新たな水晶体等価線量限度に関する放射線防護の課題

藤通 有希^{*1,2}, 小佐古 敏荘^{*2}, 吉田 和生^{*1}, 浜田 信行^{*1,3}

(2013 年 2 月 26 日受理)

(2013 年 5 月 16 日再受理)

Issues Behind Radiation Protection of the Ocular Lens Based on New Dose Limit

Yuki FUJIMICHI,^{*1,2} Toshiso KOSAKO,^{*2} Kazuo YOSHIDA^{*1} and Nobuyuki HAMADA^{*1,3}

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) has classified radiation cataract as tissue reactions (formerly known as deterministic effects or non-stochastic effects) for which a threshold dose exists, and recommended an equivalent dose limit for the lens of the eye to prevent vision-impairing cataracts. A recommended occupational dose limit has been 150 mSv/year predicated on the threshold of >8 Sv since the 1980 Brighton Statement, but was drastically lowered by the 2011 Seoul Statement to 20 mSv/year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv. Such a new limit was included immediately in the Interim Edition of General Safety Requirements Part 3 of the International Atomic Energy Agency. In contrast, a dose limit of 15 mSv/year for members of the public has not been changed since the 1990 Recommendations. This paper considers the impacts of a new limit focusing on conformity with cancer risk management, the necessity of the public dose limit in planned exposure situations and the occupational dose limit in emergency exposure situations. Potential issues arising from its implementation shall also be discussed especially in terms of the compensation problem and the possibility of exceeding a dose limit in interventional cardiologists.

KEY WORDS: lens of the eye, cataract, ICRP, equivalent dose limit, occupational dose limit, public dose limit, planned exposure situation, emergency exposure situation, effective dose limit, cancer risk management, interventional cardiologist, attributability.

I 緒 論

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) は、放射線影響を、しきい線量がない確率的影響と、しきい線量型の線量応答を示す組織反応 (かつての非確率的影響、確定的影響) と

に分類している。放射線防護の目的は、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。ICRP は、放射線作業員への水晶体等価線量限度として、1980 年から 150 mSv/年を勧告してきたが、それを 5 年平均 20 mSv/年 (かつ単年で 50 mSv を超えない) に引き下げるソウル声明を、2011 年 4 月に発表した¹⁾。国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency: IAEA) の国際基本安全基準 (International Basic Safety Standards: BSS) は ICRP の勧告を各国の法令に取り込む際の土台であり、新たな水晶体等価線量限度を導入した BSS の暫定版が刊行された²⁾。この最終版が刊行されると、国内法令へ

^{*1} 電力中央研究所原子力技術研究所放射線安全研究センター; 東京都狛江市岩戸北 2-11-1 (〒201-8511)

Radiation Safety Research Center, Nuclear Technology Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI); 2-11-1 Iwado-kita, Komae, Tokyo 201-8511, Japan.

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻; 東京都文京区弥生 2-11-16 (〒113-0032)

Department of Nuclear Engineering and Management, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo; 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

^{*3} 責任著者 (Corresponding author); E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp

の導入が加速することが予想される。そこで、新たな水晶体等価線量限度を日本の国内法に導入する検討が開始される前に、導入に伴う課題を予め検討しておく必要がある。そこで、本稿では、水晶体等価線量限度変更の経緯（II章）と変更後の国内外の動向を整理したうえで（III章、IV章）、水晶体の放射線防護に関わる課題を抽出して、その対応策や解決策を考える（V章、VI章）。

II ICRP による水晶体等価線量限度の変更

ICRP は、新たな疫学的知見を踏まえて視覚障害性白内障のしきい線量を定めるために、2006年に“組織反応とその他の非がん影響”を検討する Task Group 63 (TG63) を第1委員会に立ち上げた³⁾。TG63による報告書の草案（いわゆる TG63 草案）を2010年末か2011年初頭に公開して、水晶体等価線量限度を声明で勧告することを、2010年10月のICRP主委員会で決定した⁴⁾。白内障のしきい線量を0.5 Gyに引き下げるとする草案を2011年1月20日に公開し、同年4月1日まで意見募集を実施した。この間、本邦を含む22件のコメントが投稿された⁵⁾。この草案にもとづいて、ICRP は、同年4月21日のソウル声明¹⁾によって、視覚障害性白内障のしきい線量を>8 Gy から0.5 Gyに引き下げた。2012年8月に、TG63 草案の最終版は Publ. 118 として刊行されたが、結論の内容は草案から変更されなかった。

ICRP は、Publ. 60 (1990 年勧告)⁶⁾と Publ. 103 (2007 年勧告)⁷⁾により、しきい線量を50年と仮定した労働期間で除した値を放射線作業員への水晶体等価線量限度として勧告してきた。0.5 Gyのしきい線量を50年で除した値が線量限度になるとすれば、10 mSv/年となるはずであるが、ソウル声明によって勧告された水晶体等価線量限度は、等価線量と実効線量との違いはあるものの、実効線量限度と同じ「5年平均20 mSv/年（かつ単年で50 mSvを超えない）」であった¹⁾。その導出根拠は、ソウル声明で述べられておらず、唯一示されているのが、IAEAの技術会合（III章を参照）におけるICRPの説明資料である⁸⁾。その資料によると、約0.5 Gyの視覚障害性白内障のしきい線量をもとに、水晶体が防護されること、導入可能か、最適であるかを考慮して、水晶体等価線量限度を設定したとある⁸⁾。公衆の水晶体等価線量限度については、ソウル声明では触れられなかった。

通常、主勧告が法令に取り入れられるまでには時間がかかるが、ソウル声明は、2007年勧告の取り入れが検討されている時期に出されたこともあり、III章とIV章で述べるように、新たな水晶体等価線量限度を併せて導

入する検討が早くも開始されている。

III 新たな水晶体等価線量限度の導入の検討に関わる国際動向

IAEA は、ICRP が勧告する放射線防護体系を取り入れた実用的な基準を策定し、放射線防護と放射線源の安全に対するBSSとして刊行している。そして、各国は、BSSにもとづいて、自国の規制に取り入れるという構造を取っている。TG63 草案が公開された2011年1月の時点では、1990年勧告を取り入れた1996年のBSS (Safety series 115: 安全シリーズ115)⁹⁾が最新版であり、2007年勧告⁷⁾を取り入れたBSSの改訂を2007年から新たに基準案DS379として検討している段階であった。2010年12月7日から同月10日に開催されたIAEAの放射線安全基準委員会 (Radiation Safety Standards Committee: RASSC) 会合において、水晶体等価線量限度の引き下げをICRPが予定しているため、安全基準委員会 (Commission on Safety Standards: CSS) での審議はICRPの勧告を待ってからおこなうことが提案され、合意された¹⁰⁾。2011年3月の時点では、水晶体等価線量限度は150 mSv/年のままであったが¹¹⁾、CSSは、新たな水晶体等価線量限度を改訂中のBSSに取り入れることを2011年5月（ソウル声明が発表された翌月）に決定した。CSSでの審議の段階で水晶体等価線量限度の引き下げが提案されたことから、水晶体等価線量限度に関する部分のみ、短期間の加盟国意見照会に付すこととなった¹²⁾。IAEA加盟国からの意見募集を経て、DS379を、2011年7月にCSSが承認、同年9月にIAEA理事会が承認して、同年11月に安全要件 (General Safety Requirements Part 3: GSR パート3) としてBSS暫定版²⁾が刊行された。水晶体等価線量限度は、18歳以上の放射線作業員に対しては150 mSv/年から20 mSv/年かつ単年で50 mSvを超えないへ、16歳から18歳までの実習生や学生に対しては50 mSv/年から20 mSv/年へ変更され、公衆に対しては15 mSv/年のまま変更されなかった^{2, 9)}。この最終版は、連携機関の承認を経て2013年に刊行される予定である。また、IAEAは、2013年7月には技術文書 (technical document: TECDOC) の刊行準備に入りたいとして、2012年10月2日から4日に技術会合を開催して、新しい水晶体等価線量限度の導入とその課題について議論した¹³⁾。さらに、TECDOCをもとに、安全要件の下位にある安全指針として、「職業上の放射線防護」(DS453)と「電離放射線の医療利用における放射線安全」(DS399)の刊行を2016年までに予定し

ている。この技術会合の内容は、2012年11月29日に開催されたRASSC会合で報告された¹⁴⁾。米国では、原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission: NRC)が新たな水晶体等価線量限度を取り入れた報告書案を2011年8月30日に公開し、10月31日まで、意見募集を実施した¹⁵⁾。その後、NRCは、2012年10月の会議において、新しい水晶体等価線量限度の取り入れに関する議論を継続するとした¹⁶⁾。NRCは、2013年3月12日から14日に開催する規制情報会議で検討状況を報告する予定である¹⁷⁾。英国では、健康保護庁(Health Protection Agency)が2012年9月にソウル声明を支持する声明を発表¹⁸⁾し、その見解を2012年12月に論文として発表したところである¹⁹⁾。

新たな水晶体等価線量限度が規制に取り入れられると、より厳密な線量管理が必要となるが、現時点では、水晶体の線量は直接計測されていない。そこで、国際放射線単位・測定委員会は、2012年3月29日から4月3日にかけて開催した主委員会において、水晶体の線量計測法を検討するワーキンググループの設置を決めた。さらに、国際標準化機構(International Organization for Standardization: ISO)と国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)も規格の変更にに向けて動き出している^{13, 20, 21)}。規格制定までの6つの段階のうち、2013年2月の時点で、ISOは3段階目まで^{20, 22, 23)}、IECは4段階目まで^{21, 23)}を終了している。

IV 新たな水晶体等価線量限度の導入の検討に関わる国内動向

日本国内でも、新しい水晶体等価線量限度への注目が集まっている。2011年1月に、放射線審議会基本部会(当時は文部科学省、現在は環境省原子力規制委員会に設置)は、2007年勧告の国内制度への取り入れに関する第二次中間報告を公表している。そのなかで、ICRPの今後の動向を注視していくとともに、水晶体の等価線量限度の規準や考え方に変更があった場合には、規準や考え方の国内制度等への取り込みについて十分検討する必要があると述べている²⁴⁾。しかし、その後は、福島第一原子力発電所事故の影響もあり、水晶体等価線量限度の取り込みについては、検討されていない。

2013年1月23日に、宇宙航空研究開発機構の外部諮問委員会である宇宙放射線被ばく管理分科会は、2007年勧告取り入れに関する報告書案への意見募集を開始した²⁵⁾。日本では、国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS)搭乗宇宙飛行士に対して、水晶体、

骨髄、皮膚、精巣への等価線量制限値を設定しており、水晶体制限値は0.5 Sv/週、2 Sv/年、5 Sv/生涯である²⁵⁾。その一方、ICRPは、宇宙飛行士の被ばくを職業被ばくに分類しておらず、参考レベルを適用している⁷⁾。この分科会の報告書案では、新しい水晶体等価線量限度についても検討されており、宇宙飛行士の水晶体等価線量が500 mSvに達するのはISSに約1.5年滞在する場合であり、現状の滞実績を考えるとISSへの搭乗が3回程度であれば新たなしきい線量を超えないと報告している。しかし、等価線量を厳密に評価できないことと、国内外の対応が不明確であることから、2013年1月の時点では従来の限度から変更しないとした²⁵⁾。なお、Publ. 118における0.5 Gyは低LET放射線のしきい線量であるのに対して、宇宙飛行士は重粒子線を含む高LET放射線にも被ばくするので注意が必要である¹⁾。LET(linear energy transfer: 線エネルギー付与)とは、放射線が物質を通過する際に、その飛跡の単位長さあたりに付与される放射線のエネルギーのことである。

このように、新たな水晶体等価線量限度を取り込む動きがあるが、Publ. 118とソウル声明では組織反応のみが検討された結果、放射線防護体系の一部として水晶体等価線量限度を考えると、がんに対する放射線防護との整合性が取れていない。さらには、公衆、緊急時被ばくにおける水晶体の放射線防護についても検討する必要がある。

V 放射線防護体系の不整合

1. がんに対する実効線量限度との比較

(現状と課題)

組織反応については視覚障害性白内障などの有害事象の発症を防ぐように、確率的影響についてはがんと遺伝的影響を容認できるレベルのリスクに制限するように、放射線防護体系が構築されている。これまで、線量限度を設定する上で、白内障は、>8 Svの高線量被ばくによって生じる、がんと発生機序が異なる、致死性がないと考えられてきた。そして、組織反応である白内障はがんと独立した防護体系がとられてきた。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、しきい線量にもとづいて定められている。しきい線量は、被ばく集団の1%のヒトに有害事象が発症する線量と定義されていることから⁷⁾、水晶体は1%のリスクで管理されていると考えられる。Table 1に示すように、がんは4.1%/Svの名目死亡リスク(過剰絶対リスク)によって線量限度が定められているのに対し、白内障のしきい線量におけ

Table 1 Cataract vs Cancer in Radiation Workers.

	Cataract	Cancer
Characteristics	Non life threatening. Curable by day surgery. The severity of visual impairment depends on the site of onset.	Life threatening. Mortality and prognosis depend on the site of onset and type of cancer.
Dose limit	Equivalent dose: 20 mSv/year (Prevention of vision-impairing cataract)	Effective dose: 20 mSv/year (Detriment of all solid cancers)
Basis of dose limit	Morbidity	Mortality
Morbidity	1%/0.5 Sv ¹⁾	11.7%/Sv = 5.85%/0.5 Sv ^{7)*1, 2}
Mortality	0%	4.11%/Sv = 2.05%/0.5 Sv ^{7)*1, 3}

*¹ The numerical value for “per Sv” was halved to “per 0.5 Sv” based on the linear non-threshold hypothesis.

*² Nominal risk coefficient for working age population (18–64 years at the time of exposure), excluding the contribution of the genetic effects.

*³ Nominal risk adjusted for lethality and quality of life for working age population (18–64 years at the time of exposure), excluding the contribution of the genetic effects.

る過剰絶対リスクは 1%/0.5 Sv（しきい値なし直線仮説を採用すれば 2%/Sv）である。多くのがんは致死性であるが、白内障は致死性ではない。確率的影響の線量限度は容認されるレベルへの制限、組織反応の線量限度は防止であることを勘案しても、白内障はがんよりも低いリスクで管理されていると考えられる。

白内障とがんを比較するには、自然発症率（あるいは自然死亡率）が重要な指標となる。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²⁶⁾。Publ. 118 におけるしきい線量の主要な根拠で使われている指標の 1 つである白内障手術歴の場合は、白内障発症部位を区別できないため、ここでは、全水晶体混濁の発症率を、がんによる死亡率・発症率と比較することとする。また、がんについては生涯罹患率と生涯死亡率が推定されているが、白内障は非致死性であり、老齢で発症するため生涯罹患率が推定されていない。そのため、白内障の生涯罹患率を、80 歳以上の水晶体混濁の自然発症率（67～83%）の中央値 75% と考えることとする。全がんに対する日本人の自然生涯死亡率は、男性が 26%、女性が 16%（2009 年）、全がん自然生涯発症率は男性が 54%、女性が 41%（2005 年）である²⁷⁾。0.5 Sv を被ばくした場合、白内障の発症率は 75% から 76% に、がんの死亡率は 20% から 22% に、全がんの発症率は 48% から 54%（過剰発症率は 6%/0.5 Sv）に上昇することになる。仮に、白内障に対してしきい値なし直線仮説を採用して、がんの過剰発症率（つまり 12%/Sv）で管理すると、生涯で 24 Sv（480 mSv/年）が放射線作業員への水晶体等価線量限度となり、がんと白内障に大きな不整合が生じている。

また、全ての小さな混濁が視覚障害性白内障に進行す

るという仮定のもと、検出可能な混濁のしきい線量で管理するという事は、前がん病変に対して線量限度を設けていることと同じである。放射線防護の原則である、害より便益を大きくすべきであるという正当化や、社会的及び経済的な要因を考慮して被ばく線量を合理的に達成できる限り低く保つという考え（いわゆる as low as reasonably achievable: ALARA）⁷⁾ も踏まえて、発症リスク 1% で管理する妥当性についても検討すべきである。

（解決に向けて）

Publ. 41 では、疫学的知見から仮定をはさまずに、多分割・遷延被ばくの方が急性被ばくよりも高いしきい線量とされた。白内障発症率は 1 回照射の方が同じ総線量の分割照射よりも高いことも報告されており²⁸⁾、しきい値以下では回復によって影響が蓄積しないと考えられる。Publ. 118 では、慢性被ばくについてはしきい線量を判断できないとしたものの、急性被ばくと遷延被ばくで同じしきい線量にした。これによって、影響が蓄積するという、がんの考え方に近づいてきたと考えられる。そこで、これに対応した放射線防護体系にする必要がある。具体的には、放射線白内障による健康上の損害（いわゆるデトリメント）をどう定義して、防護するかを考える必要がある。確率的影響のリスクは、ある集団が放射線源に被ばくした結果、被ばくグループとその子孫が受ける健康上の損害を表す「デトリメント」として取り扱われているが、組織反応にはデトリメントの概念が存在しないことが問題である。Publ. 118 の前身である 1984 年の Publ. 41 では、重篤度、発症年齢、ヒトのもつ抵抗力などにより影響のインパクトが変わること、低線量率での長期被ばくの場合は線量と重篤度の関係を厳密に予測できないことから、組織反応のデトリメントは定量化できないとしていた²⁹⁾。2012 年 11 月 6 日から 8 日に東京

で開催された経済協力開発機構／原子力機関の「第3回放射線防護における科学と価値に関するワークショップ」及び「第6回放射線防護体系の進展に関するアジア会議」(以下、S&V)では、放射線の非がん影響(特に血管疾患)のデトリメントについて議論された。S&Vでの結論のひとつとして、本来デトリメントは確率的影響に対する指標であるが、組織反応のデトリメントを検討することが重要であるとされた³⁰⁾。デトリメントが適用されれば、組織反応も実効線量限度によって確率的影響との一元管理が可能になる。その一方、1980年のブライトン声明で示されたように、非致死性のがんはデトリメントの重みが変わると実効線量への寄与率が変わる。したがって、がんと組織反応ではなく、致死性疾患と非致死性疾患とに区分したうえで、デトリメントにもとづいた放射線防護体系を検討するべきである。

白内障による視覚障害は、混濁が視軸上にあるか否かなど発症部位に強く依存し、混濁の進行度と視覚障害の重症度が必ずしも比例しないという特徴があるため、デトリメントの定義は難しく、注意が必要である。

2. 公衆への水晶体等価線量限度

(現状)

公衆への水晶体等価線量限度は、放射線作業員への限度の1/10として、1990年勧告⁶⁾と2007年勧告⁷⁾で15 mSv/年と勧告されている。公衆への水晶体等価線量限度に関して、ソウル声明では触れられなかったが、Publ. 118の招待論説¹⁾と上述のIAEA技術会合での説明資料⁸⁾に示されている。それらによると、15 mSv/年を70年間被ばくしても最大1,050 mSvであること、水晶体だけ被ばくする可能性は低いこと、実効線量限度1 mSv/年で守られているとの理由から、公衆への水晶体等価線量限度はソウル声明で変更されなかった(2 mSv/年にしなかった)とある^{1,8)}。

(課題とその状況の改善に向けて)

1985年のパリ声明において、計画被ばく状況における公衆への等価線量限度は、水晶体と皮膚を残して、廃止された。水晶体と皮膚は、非確率的影響(現在の組織反応)を実効線量限度で管理できないことと、局所被ばくの可能性を勘案して、等価線量限度が残された³¹⁾。放射線作業員、特に介入治療や放射線治療に携わる医療従事者は、水晶体だけを被ばくする可能性があるため(VI.1節を参照)、等価線量限度が必要である。その一方、計画被ばく状況において、公衆が医療被ばく以外に水晶体や皮膚だけを局所的に被ばくすることは想定されにく

い。そこで、公衆への水晶体や皮膚への局所被ばくの実態と可能性を調べる必要がある。被ばくの可能性がない場合は、実効線量限度と等価線量限度で二重に防護する体系の妥当性について検討する必要がある。

3. 緊急時被ばく状況での水晶体等価線量限度

(現状)

医療従事者以外の職業被ばくで、水晶体等価線量が白内障のしきい線量である0.5 Gyを超える可能性があるのは、計画被ばく状況より緊急時被ばく状況である。2007年勧告では、放射線作業員に対して、実効線量による参考レベルが定められており、注釈にて、「1,000 mSv以下の実効線量は重篤な確定的影響を回避できるはずであり、500 mSv以下では他の確定的影響を回避できるはずである」とある⁷⁾。さらに、2007年勧告が参照しているPubl. 96では、放射線作業員に対して、救命活動や重篤な障害の防止、悲惨な状況への発展を避けるための行動に対する救助活動では、確定的影響を避けるために、年線量限度の最大値の10倍以下というガイダンスレベルを助言している³²⁾。また、多くの人への傷害や大線量の被ばくを防ぐための他の緊急の行動については、年線量限度の最大値の2倍以下というガイダンスレベルを助言している³²⁾。ソウル声明で水晶体の線量限度は引き下げられたが、緊急時被ばく状況における参考レベルは変更されていない。

(課題とその解決に向けて)

これまでは15 mSv/年の10倍は1,500 mSvであり、しきい線量を下回っていたが、50 mSv/年の10倍は500 mSvとしきい線量と同じ値であり、本来は確定的影響を避けるためのガイダンスレベルであるが、視覚障害性白内障を発症する可能性がある。視覚障害性白内障のしきい線量が下がった今、緊急時被ばく状況における限度は、再び検討すべき課題となる。

日本では、1990年勧告の国内法令への取り入れを検討して以来、独自に、電離放射線障害防止規則、防災指針などにより、緊急作業に従事する放射線作業員の水晶体等価線量限度を300 mSv(1990年勧告での計画被ばく状況における限度150 mSv/年の2倍の値)と設定してきた³³⁾。ソウル声明を受けて、この限度が40 mSv/年に変更されるかは不明である。放射線審議会基本部会の2007年勧告国内制度への取り入れに関する第二次中間報告(IV章を参照)では、緊急時の線量の制限値は努力目標値の位置づけであるべきとするとして、ICRPの主勧告やIAEAのBSSを参考に、緊急性の程度に応じた段階的な線量の制限値とすることが適切であると述べ

られている²⁴⁾。今後、緊急時被ばく状況における水晶体等価線量の参考レベルについて議論されるものと考えられる。また、同報告書では、水晶体に関して、緊急時の線量計測の実行可能性を考えると、実時間で線量評価が必要な緊急時の線量制限値を設けることは適切でないと述べられている²⁴⁾。さらに、緊急時では生死にかかわる影響の防護という観点を含めた、規制値の判断が重要である。

最後に VI 章では、実際に新たな水晶体等価線量限度を導入すると、どのような問題が生じるか考える。

VI 新たな水晶体等価線量限度の導入によって生じうる課題

1. 線量限度を超過する可能性

(課題)

放射線作業によって水晶体を被ばくする可能性があるのは、混合酸化物 (mixed oxide: MOX) 燃料などの核燃料のグローブボックスでの操作で線源を顔に近づける場合や、患部を放射線で透視しながら施術する介入治療に携わる医療従事者が挙げられる。水晶体の職業被ばくの可能性について現状を調査し、線量低減などのためにどう資源を分配するか判断が必要である。

放射線作業者のうち、水晶体の被ばくが現状で最も問題となるのは、医療従事者である。現在、介入治療が普及し、多くの患者の命が救われているが、医療従事者は被ばくすることとなる。なかでも、心臓介入治療医は、1回の施術により、水晶体等価線量で 10–1,000 μ Sv を被ばくする^{34–38)}。つまり、1回の施術で 1 mSv を被ばくする場合、年間平均 20 回の施術で新たな線量限度に到達することとなる。実際、心臓介入治療医の白内障に関するフランス国内での横断的調査 (Occupational Cataracts and Lens Opacities in interventional Cardiology: O'CLOC) によると、最近の 10 年では、40% の心臓介入治療医の被ばく線量が新たな線量限度 (20 mSv/年) を上回っており、約 25% の心臓介入治療医の生涯線量が新たなしきい線量 (0.5 Sv) を上回っているという³⁹⁾。このままでは、水晶体等価線量限度の引き下げにより、医療業務が制限される結果、心臓介入治療を受けられないなど、患者に不利益が生じる可能性がある。

(対応策)

上述の課題の解決には、治療医あたりの被ばく線量を低減するための対策を講じる必要がある。線量低減対策の基本は、医療に関する放射線防護の報告書である Publ. 117⁴⁰⁾ や Publ. 120⁴¹⁾ でも指摘されているように、

放射線防護の三原則である「距離」「時間」「遮蔽」である⁴²⁾。心臓介入治療の場合、治療医が、患者からの「距離」をとって施術すること、一人あたり・施術あたりの治療に要する「時間」を短縮することは、現実的に困難である。「時間」の短縮には、心臓介入治療に代わる新たな治療法の導入による患者数の減少や心臓介入治療医の増員が有用であろうが、現実的に即効性が期待できるのは「遮蔽」である。

水晶体の放射線防護具としては、メガネ・ゴーグル、天井から吊すシールド、フェイスガードや放射線遮蔽キャビンなどがあるが³⁹⁾、最も使用されているのは鉛メガネである。既述の O'CLOC 調査によると、職歴の 75% 以上の期間に鉛メガネを着用すれば白内障発症リスクが減少する傾向にあると報告されている³⁴⁾。しかし、鉛メガネを職歴の 75% 以上の期間に着用した治療医は全体のわずか 18% であり、逆に、鉛メガネの使用経験がない治療医は 10% もいた³⁴⁾。鉛メガネの重さは 40–120 g であり^{43–45)}、一般的な近視用軽量メガネよりも数倍から十数倍重い。さらに、鉛メガネの着用により視野が狭まることや、近視用メガネと併用しにくいこともあり、着用率が低いと考えられる。鉛メガネの主な素材として、鉛ガラスは鉛当量 (つまり防護効果) を大きくできるが重く、鉛アクリルは軽いが鉛当量を大きくしにくいという長短があるものの、鉛当量 0.07 mmPb の薄い鉛アクリルメガネでも 6 割の防護効果があり⁴⁶⁾、更に軽量化できれば、着用率は向上するであろう。手術時の鉛メガネ着用は、放射線白内障リスクの低減に加えて、患者由来の血液や体液の眼への飛散を防ぐ上でも有用であるため、着用率を向上させるべきである。

なお、ソウル声明では、患者への被ばく線量を抑えるための医療従事者への警鐘として血管疾患に対する 0.5 Gy のしきい線量が初めて勧告された。白内障について、同様の言及はされなかった。公衆の計画被ばく状況に医療被ばくは含まれないが、視覚障害性白内障のしきい線量が 0.5 Gy となった現在の状況では、患者の防護も考える必要がある。例えば、眼に対する線量は、頭部コンピューター断層撮影法 (computed tomography: CT) の場合は 70 mGy であり⁴⁷⁾、脳への介入治療の場合は 380 ± 593 (平均値 $\pm$ 標準偏差、範囲: 2–2,079) mGy であるという報告もある⁴⁸⁾。放射線画像診断における診断参考レベル⁷⁾のように、治療についても基準の設定を検討すべきであり、医療従事者は患者の水晶体等価線量にも留意する必要がある。介入治療従事者への放射線安全教育のさらなる徹底が必要である。

2. 放射線起因性の判断の考え方について

(現状と課題)

VI.1 節で述べたように、個人線量が、従前の水晶体等価線量限度 (150 mSv/年) で管理されている現時点では、新たな水晶体等価線量限度やしきい線量を上回る放射線作業員がいる。日本での水晶体に関する労災認定では、(1) 3 か月以内の期間における被ばくの場合、概ね 200 レム (2 Sv) 又はこれを超える線量の被ばくがあること、3 か月を超える期間における被ばくの場合、概ね 500 レム (5 Sv) 又はこれを超える線量の被ばくがあること、(2) 被ばく開始後少なくとも 1 年を超える期間を経た後に発生した疾病であること、(3) 水晶体混濁による視力障害を伴う白内障であること、が基準として 1976 年に定められている⁴⁹⁾。しきい線量が引き下げられると、この判断基準を変える必要が生じる。2012 年 9 月 28 日に、厚生労働省の電離放射線障害の業務上外に関する検討会は、放射線作業員の胃がん・食道がん・結腸がんについて、放射線業務が原因かどうかを判断するための疫学調査報告を発表した⁵⁰⁾。2009 年 12 月と 2011 年 2 月に労災請求があったことを受けての報告書である。そのなかで、当面の労災補償の考え方として、判断は個別事案ごとに被ばく線量と潜伏期間、放射線以外のリスク要因を総合的に検討するとし、そのうち、被ばく線量については、100 mSv 以上から放射線被ばくとがん発症との関連がうかがわれるとした。

なお、原爆症は、放射線起因性と要医療性を勘案して認定される。白内障は、原爆症認定に際して放射線起因性が推認されている 7 つの疾病のうちのひとつである⁵¹⁾。かつては、白内障の放射線起因性の判断には、しきい線量として 1.75 Sv (95% 信頼区間: 1.31–1.21) が基準として用いられていた⁵²⁾。しかし、現在は、被爆地点が爆心地から約 3.5 km 以内の者、原爆投下の約 100 時間以内に爆心地から約 2 km 以内に入市した者、原爆投下の約 100 時間から約 2 週間以内に、約 2 km 以内の地点に一週間以上滞在した者が、7 つの放射線起因性推認疾患のいずれかを発症した場合は、被ばく線量に関係なく放射線起因性を積極的に認めることになっており、これに該当しない場合は、被ばく線量、既往歴、環境因子、生活歴等を総合的に勘案して、放射線起因性を判断することになっている⁵¹⁾。白内障については、加齢白内障を除くとしており、原爆症の申請にあたっては、細隙灯顕微鏡検査の写真に加えて、糖尿病の罹患歴やステロイド長期投与の治療歴などに関する医師の所見を提出す

ることになっている⁵³⁾。糖尿病とステロイド長期投与は、後囊下白内障の誘発因子である。

(状況の改善に向けて)

労災等の認定に関しては、その症状が放射線起因かどうか、労働者の福祉と救済の観点から総合的に判断される。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¹⁾。Publ. 118 では、従来と考え方が異なり、小さな混濁が視覚障害性白内障に進行すると仮定され、視覚障害性白内障のしきい線量推定の根拠には混濁が含まれている⁵⁴⁾。また、放射線の被ばくによって最も増加するのは後囊下白内障であり、その次が皮質白内障である。視覚を障害しない初期の後囊下混濁は放射線に特徴的な形態を示す^{55, 56)} が、視覚障害性白内障へ進行すると、他の原因と区別がつかなくなる。さらに、加齢白内障は、水晶体の複数の部位に混濁が生じる混合型白内障も多い⁵⁷⁾。このように、初期の混濁は放射線起因性を特定できても、視覚障害性白内障は特定できない。そこで、認定の対象とする症状や、視覚障害性白内障の放射線起因性を判断するための考え方を、検討しておく必要がある。例えば、上述のように、放射線起因性を判断するかつての基準はしきい線量であったが、現在は、被ばく線量に加えて白内障の発症に影響を及ぼす過去の罹患歴や治療歴なども総合的に勘案して判断されている。

VII 結 論

水晶体等価線量限度は、実効線量限度とは独立して設けられており、がんとのリスク管理が統一されていない。放射線防護体系の整合性をとるためには、白内障のデトリメントを定義することと、水晶体の被ばくが起りうる状況を整理する必要がある。また、医療従事者の被ばく線量が新たな線量限度を超えたり、患者の被ばく線量がしきい線量を超える可能性がある。一部の国際機関は、新たな水晶体等価線量限度の取り込みを検討している。その一方、日本では、2007 年勧告の取り入れに際して、水晶体等価線量限度が新たに勧告された場合はその取り入れを検討するとしたものの、検討が開始されていない。そこで、新たな水晶体等価線量限度が国内法へ取り込まれるまで、十分な時間的猶予があるため、本稿で述べた課題を検討して改善する意義は大きい。

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 (Interim) [online]. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf, Accessed 1 December 2012.
 - 3) ICRP; ICRP 2009 Annual report [online]. Available at: <http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Annual%20Report%202009.pdf>, Accessed 1 December 2012.
 - 4) ICRP; ICRP Main Commission meeting 2010 October 25–28 – Cape Town, South Africa [online]. Available at: <http://www.icrp.org/admin/ICRP%20Main%20Commission%20Meeting%20October%202010%20Cape%20Town.pdf>, Accessed 17 January 2013.
 - 5) ICRP; View comments, consultations [online]. Available at: http://www.icrp.org/consultation_view.asp?recommendation=8ED14080-935A-4280-B07A-41342787B313, Accessed 1 December 2012.
 - 6) ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3) (1991).
 - 7) ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4) (2007).
 - 8) C. CLEMENT; New dose limit for lens of the eye, TM on the new dose limits for the lens of the eye: implications and implementation [online]. Available at: <http://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2FRTWS%2Fgeneral%2FShared%20Documents%2FRadiation%20Protection%2FTM%20on%20the%20New%20Dose%20Limit%20to%20the%20Lens%20of%20the%20Eye&FolderCTID=0x012000ED5297AE9E0C2641BF8730241B0CA87C&View=%7B9F111749-22B1-4BB1-A77E-5E2A403EBCEA%7D>, Accessed 1 December 2012.
 - 9) IAEA; International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources, Safety Series No. 115 [online]. Available at: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/publication/wcms_152685.pdf, Accessed 16 January 2013.
 - 10) 原子力安全研究協会；放射性廃棄物の国際基準等に係る動向調査，経済産業省ホームページ，Available at: http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001381.pdf，閲覧 2013 年 12 月 1 日。
 - 11) IAEA; Radiation protection and safety of radiation sources, International Basic Safety Standards 2011 Edition, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, Draft Safety Requirements DS379 [online]. Available at: <http://www-ns.iaea.org/committees/files/bsscomments/1035/DS379-Draft5.0-21Mar2011.pdf>, Accessed 16 January 2013.
 - 12) 原子力安全・保安院；第 29 回 IAEA 安全基準委員会（CSS 会合）について，第 43 改原子力安全委員会資料第 5 号，原子力規制委員会ホームページ，Available at: <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2011/genan043/siryos.pdf>，閲覧 2013 年 12 月 1 日。
 - 13) IAEA; Report of the technical meeting: The new dose limit for the lens of the eye - implication and implementation, 2–4 October 2012 [online]. Available at: <http://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Radiation%20Protection/TM%20on%20the%20New%20Dose%20Limit%20to%20the%20Lens%20of%20the%20Eye/REPORT%20OF%20THE%20TM.pdf>, Accessed 20 January 2013.
 - 14) RASSC; IAEA, RASSC 33-November 2012 [online]. Available at: <http://www-ns.iaea.org/committees/rassc/default.asp?fd=1185&dt=0>, Accessed 1 February 2013.
 - 15) NRC; New International Commission on Radiological Protection; recommendations on the annual dose limit to the lens of the eye 76 FR 53847 [online]. Available at: <https://www.federalregister.gov/articles/2011/08/30/2011-21900/new-international-commission-on-radiological-protection-recommendations-on-the-annual-dose-limit-to>, Accessed 5 February 2013.
 - 16) NRC; SECY-12-0064, Recommendations for policy and technical direction to revise radiation protection regulations and guidance, Washington, 16 October 2012 [online]. Available at: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1228/ML12289A915.pdf>, Accessed 1 February 2013.
 - 17) NRC; NRC's 25th annual regulatory information conference, March 12–14, 2013 [online]. Available at: <http://www.nrc.gov/public-involve/conference-symposia/ric/>, Accessed 1 February 2013.
 - 18) HPA; HPA response to the ICRP statement on tissue

- reactions and recommendation on dose limit for the eye lens [online]. Available at: http://www.hpa.org.uk/Publications/Radiation/HPAResponseStatementsOnRadiationTopics/radresp_ICRPPcataractstatement/, Accessed 1 February 2013.
- 19) S. BOUFFLER, E. AINSBURY, P. GILVIN and J. HARRISON; Radiation-induced cataracts: the Health Protection Agency's response to the ICRP statement on tissue reactions and recommendation on the dose limit for the eye lens, *J. Radiol. Prot.*, **32**, 479–488 (2012).
 - 20) ISO; ISO/CD 15382, Radiological protection - Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities [online]. Available at: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=13&ics2=280&ics3=&csnumber=61582, Accessed 1 February 2013.
 - 21) IEC; IEC 61331-3, Publication detail, [online]. Available at: http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/Artnum_PK/23348, Accessed 1 February 2013.
 - 22) ISO; International harmonized stage code [online]. Available at: http://www.iso.org/iso/stage_codes.pdf, Accessed 1 February 2013.
 - 23) ISO/IEC 2012 ; ISO/IEC Directives, Part 1, Procedures for the technical work, Ninth edition, 2012 [online]. Available at: http://www.iec.ch/members_experts/refdocs/iec/isoiecdir-1%7Bed9.0%7Den.pdf, Accessed 1 February 2013.
 - 24) 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—, 原子力規制委員会ホームページ Available at: http://www.nsr.go.jp/archive/mext/b_menu/shingi/housha/toushin/_icsFiles/afieldfile/2011/03/07/1302851_1.pdf, 閲覧 2013 年 2 月 6 日.
 - 25) 有人サポート委員会；有人サポート委員会 宇宙放射線被ばく管理分科会報告書（案）への意見募集について, 宇宙ステーション・きぼう広報・情報センター, 宇宙航空研究開発機構ホームページ, Available at: <http://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/000.html>, 閲覧 2013 年 1 月 25 日.
 - 26) 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).
 - 27) 独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター；最新がん統計, 独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センターホームページ, Available at: <http://ganjoho.jp/public/statistics/pub/statistics01.html>, 閲覧 2012 年 12 月 1 日.
 - 28) Y. BELKACÉMI, M. OZSAHIN, F. PÈNE, B. RIO, J. P. LAPORTE, V. LEBLOND, E. TOUBOUL, M. SCHLIENGER, N. C. GOLIN and A. LAUGIER; Cataractogenesis after total body irradiation, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **35**, 53–60 (1996).
 - 29) ICRP; Nonstochastic effects of ionizing radiation, ICRP Publication 41. Ann. ICRP **14** (3) (1984).
 - 30) J. HENDRY; Topic 3. Non-cancer effects summary of discussions, 3rd Workshop on Science and Values in radiological protection decision making and the 6th Asian regional conference on the evolution of the system of radiological protection [online]. Available at: http://www.oecd-nea.org/rp/workshops/tokyo2012/topic3_breakout_summary.pdf, Accessed 17 January 2013.
 - 31) ICRP; Statement from the 1985 Paris meeting of the International Commission on Radiological Protection, *J. Soc. Radiol. Prot.*, **5**, 87–88 (1985).
 - 32) ICRP; Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack, ICRP Publication 96. Ann. ICRP **35** (1) (2005).
 - 33) 厚生労働省；電離放射線障害防止規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第四十一号）第二章，第七条 2.
 - 34) 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 observation study, *Int. J. Cardiol.*, in press (2012).
 - 35) E. VAÑO, L. GONZÁLEZ, E. GUIBELALDE, J. M. FERNÁNDEZ and J. I. TEN; Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br. J. Radiol.*, **71**, 954–960 (1998).
 - 36) E. VANO, L. GONZALEZ, J. M. FERNÁNDEZ and Z. J. HASKAI; Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted, *Radiology*, **248**, 945–953 (2008).
 - 37) K. P. KIM, D. L. MILLER, S. BALTER, R. A. KLEINERMAN, M. S. LINET, D. KWON and S. L. SIMON; Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures, *Health Phys.*, **94**, 211–227 (2008).
 - 38) L. DONADILLE, E. CARINOU, M. BRODECKI, J. DOMIENIK, J. JANKOWSKI, C. KOUKORAVA, S. KRIM, D. NIKODEMOVA, N. RUIZ-LOPEZ, M. SANS-MERCE, L. STRUELENS, F. VANHAVERE

- and R. ZAKNOUNE; Staff eye lens and extremity exposure in interventional cardiology: Results of the ORAMED project, *Radiat. Meas.*, **46**, 1203–1209 (2011).
- 39) 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. Dosimetry*, **153**, 282–293 (2013).
- 40) ICRP; Radiological protection in fluoroscopically guided procedures outside the imaging department, ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40 (6) (2010).
- 41) ICRP; Radiological protection in cardiology, ICRP Publication 120. Ann. ICRP 42 (1) (2013).
- 42) W. C. FUCHS; Effect of the röntgen rays of the skin, *Western Electrician*, **12**, 291 (1896).
- 43) 千代田テクノル; 千代田テクノル・アイソトープ事業カタログサイト, カタログダウンロード, RI 防護衣及び関連品, Available at: <http://isotope.c-technol.co.jp/pdf/06RIBougou.pdf>, 閲覧 2013 年 1 月 10 日.
- 44) 株式会社マエダ; 製品紹介, HAGOROMO 総合カタログ, <羽衣スタンダード>, 眼の防護, Available at: <http://www.kk-maeda.com/pdf/products/hagoromo/p20-21.pdf>, 閲覧 2013 年 1 月 10 日.
- 45) 東レ・メディカル株式会社; 医療従事者向け情報, 製品情報, 血管造影・X 線防護, X 線防護用グラス, パノラマシールド, Available at: http://www.toray-medical.com/medical/kekkan/kek_d001.html, 閲覧 2013 年 1 月 11 日.
- 46) 日本循環器学会; 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 (2011 年改訂版), Available at: http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2011_nagai_rad_h.pdf, 閲覧 2013 年 1 月 17 日.
- 47) ICRP; Managing patient dose in computed tomography, Publication 87. Ann. ICRP 30 (4) (2000).
- 48) T. MORITAKE, Y. MATSUMARU, T. TAKIGAWA, K. NISHIZAWA, A. MATSUMURA and K. TSUBOI; Dose measurement on both patients and operators during neurointerventional procedures using photoluminescence glass dosimeters, *ALNR Am. J. Neuroradiol.*, **29**, 1910–1917 (2008).
- 49) 労働省労働基準局長; 電離放射線に係る疾病の業務上外の認定基準について, 基発第 810 号, 厚生労働省ホームページ, Available at: <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/05/dl/s0522-7c.pdf>, 閲覧 2013 年 2 月 13 日.
- 50) 厚生労働省; 胃がん・食道がん・結腸がんと放射線被ばくに関する医学的知見の公表～労災請求を受け, 疫学調査報告を分析・検討して報告書を取りまとめ～, 厚生労働省ホームページ, Available at: <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002koo1.html>, 閲覧 2013 年 2 月 6 日.
- 51) 厚生労働省; 原爆症認定, 厚生労働省ホームページ, Available at: <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/genbaku09/08.html>, 閲覧 2013 年 2 月 11 日.
- 52) 疾病・生涯認定審査会, 原子爆弾被爆者医療分科会; 原爆症認定に関する審査の方針, Available at: <http://shoruisouko.xsrv.jp/kntk/ss2.pdf>, 閲覧 2013 年 2 月 11 日.
- 53) 広島県; 原爆症の認定について, 広島県ホームページ, Available at: <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/52/8566661.html>, 閲覧 2013 年 2 月 11 日.
- 54) 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).
- 55) G. R. MERRIAM Jr. and E. F. FOCHT; A clinical and experimental study of the effect of single and divided doses of radiation on cataract production, *Trans. Am. Ophthalmol. Soc.*, **60**, 35–52 (1962).
- 56) D. G. COGAN, D. D. DONALDSON and A. B. REESE; Clinical and pathological characteristics of radiation cataract, *AMA Arch. Ophthalmol.*, **47**, 55–70 (1952).
- 57) C. DELCOURT, J. P. CRISTOL, F. TESSIER, C. L. LÉGER, F. MICHEL, L. PAPOZ and the POLA Study Group; Risk factors for cortical, nuclear, and posterior subcapsular cataracts - The POLA study, *Am. J. Epidemiol.*, **151**, 497–504 (2000).

藤通 有希 (ふじみち ゆき)

2012 年 3 月に東京大学大学院博士前期課程修了。修士 (工学)。2012 年 4 月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 2 年。興味ある分野は放射線防護と放射線生物学。

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 69 編。国内

受賞 14 件。ポスドク等を終了後 10 年以内の世界の研究者を対象に選考する米国放射線影響学会（RRS）マイケルフライ研究賞を 2013 年 9 月に受賞予定（RRS が日本人に賞を授与するのは初）。

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