での事例³⁹⁻⁴²⁾

原子力機構核燃料サイクル工学研究所のプルトニウム燃料施設(MOX燃料製造施設及び再処理施設転換工程)のグローブボックス作業では、被ばく低減対策の一環として、作業者は鉛エプロンを着用する。このとき、作業者は、鉛エプロンの内側胸部と外側頸部(管理区域内作業着の襟)のそれぞれに1個ずつの個人線量計をセットで、さらに末端(手)部に1個の個人線量計を装着する。胸部の個人線量計は $\gamma \cdot \beta$ 中性子用TLDバッジ、頸部の個人線量計は $\gamma \cdot \beta$ 線用TLDバッジであり胸部のその約半分のサイズである。水晶体の等価線量は、頸部TLDバッジから算出した γ 線1 cm線量当量と胸部TLDバッジから算出した中性子1 cm線量当量の和と等価であるとして評価、記録される。頸部TLDバッジは β 線による線量当量(70 μ m及び3 mm線量当量)を算出する機能も有するがMOX燃料施設で有意な β 線が検出された例はない。頸部TLDバッジの配布は、頸部と胸部の線量当量の比が3倍以上(水晶体の等価線量限度と実効線量限度の比に相当する)であることが条件である。ただし、実際のところは、グローブボックス作業の従事度(全作業時間に対するグローブボックスへの張り付き時間または鉛エプロンの着用時間の割合)や実際の頸部/胸部比に関係なく、頸部TLDバッジの発行申請がなされることが多い。また、モニタリング期間の途中で頸部TLDバッジを新たに必要とする場合は、それまで発行していた胸部TLDバッジを回収し、新たな胸部TLDと頸部TLDをセットで再配布する。これまでの被ばく記録によれば、水晶体の等価線量は高い者でも10 mSv/年のオーダー(最大は2008年度の18.9 mSv)であり、20 mSvを超えた例はない。鉛エプロン内外の γ 線1 cm線量当量の比は全体で約2.5(比較的高線量域で約4)、水晶体の等価線量のうち中性子による線量寄与は約2割である。

水晶体の線量限度が今後引き下げられたとしても、水晶体のモニタリングに係る現行の方法論に大きな変更はないものと考えられる。ただし、水晶体の線量が限度

(20 mSv/年)に近づくことになるので、工程設備側で必要な遮へい対策等を進めるとともに、頸部個人線量計の着用位置の最適化や個人防護具を併用する場合の線量評価法について今後検討する必要がある。

IV 産業分野(原子力分野の従事者を除く)

わが国の原子力発電所などにおける放射線業務従事者を除いた放射線業務従事者に関する年間(各年度)の個人線量を集計した資料が、モニタリングサービス会社の機関紙及び個人線量測定機関協議会のホームページ等に掲載されている^{43,44)}。眼の水晶体に関する被ばく線量の集計結果が、最近1社の機関紙に掲載された⁴³⁾。ここでは、年実効線量の被ばく集計との関係性も含めて、この機関紙からの情報を基に記載する。

1. 被ばくの集計方法

被ばく線量の集計方法は、2012年4月1日から2013年3月31日までの間に1回以上個人線量計を使用した人の年実効線量及び年等価線量を対象とし、約26万人の放射線業務従事者等を基に統計データを作成している。ここで、年実効線量とは、一個人が4月1日から翌年3月31日までに受けた実効線量の合計を意味し、年等価線量は、一個人が4月1日から翌年3月31日までに受けた等価線量の合計を意味している。統計データの業種区分は、医療、研究教育、非破壊検査、一般工業及び獣医療の5種類に分けて集計を行っている。

2. 職種別実効線量及び水晶体の等価線量

Fig. 1は、2012年度の職種別平均実効線量を表している。ここでXは、検出限界未満を表している。職種別年平均実効線量では、医療と非破壊検査が、他の職種に比べて15倍程度高い。しかし、医療分野の各線量区分の内訳では、医療分野全体の75%が検出限界未満であり、従事者全員が他の職種と比べて高い線量で被ばくしているわけではない。また、年実効線量で50 mSvを超過した従事者の数は、2012年では、どの職種も0人であった。20 mSv~50 mSvの従事者は一般工業関係者で3人、獣医療関係者で0人となっている。

Fig. 2は、2008年度から2012年度までの過去5年間の眼の水晶体に対する職種別平均等価線量を表している。一般工業、研究教育、獣医療関係者に関しては、過去5年間でほとんど変化していない。一方、医療関係者に関しては、年度毎に増加傾向が見られ、2011年度以降、顕著な増加傾向が見られなくなった。

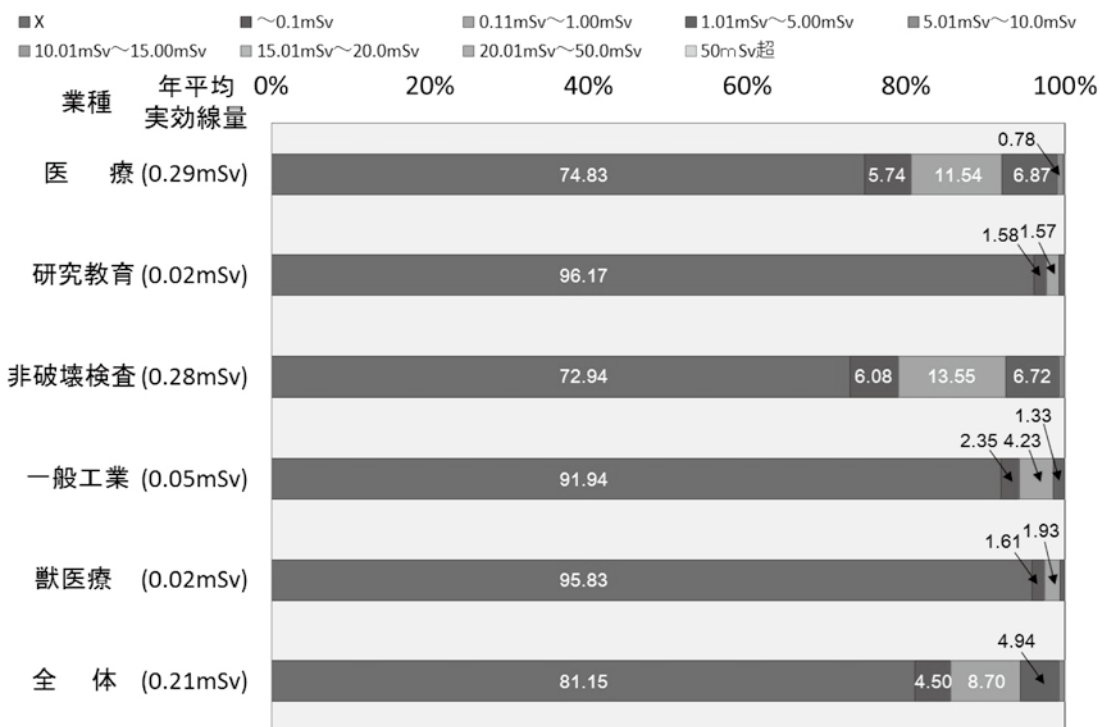


Fig. 1 2012年度の業種別平均実効線量

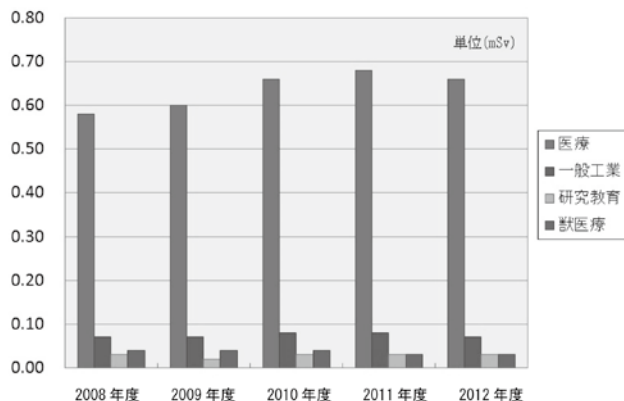


Fig. 2 過去5年間の水晶体の平均等価線量 (業種別)

Fig. 3 は、2008年度から2012年度の過去5年間の医療関係者に関して、眼の水晶体の平均等価線量の推移を示している。医療機関別に見ると、一般病院での被ばくがもっとも多く、次いで大学病院、診療所・その他、歯科、保健所の順となっている。5年間の被ばく線量の傾向は、Fig. 2と同様に一般病院、大学病院、診療所・その他と続き、2011年度を境に減少傾向を示している。この減少原因としては、2011年のICRP声明を受けて、放射線技術学会等でIVR術者に対して防護メガネ着用の啓蒙が行なわれたことが影響していると思われる。

Fig. 4 は、2008年度から2012年度の過去5年間の医

療関係職種別の眼の水晶体の平均等価線量の推移を示している。被ばく線量としては、技師がもっとも被ばくし、次いで医師、看護師、その他の順となっている。5年間の被ばく線量の推移を見ると、看護師、その他は、過去ほとんど変化していない。しかし、技師、医師に関しては、2008年度から被ばく量が増加し、2011年度を境に減少傾向を示している。

Fig. 5 は、2012年度の業種別水晶体の年等価線量の推移を示している。年等価線量は、医療関係者がもっとも高いことが分かる。しかし、医療分野での検出限界未満の占める割合は、年平均実効線量の72%とほぼ同じ割合を示している。眼の水晶体の被ばくの業種別総人数に対する20 mSv以上の割合は、医療関係者全体の0.5%程度(約880人)であり、一般工業関係者全体で0.02%(6人)、研究教育関係で0.001%(1人)となっている。また、現行法令である眼の水晶体の線量限度150 mSvを超える人数については、医療で2人、一般工業、研究機関、獣医療で該当者0人である。眼の水晶体が被ばくした20 mSv以上の人数は、年実効線量に比べて885人多いことが分かる。今後、放射線従事者等の眼の水晶体等価線量限度を150 mSv/年から5年平均で20 mSv/年、但し単年で50 mSvを超えないとした場合、防護用眼鏡等で眼の水晶体等価線量低減を講じるが必要となる。

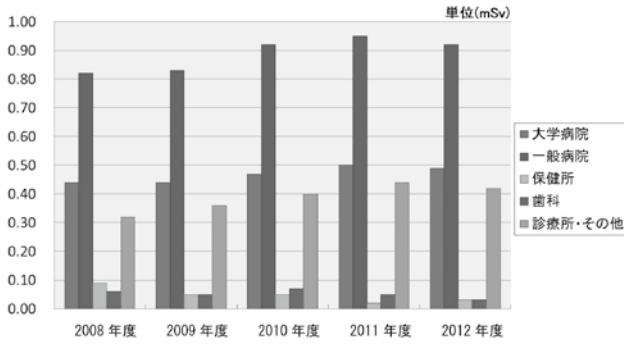


Fig. 3 過去5年間の水晶体の平均等価線量（医療関係）

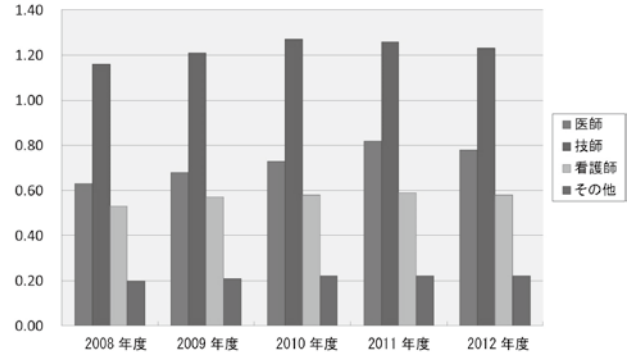


Fig. 4 過去5年間の水晶体の平均等価線量（医療関係職種別）

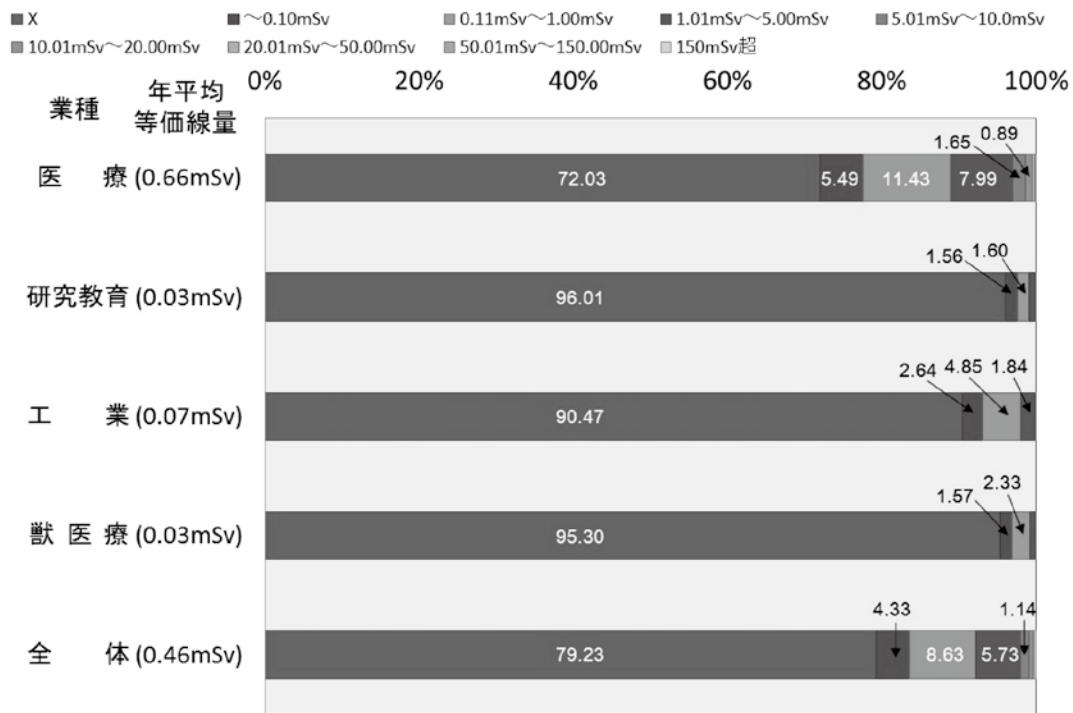


Fig. 5 2012年度の業種別水晶体の平均等価線量

V 福島第一原子力発電所事故に伴う作業員の
水晶体被ばく管理の現状

2011年3月11日に発生した、東電福島第1原子力発電所事故は、多量の放射性物質の放出をもたらし、同年4月12日にはINISスケールでレベル7に分類されている⁴⁵⁾。この事故の収束のため、発電所内外で多くの作業員や防災関係者が対応作業に従事し、また多くの住民が避難をすることになった。原子炉冷却のための作業は2011年3月が中心であったが、事故収束のための作業は、建屋内の復旧作業や汚染水対応作業など比較的高い

空間線量率の場所での作業が現在に至るまで継続されている。また今後も炉心の解体なども含めて、比較的高い空間線量率の場所での作業が予想される。

現場作業員に関しても、これまで確定的影響をもたらす事例は無かったが、一部の作業員にある程度高い線量の被ばくがあったことが報告されている。全作業員の被ばく量に関して、Table 1に2011年3月から2012年1月までの外部被ばく線量の積算値を示す⁴⁶⁾。

250 mSvを超えた高線量被ばくをともなった作業員の被ばくは内部被ばくの方が多く、内部被ばくの主体となる核種は¹³¹Iである⁴⁶⁾。一方、水晶体に関する被ばくは

外部被ばくが主体と考えられる。しかし、Table 1 に示した外部被ばく線量は、電子式個人線量計を用いた計測に基づく γ 線による1 cmの線量当量値であると考えられるため、水晶体の線量として用いられる β 線を含む3 mm線量当量が評価されているわけでは無いことに注意が必要である。ただし、すべての現場作業ではすべての作業員が全面マスクを着用していたため ^{131}I からの β 線はほとんど遮蔽されていると考えられ、また ^{90}Sr - ^{90}Y 等他の核種からの β 線も事故当初はそれ程大きな寄与でなかったと考えられる⁴⁷⁾。したがって、線種を考慮した報告はされていないものの、 γ 線による1 cm線量当量に比べて、 β 線による寄与を含む水晶体線量が桁違いに大きいとは考えられない。

Table 1 に示すように、2012年1月までの累積で見ると外部被ばくのみで100 mSvを超えた東電社員は64人で、最大外部被ばく線量は188.14 mSv、一方、外部被ばくのみで100 mSvを超えた協力企業作業員は11人で、最大外部被ばく線量は199.42 mSvと報告されている⁴⁶⁾。(ただし、2013年4月までの累積では、外部被ばくのみで100 mSvを超えた東電社員は66人となっている⁴⁸⁾。)

これらは、ICRPの新しい水晶体混濁の1%しきい値線量0.5 Gyよりかなり低い。このため作業員に対する放射線白内障の発生可能性はほとんどないと予想される。

また、防災関係者は、作業現場から考えて、被ばくした線量は、原発内作業員より低いと考えられる。

一方、緊急作業従事者の健診については、厚生労働省が2011年10月11日に、「東京電力福島第一原子力発電所における緊急作業従事者等の健康の保持増進のための指針」を示している⁴⁹⁾。この中で、緊急作業従事者等のうち、指定緊急作業期間中に通常の放射線業務の被ばく上限を超える線量を被ばくした労働者に関しては、がん

等晩発性の健康障害の発生が懸念されることを指摘している。そして、緊急作業従事者等が抱く健康上の不安を解消するため、離職した後を含めそれらに対する検査等、適切な長期的健康管理を実施する必要があるとしている。具体的には事業者による健康管理として、白内障について以下の様に定めている。

- (i) 指定緊急作業に従事した間に受けた放射線の実効線量が50 mSvを超え100 mSv以下の者について、
- (ii) おおむね1年ごとに1回
- (iii) 細隙灯顕微鏡による白内障の検査を実施

なお、この際、水晶体の写真を撮影しておくことが望ましい；当該労働者が受診を希望しない場合にはこの限りではない、とされている。そして、100 mSvを超える者は、上記の水晶体検査に他の検査が加わる。したがって、白内障に関しては、指定緊急作業に従事した間に受けた放射線の実効線量が50 mSvを超えた者のうち、希望者には定期的に検査をするよう指示されている。

また、厚生労働省では上記の緊急作業従事者、つまり緊急時被ばく限度適用労働者（原則として2011年12月15日以前に作業に従事した者）を対象に、長期健康管理のため登録データベースを整備している。そして、このデータベースに登録された者に「東電福島第一原発緊急作業従事者登録証」を発行している。2013年8月の時点で、緊急作業従事者19,346人のうち18,874人(97.6%)に登録証を発行している。データベース未登録者に関しては、困難な面はあると考えられるが、登録率のさらなる上昇が望まれる。また、検診等の実施状況調査では、2011年10月から2013年3月までで、白内障に関する眼の検査対象者863人中589人に検査実施とのことで、この時点までの実施率は68.3%であった⁵⁰⁾。

一方、東電福島第1原子力発電所内では現在も復旧作業が日夜続いている。そして、作業員の中にはまだ10 mSv/月を超えて被ばくする者もあり、事故当時よりは被ばく線量は低下しているものの高線量作業が続いている⁵¹⁾。現在、原子炉冷却のための循環注水の処理は、まず、原子炉及び建屋内の冷却水からセシウムを除去し、淡水化処理をした後、多核種除去設備でトリチウム以外の核種を除去し、貯蔵するというラインで行われている。この過程でセシウムだけが除去された段階では、 β 線の放出が相対的に高い汚染水が蓄積されている。この段階の汚染水中の核種を放射能濃度で見ると、 ^{90}Sr / ^{90}Y 、ついで ^3H が高濃度とされている⁵²⁾。実際の現場では、汚

Table 1 東電福島原発事故での作業員の外部被ばく線量積算値（期間：2011.3～2012.1）⁴⁴⁾

線量 (mSv)	東電社員	協力企業員	計
250 越え	0	0	0
200 超え～250 以下	0	0	0
150 超え～200 以下	7	3	10
100 超え～150 以下	57	8	65
50 超え～100 以下	307	237	544
20 超え～50 以下	677	1,889	2,566
10 超え～20 以下	550	2,559	3,109
10 以下	1,741	12,068	13,809
合計 (人)	3,339	16,764	20,103
最大 (mSv)	188.14	199.42	199.42
平均 (mSv)	18.83	8.38	10.11

染水等の保管の状況によって、タンクの中に蓄積された汚染水の場合など、制動放射も考慮する必要はあるが、汚染水自体では β 線の放出も重要である。また、多核種除去設備の沈殿物や吸着剤にも β 線放出核種が存在し、これらを扱う作業においても眼の水晶体が1 cm線量当量の値よりも多く被ばくする可能性がある。このような環境では、通常全面マスク（面体はポリカーボネート製）を装着しての作業が行われている。今後このような作業環境も視野に入れ、水晶体の線量評価の検討が必要である。

今後の事故の可能性を除けば、これまで述べたように、東電福島第一原子力発電所の作業員の被ばく線量は、現在考えられているしきい値（0.5 Gy）より低いため、放射線による水晶体への影響が見られることは考えにくい。一方、白内障のしきい値自体も議論がなされているところである。白内障は晩発影響であり、長期追跡調査後にはじめて放射線誘発白内障かどうかが判明する。放射線量と白内障との関係を明らかにする上でも、作業員の線量をしっかりと把握しておくことが重要である。

VI 結 論

本解説では、わが国における医療分野を含む各産業分野や原子力分野の被ばくの現状について調査した結果等を取りまとめた。これらによると、計画被ばく時におけるわが国のいずれの分野の放射線取扱作業員の水晶体の等価線量についても、多くの作業員についてはICRPの新しい水晶体の等価線量限度を超える、または超えるおそれのあるレベルにはないだろう。

一方、諸外国と同様に医療従事者のうち、インターベンショナルラジオロジー（IVR）に携わる術者等については、実施件数も多く、治療や検査における透視時間が長時間に及ぶ場合がある。これまでに各施設での被ばく線量低減に関する検討や調査が実施されているが、これらの結果が論文等に取りまとめられることが少なく、信頼性の高いデータや系統立った取りまとめが十分なされていない。また、IVR術者の中でも、非血管系の手技にあたる術者の線量の把握やそれ以外の核医学等に携わる医療従事者等の水晶体の等価線量に関するデータもほとんどない。被ばく低減に関しては、わが国でもIVR術者の被ばく低減に関するガイドラインが策定されており、作業場の環境の改善（術者の配置、スムーズな動線の確保等）や個人用防護具の着用により適切な線量低減が実施可能である。しかし、現場において、術者の水晶体の放射線防護への関心や重要性について十分に浸透している

とは言いがたい。このため、医療分野では、わが国における医療従事者の水晶体の等価線量の把握のための信頼性の高い詳細な解析が行われたデータの蓄積とともに放射線防護への関心を高めるための知識普及（放射線防護教育）が重要な課題であると考えられる。

また、原子力施設等においては、水晶体の線量限度が今後引き下げられたとしても、水晶体のモニタリングに係る現行の方法に大きな変更はないものと考えられる。ただし、プルトニウムを取り扱う施設等においては、水晶体の線量が20 mSv/年に近い値となる可能性もある。工程設備側で必要な遮へい対策、個人線量計の着用位置の最適化や個人防護具を併用する場合の線量評価法の検討については今後の課題である。

わが国特有の課題としては、東電福島第一原子力発電所において緊急時作業に携わった作業員の水晶体の被ばくがある。現在のところ、緊急時作業に携わった作業員についても100 mSvを超えた者はわずかで、ほとんどの作業員は水晶体のしきい線量である0.5 Gyよりもずっと低く抑えられている。このため、放射線による白内障発症の可能性はほとんど考えなくてもよいだろう。しかしながら、今後、解体・廃炉等の作業が予定されており、より複雑かつ比較的高い線量となる放射線場での作業も予想される。緊急時作業に携わった高い技術を持った作業員が、このような場で作業をした場合、生涯就業期間においてしきい線量を超えないように管理することが重要である。作業環境に応じた防護マスク等防護具の着用・選定方法を検討しておくことも、水晶体等価線量低減に有効であろう。

このほか、産業分野における放射線業務従事者の水晶体の等価線量に関しては推定値が算出されており、医療従事者以外では多くの作業員が線量限度を大きく下回るとされている。また、本解説では取り上げていないが、放射線業務従事者以外の作業員（たとえば、獣医療補助者等）に関しては放射線被ばくを伴う作業に従事しているものの、当時者に十分な認識がない可能性がある。このような作業員の数も少ないと予想されるが、これらの作業員に対しても、放射線教育と線量把握のための評価（モニタリング）が実施されるべきであろう。

参 考 文 献

- 1) FDA; Avoidance of serious x-ray-induced skin injuries to patients during fluoroscopically-guided procedures, Statement 9 (1994).
- 2) 日本医学放射線学会；IVRに伴う患者及び術者の被

- ばくに関する警告 (1955年3月22日), (1995).
- 3) 医療放射線防護連絡協議会他; IVRに伴う放射線皮膚障害の防止ガイドライン (2004).
 - 4) 富樫敦彦; IVRに伴う放射線皮膚障害報告症例から放射線防護を考える, 日本放射線技術学会誌, **57** (12), 1444-1450 (2001).
 - 5) 日本循環器学会他; 循環器における放射線被ばくに関するガイドライン (2006).
 - 6) 日本循環器学会他; 循環器における放射線被ばくに関するガイドライン (2011年改訂版), (2012).
 - 7) 山岸正文; IVR実施4施設における術者の被曝線量, 日本放射線技術学会誌, 1044 (2003).
 - 8) 石口恒男, 中村仁信, 岡崎正敏, 澤田 敏, 高安幸生, 橋本 統, 林 信成, 古井 滋, 小山修二, 前越 久; 肝細胞癌の動脈塞栓療法における患者と術者の被曝測定. 日本医放会誌, **60** (14), 839-844 (2000).
 - 9) T. MORITAKE et al.; Dose Measurement on Both Patients and Operators during Neurointerventional Procedures Using Photoluminescence Glass Dosimeters, *AJNR*, **29**, 1910-1917 (2008).
 - 10) M. HAYAKAWA et al.; Direct measurement of patient's entrance skin dose during neurointerventional procedure to avoid further radiation-induced skin injuries. *Clin. Neurol. Neurosurg.*, **112**, 530-536 (2010).
 - 11) T. MORITAKE et al.; Precise mapping system of entrance skin dose during endovascular embolization for cerebral aneurysm, *Radiat. Meas.*, **46**, 2103-2106 (2011).
 - 12) 今関雅晴他; 脳IVRにおける被ばく線量の実態調査, 第25回全国循環器撮影研究会 (2011). Available at: http://plaza.umin.ac.jp/~zen-jun/public_html/kadai_kenkyu/H22_nouIVR_hibaku/H22kadai_nouIVR.pdf, 閲覧2014年1月27日.
 - 13) 高塚牧子他; CT透視下生検におけるK-Ishotデバイス併用による被曝低減の可能性, 山梨肺癌研究会会誌, **18** (1), 2-6 (2005).
 - 14) 深谷美絵他; CT透視下経皮肺生検の被曝線量の検討第2報, 日本放射線技術学会総会学術大会抄録, **55**, 324 (1999).
 - 15) 富田博信, 諸澄邦彦; OSL線量計を用いたMDCT装置のCT室内散乱線分布の測定, 日本放射線技術学会雑誌, **60** (11), 1550-1554 (2004).
 - 16) 厚生労働省医療放射線安全管理に関する検討会; 放射性医薬品を投与された患者の退出に関する指針 (改定) (2010).
 - 17) 日本放射線学会他; 残存甲状腺破壊を目的としたI-131 (1,110 MBq)による外来治療実施要領 (改定第2版) (2012).
 - 18) 日本医学放射線学会他; 放射性ヨウ化 (I-131) ナトリウムカプセルを用いた内用療法の適正使用マニュアル (改訂第2版) (2012).
 - 19) 放射線医学総合研究所; 医学教育における被ばく医療関係の教育・学習のための参考資料 (2012).
 - 20) 金谷信一; 心臓核医学検査に従事する者の被ばく, 日本心臓核医学会誌, **15** (1), 10-11 (2013).
 - 21) PET検査施設における放射線安全の確保に関する研究班編, FDG-PET検査における安全確保に関するガイドライン, 平成16年度厚生労働省科学研究費補助金医療技術評価総合研究事業 (2005).
 - 22) 赤羽恵一; (29) PET検査による被ばく, Available at: http://www.nirs.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/jPET_D4_2008/p133_136.pdf, 閲覧2014年1月28日.
 - 23) 日本核医学会; FDG PET, PET/CT診療ガイドライン2012 (2012), Available at: http://www.jsnm.org/files/pdf/guideline/2012/fdgpct_guideline2012_120912.pdf, 閲覧2014年1月28日.
 - 24) 日本アイソトープ協会医学・薬学部会ポジトロン核医学利用専門委員会; PET用放射性医薬品の合成, 分注, 品質管理に携わる作業者の被ばく線量調査報告, *Isotope news*, **10**, 38-42 (2008). Available at: https://www.jrias.or.jp/report/pdf/pet_hibaku_houkoku_2008_10.pdf, 閲覧2014年1月31日.
 - 25) 江尻和隆; 放射性医薬品投与を受けた患者周辺の実効線量当量の測定, 保健物理, **30** (1), 133-139 (1995).
 - 26) 江尻和隆; 放射性医薬品投与を受けた患者周辺の線量測定と実効線量の算出—^{99m}Tc-GSA, *Radioisotopes*, **48** (5), 334-340 (1999).
 - 27) 江尻和隆; 放射性医薬品投与患者に接近する者の実効線量の推定—¹²³I-IMP投与患者周辺の照射線量率測定に基づく方法—, 日本安全管理学会誌, **1** (1) (2002).
 - 28) T. KATOH et al.; Calculation of direction dose equivalent due to the positron emitters using the monte-carlo code EGS5, *Radiat. Prot. Dosim.*, **146** (1-3), 23-26 (2011).
 - 29) S. YOKOYAMA et al.; Calculation of equivalent dose for the lens of the eye in a positron field using EGS5, *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 788-792 (2014).
 - 30) 日本放射線腫瘍学会他; シード線源による前立腺永久挿入密封小線源治療の安全管理に関するガイドラ

- イン第5版(2011).
- 31) 丸山隆司他(編); 外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル, 原子力安全技術センター, 東京(1988).
- 32) 草間朋子, 福井 徹, 太田勝正, 加藤命久, 中野健二; 原子力発電所作業者を対象とした個人モニタの装着基準に関する実験的考察, 保健物理, **22**, 259-264(1987).
- 33) 藤原宏伸, 寺山正直, 梶谷 正, 土井 徹, 川島恒憲; ダイバー作業時の放射線管理について, 日本保健物理学会第38回研究発表会要旨集P-14(2004).
- 34) 二之宮和重, 百瀬琢磨, 伴 信彦; 法令改正に伴う個人被ばく管理上の対応, 保健物理, **24**, 47-50(1989).
- 35) 高島房生, 岡村泰治, 野田喜美雄; 六ヶ所再処理施設における個人線量管理について(その1) — 個人線量管理体系について —, 日本保健物理学会第39回研究発表会要旨集B-4(2005).
- 36) 菊地正行, 赤津康夫, 堀 和昭, 山下朋之, 米沢秀成, 柳沢美樹男, 遠藤清志, 大和愛司, 大柿一史; 高線量率環境下作業の放射線管理, 日本保健物理学会第19回研究発表会要旨集B-27(1984).
- 37) 山下朋之; 私信(2014).
- 38) 川崎 位, 秋山聖光, 大関 清, 江尻英夫, 大峰 守, 石田順一郎; 再処理工場における不均等被ばく管理について, 日本保健物理学会第29回研究発表会要旨集B-32(1994).
- 39) 辻村憲雄, 百瀬琢磨, 野村 保; 東海事業所における体幹部不均等被ばく及び局部被ばく事例の解析, 動力炉・核燃料開発事業団(日本原子力研究開発機構), PNC TN8410 94-337(1994).
- 40) 辻村憲雄, 百瀬琢磨, 篠原邦彦; 鉛エプロンの着用に伴う体幹部不均等被ばくについて, 動燃技報, **98**, 43-47(1996).
- 41) 中川貴博, 高田千恵, 辻村憲雄, 山崎 巧, 櫻村慎也; グローブボックス作業における体幹部不均等被ばく及び末端部被ばくのデータ分析, 日本保健物理学会第43回研究発表会要旨集B-5(2009).
- 42) 山崎 巧, 高田千恵, 辻村憲雄, 石川 久; MOX燃料施設における眼の水晶体の線量測定の現状と課題, 日本保健物理学会第47回研究発表会要旨集, C-10(2014).
- 43) (株)千代田テクノル; 「平成24年度個人線量の実態」, FBNews, No. 441, 7-15, (2013).
- 44) 個人線量測定協議会; 「実効線量の分布表」, Available at: <http://www.kosenkyo.jp/siryoudatalink.htm>, 閲覧2014年8月13日.
- 45) IAEA; Staff Report, (12 April 2011), Available at: <http://www.iaea.org/newscenter/news/2011/fukushima120411.html>, 閲覧2014年4月22日.
- 46) 東京電力(株); 世界保健機構(WHO)へ提供した福島第一原子力発電所事故の復旧作業に携わった作業員の被ばく線量に関するデータについて(2012年12月6日). Available at: http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_121206_01-j.pdf, 閲覧2014年4月22日.
- 47) 原子力安全・保安院; 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機, 2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について(2011年6月6日).
- 48) 東京電力(株); 新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会, 福島事故検証課題別ディスカッション, 課題5【高線量下の作業】第2回(平成26年1月18日)資料No.2補足説明資料より.
- 49) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課; 「東京電力福島第一原子力発電所における緊急作業従事者等の健康の保持増進のための指針」(2011-10-11).
- 50) 厚生労働省; 東京電力福島第一原子力発電所緊急作業従事者の長期的健康管理の実施状況について, (2013-8-9), Available at: http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anken/fukushima/dl/sonota-01.pdf, 閲覧2014年4月22日.
- 51) 東京電力(株); 福島第一原子力発電所作業員の被ばく線量の評価状況について, 月別線量分布表, Available at: http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/140731j0603.pdf, 閲覧2014年8月19日.
- 52) 東京電力(株); 多核種除去設備処理水の放射能濃度 in 福島第一原子力発電所における汚染水処理とトリチウム水の保管状況, 経済産業省トリチウム水タスクフォース(第2回), 資料1(2014).



赤羽 恵一（あかはね けいいち）

1987年3月東北大学理学部物理学第二学科卒業。国立公衆衛生院放射線衛生学部研究員，大分県立看護科学大学環境科学研究室助手を経て，現在は放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト

医療被ばく研究推進室室長。専門は医療放射線防護。

E-mail: akahane@nirs.go.jp



堀田 豊（ほった ゆたか）

平成5年4月に日本原燃（株）入社。入社後から再処理工場の放射線管理業務を約20年担当。現在、MOX燃料工場の放射線管理設備の設計業務を担当。

水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (VI) —ISO, IAEA 及び IRPA の動向—

赤羽 恵一*1, 飯本 武志*2, 伊知地 猛*3, 岩井 敏*4, 大口 裕之*5, 大野 和子*6,
川浦 稚代*7, 立崎 英夫*1, 辻村 憲雄*8, 浜田 信行*3, 藤通 有希*3, 堀田 豊*9,
山崎 直*10, 横山 須美*11

(2014年7月8日受理)

(2015年1月31日再受理)

Interim Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (VI) —Recent Developments of Radiation Safety of the Lens of the Eye in ISO, IAEA and IRPA—

Keiichi AKAHANE,*1 Takeshi IMOTO,*2 Takeshi ICHIJ,*3 Satoshi IWAI,*4 Hiroyuki OHGUCHI,*5 Kazuko OHNO,*6
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*7 Hideo TATSUZAKI,*1 Norio TSUJIMURA,*8 Nobuyuki HAMADA,*3 Yuki FUJIMICHI,*3
Yutaka HOTTA,*9 Tadashi YAMASAKI*10 and Sumi YOKOYAMA*11

While the revised dose limit for the lens of the eye was presented by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), the dose measurement standards for the lens of the eye have been discussed in the International Organization for Standardization (ISO). In the International Basic Safety Standards of International Atomic Energy Agency (IAEA), a new ICRP dose limit of the lens of the eye was included, and a technical document was published as a guidance on the implications of the new dose limit for the lens of the eye for occupational radiation protection. By the International Radiation Protection Association (IRPA) Task Group on Implementation of Revised Dose Limits to the Lens of the Eye, the opinions for the new ICRP dose limit for the lens of the eye are investigated for the member states. In this paper, the progress of discussion in these organizations is reported.

KEY WORDS: lens of the eye, radiation safety, new ICRP dose limit, ISO, IAEA, IRPA, dosimetry, standards, $H_p(3)$.

I はじめに

国際放射線防護委員会 (ICRP) から水晶体の等価線量限度引き下げに関する声明が発表されたことで、自国の法令へのこの新しい水晶体等価線量限度の取り入れを具体的に検討する必要があるとの認識から、その社会的・経済的影響を含め、各国の関心が高まっている。

水晶体の等価線量評価法に関しては、ICRP 及び国際放射線単位測定委員会 (ICRU) において、検討が進められていることは別途報告した¹⁾。本報では、この他の国際的な動きとして、国際標準化機構 (ISO) においては水晶体線量測定にかかる国際規格に関する検討が、また、国際原子力機関 (IAEA) においては安全基準への

取り入れ及びその適用のための具体的かつ技術的手法に関する検討が進められていることから、これらの検討状況について解説する。さらに、国際放射線防護学会 (IRPA) においても、関連タスクグループを設立し、各国の加盟学会の意見を取りまとめるといった活動を実施している。合わせてこの活動内容についても報告する。

II ISO における水晶体線量測定にかかる 国際規格に関する検討

ISO は、正式名称を国際標準化機構 (International Organization for Standardization) といい、各国の代表的標準化機関からなる国際標準化機関の中で、電気及び電子技術分野を除いた全産業分野 (鉱工業, 農業, 医薬品等)

に関する国際規格の作成を行っている。ISO は主要な産業分野の標準化を「技術委員会 (Technical Committee, 日本工業標準調査会では、「専門委員会」の訳を用いている)」の下で行う。TC は TC1 から TC229 までであり、さらに TC230 から TC243 まではプロジェクト委員会という形態をとっている。TC85 は、原子力エネルギー分野を意味し、TC85/SC2 は、原子力エネルギー分野の放射線防護を意味している。

一方、IEC (国際電気標準会議) は、1906 年に設立され、電気及び電子の技術分野を対象とする標準化を進めている。IEC 規格は、さまざまな分野があり、原子力計測に関わる規格作成は、原子力計測専門委員会 (TC45) が担当している。TC45 は、1960 年から開催され、1 年に 1 回程度で開催されている。国内では、日本工業標準調査会 (JISC) より、日本電気計測器工業会が審査団体として認められ、TC45 国内委員会を組織している。国内委員会は、大学、研究機関、電力会社、原子力、放射線関連の製造業者等により構成されている。

最近の国際規格 (ISO/IEC) 改定は、これまでの各個人線量計の個別規格から同種の線量計を包括した総合的な基本規格としてまとめる傾向にある。

IEC では、光子及び β 線に関する環境及び個人モニタリングを対象とした各種受動型線量計に共通する規格 IEC62387²⁾ を 2012 年 12 月に改訂した。この改訂版では、眼の水晶体の線量測定 (3 mm 線量当量 ($H_p(3)$)) に関する要件が盛り込まれている。この改定を受けて、ISO では ISO15382 “Radiological protection-Procedure for

monitoring of the dose to the extremities and the lens of the eye”³⁾ について、眼の水晶体を含んだ手順書の改定を現在進めている。既存の規格では、適用範囲が原子力施設における β 線等による個人被ばくモニタリングに限定されていたが、今回の改定では、X・ γ 線及び β 線を対象とし、適用範囲をこれらの放射線モニタリングの需要が増加している医療関係の被ばくにも拡張した。この手順書では、眼の水晶体の等価線量限度を最新の ICRP 勧告に合わせて、水晶体の等価線量限度 (100 mSv/5 年、50 mSv/年) に変更し、眼の水晶体を評価できる線量計の装着位置、評価上での注意事項について記載している。特にインターベンショナルラジオロジー (IVR) の術者のような不均等の被ばくをする者に対して、線量計を装着する際の位置と X 線防護メガネを装着している場合の課題を挙げている。線量計に関しては、眼の水晶体測定に対する受動型線量計システムの技術仕様が IEC62387 に定義されている。なお、この ISO では、眼の水晶体評価用としての線量計装着位置を眼鏡付近が良いと推奨しているが、他の位置 (襟、体幹部、頭部等) でも代用することが可能である。

III IAEA における眼の水晶体の等価線量限度適用に関する検討状況

1. 検討経緯

IAEA においては 2011 年 5 月に開催された第 29 回安全基準委員会 (CSS) 会合において、国際基本安全基準 (International Basic Safety Standards, BSS) の改定が

*1 (独) 放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒 263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.
E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.
E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財) 電力中央研究所; 東京都泊江市岩戸北 2-11-1 (〒 201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.
E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp, f-yuki@criepi.denken.or.jp, ichiji@criepi.denken.or.jp

*4 (一社) 原子力安全推進協会; 東京都港区芝 5-36-7 (〒 108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.
E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 千代田テクノ (株); 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒 113-8681)
Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒 622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi,

Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

E-mail: kakochan@kyoto-msc.jp

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20 (〒 461-8637)
Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (独) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒 319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*9 日本原燃 (株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字沖付 4-108 (〒 039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnfl.co.jp

*10 中部電力 (株); 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒 437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*11 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒 470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyooka-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

審議事項となった。これにともない眼の水晶体の等価線量限度の値の改定についても提案された。しかし、CSS 審議段階での提案であったため、加盟国からの意見を反映した上で、放射線安全基準委員会（RASSC）議長が裁定することとなった。このため、6月に加盟国からの意見照会が公示され、7月に意見に対する回答がなされた。これらの過程を経て、同年11月に発表された GSR Part 3: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards の Interim Edition⁴⁾ では ICRP の新しい眼の水晶体の等価線量限度に関する記載が追加された（2014年7月に最終版⁵⁾ が公刊）。

水晶体の等価線量限度引き下げに関しては、加盟国の関心が非つねに高かったことから、BSS の改定を踏まえ、2012年10月には、BSS の要件を満たすため技術文書（TECDOC）を取りまとめることとした。これにあたり、技術会合 The new dose limit for the lens of the eye — Implications and implementation— を開催した。会合へ参加したのは加盟国中 24 か国及び 8 機関であった。会合では、議論の基本となる水晶体及び放射線誘発白内障発症メカニズム、ICRP が眼の水晶体の等価線量限度を引き下げることとなった科学的根拠、医療、原子力及び産業の各界において線量限度履行のための実際的な課題について、各国の認識の統一が図られた。さらに、重要課題として、水晶体に対する高リスク作業員の抽出、施設/防護具設計、作業規定の策定、教育訓練・健康管理プログラム、水晶体線量モニタリングのあり方等が検討された。

これらの検討を踏まえ、2013年3月に会合出席者にドラフトが配布され、5月末に意見募集を行った結果、21の個人及び組織から310件のコメントが寄せられた。同年6月には意見への回答が公示、修正ドラフトが示された。このドラフトは7月に開催された第34回 RASSC 会合において報告され、2014年1月に TECDOC1731⁶⁾ として公刊された。

2. TECDOC1731 の概要

(1) TECDOC1731 の構成

TECDOC1731 は、以下の3章から構成されている。

1. INTRODUCTION (はじめに)
2. THE SCIENTIFIC BASIS FOR THE CHANGE IN THE DOSE LIMIT (線量限度の変さらに伴う科学的根拠)
3. IMPLICATIONS OF THE NEW DOSE LIMIT FOR THE LENS OF THE EYE (新しい眼の水晶体の等

価線量限度の意味)

第1章では、本稿 III. 1. で述べた背景、目的、適用範囲及びこの報告書の構成が示されている。第2章では ICRP Publication 118 からの引用として、ICRP の示した新しい眼の水晶体の等価線量限度の科学的根拠の概要を述べている。第3章では、線量限度の変さらにより影響を受ける作業員と線量限度を変更するためになすべき方針が示されている。第3章は、さらに以下の6節から構成されている。

- 3.1 Safety assessment (安全評価)
- 3.2 Workers for whom exposure of the lens of the eye might be important (眼の水晶体の被ばくが重要となる可能性のある作業員)
- 3.3 Optimization of protection (防護の最適化)
- 3.4 Monitoring of doses to the lens of the eye due to external radiation (外部放射線から眼の水晶体を受ける線量のモニタリング)
- 3.5 Health surveillance (健康管理調査)
- 3.6 Exposure of emergency workers (緊急作業に携わる従事者の被ばく)

以下、特に TECDOC1731 の中でも重要である第3章について説明する。

(2) 安全評価

作業員の放射線防護に関する全般的なことは、BSS に記載されている。3.1 節に述べられている安全評価に関しても水晶体のみに限ったことではない。規制当局は、安全評価のための必要要件を確立し、準備しておかなければならない。そして、責任のある人や組織はその施設や活動に対して適切に安全評価を実施すべきであるとしている。これらの対象としては施設操業前の施設設計をはじめ、施設操業に関するすべての過程における操作手順、防護具の使用に関するものである。水晶体に対しては、新しい ICRP の線量限度を踏まえ、十分な配慮が必要である。このため、各事業者は作業員の眼の水晶体の線量がかかり高くなる（年間数 mSv 程度）かどうか、特に、低透過性の β 線や低エネルギーの光子による局所被ばくにより、実効線量よりも眼の水晶体の等価線量限度で制限されるような場合、上記事項を見直す必要があるとしている。また、防護が最適化されるよう機器や設備が設計されることを確実にすること、必要に応じて、防護を最適化することを確実にするために操作方法を確立すべきであり、このような措置を講じた上で、まだ装置や設備の設計、操作方法が十分でない場合には、作業に応じた防護具の使用について検討すべきであるとして

いる。

(3) 眼の水晶体の被ばくが重要となる可能性のある作業業者

定常的に眼の水晶体がかなりの放射線を受ける可能性のある作業業者は、水晶体の線量推定方法を、以下のような場合に分けて評価する必要があるとしている。

- (i) 一様な放射線場での被ばく：
- (ii) 眼の水晶体の等価線量が高くなるような不均等な放射線場での被ばく：

これには、頭部の遮へいがなされていない場合や頭部が線源に近い場合の被ばく、 β 線による被ばくが含まれる。

- (iii) β 線や低エネルギー光子（約 40 keV 未満の光子）のような低透過性の放射線による被ばく：

(iii) は、実効線量にはあまり影響しないが、水晶体の線量への寄与が大きい。

α 線やその他の高 LET 放射線の取り扱いについては、ICRP Publication 118 でも十分な議論がなされていないが、TECDOC1731 では、 α 線については体内の飛程が非つねに短いので、水晶体の感受性領域（3 mm 深さ）への影響は考えなくてよいとされている。中性子による被ばくは、実効線量で制限されていれば、眼の水晶体の線量が問題になることはなさそうだが、評価は複雑であるとしている。

眼の水晶体の線量が比較的高くなる可能性のある作業業者としては、以下の職種が挙げられている。

(i) 医療分野

IVR 術者、放射性医薬品の取扱作業業者、手で密封小線源療法を行う術者、CT 透視に携わるスタッフ及び加速器運転員。

(ii) 原子力分野

グローブボックスを使用する作業業者、デコミッションングに携わる作業業者及びプルトニウムや劣化ウランを取り扱う作業業者。

(iii) その他の産業分野

通常、一様な放射線場で作業しており、IAEA の放射線の産業利用に関するワーキンググループが 2009 年に調査した結果、86% が 5 mSv 以下、最大でも 50 mSv (0.3%) であったことから、通常、眼の水晶体の被ばくもほとんどしないと考えられるとしている。

宇宙飛行士については、中性子による高レベル被ばくをする可能性があるが、この TECDOC では検討の対象外としている。また、航空機乗務員の被ばくに関しても、水晶体の線量は十分に低いと予想されることから高レベ

ルの被ばくをする職種としては、取り扱わないこととしている。

(iv) 事故的な被ばく

非破壊検査等の産業分野において、線量限度を超えるような事故的な被ばくが発生している。これらの作業業者が被ばくした放射線場は均一ではなく、着用している個人線量計の読み値は眼の水晶体の等価線量の代用にはならないかもしれない。また、核医学検査や治療を行う部門では、準備の段階で放射性医薬品による汚染により眼の水晶体の等価線量が高くなる可能性があることを指摘している。

(4) 防護の最適化

個人の線量と個人の数、被ばくの可能性を経済的、社会的状況を考慮して、達成可能な限り低くするという防護の最適化の考え方は、水晶体の被ばく防護に限ったことではない。防護の最適化の観点から、事業者等は、工学的に制御（安全のために施設や設備を設計）や作業環境を整備し、法的な管理や防護具の使用を最小限にする必要があるとしている。また、放射線業務従事者の防護の最適化のみを考えると、他の作業業者、公衆または患者の被ばくを増加させる可能性もある。このため、公衆等の被ばく低減にも注意することとしている。

規制当局は、防護や安全に対しての規制やガイドラインを作成するとともに、これらが機能しているかを確認するシステムを確立しておかなければならない。放射線による水晶体の影響に関する新しい科学的知見、規制やガイドラインに重大な変更があった場合には、事業者等に広く情報を提供しなくてはならない。これに加え、事業者等は作業業者の安全・防護に関する適切な情報、教育・訓練を提供しなければならないとしている。

(5) 外部放射線から眼の水晶体が受ける線量のモニタリング

水晶体の線量モニタリングについては、水晶体用の線量計も開発されており、直接測定も可能であるが、その評価方法については国際的な基準が必要であるとしている。現在、国際基準に関しては ISO 及び IEC において議論されているのでそれに従い実施することとしている (Table 1)。定期的な個人のモニタリングを実施する線量レベルとしては、眼の水晶体の等価線量が 5 mSv/年を超える可能性がある場合としている。個人線量モニタリングにおいては、放射線の種類、エネルギー、入射方向、施設の構造、防護具の使用等を考慮して、これらに適した方法で測定すべきとしており、被ばくの形態と評価方法が表として示されている。Table 2 から Table 5 に示す。

Table 1 エリアモニタ及び個人線量計の国際規格

放射線の種類	エリアモニタ		個人線量計	
	線量率計	受動型線量計	線量率計	受動型線量計
光子及び β 線	IEC60846-1 $H'(0.07)$ 及び $H^*(10)$	IEC62387 $H'(0.07)$ 及び $H^*(10)$	IEC61526 $H_p(0.07)$ 及び $H_p(10)$	IEC62387 $H_p(0.07), H_p(3)$ 及び $H_p(10)$
中性子	IEC61005 $H^*(10)$	—		ISO21909 $H_p(10)$

Table 2 中性子の線量

影響を及ぼす要因	説明	
A (エネルギー及び入射角度)	任意のエネルギー及び入射角に対し、全身線量モニタリングは、水晶体の線量を保守的に評価できそうにない。このため、作業場によっては、水晶体に対する中性子の線量を評価する必要があるかもしれないが、これについては、さらなる調査が必要。	
B (幾何学的形状)	均一な放射線場か？	
	はい 体幹部でのモニタリングを利用	いいえ 眼の近傍でのモニタリングが必要。
C (防護具)	どんな防護具（メガネ、遮へい板等）も中性子を防護することができないかもしれない。	

Table 3 光子の線量

影響を及ぼす要因	説明	
A (エネルギー及び入射角度)	平均光子エネルギー約 40 keV 未満か？	
	いいえ 放射線が主に正面から入射される場合かまたは、人が動くことであらゆる方向から放射線が入射される場合か？	
	はい $H_p(0.07)$ を使用し、 $H_p(10)$ を使用しないかもしれない	いいえ $H_p(0.07)$ または $H_p(10)$ を使用し、 $H_p(0.07)$ を使用しないかもしれない。
B (幾何学的形状)	均一な放射線場か？	
	はい ↓ 体幹部でのモニタリングを利用	いいえ ↓ 眼の近傍でのモニタリングが必要。
C (防護具)	防護具（メガネ、遮へい板等）を使用するか？	
	眼の防護具を着用するなら ↓ 眼の近傍及び防護具の下でモニタリングが必要。一方、遮へいに適切な遮へい係数を適用すべき。	体幹部の防護（防護エプロン等）がなされるなら ↓ 防護具の下の体幹部着用線量で眼の水晶体の線量を評価した場合は過小評価となる。 ↓ 別途、眼の近傍での測定が必要。

Table 4 β 線の線量

影響を及ぼす要因	説明	
A (エネルギー及び入射角度)	最大エネルギーは 0.7 MeV 以上か？	
	いいえ モニタリング不要	はい モニタリング要
B (幾何学的形状)	β 線場は通常不均一なので眼の近傍で線量計による測定が必要。ただし、Cに示した十分な厚さの遮へいを使用するなら不要。	
C (防護具)	眼に対して十分な厚さの防護具を使用しているか？	
	使用している 制動放射線を考慮	使用していない $H_p(3)$ のモニタリング

Table 5 混合放射線場における水晶体線量測定に必要な線量計の選択のためのガイダンス

場の放射線の種類			必要な線量計
中性子	光子	β 線 (> 0.7 MeV)	
×			中性子用 $H_p(10)$ 線量計 (1 台)
	×		光子用 $H_p(0.07)$ (1 台) 及び/または $H_p(10)$ 線量計 (1 台)
		×	β 線用 $H_p(3)$ 線量計 (1 台)
×	×		中性子用 $H_p(10)$ (1 台) 及び 光子用 $H_p(0.07)$ (1 台) 及び/または $H_p(10)$ 線量計 (1 台)
×		×	中性子用 $H_p(10)$ (1 台) 及び β 線用 $H_p(3)$ 線量計 (1 台)
	×	×	光子用・ β 線用 $H_p(3)$ 線量計 (1 台)
×	×	×	中性子用 $H_p(10)$ 線量計 (1 台) 及び 光子・ β 線用 $H_p(3)$ 線量計 (1 台)

* 中性子線照射に関しては、つねに光子が付随しているが、ここでは中性子線単独で存在しているとして示す。

(6) 健康管理調査

健康管理調査については、20 mSv/年以下の人は追加的な健康診断は不要としている。しきい線量である0.5 Gyを超えたとしても、そのリスクは小さいと考えられるため、障害の進展を確認するのみにとどめ、作業者が放射線業務から排除されるような不利益を被らないように配慮すべきとしている。

(7) 緊急作業に携わる従事者の被ばく

緊急作業に携わる従事者に対しても記載があり、眼の水晶体の線量 ($H_p(3)$) は、通常は1 cm線量当量 ($H_p(10)$) から評価することが可能であるとしている。しかし、 β 線や低エネルギー γ 線場(平均エネルギーが40 keV未満)であることが予想される場合には、 $H_p(10)$ では水晶体の線量を制御しきれない。したがって、緊急作業に携わる作業には、状況に応じて、低原子番号の遮へい材等の使用を推奨している。

3. ま と め

TECDOC1731では、水晶体の等価線量限度適用のための技術的な要件を示しているが、放射線防護・線量の低減という観点から、その他の人体組織(全身)を防護する場合と同様に、作業場の設計や作業場及び個人の線量管理を適切に実施し、遮へい材や防護具の着用、作業者の教育等が重要であるとしている。また、高レベル被ばくまたは不均等被ばくをする可能性のある作業員(職種)に限定して管理することにより、過剰な防護や管理を避けることが可能である。一方、場や個人の線量モニ

タリング方法についても詳細な記載があるが、ISO等の規格・基準に依存した部分があり、これらの検討状況によっては、ただちに各国の基準に反映することができない状況である。また、中性子の線量モニタリングについても、全身線量のモニタリングによって、眼の水晶体の線量を保守的に評価できない可能性を示唆している。このような場においては、今後も十分な検討が必要であろう。

IAEAではICRP Publication 103(ICRP 2007年勧告)の発刊やBSSの改定等により、安全指針:職業上の放射線防護(DS453)等、これまでであった職業上の放射線防護に関する指針類についても内容を更新することとなった。この機会に細分化されていた職業上の防護に関する指針を統合することとしている。改定にあたっては、IAEA(RASSCが中心となり、原子力安全基準委員会(NUSSC)、輸送安全基準委員会(TRANSSC)、廃棄物安全基準委員会(WASSC)が協力)と国際労働機関(ILO)が協力して作業をすすめることとなっている。2013年8月末~10月に加盟国に向けて意見募集が行われ、2014年1月に改訂ドラフトがCoordination Committeeによって承認された。2014年6月にCSSにおいて審議を経て、2015年4月に発刊の予定である。また、安全指針:電離放射線の医療利用(DS399)についても検討中であり、2015年から2016年に発刊を予定している。これらの中でもICRPの新しい水晶体の等価線量限度に関する記述が追加、修正となる予定である。

IV IRPA における眼の水晶体の等価線量限度適用に関する検討状況

1. IRPA

国際放射線防護学会は、「すべての国々で放射線防護活動に従事する人々がより迅速に情報交換し、この過程を通じて世界の多くの地域で放射線防護を推進できる手段を提供すること」を主目的とする、放射線防護に関する国際組織である⁷⁾。メンバーとして、60か国の48のAssociate Societies (ASs) で構成されており、日本では当学会がメンバー登録されている。

2. 眼の水晶体のICRP 声明に関するアンケート

IRPA は、2011年のICRPの組織反応に関する声明に対し、加盟学会に対して意見聴取し、IRPAとして提言をまとめるためのタスクグループを作り、調査を行った⁸⁾。48のASsのうち、16か国の12のASs (アルゼンチン、ベルギー、フランス、ハンガリー、イタリア、日本、北欧、スペイン、ルーマニア、スロバキア、英国、米国) から回答があった。

調査項目は、「水晶体の線量評価への影響」、「水晶体被ばく防護方法」、「新しい線量限度適用による影響」の、三つのトピックに分けられている (Table 6)。

トピック毎に、ASsから協力ボランティアが募られ、日本から当学会の「水晶体の放射線防護に関する専門研究会」のメンバー2人 (赤羽・横山) がトピック3の取りまとめに協力した。結果は、報告書にまとめられ、公開されている⁸⁾。以下に、調査の結論と勧告の内容を示す。

Table 6 アンケート項目

Topic 1: 水晶体の線量評価への影響 (4問)	
Q.1	現在の最適な評価法
Q.2	線量評価法の将来的課題
Q.3	線量レベル等の条件ごとの評価
Q.4	多数施設で従事する作業員の線量管理の一元化
Topic 2: 水晶体被ばく防護方法 (2問)	
Q.5	現在の水晶体線量低減方法
Q.6	将来の水晶体線量低減方法に関する課題
Topic 3: 新しい線量限度適用による影響 (5問)	
Q.7	防護・線量評価に関する短期課題
Q.8	防護・線量評価に関する長期的課題
Q.9	雇用への影響
Q.10	補償に関する課題
Q.11	その他、タスクグループで検討が必要な課題

3. アンケートの結論

(1) 影響される分野

新しい線量限度が影響を与える分野は医療、主にIVR (IR) と循環器科 (IC) であるとのコンセンサスが広く得られている。放射線診断と獣医のX線でも、いくらかの影響は生じ得る。

原子力分野では、実質的に影響の心配は無かった。高い β 線場のような状況 (たとえば重大な事故後) を除き、防護メガネの使用により比較的簡単に適切な管理が実行可能である。

(2) 眼の水晶体の線量測定

(i) 新しい眼の水晶体の等価線量限度は、一様な場、あるいは非つねに低線量であり、つねにモニタされている多くの作業員に対しては、作業内容や防護方法、線量評価法等の変更を課すものではないであろう。しかしながら、ある種の作業、主にIRやICの術者に対しては、新しい線量限度に近いが、これを超える可能性がある。このため、線量計により、眼の水晶体の受ける線量を記録し、把握しておくことが必要となる。

(ii) 線量と白内障の間の関係は、よくわかっておらず、因果関係を明らかにすべきである。

(iii) 一般的に、具体的な眼の水晶体の線量測定を定期的に行う必要がないことは明らかである。作業員に対する眼の水晶体をモニタするためにいくつかのアプローチが提案されているが、すべて実用性に課題があり、国際的な勧告が放射線防護基準と調整されている必要がある。

(iv) 特に、種々の作業環境において使用するために、 $H_p(3)$ を測定するための線量測定法を開発することが有益である。

(v) さらに一般的な状況では、 $H_p(10)$ と $H_p(3)$ の両方を記録するための標準システム (double-dosimetry システム、または適当な経験式を用いた一つのバッジの使用) と一致させることが適当と思われる。

(vi) 移動労働者の眼の水晶体の総線量を評価し、記録するための取り決めを確認し、有効にすべきである。

(3) 作業員の防護

(i) 眼の水晶体の線量を低減するために、確立された放射線防護技術と遮へい装置が、すべての所属学会で利用されてきたが、あまり継続的には使われていないようである。これらの技術と装置を効果的に、そして堅実に用いるよう、作業員を訓練することは重要である。しかし、効果的な訓練を適切に実行するためには、スタッフが限られており、時間的にも非つねに困難である。特に、

眼の水晶体の等価線量が新しい線量限度を超える可能性がある領域では、優先的に放射線防護訓練へ投資することは、非つねに重要なことである。一方、投資額の増加は、費用の主要な課題となる。

(ii) 防護手段の適用には、場所によって、さらに同じ国内でさえも、かなりの違いがある。防護手段に関する明確なガイドラインがないため、施設は独自に防護用具を購入するか、異なる手技を選ぶ可能性がある。どの技術と用具を用いるかの決定は、ローカルなレベルでなされなければならない。これらに関するガイドラインを出すことができれば有用である。

(iii) 眼の防護を義務にすることを、すべての被ばくする作業員に対して考えなければならない。

(4) 広範囲に及ぶ影響

(i) 広い範囲に及ぶ影響として、眼の水晶体に対する新しい線量限度の適用が現行の作業方法に影響を与え、所属学会の大多数に多くの問題をもたらす可能性があることが挙げられる。特に、雇用の問題である。この問題には、眼の水晶体に対し追加的な医学検査を実施することで費用が高くなる、補償訴訟が増加する、そして、既存の線量限度より十分に低い（しかし、新しい限度よりも高い可能性のある）、これまでに記録されていない線量についての質問にどう答えるか、といった問題が含まれている。

(ii) 多くの所属学会が、線量限度の変さらに対する正当性について、大きな心配があることと、放射線作業員間の混乱を述べている。これらの心配の本質には、次のことが含まれる：

(a) なぜ致命的影響と非致命的影響が同じ形で考えられているのか。この変更を支持する根拠は、害に直接関連するものではなく、顕著な損傷ではない眼の潜在的な変化に関するものである。

(b) 文献の見解は一致しておらず、結果に乏しい。この種の変更は、費用に多大な影響を及ぼすが、眼に対するリスク自体は小さいと考えられるかもしれない。

(c) このトピックに関するキーとなる国際機関（ICRP や IAEA）は、議論を十分にせず、急いだように見える。

新しい線量限度は、もっと作業員に分かりやすくつくられるべきである。

(5) 潜在的な費用への影響

この調査では、新しい線量限度によって課される追加の費用を示すことはできなかった。しかしながら、ほとんどの所属学会は、課される費用について、次のことを懸念している：

- (i) 追加の訓練
 - (ii) 追加の線量測定
 - (iii) 追加の遮へい
 - (iv) 公式的に多くの作業員を分類することが必要となる可能性
 - (v) 現行の専門家が線量限度に達する場合、特別なスタッフが必要となる可能性
 - (vi) 作業員に対する医学的な眼の検査を増やすこと
- #### (6) 一般的事項

受け取った質問票の回答は、さまざまな検討方法を示し、異なる視点で、特定の所属学会あるいは特定のグループの微妙な考え方の違いを反映している。

回答をまとめるとき、たとえば、次の三つの見地にかんがりの不一致が見られた：

- (i) 眼の水晶体の等価線量を低減するための手技の見直しと、それに伴う装置費用の増加
- (ii) 既存の白内障を有する、あるいは白内障の前段階を示している人々の雇用に関係するさまざまな影響
- (iii) 新しい眼の水晶体の等価線量限度に関係する将来の補償についての現在の認識

個々の国々によって選択と決定がなされるため、この報告書で考慮されたさまざまな見地が理解されるためには、意見交換をさらに進めていくことが有用であろう。

4. タスクグループの勧告

(1) 理解とガイダンス

(i) 眼の水晶体の放射線被ばくと白内障形成の間の基本的な関係には、さらなる研究と解明が求められる。このための調査にはサポートが与えられるべきである。

(ii) 致命的な確率的影響に対するものと、非致命的な確定的影響に対する線量限度が同じ数値で表されているこの勧告は、混乱を生じさせている。関係する国際機関が、新しい線量限度を術者にわかりやすく説明することが有益である。

(iii) これからのガイドラインには、眼の水晶体の線量が線量限度に近くなる可能性がある作業員を、正確に特定することが求められる。

(iv) IRPA 理事会は、眼の水晶体の線量をモニタリングするための勧告を考慮し、国際プロトコルを導くさらなる研究を促進すべきである。

(v) 適切なガイダンスは、規制機関から提供されるべきで、どのような変更が導入されても、時機を逸せずに行われるようにしなければならない。このガイダンスには、管理、防護手段、線量評価、そしてモニタリングシ

システムについての要件が含まれるべきである。

(2) 実用面

(i) 白内障データ（混濁のレベルと白内障の形成）を見つけ、調査し、報告するために新しいシステムが必要である。あるいは、その代わりに、既存のシステムを明確に比較できることが必要である。

(ii) $H_p(3)$ を評価するため、襟と鉛エプロン上に付けた全身線量計の妥当性と制限に関する一層の調査が必要である。IR 及び IC 術者の放射線誘発白内障に対する疫学調査：方法論の実現に関する (ELDO) プロジェクト*の結果は、大変有用な情報を提供している。

(iii) 新しい線量計、鉛メガネや遮へい板のような通常用いられる防護用具の効果をさらに調査し、訓練を通してその結果を使用者に周知することが必要である。

(iv) 眼の水晶体に対する新しい線量計及び防護用具のいずれもが快適に利用でき、医療手技の効率を顕著に妨げないことを確実にすることが重要である。

(v) 異なる作業と状況に対する眼の水晶体の防護手段の効果について情報を提供する研究が必要である。

(vi) 鉛メガネのいくつかのデザインは、散乱線の遮へいが不十分である。これらのメガネは再設計されるべきである。

(vii) 線量限度に近づくレベルの被ばくを受ける可能性のある作業員に対し、放射線被ばくの最適化が考慮されるべきである。

(viii) 緊急時被ばく状況に対し、公衆に対する放射線防護と、対応手順もまた、考慮されるべきである。

(3) 社会的、経済的、管理的な検討

(i) 経済的及び社会的な検討は、新しい水晶体の等価線量限度を各国の関連規制に取り入れる際に、十分に考慮されるべきである。

(ii) 各手順の総コストと要求される設備、またはそのどちらか、防護の既存の方法に対する現在のコストと眼の水晶体の被ばくを低減するために負う追加のコストの評価を示しつつ、コストの詳細を得ることは有用である。

(iii) 新しい線量限度により、もっとも高い被ばくをする可能性のある作業員集団に対して訓練を行うことが、強く求められることになる。防護の効果についての認識を充実させるとともに、最善の防護を達成するための防護具の使用についても訓練に取り組む必要がある。線量計を正しく装着することの重要性もまた、強調されなければならない。

(iv) 白内障やその前段階は、集団の中では比較的一般的である。このため、仕事の役割とその他の状況を踏まえて、これらの症状のある人々の雇用に関する手順をより明確に提案あるいは定義する必要がある。この際、二つの状況が関係する：

- a) 雇用を求める人々が差別されてしまうリスク
- b) 白内障の前段階を有する作業員が被ばくすることにより一層の視力低下が引き起こされるリスク

5. 日本との比較

日本でも、基本的に上記アンケート調査結果の内容は、ほとんど当てはまるものと考えられる。「移動労働者」については、欧州では国をまたいだ作業員の移動があるが、日本では国内の施設間を移動する労働者の意味に限定される。また、現時点では、国内における水晶体の被ばくの実態に関する具体的な情報は限られている。そこで、今後、新しい眼の水晶体の等価線量限度について考慮するためには、水晶体の被ばくが比較的高いグループ、たとえば IVR 術者等の被ばくに関する調査等が必要になると考えられる。

V 結 論

ICRP の示した計画被ばく状況下での職業被ばくに関連した新しい眼の水晶体の等価線量限度について、その科学的根拠に関しては、さまざまな検討課題が残されていると考えられるものの、ISO/IEC では水晶体線量測定のための線量計の規格策定が進められている。IAEA では安全基準に新しい水晶体の等価線量限度の記載が取り入れられ、さらには、線量限度を遵守するための技術的なガイドラインとなる報告書が作成された。IRPA のアンケート調査の結果では、多くの国々が各国の規制・基準へ新しい水晶体の等価線量限度を取り入れることに関しては、社会的、経済的影響があり、特に、一部の作業員に対する雇用への影響を懸念している。一方、国際的な動向を見据えるとともに、多くの作業員に対しては、線量限度を大きく下回ることから、従来の線量測定法の適用で作業員を管理できると考えていることがうかがえ

* データの収集方法及び収集されたデータの価値向上、及び欧州の IR 及び IC 術者の放射線誘発水晶体混濁のリスクに関する疫学調査の標準手順書を開発することを目的として、欧州の 4 機関（ベルギー原子力エネルギー研究所：SCK・CEN、フランス放射線防護原子力安全研究所：IRSN、フィンランド放射線・原子力安全センター：STUK、ドイツ連邦放射線防護庁：BfS）が 2012 年から 2013 年に実施したプロジェクト。作業員や患者の低線量放射線の健康リスクに関する課題を検討するため、2010 年に設立された欧州の 32 機関が参加しているプロジェクト (DoReMi) 内に設置。

る。わが国の法令適用についても、進展しつつある国際的な動向を把握し、取り入れ前に十分な検討が必要であろう。

これまで6回に分けて水晶体の放射線防護に関する専門研究会において議論した国内外における水晶体被ばく防護の現状と課題について取りまとめた。平成25年4月から検討を実施してきた本専門研究会は平成27年3月をもって終了した。現在、最終報告書を取りまとめ中である。

一方、水晶体の放射線防護に関する研究や調査や水晶体の等価線量限度に関する検討は国内外において現在も進行中である。保健物理学会として、今後もこれらの動きに注目するとともに、わが国の取り組みについて広く海外に発信していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV), 保健物理, **50**, 67-75 (2015).
- 2) IEC; Radiation protection instrumentation-Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC62387 (2012).
- 3) ISO; Radiological protection - Procedure for monitoring of the dose to the extremities and the lens of the eye, ISO 15382 (改訂中).
- 4) IAEA; GSR Part 3: Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards interim edition (2011).
- 5) IAEA; GSR Part 3: Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards (2014).
- 6) IAEA; Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye, TECDOC1731 (2014).

- 7) IRPA; International Radiation Protection Association, Available at: <http://www.irpa.net/>, 閲覧2014年5月7日.
- 8) J. BROUGHTON, M. C. CANTONE, M. GINJAUME and B. SHAH; Report of task group on the implications of the implementation of the ICRP recommendations for a revised dose limit to the lens of the eye, *J. Radiol. Prot.*, **33**, 855 (2013).



赤羽 恵一 (あかはね けいいち)

1987年3月東北大学理学部物理学第二学科卒業。国立公衆衛生院放射線衛生学部研究員, 大分県立看護科学大学環境科学研究室助手を経て, 現在は放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト医療被ばく研究推進室室長。専門は医療放射線防護。

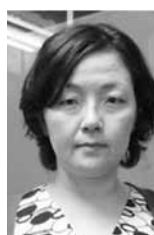
E-mail: akahane@nirs.go.jp



大口 裕之 (おおぐち ひろゆき)

1957年大阪市生まれ。1982年に千代田保安用品(株)(現,千代田テクノ(株))に入社。現在,個人線量計(ガラスバッジ, D-シャトル等)全般の計測技術統括業務及び開発業務に従事。

E-mail: ohguchi-h@c-technol.co.jp



横山 須美 (よこやま すみ)

1994年に日本原子力研究所入所。2008年に藤田保健衛生大学に移り, 環境放射線, 加速器施設の空气中放射性ガス・粒子挙動, 医療従事者の被ばく防護に関する研究等に取り組んでいる。最近はリスクコミュニケーションに関心あり。

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

解 説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I) —わが国における水晶体線量評価に関する研究と原子力発電所の線量管理の現状—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
加藤 昌弘*⁷, 川浦 稚代*⁸, 黒澤 忠弘*⁷, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁹, 浜田 信行*³,
林田 敏幸*¹⁰, 堀田 豊*¹¹, 山崎 直*¹², 横山 須美*¹³

(2015年9月4日受理)

(2015年10月7日再受理)

Addendum Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (I) —Eye Lens Dosimetry R&D, and Radiation Management and Estimated Eye-Lens Exposure for Workers in Japanese Nuclear Power Plants—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IIMOTO,*² Takeshi ICHIJI,*³ Satoshi Iwai,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶ Masahiro KATO,*⁷
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁸ Tadahiro KUROSAWA,*⁷ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁸ Nobuyuki HAMADA,*³
Toshiyuki HAYASHIDA,*¹⁰ Yutaka HOTTA,*¹¹ Tadashi YAMASAKI*¹² and Sumi YOKOYAMA*¹³

The Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye was established under the Japan Health Physics Society in April, 2013 (completed, March, 2015). The Committee looked at new/ revised documents and standards related to the eye lens published by international organizations such as the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). The Committee also examined recent and previous studies related to eye-lens radiation exposure and dosimetry in Japan. These findings were published in this journal as the Interim Report of the Committee. Since then, the Committee expanded its activity to give an overview the current progress of eye-lens dosimetry R&D at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, along with research related to radiation management and estimated eye-lens exposure of Japanese nuclear-power-plant workers (including those at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant) for publishing an addendum Committee report. These additional findings are reported here.

KEY WORDS: dosimetry, exposure, eye lens dose, workers in nuclear power plants, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye.

I はじめに

2013年4月から2015年3月にかけて、日本保健物理学会では、水晶体の放射線防護に関する専門研究会を設置した。この専門研究会では、国際放射線防護委員会 (ICRP) が新しい水晶体等価線量限度を2011年4月に発表したこと¹⁾から、水晶体等価線量限度の変遷、国際放射線単位及び測定委員会 (ICRU)、国際標準化機構 (ISO)、国際原子力機関 (IAEA) 及び国際放射線防護学会 (IRPA) といった関連のある国際機関がどのような検討を進めてきた／いるのか、さらには、わが国におけ

る水晶体の線量評価・測定、作業者の水晶体の被ばくレベルや防護についてどのようなことが明らかになっているのかを把握するため、これらの調査を進めてきた。調査の途中経過については、本学会誌に専門研究会中間報告書として6編の解説記事を報告した²⁻⁷⁾。

その後も、専門研究会では、最終報告書のとりまとめに向けて、わが国の線量評価技術開発の現状、実用原子力発電所の線量管理や福島第一原子力発電所の線量管理の現状について調査を進めてきた。本稿では、中間報告書以降に専門研究会で調査及び議論したこれらの内容について報告する。なお、福島第一原子力発電所の線量管

理の現状については、中間報告書にも記載があるが⁶⁾、本稿では、それ以降に進捗のあった事項及びより実際の現場に近い視点から、特に、 β 線源による被ばくに関して、どのような場所が放射線源となったのか、どのように管理が行われていたかを述べる。

ICRP が新しい水晶体等価線量限度を発表する 2011 年以前に、水晶体の等価線量測定や評価が行われていなかったわけではない。しかし、わが国の場合、2001 年度の法令改正時に、3 mm 線量当量の測定義務が課されなくなった。このため、過去にわが国で実施されていた水晶体の線量測定方法を記憶している人も少なくなってきたのが現状である。そこで、改めてこれらの方法を整理するとともに水晶体の線量評価の必要性についても検討した。これらの結果については別途報告する⁸⁾。

欧州共同体 (EU) では、2013 年 12 月に指令 (Directive) が発行されており⁹⁾、2018 年 2 月までに加盟国は法令に新しい水晶体等価線量限度を取り入れることとなっている。欧州では、これまでに多くの放射線白内障の疫学研究が実施されてきたが、現在も新しい研究が進められつつある。

一方、米国でも新たな水晶体等価線量限度の取り入れについての検討を開始しており、欧州とは異なる決定を下すとされている。このように、各国において、更なるさまざまな動きがあることから、これまでに報告していない国外動向についても別途報告する¹⁰⁾。

II 産業技術総合研究所における水晶体線量評価技術の開発

1. 開発の経緯

ICRP や IAEA などの国際機関による水晶体等価線量限度の変更に伴い、各国の標準研究所も 3 mm 線量当量に関する標準開発を進めている。ドイツの物理工学研究所 (PTB) では、 β 線源に対する 3 mm 深さの組織吸収線量の標準を開発している¹¹⁾。またヨーロッパの ORAMED プロジェクトで、光子に対する 3 mm 線量当量の換算係数の評価¹²⁾など進められた。さらに国際規格である ISO でも、3 mm 線量当量の導入が検討されている。このような状況を踏まえ、日本国内でも 3 mm 線量当量の測定に関して、トレーサビリティの確保が重要であると考え、産業技術総合研究所 (産総研) において、標準の開発を 2014 年度から開始している。

2. β 線源に対する 3 mm 線量当量について

β 線のような透過力の弱い放射線では、皮膚組織への影響を評価する指標である 70 μ m 線量当量が重要と考えられ、従来よりこの値を導出する元となる 70 μ m 組織吸収線量の絶対測定が、外挿電離箱を用いて行われてきた。Fig. 1 に外挿電離箱の外観図を示す¹²⁾。外挿電離箱は非常に薄い入射窓を持っており、膜を通過した電子による電離量を、電荷収集領域の体積を変化させて測定する。

*1 (国研) 放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inageku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.
E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.
E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財) 電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.
E-mail: ichiji@criepi.denken.or.jp, hamada-n@criepi.denken.or.jp

*4 (一社) 原子力安全推進協会; 東京都港区芝 5-36-7 (〒108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.
E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 (株) 千代田テクノ; 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒113-8681)
Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi, Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

*7 (国研) 産業技術総合研究所; 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2 (〒305-8568)

National Metrology Institute of Japan; Central 2 Umezono 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan.

*8 名古屋大学; 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20 (〒461-8637)
Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*9 (国研) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki 319-1194, Japan.
E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*10 東京電力 (株); 東京都千代田区内幸町 1-1-3 (〒100-8560)
Tokyo Electric Power Company, 1-1-3, Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8560, Japan.

*11 日本原燃 (株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付 4-108 (〒039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkashomura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.
E-mail: yutaka.hotta@jnfl.co.jp

*12 中部電力 (株); 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.
E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*13 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyooka-shi, Aichi 470-1192, Japan.
E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

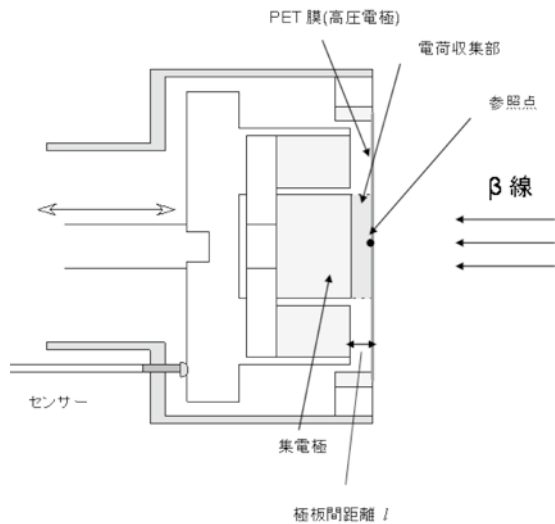


Fig. 1 外挿電離箱の概要図

また組織 70 μm 深さの吸収線量を評価するため、入射面の線源側にポリエチレンテレフタレート (PET) でできた約 12 μm ~ 100 μm の厚さの付加フィルターを設置し、付加フィルターの厚さの関数として電流測定を行う。これによって得られた減衰曲線を内挿することにより、組織深さ 70 μm での吸収線量を評価している。70 μm 組織吸収線量は、 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対して評価している。

β 線の 3 mm 線量当量は、70 μm 線量当量の場合と測定手法は大よそ同様に、異なるのは減衰曲線を測定する深さ (付加フィルターの厚さ) と、測定する深さにおける電子スペクトルの評価である。このうち測定する深さにおける減衰曲線の値の違いが、測定値に大きな影響を与える。Fig. 2 に $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対する減衰曲線の測定値を示す¹³⁾。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源でも、組織 3 mm の深さ (質量厚 300 mg/cm^2 に対応) では、吸収線量が 70 μm と比較して 40% 程度まで減少する。800 keV 以下のエネルギーの β 線が支配的な ^{85}Kr や ^{147}Pm は、組織深さ 3 mm まで β 線が到達しないことから、産総研では $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対する 3 mm 組織吸収線量を評価している。Fig. 2 からも分かるように、3 mm 深さでの吸収線量は、その厚さによって大きく変化している領域となっている。そのため産総研では、減衰曲線のデータを高精度に評価するための実験を進めている。

3. 光子の 3 mm 線量当量について

光子の線量当量については、物理量として空気カーマが基準となっている。測定によって評価された空気カー

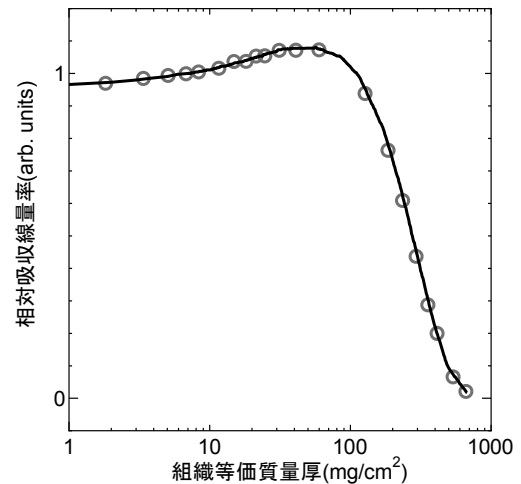


Fig. 2 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対する付加フィルターによる減衰

マに対して、空気カーマ-各種線量当量への換算係数を用いて、線量当量を評価している。光子の空気カーマの絶対測定は、産総研では γ 線に対してグラファイト壁空洞電離箱 (Fig. 3)、X 線に対しては自由空気電離箱を用いている (Fig. 4)。

空気カーマから周辺線量当量や個人線量当量 (実用量) への換算係数については、実測が非常に困難であることから、シミュレーションによって行われている。ICRU では、周辺線量当量と方向性線量当量について ICRU 球の各深さでの吸収線量で定義している¹⁴⁾ (Fig. 5)。また個人線量当量については、ICRU スラブファントムの各深さでの吸収線量で定義している¹⁴⁾ (Fig. 6)。3 mm 線量当量については、ICRU では明確に換算係数は提示されておらず、現在各研究者によって定義も含めた検討が行われている。ORAMED では、スラブファントムのみならず頭部を模擬した円柱ファントムに対する $H_p(3)$ などさまざまなファントムに対して比較検討が行われてい



Fig. 3 グラファイト壁空洞電離箱

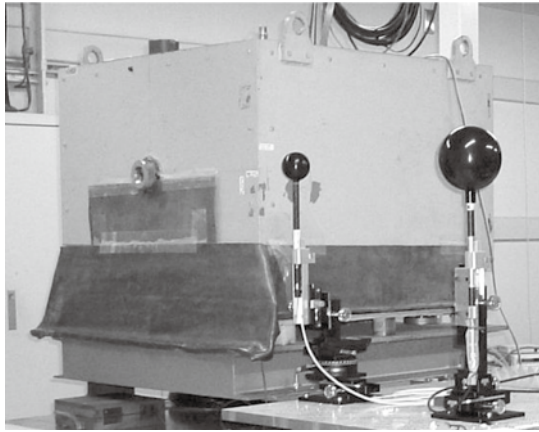


Fig. 4 自由空気電離箱

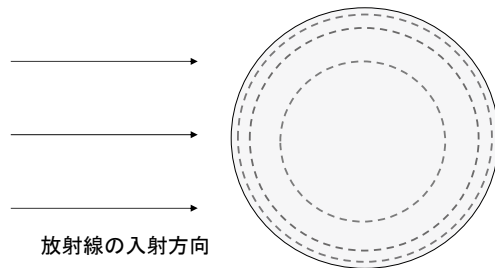


Fig. 5 ICRU 球による周辺線量当量及び方向性線量当量の定義

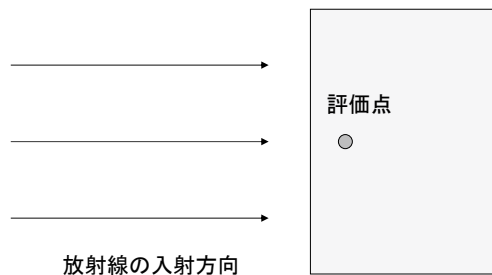


Fig. 6 ICRU スラブファントムによる周辺線量当量及び方向性線量当量

る^{12, 15)}。水晶体の位置や形状を考えると、横方向から照射された場合でも水晶体の吸収線量は正面方向と大きく変わらないことが想像できる。しかし、現状のスラブファントムで横方向からの照射を考えると、ファントム内での吸収が大きく働き 3 mm 深さに到達するまでに大きく減衰し過小評価となってしまふ。そこで換算係数を評価する際の定義として、ICRU スラブファントムではなく、頭部を模擬した円柱ファントムが検討されている。産総研においても、形状の異なるファントムに対する換算係

数のシミュレーションを EGS5 コード¹⁶⁾を用いて進めている。

4. その他 3 mm 線量当量に関する検討事項

3 mm 線量当量を計測する線量計で、検討が必要な項目として校正におけるファントムの選定がある。 $H_p(10)$ 用の個人線量計は、胸等に装着するため人体体幹部を模擬した水またはアクリル製のスラブファントムに設置して照射し校正を行う。また指に装着して $H_p(0.07)$ を評価するリング線量計などは、指を模擬したロッドファントムに装着して校正を行う。ISO の標準場・線量計校正に関する規格を検討するワーキンググループでも、ファントムの形状について検討を行っている。産総研でも ORAMED で提唱されている 20 cm 直径、20 cm 長の頭部ファントムを制作し、従来のスラブファントムと実際の光子場における線量計の応答等について比較検討を行う予定である。

また、光子の 3 mm 線量当量で重要となる、介入放射線治療 (IVR) 機器周辺の光子スペクトルについて、実測を開始している。これらのデータを基に、X 線の最適な校正場の検討や効果的な遮への検討等が効果的に行えるものとする。

III 原子力発電所における水晶体被ばく管理の現状

1. 全体状況

発電用原子炉施設、研究開発段階発電所原子炉施設、加工施設、再処理施設、廃棄施設及び貯蔵施設に関する情報については、独立行政法人原子力安全基盤機構によって「原子力施設運転管理年報」にまとめられ、公表されてきた¹⁷⁾。しかしながら、2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、原子力規制委員会が発足したことにとともに、2014 年度に統合された。

原子力施設運転管理年報¹⁷⁾の中で上記の施設における放射線業務従事者の線量について、施設ごとの線量分布も報告されている。しかし、実効線量の記載がなく、水晶体被ばくに関しては記載されていない。これは、施設内ではほぼ均等なガンマ線被ばく場と考えてよい状態であり、実効線量のみを評価すればよいとしているためである (水晶体の被ばく線量 = 実効線量)。

2013 年度版の年報¹⁷⁾では、2012 年度における実用発電用原子炉施設の放射線従事者の延べ人数は約 62,400 人、総線量は 90.16 人・Sv、平均線量は 1.4 mSv、最大線量 54.1 mSv (福島第一原子力発電所特定高線量作業従事者: 緊急被ばく限度 100 mSv) であったと報告され

ている¹¹⁾。また、2001年度4月1日を始期とする5年間につき100 mSvとする線量限度が法令において規定されているが、東京電力福島第一原子力発電所を除き、2012年度末においてこの線量限度を超えた放射線業務従事者はいなかった。女子（実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第9条第2項他に規定する女子）¹⁸⁾についても3か月間につき5 mSvの線量限度を超えた放射線業務従事者はいなかった。

Fig. 7に1993年度より2012年度の実用発電用原子炉施設における放射線業務従事者の延べ人数及び総線量の年度別推移を示す¹⁷⁾。2010年度から2012年度においては、福島第一原子力発電所事故の影響が含まれている。このため、2011年度の総線量は例年の3倍近く高くなっている。しかしながら、2012年度には例年の値とほぼ同レベルとなっている。

放射線業務従事者の線量管理は施設ごとで実施しているが、放射線業務従事者が複数の原子力事業所を移動した場合であっても、他施設での被ばく歴を認識した管理が各施設において実施されている。また、発電所等の原子力施設における放射線業務従事者については、一元的に登録管理及び記録の保管が行われている。

2. 中部電力における線量管理の現状

実用原子力発電所の線量管理の一例として、中部電力浜岡原子力発電所では、放射線被ばく管理は電子線量計を用いて行っている。水晶体の被ばく管理は、実効線量に β 線による線量を加えて評価している。 β 線被ばくが考えられる作業場（機器分解等の β 線核種による汚染が考えられる場所等）では3線種用電子線量計を装着する

ことにより、 β 線被ばくの評価を行っている。ただし、現実としては、記録レベルとしている0.1 mSvを超える β 線による被ばく線量が確認されたことはない。

3. 原子力発電所における水晶体被ばく線量管理に関する課題

上記で述べたように、実用原子力発電所では、福島第一原子力発電所事故を除き、通常の計画被ばく状況の管理下においては、局所被ばくが問題となる β 線による被ばくが確認されたことがなく、実効線量についても線量限度を超えることはない。

今後、わが国の法令において、水晶体の線量限度が引き下げられたとしても、専用線量計装着が必要となる従事者は非常に限られている。このため、水晶体の線量が限りなく0に近い数多くの作業者に対して測定を義務付けるといった非合理的な管理を行うのではなく、現実に即した方法で水晶体の線量を評価すべきである。

IV 東京電力福島第一原子力発電所における放射線管理の状況

1. 実効線量の管理の現状

東京電力福島第一原子力発電所では2011年3月11日に発生した事故以降、事故収束及び廃炉措置に向けた作業を実施しており、現在でも月に10,000人前後の作業員が廃炉措置に向けて発電所構内で従事している。事故初期の事故収束作業を実施していた時期は高線量の被ばくをしており、中でも内部被ばく線量は特に高くなっている。これは放出された¹³¹Iの体内摂取による影響が大きく甲状腺等価線量は最大で10,000～15,000 mSvのバ

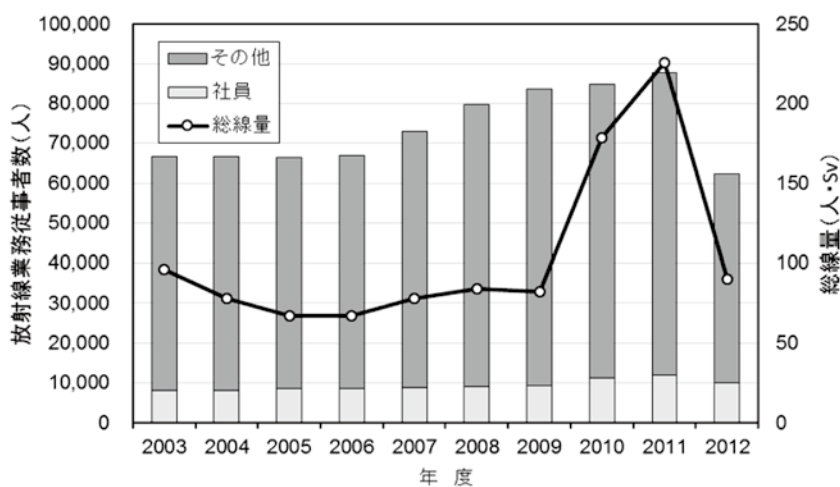


Fig. 7 実用原子力発電所の放射線業務従事者数及び総線量の推移

ンドに2人が分布している¹⁹⁾。

外部実効線量については、最大で199.42 mSvとなっている。2011年12月16日のステップII達成以降、厚生労働省の通達に基づき一部の特例者を除き実効線量が100 mSvを超えた作業員は放射線業務に従事していない。また、一部の特例者においても2012年5月1日以降は放射線業務に従事していない。なお、実効線量が100 mSvを超えたのは、「平成二十三年東北地方太平洋沖地震に起因して生じた事態に対応するための電離放射線障害防止規則の特例に関する省令」(厚生労働省)及び「平成二十三年東北地方太平洋沖地震に起因して生じた事態に対応するための電離放射線障害防止規則の特例に関する省令を廃止する等の省令」(厚生労働省)に基づき2011年3月11日から2011年12月15日までの間となる。

2. 水晶体等価線量評価の現状

水晶体等価線量については本来3 mm線量当量で評価するものであるが、国内においては厚生労働省の通達により放射線の種類及びエネルギーを考慮して1 cm線量当量又は70 μ m線量当量のいずれか適当な方法で評価することになっている²⁰⁾。

事故初期の福島第一原子力発電所の作業現場の放射線の線源としてはガンマ線が主であり^{21, 22)}、また、事故初期は福島第一原子力発電所免震重要棟屋外の発電所構内全域で全面マスク着用としていた。このことから事故初期(後述の「 β 放射線管理対象エリア」を設定するまで)は主に警報付きポケット線量計(APD)などによる1 cm線量当量の測定値にて水晶体等価線量を評価していた。

3. β 放射線場における線量管理の現状

事故後、タービン建屋地下の滞留水を処理するための水処理設備を設置して運用を開始した。処理した水の一部は、1号機～3号機の炉心冷却のための注水用としても使用している。この水処理設備にセシウム吸着装置を設置しており、セシウム吸着装置を通過後の汚染水は⁹⁰Sr/⁹⁰Yが主たる線源となった。

このため、2011年8月には β 放射線管理対象エリアを設定し、管理を開始している。具体的には「 $(\gamma + \beta) / \beta$ 」の線量比で4倍を超えるまたは超えるおそれのあるエリアを β 放射線管理対象エリアとして設定している²³⁾。これは、2011年3月14日に福島第一原子力発電所の緊急作業線量限度のうち、実効線量の限度が

250 mSvに引き上げられていたことから、⁹⁰Sr/⁹⁰Yが主たる線源となる環境での作業によって末端部(皮膚)の線量限度(皮膚の緊急線量限度は1,000 mSvのままであった)が超えないように考慮して設定したものである。

β 放射線管理対象エリアで汚染水を取り扱う作業の基本点な装備は、全面マスク、作業用不織布カバーオール+アノラック、布手袋+ゴム手袋2重、靴下+長靴としており、 β 汚染が高いタンク等の解体作業等においては特殊なゴム手袋等を個別に着用している場合もある。また、個人線量計としては、APDに加え末端部被ばく用としてリストバッジまたはリングバッジを着用することとしている。

現場では高 β 線が検出されている事例があり、2012年2月3日に確認された淡水化装置(逆浸透膜)の濃縮水貯槽においてタンクの継ぎ手部ににじみが確認され、にじみのある継ぎ手部の直下のコンクリート基礎部とタンクフランジの隙間に局所的に高い線量が確認されており、線量としては1 cm線量当量率で22 mSv/時、70 μ m線量当量率で2,000 mSv/時が確認された²⁴⁾。

福島第一原子力発電所での水晶体の線量評価としては、高 β 線エリアでは全面マスクを着用しているものの全面マスク面体の遮へいは考慮せず、胸部(女性の場合は腹部)に着用している個人線量計の70 μ m線量当量にて評価している。このため、真の水晶体等価線量値よりかなり保守的な線量評価を行い、その保守的な評価値を記録していることになる。

なお、タンク底部の残水を除き2015年5月27日に海水成分の多いRO濃縮塩水(逆浸透膜装置の廃液であり高濃度ストロンチウムを含む高濃度汚染水)の処理が完了した²⁵⁾。これにより⁹⁰Sr/⁹⁰Yによる高 β 線汚染水はタンク内からほぼなくなった。また、現在では吸着装置にてセシウムとストロンチウムを吸着しており、吸着装置にて吸着後の水はストロンチウム処理水と呼んでおり、多核種除去設備にて再浄化を進めているものである²⁶⁾。このため2015年5月27日以降は、⁹⁰Sr/⁹⁰Yが主たる線源となる環境は大幅に縮小している。

4. 今後の課題

厚生労働省では2014年6月4日に「東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究のあり方に関する専門家検討会」の報告書を公表しており、今後の疫学的研究において白内障を含む非がん疾病を可能な限り網羅するべきであるとしている²⁷⁾。

今後の長期におよぶ廃炉作業及び厚生労働省による疫

学的研究を鑑みると全面マスク面体の遮へい効果等を適切に反映したより過度に保守的でないより正確な水晶体の線量評価方法の確立とそれに基づく線量評価が望まれる。

参 考 文 献

- 1) ICRP; 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) (2012).
- 2) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (I), 保健物理, **49**, 145–152 (2014).
- 3) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (II), 保健物理, **49**, 153–156 (2014).
- 4) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (III), 保健物理, **49**, 171–179 (2014).
- 5) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV), 保健物理, **50**, 67–75 (2015).
- 6) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V), 保健物理, **50**, 76–89 (2015).
- 7) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (VI), 保健物理, **50**, 128–137 (2015).
- 8) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 加藤昌弘, 川浦稚代, 黒澤忠弘, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 林田敏幸, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II), 保健物理, **50**, 257–261 (2015).
- 9) The European Commission; Directive 2013/59/ Euratom-protection against ionising radiation, (2013). Available at: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-59-euratom-protection-against-ionising-radiation>, 閲覧 2015 年 8 月 4 日.
- 10) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (III), **50**, 262–268 (2015).
- 11) J. BRUNZENDORF; Determination of depth-dose curves in beta dosimetry, *Rad. Prot. Dosim.*, **151**, 203–210 (2012).
- 12) J. DAURES; J. GOURIOU and J. M. BORDY; Conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent $H_p(3)$ for eye-lens dosimetry, Rapport CEA-R 6235 (2009).
- 13) 加藤昌弘, 黒澤忠弘, 齋藤則生; β 線 3 mm 線量当量に用いる組織等価物質の特性評価, 第 29 回放射線検出器とその応用, つくば, 2015 年 2 月, RADIATION DETECTORS AND THEIR USES, Proceedings of the 29th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses in KEK, accepted.
- 14) ICRU; Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRU Report 57 (1998).
- 15) G. GUALDRINI, P. FERRARI and R. TANNER; Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutron from thermal to 15 MeV, *Radiat. Prot. Dosim.*, **157** (2) (2013).
- 16) 加藤昌弘, 黒澤忠弘, 齋藤則生; EGS5 を用いた眼科治療用線源の補正係数の導出, 第 21 回 EGS 研究会アブストラクト集 (2014).
- 17) 原子力安全基盤機構; 原子力運転管理年報, 平成 25 年度版, ISSN 1347-0493 (2013).
- 18) 平成 13 年 21 日付経済産業省告示第百八十七号「実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」.
- 19) 福島第一原子力発電所甲甲状腺等価線量分布表; 東京電力ホームページ, http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/150130j0508.pdf, 閲覧 2015 年 7 月 24 日.
- 20) 平成 13 年 30 日付基発第 253 号厚生労働省労働基準局長通達など.
- 21) タービン建屋溜まり水分析結果 (参考配布 2011.

- 5.22)；東京電力ホームページ，http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110522_04-j.pdf，閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 22) UNSCEAR; UNSCEAR 2013 Report volume 1 (2014), http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html, 閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 23) 地下貯水槽からの漏えい関連作業におけるリングバッジ, γ ・ β APD 不携帯について (2013.4.22)；東京電力ホームページ，http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130422_11-j.pdf，閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 24) 平成 24 年 1 月 1 日～12 月 31 日実績 (p46-p47)；東京電力ホームページ，http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/past-progress/images/past_121231-j.pdf，閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 25) 長期ロードマップの進捗状況 (概要版) (2015.5.28)；東京電力ホームページ，http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/d150528_05-j.pdf，閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 26) 汚染水の浄化処理；東京電力ホームページ，<http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/alps/index-j.html>，閲覧 2015 年 7 月 24 日。
- 27) 東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研

究のあり方についてとりまとめ；厚生労働省ホームページ，<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000047387.html>，閲覧 2015 年 7 月 24 日。



加藤 昌弘 (かとう まさひろ)

2004 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科化学専攻博士課程修了。博士 (理学)。2004 年 4 月 (独) 産業技術総合研究所に入所。現在は分析計測標準研究部門放射線標準研究グループ主任研究員。

β 線や γ 線の標準測定手法の開発に従事。

E-mail: masahiro-katou@aist.go.jp



黒澤 忠弘 (くろさわ ただひろ)

2000 年東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士課程修了。工学博士。2000 年 4 月工業技術院電子技術総合研究所入所。2001 年組織変更に伴い，(独) 産業技術総合研究所となる。 γ

線，X 線の線量標準の開発，供給に従事。

解 説

水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II) —いつどのようにβ線3ミリメートル線量当量を測定・評価すべきか?—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
川浦 稚代*⁷, 黒澤 忠弘*⁸, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁹, 浜田 信行*³, 林田 敏幸*¹⁰,
堀田 豊*¹¹, 山崎 直*¹², 横山 須美*¹³

(2015年9月4日受理)

(2015年10月16日再受理)

Addendum Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (II) —When and How Should the Dosimetry of Beta $H_p(3)$ Be Made?—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IMOTO,*² Takeshi ICHII,*³ Satoshi IWAI,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁷ Tadahiro KUROSAWA,*⁸ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁹ Nobuyuki HAMADA,*³
Toshiyuki HAYASHIDA,*¹⁰ Yutaka HOTTA,*¹¹ Tadashi YAMASAKI*¹² and Sumi YOKOYAMA*¹³

In a mixed field of photon and beta radiations, the same dose assigned to skin is normally assigned to the dose to the lens of the eye as a conservative estimate of $H_p(3)$. In exceptional cases where a very high beta dose might be imparted of the same order with the dose limit, however, the conservatively biased dose must be too limiting, and thereby an accurate estimate of beta $H_p(3)$ is desirable. This addendum report of the Japan Health Physics Society Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye presents a practical proposal of when and how the dosimetry of beta $H_p(3)$ should be made.

KEY WORDS: beta rays, the lens of the eye, dosimetry, personal dose equivalent at a depth of 3 mm ($H_p(3)$).

I はじめに

3 mm 線量当量の測定・評価は、現在の個人被ばく管理では必須とはされていない。これは、「3ミリメートル線量当量は、(中略)測定の義務を原則として課さない」及び「通常、1センチメートル線量当量又は70マイクロメートル線量当量のうち、放射線の種類やエネルギー等を考慮して適切と判断される方をもって眼の水晶体の等価線量の評価値とすることができる」とする1999年4月の放射線審議会基本部会の「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針針¹⁾」を基礎とし、2001年度から施行された放射線防護関係法令²⁾に基づく。測定対象としての3 mm 線量当量の撤廃(あるいは免除)は、一般的な作業場の放射線状況や当時の放射線測定器の仕様に鑑み、そのモニタリングの要件を整理し、単純化した結果と言えるものであったが、高エネルギーのβ線による被ばく状況においては、この単純化は線量の過

大評価をもたらす。

保健物理学会水晶体の放射線防護に関する専門研究会では、これまでに専門研究会で議論をされた内容を踏まえ、報告を行ってきた³⁻⁹⁾。本稿では、追加報告として、2000年度以前にわが国で行われていたβ線3 mm 線量当量の測定評価の方法について紹介するとともに、福島第一原子力発電所の事故復旧作業の現場などのような⁹⁰Sr-⁹⁰Yβ線による高線量(率)の放射線環境下での適用を念頭に、その測定及び評価の必要性と具体的な対応について述べる。

II β線による線量の測定・評価方法

β線による被ばくの防護においては、体表面からβ線の飛程の範囲内にある臓器・組織、具体的には皮膚、水晶体及び生殖腺(精巣)が対象となる。これらのうち日常的にモニタリングされるのは皮膚と水晶体についてであり、線量を評価すべきポイントは体表面からそれぞれ

れ 70 μm , 3 mm の深さに位置するとされる。これらの深さにおける β 線による線量を評価する際に好都合なことは、物質中における β 線の線量深さ分布が、入射する物体の材質によってあまり変化しないという事実である¹⁰⁾。このことは、他の材質で測定又は計算された値を軟組織での値に換算したり、目的とする深さとは異なる深さで測定された値をその線量深さ分布に基づいて当初の目的とする深さでの値に補正したりすることを可能にした。わが国でも 1960 年代前半には γ 線用フィルム線量計を用いて、厚さの異なるプラスチックフィルタの下側のフィルムの黒化度の違いから β 線による皮膚線量と水晶体線量を評価する方法が開発され¹¹⁾、同様の考え方に基づく測定・評価は、その後、商業サービスのフィルムバッジや熱ルミネセンス線量計でも行われた。

1988 年に改正、1989 年に施行された放射線防護関係法令では、皮膚に加えて水晶体に対する線量限度が新たに定められ、それに対応する実用量 (3 ミリメートル線量当量) があわせて導入された¹²⁾。これにあたって、当時使用されていた個人線量計は、 β 線 70 μm 線量当量の評価値から β 線 3 mm 線量当量を算出するなどの対応を採った^{13, 14)}。その一例として、当時の JIS Z4323-1997 広範囲用フィルムバッジの解説¹⁵⁾ で示された β 線 3 mm 線量当量評価法を以下に示す。

$$3 \text{ mm 線量当量} = 70 \mu\text{m 線量当量} \times e^{-\mu \times (300-7)} \quad (1)$$

ここで、 μ は、 β 線のエネルギーで決まる質量減弱係数 (cm^2/g) であり、指数項は、深さ 300 mg/cm^2 (比重 1 で 3 mm に相当) と深さ 7 mg/cm^2 (同 70 μm に相当) の二点の間における β 線 70 μm 線量当量の減衰を表す。これは、 β 線 70 μm 線量当量を指示するよう設計・校正された測定器に、(1) 式の指数項と同等の減衰を与えるフィルタを取り付けることで、その指示値を β 線 3 mm 線量当量として読み替えることが可能であることを意味する。また、70 μm 線量当量だけでなく 3 mm 線量当量も決定された β 線校正場¹⁶⁾ の開発も当時進められ、そうした校正場を利用すれば、測定器の指示値を 3 mm 線量当量に直接関連付けることも可能であった。

III 問題点の提示と測定評価の必要性

β 線による高線量 (率) 環境下における 3 mm 線量当量の測定及び評価に係る問題点を明らかにするために、具体的な数値の例を挙げてみる。ここでは、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線と ^{137}Cs γ 線の混在する放射線場において、 β 線 70 μm 線量当量で 100 mSv, γ 線 1 センチメートル線量当量 (以下、「1 cm 線量当量」と記す) で 10 mSv が個人線量計によって評価された状況を想定する。 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線の理想的な平行ビームの場合、 β 線 3 mm 線量当量は β 線 70 μm 線量当量の約 0.2 倍¹⁷⁾ の 20 mSv となる。厚さ 3 mm 相当のアイピース (視野カバーと呼ぶこともある) を備える全面式呼吸保護具を装着した場合、同じ程度の線量低減が

*1 (国研) 放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒 263-8555)
National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inageku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.
E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuz@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)
The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.
E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財) 電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒 201-8511)
Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.
E-mail: ichiji@criepi.denken.or.jp, hamada-n@criepi.denken.or.jp

*4 (一社) 原子力安全推進協会; 東京都港区芝 5-36-7 (〒 108-0014)
Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.
E-mail: iwai.satoshi@genanshin.jp

*5 (株) 千代田テクノ; 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒 113-8681)
Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒 622-0041)
Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi, Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041, Japan.

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20 (〒 461-8637)
Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-

shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (国研) 産業技術総合研究所; 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2 (〒 305-8568)

National Metrology Institute of Japan; Central 2 Umezono 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan.

*9 (国研) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒 319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*10 東京電力 (株); 東京都千代田区内幸町 1-1-3 (〒 100-8560)
Tokyo Electric Power Company, 1-1-3, Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8560, Japan.

*11 日本原燃 (株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付 4-108 (〒 039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkashomura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jfnl.co.jp

*12 中部電力 (株); 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒 437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*13 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒 470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyooka-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

さらに期待できるので、保護具内側の β 線3mm線量当量は、外側の β 線70 μ m線量当量の $0.2 \times 0.2 = 0.04$ 倍の4mSv程度まで下がると概算される。 γ 線3mm線量当量については、呼吸保護具による遮へい効果は比較的小さいため、保護具内側の線量当量は外側の γ 線1cm線量当量と大きく変わらないであろう。したがって、当該被ばく状況における保護具内側の3mm線量当量は、 β 線と γ 線の合計で14(=4+10)mSvとなる。

現在、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示(以下、「線量告示」と記す)第11条では、「水晶体の等価線量は、1cm線量当量又は70 μ m線量当量のうち、適切な方とする」とされている¹⁸⁾ので、上記の状況においては、前者の1cm線量当量を採れば10mSv、後者の70 μ m線量当量を採れば110(=100+10)mSvが3mm線量当量のかわりに水晶体等価線量として記録される。 β 線と γ 線が混在する条件では、値が大きくなる70 μ m線量当量(110mSv)が通常記録されるわけであるが、この場合、14mSvに対して約8倍もの過大評価となり、「適切」とは言い難い。障防法及び電離則等の関係通達¹⁹⁻²¹⁾では、線量告示と同様に「適切な方とする」ことに加えて、この代替評価が「著しく過大となる場合については作業場所の線量(率)の位置分布やエネルギー分布の測定等に基づき推定する」との説明があり、また、(財)原子力安全技術センター(現(公財)原子力安全技術センター)の個人被ばく管理マニュアル²²⁾にも同様の趣旨の解説がある。これらはいずれも、軟X線や β 線(電子線)のような弱透過性放射線の場合、70 μ m線量当量をそのまま割りあてるのでは3mm線量当量を過大に記録する場合があるという事実を踏まえたうえで、必要に応じて実態に即したより弾力的な線量評価を行うことを容認するものである。

上記の想定のような⁹⁰Sr-⁹⁰Y β 線による高線量の被ばく状況においては、水晶体の線量評価は、これらの通達等の考え方にこそ基づくべきである。その理由は少なくない。まず、高線量になればなるほど正確な線量評価が必要なことは防護における基本的な考え方である。線量限度近くでの過大評価は、個人のリスク評価として何ら意味のある数値にもならないし、その個人に対する不当な就労制限になりかねない(結果的にそのしわ寄せは作業者の増員になる)。また、実態とかけ離れた過大な被ばく記録は、作業者の不安を必要以上にかきたてたり、防護装備の効果が記録に反映されず装備そのものの軽視につながったりするといった弊害もある。一見して良い

ことがあるとすれば、面倒な説明や評価の手間を省けることくらいである。

IV 具体的な対応

β 線70 μ m線量当量測定器を利用して β 線3mm線量当量を測定及び評価する方法は既にある。IIで紹介したフィルムバッジで使用されていた方法は、既存のほとんどの個人線量計に今なお適用可能であると考えられるし、あるいは、 β 線入射窓を備えた電離箱式線量当量率サーベイメータの中には、窓に取り付ける厚さ3mm相当のフィルタがオプション販売されているものもある。例えば、そうしたサーベイメータを使って β 線被ばくが生じる代表的な作業場所において70 μ m線量当量と3mm線量当量をそれぞれ測定し、それらの比((1)式の指数項に相当する)を個人線量計による β 線70 μ m線量当量に乗じることは、もっとも簡便かつ実用的な β 線3mm線量当量の評価方法である。この方法は、呼吸保護具や防護メガネ等(以下、「防護具」と記す)を実際に着けていたかどうかに関係なく作業者全員に一律に適用できるという利点を持つ。防護具の遮へい効果を β 線3mm線量当量の評価に反映する場合は、防護具を配置した状態で70 μ m線量当量と3mm線量当量の比をとればよい。その場合は、防護具の種類等によって遮へい効果に違いがあるかどうかを確認したり、作業のときに防護具を着けていたことを別途保証したりするなど個別的な対応がさらに必要になるであろう。

一方、上記のような β 線3mm線量当量の測定・評価は、どのような条件のときに行うべきであろうか。障防法及び電離則等の関係通達には「著しく過大となる場合(中略)推定する」とあるが、「著しく過大」とはどれくらいの過大評価を指すのか。ICRP Publication 75「作業者の放射線防護に対する一般原則」²³⁾の251項によれば、線量限度近くにおいて個人線量計によって評価される線量の総合的な不確かさは、 γ 線でファクター1.5、 β 線ではさらに大きくなるとされる。これらの数値は、現在使用されている個人線量計による線量評価の正確さの水準を記述したものであるが、線量評価の正確さにかかる目標(又は個人線量計の性能仕様)としばしば解釈される²⁴⁾。この考え方にならって、ここでは、「著しく過大」を「線量限度と同オーダーで、かつファクター2を超える」と解釈し、それに該当する場合、「必要な換算や補正をして、できるだけファクター1.5以内に収めるように努力する」ことは、 β 線による高線量被ばくという特別な状況において、理にかなった対応に思える。な

お、ここで「努力する」としたのは、作業現場で観測される3 mm線量当量/70 μ m線量当量比が一定ではなく幅があったり、防護具の種類によって遮へい効果に違いがあったりした場合、その個別対応が難しければ、保守的な値を採用して結果的にプラスのバイアスを持った線量評価をせざるを得ない場合があるためである。とはいえ、ここでの考え方は一案であり、具体的な数値やルールについては、最終的にはそれぞれの事業者が定めるべきである。

なお、3 mm線量当量を評価するべきとの本稿の論旨からやや外れるが、防護具内側の70 μ m線量当量を評価し、それを水晶体等価線量のかわりにするという考え方もある。 β 線に対する3 mm線量当量と70 μ m線量当量の本質的な違いを無視することになるので、最良評価とはいええないが、極端な過大評価は回避できる。胸等に着けた個人線量計から評価した β 線70 μ m線量当量に防護具の遮へい効果を乗じて補正してもよいし、既存の70 μ m線量当量用線量計を防護具内側に取りつけて直接測定するという手段もある。ただし、III章の数値例で示したように、防護具の着用によって線量限度に対してかなり小さくなる β 線3 mm線量当量（上記の例では4 mSv）を、小形のものとはいえ防護具内部に線量計を取り付けてまでして保守的に測定しなければならない必然性は大きいとは言えない。むしろ、胸等に着けた個人線量計の指示値に基づく評価が、その眼との位置の違いによる線量（率）勾配の有無を含め、妥当かどうかを確認する目的等に有用であると思われる。

V おわりに

過去にわが国で行われていた β 線3 mm線量当量の測定・評価の方法について紹介するとともに、福島第一原子力発電所の事故復旧作業の現場などのような ^{90}Sr - ^{90}Y β 線による高線量（率）の放射線環境下での適用を念頭に、具体的な数値例を挙げつつ、現行法令下におけるその測定・評価の必要性と具体的な対応について述べた。

胸等に取り付けた個人線量計から評価した β 線70 μ m線量当量をそのまま β 線3 mm線量当量、すなわち水晶体の等価線量とする方法は、過大な線量評価を与える。それが線量限度に近づくような場合は、3 mm線量当量と70 μ m線量当量の本質的な違いや、必要に応じて防護具による遮へい効果を考慮し、補正を行うべきである。

参 考 文 献

1) 文部科学省放射線審議会基本部会；外部被ばく及び

内部被ばくの評価法に係る技術的指針（平成11年4月）（1999）。

- 2) 原子力規制委員会；放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則（昭和三十五年九月三十日総理府令第五十六号 最終改正平成二六年一二日）（2014）。
- 3) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（I）—水晶体，白内障，ICRPが勧告した新たな水晶体等価線量限度の概要—，保健物理，**49**，145-152（2014）。
- 4) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（II）—わが国の水晶体被ばく線量測定及び評価方法の変遷—，保健物理，**49**，153-156（2014）。
- 5) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（III）—海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究—，保健物理，**49**，171-179（2014）。
- 6) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（IV）—ICRP及びICRUの水晶体線量評価法—，**50**，67-75（2015）。
- 7) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（V）—わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状—，**50**，76-89（2015）。
- 8) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，川浦稚代，立崎英夫，辻村憲雄，浜田信行，藤通有希，堀田 豊，山崎 直，横山須美；水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（VI）—ISO，IAEA及びIRPAの動向—，**50**，128-137（2015）。
- 9) 赤羽恵一，飯本武志，伊知地猛，岩井 敏，大口裕之，大野和子，加藤昌弘，川浦稚代，黒澤忠弘，立崎英夫，

- 辻村憲雄, 浜田信行, 林田敏幸, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I), 保健物理, **50**, 249-256 (2015).
- 10) ICRU; Dosimetry of external beta rays for radiation protection, ICRU Report 56, p. 27 (1997).
- 11) 宮永一郎, 備後一義, 山本峯澄; 富士 γ 線用フィルムバッジの β 線感度と β 線の被曝線量の評価, 日本原子力学会誌, **5**, 497-503 (1963).
- 12) 昭和63年10月1日付科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知.
- 13) 丸山隆司編; 外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル, 原子力安全技術センター (1988).
- 14) 藤田稔監修; 個人線量計技術説明書, 千代田保安用品株式会社 (1993).
- 15) JIS; 広範囲用フィルムバッジ, JIS Z4323-1997, 日本規格協会 (1997).
- 16) 崎原克彦, 山地 磐, 小山保二, 松本 健; ETL β 線標準場の線質特性, 日本保健物理学会第25回研究発表会要旨集 A5-24a (1990).
- 17) ICRU; op.cit., p.106
- 18) 平成13年3月21日付経済産業省告示第百八十七号「実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」.
- 19) 平成12年10月23日付科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知.
- 20) 平成13年3月20日付基発第254号, 厚生労働省労働基準局長通達.
- 21) 平成13年3月29日付医薬発第283号, 厚生労働省医薬局長通達.
- 22) 被ばく線量の測定・評価マニュアル, 第二版, 原子力安全技術センター, pp. 44-45 (2000).
- 23) ICRP; General principles for the radiation protection of workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27 (1), (1997).
- 24) IAEA; Assessment of occupational exposure due to external sources of radiation, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.3, p. 18 (1999).

辻村 憲雄 (つじむら のりお)



平成5年4月から動力炉・核燃料開発事業団, 二度の改組を経て現在に至る。博士(工学)東北大学。外部被ばくによる線量の測定評価を中心に個人線量計から臨界警報装置まで幅広く研究を進めている。

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (III) —最近の国外動向—

赤羽 恵一*¹, 飯本 武志*², 伊知地 猛*³, 岩井 敏*⁴, 大口 裕之*⁵, 大野 和子*⁶,
川浦 稚代*⁷, 立崎 英夫*¹, 辻村 憲雄*⁸, 浜田 信行*³, 堀田 豊*⁹, 山崎 直*¹⁰,
横山 須美*¹¹

(2015年9月4日受理)

(2015年10月7日再受理)

Addendum Report of the JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye (III) —Recent Related Overseas Activities—

Keiichi AKAHANE,*¹ Takeshi IMOTO,*² Takeshi ICHIJI,*³ Satoshi IWAI,*⁴ Hiroyuki OHGUCHI,*⁵ Kazuko OHNO,*⁶
Chiyo YAMAUCHI-KAWAURA,*⁷ Hideo TATSUZAKI,*¹ Norio TSUJIMURA,*⁸ Nobuyuki HAMADA,*³
Yutaka HOTTA,*⁹ Tadashi YAMASAKI*¹⁰ and Sumi YOKOYAMA*¹¹

Following the Statement on Tissue Reaction issued by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), revisions and discussions are underway in various international organizations about the standards, guidelines and methods for the eye dosimetry. We have previously discussed these issues in six interim reports, followed by two addendum reports on lens dosimetry. This addendum report reviews ongoing overseas discussion and work in relation to research on radiogenic cataracts and implementation of the new eye lens dose limit, such as those in the European Commission, Low Dose Research towards Multidisciplinary Integration (DoReMi), Open Project for European Radiation Research Area (OPERRA), and the United States National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). This report serves as the last part of a series of reports by the Japan Health Physics Society Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye.

KEY WORDS: dose limit for the lens of the eye, ICRP, DoReMi, OPERRA, NCRP, UNSCEAR, IRPA, OECD/NEA JHPS Expert Committee on Radiation Protection of the Lens of the Eye.

I はじめに

国際放射線防護委員会 (ICRP) が 2011 年 4 月に水晶体等価線量限度に関する声明を発表して以降, 国際機関において, 水晶体の放射線被ばく及び防護に関する基準や評価方法について, さまざまな検討が開始された。このため, 2013 年に水晶体の放射線防護に関する専門研究会が日本保健物理学会に作られ, 専門研究会の中間報告書として, 本学会誌にこれらの動向を紹介するとともに, 水晶体の等価線量限度の変遷, これまでの線量評価方法, わが国及び諸外国において行われてきた調査研究等について, その内容を紹介してきた¹⁻⁶⁾。

しかしながら, 現在, 欧州や米国においては, さらに次の段階として, ICRP の新しい水晶体等価線量限度を

各国の法令へ取り入れるための検討を進めている。それとともに, 欧州では新しく放射線白内障の疫学研究等にも力が入られ, 次々と研究計画が発表されている。

このような現状から, 本稿では, 最近の国外動向として, 特に, 欧州及び米国における動きについて紹介する。

II 最近の国外動向

1. 欧州の動き

国際放射線防護委員会 (ICRP) は, 組織反応 (確定的影響) に関する声明を 2011 年 4 月に出した⁷⁾。この中で, 作業者の水晶体等価線量限度について, これまで年間 150 mSv であったものを引き下げ, 5 年間の年間平均を 20 mSv, ただし年間 50 mSv を超えないこととした⁷⁾。これを受けて, 欧州では, 2013 年 12 月に欧州

共同体 (EU) の改訂 Directive である Council Directive 2013/59/EURATOM を発行し、上述の新たな水晶体等価線量限度を 2018 年 2 月 6 日までに受け入れることとした⁸⁾。この Directive に従い、欧州の放射線作業者は、実効線量が 6 mSv/年、水晶体等価線量 15 mSv/年、あるいは皮膚と四肢の等価線量が 150 mSv/年を上回るカテゴリー A と、これらを下回るカテゴリー B に二分して管理されることになっている。

EU は、予算が 500 億ユーロ規模の第 7 次研究・技術開発枠組み計画 (Seventh Framework Programme: FP7) を 2007 年に開始した。そのうち、DoReMi (Low Dose Research towards Multidisciplinary Integration) は、予算が 1,300 万ユーロ規模の FP7 プロジェクトである。DoReMi には、七つの Work Package (WP) があり、WP7 が非がん影響に関する WP である。WP7 のリーダーは、フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) の Jean-René JOURDAIN 氏である。WP7 には、水晶体の疫学研究に関係する三つのタスクと水晶体の生物研究に関する二つのタスクがある。Task 7.4 の O'CLOC (Occupational Cataracts and Lens Opacities in Interventional Cardiology) は、フランスの介入心臓治療医 (106 名) と対照群 (99 名) における水晶体混濁を比較するタスクであり、2010 年 1 月から 2012 年 4 月まで IRSN の主導で実施された。O'CLOC の研究成果について、水晶体線量及び水晶体混濁に関する主な知見は、ともに 2013 年に報告された^{9,10)}。O'CLOC のサブタスクである Task 7.4.1 の ELDO (Epidemiological Studies of Radio-induced Cataracts

in Interventional Cardiologists and Radiologists: Methodology Implementation, Eye Lens Dosimetry) は、水晶体混濁の疫学における混濁評価法や線量計測法の標準プロトコールの開発をするタスクであり、2012 年 2 月から 2013 年 1 月までベルギー原子力研究センター (SCK・CEN) の主導で実施された。Task 7.11 の EVAMET (Epidemiological Pilot Study on Radiation-induced Cataract in Interventional Cardiology-Validation of Methodology Explored in O'CLOC and ELDO Projects) は、ELDO によって開発された疫学と線量計測に関する方法論の有用性をポーランドでの介入治療医における予備的な疫学結果を用いて確認するとともに、後述の EURALOC (European Epidemiological Study on Radiation-induced Lens Opacities among Interventional Cardiologists) 用にポーランドの介入治療医コホートを立ち上げるタスクであり、ポーランドのノファー労働医学研究所 (NIOM) の主導で、2014 年 6 月から実施されている。Task 7.8 の LDR-OPTI-GEN (Low Dose Radiation-induced Optical Changes and Genetic Factors) は、低線量放射線 (> 1 mGy) に対するヒト由来正常水晶体上皮細胞の初期応答と遅延的応答を解析するタスクであり、英国オックスフォードブルックス大学 (OBU) と英国ロンドンブルーネル大学 (UBRUN) の共同で、2013 年 1 月から実施されている。Task 7.13 の RadCat (Low-Dose Ionizing Radiation-induced Cataracts in the Mouse: in vivo and in vitro study) は、低線量放射線 (< 100 mGy) に対するマウス白内障形成の線量応答を解析するタスクであり、ドイツヘルムホルツ協会ミュンヘン環境健康研究セ

*1 (国研) 放射線医学総合研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒 263-8555)

National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inageku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: akahane@nirs.go.jp, tatsuzo@nirs.go.jp

*2 東京大学; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)

The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

E-mail: iimoto.takeshi@mail.u-tokyo.ac.jp

*3 (一財) 電力中央研究所; 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒 201-8511)

Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan.

E-mail: ichiji@criepi.denken.or.jp, hamada-n@criepi.denken.or.jp

*4 (一社) 原子力安全推進協会; 東京都港区芝 5-36-7 (〒 108-0014)

Japan Nuclear Safety Institute; 5-36-7, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

E-mail: iwai.satoshii@genanshin.jp

*5 (株) 千代田テクノロ; 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒 113-8681) Chiyoda Technol Co.; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8681, Japan.

*6 京都医療技術大学; 京都府南丹市園部町小山東町今北 1-3 (〒 622-0041)

Kyoto College of Medical Science; 1-3, Imakita, Oyamahigashimachi, Sonobe-cho, Nantan-shi, Kyoto 622-0041,

Japan.

*7 名古屋大学; 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20 (〒 461-8637) Nagoya University; 1-1-20, Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya-shi, Aichi 461-8637, Japan.

E-mail: kawaura@met.nagoya-u.ac.jp

*8 (国研) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒 319-1194)

Japan Atomic Energy Agency; 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

E-mail: tsujimura.norio@jaea.go.jp

*9 日本原燃 (株); 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字沖付 4-108 (〒 039-3212)

Japan Nuclear Fuel Limited; 4-108, Okitsuke, Obuchi, Rokkashomura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan.

E-mail: yutaka.hotta@jnfl.co.jp

*10 中部電力 (株); 静岡県御前崎市佐倉 5561 (〒 437-1695)

Chubu Electric Power Co. Inc.; 5561 Sakura, Omaezaki-shi, Shizuoka 437-1695, Japan.

E-mail: Yamasaki.Tadashi@chuden.co.jp

*11 藤田保健衛生大学医療科学部; 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98 (〒 470-1192)

Faculty of Health Science, Fujita Health University; 1-98, Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi 470-1192, Japan.

E-mail: sumi0704@fujita-hu.ac.jp

ンター (HMGU), OBU, UBURN の共同で, 2014 年 5 月から実施されている。DoReMi は, 2015 年 12 月で終了し, タスク全体の成果を 2016 年 2 月までに EU へ報告することになっている。

OPERRA (Open Project for European Radiation Research Area) は, 予算が 950 万ユーロ規模の FP7 プロジェクトで, 上述の Jourdain 氏が OPERRA のコーディネータも務めている。OPERRA タスクのうち, Task 5.2 の EURALOC は, 欧州の介入心臓治療医 (440 名) と対照群 (285 名) における水晶体混濁を比較する疫学タスクであり, SCK・CEN の主導で, 2014 年 12 月から実施されている。

FP7 の後継枠組み計画として, EU は, 予算が 800 億ユーロ規模の Horizon 2020 (H2020) を, 2014 年 1 月に開始した。H2020 プロジェクトの一つである CONCERT は, 2015 年 6 月に開始され, そのキックオフ会議が同月 17 日～18 日にドイツミュンヘンで開催されたところである。CONCERT には, 七つの WP があり, 2016 年春と 2017 年秋の 2 回, CONCERT タスクを公募予定である。CONCERT は, 2020 年に終了予定で, その 5 年間の予算規模は 2750 億ユーロである。

FP7 と H2020 の枠組み以外では, 英国公衆衛生庁 (PHE) と英国ダラム大学 (UoD) とが共同で水晶体生物研究を実施しており, その最初の研究成果が 2015 年 4 月に報告されたところである¹¹⁾。この研究において PHE/UoD はマウス個体を用いたが, 電力中央研究所がヒト由来水晶体上皮細胞を用いて実施した研究と一致して, 放射線照射後に水晶体上皮細胞の増殖が促進されるという共通の知見が得られており, 興味深い^{11, 12)}。さらに重要なことに, LDR-OPTI-GEN, PHE/UoD, 及び電力中央研究所で細胞実験に使用されているヒト由来正常水晶体上皮細胞は, すべて同じところから入手されているので, 得られる知見の比較・議論が容易である。

2. 米国の動き

米国放射線防護審議会 (NCRP) には, 二つの審議会委員会 (CC1-CC2) と七つの領域別プログラム委員会 (PAC1-PAC7) がある。そのうち, PAC1 は, 基本的指標, 疫学, 放射線生物とリスクを扱う委員会である。米国で現行の水晶体線量限度を変更すべきかどうかのガイダンスとなる NCRP コメンタリーを 2015 年初頭に発行するために, NCRP は, 水晶体線量限度ガイダンスに関する科学委員会 (SC1-23) を PAC1 のもとに設置することを, 2013 年 12 月に承認した。SC1-23 の活動は, 米国原

子力規制委員会 (NRC) と疾病制御予防センター (CDC) によって支援されている。SC1-23 は, 2 名の共同議長 (放射線生物が専門の Eleanor A. BLAKELY 氏と医学物理が専門の Lawrence T. DAUER 氏), 9 名の委員, 4 名の顧問から構成され, そのうち, 米国外からは, Eliseo VANO 氏 (スペイン) と Elizabeth A. AINSBURY 氏 (英国) が委員, 浜田信行氏 (日本) が顧問を務めている。

SC1-23 は, 2014 年 2 月 19 日から 12 月 18 日までに会議を 12 回開催した。2015 年 3 月 1 日にコメンタリー草案を NCRP へ提出し, その概要を, 第 51 回 NCRP 年次会合の場で, 2015 年 3 月 16 日に, SC1-23 共同議長のひとりである DAUER 氏が公開した¹³⁾。ここでは, コメンタリー草案における四つの主な結論と勧告を紹介する。

- ・放射線誘発混濁が確率的であるかもしれないという研究者がいる。
 - ・微小な混濁と視覚障害性白内障の関連性とその機構は不明である。
 - ・最良の疫学的知見はしきい線量型モデルを今でも示唆している。
 - ・放射線防護の目的で, しきい線量型モデルの使用を継続する。
 - ・しきい線量の定量的推定は, 現時点では困難である。
- [結論 2] 線エネルギー付与 (LET), 線量, 線量率, 急性・遷延被ばくは, 白内障の誘発と進行にどのような影響があるか。
- ・これらの因子についてさまざまな研究がこれまでに実施されているが, この質問に対する答えの基礎となる知見は, まだない。
 - ・機構的知見の方が明らかになっていることもある (例えば, 線質の違いによる水晶体混濁の誘発と進行の増強度合いの違い)。
 - ・より質の高い疫学研究, 機構解明研究, 線量計測, 水晶体混濁評価法が必要である。
- [結論 3] 白内障のデトリメントをどう評価するか。
- ・白内障は生命を脅かすことはないが, 個人の日常業務に影響を及ぼし得る。
 - ・ICRP の新たな線量限度では, 水晶体混濁と致死性疾患を同等の基盤に置いていると解釈でき, 多くの研究者が, この妥当性に疑問を抱いている。
 - ・現行の線量限度を正確に再評価するために十分な知見が利用可能になるまでは, 眼の被ばくを全身被ばくと同じと考えた方が用心深いとする NCRP Report No.

168¹⁴⁾の勧告に準拠することを推奨する。これには、正当化と最適化を含む。

[結論4] 現在の知見にもとづいて、NCRPが勧告する線量限度を変更するべきか。

- ・現在の疫学的知見と生物学的知見は、おそらくこれまで水晶体等価線量限度で考慮されてきたよりも低い線量で、後囊下白内障、皮質白内障、あるいはそれらの混合型白内障の誘発や進行と放射線被ばくとの関連性を示唆している。しかし、その知見は限られており、大きな不確実性があるので、現時点では、定量的にしきい線量を推定できない。

- ・NCRP Report No. 116 (NCRPの最新基本勧告)¹⁵⁾で勧告されている現行の水晶体等価線量限度(150 mSv/年)を現時点で変更することは、十分に正当化されない。

[勧告]

- ・放射線影響研究所の疫学的知見について、報告済データの再評価と進行中のデータを待つ。
- ・新たな質の高い疫学と放射線の作用機序に関する基礎研究が必要である。
- ・現行の線量限度を上回る可能性がある潜在的被ばく集団の更なる教育とより正確な線量評価が必要である。
- ・成人被ばくより小児被ばくの放射線白内障リスクが高いかについて、更なる情報が必要である。
- ・放射線治療患者と放射線作業に関する縦断的研究が必要である。
- ・水晶体への全般的な放射線影響について総合評価が急務である。

2015年9月1日現在、コメンタリー草案は、PAC1, PAC4, 内容領域専門家(SME)からのコメントを受けて改訂中であり、そのため上述の結論と勧告は暫定的なものである。今後、NCRP審議会及びNCRPスタッフの査読を経て、コメンタリーが刊行されることになる。さらに、上述の六つ目の勧告に関連して、NCRPは、今後、新たな科学委員会を設置し約3年間で、水晶体への全般的な放射線影響について総合評価し、甲状腺への放射線リスクに関するNCRP Report No. 159¹⁶⁾のようなフルレポートをまとめる可能性も検討中である。

3. その他の動き

(1) 原子放射線の影響に関する国際連合科学委員会(UNSCEAR)

UNSCEARは、2013年報告書付属書B¹⁷⁾のなかで、放射線によって誘発される後囊下混濁、皮質混濁、視覚障害性白内障のリスクが、小児被ばくは成人被ばくより約

2倍高いことを示している研究があるが、その証拠のレベルは弱いとしている。

(2) 国際放射線防護学会(IRPA)

IRPAは、2012年に新たな水晶体線量限度の取り入れの影響に関するタスクグループ(TG)を立ち上げた。このTGは、議長のJohn BROUGHTON氏(英国)、副議長のMarie Claire CANTONE氏(イタリア)と2名の委員(スペインのMercè GINJAUME氏と英国のBinika SHAH氏)により構成された。また、三つのトピックについて専門家が招聘され、日本からは赤羽恵一氏と横山須美氏がトピック3の専門家を務めた。TGは、IRPA加盟学会に対してアンケートを実施し、12のIRPA加盟学会から回答があった。その結果を2013年に報告¹⁸⁾し、TGの活動を2014年に終えた。これに続く第二期のTGを、2015年1月に立ち上げた。この第二期TGは、議長のMarie Claire CANTONE氏(イタリア)、副議長のMercè GINJAUME氏(スペイン)と8名の委員により構成されており、そのうち、日本からは赤羽恵一氏が委員を務めている。第二期TGは、2015年4月に同年7月10日を回答期限としてIRPA加盟学会にアンケートを配布した。その後、期限回答を8月20日に延長したが、2015年9月1日現在、まだ回答を待っているところである。

(3) 経済協力開発機構/原子力機関/放射線防護・公衆衛生委員会(OECD/NEA/CRPPH)

CRPPHは、放射線防護に影響する科学と技術に関するワーキンググループ・放射線健康科学サブグループ(WGST-RHS)の「放射線健康科学の発展とその放射線防護への影響」と題する報告書¹⁹⁾を1998年に公表した。この1998年のWGST-RHS報告書を更新するため、CRPPHは放射線防護科学に関する専門家グループ(EGIS)を立ち上げ、「放射線防護における科学的問題と新たな課題」と題する報告書²⁰⁾を2007年に公表した。EGISは、議長のHenri MÉTIVIER氏(IRSN)と15名の委員により構成され、日本からは土居雅広氏が委員を務めた。

2007年のEGIS報告書を更新するために、2013年5月の第71回CRPPH総会で、放射線防護科学に関する専門家グループ(EGRPS)を設置することが決まった。EGRPSは、議長のIngemar LUND氏、15名の委員(そのうち3名がEGIS委員を歴任)と5名のオブザーバにより構成され、日本からは、浜田信行氏が委員、酒井一夫氏がオブザーバを務めている。EGRPSは、2013年9月12日から13日、2014年2月10日から11日、同年11月13日から14日に会議を開催した。EGRPS報告書

草案「放射線防護の科学的、社会的、取り入れ、規制の挑戦」は2015年4月の第73回CRPPH総会で条件付き承認され、2015年9月1日現在、2015年6月16日からCRPPHビューロ内で回覧されているところである。ここでは、EGRPS報告書草案における水晶体に関連する記述の概要を述べる。

- ・白内障などの放射線誘発がん影響は注目を集めているが、低線量、低線量率での応答と機構は不明のままである。
- ・正確なしきい線量は不明のままであるが、低いしきい線量とこれらの影響の確率的な性質については今後も研究が必要である。
- ・発症機構と線量応答曲線の形状を徹底的に研究すべきである。
- ・科学的知見は増えてきており、ICRPの新たな水晶体線量限度の勧告に至ったが、科学の進展によって放射線防護の全体的アプローチは変わっていない。

今後、EGRPS報告書は、CRPPHビューロ承認、CRPPH事務局での編集を経て、2016年に刊行されることになる。

(4) ICRP

医療分野における放射線防護を専門に議論するICRPの第3専門委員会は、現在六つのワーキングパーティ(WP)を設置している。そのうち、透視下あるいはコンピュータ断層画像(CT)ガイド下の介入治療における職業放射線防護の課題に関するWPでは、Pedro Ortiz LÓPEZ氏が議長を務め、水晶体の防護方法・防護具など、介入治療における職業放射線防護の課題が議論されている。2015年10月に開催される第3専門委員会会合では、このWPの報告書草案が審議される予定である。また、第3専門委員会は、今後検討する三つの課題のうちの一つとして、「水晶体、心血管、脳の防護：ICRP Publication 118の医療分野への示唆」を挙げており、今後も議論が展開されることが予想される。

III さ い ご に

水晶体の放射線防護に関する専門研究会では、2年間の活動を通して得られた情報を、これまでに中間報告書(6編)¹⁻⁶⁾及び追加報告(2編)^{21, 22)}として取りまとめた。

本専門研究会の最後の報告書となる本稿では、最近の国外の動向について紹介した。欧州及び米国においては、国家レベルで法令への新しい水晶体の等価線量限度取り入れに関する本格的な議論が実施されていることがわか

る。両者の取り入れに関する結論は相反するものとなることが予想されるが、低線量・低線量率における水晶体の放射線影響に関する正確な測定及びデータの蓄積について、その重要性を指摘している点は一致している。

国外において、このような動きがある中、わが国では、福島第一原子力発電所事故以降、事故への対応が最優先課題となっている。このため、新しい水晶体の等価線量限度の取り入れに限らず、ICRP 2007年基本勧告の法令取り入れについても、事故以前に放射線審議会が法令取り入れに関する中間報告書²³⁾を発表して以来、国としての検討が停滞している。

水晶体等価線量限度の取り入れに関して、欧米の検討状況を見ていると、今すぐに日本において検討を開始することが賢明であるかどうかは疑問である。検討に要する水晶体線量測定方法や被ばく線量に関するデータについても十分にそろっているとは言い難い。

専門研究会会合においては、このほかにも最近のわが国における水晶体の放射線被ばく防護に関する調査研究を把握するため、日本放射線技術学会より講師を招き、2014年から現在実施中(2015年終了予定)の非血管系介入治療に携わる医療スタッフ(医師及び看護師)の被ばく線量を多施設間で比較する調査研究等の概要を聴取した。会員により、医療スタッフに対する比較的規模の小さな施設間比較やファントム実験結果等の報告もなされた。わが国においては、学会等、個別にさまざまな研究が実施されているが、水晶体混濁や白内障の状態・程度を合わせて測定するといった大規模なプロジェクト研究は実施されていないというのが現状である。

国外では進行中の検討・研究も多く、今後もその動向から目を離すことができない。これらの情報収集は今後も重要であると考えられる。合わせて、日本の作業員、特にIVRを行う医師や福島第一原子力発電所の作業員の水晶体の被ばくといった日本特有の事象についても、十分な調査研究を実施しておく必要がある。今後も、わが国の法令への取り入れ検討に耐えうる情報、研究結果の蓄積、線量測定法の確立等は必要不可欠であろう。そして、これらの検討結果を海外に発信していくことも、放射線防護研究に携わっているわれわれの使命である。本専門研究会は、2015年3月にて活動を終えたが、その翌月に設置された水晶体の線量限度に関する専門研究会において、引き続き、これらの活動を継続・発展させていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (I), 保健物理, **49**, 145–152 (2014).
- 2) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (II), 保健物理, **49**, 153–156 (2014).
- 3) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (III), 保健物理, **49**, 171–179 (2014).
- 4) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (IV), 保健物理, **50**, 67–75 (2015).
- 5) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V), 保健物理, **50**, 76–89 (2015).
- 6) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (VI), 保健物理, **50**, 128–137 (2015).
- 7) ICRP; 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) (2012).
- 8) EU; Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union [online]. Available at: <http://faolex.fao.org/docs/pdf/eur130004.pdf>, Accessed 1 September 2015.
- 9) S. JACOB, L. DONADILLE, C. MACCIA, O. BAR, S. BOVEDA, D. LAURIER and M. O. BERNIER; Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses, *Radiat. Prot. Dosim.*, **153**, 282–293 (2013).
- 10) S. JACOB, S. BOVEDA, O. BAR, A. BRÉZIN A, C. MACCIA, D. LAURIER and M. O. BERNIER; Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study, *Int. J. Cardiol.*, **167**, 1843–1847 (2013).
- 11) E. MARKIEWICZ, S. BARNARD, J. HAINES, M. COSTER, O. VAN GEEL, W. WU, S. RICHARDS, E. AINSBURY, K. ROTHKAMM, S. BOUFFLER and R. A. QUINLAN; Nonlinear ionizing radiation-induced changes in eye lens cell proliferation, cyclin D1 expression and lens shape, *Open Biol.*, **5**, 150011 (2015).
- 12) Y. FUJIMICHI and N. HAMADA; Ionizing irradiation not only inactivates clonogenic potential in primary normal human diploid lens epithelial cells but also stimulates cell proliferation in a subset of this population, *PLOS ONE*, **9**, e98154 (2014).
- 13) NCRP; Session presentations made at the 51st NCRP Annual Meeting (2015) [online]. Available at: http://www.ncrponline.org/Annual_Mtg/2015_Ann_Mtg/Combine_2015_Presentations.pdf, Accessed 1 September 2015.
- 14) NCRP; Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional medical procedures, NCRP Report No. 168 (2010).
- 15) NCRP; Limitation of exposure to ionizing radiation, NCRP Report No. 116 (1993).
- 16) NCRP; Risk to the thyroid from ionizing radiation, NCRP Report No. 159 (2008).
- 17) UNSCEAR; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Volume II: 2013 Report to the General Assembly Scientific Annex B: Effects of radiation exposure of children, UNSCEAR 2013 Report (2013) [online]. Available at: http://www.unscear.org/docs/reports/2013/UNSCEAR2013Report_AnnexB_Children_13-87320_Ebook_web.pdf, Accessed 1 September 2015.
- 18) J. BROUGHTON, M. C. CANTONE, M. GINJAUME and B. SHAH; Report of Task Group on the implications of the implementation of the ICRP recommendations for a revised dose limit to the lens of the eye, *J. Radiol. Prot.*, **33**, 855–868 (2013).
- 19) OECD; Developments in radiation health science and their

impact on radiation protection. Report of the Working Group on Science and Technology Affecting Radiation Protection Sub-Group on Radiation Health Sciences (1998) [online]. Available at: <http://www.oecd-nea.org/rp/reports/1998/devrad.pdf>, Accessed 1 September 2015.

- 20) OECD; Scientific issues and emerging challenges for radiological protection. Report of the Expert Group on the Implications of Radiological Protection Science. NEA No. 6167 (2007) [online]. Available at: <http://www.oecd-nea.org/rp/reports/2007/nea6167-egis.pdf>, Accessed 1 September 2015.
- 21) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 加藤昌弘, 川浦稚代, 黒澤忠弘, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 林田敏幸, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I), 保健物理, **50**, 249-256 (2015).
- 22) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 黒澤忠弘, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 林田敏幸, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II), 保健物理, **50**, 257-261 (2015).
- 23) 放射線審議会基本部会; 国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告 (Pub.103) の国内制度等への取入れについて—第二次中間報告— (2011)



赤羽 恵一 (あかはね けいいち)

1987年3月東北大学理学部物理学第二学科卒業。国立公衆衛生院放射線衛生学部研究員, 大分県立看護科学大学環境科学研究室助手を経て, 現在は放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト医療被ばく研究推進室室長。専門は医療放射線防護。

E-mail: akahane@nirs.go.jp



浜田 信行 (はまだ のぶゆき)

2004年3月に長崎大学で博士(薬学)を取得。群馬大学COE准教授等を経て, 2010年度より現所属(主任研究員)。専門分野は放射線生物。関心分野は放射線影響。査読付学術英語論文83編, 日本語論文21編, 受賞16件(米国放射線影響学会マイケルフライ研究賞など)。現在, ICRP科学秘書官補佐, OECD/NEA/CRPPH/EGRPS委員, NCRP SC1-23顧問, 日本保健物理学会水晶体の線量限度に関する専門研究会委員などを務めている。

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp