

平成 29 年度放射線対策委託費
(放射線安全規制研究戦略的推進事業)

原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量
モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？
～水晶体被ばくの実態から探る～

成 果 報 告 書

藤田保健衛生大学

平成 30 年 3 月

目 次

1.	全体概要.....	1- 1
1.1	背景・目的.....	1- 1
1.2	研究課題及び研究体制.....	1- 2
1.3	今年度の実施内容.....	1- 4
1.3.1	原子力発電所等における水晶体の等価線量の実態調査及び標準モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討・提案.....	1- 4
1.3.2	原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究.....	1- 4
1.3.3	医療施設における水晶体の等価線量の実態調査と効果的な教育プログラムの開発...	1- 5
1.3.4	医療機関における不均等被ばく管理の実態と非透視検査での水晶体等価線量の測定・評価方法に関する研究.....	1- 5
1.3.5	協力及び連携.....	1- 6
1.3.6	研究全体の進捗状況の把握等.....	1- 6
	参考文献.....	1- 7
2.	原子力発電所等における水晶体等価線量の実態調査.....	2- 1
2.1	背景・目的.....	2- 2
2.2	水晶体の等価線量の測定を実施する作業項目の抽出.....	2- 4
2.2.1	原子力発電所.....	2- 4
2.2.2	非破壊検査.....	2- 9
2.3	個人線量測定方法.....	2- 9
2.3.1	原子力発電所等の線量管理の現状.....	2- 9
2.3.2	本研究における水晶体の等価線量算定方法.....	2-10
2.3.3	使用線量計.....	2-13
2.3.4	倫理面への配慮.....	2-13
2.4	研究結果.....	2-17
2.4.1	福島第一原子力発電所の従事者の水晶体の等価線量測定結果及び考察.....	2-17
2.4.2	非破壊検査作業の従事者の水晶体等価線量測定結果及び考察.....	2-20
2.5	水晶体の等価線量の評価方法に関する考察: X・ γ 線の1 cm線量当量、3 mm線量当量、70 μ m線量当量への換算係数の関係.....	2-21
2.6	文献調査.....	2-26
2.6.1	各国におけるICRPの水晶体の線量限度の取入れ状況.....	2-26
2.6.2	緊急時の水晶体の等価線量制限レベルについて.....	2-29
2.7	結論.....	2-32
2.8	次年度の活動概要.....	2-33
2.9	研究発表.....	2-33
	謝辞.....	2-34
	参考文献.....	2-35

3.	原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究.....	3- 1
3.1	目的.....	3- 2
3.2	研究方法.....	3- 2
3.2.1	原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査.....	3- 2
3.2.2	作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験.....	3- 3
3.2.3	人体形状ファントムを用いる模擬照射実験.....	3- 8
3.3	研究結果.....	3-13
3.3.1	原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査.....	3-13
3.3.2	作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験.....	3-17
3.3.3	人体形状ファントムを用いる模擬照射実験.....	3-23
3.4	考察.....	3-28
3.4.1	原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査..	3-28
3.4.2	作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験.....	3-28
3.4.3	人体形状ファントムを用いる模擬照射実験.....	3-30
3.5	結論.....	3-32
3.6	研究発表.....	3-33
	謝辞.....	3-33
	参考文献.....	3-34
4.	医療施設における水晶体の等価線量の実態調査と防護方法に関する効果的な教育プログラムの開発.....	4- 1
4.1	研究目的.....	4- 2
4.2	研究方法.....	4- 2
4.2.1	対象選定.....	4- 2
4.2.2	計測方法.....	4- 3
4.3	研究結果.....	4- 4
4.4	考察.....	4- 5
4.5	結論.....	4- 6
4.6	次年度の活動概要.....	4- 6
4.7	研究発表.....	4- 7
5.	医療機関における不均等被ばく管理の実態と非透視検査での水晶体等価線量の測定・評価方法に関する研究.....	5- 1
5.1	背景・目的.....	5- 2
5.2	研究方法.....	5- 3
5.2.1	放射線診療従事者の不均等被ばく管理の実態に関するアンケート.....	5- 3
5.2.2	非透視系放射線検査での水晶体等価線量の実態調査.....	5- 3
5.2.3	防護メガネの鉛当量による遮蔽効果の評価.....	5- 9

5.3	研究結果.....	5-14
5.3.1	医療機関における不均等被ばくの管理状況のアンケート.....	5-14
5.3.2	X線 CT 検査や一般撮影等透視を使用しない放射線検査介助時における水晶体被ばくの 評価.....	5-20
5.3.3	防護メガネの照射方向別の遮蔽能力について評価.....	5-24
5.4	考察.....	5-25
5.4.1	医療機関における不均等被ばくの管理状況のアンケート.....	5-25
5.4.2	X線 CT 検査や一般撮影等透視を使用しない放射線検査介助時における水晶体被ばくの 程度を評価.....	5-26
5.4.3	防護メガネの照射方向別の遮蔽能力について評価.....	5-26
5.5	次年度の活動概要.....	5-27
5.5.1	不均等被ばく管理実態調査アンケートの集計と解析.....	5-27
5.5.2	実態調査結果の整理と検討.....	5-27
5.5.3	過去の水晶体被ばく、防護に関する文献調査と本研究の取りまとめ.....	5-27
5.6	研究発表.....	5-27
	参考文献.....	5-28
6.	最後に.....	6- 1

原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～

1. 全体概要

1.1 背景・目的

2011年、ICRPは、計画被ばく状況下での職業被ばくに対して、水晶体の等価線量限度を年間150 mSvから5年間の平均を20 mSv/年、かつ、1年間で50 mSvを超えないとする声明を発表した¹⁾。2014年、IAEAは、これを国際安全基本原則(BSS)²⁾に取り入れた。その後、2013年には、欧州連合(EU)がEURATOM指令³⁾を出すなど、近年、水晶体の等価線量限度に関する国際的な様々な動きがあった。

わが国では、日本保健物理学会において2013年から2014年に水晶体の放射線防護に関する専門研究会を、2015年から2016年に水晶体の線量限度に関する専門研究会を設置し、水晶体の等価線量の評価に関する国際動向や諸外国での水晶体防護・疫学研究の現状、わが国の水晶体の等価線量レベル等を調査し、課題をとりまとめた⁴⁾。

原子力規制委員会は、2016年1月にIAEAの総合規制評価サービス(IRRS)を受け入れた。この際に、自己評価の過程で浮き彫りにされた課題として、職業被ばくに関する眼の水晶体の等価線量限度について、IAEAの安全基準を踏まえて対応する必要があるとした⁵⁾。また、2017年4月には厚生労働省が関連機関にあてて、『放射線業務における眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策について』(通知)⁶⁾が出された。この中で、「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能なかぎり低く抑えるべきである」というALARAの原則に則り、実施可能な被ばく低減に取り組むこと及び今後のわが国の規制動向に注目するよう呼び掛けた。

このような国内・国外での動きがある中、2017年7月に開催された第135回放射線審議会総会では、「わが国においても水晶体の線量管理に関する規制を見直す必要がある」として、放射線審議会の下に『眼の水晶体の放射線防護検討部会』を設置するとした⁷⁾。事業者からのヒアリング等を行い、7回の検討を経て、水晶体の防護のあり方を取りまとめた。これは、140回放射線審議会総会に報告、各省庁に提言がなされた⁸⁾。

水晶体の等価線量限度を規制に取り入れた場合に、円滑かつ適切に規制が運用されるためには、標準的な水晶体の等価線量モニタリング方法が確立されるとともに、各分野において被ばく低減のための防護対策や事業者等による自主的な被ばく低減への取り組みが必要となる。

そこで、本研究では、各分野の水晶体の被ばくの実態を把握し、これらを踏まえた上で分野を横断した標準的な水晶体の等価線量モニタリング手法、実態に即した適切な防護及び管理の在り方を提案する。

1.2 研究課題及び研究体制

表 1-1 に主任研究者及び分担研究者の研究課題を示す。合わせて、図 1-1 に全体の研究体制を示す。表 1-1 の課題 1 及び 2 が主に原子力分野（非破壊検査含む）の水晶体被ばくに関連した研究であり、課題 3 及び 4 が医療分野に関連した研究である。各課題は、主任研究者及び分担研究者を中心に連携を取りながら、研究参加者及び研究協力者の協力を得て実施することとした。

また、日本保健物理学会、日本医学放射線学会、日本放射線技術学会、日本放射線看護学会、日本歯科学会等の関連学会、原子力、医療及び非破壊検査関連の事業者、関連研究機関である産業技術総合研究所等にも協力を仰ぎ、連携を図ることとした。

表 1-1 主任研究者及び分担研究者の研究課題

	研究課題	担当者
1	原子力発電所等における水晶体の等価線量の実態調査及び標準モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討・提案	横山 須美
2	原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究	辻村 憲雄
3	医療施設における水晶体の等価線量の実態調査と効果的な教育プログラムの開発	大野 和子
4	医療機関における不均等被ばく管理の実態と非透視検査での水晶体等価線量の測定・評価方法に関する研究	藤淵 俊王

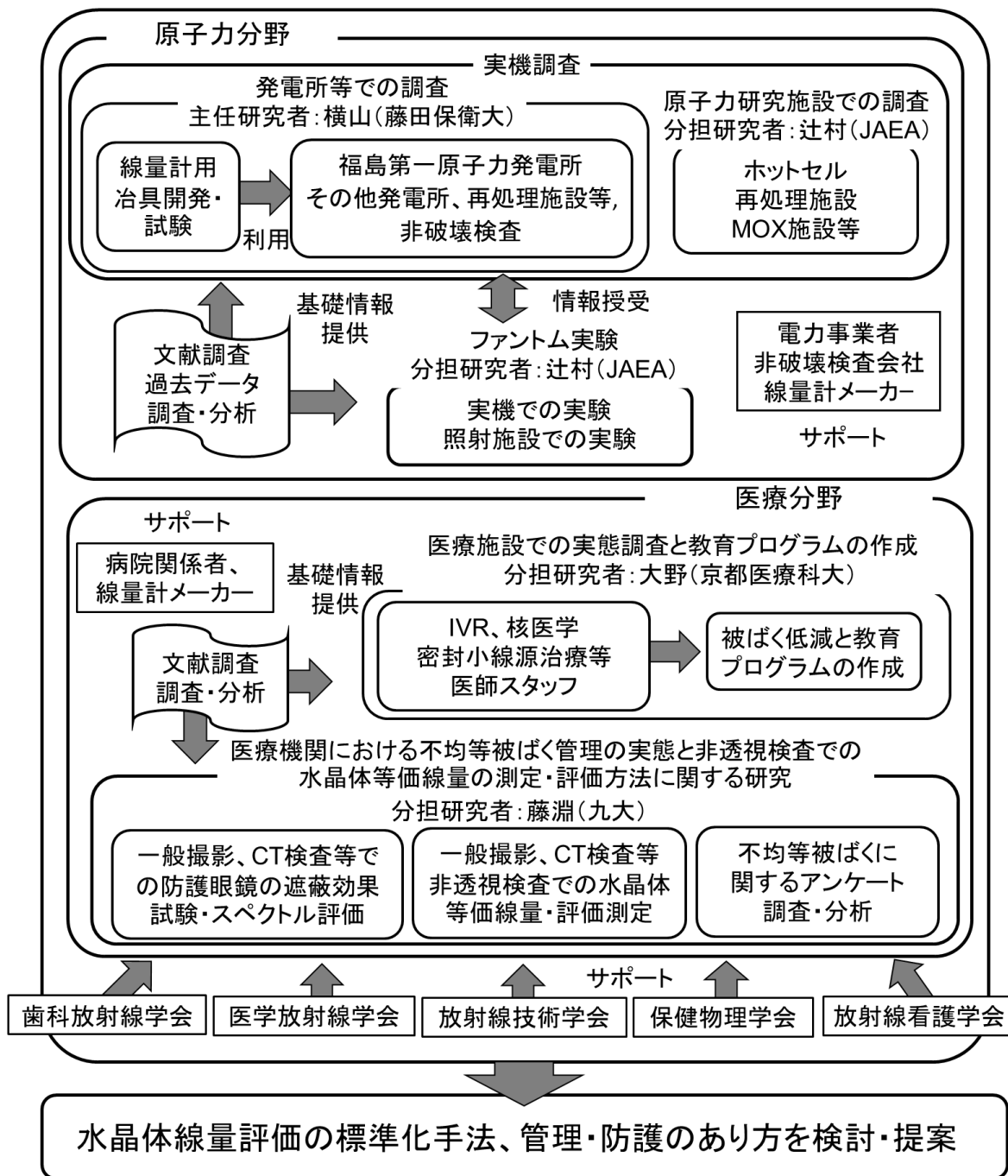


図 1-1 実施体制図 (全体)

1.3 今年度の実施内容

今年度に主任研究者及び分担研究者の実施した研究課題の概要を以下に述べる。各研究課題の内容の詳細は次章以降に述べることとする。

1.3.1 原子力発電所等における水晶体の等価線量の実態調査及び標準モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討・提案

原子力施設等の従事者の水晶体の等価線量を把握するため、従事者の作業項目の抽出を実施した。対象施設及び作業は、東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所及び九州電力（株）川内原子力発電所での作業、並びに石油コンビナート等での放射線透過検査といった非破壊検査作業とした。原子力発電所においては、水晶体の線量が高くなるかつ／または、不均等被ばくをともなう作業項目を抽出し、これらの作業場において、従事者の水晶体の等価線量測定を実施するための準備を進めた。

従事者に装着する線量計の装着方法の検討では、線量計装着位置、線量計装着治具（またはゴムバンド）、線量計を装着した時の全面マスクの気密性への影響等を検討した。線量計を装着することにより、全面マスクが初期規格から大幅に逸脱することなく、気密性を保つことができることを確認できたことから、この方法により、実際の作業場での従事者の個人線量測定を実施した。

従事者の水晶体の等価線量測定は、上記の施設の作業において実施した（一部継続中）。福島第一原子力発電所では、水晶体の等価線量が高くなることが予想される γ 線場及び β 線場で作業を行う従事者を対象とした。測定結果から、実際の作業場における全面マスクの β 線に対する遮蔽効果、線量計取り付け位置の影響、頭部（水晶体）と胸部位置での線量計の値の差等を明らかにした。頭部と胸部の線量計の値の違いについては、さまざまな要因が考えられ、今後も検討が必要である。非破壊検査の作業においては、X線源または γ 線源を用いた放射線透過検査時の従事者に対して線量測定を実施した。

福島第一原子力発電所における作業場の空間線量及びエネルギースペクトル測定は分担研究者らが中心となって実施し、主任研究者はこの情報を共有した。なお、川内原子力発電所における従事者の個人線量測定及び空間線量測定は、現在も継続して実施中であり、次年度に分析及び取りまとめを実施する予定である。

文献調査では、原子力発電所での作業選定に有用となる情報を中心に取りまとめた。また、計画被ばく状況及び緊急被ばく状況における職業人の水晶体の等価線量限度や制限レベルに関する国際動向を把握するため、各国の線量制限レベルの取入れ状況に関する情報をweb等で収集し、取りまとめた。

1.3.2 原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究

原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査では、日本原子力研究開発機構（核燃料サイクル工学研究所及び原子力科学研究所）において、こ

れまでに実施されたセル内作業・グローブボックス作業に関する放射線記録等を調査し、水晶体に高線量・不均等被ばくを受ける作業条件等を明らかにした。

作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験では、福島第一原子力発電所構内において、 γ 線及び β 線のスペクトル測定を行い、被ばくの主たる線源の特徴（エネルギー分布+大まかな入射角度分布）を評価するとともに、水晶体等価線量（3 mm 線量当量）と1 cm 線量当量などとの相違について線質の観点から考察した。また、同じ作業場所で、平板（体幹部）と円柱（頭部）からなる簡易的なファントム表面に取り付けた個人線量計の照射実験を行い、線量計の異なる向きや位置間で指示値変化を調べた。このとき、ファントム全体を連続水平回転させた場合、全面マスクを取り付けた場合での指示値変化もあわせて調べた。

人体形状ファントムを用いる模擬照射実験では、文献調査及び作業場で得られた線源情報に基づき、校正場において、人体形状ファントム（RANDO ファントム）に取り付けた線量計の模擬照射実験を行った。実験を通じ、頭部に取り付けた水晶体用線量計の指示値の精度、取付位置による指示値の変化、さらに全面マスクなどの防護装備による線量低減効果等を明らかにした。

1.3.3 医療施設における水晶体の等価線量の実態調査と効果的な教育プログラムの開発

この数年急速に発展したインターベンション手術・手技（IVR）等は侵襲性が低く、外科的手術を受けることができない部位の治療も可能とした。高齢の患者にとっては、これらの手法が唯一の救命方法ともなっている。また、核医学診療、小線源治療、歯科領域の検査でも日常的に多数の患者に必要な放射線診療を実施している。しかし、水晶体の等価線量限度が現行の年 150mSv から 20mSv に引き下げられた場合、線量限度を超える放射線診療従事者が平成 27 年度の統計を参考にすれば約 3,000 人^{9, 10)}に上る恐れがある。

本研究では、従来の個人線量測定結果よりも実情に一層近似した、より正確な結果を得るために、日本国内で放射線診療に従事する様々な診療科の放射線診療従事者（医師、診療放射線技師、看護師）を対象として、水晶体等価線量を、眼の近傍に違和感なく装着可能な特殊な形状の線量計を用いて計測した。

その結果、現在計測を終了した放射線科と循環器科の IVR、核医学診療、小線源治療においては防護眼鏡や遮蔽板等の防護具を適切に利用することで年間 20mSv 以下の被ばく線量は達成可能とする結論を得た。

1.3.4 医療機関における不均等被ばく管理の実態と非透視検査での水晶体等価線量の測定・評価方法に関する研究

医療現場において、放射線診療従事者が被ばくする可能性のある場所で作業する際、原則として防護プロテクタを着用しているが、その場合プロテクタを着用している部位とそうでない部位で被ばく量が異なる不均等被ばくとなる。水晶体の線量を把握するためには、不均等被ばくを評価するため頸部への個人モニタ（以下頸部モニタ）の装着が必要であるが、1つの個人モニタ装着でしか管理していない施設もあり、不均等被ばく、特に水晶体

の管理状況は施設間で異なる。施設間による被ばく管理の非統一性は、放射線診療従事者の正確な水晶体被ばく管理ができないことにつながる可能性がある。不均等被ばく管理や放射線診療従事者の登録について実態をアンケートにより明らかにすることで、不均等被ばく管理の在り方について検討する材料とする。

水晶体被ばくが多いとされる IVR 等透視を使用した放射線診療については多くの水晶体被ばくに関する調査報告があるものの、透視を使用しない X 線 CT 検査や一般撮影においても介助時に被ばくする可能性があるが、それらの放射線診療での水晶体被ばくに関する調査はほとんど報告されていない。医療従事者が放射線検査で介助する際に線量計を装着することで、被ばくの程度を明らかにし、介助時の放射線防護の必要性を示す。

水晶体の被ばく低減目的で防護メガネを着用する場合、頸部モニタの値を利用すると過大評価になってしまう。頸部モニタの値から正確な水晶体等価線量を評価しようとした際の補正方法は確立されていない。様々な種類、形状の防護メガネに対して照射方向別の遮蔽能力を明らかにすることで、換算方法を検討する際の基礎データを取得した。

1.3.5 協力及び連携

課題解決においては、適宜、線量測定を実施する機関（事業者や施設）、主任研究者または分担研究者、日本保健物理学会等の学会等に助言を求めた。

1.3.6 研究全体の進捗状況の把握等

研究で得られた成果については、規制庁からの要請に応じ、適宜、放射線審議会や関連部会に報告した。2018年2月には、規制庁において開催される成果報告会において、これまでに得られた研究成果とさらに追加して実施する必要性のある項目や今後の課題について発表を行った。上記研究により得られた成果は、日本保健物理学会企画シンポジウムにおいて報告した。

また、原子力規制庁及び同庁が任命するプログラムオフィサーに対し、進捗報告を月に1回程度行った。

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, IAEA; Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 (2014).
- 3) EU; Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union., , 2018年3月12日閲覧.
<http://faolex.fao.org/docs/pdf/eur130004.pdf>
- 4) S. Yokoyama, N. Hamada, T. Hayashida, N. Tsujimura, H. Tatsuzaki, T. Kurosawa, K. Nabatame, H. Ohguchi, K. Ohno, C. Yamauchi-Kawaura, T. Iimoto¹, T. Ichiji, Y. Hotta, S. Iwai and K. Akahane, Current situations and discussions in Japan in relation to the new occupational equivalent dose limit for the lens of the eye, J. Radiol. Prot. 37659–683 (2017) など.
- 5) Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Japan IAEA-NS-IRRS-2016 (2016), , 2018年3月12日閲覧. <http://www.nsr.go.jp/data/000148261.pdf>
- 6) 厚生労働省労働基準局安全衛生部長, 放射線業務における眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策について (平成29年4月18日), 基安発0418第1号 (2017) 他, 2018年3月12日閲覧.
http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anzen/dl/anzenisei_0418_1-4.pdf
- 7) 放射線審議会, 放射線審議会の部会について (案) (2017), 2018年3月12日閲覧.
<http://www.nsr.go.jp/data/000196890.pdf>
- 8) 放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について, 平成30年2月(2018).
- 9) 長瀬ランダウア, 平成28年度眼の水晶体等価線量の推計.NL ニュース, p2,(11)479 (2017).
- 10) 千代田テクノル, 平成28年度個人線量の実態. FBNews p9-17, 489 (2017).

2. 原子力発電所等における水晶体等価線量の実態調査

主任研究者	横山須美	学校法人 藤田学園 藤田保健衛生大学
研究協力者	江崎 巖	株式会社 千代田テクノル
研究協力者	立崎 英夫	国立研究開発法人 量子科学研究開発機構
研究協力者	平尾 茂一	国立大学法人 福島大学
研究協力者	青木 克憲	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

2.1 背景・目的

2011年に国際放射線防護委員会（ICRP）が組織反応に関する声明を発表し、計画被ばく状況下における職業人の水晶体の等価線量限度を大幅に引き下げる勧告を発表した¹⁾。これにより、国内外において、水晶体の放射線防護や管理に関する関心が高まった。ICRPが水晶体の等価線量限度を勧告した同じ年に、国際原子力機関（IAEA）は国際基本安全基準（BSS）²⁾へこのICRPの水晶体の等価線量限度を取り入れることとした。IAEAは、水晶体の等価線量限度の引き下げに対する各国の関心の高さから、2012年に水晶体の線量限度の適応に関する技術的会合を開催し、2013年にどのような放射線従事者が水晶体の等価線量が高くなるのか、水晶体の等価線量をどのように測定すればよいか等、水晶体の放射線防護やモニタリングの基本的な考え方をIAEA TECDOC1731として取りまとめた³⁾。

水晶体の被ばく防護に関する研究としては、医療分野においては、欧州で医療スタッフの防護の最適化の観点から Optimization of RAdiation protection for MEDical staff (ORAMED) プロジェクトが実施された⁴⁾。IAEA TECDOC1731の中でもインターベンショナルラジオロジー（IVR）のスタッフ、核医学診断・治療における加速器運転員の被ばくとその防護に注意すべきとしているように³⁾、線量限度を引き下げた場合に被ばく低減策が必要な従事者が多く存在することから、医療スタッフに対しては様々な水晶体の被ばく防護や線量評価に関する研究がなされている⁵⁾。

一方、IAEA TECDOC1731では、ICRPの水晶体の等価線量限度の取入れに関して、原子力施設等において注目すべき作業及び従事者としては、①グローブボックスを使用する従事者、②原子力施設で廃止措置（廃炉）作業に従事する者、③プルトニウムや劣化ウランを取り扱う者としている³⁾。通常の原子力発電所の従事者等については、特に言及していない。

このような現状において、スウェーデンの規制当局である放射線規制機関（SSM）は、原子力施設等における作業者の水晶体の放射線防護や線量評価方法について詳細な調査を実施しておく必要があるとした⁶⁾。そして、スウェーデン国内の原子力施設に水晶体モニタリングの実施が妥当である作業環境及び業種の選定、個人の防護具の遮蔽能力試験の実施等を要求した⁶⁾。2013年から、その取りまとめ機関であるバッテンフォール社が原子力施設での試験研究を開始した⁶⁾。また、2017年には、英国の原子力施設において、胸部に装着したアクティブ型線量計（電子式線量計）により水晶体の等価線量をモニタリングすることが妥当かどうかについての検討を行った論文が発表された⁷⁾。この論文では、英国の原子力施設においては、眼の近傍において受動形個人線量計（熱ルミネセンス線量計、TLD）を装着しなくても、胸部の電子式線量計（APD）により、間接的に水晶体の等価線量をモニタリングすることが可能であるとしている⁷⁾。

原子力発電所の定期検査時等における通常の原子力発電所の作業においては、場の線量分布等から、明らかに不均等被ばくとなるおそれがあるような特別な場合を除き、従事者は全身に均等に被ばくを受けるとして、胸部（または腹部）でのみ線量管理を実施している⁸⁾。わが国において2001年の法令改正時に、実効線量を算定するための1 cm線量当量と皮膚の等価線量を算定するための70 μm線量当量を算定することにより、3mm線量当量を評価しなくても、水晶体の等価線量限度を担保できることを検討している^{9, 10)}。明記さ

れていないが、均等被ばくとする根拠は、その時に合わせて実施された調査によるものと考えられる。しかし、水晶体の等価線量限度が引き下げられ、実効線量限度と同じ値となった場合に、これまでの方法と同様な方法での管理が適切かどうかを判断するためには実態を把握しておく必要がある。

過去にわが国の原子力発電所の従事者を対象とした個人モニタの装着基準を調査するための研究がある¹¹⁾。この研究では、発電所内の作業者に実験的に複数の線量計を装着してその考察を実施している。ほかにも、ダイバーによる潜水作業といった特殊作業における不均等被ばくの管理についての調査等の報告もある¹²⁾。しかし、これらの研究は、水晶体の等価線量に着目した研究ではない。また、わが国の現行法令（水晶体の等価線量限度：150mSv/年）の下で実施したものである。その上、研究の実施から年月が経過している。近年において原子力施設の従事者の水晶体の被ばくとその防護に着目した先行研究はほとんどない^{8,13)}ことから、近い将来における水晶体の等価線量限度の規制への取入れに対応するためには、現在の原子力施設（原子力発電所）の作業従事者に対して、水晶体の被ばくの実態を把握する必要がある。

また、IAEA TECDOC1731 では、工業分野の放射線業務従事者については、年間 20mSv を超える従事者は少なく、通常は均等被ばくであることから、別途、水晶体のモニタリングは必要ないとしている³⁾。しかし、非破壊検査の放射線透過試験のような作業等において、実際の作業場での線量率（空間分布）測定や胸部と頭部との線量比較・調査した例はない。

そこで、本研究では、標準的な水晶体の等価線量モニタリングの方法の確立、適切な防護の実現に向け、これまでに十分なデータが得られていない原子力発電所や非破壊検査の作業現場で作業する放射線業務従事者の水晶体の等価線量を測定し、空間線量分布の影響等についても検討した。

水晶体の等価線量測定に当たっては、特に、原子力発電所での調査としては、通常運転中の原子力発電所とは異なる東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（以下、福島第一原子力発電所）を実施対象とした。福島第一原子力発電所では、現在、事故後の廃炉作業を進めており、他に例のない作業現場で従事者が作業を行っている¹⁴⁾。特に、 β 線の線量が高い場や γ 線の線量が高い場における管理には、異なる課題がある。 β 線場では、全面マスクの着用により、水晶体の等価線量がどの程度低減するのか、その際の線量評価や管理をどのように実施するのが適当かも検討を行うこととした。さらに、胸部で測定した結果や現行法令に基づいて算定した場合と比較を行い、現在の管理方法で水晶体の等価線量を管理可能か、また、将来の規制に対応できるのかを光子に対する 1 cm 線量当量、3 mm 線量当量、70 μ m 線量当量の換算係数の関係から考察した。

なお、原子力施設のうち、再処理施設に関する調査結果については、第 3 章で述べる。

2.2 水晶体の等価線量の測定を実施する作業項目の抽出

どのような施設や作業に対して水晶体の等価線量を試験的に測定・調査することで、モニタリング、防護、管理に必要な情報が得られるのかを検討した。

2.2.1 原子力発電所

原子力施設には、発電用原子炉施設（原子力発電所）、研究開発段階にある発電の用に供する原子炉施設、加工施設、再処理施設、廃棄施設及び貯蔵施設がある。

原子力発電所については、2011年に福島第一原子力発電所での事故以降、2012年5月には国内の原子力発電所がすべて停止した¹⁵⁾。また、この事故を踏まえ、2013年には従来の規制基準に加えて、共通要因による安全機能の一斉喪失を防止する観点から自然現象や火災、重大事故等に対処するための要求事項等が新設され、新規制基準が施行された¹⁶⁾。

本研究を開始した2017年8月当時、新規制基準適合性に係る審査を受けて許可、使用前検査を経て、通常運転を行っていた原子力発電所は、四国電力伊方発電所3号機、九州電力川内原子力発電所1号機及び2号機、関西電力高浜発電所3号機及び4号機の5基であった。（2018年3月現在、伊方発電所3号機が2017年10月3日から定期検査のため停止。川内原子力発電所1号機が2018年1月29日から定期検査のため停止。）¹⁷⁻¹⁹⁾

上記の原子力施設は、原子力放射線業務従事者被ばく線量登録管理制度に参加しており、放射線業務従事者の線量（実効線量）については、公益財団法人放射線影響協会の放射線従事者中央登録センターで一元管理されている。現在は2016年度までの放射線業務従事者の線量管理状況が公開されている²⁰⁾。

2017年（2016年度実績）の主な発電用原子炉施設の被ばく線量分布を表2-1に示す。報告されている発電用原子炉施設の放射線業務従事者の総数は62,721名であり、うち、社員は10,208名、協力会社等のその他の従事者は52,513名であった。

福島第一原子力発電所では、現在、廃炉に向けた作業を実施していることから、その他の発電所に比べて従事者数も多く、総線量は45.9人・Svと最も高い。サイト内のガレキの撤去や除染、遮蔽により発電所構内の環境が改善されつつあるため、従事者の線量も年々低下しつつあるものの、2016年4月から2017年3月の従事者の累積被ばく線量（実効線量）としては、15,835名のうち50mSvを超えた人はいなかったが、20mSvから50mSvの者は、216名であった。

このほかの発電所では、中部電力（株）浜岡原子力発電所の従事者の最大線量が15.5mSv（15mSvから20mSv:1名）、九州電力（株）川内原子力発電所の従事者の最大線量が11.8mSv（10mSvから15mSv:4名）、中国電力（株）島根原子力発電所の従事者の最大線量が11.4mSv（10mSvから15mSv:2名）であり10mSvを超えた人がいたが、20mSvを超えた人はいなかった。

2016年度において、実用発電用原子炉施設、研究開発段階にある発電の用に供する原子炉施設、加工施設、再処理施設、廃棄物埋設施設、廃棄物管理施設、試験研究用等原子炉施設、核燃料施設のいずれの施設においても女子の従事者で1mSvを超える人はいなかった。

再処理施設については、第3章で、日本原子力研究開発機構の再処理施設における過去の作業記録等から、不均等被ばくを伴う作業や高線量被ばくをともなう作業の調査を行っている。このほかの再処理施設としては、日本原燃（株）再処理事業所の再処理施設がある。日本原燃（株）の再処理施設は2018年上期にしゅん工予定であったが、新規制基準を踏まえた安全性向上を図るため、2017年12月に当初予定のしゅん工時期を延期するとした。変更後、再処理施設は2021年度上期にしゅん工を予定としている²¹⁾。このほか日本原燃（株）ではMOX燃料工場についても、2019年度上期にしゅん工を予定していたが、2022年度上期に変更された。このため、現在施設は稼働していない。2016年度の日本原燃（株）の再処理施設における放射線業務従事者の線量（総実効線量）は、5 mSvを超える者はおらず、最大線量は2.0 mSv、総線量は0.04 人・Sv（放射線業務従事者数：5773名）であった。

廃棄物埋設施設及び廃棄物管理施設としては、日本原燃（株）濃縮・埋設事業所（廃棄物埋設施設）、日本原燃（株）再処理施設（廃棄物管理施設）、日本原子力研究開発機構廃棄物埋設施設及び廃棄物管理施設がある。日本原燃（株）再処理事業所（廃棄物管理施設）では、2007年度から2016年度の線量は0 人・Sv（2016年度の放射線業務従事者数：1179名）であった。日本原子力研究開発機構の再処理施設については、2007年度から2016年度において総線量が0.01 人・Sv（2016年度の放射線業務従事者数：191名）を超えることはなかった。

これらの原子力施設の運転状況及び従事者の実効線量分布を参考とするとともに、事業者と意見交換を行い、本研究での水晶体の等価線量測定については、他に例のない廃炉作業を実施しており、実効線量の高い福島第一原子力発電所において実施することとした。その他の発電所としては、2018年の1月末日から定期検査を開始する予定であった川内原子力発電所1号機において実施することとした。

表 2-1 平成 28 年度（2016 年度）における主な実用発電用原子炉施設の放射線業務従事者の線量（実効線量）分布

発電所名	東京電力HD（株） 福島第一原子力発電所		東京電力HD（株） 福島第二原子力発電所		東京電力HD（株） 柏崎刈羽原子力発電所		中部電力（株） 浜岡原子力発電所		関西電力（株） 美浜発電所		関西電力（株） 高浜発電所		関西電力（株） 大飯発電所	
	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他
線量	1566	11409	545	1527	1209	5008	791	3827	390	1710	509	3067	489	2356
5mSv以下	90	1393	0	4	0	5	0	18	0	3	0	7	0	2
5mSvを超え10mSv以下	22	770	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
10mSvを超え15mSv以下	0	369	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
15mSvを超え20mSv以下	0	216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20mSvを超え50mSv以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50mSvを超える	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

発電所名	中国電力（株） 島根原子力発電所		四国電力（株） 伊方発電所		九州電力（株） 玄海原子力発電所		九州電力（株） 川内原子力発電所		総合計	
	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他	社員	その他
線量	482	2573	453	1605	619	2830	456	2844	10096	49648
5mSv以下	0	33	0	7	0	1	0	25	90	1499
5mSvを超え10mSv以下	0	2	0	0	0	0	0	4	22	780
10mSvを超え15mSv以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370
15mSvを超え20mSv以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	216
20mSvを超え50mSv以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50mSvを超える	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

出典：ISOE アジア技術センター，アジア地域線量情報(日本) 放射線廃棄物の管理及び線量管理状況，平成 29 年（平成 28 年度実績），http://www.nstra.or.jp/isoc/regionalinfo/info_02_h29.html

(1) 福島第一原子力発電所

福島第一原子力発電所では、全・半面マスクやカバーオールを必要としない一般服エリア (G zone)、全面または半面マスク及びカバーオールを必要とするカバーオールエリア (Y zone)、カバーオールの上にアノラックまたはカバーオールを2重に着用するアノラックエリア (R zone) として、構内を区分している¹⁴⁾。2017年9月には、一般服エリアが構内面積の95%まで拡大した。現在、1号機から4号機周辺を除くと線量率は平均5 $\mu\text{Sv/h}$ 以下である²²⁻²⁴⁾。1号機から4号機周辺においては、まだ100 $\mu\text{Sv/h}$ を超える場所が存在する。

カバーオールエリアは1号機から4号機周辺、 β 線被ばくを考慮する必要のある水処理設備 (淡水化处理装置、他核種除去装置等) を含む建屋内及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を含む処理水を内包しているタンクエリアである。アノラックエリアは、1号機から3号機原子炉建屋内及び1号機から4号機周辺建屋のうち滞留水を保有するエリアである。

2016年度において、福島第一原子力発電所では、約1.6万人のうち、401人の従事者の水晶体の等価線量 (水晶体の等価線量の算出方法は後述する。) が、年間20 mSv を超え、21人が年間50 mSv を超えた¹⁴⁾。また、福島第一原子力発電所には、(a) γ 線の線量率が非常に高い場所での作業及び他に例のない (b) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からの β 線による水晶体被ばくをとともなう作業がある。また、今後の廃炉作業においては、 β 線と γ 線の混在している場であり、いずれの線量率も高くなるような環境も考えられる¹⁴⁾。

(a) 高線量 γ 線場での作業

γ 線により実効線量及び水晶体の等価線量が高くなる場所としては、1から4号機周辺が挙げられる。

1号機から4号機周辺では、使用済燃料取り出しに向けた準備が行われている。1号機においては、オペレーティングフロア (以下、オペフロ) のガレキ撤去のため、2015年7月28日から、建屋カバーの屋根パネル等の取り外しに着手し、2017年12月には、建屋カバーの柱・梁取り外し改造、防風フェンス取り付け工事等を完了した²⁵⁾。2018年1月からオペフロのガレキの撤去を開始している。2号機では、使用済燃料の取り出しに向け、原子炉建屋周辺の作業エリアの整備、オペフロへアクセスするための作業用構台の設置等、が進められている²⁵⁾。3号機では、オペフロの除染、遮蔽設置作業が行われ、2017年1月から使用済燃料取り出しカバー等の設置工事に着手し、2018年2月にオペフロ上部にドーム屋根の設置が完了した²⁶⁾。2018年中旬頃より使用済燃料の取り出しを開始する予定である。4号機では、2013年11月から使用済燃料プールから共用プールへの使用済燃料の移送作業を開始、2014年12月に移送作業を完了している²⁵⁾。

このような状況を踏まえ、事業者と相談の上、これらの作業を実施している協力会社に協力を依頼し、2号機周辺で作業を行う従事者8人 (うち、1人は本研究用の線量計の装着の不備があり、測定できず。) を対象に線量測定を実施することとした。

(b) 高線量 β 線場での作業

β 線放出核種である $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (^{90}Sr : 最大エネルギー546keV, ^{90}Y : 最大エネルギー: 2.28 MeV) を含む汚染水をフランジタンクに貯蔵してきた。しかし、汚染水の漏洩リスクを低減するために溶接タンクに切り替えを行い、2015年5月末からフランジタンクの撤去工事

を開始した^{27,28)}。フランジタンクの撤去・解体作業にあたっては、タンク内の水を処理し、ダスト飛散抑制を目的として遠隔で内壁を塗装後、タンクの天板・側板の順番で解体する。タンク内での作業においては、側板からのβ線の遮蔽にコンクリート型枠用合板を利用するとともに、床板にはゴムシートを利用している。この他、さまざまな被ばく低減措置が取られている²⁷⁾。タンク設置現場でフランジを外し、天板、側板を分割し、これらを必要に応じ一時仮置きテントに運搬、その後、定検資材倉庫に運搬し、大型バンドソーにて切断、減容処理が行われる²⁸⁾。

これらの作業のうち、定検資材倉庫または一時仮置きテントでの作業に従事する10人を対象に線量測定を実施することとした。

(2) その他の原子力発電所（九州電力（株）川内原子力発電所）

福島第一原子力発電所以外の原子力発電所（原子炉施設）における従事者は、炉心及び一次冷却系等に含まれる放射化生成物や放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物等から外部被ばくする¹⁰⁾。運転中の主な放射線源は、一次冷却水中に生成される¹⁶N等の短半減期の放射化生成物である。沸騰水型（BWR）原子力発電所の場合には、タービン発電機の周辺が高線量になるが、原子炉停止後は短時間で減衰してしまう。一方、冷却材中に生成される放射性核種のうち、⁵⁸Co（半減期：70.86日）、⁶⁰Co（半減期：5.27年）、⁵⁴Mn（半減期：312日）等は、比較的半減期も長く、系統配管等の内面に付着する。このため、定期検査時には、これらの放射性核種からの外部被ばくにより、従事者の線量（実効線量）が高くなる可能性がある^{8,10)}。

上記のとおり、その他の発電所としては、2018年3月現在、定期検査中である川内原子力発電所1号機において実施することとした。川内原子力発電所は、電気出力89万kWの1号機と89万kWの2号機を有する。原子炉の型式は加圧水型（PWR）であり、1号機、2号機ともに熱出力は226万kWである²⁹⁾。1号機は1984年7月に、2号機は1985年7月に運転を開始している。1号機は、原子炉等規制法に基づき、第22回定期検査のため、2016年10月6日に発電を停止し、同年12月11日に発電を再開、2018年1月29日には、第23回の定期検査に着手し、同年3月現在、原子炉容器開放検査を実施中である³⁰⁾。今後は、燃料取り出し、蒸気発生器伝熱管渦電流探傷検査、燃料検査、燃料装荷、原子炉容器組立て、1次冷却材系統漏洩検査、起動試験が行われ、発電を再開する予定である³¹⁾。

従事者の水晶体の等価線量測定を行うあたり、作業内容については、事業者から意見聴取し、今後、他の発電所で測定した場合に、今回の結果と比較ができるように、代表的な以下の5作業を抽出することとした。

- ①原子炉容器開放・復旧作業
- ②蒸気発生器マンホール開放・復旧作業
- ③蒸気発生器伝熱管渦電流探傷検査
- ④1次冷却系ポンプのインターナル点検
- ⑤弁類分解点検

①から⑤の作業に対して、複数の従事者に線量計を装着し、線量測定を実施する予定である（現在、一部実施中）。

2.2.2 非破壊検査

非破壊検査では、線源として ^{169}Yb 、 ^{192}Ir 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 等を使用してプラント等の配管の放射線透過試験を実施する³²⁾。また、X線発生装置を用いた透過試験も行っており、X線の管電圧は90kVから600kVである。これらの線源や装置は、コンクリート製の遮蔽壁か、遮蔽された照射室内で使用する。野外において使用する場合はコリメータ等を用いた点線源状にして、通常、従事者は線源から5m以上離れるようにする³²⁾。非破壊検査の作業における被ばくは、外部線源容器、照射室の遮蔽壁等を透過してくる漏洩放射線及び壁や空気等で散乱した散乱線によるものである³²⁾。このため、全身均等な被ばくとなると考えられる。しかし、作業場所により、十分な距離を取ることができない場合、従事者の実効線量が高くなる可能性がある。

2016年度の従事者の個人線量は15mSvを超えることはなく、約80%（2,191名中1,816名）の従事者が1mSv以下である。しかし、中には、10mSvを超える従事者（1人）もあり、医療を除く産業分野の中では、比較的線量が高い³²⁾。

上記の内容を踏まえるとともに、事業者からの作業内容を聴取して、実施可能な作業を選定した結果、作業場所については、非破壊検査が通常多く実施されている石油コンビナート等での検査作業を対象とすることとした。また、線源は大きく分けて γ 線及びX線の2種類となることから、それぞれの線源を使用する従事者を5人ずつ選定し、線量測定を実施することとした。

2.3 個人線量測定方法

2.3.1 原子力発電所等の線量管理の現状

(1) 福島第一原子力発電所の線量管理の現状

福島第一原子力発電所では、上記で述べたように、事故時に拡散した放射性物質の降下物により、構内が汚染したため、構内全域を管理対象区域に設定し、業務上管理対象区域に立ち入る作業者を放射線業務従事者として、線量管理を実施している^{14,22)}。個人線量の管理には、受動形個人線量計及び電子式個人線量計を用いている¹⁴⁾。

受動形個人線量計としては、蛍光ガラス線量計(RPLD)、光刺激ルミネセンス線量(OSLD)等の積算線量計を用いており、 γ 線の1cm線量当量、 γ 線及び β 線のそれぞれの70 μm 線量当量を測定している。また、日々の管理には、警報機能付き電子式線量計(APD)を用いており、 β 線による70 μm 線量当量及び γ 線による1cm線量当量を測定している¹⁴⁾。

実効線量は、1cm線量当量により算出し、水晶体の等価線量(3mm線量当量)は、 γ 線による70 μm 線量当量、あるいは1cm線量当量のどちらか高い方を β 線による70 μm 線量当量に加算することによって算出している¹⁴⁾。

(2) その他の原子力発電所の線量管理の現状

従事者の個人線量の管理は、福島第一原子力発電所同様に、現行法令に基づき、受動形個人線量計及び電子式線量計(一部の発電所では、電子式線量計のみ)を用いて、 γ 線及

びβ線による1cm線量当量や70μm線量当量を測定している。中性子の被ばくの可能性がある場合には、中性子用の線量計（1cm線量当量）を用いるが、これまでにほとんど検出されていない³³⁾。

水晶体の等価線量は、体幹部（男子は胸部、女子は腹部）の1cm線量当量または70μm線量当量で管理しておけば、水晶体の等価線量限度（現行法令の150mSv/年）を超えないように管理できるとしており、現状は1cm線量当量または70μm線量当量の適切な値で管理している³³⁾。

(3) 非破壊検査の線量管理の現状

非破壊検査の従事者についても原子力発電所と同様に、現行法令に基づき胸部に装着したRPLDやOSLD等の受動形個人線量計（胸部）と電子式線量計を併用して線量管理を行っている³²⁾。

2.3.2 本研究における水晶体の等価線量算定方法

(1) 全面マスク着用時の水晶体等価線量測定方法

福島第一原子力発電所のβ線場で作業を行う場合には、作業者は常時、内部被ばく防護のため、全面マスクを装着している。全面マスクが遮蔽となっているため、現在のような胸部のAPD、RPLD、OSLD等で測定した結果から、水晶体の等価線量を算定した場合、著しく過大評価になるものと考えられる。このため、実際的な水晶体の等価線量を算定するためには、全面マスクの内側の眼の近傍において、水晶体の等価線量を算定する必要がある。

全面マスク内に線量計を取り付ける際には、労働安全衛生上の支障をきたさないよう、①視界を妨げない、②マスクの気密性を損なわない、③脱着が容易、④線量計を取り外す際に汚染が発生しないこと等に注意する必要がある。そこで、本研究では、全面マスク内で水晶体等価線量を測定するために、上記の要件を満たすような線量計装着治具の検討を実施した。この結果、福島第一原子力発電所で使用されている全面マスクの面体と接顔体の隙間に取り付けられるフレームを準備し、それに線量計を装着することができるように成型したインナーフレームを用いることとした。インナーフレームは、気密性や装着時の線量計脱落の危険性を防ぐため、全面マスクの形状に合わせて製作する必要がある。このため、インナーフレームの形状は、福島第一原子力発電所で使用頻度が高い2種類の全面マスク（型番：GM185及びTW099、(株)重松製作所製）に取付けられるようにした。

インナーフレームは、眼の近傍の左右両側に水晶体線量測定用熱ルミネセンス線量計（水晶体用TLD、DOSIRIS、IRSN製、(株)千代田テクノル提供³⁴⁾）を取り付けることができるよう専用のホルダが設置されている。このホルダは上下方向に3段階に取り付け位置を変えることができる。このため、個人の顔の形状等に合わせて眼の近傍に線量計を装着することが可能である。また、このインナーフレームにポリエチレン製の厚さ1.5mmの線量計収納袋（最大約135mm横×35mm縦）を取り付けることにより、全面マスク内に水晶体用TLD以外の線量計の装着や、全面マスク内の異なる場所に線量計を装着することも可能である。図2-1及び2-2にインナーフレーム及び全面マスクにインナーフレーム及

び線量計を取り付けた様子を示す。

本研究における福島第一原子力発電所の従事者を対象とした線量測定では、インナーフレーム左右の線量計ホルダにそれぞれ 1 個の水晶体用 TLD を装着するとともに、線量計収納袋に RPLD (ガラスバッジ, 千代田テクノ製) び水晶体用 TLD を入れて、これらの線量計が概ね額中央に装着されるように取り付けた。β線場では線量計収納袋の線量評価への影響が考えられるため、水晶体用 TLD は線量計収納袋の検出部前面を切り取り、RPLD は線量計収納袋による β線の遮蔽を考慮し、補正できるようにした。

なお、インナーフレームを全面マスクに取り付けることにより、初期規格から気密性が大幅に低下していないかを確認するため、JIS T 8150³⁵⁾に記載されたフィットテストで気密試験を実施した。この結果、漏れ率は 2%以下、つまり防護係数が 50 以上であり、十分な気密性を保つことができることを確認した。

(2) 全面マスクを着用しないまたは全面マスクを取り外す場合の線量測定方法

通常原子力発電所の定期検査や非破壊検査の作業現場においては、全面マスクを着用しないか、または、内部被ばくの発生する可能性がある作業に従事する期間において、一時的に全面マスクを着用する。全面マスクを着脱するような場合には、全面マスクへ線量計を装着することは、適当ではない。このため、このような作業に従事する作業者に対しては、頭部(眼の近傍)に線量計を装着できるように、コムバンドに線量計収納袋を取り付け、この中に線量計を挿入することで線量を測定することとした。全面マスクも装着する可能性があるため、ゴムバンドは平ゴムを用いた。図 2-3 に全面マスク未装着時及び装着時の様子を示す。ここでの全面マスクの着用時の気密性試験は、川内原子力発電所で使用されている 2 種類の全面マスク(型番:アドバンテージ 1000J, MSA 製及び型番:ハイ スコープ VII, 興研製)に対して、マスクフィッティングテスター(労研式マスクフィッティングテスター MT-05 型, 柴田科学製)を用いて行った。結果を表 2-2 に示す。線量計を取り付けたゴムバンドの太さを複数準備したが、今回使用したゴムバンドは気密性に影響するものではなかった。ただし、ゴムバンドのねじれが大きい場合には、全面マスクの気密性が低下する可能性がある。これは非常に極端な例であり、通常線量計取り付けにおいては、このようなねじれは生じない。したがって、この方法で線量計を取り付けた上で、全面マスクを着用したとしても、初期規格から全面マスクの気密性が大幅に低下することはないと考えられる。しかしながら、線量計着用時に全面マスクを装着する際には、ゴムバンドのねじれがないように装着することで、不用意な内部被ばくを低減することができると考えられる。

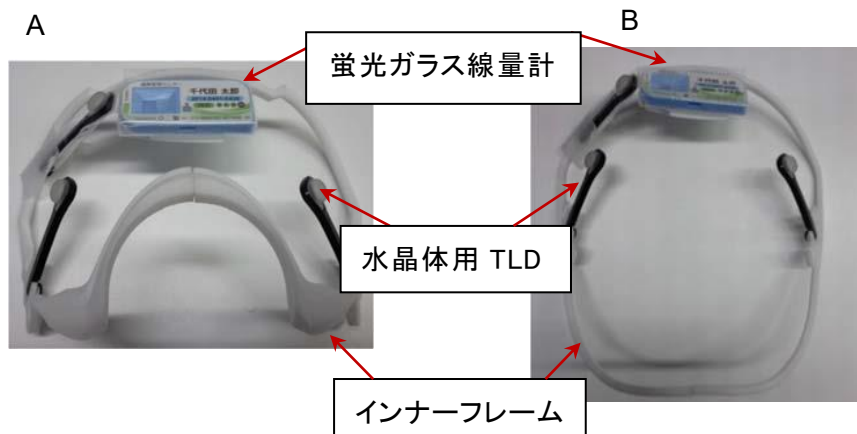


図 2-1 インナーフレーム及び各種線量計（A：重松社製 GM185 用，B：重松社製 TW099 用）



図 2-2 全面マスク装着時の線量計装着方法

A: マスク未装着時 B: マスク装着時



図 2-3 全面マスク未装着時（一時的な全面マスク装着時）の線量計装着方法

2.3.3 使用線量計

水晶体の等価線量は 3 mm 線量当量を用いて算定する。しかしながら、現行法令では、3 mm 線量当量を測定する必要はなく、1 cm 線量当量または 70 μ m 線量当量のどちらか適切な方を用いて評価すればよいとされている¹²⁾。これは、3mm 線量当量は、70 μ m 線量当量または、1 cm 線量当量を測定・評価することで、過小評価することがないためである。しかし、ICRP の水晶体の等価線量限度は、連続した 5 年間の年平均線量を 20 mSv、かつ、単一年度当たり 50 mSv を超えないとしており、これを規制に取り入れた場合には、現行法令の水晶体の等価線量限度である 150 mSv/年を大幅に引き下げる事となる。この ICRP の水晶体の等価線量限度の値は、実効線量限度の値と等しいため、これまでの評価よりも高い精度での評価が求められると考えられる。放射線審議会の眼の水晶体の検討部会においては、水晶体の等価線量の評価には、3 mm 線量当量を測定（算定）することが望ましいとしている。このため、今後、3 mm 当量を用いた適切な測定・評価を行うことができるかどうかを検討しておく必要がある。

そこで、本研究では、水晶体の等価線量（3 mm 線量当量）測定については、上記に示した水晶体用 TLD（7LiF:Mg,Ti, 検出部：3 mm ϕ , ホルダーサイズ：11 mm ϕ , 厚さ 8 mm）を用いることとした。また、現在、一般的に従事者の放射線管理や線量モニタリングに使用されている RPLD も合わせて使用することとした。このほか、原子力発電所や非破壊検査で作業する従事者は、日々の管理において、APD（福島第一原子力発電所では主に型式：ZP-1461、パナソニック社製を利用）を胸部に装着している。そこで、水晶体用 TLD や RPLD 装着期間中の線量確認のために、日ごろの放射線管理に用いている APD のデータを提供いただいた。線量計は、いずれも ^{137}Cs を用いて JIS Z 4511³⁶⁾ に基づき校正されている。

作業場所、線量測定を実施した従事者の数、使用した線量計の着用箇所及び個数は、表 2-3 から 2-5 に示すとおりである。福島第一原子力発電所においては、全面マスクのほか、高線量率の γ 線場においては遮蔽ベストを着用している。胸部での遮蔽ベスト外側には、線量計を装着する適切な箇所がなく、作業に支障をきたすおそれがあったため、遮蔽ベストの内側で測定することとした。また、このような作業場では遮蔽ベスト外側の線量を測定するため、APD を上腕部に着用している。したがって、高線量率の γ 線場での従事者の測定については、この APD の値を遮蔽ベスト外側の線量として、結果の解析に使用した。

非破壊検査作業においては、ヘルメット着用の際、額中央に RPLD を装着できなかったため、頭部には水晶体用 TLD のみを装着することとした。水晶体用 TLD は γ 線源を使用する従事者は ^{137}Cs により校正、X 線源を使用する従事者は N100（実効エネルギー：83 keV）で校正した線量計を使用した。体幹部（胸部）には、遮蔽ベスト等の防護具は着用しないことから、原子力発電所の従事者と同様に、胸部の左または右側に RPLD を、もう一方に APD を装着して線量測定を行った。

2.3.4 倫理面への配慮

本研究における従事者の線量測定においては、藤田保健衛生大学の倫理委員会の承認

(受付番号：HM17-166) を得て実施した。

各機関の本務に支障がないよう（作業の遅れや作業効率の著しい悪化、危険等）に線量計の着用方法、場所等については各施設の従事者と十分に意見交換を行った。

線量計を装着してもらう従事者には、事前に研究内容、研究への参加は強制ではないこと、同意後も撤回が可能なこと、撤回した場合には不利益を被らないことを説明し、同意を得た上で研究に参加してもらった。

得られたデータについては、個人が識別できないようにパスワードをかけて保管し、情報漏洩を阻止した。

表 2-2 全面マスク気密性試験の結果

No.	マスク種類	作業者	紐幅(mm)	ねじれ	粉塵数(count)		漏れ率(%)	合否
					マスク外	マスク内		
1	1-A	作業者 3	-	-	335,555	1,023	0%	合
2			3	-	163,370	172	0%	合
3			6	-	171,175	1,269	1%	合
4			9	-	406,075	2,575	1%	合
5			9	有	642,000	10,445	2%	合
6	1-B	作業者 2	-	-	183,695	348	0%	合
7			3	-	90,009	327	0%	合
8			6	-	132,745	479	0%	合
9			9	-	237,822	606	0%	合
10			9	有	369,116	1,384	0%	合
11	1-C	作業者 1	-	-	308,788	1,009	0%	合
12			3	-	241,162	1,124	0%	合
13			6	-	140,962	514	0%	合
14			9	-	213,088	884	0%	合
15			9	有	195,417	3,946	2%	合
16	2-A	作業者 1	-	-	174,317	1,213	1%	合
17			3	-	371,251	629	0%	合
18			6	-	256,735	515	0%	合
19			9	-	292,591	653	0%	合
20			9	有	223,285	16,473	7%	否
21	2-B	作業者 2	-	-	218,205	462	0%	合
22			3	-	194,465	166	0%	合
23			6	-	180,147	235	0%	合
24			9	-	168,079	104	0%	合
25			9	有	211,598	1,617	1%	合
26	2-C	作業者 3	-	-	147,240	14	0%	合
27			3	-	161,060	85	0%	合
28			6	-	202,073	58	0%	合
29			9	-	76,416	13	0%	合
30			9	有	426,448	502	0%	合

※マスク種類は、2種類の全面マスクをそれぞれ3個準備し、3名で実施した。全面マスクの種類は次のとおりである。

マスク 1：アドバンテージ 1000J

マスク 2：ハイスコープ VII

表 2-3 福島第一原子力発電所 2 号機建屋周辺で作業を行う線量測定者数、使用線量計の装着箇所、種類及び装着数

線量測定者数：7 人（全面マスク及び遮蔽ベスト着用）

線量計装着箇所	使用した線量計（装着回数/人）
胸部（遮蔽ベスト内 右または左）	蛍光ガラス線量計（1） 警報機能付き電子式線量計（1）
腕（遮蔽ベスト外）	警報機能付き電子式線量計（1）
頭部（全面マスク内 額中央）	蛍光ガラス線量計（1）
眼近傍（全面マスク内 左、右及び額中央）	水晶体用熱ルミネセンス線量計（3）

表 2-4 福島第一原子力発電所定検資材倉庫及び一時仮置きテントで作業を行う線量測定者数、使用線量計の装着箇所、種類及び装着数

線量測定者数：10 人（全面マスク着用、遮蔽いベストなし）

線量計装着箇所	使用した線量計（装着回数/人）
胸部（右または左）	蛍光ガラス線量計（1） 警報機能付き電子式線量計（1）
頭部（全面マスク内 額中央）	蛍光ガラス線量計（1）
眼近傍（全面マスク内 左、右及び額中央）	水晶体用熱ルミネセンス線量計（3）

表 2-5 非破壊検査の作業を行う線量測定者数、使用線量計の装着箇所、種類及び装着数

線量測定者数：10 人（ γ 線源（ ^{192}Ir ）使用者：5 人 X線源使用者：5 人
（いずれも全面マスクなし、遮蔽ベストなし）

線量計装着場所	使用した線量計（装着回数/人）
胸部（右または左）	蛍光ガラス線量計（1） 警報機能付き電子式線量計（1）
眼近傍（左または右）	水晶体用熱ルミネセンス線量計（1）

2.4 研究結果

2.4.1 福島第一原子力発電所の従事者の水晶体の等価線量測定結果及び考察

(1) 高線量 γ 線場で作業を行う従事者の水晶体の等価線量

図 2-4 に γ 線の線量が高い 2 号機建屋周辺で作業を行う従事者の頭部水晶体用 TLD の測定結果を示す。

2 号機建屋周辺は、第 3 章に示す空間線量率及び γ 線のエネルギースペクトル測定結果からわかるとおり、地表面等に付着した ^{137}Cs から放出される γ 線が地表面を覆った遮蔽板によりエネルギーが減弱、散乱線成分の割合が多い場である。地表面、地表面から 1.0 m の高さ及び 1.5 m の高さにおいて、電離箱 (AE-133B/ Λ 2+, 応用技研製) によって測定した 1 cm 線量当量及び 3 mm 線量当量は地表面が最も高く、1.5 m の高さでは、1 m より低いか、ほぼ同程度であった。

各種個人線量計を装着しての測定は 2017 年 11 月 21 日から 2017 年 12 月 15 日に実施した。従事者の負担とならないよう、胸部または上腕部の APD で測定した 1cm 線量当量が 0.5mSv を超えた時点で線量測定を終了してもよいとした。作業内容によっては 0.5mSv を超えない、または、0.5mSv を超えても装着している場合もあった。このため、従事者によって測定期間が異なるので、従事者間での当該の期間での線量の高低は比較できない。なお、従事者 ID の No.1 は本研究の線量計の装着に失敗したため、結果が得られなかった。

図 2-4 の水晶体用 TLD で測定した値 (3mm 線量当量) の標準偏差は、第 3 章におけるファントム照射実験により得られた水晶体用 TLD の相対標準偏差の中でも、最も大きな値 (6%) を参考として示した。実際の作業場所での測定では、照射ジオメトリ、線量計のエネルギー依存性の影響等、様々な不確かさ要因が加わる。このため、測定結果の不確かさは、ここに示した標準偏差より、大きな値となるものと考えられる。

全面マスク内の左眼の顔側面、額中央及び右眼の顔側面で測定した結果、左側面、額中央、右側面で測定した値を平均した値に対する相対標準偏差は、最大でも 6.3% であり、装着位置による有意な差はみられなかった。 γ 線場では、全面マスクや線量計の装着位置が測定結果に与える影響は小さいものと考えられる。

図 2-5 に 2 号機建屋周辺で作業をした従事者の遮蔽ベスト外側上腕部に装着した APD から算定した水晶体の等価線量に対する、遮蔽ベスト内の胸部 RPLD、全面マスク内の頭部 RPLD 及び全面マスク内の頭部の水晶体用 TLD から算定した水晶体の等価線量の比を示す。なお、水晶体用 TLD の値は頭部 3 か所で測定した平均値を用いた。遮蔽ベスト外腕部の APD 及び遮蔽ベスト内胸部の RPLD では、1 cm 線量当量及び 70 μm 線量当量が測定可能である。

これらの線量計により水晶体の等価線量を算出する方法としては、上述したとおり、電子式線量計では、 β 線による 70 μm 線量当量と γ 線による 1 cm 線量当量を加算したもの、RPLD については、現行法令に基づき、 γ 線による 70 μm 線量当量及び 1 cm 線量当量のどちらか適切 (高い方) を水晶体の等価線量とすることとした。水晶体用 TLD は 3 mm 線量当量を算定している。なお、2 号機建屋周辺で作業した従事者の頭部及び胸部 RPLD、もしくは上腕部 APD で測定した β 線による 70 μm 線量当量はいずれも検出下限以下であった。

図 2-5 の上腕部 APD に対する胸部 RPLD(遮蔽ベスト内)の値はいずれも 1 以下となり、平均値は 0.76 ± 0.095 であった。このことから、遮蔽ベストにより、胸部線量を 25%程度低減できていると言える。上腕部 APD に対する頭部 RPLD の値は 0.91 から 1.36、平均値は 1.09 ± 0.17 であった。従事者のうち、No. 7 及び No. 8 が他の従事者に比べてやや高い傾向にあった。第 3 章で述べる ^{137}Cs や ^{60}Co の存在する γ 線校正場や 100 kV から 250 kV の X 線校正場でのファントムを用いた実験からも、従事者が使用している全面マスクの着用の有無が、線量計の指示値に影響を与えないことが明らかとなっている。No. 7 及び No. 8 の APD に対する頭部 RPLD の値が高くなった原因としては、胸部よりも眼の高さ付近の線量が高くなるような場で作業を行ったことが考えられる。

また、図 2-5 の上腕部 APD の測定値から算定した水晶体の等価線量に対する頭部水晶体用 TLD で測定した水晶体の等価線量(3 mm 線量当量)は、1.02 から 1.54 の範囲内にあり、水晶体用 TLD は、RPLD より平均して約 15%高い値となった。

胸部と頭部の線量が異なる原因として、線量計のエネルギーレスポンスの違いについて考察してみる。第 3 章で、校正施設で各種線量計を同条件で照射して比較を行っているが、線源が ^{137}Cs (662 keV) の場合は、前方 (AP) 照射及び回転 (ROT) 照射のいずれも RPLD と水晶体用 TLD との測定値の差は小さい。しかし、線質 N100 (実効エネルギー: 83 keV) 等の X 線を用いた場合には、AP 及び ROT 照射とも水晶体用 TLD の測定値が RPLD の測定値よりも 1.1 から 1.4 倍程度高くなった。これは、水晶体用 TLD は低エネルギー側の相対レスポンスが高いことが影響していると考えられる。たとえば、 ^{137}Cs の校正値に対する N100 のレスポンスは 1.2 倍程度高くなる。2 号機建屋周辺は、散乱線の割合が高いことから、このような水晶体用 TLD の特性により、APD や RPLD の測定値よりも高く算定している可能性がある。

さらに、校正値の違いとして、スラブファントムに対して校正されたものか、円筒ファントムによって校正されたものかの違いについても考えてみる。本研究で使用した線量計は、JIS Z 4331³⁷⁾に示された ICRU スラブファントム (30 cm×30 cm×15 cm) に対して校正したものである。頭部に装着した線量計に対しては、今後 ISO が換算係数を示すであろう³⁸⁾ 組織等価の円筒ファントム (直径 20 cm×高さ 20 cm) に対する換算係数を用いて評価する必要があるかもしれない。Behrens らが示す 60 kV の X 線 (実効エネルギー: 46.3 keV) から 300 kV の X 線 (実効エネルギー: 252 keV) に対する円筒ファントムにより算出した 3 mm 線量当量への換算係数 (Sv/Gy)³⁹⁾ は、スラブファントムにより算出した 3 mm 線量当量への換算係数に比べて 6 から 11%低い値となる。 γ (X) 線場において、水晶体の等価線量の評価に、スラブファントムにより校正した値を用いると、後方散乱成分を円筒ファントムよりも高く評価することとなる。

2 号機建屋周辺での作業において、水晶体の等価線量を胸部で評価しても多くの場合、過小評価 (または過大評価) しすぎることはないと考えられる。しかし、No.7 及び 8 の従事者の測定結果については、校正するファントムの違いを考慮しても、胸部よりも頭部で測定した水晶体の等価線量が高くなる可能性がある。したがって、場所や作業姿勢等が影響しているかもしれない。このほか、APD を上腕部に装着していることで、頭部に装着した線量計との放射線の入射角度の違い、APD を遮蔽ベストの外側上腕部に着用しているも

の、線量計の入射面の一部が遮蔽ベストに隠れてしまう等、様々な影響要因についても、今後、さらにデータを蓄積し、詳細な検討を行う必要がある。

(2) 高線量β線場で作業を行う従事者の水晶体の等価線量

福島第一原子力発電所定検資材倉庫または一時仮置きテントで作業を行った従事者の水晶体の等価線量測定結果を図 2-6 に示す。頭部及び胸部ともに RPLD で測定したものであり、γ線とβ線を分けて示した。

この作業場の外部被ばく線源は、遮蔽体（飛散防止のためのフランジタンク内面の塗装を含む）や線源からの距離等に影響を受けエネルギーは低下していると考えられるものの、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ である。しかしながら、No.6 以外から、わずかであるがγ線が検出されている。図 2-6 に示したβ線の線量に着目すると、胸部（遮蔽なし）の 70 μm 線量当量に対する、全面マスク内の 70 μm 線量当量の値は、マスクの面体の遮蔽効果により、No.8 及び No.9 を除き、約 16% まで低下した。γ線寄与分を含めて現行法令に基づき水晶体の等価線量を算出した場合でも、全面マスク内の頭部 RPLD から算定した値は、胸部で算定した値の 20% 程度であった。図 2-6 には示していないが、全面マスク内の頭部 RPLD で測定した 70 μm 線量当量と全面マスク内の頭部水晶体用 TLD で測定した 3 mm 線量当量とを比較すると、RPLD の値が水晶体用 TLD の値の約 2 倍となった。これは測定している線量が、70 μm 線量当量か、3 mm 線量当量かの違いである。なお、水晶体用 TLD は、β線とγ線を分けることができないため、水晶体用 TLD、RPLD ともに、β線とγ線の寄与分を合わせて比較した。これらの比較では、図 2-6 に示すようにγ線しか検出されていない No.1、後述する No.8 及び No.9 を除いた。γ線の寄与分を除くと、マスク内の頭部水晶体用 TLD で測定した 3 mm 線量当量は、RPLD で測定した 70 μm 線量当量よりもさらに低くなるものと考えられる。

No.8 及び No.9 の頭部全面マスク内の RPLD の値は胸部に対してそれぞれ 38% 及び 48% となった。同じく全面マスク内で測定した水晶体用 TLD（3 mm 線量当量）の測定結果に対しては、このような顕著な増加はみられなかった。RPLD では 70 μm 線量当量を算定しており、水晶体用 TLD では 3 mm 線量当量を算定している。RPLD では、低エネルギーの光子や低エネルギーの電子が測定されている。全面マスクの面体に入射したβ線により発生した制動輻射 X 線の影響も考えられる。しかし、平山らが、半径 1.5 cm の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源から 5 cm の位置にあるポリカーボネート（密度 1.2 g/cm³ とした場合、 ^{90}Sr の最大飛程は 0.15 cm、 ^{90}Y の最大飛程は 0.92 cm）の背後の人体等価物質の平板ファントムに対する 70 μm 線量当量と 3 mm 線量当量を egs5 コードで計算した結果では、今回使用した全面マスクの厚さの範囲では、70 μm 線量当量、3 mm 線量当量ともに、ポリカーボネートで発生した制動輻射 X 線の寄与は無視できる程度であるとしている⁴⁰。RPLD のみが高くなった原因については、今後測定データを追加して引き続き検討する必要がある。

図 2-7 に額中央、左右顔側面に水晶体用 TLD を取り付け、3 mm 線量当量を算定した結果を示す。No.1 及び No.6 については、左または右側の線量が額中央より低く、その次に額中央、他方の顔側面の線量が順に高くなっているが、そのほかについては、額中央に装着した線量計の値が左右顔側面に比べて有意に低く、その差は約 20% であった。

測定の際には、2種類の全面マスクを使用した。両全面マスクとも面体側面の厚みが正面よりも薄くなっている。このため、薄い面体側面に近い左右の水晶体用 TLD への入射線量が増加したものと考えられる。全面マスクの正面と側面の厚みの違いを表 2-6 に示す。

ただし、額中央の RPLD で測定し、現行法令に従い算定した水晶体の等価線量は、β線が検出されなかった No.1 を除き、いずれも左右に装着した水晶体用 TLD で算定した 3 mm 線量当量の値よりも高かった。これより、β線場において、線量計を額中央に装着した場合であっても、現行法令に従い 70 μm 線量当量（または 1 cm 線量当量のいずれか適切な方）により水晶体の等価線量を管理していれば、保守的な管理が可能である。

表 2-6 全面マスクの面体の正面及び側面の厚さ

全面マスクの種類*	正面の厚さ (mm)	側面の厚さ (mm)
GM 185	2.35	1.3
TW099	2.8	1.25

2.4.2 非破壊検査作業の従事者の水晶体等価線量測定結果及び考察

図 2-8 に非破壊検査作業に伴う従事者の胸部 RPLD により測定した 1 cm 線量当量に対する頭部水晶体用 TLD で測定した 3 mm 線量当量、または、胸部 APD で測定した 1cm 線量当量の比を示す。なお、APD の測定結果から β線は検出されていない。No.1 及び No. 2 が管電圧 200 kV の X 線源（RF 200EG-S2 理学電機製）、No. 11 及び No. 12 は管電圧 200 kV の X 線源（RIX-200MC トーレック(株)製）を使用して検査を行った。それ以外は ¹⁹²Ir（γ線、296 keV 29%、308 keV 30%、317 keV 83%、468 keV 48%及び 604 keV 8.1%）を使用して検査を行った。作業場所は、No.1 から 6 が四日市及び No.9 から 12 が堺市のコンビナートである。作業は屋外で実施され、タンク側板の撮影及びボイラチューブの撮影を行った。従事者は、照射中は照射方向に対して 90° から 180° 方向 4~8 m 離れて立ち会った。遮蔽ベスト等は着用していない。

胸部に装着した RPLD で算定した 1 cm 線量当量は、測定したすべての従事者に対して 70 μm 線量当量より高い値であった。このため、頭部の水晶体用 TLD での測定値及び胸部 APD の測定値との比較には、1 cm 線量当量を用いることとした。水晶体用 TLD の校正は、X 線源を使用する従事者に対しては、校正点を N100（実効エネルギー 83 keV）を基準とした校正定数を用い、γ線核種である ¹⁹²Ir を使用する従事者の線量計に対しては校正点を ¹³⁷Cs とした校正定数を用いて、3 mm 線量当量を算定した。

図 2-8 より、胸部 APD と胸部 RPLD の比は 0.99±0.06 であり、2つの線量計の値は良く一致した。胸部 RPLD に対する頭部水晶体用 TLD の値は No.2 の従事者が高くなった。No.1 から No.3 については、胸部、頭部ともに線量が低く、0.1mSv をわずかに超えるか、下回った。したがって、これらの結果に対する不確かさが大きいと考えられる。No.4 から No.9 については、いずれも γ線源を用いて検査を行っており、胸部 RPLD に対する頭部水晶体用 TLD の比は、ほぼ 1 に等しい。

一方、X線源を用いた作業では、水晶体用のTLDの算定値が高い傾向があった。これは、福島第一原子力発電所の2号機建屋周辺での測定結果と同じく、非破壊検査に使用した γ 線源及びX線源のエネルギーとは異なる散乱線による外部被ばくのためと考えられる。このような傾向を明らかにするためには、今後、さらにデータを追加取得して、頭部と胸部の均一性と線量計の特性、線量計間の差異を明らかにする必要がある。

2.5 水晶体の等価線量の評価方法に関する考察：1 cm線量当量、3 mm線量当量、70 μ m線量当量への換算係数の関係

本研究では、現在広く用いられている受動形個人線量計であるRPLDを用いて水晶体の等価線量を算出する場合には、1 cm線量当量($H_p(10)$)または70 μ m線量当量($H_p(0.07)$)のどちらか適切な方(大きい方)を用いることとした。

福島第一原子力発電所の γ 線場や非破壊検査の γ 線源を使用した従事者の1 cm線量当量は、70 μ m線量当量に対し1.8%から4.1%高い値である。200 kVのX線源を使用した非破壊検査の従事者においても、最大で18% (1 cm線量当量が0.13 mSv、70 μ m線量当量が0.11 mSv)であった。いずれも散乱線の割合が高い場であると考えられるが、RPLDで測定した結果からは、1 cm線量当量、70 μ m線量当量、3 mm線量当量との間に大きな違いは見られなかった。このため、今回の結果において、 γ 線源に対しては、1 cm線量当量を使用しても70 μ m線量当量を使用しても、3 mm線量当量で算定した水晶体の等価線量と大きな違いはない。 γ 線に対してどのような場合に3 mm線量当量での算定・評価が必須になるのかを考察してみる。

現在の水晶体の等価線量の管理の考え方は、1999年11月に放射線審議会基本部会がとりまとめた外部被ばく及び内部被ばくの評価に係る技術的指針が基になっている⁹⁾。技術指針では、『10 keVから17 keVの限定された領域以外では、 $H_p(3)/((150/50) H_p(10))$ が1以下であり、 $H_p(10)$ が実効線量限度以下となるように管理していれば、眼の水晶体の線量限度は自動的に担保される。また、10 keVから17 keVの領域でも $H_p(3)/H_p(0.07)$ が1以下となっていることから、 $H_p(3)$ を測定しなくても $H_p(0.07)$ の値で150 mSv以下としていれば眼の水晶体の線量限度を担保できる。』としている。ただし、技術指針では、現行法令の水晶体の等価線量限度(150 mSv/年)を踏まえ、 $H_p(10)$ に対しては、150/50という数値を使用している。

そこで、ICRPの水晶体の線量限度を踏まえ、各換算係数の関係性を明らかにするため、 $H_p(3)/H_p(10)$ 及び $H_p(3)/H_p(0.07)$ を算出した。図2-9にX・ γ 線の換算係数の比を示す。換算係数の比は、JIS Z 4345⁴¹⁾に記されたスラブファントムに対するISOシリーズのX・ γ 線 $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ への換算係数を用いて算出した。 $H_p(3)/H_p(10)$ の値は、40 keV以上で1以下となり、実効線量を限度以下で管理していれば、水晶体の等価線量限度も担保される。40 keV以下であっても、 $H_p(3)/H_p(0.07)$ は1以下となっていることから、 $H_p(0.07)$ を実効線量限度や水晶体の等価線量限度と同じ値(5年で100 mSvかつ50 mSv/年)で管理していれば、水晶体の等価線量限度を担保できると考えられる。

β 線については、現在、JIS Z 4345⁴¹⁾には⁹⁰Sr/⁹⁰Y(照射距離: 30 cm、フィルタあり)にしか3 mm線量当量への換算係数は与えられていない。角度0°のとき、この値と同条件

の 70 μm 線量当量への換算係数を比較すると、70 μm 線量当量への換算係数の方が 2.3 倍高くなる。本研究での福島第一原子力発電所の β 線場の全面マスク内において、RPLD で測定した 70 μm 線量当量は水晶体用 TLD で測定した 3 mm 線量当量の、約 2 倍となった。2.4.1 で述べたように、この結果にはわずかに γ 線の寄与が含まれていることから、これを除くと 3 mm 線量当量の値はより小さくなり、さらに差は大きくなると考えられる。

水晶体の等価線量が ICRP の水晶体の等価線量限度を超えるおそれがある場合には、著しい過大評価を避けるために、福島第一原子力発電所のような場所では全面マスクの遮へい効果を含め、70 μm 線量当量を用いた水晶体の等価線量の算定が妥当であるかを十分に検討しておいた方がよいと考えられる。

放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会報告書では、個人の外部被ばくに係る測定において、3mm 線量当量の測定については、事業者等が簡易に測定できる環境が整いつつあることから、現行の規定を見直し、3mm 線量当量での水晶体の等価線量を算定することを可能にすべきであるとしている⁴²⁾。

今後、現場での水晶体の等価線量の評価については、混乱が生じないように、どのように評価すればよいか、具体的な方法を十分に検討しておく必要があるだろう。

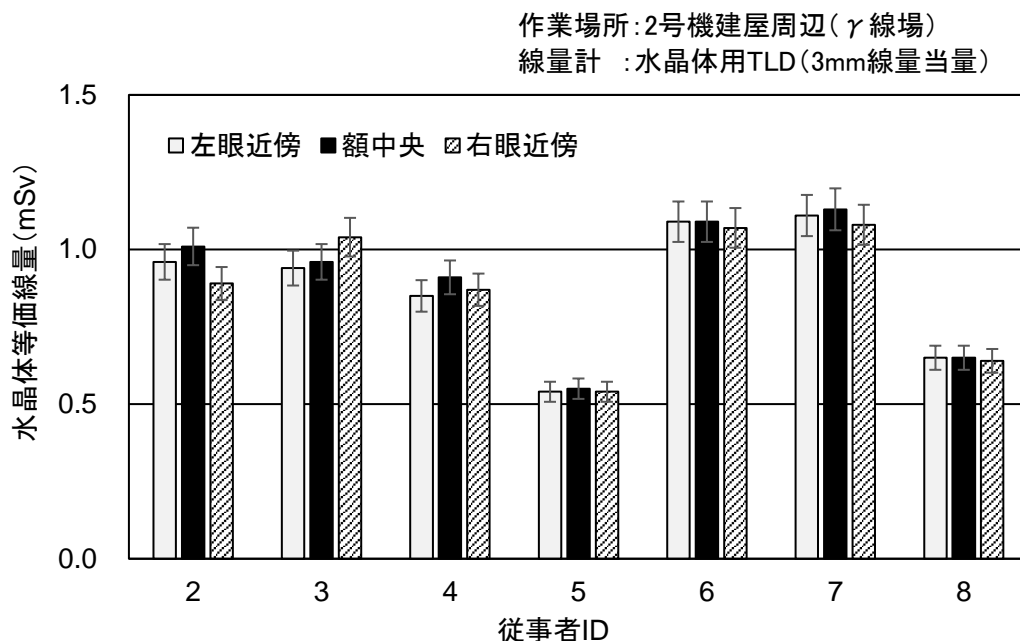


図 2-4 福島第一原子力発電所 2号機原子炉建屋周辺で作業をした従事者の頭部において水晶体用 TLD で測定した水晶体の等価線量当量 (3 mm 線量当量)

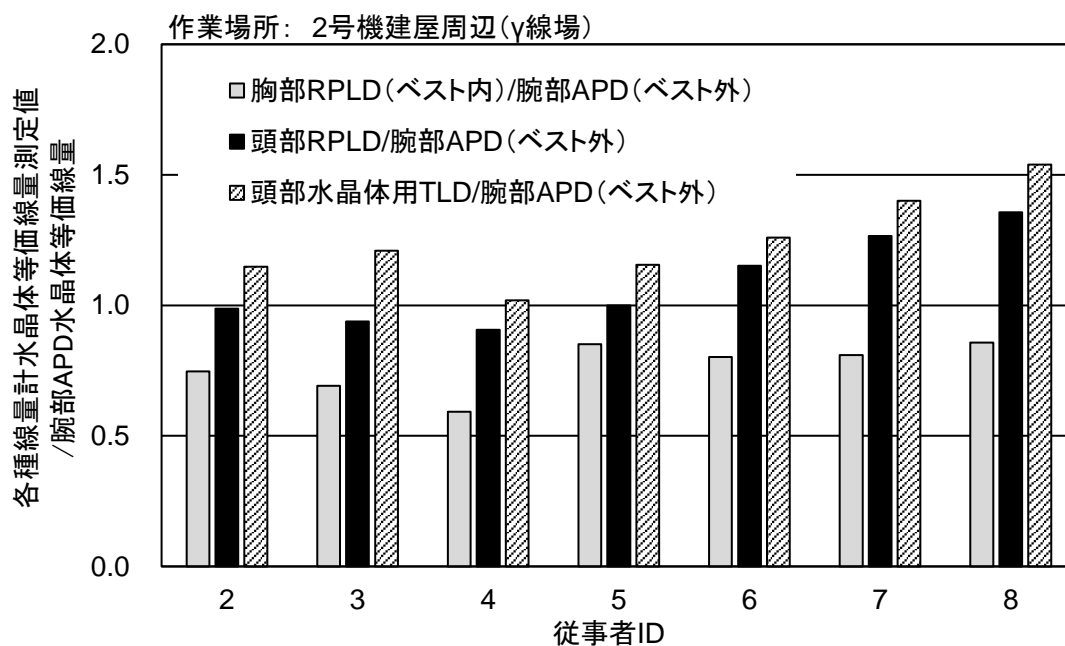


図 2-5 福島第一原子力発電所 2号機周辺において作業した従事者の上腕部 APD (遮蔽ベスト外) で測定した水晶体等価線量*に対する従事者の頭部での水晶体用 TLD または胸部 (遮蔽ベスト内) RPLD で測定した水晶体の等価線量**

* γ線の1cm線量当量にβ線(70 μm線量当量)を加算したもの。

**水晶体用 TLD は 3 mm 線量当量を測定し、これをもって水晶体の等価線量とする。RPLD は、γ線による 70 μm 線量当量と 1 cm 線量当量のうち、いずれか大きい方を水晶体の等価線量として算定。

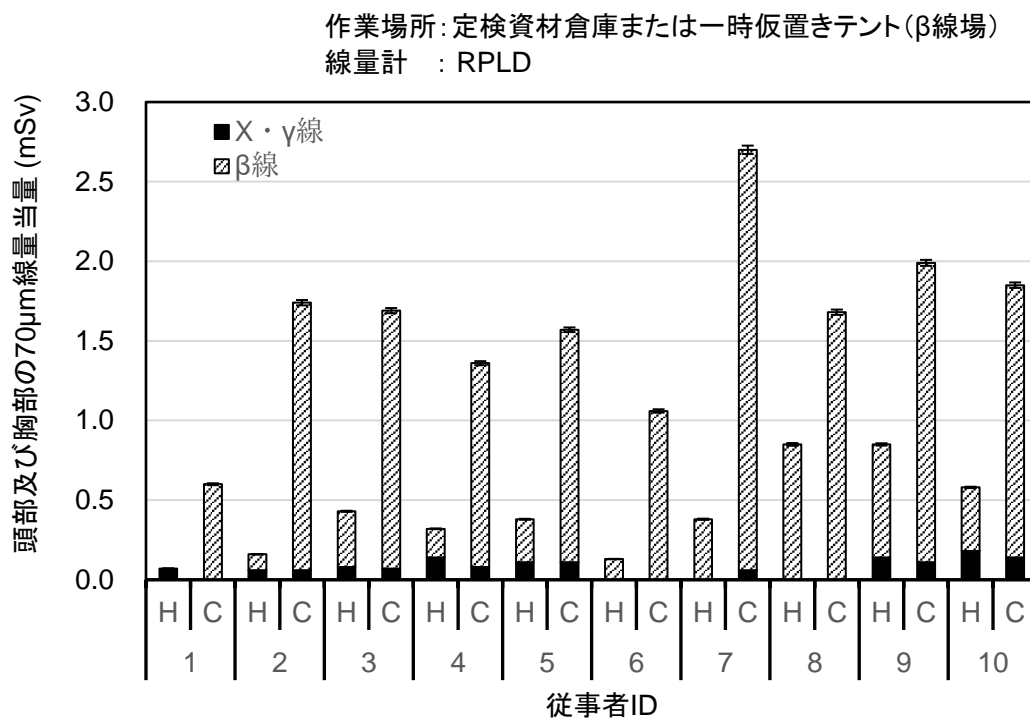


図 2-6 高線量β線場で作業した従事者の頭部及び胸部のRPLDで測定した70 μm線量当量 (H:頭部、C:胸部に装着した線量計で測定した結果を示す。)

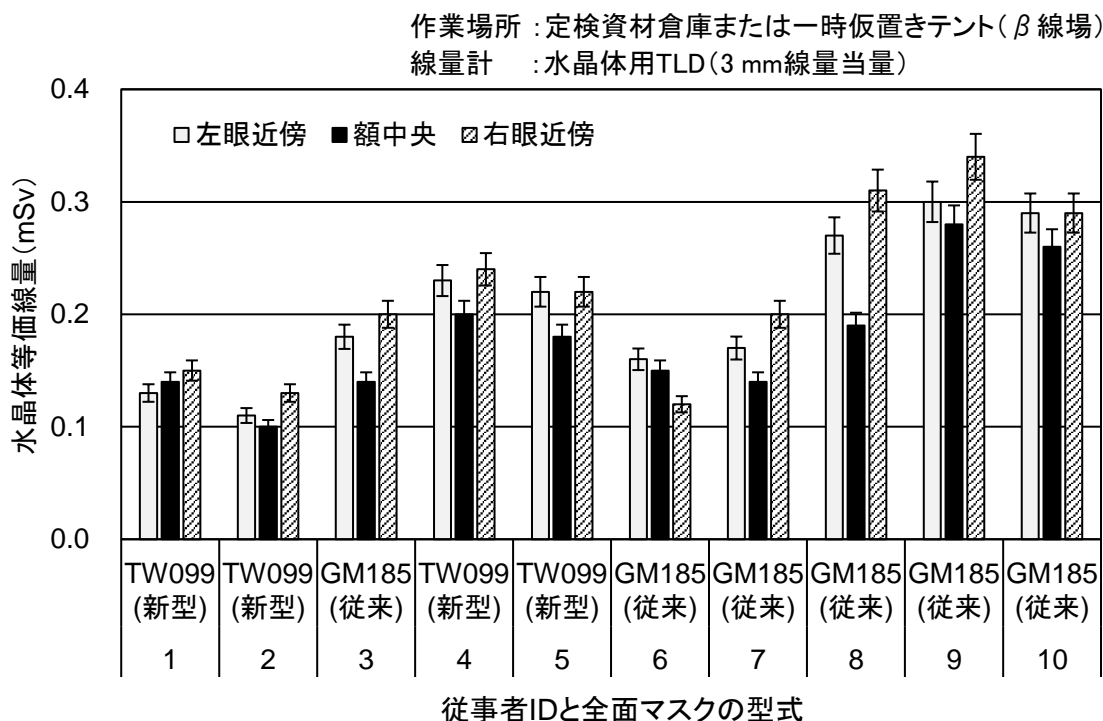


図 2-7 高線量β線場における全面マスク内に装着した水晶体用TLDによる3mm線量当量

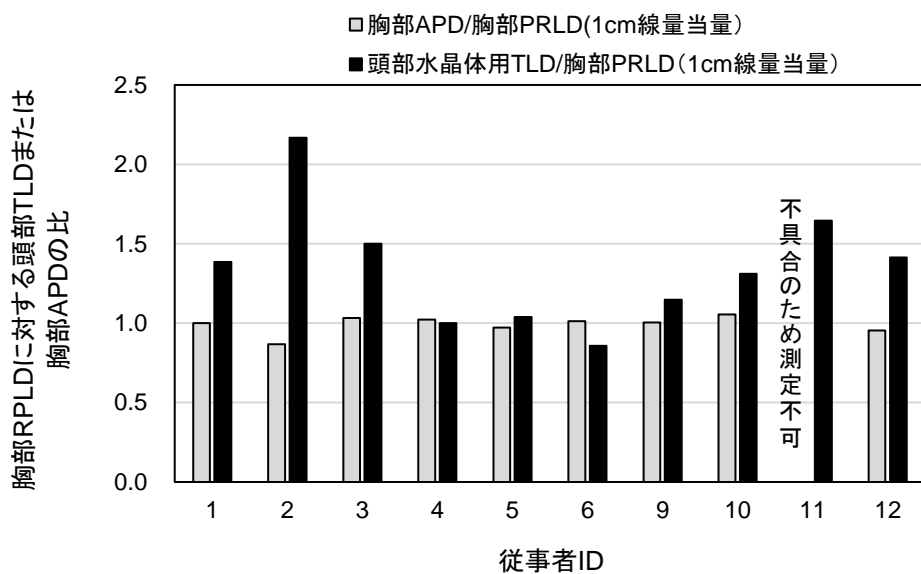


図 2-8 非破壊検査作業の従事者の胸部 RPLD により測定した 1cm 線量当量に対する頭部水晶体用 TLD で測定した 3mm 線量当量、または、胸部 APD で測定した 1cm 線量当量の比 (No.1,2,11 及び 12 は管電圧 200kV の X 線源を使用。それ以外は ^{192}Ir 線源を使用。)

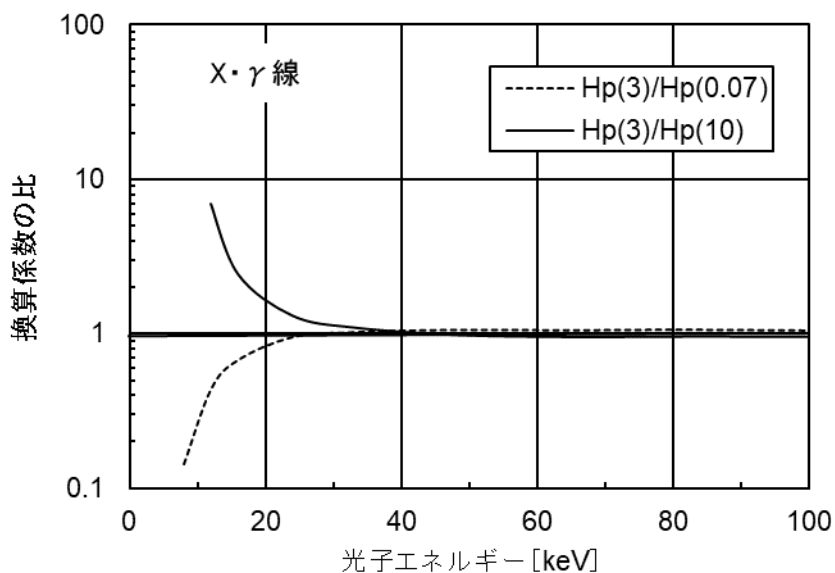


図 2-9 光子の 70 μm 線量当量または 1 cm 線量当量への線量換算係数に対する光子の 3 mm 線量当量への換算係数

2.6 文献調査

2.6.1 各国における ICRP の水晶体の線量限度の取入れ状況

欧州連合（EU）では、2018年2月6日までに Euratom Directive 2013/59⁴³⁾ にしたがって、各国の規制への新しい水晶体の等価線量限度の取入れることを決定した。米国では、米国放射線審議会（NCRP）が水晶体の線量限度に関するガイダンス Commentary No.26⁴⁴⁾ を取りまとめている。カナダにおいても検討、水晶体の等価線量として 50mSv/年を提案していること等が放射線審議会の部会においても報告された⁴⁵⁾。そこで、2018年3月現在、そのほかの国々で、ICRP の水晶体の等価線量限度が法令に取入れられているかを調査した。

調査では、加盟国の職業被ばくの一元管理のための個人モニタリングに関するデータベース ESOREX Platform (European Platform for Occupational Radiation Exposure)⁴⁶⁾ を利用した。ESOREX Platform には、規制部局、規制の枠組み、国の線量登録、線量モニタリングに関する情報（線量計の種類、線量計装着位置、モニタリング期間等）等が掲載されている。現在は整備中であり、すべての項目に対する情報がそろっているわけではないが、22か国中、15か国が情報を提供している。調査では、各国の政府等の web サイトに掲載されている規制・基準に関する情報も合わせて調べることにした。

(1) 調査対象

対象地域：19 개국（主に、ESOREX に情報が掲載されていた国を選別）

ブルガリア、スイス、ノルウェー、フランス、ドイツ、スウェーデン、フィンランド、スロベニア、スペイン、ルクセンブルク、オランダ、イギリス、ルーマニア、ポーランド、オーストラリア、カナダ、韓国、タイ、マレーシア

(2) 規制への取入れ状況

ICRP の水晶体の水晶体の線量限度を規制に取入れている国は以下のとおりである。

(a) 法令へ取入れ済みの国：

イギリス（EU）、ブルガリア（EU）、ノルウェー、スイス、オーストラリア
水晶体の等価線量限度の値は、書き方が多少異なるものの、ICRP の勧告や IAEA の BSS と同じ値を採用している。

(b) 取り入れを予定している国：

スウェーデン（EU）、フランス（EU）、ドイツ（EU）、スロベニア（EU）、スペイン（EU）、ルクセンブルク（EU）、ルーマニア（EU）、ポーランド（EU）、フィンランド、カナダ、韓国、タイ、マレーシア

主な国の規制取入れに関する検討経緯・状況の詳細を下記に示す。

① イギリス

2.1 で述べた通り、2007年から2016年に英国内の原子力施設作業員の体幹部に装着したAPD（電子線量計）、四肢、眼用の線量計（TLD）で測定した結果から、APDで測定した $H_p(0.07)$ の値が、眼の近くで測定した $H_p(3)$ の値と同程度であると結論づけた。原子力産業及びその他の非医療分野では、全身用（胸部で測定した $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ ）の線量計を使用することで、大多数の労働者の水晶体線量の評価が可能としている⁷⁾。英国においては、2018年1月に新しい水晶体の等価線量限度を施行した⁷⁾。

② スウェーデン

2.1 に述べたとおり、スウェーデンでは、2013年からスウェーデン規制当局（SSM）主導で原子力施設において水晶体の線量測定（パイロット試験）を実施している⁶⁾。測定対象者は、年間6 mSv(0.5 mSv)を超える者を基準としている。この線量を超えても把握できないおそれがあるとして、さらに、不均等被ばくとみなされる基本的な3要件を示しており、(i)一次冷却水の機器開放作業、(ii)体幹部が遮蔽されており眼が体幹部より被ばくする作業、(iii)眼を線源に近づける作業を選定している。(ii)及び(iii)の具体的な作業としては、燃料からのクラッドふき取り試料の処理、BWRの弁のバルブハウジングやバルブコーンの手研磨等の作業、制御棒駆動機構の解体、除染作業等である。バッテンフォール社では、眼の線量が、体幹部より高くなり、1か月で0.5 mSvを超える作業員については、今後も継続して眼のモニタリングを実施するとしている。 γ 線による被ばくだけでなく、 β 線による被ばくについても考慮している⁶⁾。

規制への水晶体の線量限度の取入れは、2018年6月1日を予定している^{6,47)}。

③ フランス

2017年に発刊されたフランスの原子力安全機関（ASN）の2016年の年報⁴⁸⁾によると、2016年から、特に線量の高い医療分野を中心に水晶体の等価線量測定を実施している。しかし、測定者数が200名と少なかったため、法令遵守が可能かどうかの結論には至らなかった。2017年より法令遵守に向けて、放射線業務従事者の水晶体の等価線量測定を開始している。

原子力施設（原子力発電所）においては、作業員の実効線量は年間15 mSvで管理されている⁶⁾。このため、不均等被ばくがあったとしても、線量限度を超えないと整理しているとのことである。ただし、年間15 mSvを超える作業員については、水晶体の測定も実施する可能性がある。

現行法令の水晶体の等価線量限度は150 mSv/年であり、規制への水晶体の線量限度取入れは2023年を予定している⁴⁸⁾。

④ ドイツ

2015年7月にドイツ放射線防護委員会(SSK)が検討を実施し、水晶体の線量モニタリングに関する報告書を発表している⁴⁹⁾。この報告書は、新しい線量限度を踏まえて検討されたものである。この中で、 $H_p(3)$ 及び $H'(3)$ は光子に対しても β 線に対しても眼の水晶体の等価線量モニタリングに関して適切であるとしている。しかし、規制へこれらの実用量

を導入するためには、光子に対する $H'(3)/K_a$ (K_a : 空気カーマ)の換算係数がまだ整備されていないことが課題であるとしている。ただし、 β 線がほとんど存在しない、光子に対しては、 $H_p(0.07)$ 、 $H'(0.07)$ での評価が可能であるとしている。水晶体の等価線量限度の規制への取入れ時期に関しては、明示されていない。

⑤ ルクセンブルク

ESOREX Platform の web サイト⁵⁰⁾ にモニタリング手法とともに、以下のコメントの記載があった。コメントによると、眼の水晶体の定期的な調査はしていないが、エプロンの下と上に線量計を装着した場合、 $H_p(3)$ は甲状腺の近くで推定することとなる。上記のエプロンの上に装着した線量計の値は 20 mSv/年を超えることは一度もなかったことから、現在は、水晶体の等価線量を測定するといったことを行っていない。鉛眼鏡着用時の遮蔽効果が、線量評価に対する最大の不確かさ要因であるとしている。

⑥ カナダ

カナダ原子力安全委員会が 2016 年 4 月に Technical Note: Proposed Changes to the Equivalent Dose Limit for Lens of the Eye⁵¹⁾ をとりまとめており、新しい水晶体の等価線量限度として 50 mSv/年（実効線量限度と同じ値）を提案している。法令への取入れ時期は未定である。

⑦ タイ

2017 年 9 月には改訂案を準備しており、タイ原子力庁最上部の承認待ちにある（2017 年 10 月～2018 年 1 月現在）。しかしながら、歯科医師や放射線管理責任者から法令遵守ができない状況であるとの意見があり、現在、法令取入れの検討を一時中断している^{52, 53)}。

2.6.2 緊急時の水晶体の等価線量制限レベルについて

国際労働機関（ILO）が、2011年の福島第一原子力発電所事故を受けて、放射性物質の放出が大人数の避難、（汚染した）食品・水道水の供給の懸念、原子力・緊急時作業者の取り扱いに関する懸念が出たことから、「放射線安全、作業者の防護及び緊急時作業」が、web サイトに取りまとめている⁵⁴⁾。緊急時作業者のリスク、防護策等の記載があり、Annex として、カナダ、フランス、韓国及びロシアの原子力及び緊急時の作業者の線量限度（制限）レベルが取りまとめられている。

厚生労働省の第1及び第2回福島第一原発作業者の長期健康管理等に関する検討会（2014年12月及び2015年1月15日）^{55, 56)}において、緊急時における諸外国の管理状況について取りまとめられている。

さらに web 等を調査した結果、IAEA の BSS が出版された 2014 年度以降に緊急時の線量管理基準について改訂を行っている国はあるものの、ICRP の組織反応に関する声明や IAEA の BSS の改訂を受けて、緊急時の作業者に対する水晶体の等価線量の管理基準を検討した、または、変更した国はなかった。

① カナダ

Radiation Protection Regulations (SOR/2000-203)⁵⁷⁾に以下の緊急時の作業者の線量限度についての記載がある。2017年9月に改訂されているが、以前から水晶体の等価線量限度の記載はなく、9月の改訂においても記載の追加等はなされていない。

表 2-7 カナダにおける緊急時の作業者の線量限度

	活 動	実効線量 (mSv)	皮膚等価線量 (mSv)
1	放射性物質の放出に関連する公衆のための線量の影響を最小限に抑えるための活動	100*	1 000*
2	致命的または生命を脅かす放射線の健康への影響を防止するための活動、または恒久的な傷害をもたらす行為	500	5 000
3	人と環境に重大な影響を及ぼす可能性のある状況の進展を防止するための活動	500	5 000

* 2017年9月22日に改訂され、*の値が追加。

② フランス

フランス原子力局（ASN）の2016年報告書⁴⁸⁾に Reference individual Exposure levels の記載があるが、水晶体の等価線量制限の記載ない。

- ・緊急時被ばく状況においてすべての介入（実効線量）：100 mSv
- ・人命救助や多数の被ばく防止や低減等の特別な状況（実効線量）：300 mSv

- ・いかなる場合も全累積の実効線量は 1Sv を超えてはならない。
- ・スペシャリスト以外（グループ 2）の参考レベル（実効線量）：10 mSv/介入

③ 韓国

緊急時作業員または必然的に被害の拡大を防止するための作業員については以下のとおりとしているが、水晶体の等価線量制限の記載なし⁵⁶⁾。

実効線量：500 mSv、皮膚（四肢）の等価線量：5 Sv(Gy)。

人命救助に関しては制限なし。

④ ロシア

緊急時に職業被ばくとして線量限度を超える被ばくが予期される特別チームに対しては、通常の線量限度の 2 倍といった記載がある。また、以下のような記載がある^{55,58)}。

最大実効線量：100 mSv/年

実効線量が年間 100 mSv を超えた場合、さらなる作業中により年間 20 mSv を超えてはならない。

人命救助等の例外的な状況下においては、通常の線量限度の 4 倍を適用することが可能。

上記には明確な記載ないが、ILO の取りまとめた資料⁵⁴⁾には、最大等価線量として、実効線量限度（200 mSv）と合わせて、水晶体の等価線量限度は 600 mSv（150 mSv の 4 倍）、皮膚、四肢の等価線量限度は 2000 mSv としている。これらの数値は上記の通常の線量限度の『4 倍を適用する』をもとにしたものであると考えられる。

⑤ イギリス：

緊急時に職業被ばくとして線量限度を超える被ばくが予期される特別チームに対する Emergency Dose Level として、実効線量は 100 mSv、皮膚の等価線量は 1000 mSv、眼の水晶体の等価線量は、300 mSv という記載がある⁵⁹⁾。

また、人命救助の場合には、全身線量（Whole body dose）として 500 mGy、皮膚の線量として 5000 mGy が定められているが、水晶体の等価線量レベルの記載はない。

⑥ イタリア

緊急時に職業被ばくとして線量限度を超える被ばくが予期される特別チームに対して水晶体の限度に関する記載がある^{54, 55)}。

実効線量：100 mSv、眼の水晶体等価線量：300 mSv、皮膚の等価線量：1000 mSv

四肢の等価線量：1000 mSv

実効線量が 100 mSv を超えた場合、翌年 10 mSv を超えてはならない。

⑦ ドイツ

規制当局が例外的に特定の作業について、線量限度を設けている⁶⁰⁾。

実効線量：100 mSv、眼の水晶体等価線量：300 mSv、皮膚の等価線量：1000 mSv

四肢の等価線量：1000 mSv

⑧ ルーマニア

緊急作業者の参考レベルとして以下の記載がある⁶¹⁾。

実効線量：50 mSv、眼の水晶体等価線量：50 mSv、皮膚の等価線量：500 mSv、
四肢の等価線量：500 mSv

⑨ その他の国

オランダでは2017年10月に法令改正を行っている⁶²⁾が、水晶体の等価線量限度や参考レベルについての記載はされていない。ノルウェー、スロベニア、オーストラリア、フィンランド、米国についても水晶体の参考レベルまたは線量限度に関する記載はない。

2.7 結論

原子力発電所等での水晶体の等価線量モニタリング、防護、線量管理の在り方を探るために、水晶体の等価線量の実態調査を実施した。

実施施設の選定、作業項目の抽出を行い、福島第一原子力発電所、川内原子力発電所及びコンビナートでの非破壊検査の従事者に対して水晶体の等価線量（3mm線量当量）を算定したほか、頭部や胸部での70 μ m線量当量及び1cm線量当量を測定した。

水晶体の線量測定に使用する線量計の装着方法については、全面マスク装着時及び未装着時の線量計装着方法の検討を行い、本研究における実際の作業場所での従事者の線量測定に試験的運用を行った。

福島第一原子力発電所においては、高線量（率） γ 線場及び高線量率 β 線場の作業者の水晶体の等価線量測定を実施した。高線量 γ 線場では、空間線量率測定結果から、体幹部高さではほぼ均一または、頭部（水晶体）の線量が胸部よりも低くなると考えられたが、一部の結果から、胸部位置で算定した水晶体の等価線量より、頭部位置で算定した水晶体の等価線量の方が高くなるケースがあった。また、RPLDと水晶体用TLDで算定した値は水晶体用TLDで算定した値の方が高くなった。使用する換算係数の影響、線量計装着位置、作業場所の空間線量分布の違い、場の放射線エネルギーに対する線量計のエネルギーレスポンスの違い等、様々な要因が考えられた。これらの要因については、今後検討が必要である。

福島第一原子力発電所の β 線場においては、全面マスクの遮蔽効果で全面マスク内の線量は全面マスク外の線量の20%以下であると推定された。これまで全面マスクの外側で算定した線量を水晶体の等価線量としてきたが、全面マスク外の線量が年間20 mSvから50 mSvとなった場合でも、実際の水晶体の等価線量はICRPの水晶体の等価線量限度を十分に下回ると言える。 β 線場においては、著しい過大評価を避けるために、全面マスクの効果、そして、3 mm線量当量での評価の妥当性を考えておく必要があるだろう。また、全面マスクの面体の厚さが正面と側面との違いにより、額中央の値が小さく見積られる可能性があったが、その差は、約20%であった。本研究において線量計を装着した位置であれば、著しく過小評価することはないものと考えられる。なお、低い位置（額中央）であっても、現行法令に基づき70 μ m線量当量で評価した場合には、保守的な評価となる。

また、頭部線量と胸部線量がどの程度の違いであれば均等被ばくと考えられるのかについても、今後、測定を追加して、検討する必要がある。さらに、実態把握では、実際の作業場として、 γ 線または β 線が各々有意な場しか存在しないが、混在場についても検討しておく必要がある。混在場においては、全面マスクで β 線の線量が低減する一方、全面マスクは γ 線に対して遮蔽効果はほとんどないため、低下した β 線線量に γ 線の線量が加算されることになることに注意が必要である。適切な防護や管理方法を検討し、提案するためには、混在場についても具体的な方法を示しておくことが必要であろう。

非破壊検査の作業においては、概ね均等被ばくであることが明らかになった。しかし、中には、胸部と頭部で測定値が異なる場合があった。福島第一原子力発電所の γ 線場の従事者同等に、その原因については今後も十分な検討が必要である。

福島第一原子力発電所以外の発電所として、九州電力（株）川内原子力発電所の作業項目抽出を実施した。2018年2月末より、従事者の水晶体等価線量測定を開始している。これらの結果についても今後分析を行い、適切な水晶体の等価線量モニタリング方法、管理及び防護策の提案に反映する予定である。

文献調査では、各国のICRPの新しい水晶体の等価線量限度の取入れ状況及び研究の現状、並びに、各国の緊急時の水晶体の等価線量限度の取入れ状況について調査した。EUでは、2018年2月6日までに新しい水晶体の等価線量限度各国の法令へ取り入れるよう指令が出ていたが、多くの国で取り入れの準備が進められているものの、2月までに自国の規制への取入れに至った国は、英国他、数か国のみであった。今後、適宜取入れが進められるものと考えられる。わが国での規制への取入れにあたっては、これらも参考になると考えられるため、今後も情報収集を行っていく必要がある。

2.8 次年度の活動概要

詳細な分析を行うためには、より多くのデータが必要である。このため、2017年度（平成29年度）に検討した線量計装着治具及び線量計（水晶体用TLD、RPLD、APD等）を用い、必要に応じて装着方法等に改良を加え、原子力発電所等の従事者の水晶体の等価線量測定を追加して実施する。得られた結果については、ファントム実験、空間線量、従事者の線量計着用位置や線量計の違い等を踏まえ分析を行う予定である。

実施場所は、福島第一原子力発電所、川内原子力発電所（現在、実施中であり、次年度も継続）及び非破壊検査施設等で継続して実施する予定である。このほか、事業者と意見交換を行い、測定可能な施設がある場合には、十分に検討した上で、同様な方法にて線量測定を実施する。

線量計の装着による作業への支障がでないよう各事業所の放射線管理者や実際に作業を行う従事者と意見交換を行う。測定開始後も、放射線管理者や作業者と定期的に意見交換を行い、必要に応じて、線量測定を実施する作業内容や線量装着方法について改善・変更する。主任研究者らの入域が制限される場所での空間線量測定及び個人線量計の装着は、今年度と同様に実施機関の従事者に協力を要請する予定である。

2.9 研究発表

本研究では、以下の発表を実施・予定している。

2018年3月20日 保健物理学会シンポジウムII原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～平成29年度放射線安全規制研究戦略的推進事業

2018年6月29日～30日 日本保健物理学会第51回研究発表会

謝辞

本研究にご協力及びご助言いただきました以下の皆様に心から御礼申し上げます。
東京電力ホールディングス（株）林田敏幸氏、吉田武史氏、佐藤暢秀氏、夏目良典氏、林宏二氏、向田直樹氏、木村義昭氏、菊地弘幸氏、高平史郎氏、牧平淳智氏、中部電力（株）吉田博氏、望月和博氏、稲垣博光氏、浜岡原子力発電所放射線管理課の皆様、関西電力（株）高木正茂氏、中村年孝氏、秋宗尚弥氏、九州電力（株）畠埜恭介氏、上村孝雅氏、川内原子力発電所放射線管理課の皆様、日本原燃（株）前田哲太郎氏、四国電力 松本龍一氏、電気事業連合会 岩瀬栄二氏、（一社）原子力安全推進協会 岩井敏氏、仙波毅氏、日本エヌ・ユー・エス（株）青天目州晶氏、非破壊検査（株）桂山丈典氏、（株）千代田テクノル 佐野智久氏、一ノ瀬桂吾氏、大口裕之氏、日本原子力研究開発機構 谷村嘉彦氏、吉富寛氏、星勝也氏、産業技術総合研究所 黒澤忠弘氏、加藤昌弘氏、高エネルギー研究加速器機構 平山英夫氏、電力中央研究所 浜田信行氏、金沢大学 松原孝祐氏、（株）原子力エンジニアリング 西村健氏、規制庁 本間俊充氏、一瀬様昌嗣氏、大町康氏、鹿島建設、東京パワーテクノロジー（株）、三菱重工業（株）、西日本プラント工業（株）、（株）重松製作所、柴田科学（株） ご協力いただきました皆様

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, 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, TECDOC No. 1731 (2014).
- 4) F.Vanhavere, E.Carinou, G.Gualdrini, I.Clairend, 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. Itiř, 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).
- 5) E. Vano, N. Kleiman, A. Duran, M. Romano-Millerand M. Rehai, Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments, J. Vasc. Interv. Radiol., **24**, 197-204 (2013) など
- 6) 岩井敏, 仙波毅, 青天目州晶, 眼の水晶体の線量限度に関する国外動向調査～スウェーデンの原子力発電所における取組を中心に～, 日本保健物理学会企画シンポジウムプロシーディング (2018年3月20日) (2018).
- 7) A. McWhan, W. Dobrzynska, Eye lens dose monitoring in the UK nuclear industry using active personal dosimeters, J. Radiol. Prot. in press.
- 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 (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).
- 9) 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に係る技術的指針 (1999).
- 10) 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).
- 11) 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).
- 12) 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).
- 13) S. Yokoyama, N. Hamada, T. Hayashida, N. Tsujimura, H. Tatsuzaki, T. Kurosawa, K. Nabatame, H. Ohguchi, K. Ohno, C. Yamauchi-Kawaura, T. Iimoto1, T. Ichiji, Y. Hotta, S. Iwai and K. Akahane, Current situations and discussions in Japan in relation to the new occupational equivalent dose limit for the lens of the eye, J. Radiol. Prot. 37659-683 (2017).
- 14) 東京電力 HD (株), 「今後の眼の水晶体の等価線量限度の引き下げ」に対応した取り組みについて, 放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会第 2 回資料 2 (2017) など.
- 15) 気象ネットワーク, 追加試算 (1) 全ての原発が停止する場合の影響について, 新大綱

- 策定会議（第9回）資料第2-2-2号（2011）。
- 16) 原子力規制委員会，実用発電用原子炉に係る新規規制基準について（概要），2016年2月17日更新，2018年3月7日閲覧，<http://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf>
 - 17) 原子力安全推進協会ホームページ，原子力施設新規規制基準適合性審査状況，2018年3月7日閲覧，<http://www.genanshin.jp/facility/map/>
 - 18) 四国電力（株）ホームページ，最近の定期検査の状況，2018年3月7日閲覧，http://www.yonden.co.jp/energy/atom/ikata/page_06.html
 - 19) 九州電力ホームページ，現在実施中の定期検査の状況，2018年3月7日閲覧，http://www.kyuden.co.jp/nuclear_maintenance_now_check.html
 - 20) ISOE アジア技術センター，アジア地域線量情報（日本）放射線廃棄物の管理及び線量管理状況，平成29年（平成28年度実績），2018年3月7日閲覧，http://www.nsra.or.jp/isoe/regionalinfo/info_02_h29.html
 - 21) 日本原燃株式会社ホームページ，再処理工場およびMOX燃料工場のしゅん工時期の変更について2017年12月22日，2018年3月7日閲覧，<http://www.jnfl.co.jp>
 - 22) 東京電力ホールディングス（株），福島第一原子力発電所の労働環境改善に伴う設計上の労務費適正化について，2018年3月7日閲覧，<http://www.tepco.co.jp>
 - 23) 東京電力ホールディングス（株），福島第一サーベイマップ（2018年2月分），2018年3月7日閲覧，<http://www.tepco.co.jp/decommission/news/data/sm/images/fl-sv-20180228-j.pdf>
 - 24) 東京電力ホールディングス（株），福島第一構内サーベイマップ（2018年2月7，14日測定分），2018年3月7日閲覧，<http://www.tepco.co.jp/decommission/news/data/sm/images/fl-sv2-20180228-j.pdf>
 - 25) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議，東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃炉措置等に向けた中長期ロードマップ平成29年9月26日（2017），2018年3月7日閲覧，<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20171003.pdf>
 - 26) 東京電力ホールディングス（株），3号機燃料取り出しカバー設置状況，2018年2月8日，福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会資料（2018），2018年3月7日閲覧，<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/252327.pdf>
 - 27) 大成建設，東電福島第一原発における放射線被ばく管理等に関するワークショップ（2015）。
 - 28) 東京電力株式会社，フランジタンクの解体・切断作業の概要について，福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会（2015年6月23日開催）資料，2018年3月7日閲覧，<http://www.tepco.co.jp/>
 - 29) 九州電力（株）ホームページ，川内原子力発電所発電所の概要，2018年3月7日閲覧，http://www.kyuden.co.jp/sendai_outline_index.html
 - 30) 九州電力（株）ホームページ，川内1号機の定期検査実施状況，2018年3月7日閲覧，http://www.kyuden.co.jp/nuclear_maintenance_sendai1_check.html
 - 31) 九州電力（株）ホームページ，定期検査工程（例），2018年3月7日閲覧，

- http://www.kyuden.co.jp/nuclear_maintenance_check_process.html
- 32) (一社) 日本非破壊検査工業会, 非破壊検査における水晶体被ばくの現状, 第 5 回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会資料 2 (2018), 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://www.nsr.go.jp/data/000212809.pdf>
 - 33) 電気事業連合会, 原子力発電所における眼の水晶体の被ばくの現状について 第 4 回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会資料 4 (2017), 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://www.nsr.go.jp/data/000209659.pdf>
 - 34) フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) ホームページ, The eye dosimeter DOSIRIS, 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://dosimetre.irsn.fr/en-us/Documents/Product%20files/DOSIRIS%20EN%20WEB.pdf>
 - 35) 日本工業標準調査会, JIS T 8150: 呼吸用保護具の選択, 使用及び保守管理方法 (2006).
 - 36) 日本工業標準調査会, JIS Z 4511: 照射線量測定器, 空気カーマ測定器, 空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法 (2005).
 - 37) 日本工業標準調査会, JIS Z 4331: 個人線量計校正用ファントム (2005).
 - 38) 加藤昌弘, 黒澤忠弘, 私信.
 - 39) R.Behrens, Air kerma to Hp (3) conversion coefficients for a new cylinder phantom for photon reference radiation qualities, Rad. Pro. Dos. 151(3), 450-455 (2012).
 - 40) 平山英夫, 全面マスクでの制動輻射 X 線の寄与 (Y-90 β 線), 私信.
 - 41) 日本工業標準調査会, JIS Z 4345 X・ γ 線及び β 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置 (2017)
 - 42) 放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について, 平成 30 年 2 月 (2018) .
 - 43) EU; Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013, Official Journal of the European Union., 2018 年 3 月 7 日閲覧, <http://faolex.fao.org/docs/pdf/eur130004.pdf>
 - 44) NCRP, Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye, NCRP Commentary No. 26 (2016).
 - 45) 浜田信行, 新たな水晶体等価線量限度と国外動向, 第 1 回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会資料 3, 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://www.nsr.go.jp/data/000197233.pdf>
 - 46) European Platform for Occupational Radiation Exposure, ESOREX Platform, , 2018 年 3 月 7 日閲覧, <https://esorex-platform.org/>
 - 47) Swedish Radiation Safety Authority, 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/regler/foreskrifter/oversyn-av-vara-foreskrifter/>
 - 48) Nuclear Safety Authority, ASN report on state of nuclear safety and radiation protection in France in 2016 (2017).
 - 49) German Commission on Radiological Protection, Monitoring the Eye Lens Dose, Recommendation of the German Commission on Radiological Protection Commission on Radiological Protection (2015).

- 50) European Platform for Occupational Radiation Exposure, Luxembourg, 2018 年 3 月 7 日閲覧, <https://esorex-platform.org/country/Luxembourg>
- 51) Canadian Nuclear safety Commission, Technical Note; Proposed Changes to the Equivalent Dose Limit for Lens of the Eye, April 6 (2016).
- 52) 松原孝祐, 私信.
- 53) 浜田信行, 私信.
- 54) ILO, Radiation safety and protection of workers in nuclear and radiological emergency operations, 2018 年 3 月 7 日閲覧,
http://www.ilo.org/safework/whatsnew/WCMS_154370/lang--en/index.htm
- 55) 杉浦紳之, Responses to Questions about The Management of Workers Exceeding Dose Limits in Accident Situations, 第 1 回東電福島第一原発作業員の長期健康管理等に関する検討会資料 20 (2015), 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyoku-Soumuka/0000070391.pdf>
- 56) 杉浦紳之, 線量限度を超えて被ばくした作業者の線量管理の諸外国の状況について, 第 2 回東電福島第一原発作業員の長期健康管理等に関する検討会資料 3 (2015), 2018 年 3 月 7 日閲覧, <http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyoku-Soumuka/0000071281.pdf>
- 57) Canadian Nuclear Safety Commission, Radiation Protection Regulations SOR/2000-203, Nuclear Safety and Control Act. , 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2000-203/section-15-20170922.html#wb-cont>
- 58) The Russian regulations of Radiation Safety Standards NRB-99/2009. , 2018 年 3 月 7 日閲覧, <https://www.quarta-rad.ru/useful/vse-o-radiacii/nrb-99-2009/>
- 59) REPPiR, Provisional HSE internal guidance on dose levels for emergencies (2001),
<http://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/doses/dose-pr.htm>
- 60) Federal Ministry of Justice and consumer Protection, , 2018 年 3 月 7 日閲覧,
https://www.gesetze-im-internet.de/strlrschv_2001/BJNR171410001.html#BJNR171410001BJNG002100000
- 61) Norms on general regulation for preparedness and response to a nuclear or radiological emergency, 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<http://www.nuclever.com/pdf/Norms%20on%20general%20regulation%20for%20PR%20to%20a%20nuclear%20or%20radiological%20emergency.pdf>
- 62) Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming), 2018 年 3 月 7 日閲覧,
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2017-404.html>

3. 原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究

分担研究者	辻村 憲雄	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構
研究参加者	吉富 寛	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構
研究参加者	星 勝也	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構
研究参加者	山崎 巧	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構
研究参加者	西野 翔	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構
研究協力者	大口 裕之	株式会社千代田テクノ	

3.1 目的

国際放射線防護委員会(ICRP)が勧告する新たな水晶体等価線量限度(5年間で100 mSv, かつ50 mSv/年を超えない)に対応すべく, 原子力施設における放射線業務従事者の水晶体等価線量の実態を調査するとともに, 標準的な水晶体等価線量のモニタリング方法及び適切な管理・防護の在り方を, 作業現場の放射線場の特性と個人線量計の応答特性の理解をその基礎として, 提案することを目的とする。

背景

Yokoyama ら¹⁾の報告によれば, 我が国の放射線業務従事者の多くは, γ 線やX線による全身均等被ばくを受ける場合がほとんどで, かつその水晶体等価線量もICRPが勧告した新たな線量限度を十分に下回っていると考えられる。しかしながら, 原子炉施設の定期検査対応作業や, とりわけ福島第一原子力発電所の廃炉関連作業において, 放射線業務従事者が高い水晶体等価線量を受けたり, β 線や γ 線による不均等被ばくを受けたりする可能性がある²⁾。また, 一部の研究施設(再処理・MOX燃料施設, ホットセル)においても, 作業内容によっては体幹部に比べて高い水晶体等価線量を受けることが報告されている³⁾。このような作業現場において水晶体等価線量を精度よく評価するには, 放射線スペクトル測定(スペクトロメトリ)技術による作業現場の放射線場の特性と, 適切な線源とファントムを用いる標準照射による個人線量計の応答特性の理解を効果的に結びつける必要がある。

3.2 研究方法

研究(二年計画)は, (1)原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査, (2)作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験, 及び(3)人体形状ファントムを用いる模擬照射実験からなる。初年度である平成29年度には, (1)~(3)を実施する。それぞれの研究項目について実験方法を以下に記述する。

3.2.1 原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査

日本原子力研究開発機構(核燃料サイクル工学研究所及び原子力科学研究所)において, これまでに実施されたセル内作業やグローブボックス作業について過去の放射線記録等を調査し, 水晶体に高線量の被ばく及び不均等な被ばくを受ける作業状況等を明らかにする。調査は, 下記施設を対象に行う。

- ・核燃料サイクル工学研究所: プルトニウム燃料第一開発室, プルトニウム燃料第二開発室, プルトニウム燃料第三開発室及び再処理施設プルトニウム転換技術開発施設(本報告書ではこれらを「MOX燃料施設」と総称する)並びに再処理施設。
- ・原子力科学研究所: 試験炉施設(燃料取扱作業), ホット試験施設, 廃棄物取扱施設(廃止措置含む)

3.2.2 作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験

実際の作業現場において、 γ 線及び β 線のスペクトル測定を行い、被ばくの主たる線源の特徴（エネルギー分布+大まかな入射角度分布）を評価するとともに、3mm線量当量、1cm線量当量等の実用量と水晶体等価線量の関係について、スペクトル（線質）の観点から考察する。また、同じ作業場所で、頭部を模擬する円柱と胴体部を模擬する平板からなる簡易的なファントムの表面に個人線量計を取り付けた現場（フィールド）照射実験を行い、個人線量計の異なる向きや取り付け位置の間で指示値にどのような変化が生じるかを調べる。

平成29年度に実施した当該実験の日時と場所、使用した測定器を以下に記す。

(1) 日時と場所

第一回 平成29年11月30日～12月1日

東京電力福島第一原子力発電所（以下、「東電1F」と記す）：1号機原子炉建屋大物搬入口付近、2号機原子炉建屋南西側作業現場、定検資材倉庫（フランジタンク解体切断片近傍）、分析棟屋外（汚染水を紙に浸して作成した線源）

第二回 平成30年3月7～9日

東電1F：2号機原子炉建屋屋上、2号機・3号機原子炉建屋間道路わき

(2) 検出器

(a) γ 線スペクトロメータ

γ 線スペクトル測定に使用するスペクトロメータは以下の二種類である。

- ① CdZnTe 検出器（Kromek 製 GR-1, 1 cm×1 cm×1 cm）：ポータブル PC により給電制御を行う小形の常温半導体検出器である。図 3-1 に検出器を示す。第二回測定では、検出器にコリメータ（図 3-1 参照）を装着し、検出器そのものを回転させることで入射方向別に測定を行う。
- ② LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器(OKEN 製, 1 cm×1 cm×1 cm)：LaBr₃(Ce)は、NaI(Tl)よりも優れたエネルギー分解能を持ち、また①の CdZnTe 検出器に比べて高計数率にも対応可能である。図 3-2 に、プリアンプ（CANBERRA 製 2005）及び波高分析器（Inspector2000）とあわせて示す。

両検出器ともに、得られたパルス波高分布から、それぞれの検出器の応答関数を用いてアンフォールディング処理を行うことにより、20 keV～1000 keV 程度までの光子スペクトルを導出する。応答関数は、検出器に 4π 方向から入射する単色光子（5 keV 刻み）に対するパルス波高分布をモンテカルロ計算によって評価したものである⁴⁾。アンフォールディングには、MAXED コード⁵⁾を利用する。得られた光子スペクトルに、フルエンスから ICRP Publ. 116⁶⁾の水晶体等価線量、EURADOS Report 2012-02⁷⁾の 3 mm 線量当量 ($H_p(3)$)、及び ICRP Publ. 74⁸⁾の 1 cm 線量当量 ($H_p(10)$) への換算係数を作用させることによって、それぞれの線量を得る。ただし、回転照射及び等方照射条件における $H_p(10)$ については、ICRP⁸⁾に換算係数が与えられていないので、別に計算した値⁹⁾を用いる。

(b) β 線スペクトロメータ¹⁰⁾

β 線スペクトロメータは、直径 51 mm×厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ

(ELJEN Technology 社製 EJ200), 光電子増倍管 (Scionix Holland 社製 25AM10/2) 及びマルチチャンネルアナライザ (Ortec 社製 digiBASE) からなる。シンチレータの厚さ 10 mm は ^{90}Sr - ^{90}Y の β 線最大エネルギー (2.2 MeV) の飛程に相当する。シンチレータ前面の直径 25.4 mm のアルミ蒸着マイラー (2.7 mg/cm²) の窓を通り抜けた電子はシンチレータ中でほぼフルストップするので、観測されるパルス波高スペクトルは、入射 β 線スペクトルの近似値となる。 ^{137}Cs 線源 (内部転換電子 625 keV) での校正によってチャンネルをエネルギーに変換したパルス波高スペクトルを窓面積で除することによってスペクトラルフルエンスに換算し、それに換算係数を乗じて線量当量を算出する。使用する換算係数は、ICRP Publ. 74 (Table A.44)⁸⁾ の 70 μm 線量当量 ($H'(0.07)$), 3 mm 線量当量 ($H'(3)$) 及び 1 cm 線量当量 ($H'(10)$) である。

なお、 β 線と γ 線の混在場では、 β 線だけを遮る厚さ 10 mm のアクリル樹脂製キャップをシンチレータに被せた状態と取り外した状態で測定し、両条件で観測されるパルス波高スペクトルの差分から入射 β 線スペクトルを得る (図 3-3)。また、パイルアップを回避するため、電離箱式線量当量率サーベイメータによる測定で 70 μm 線量当量率が数 mSv/h 程度になるような距離で測定を行う。

(c) 個人線量計とファントム

作業現場における γ 線の入射方向の大まかな推定及び作業者による水晶体用個人線量計着用試験結果 (詳細については 2.4.1 を参照) と上記のスペクトル測定で得られる情報との比較分析を目的として、ファントムに取り付けた個人線量計のフィールド照射実験を行う。次の二種類のファントムを使用する。それぞれの個人線量計の仕様の詳細について、表 3-1 に示す。

- ① 立方体ファントム (図 3-4) : 外寸 30 cm×30 cm×15 cm のアクリル樹脂製。ファントムのそれぞれの面 (計 6 面) の中央に電子式個人線量計 (富士電機株式会社製 Dose i) を取り付け、その指示値の相対的な大小から主たる γ 線の入射方向を特定する。なお、電子式個人線量計の取り付け部分は、線量計の本体がファントム面に埋没するよう切削されている。
- ② 簡易人体形状ファントム (図 3-5) : 頭部 (直径 20 cm×長さ 20 cm のポリエチレン円柱)、頸部 (直径 12 cm×長さ 8 cm のポリエチレン円柱; 寸法は文献¹¹⁾による)、及び胴体部 (30 cm×30 cm×15 cm のアクリル平板) からなる。実験では、二体用意する簡易人体形状ファントムのうち、一体を静止させた状態で、もう一体を回転台に載せ連続水平回転させた状態で使用する。頭部及び胴体部に取り付ける個人線量計の仕様を表 3-1 に示す。胴体部及び頭部中央は、地表からそれぞれ高さ 120 cm, 153 cm である。

(d) 線量当量率サーベイメータ

表 3-2 に示すサーベイメータを用いて実験現場における γ 線及び β 線による線量当量率を測定する。

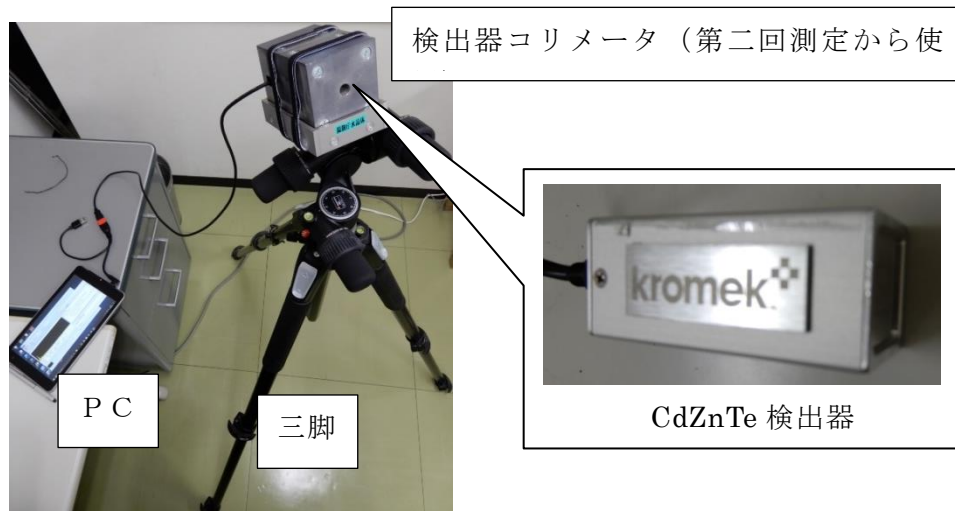


図 3-1 γ 線スペクトロメータ (CdZnTe 検出器)

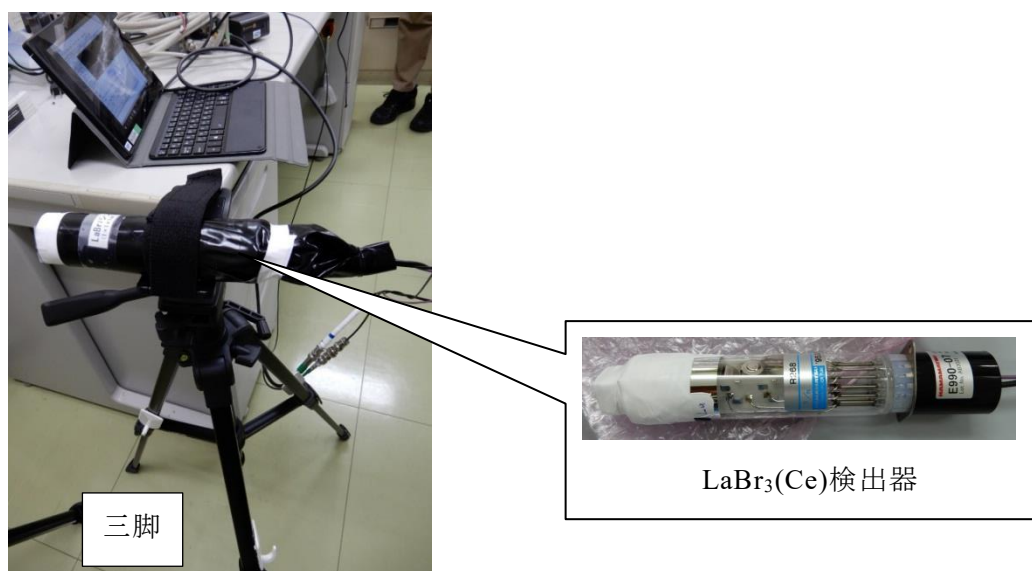


図 3-2 γ 線スペクトロメータ (LaBr₃(Ce)シンチレータ)



図 3-3 β 線スペクトロメータ(プラスチックシンチレータ)

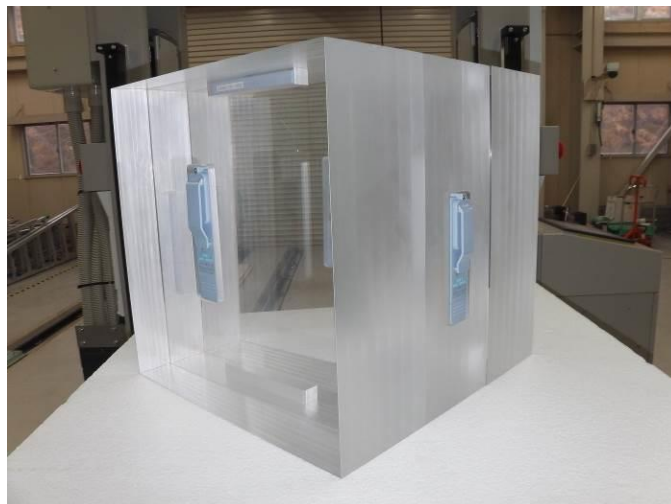


図 3-4 立方体ファントム
(写真は電子式個人線量計を取り付けた状態)

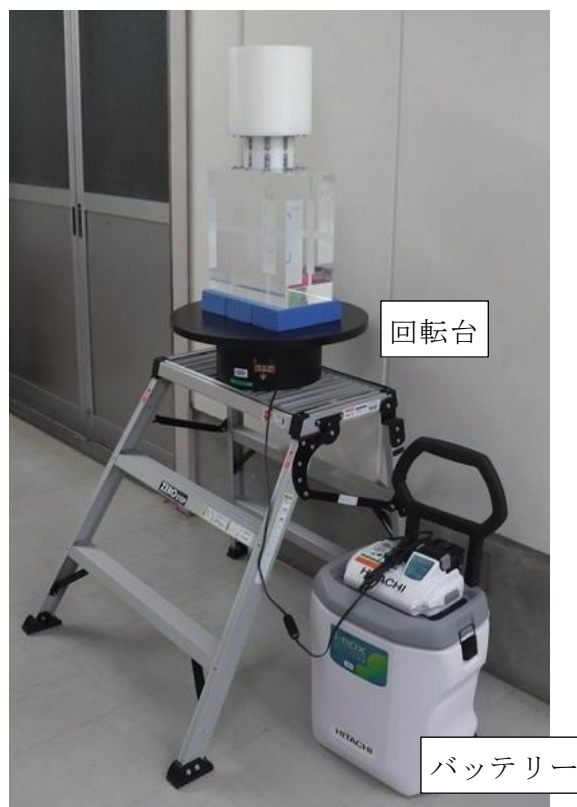


図 3-5 簡易人体形状ファントム
(使用するバッテリーは連続 6 時間の回転が可能である)

表 3-1 使用する個人線量計の一覧

個人線量計	検出器	備考	取り付けるファントム	
			東電 1F フィールド 照射試験	校正室での照射試験
千代田テクノ Dosiris	LiF 熱ルミネ センス線量計	水晶体用線量計	20cm φ × 20cm 円柱 ファントム	RANDO ファントム 頭部(眉間, 両目尻)
長瀬ランダウア Vision	LiF 熱ルミネ センス線量計	水晶体用線量計(試 験中)	20cm φ × 20cm 円柱 ファントム	RANDO ファントム 頭部(眉間, 両目尻)
OSLEYED	Al ₂ O ₃ 光刺激ル ミネセンス線量 計	水晶体用線量計(試 験中), 長瀬ランダウ ア製 nanoDot にエネ ルギー補償フィルタ (Sn+Al)を取り付け	20cm φ × 20cm 円柱 ファントム	RANDO ファントム 頭部(前額)
パナソニック UD-807	Li ₂ B ₄ O ₇ 熱ルミ ネセンス線量計	末端部用線量計, 蛍光体前面に 300 mg/cm ² 相当の合計 厚さになるアクリルフ ィルタ取り付け	/	RANDO ファントム 頭部(水晶体)
千代田テクノ ガラスバッジ (GB)	蛍光ガラス線量 計	全身用個人線量計	20cm φ × 20cm 円柱 ファントム 30cm × 30cm × 15cm アクリル平板ファントム	RANDO ファントム 頭部(前額) 30cm × 30cm × 15cm 水平板ファントム
パナソニック ZP-1461	Si 半導体	全身用個人線量計	30cm × 30cm × 15cm アクリル平板ファントム	/
富士電機 Dose-i	Si 半導体	全身用個人線量計	30cm × 30cm × 30cm アクリル立方体ファント ム	/

表 3-2 使用する線量当量率サーベイメータの一覧

メーカー・型式	検出器	測定線種	備考
応用技研製 AE-133B/Λ2 ⁺	電離箱式	γ 線 H'(10), H'(3), H'(0.07) β 線 H'(10), H'(3), H'(0.07)	入射窓前面に厚さの異なる フィルタを付け替えて測定
応用技研製 AE-233V	電離箱式	γ 線 H*(10)	
富士電機製 PEGASUS Pro	CsI(Tl)シンチ レータ及び Si 半導体	γ 線 H*(10)	線量データの自動保存, ト レンド表示や線量マッピング が可能。スマートフォンとの 連動機能も有する。

3.2.3 人体形状ファントムを用いる模擬照射実験

成人男性を模擬する RANDO ファントムの頭部に水晶体用個人線量計を取りつけ、平均エネルギー83 keV～1.25 MeV の X 線・ γ 線を照射し、線量計の取り付け位置や全面マスクによる指示値への影響を調べる。

(1) ファントム

Alderson 社製 RANDO ファントムの頭部～胸上部パーツを使用する。ただし、水晶体等価線量を直接測定するため、RANDO 頭部ファントムの目スライス(3番)を、組織等価プラスチック(京都科学製タフウォーター)の切削によって製作した複製品(図 3-6)と入れ替えて使用する。この複製品は、水晶体部分に小形の線量計を埋め込むことができるように、両瞳部分に直径 10 mm の穴がザグリ加工によって形成されている。

また、放射線の照射方向による個人線量計指示値への影響が、頭部と胴体分とでどの程度異なるかを調べるため、一部の実験において、標準の水槽形平板ファントム(外寸 30×30×15 cm)も使用する。

(2) 個人線量計

使用する個人線量計は、DOSIRIS, Vision, ガラスバッジ(GB), 及び OSLEYED である。前二者は、 $H_p(3)$ のモニタリング用に開発された(開発中の)小形軽量のもので、1回の照射につき3個(眉間と両目尻)使用する。GB は、元来全身用のものだが、ここでは眉間につけた DOSIRIS の真上の前額に1個設置する。OSLEYED¹²⁾は、nanoDot を利用した $H_p(3)$ 用線量計(開発中)であり、実験では眉間の Vision の真上の前額に1個設置する。さらに、全面マスクによる γ 線の遮へいが水晶体位置に及ぼす影響を調べるため、両瞳の水晶体深さに UD-807 熱ルミネセンス線量計を設置する。これらの線量計の仕様を表 3-1 に示す。

(3) 照射装置

原子力機構の放射線標準施設棟と計測機器校正施設で照射試験を行う。それぞれの施設における照射装置の概要を以下に示す。いずれの校正場も空気カーマ率は、国家計量標準である産業技術総合研究所にトレーサブルな空気電離箱による測定によって決定されている。

施設	照射装置名称	線源・線質(エネルギー)
放射線標準施設棟	中硬 X 線発生装置	ISO narrow シリーズ X 線
		N-250(平均エネルギー207 keV)
	N-100(平均エネルギー83.4 keV)	
計測機器校正施設	中レベル照射装置 コリメート形 γ 線照射装置	^{60}Co (平均エネルギー 1,250 keV) ^{137}Cs (662 keV)

(4) 照射条件

線源から RANDO ファントム頭部の瞳に埋め込んだ線量計までの距離を 2.5 m とする。照射ジオメトリは、正面照射 AP(顔面が線源に正対する)と回転照射 ROT(頭部が水平回転する)の二種類である。後者(ROT)の照射は、作業者が現場でランダムに動き回る場合を模擬するもので、両瞳の中間点(線源から 2.5 m)が回転軸と一致するよう毎分 1.25 回転(48 秒/回転)する自動回転台の上にファントムを載せることで行う。

照射条件一覧を表 3-3 に示す。空気カーマの不確かさは、 γ 線で 2.1%($k=2$)、X 線で約 1.4～1.7%($k=2$)である。空気カーマから線量当量または等価線量への換算には、表 3-4 に示す

換算係数を使用する。

(5) 全面マスク

東電1Fで広く使用されている3M製(型式:6000F)と重松製作所製(型式:GM-185-1)の2種類のマスクを使用する。本報告書では、それぞれをマスクA, マスクBと呼ぶ。図 3-7 に実験の様子を示す。

(倫理面への配慮)

原子力機構の過去の放射線作業に伴う水晶体被ばくデータの解析に際しては、機構の情報保護規程に従い、個人が特定されない形式で行い、研究結果の公表においては、連結不可能匿名化された解析結果のみを公表する。また、校正場等で実施するファントム実験は、特定の人物を対象としたものではないので倫理面等で特別の配慮を必要としない。



図 3-6 実験で使用した RANDO ファントム頭部
左:オリジナル, 右:乳白色部分が組織等価プラスチックで製作したもの



眉間・両眼尻に Dosiris, 前額に GB 設置



左にマスクAを被せた状態



眉間・両眼尻に Vision, 前額に OSLEYED 設置



左にマスク B を被せた状態



水平板ファントムに GB を設置

図 3-7 放射線標準施設棟及び計測機器校正施設での照射実験の様子

表 3-3 ファントム実験での照射条件
(個人線量計番号は個体識別のため便宜的に割り振ったものである)

照射 #	線源	実施日	照射 時間 (s)	空気 カーマ (mGy)	距離 (m)	ジオメトリ	マスク	個人線量計番号												ISO水 ファントム GB	
								RANDO頭部ファントム ファントム表面													
								水晶体 UD-807		GB	Dosiris			OSLEYED	Vision						
1	¹³⁷ Cs	2月1日	864	3.09	2.5	AP	—	1	2	1	1	2	3								
2		2月1日	864	3.09	2.5	AP	—	3	4					15	1	2	3				
3		2月1日	864	3.09	2.5	AP	A	5	6	2	4	5	6								
4		2月1日	864	3.09	2.5	AP	A	7	8					16	4	5	6				
5		2月1日	864	3.09	2.5	AP	B	9	10	3	7	8	9								
6		2月1日	864	3.09	2.5	AP	B	11	12					17	7	8	9				
7		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	—	13	14	4	10	11	12								
8		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	—	15	16					18	10	11	12				
9		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	A	17	18	5	13	14	15								
10		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	A	19	20					19	13	14	15				
11		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	B	21	22	6	16	17	18								
12		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	B	23	24					20	16	17	18				
13		2月1日	864	3.09	2.5	AP	—											7	8		
14		2月1日	864	3.09	2.5	ROT	—											9	10		
15	N-250	1月31日	768	3.01	2.5	AP	—	25	26	11	19	20	21								
16		1月31日	768	2.92	2.5	AP	—	27	28					9	19	20	21				
17		1月31日	768	2.92	2.5	AP	A	29	30	12	22	23	24								
18		1月31日	768	2.92	2.5	AP	A	31	32					10	22	23	24				
19		1月31日	768	2.92	2.5	AP	B	33	34	13	25	26	27								
20		1月31日	768	2.92	2.5	AP	B	35	36					11	25	26	27				
22		1月31日	768	2.92	2.5	ROT	—	39	40	14	28	29	30								
23		1月31日	768	2.92	2.5	ROT	—	41	42					12	28	29	30				
24		1月31日	768	2.92	2.5	ROT	A	43	44	15	31	32	33								
25		1月31日	768	2.92	2.5	ROT	A	45	46					13	31	32	33				
26		1月31日	768	2.92	2.5	ROT	B	47	48	16	34	35	36								
27		2月1日	768	2.94	2.5	ROT	B	49	50					14	34	35	36				
29		2月1日	400	1.53	2.5	AP	—											17	18		
30		2月1日	768	2.94	2.5	ROT	—											19	20		
31		N-100	1月29日	1,200	2.37	2.5	AP	—	53	54	21	37	38	39							
32			1月29日	1,200	2.37	2.5	AP	—	55	56					1	37	38	39			
33	1月29日		1,200	2.37	2.5	AP	A	57	58	22	40	41	42								
34	1月29日		1,200	2.37	2.5	AP	A	59	60					2	40	41	42				
35	1月29日		1,200	2.37	2.5	AP	B	61	62	23	43	44	45								
36	1月29日		1,200	2.37	2.5	AP	B	63	64					3	43	44	45				
38	1月29日		1,200	2.37	2.5	ROT	—	67	68	24	46	47	48								
39	1月29日		1,200	2.37	2.5	ROT	—	69	70					4	46	47	48				
40	1月30日		1,200	2.39	2.5	ROT	A	71	72	25	49	50	51								
41	1月30日		1,200	2.39	2.5	ROT	A	73	74					5	49	50	51				
42	1月30日		1,200	2.39	2.5	ROT	B	75	76	26	52	53	54								
43	1月30日		1,200	2.39	2.5	ROT	B	77	78					6	52	53	54				
45	1月30日		600	1.19	2.5	AP	—											27	28		
46	1月30日		1,200	2.39	2.5	ROT	—											29	30		
47	⁶⁰ Co		1月31日	144	3.24	2.5	AP	—	81	82	31	55	56	57							
48			1月31日	144	3.24	2.5	AP	—	83	84					7	55	56	57			
49		1月31日	144	3.24	2.5	ROT	—	85	86	32	58	59	60								
50		1月31日	144	3.24	2.5	ROT	—	87	88					8	58	59	60				

備考:照射番号 21, 28, 37 及び 44 は, 別研究での照射である。

表 3-4 空気カーマから線量当量への換算係数 (Sv/Gy)

線源	N-100	N-250	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	出典
平均エネルギー (keV)	83.4	207	662	1,250	
H _p (10,0°) _{slab} /K _a	1.88 (1.89 ^a)	1.48 (1.48 ^a)	1.21	1.15	ISO4037-3 ¹³⁾ (吉富 ⁹⁾)
H _p (10,ROT) _{slab} /K _a	0.977	0.868	0.840	0.891	吉富 ⁹⁾
H _p (3,0°) _{slab} /K _a	1.81	1.46	1.22	1.16	Behrens ¹⁴⁾
H _p (0.07,0°) _{slab} /K _a	1.72	1.42	1.21	1.17	ISO4037-3 ¹³⁾
H _p (3,0°) _{cyl} /K _a	1.63	1.36	1.18	1.14	Behrens ¹⁵⁾
H _p (3,ROT) _{cyl} /K _a	0.983	0.917	0.908	0.930	Behrens ¹⁵⁾
H _{lens} (AP)/K _a ^{b)}	1.55 (1.55)	1.31 (1.35)	1.17 (1.16)	1.08 (1.09)	ICRP 116 ⁶⁾ (ICRP 74 ⁸⁾)
H _{lens} (ROT)/K _a ^{b)}	1.02 (1.01)	0.943 (0.991)	0.932 (0.910)	0.927 (0.916)	ICRP 116 ⁶⁾ (ICRP 74 ⁸⁾)

a) 括弧内の値は、単色光子に対する換算係数をX線スペクトルで平均化した値。

b) ICRP Publ 116 の単色光子に対する換算係数をX線の平均エネルギーで内挿(ラグランジュ補間)した値。なお、ICRP Publ 116 では、H_{lens} の単位は Gy であるが、ここでは Sv として扱う。

3.3 研究結果

3.3.1 原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査

(1) 核燃料サイクル工学研究所

(a) MOX 燃料施設

核燃料サイクル研究所(以下、「核サ研」と記す)の MOX 燃料を取り扱う施設(プルトニウム燃料第1～第3 開発室, プルトニウム転換技術開発施設)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の開口部(ポート部)から手を差し込む場合があるため, 手から前腕にかけての末端部が, さらに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。このため, 作業者は被ばく低減対策の一環として胸から大腿部までを覆う鉛エプロンを通常着用する。このような作業形態においては, 鉛エプロン内外の線量に顕著な差が生じ, 体幹部に不均等な被ばくを受けることになるため, 通常の個人線量計取付け位置である鉛エプロン内側の胸腹部に加えて, 外側の頸部(管理区域内作業着の襟)に別の個人線量計を追加し, それらを一対として運用するいわゆる「不均等被ばく管理」が 1989 年の改正放射線防護関係法令の施行後おこなわれることとなった。胸複部の個人線量計は, 松下産業機器株式会社(現在, パナソニック システムソリューションズ ジャパン株式会社)の $\gamma \cdot \beta$ ・中性子用 TLD バッジ, 頸部の個人線量計は, $\gamma \cdot \beta$ 線用 TLD バッジである。水晶体等価線量は, 頸部 TLD バッジから算出した γ 線 $H_p(10)$ と胸腹部 TLD バッジから算出した中性子 $H_p(10)$ の和として算定・記録される。これは, 作業現場の γ 線及び中性子エネルギー範囲では, $H_p(10)$ と $H_p(3)$ の数値に大きな相違がないことが理由である¹。頸部 TLD バッジの配布は, 頸部と胸部の線量当量の比が, 1989～2000 年度は 2 倍以上, 2001 年度以降は 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, 実際には, モニタリング期間中に鉛エプロンを着用する可能性があるかどうかに基づいて頸部 TLD バッジの発行申請がなされる場合が多い。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, 新たな線量計ペアを再配布する。

2002 年度(平成 14 年度)から 2013 年度(平成 25 年度)にかけて, MOX 燃料施設従事者のうち年間を通して上記の不均等被ばく管理が行われた従事者(原子力機構職員及び常駐請負者)について, その人数, 最大実効線量, 最大水晶体等価線量, 水晶体等価線量が 10 mSv/年を超えた者の人数とその割合をとりまとめた結果を表 3-5 に示す¹⁶⁾。また, 図 3-8 に, 鉛エプロン内側胸部の γ 線 $H_p(10)$ と外側頸部の γ 線 $H_p(10)$ を比べたものを示す。高速炉用の MOX 燃料製造作業においては, 水晶体等価線量は高い者でも年 10 mSv のオーダー(最大は平成 20 年度の 18.9 mSv)であり, 年 20 mSv を超えた例はない。鉛エプロン内外の γ 線 1cm 線量当量の比は全体平均で約 2.5(比較的高線量域だけの平均で約 4)である。また, 水晶体等価線量のうち中性子による線量寄与は約 20～30%である。これらの結果は, 過去にとりまとめた結果¹⁷⁻¹⁹⁾と大きく変わらない。

一方, 平成 26 年度以降に本格化した施設廃止措置作業において, 水晶体等価線量が年 20

¹ 1989 年から 2000 年度: 法令告示別表第 4 及び第 5 の換算係数表に基づく。2001 年度以降: $H_p(3)$ の測定は法令で要求されず。

mSvを超えるものが2名(23.3 mSv, 20.7 mSv)いた。この二人は、ある特定の設備の廃止措置作業に年間を通して専従した者であった。

表 3-5 MOX 燃料施設における実効線量及び水晶体等価線量(2002～2013 年度)¹⁶⁾

年度	対象 人数	実効線量 年間最大 (mSv)	水晶体等価線量		
			年間最大 (mSv)	10mSv 超え人数	10mSv 超え割合
2002 (H14)	319	6.5	11.8	3	1%
2003 (H15)	282	6.2	12.6	8	3%
2004 (H16)	281	6.1	15.5	15	5%
2005 (H17)	267	8.0	18.7	20	7%
2006 (H18)	207	5.6	15.5	11	5%
2007 (H19)	232	5.5	13.1	5	2%
2008 (H20)	291	8.5	18.9	36	12%
2009 (H21)	184	9.7	17.0	43	23%
2010 (H22)	193	8.7	17.5	30	16%
2011 (H23)	182	5.4	15.2	19	10%
2012 (H24)	224	4.1	15.0	6	3%
2013 (H25)	181	4.8	15.2	21	12%
合計	2,843	9.7	18.9	217	8%

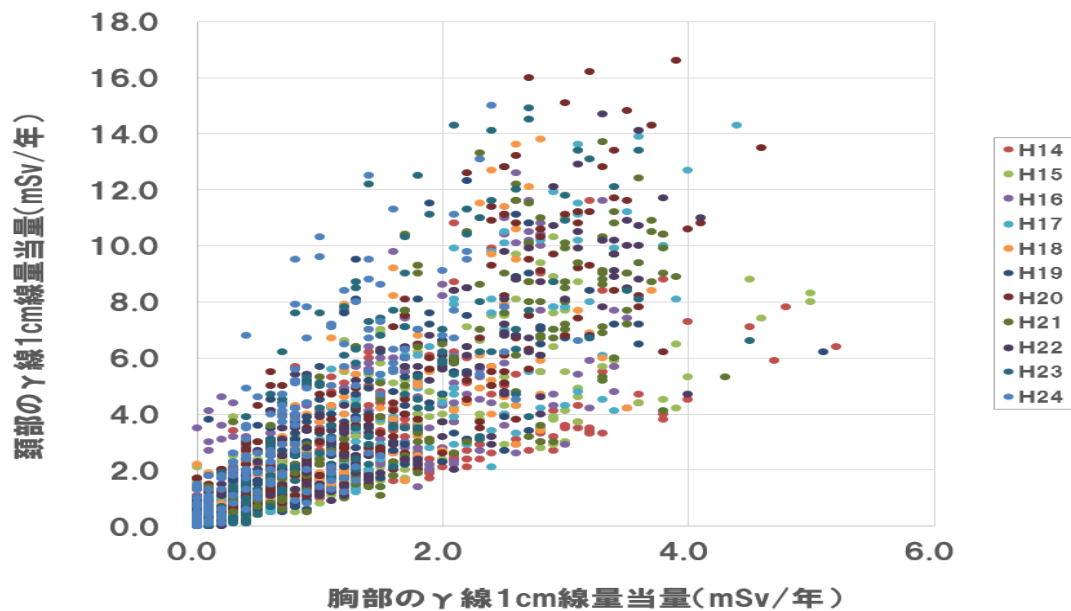


図 3-8 鉛エプロン内側の胸腹部におけるγ線 $H_p(10)$ と外側頸部におけるγ線 $H_p(10)$ の関係

(b) 再処理施設

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。作業者の外部被ばくのほとんどは、定期点検等でセル内の工程機器の保守作業を行う際、特に補修・改修等の大型工事の際に生じる²⁰⁾。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全方位からであり、作業者の身体各部(胸、背中、手及び足首)に個人線量計を取り付けて調べた結果によれば、それぞれの部位間で線量計指示値に極端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。ただし、線源となる工程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に γ 線を不均等に受ける場合が少数ながらある。平成5年の再処理施設計画停止期間中に行われた一部の作業(セル開口部付近の設備の保守作業)は、作業者が上半身だけをセル内に入れて行われたため、頭部が線源に相対的に接近した。このため、胸部 TLD バッジに加えて、頭部(額)にも個人線量計(松下産機 UD-200S)が装着された。このときの胸部の γ 線 $H_p(10)$ と頭部(額)の γ 線 $H_p(10)$ の関係を図 3-9 に示す。両位置での線量の比は平均約 2 であった²¹⁾。

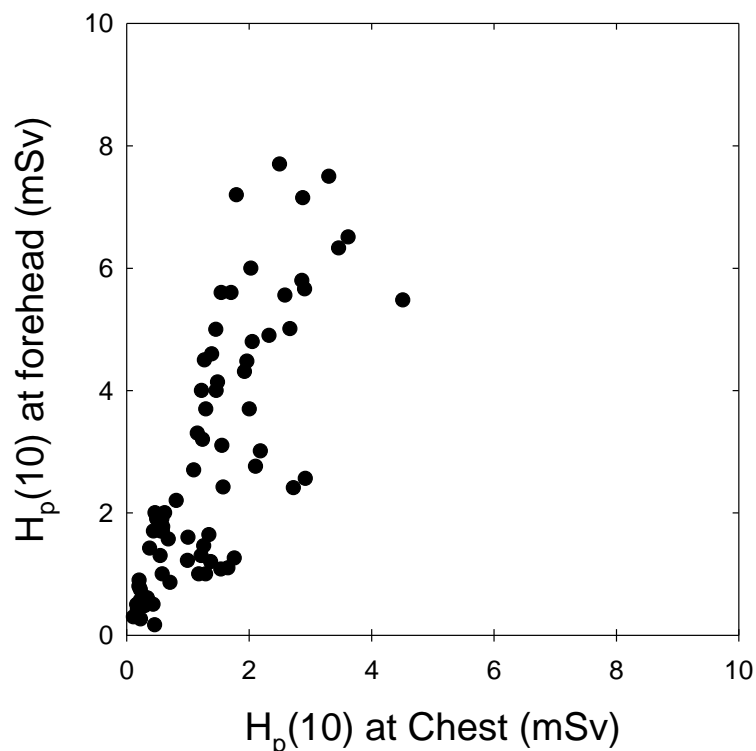


図 3-9 平成5年に再処理施設で行われた不均等被ばく管理事例における胸部の γ 線 $H_p(10)$ と頭部(額)の γ 線 $H_p(10)$ の比較

² UD-200S は、照射線量を測定するよう設計・校正された線量計であるが、当該作業現場では ^{137}Cs ガンマ線が主たる線源であるため、指示を $H_p(10)$ とほぼ同等と見なしてよい。

また、セル内作業においては、 ^{90}Sr - ^{90}Y 等による β 線被ばくも生じる場合がある。ただし、記録レベルを超える有意な β 線皮膚線量 ($H_p(0.07)$) が記録されることは稀で、2001 年度 (平成 13 年度) 以降では、最大で約 5.3 mSv である²²⁾。この程度の β 線 $H_p(0.07)$ であれば、水晶体は、全面マスクによって十分に防護される。別の調査によれば、 ^{90}Sr - ^{90}Y に対して、全面マスク無しでの $H'(0.07)$ 、全面マスク有りでの $H'(0.07)$ 及び全面マスク有りでの $H'(3)$ の関係は、 $1:0.18\sim 0.34:0.03\sim 0.04$ である²³⁻²⁴⁾。

(2) 原子力科学研究所^{12, 25-26)}

図 3-10 に過去 20 年間の原子力科学研究所 (以下、「原科研」と記す) における水晶体等価線量の年間最大線量を示す。最大被ばく者は、ホット試験施設 (燃料試験施設、廃棄物安全試験施設、ホットラボ) においてホットセル内の除染や機器の点検作業に従事した者がそのほとんどを占めるが、一部は、高速炉臨界実験装置 (FCA) で炉心装荷変更作業に従事した者である。年間線量はしばしば 20 mSv を超過しているが、これは、胸部に装着した個人線量計により得られた $H_p(0.07)$ をそのまま水晶体等価線量とする保守的な評価となっているためである。ホットセル内は、使用済燃料を取り扱うため多種多様な核分裂生成物によって汚染されており、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{241}Am 等からの γ 線放出核種だけでなく、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ や比較的半減期の短い $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ 、 $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$ 等の強透過性 β 線放出核種も混在する。こうした β 線と γ 線の混在条件では、 $H_p(3)$ は $H_p(0.07)$ と比較して必ず低くなる。さらに、実際の作業時には、エアラインスーツ、自給式加圧服、全面マスク等を着用するため、その窓部分による β 線遮蔽効果により水晶体等価線量はさらに低減される。現在、燃料試験施設におけるセル内作業員に対する全面マスク内外の線量計による低減率の調査が進められている。また、 γ 線被ばくだけに着目すると、燃料試験施設におけるセル内作業員に対して眼部及び胸部に線量計を装着した結果によれば、眼 $H_p(3)$ /胸 $H_p(10) = 0.90 \pm 0.13$ であり、ほぼ均等な被ばく状況であった。また、セル外ではあるが、高線量の物品等を取り扱う作業において、作業エリアにファントムを設置し水晶体/体幹部線量比を測定した研究によれば、比は、 0.67 ± 0.05 、 0.42 ± 0.04 と何れも水晶体の線量が体幹部線量を超えることはない結果が得られた。廃棄物安全試験施設におけるセル内作業において TLD を用いて頭部、胸部及び腹部の $H_p(10)$ を測定した事例によれば、作業単位によらず頭部は胸部や腹部に比べ同等もしくは低い値であった。

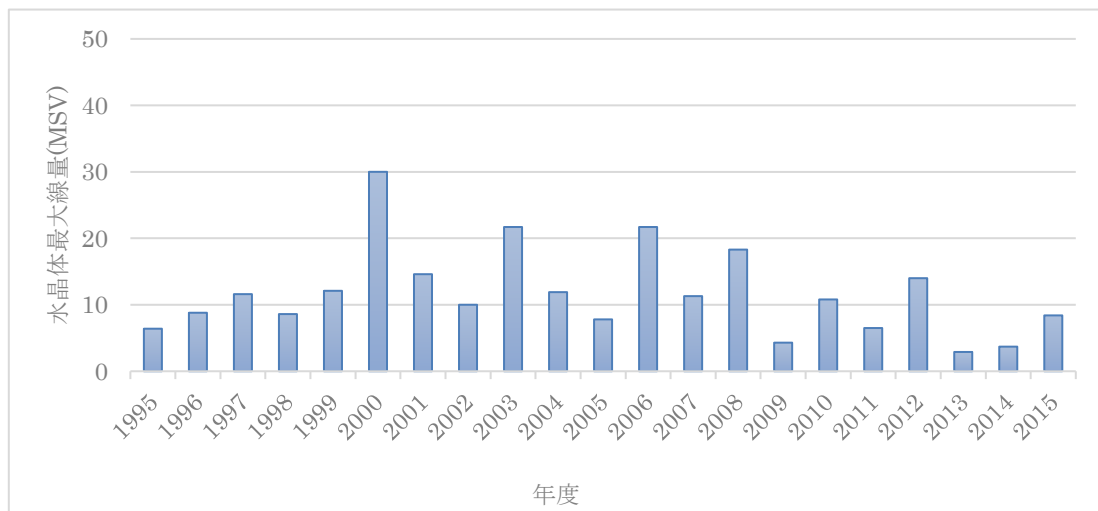


図 3-10 原科研における最大水晶体等価線量

一方、主に防護エプロン等の着用によって体幹部が部分的に防護される場合、実効線量(当量)評価のため頸部に不均等線量計が装着される。2000～2016年に体幹部不均等被ばく管理がなされた作業員(延べ406人)を追跡調査し、水晶体に不均等被ばくを受ける作業状況を抽出した。これらの作業員は、高速炉臨界実験装置(FCA)、再処理研究施設及び廃棄物処理施設の3施設の何れかで作業に従事していた。胸部の γ 線 $H_p(10)$ で0.5 mSv以上の者については、再処理研究施設及び廃棄物処理施設では頸部 $H_p(10)$ /胸部 $H_p(10)$ は1.3以下であるが、FCAでは最大3程度であった。後者の作業では、水晶体線量管理の観点からも頸部モニタリングが必要である。

3.3.2 作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験

東電1Fにおいて、平成29年11～12月に実施された第一回測定実験の結果を以下にとりまとめる。平成30年3月に行われた第二回測定実験についてはその概略だけを記す。

(1) γ 線スペクトル

図3-11にガンマ線スペクトルの測定位置を示す。測定は、 γ 線による高線量作業場である①1号機原子炉建屋大物搬入口付近(建屋入口へのアクセス、立方体ファントム設置場所)と②2号機原子炉建屋南西側作業スペース(作業員モニタリング実施作業場所)で行われた。

2種類の γ 線スペクトロメータを使用した。CdZnTe検出器による測定結果は、不感時間及びパイルアップの影響が懸念されたため、LaBr₃(Ce)検出器による測定結果を解析に用いた。図3-12に、解析によって得られた γ 線スペクトルを示す。¹³⁷Cs(662 keV)及び¹³⁴Cs(563, 569, 605, 796, 802 keV)の直接線に起因するピークとそれらの散乱線からなる光子フルエンススペクトルを得た。600～800 keVの直接線と100 keV近傍の低エネルギー散乱線の大小関係が、周囲の線量低減対策がほとんどなされていない①と、積極的に行われた②で逆転している。

今回の実験ではコリメータ未使用のため、測定されたスペクトルは全方位から入射した成分であるが、ここでは、 γ 線の入射方向をAP、ROT及びISOと仮定し、スペクトルにそれぞれの照射条件での換算係数を作用させることで算出した水晶体等価線量と実用量(円柱ファントムでの $H_p(3)$ 及び平板ファントムでの $H_p(10)$)を表3-6に示す。水晶体等価線量は円柱ファントムでの $H_p(3)$ にほぼ等しい。なお、AP条件での $H_p(10)$ は、周辺線量当量 $H^*(10)$ とほぼ等価である。

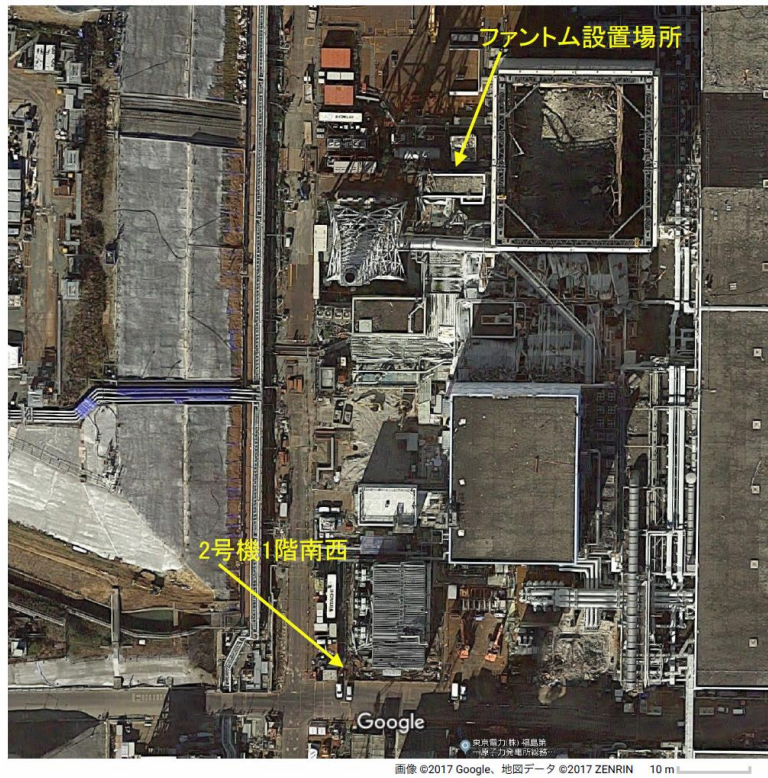


図 3-11 γ 線スペクトル測定箇所

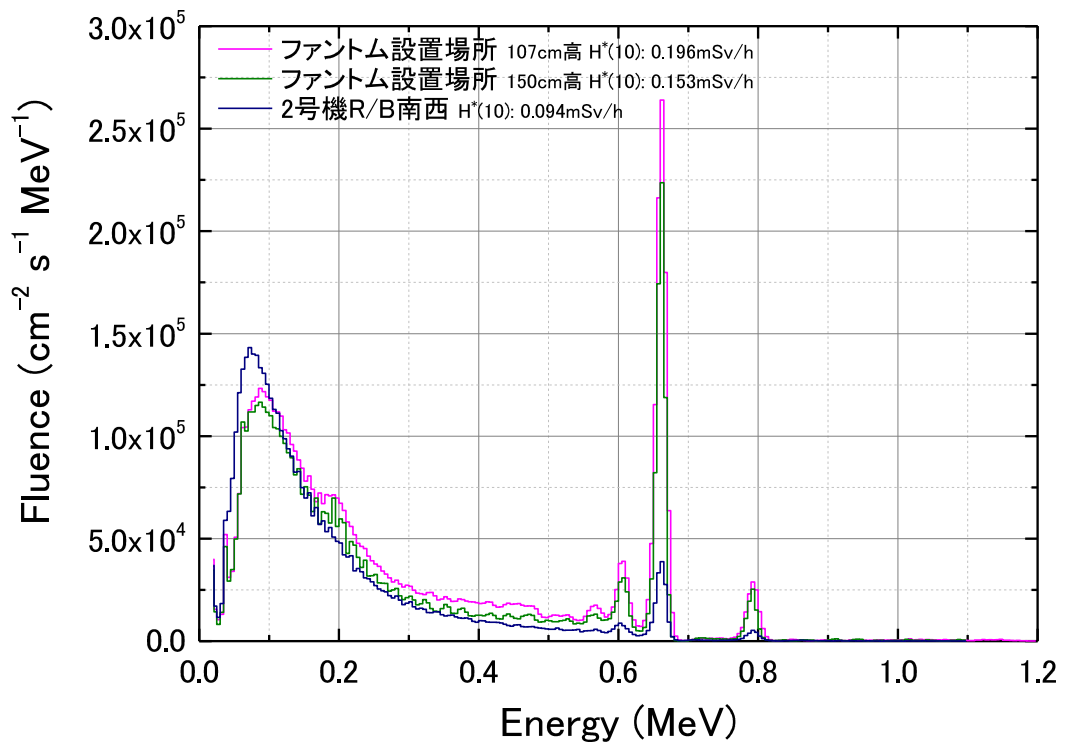


図 3-12 測定された γ 線スペクトル

表 3-6 入射方向を AP, ROT 及び ISO と仮定した場合における,
ガンマ線スペクトルに基づき評価した水晶体等価線量, 円柱ファントムでの $H_p(3)$ 及び平板ファントムでの $H_p(10)$ の比較 (単位: mSv/h)

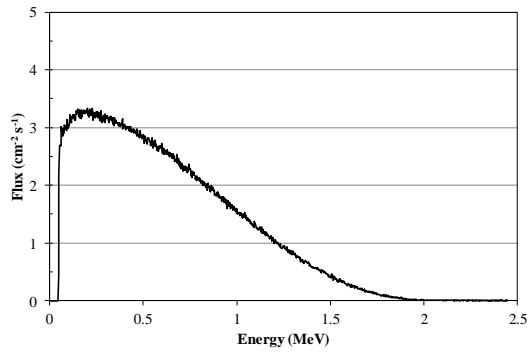
入射方向 測定位置	AP			ROT			ISO	
	H_{lens}	$H_p(3)$	$H_p(10)$	H_{lens}	$H_p(3)$	$H_p(10)$	H_{lens}	$H_p(10)$
ファントム設置場所 (107 cm 高)	0.189	0.192	0.203	0.144	0.139	0.131	0.130	0.120
ファントム設置場所 (150 cm 高)	0.146	0.150	0.159	0.111	0.107	0.101	0.0996	0.0925
2号機 R/B 南西 (107 cm 高)	0.0890	0.0919	0.0990	0.0646	0.0626	0.0594	0.0567	0.0535

(2) β 線スペクトル

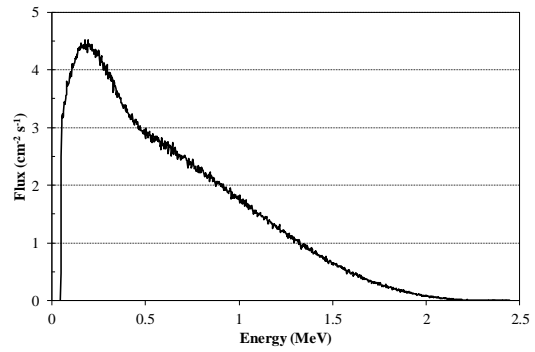
解体されたタンク片の表面及び ^{90}Sr を含む汚染水に浸した紙をジップロックに封じて作成した線源 (以下, 「汚染水線源」と記す) 表面の β 線スペクトルを測定した。観測された β 線スペクトルを, 測定条件とともに, 図 3-13 に示す。なお, 今回の測定条件では, γ 線によるパルス波高スペクトルへの寄与はほとんどなかった。いずれの β 線スペクトルも最大エネルギーは約 2 MeV であり, ^{90}Y の β 線による。親核種である ^{90}Sr (最大エネルギー 546 keV) のスペクトルは, 測定対象物への接近の程度によって観測されない場合もあった。

表 3-7 に, 測定された β 線スペクトルに基づき, 面平行入射を仮定して算出した線量当量率 ($H'(3)$ 及び $H'(0.07)$) と, 電離箱式サーベイメータ AE-133B で測定した線量当量率の比較を示す。測定した位置が完全に同一ではない点を考慮すれば, 両検出器による線量当量率はおおむね一致した。 $H'(3)/H'(0.07)$ は, 切断されたタンク片で 1/5~1/7, 汚染水線源で 1/3~1/4 であった。これは, 後者の β 線スペクトルの方が硬いことを示唆する。

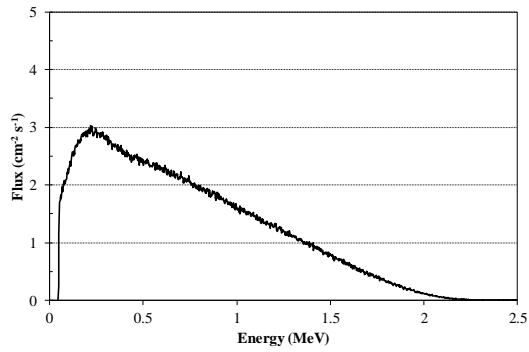
汚染水線源を用いて, 全面マスク有り無しによる線量当量率の変化の程度を調べた結果を表 3-8 に示す。ここでは, 汚染水線源との距離を固定した状態で, β 線スペクトロメータの前面に 2 種類のマスクを設置した。全面マスク無しでの $H'(0.07)$ を 1 とすると, 全面マスク無しでの $H'(3)$ は 0.31, 全面マスク有りでの $H'(0.07)$ は 0.21~0.22, 全面マスク有りでの $H'(3)$ は 0.044~0.047 であった。



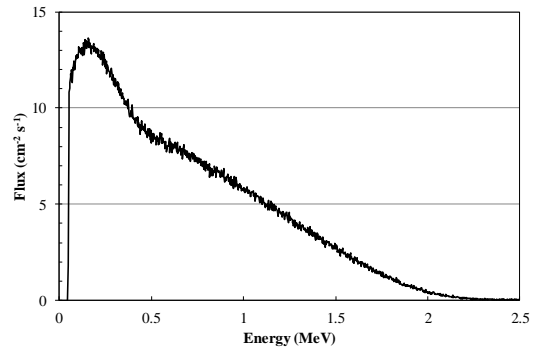
定検資材倉庫
 切断された汚染水タンク(シャッター側に仮置き)
 切断面から約 10 cm



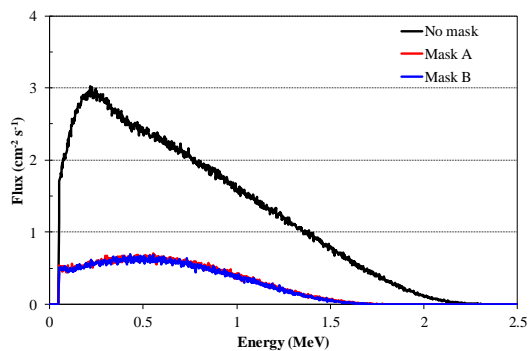
定検資材倉庫
 切断された汚染水タンク(倉庫中央寄りに仮置き)
 切断面から約 10 cm



分析棟
 汚染水線源(ジップロックに封入)
 線源表面から約 30 cm



分析棟
 汚染水線源(ジップロックに封入)
 線源表面から約 5 cm



分析棟
 汚染水線源(ジップロックに封入)
 線源表面から約 30cm
 マスク A, B をスペクトロメータ前面に設置

図 3-13 測定された β 線スペクトル

表 3-7 電離箱式サーベイメータ AE-133B と β 線スペクトロメータによる線量当量率の比較

測定場所	線量当量 ^{a)}	AE-133B M_A (mSv/h)	β 線スペクトロメータ M_B (mSv/h)	(M_B/M_A-1) $\times 100$ (%)
タンク断面 1	H'(0.07)	3	2.33	-22
	H'(3)	0.5	0.467	-7
	H'(10)	0.004	0.000	
タンク断面 2	H'(0.07)	3	2.84	-5
	H'(3)	0.4	0.624	+56
	H'(10)		0.000	
汚染水線源	H'(0.07)	3	2.10	-30
	H'(3)	0.7	0.652	-7
	H'(10)		0.000	

a) β 線については、方向性線量当量 $H'(d)$ = 個人線量当量 $H_p(d)$ として管理が行われている。(ICRP Publ. 74 の β 線 $H'(d)$ の換算係数は平板ファントムで計算された値であり、ここでは、球と平板の曲率の違いは無視されている。)

表 3-8 β 線に対する全面マスクの遮へい効果

	H'(0.07)		H'(3)		
	(mSv/h)	マスク無しに 対する比	(mSv/h)	マスク無しに 対する比	マスク無しでの H'(0.07)に対する 比
マスク無し	2.10	1.00	0.652	1.00	0.31
マスクA	0.46	0.22	0.098	0.15	0.047
マスクB	0.44	0.21	0.092	0.14	0.044

(3) ファントム実験

(a) 立方体ファントム

1号機大物搬入口付近の γ 線スペクトル測定地点(①)で行った立方体ファントムでの線量計測定結果を下表に示す。本実験は、第一回測定では、 γ 線スペクトロメータ用コリメータがまだ調達できていなかったため、スペクトロメータに対して入射する γ 線の向きを知ることを主たる目的に行われた。

ファントム設置時間は約4時間、地表からファントム中心までの高さは約 1 m である。当該場所は、代表的な作業場所ではなく、周囲の除染等線量低減対策がほとんどなされていない。そのため、立方体ファントムの下側、すなわち地面に向いた側で最大の指示値が観測された。

表 3-9 立方体ファントム表面(6面)に取り付けた電子式個人線量計の γ 線 $H_p(10)$ 指示値 (mSv)

側面・山側に 向かって左	側面・山側 (図 3-11 左)	側面・山側に 向かって右	側面・山側の 反対 (図 3-11 右)	上面	下面
0.488	0.627	0.851	0.806	0.364	1.186

γ 線スペクトル測定地点①において、電離箱式サーベイメータ AE-133B で測定した線量当量率を以下に記す。このとき、 γ 線スペクトロメータと同様にサーベイメータの入射窓を「山」側に向けた。地表近くの測定では下向きとした。

	高さ 1.5 m	高さ 1.0 m	地表近く
$H'(10)$	100 μ Sv/h		
$H'(3)$	100 μ Sv/h	150 μ Sv/h	400 μ Sv/h

また、 γ 線スペクトル測定地点②では、

	高さ 1.5 m	高さ 1.0 m
$H'(10)$	80 μ Sv/h	75 μ Sv/h
$H'(3)$	同上	同上

(b) 簡易人体形状ファントム

平成 30 年 3 月 7～9 日に簡易人体形状ファントムのフィールド照射実験を実施した。ここでは、ファントムの頭部に、DOSIRIS, Vision, GB 及び OSLEYED を、胴体部に、ZP-1461 及び GB を取り付けた。現在、これら個人線量計の測定を実施中である。

本報告書の作成時点(平成 30 年 3 月 16 日)までに得られたデータを下表に示す。残りの結果は、次年度報告書にとりまとめる。

表 3-10 簡易人体形状ファントムの胴体部に取り付けた電子式個人線量計(ZP-1461)の γ 線 $H_p(10)$ 指示値 (mSv)

日時	実施場所	静止		回転	
		前面	背面	前面	背面
3 月 8 日	2～3号機原子炉 建屋間の道路わき	1.05	0.57	0.92	0.89
3 月 9 日	3号機原子炉建屋 東側	0.17	0.14	0.16	0.15

3.3.3 人体形状ファントムを用いる模擬照射実験

表 3-11 に個人線量計の指示値を示す。ここで、それぞれの個人線量計の校正条件は以下のとおりである。

UD-807: 読み取り装置は、 ^{137}Cs γ 線を自由空气中で 100 mR 照射した TLD を測定したとき 1 mSv と表示するよう校正されている(通常は、用途または必要に応じてオンファントムでの値にさらに換算される)。なお、ここで使用した線量計は実験用のもので、相対感度が約 5%高い。

GB: 水平板ファントムで校正。 $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ 及び $H_p(3)$ がそれぞれ報告されたが、それらの値に違いがほとんど見られなかったため、ここでは $H_p(10)$ を値のみを記す。

DOSIRIS: 水円柱ファントムで $H_p(3)_{\text{cyl}}$ に対して校正。 ^{137}Cs γ 線で校正した場合とX線(N-100)で校正した場合の二つの値が報告されたが、ここでは、前者(^{137}Cs γ 線校正)の値のみを記す。

Vision: 水平板ファントムで $H_p(3)_{\text{slab}}$ に対して校正(^{137}Cs γ 線)。

OSLEYED: 水円柱ファントムで $H_p(3)_{\text{cyl}}$ に対して校正(^{137}Cs γ 線)。

これら線量計について報告された値を空気カーマ当たりの平均値に換算した結果を表 3-12 に示す。また、これらを線質別に比較したものを、図 3-14(^{137}Cs)、図 3-15(X 線 N-250)及び図 3-16(X 線 N-100)に示す。図中の黒バーは、ICRP Publ. 116 の空気カーマ当たりの水晶体等価線量である。全面マスクによる γ 線の遮へい効果はほとんど見られないことから(詳細は考察で述べる)、ここでは、水晶体等価線量を個人線量計による値との比較基準とし、その $\pm 20\%$ 内の範囲をグレーの網掛けで表す。それぞれの個人線量計の平均値(ファントムに複数個の線量計を取り付けた場合は、その指示値のばらつき(1σ)と共に)も同様に棒グラフで示す。また、図中の実線、点線及び破線は、空気カーマからそれぞれ $H_p(10)_{\text{slab}}$ 、 $H_p(3)_{\text{slab}}$ 及び $H_p(3)_{\text{cyl}}$ への換算係数である。水晶体等価線量は $H_p(3)_{\text{cyl}}$ にほぼ等しい。

RANDO ファントム頭部表面に取り付けた個人線量計のうち、DOSIRIS、Vision 及び GB は、いずれの照射条件(入射方向、マスクの有無)についても、ここで比較基準とする水晶体等価線量の $\pm 20\%$ 以内の値を示した。特に、組織等価物質である LiF 熱ルミネセンス線量計に基づく DOSIRIS と Vision は、良好なパフォーマンスを示した。OSLEYED については、X 線 N-100 の ROT 照射条件でやや過大な値(約 30%)を示したが、これは現在のエネルギー補償フィルタが表側と身体側とで対称ではないためである。前額に取り付けた GB については、低エネルギー γ 線に対して、 $\pm 20\%$ 以内であるが、やや低めの値を示す傾向が見られた。一方、水平板ファントムに取り付けた同じ GB では、このような傾向は(実線で示した $H_p(10)_{\text{slab}}$ と比べて)あまり顕著ではない。この違いは、平板ファントムから期待される γ 線の後方散乱を基礎として GB の線量算定アルゴリズムが構築されている一方で、頭部ファントムでは後方散乱が少ないためではないかと考えられる。水平板ファントムに取り付けた GB については、 $H_p(10)_{\text{slab}}$ をほぼ再現する結果を示した。その値は、 γ 線エネルギー及び入射方向に関係なく、水晶体等価線量の $\pm 20\%$ 以内の値と示すことが確認された。頭部に付けた GB との比較については、3.4.3 で述べる。

表 3-11 校正室でのファントム実験で得られた個人線量計の指示値

照射 #	線源	空気 カーマ (mGy)	ジオメトリ	マスク	RANDO頭部ファントム										水スラブファ ントム GB			
					水晶体		ファントム表面											
					UD-807	GB	Dosiris		OSLEYED	Vision								
1	¹³⁷ Cs	3.09	AP	—	3.83	3.94	3.64	3.33	3.66	3.42								
2		3.09	AP	—	3.84	3.71					3.71	3.2	3.2	3.1				
3		3.09	AP	A	4.26	3.98	3.64	3.46	3.47	3.43								
4		3.09	AP	A	4.04	4.07					3.75	3.1	3.2	3.3				
5		3.09	AP	B	4.19	3.90	3.65	3.39	3.53	3.42								
6		3.09	AP	B	3.73	3.99					3.58	3.0	3.1	3.0				
7		3.09	ROT	—	3.05	2.94	2.83	2.84	2.67	3.03								
8		3.09	ROT	—	2.99	3.16					2.89	2.7	2.5	2.7				
9		3.09	ROT	A	3.27	2.90	2.94	2.82	2.89	2.79								
10		3.09	ROT	A	3.20	3.08					2.82	2.6	2.4	2.6				
11		3.09	ROT	B	3.15	3.11	2.82	2.82	2.91	3.04								
12		3.09	ROT	B	3.30	3.11					2.89	2.6	2.7	2.5				
13		3.09	AP	—											3.77	3.77		
14		3.09	ROT	—											2.67	2.69		
15	N-250	3.01	AP	—	4.02	3.74	3.63	3.92	3.92	3.89								
16		2.92	AP	—	3.87	3.61					3.75	3.5	3.6	3.5				
17		2.92	AP	A	4.19	4.14	3.70	3.85	4.14	3.90								
18		2.92	AP	A	4.03	3.82					3.97	3.5	3.7	3.6				
19		2.92	AP	B	3.80	3.86	3.57	4.04	4.26	3.80								
20		2.92	AP	B	3.64	3.75					4.18	3.6	3.6	3.6				
22		2.92	ROT	—	2.78	2.80	2.49	3.19	3.01	3.13								
23		2.92	ROT	—	2.86	2.60					3.02	2.7	2.7	2.6				
24		2.92	ROT	A	2.76	2.78	2.46	3.14	2.91	3.06								
25		2.92	ROT	A	2.80	2.56					2.98	2.8	2.6	2.7				
26		2.92	ROT	B	2.80	2.69	2.34	2.94	2.94	2.97								
27		2.94	ROT	B	2.55	2.65					2.97	2.6	2.6	2.7				
29		1.53	AP	—											2.03	2.04		
30		2.94	ROT	—											2.31	2.32		
31		N-100	2.37	AP	—	2.76	3.02	3.34	3.74	3.91	3.69							
32			2.37	AP	—	2.89	2.85					3.60	3.4	3.5	3.5			
33	2.37		AP	A	3.12	2.89	3.34	3.83	4.02	3.85								
34	2.37		AP	A	2.58	3.16					3.48	3.3	3.5	3.3				
35	2.37		AP	B	3.24	3.10	3.21	3.82	3.95	3.81								
36	2.37		AP	B	3.07	2.92					3.42	3.3	3.4	3.4				
38	2.37		ROT	—	2.04	1.78	2.08	2.75	2.66	2.68								
39	2.37		ROT	—	2.20	1.91					3.29	2.4	2.3	2.4				
40	2.39		ROT	A	2.02	1.85	2.02	2.84	2.77	2.74								
41	2.39		ROT	A	1.85	1.93					3.32	2.7	2.4	2.4				
42	2.39		ROT	B	1.87	2.20	1.94	2.87	2.67	2.88								
43	2.39		ROT	B	2.04	2.00					3.53	2.4	2.1	2.6				
45	1.19		AP	—											2.07	2.15		
46	2.39		ROT	—											2.18	2.25		
47	⁶⁰ Co	3.24	AP	—	3.93	3.68	3.30	3.56	3.53	3.72								
48		3.24	AP	—	3.99	3.95					3.44	3.1	3.1	3.0				
49		3.24	ROT	—	3.50	3.31	3.10	3.03	2.99	3.17								
50		3.24	ROT	—	3.35	3.14					3.19	2.7	2.5	2.6				

表 3-12 校正室でのファントム実験で得られた個人線量計の空気カーマ当たりの平均指示値

照射 #	線源	ジオメトリ	マスク	空気カーマ当たり指示値																
				UD-807 (normalized)						GB			Dosiris			OSLEYED		Vision		
				平均	±	%	平均	±	%	平均	±	%	平均	±	%	平均	±	%		
1,2	¹³⁷ Cs	AP	—	<u>1.17</u>	0.03	2%	<u>1.17</u>	0.03	2%	1.18			1.12	0.06	5%	1.20	1.02	0.02	2%	
3,4		AP	A	1.25	0.04	3%	1.25	0.04	3%	1.18			1.12	0.01	1%	1.21	1.04	0.03	3%	
5,6		AP	B	1.21	0.06	5%	1.21	0.06	5%	1.18			1.12	0.02	2%	1.16	0.98	0.02	2%	
7,8		ROT	—	0.93	0.03	3%	0.93	0.03	3%	0.92			0.92	0.06	6%	0.94	0.85	0.04	4%	
9,10		ROT	A	0.95	0.05	5%	0.95	0.05	5%	0.95			0.92	0.02	2%	0.91	0.82	0.04	5%	
11,12		ROT	B	0.97	0.03	3%	0.97	0.03	3%	0.91			0.95	0.04	4%	0.94	0.84	0.03	4%	
13		Slab, AP	—							1.22	0.00	0%								
14		Slab, ROT	—							0.87	0.00	1%								
15,16	N-250	AP	—	1.21	0.05	4%	<u>1.31</u>	0.05	4%	1.21			1.30	0.01	0%	1.28	1.21	0.02	2%	
17,18		AP	A	1.31	0.05	4%	1.41	0.06	4%	1.27			1.36	0.05	4%	1.36	1.23	0.03	3%	
19,20		AP	B	1.22	0.03	2%	1.32	0.03	2%	1.22			1.38	0.08	6%	1.43	1.23	0.00	0%	
22,23		ROT	—	0.89	0.04	4%	0.97	0.04	4%	0.85			1.06	0.03	3%	1.03	0.91	0.02	2%	
24,25		ROT	A	0.88	0.04	4%	0.95	0.04	4%	0.84			1.04	0.04	4%	1.02	0.92	0.03	4%	
26,27		ROT	B	0.86	0.04	4%	0.93	0.04	4%	0.80			1.01	0.01	1%	1.01	0.89	0.02	2%	
29		Slab, AP	—							1.33	0.00	0%								
30		Slab, ROT	—							0.79	0.00	0%								
31,32	N-100	AP	—	1.15	0.04	4%	<u>1.55</u>	0.06	4%	1.41			1.59	0.05	3%	1.52	1.46	0.02	2%	
33,34		AP	A	1.17	0.11	9%	1.58	0.14	9%	1.41			1.64	0.04	3%	1.47	1.42	0.05	3%	
35,36		AP	B	1.23	0.05	4%	1.66	0.07	4%	1.35			1.63	0.03	2%	1.44	1.42	0.02	2%	
38,39		ROT	—	0.79	0.07	9%	1.07	0.10	9%	0.88			1.14	0.02	2%	1.39	1.00	0.02	2%	
40,41		ROT	A	0.76	0.03	4%	1.02	0.04	4%	0.85			1.17	0.02	2%	1.39	1.05	0.07	7%	
42,43		ROT	B	0.80	0.05	7%	1.09	0.07	7%	0.81			1.18	0.05	4%	1.48	0.99	0.11	11%	
45		Slab, AP	—							1.77	0.05	3%								
46		Slab, ROT	—							0.93	0.02	2%								
47,48	⁶⁰ Co	AP	—	1.13	0.04	4%	<u>1.08</u>	0.04	4%	1.02			1.11	0.03	3%	1.06	0.95	0.02	2%	
49,50		ROT	—	0.97	0.04	4%	0.92	0.04	4%	0.96			0.95	0.03	3%	0.99	0.80	0.03	4%	

備考:UD-807については、マスク無し、AP条件での水晶体等価線量に指示値を規格化した。規格化点(第5列:¹³⁷Cs, 第8列:線源毎)を下線付きで示す。

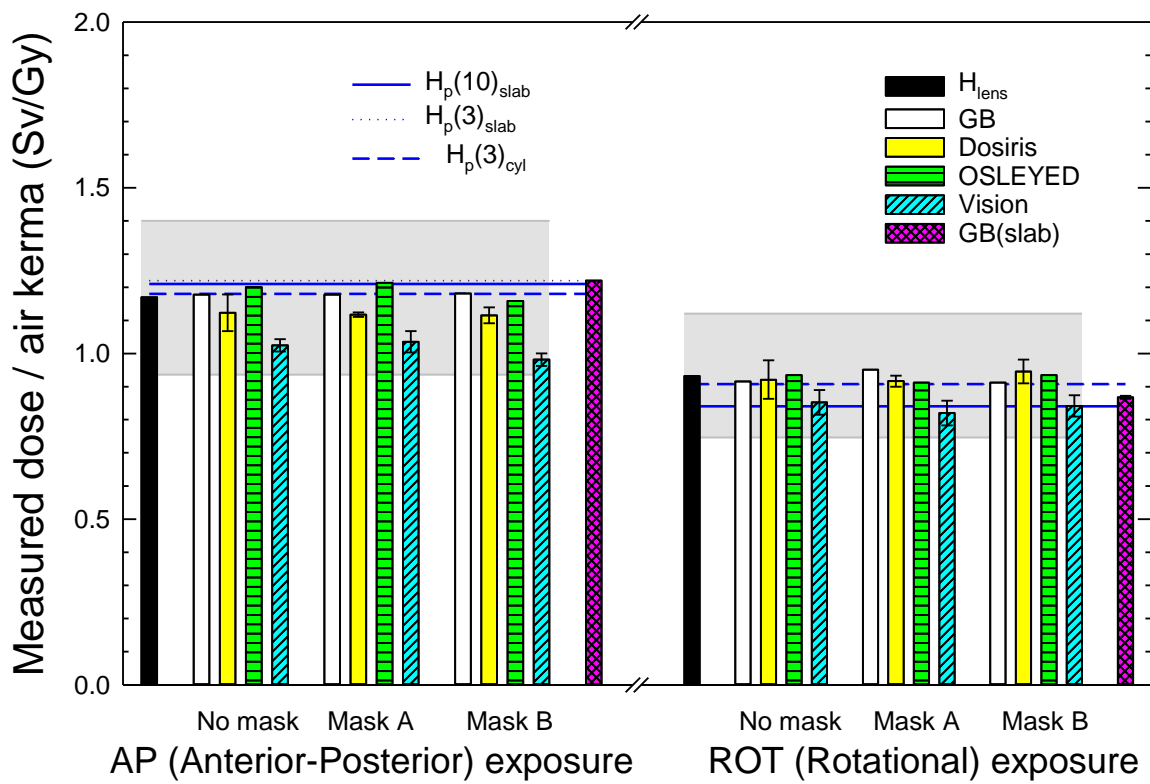


図 3-14 空気カーマ当たりの水晶体等価線量及びそれぞれの個人線量計の指示値 (^{137}Cs)
 図中の黒バーは、ICRP Publ 116 の水晶体等価線量であり、網掛けはその±20%の範囲を表す。

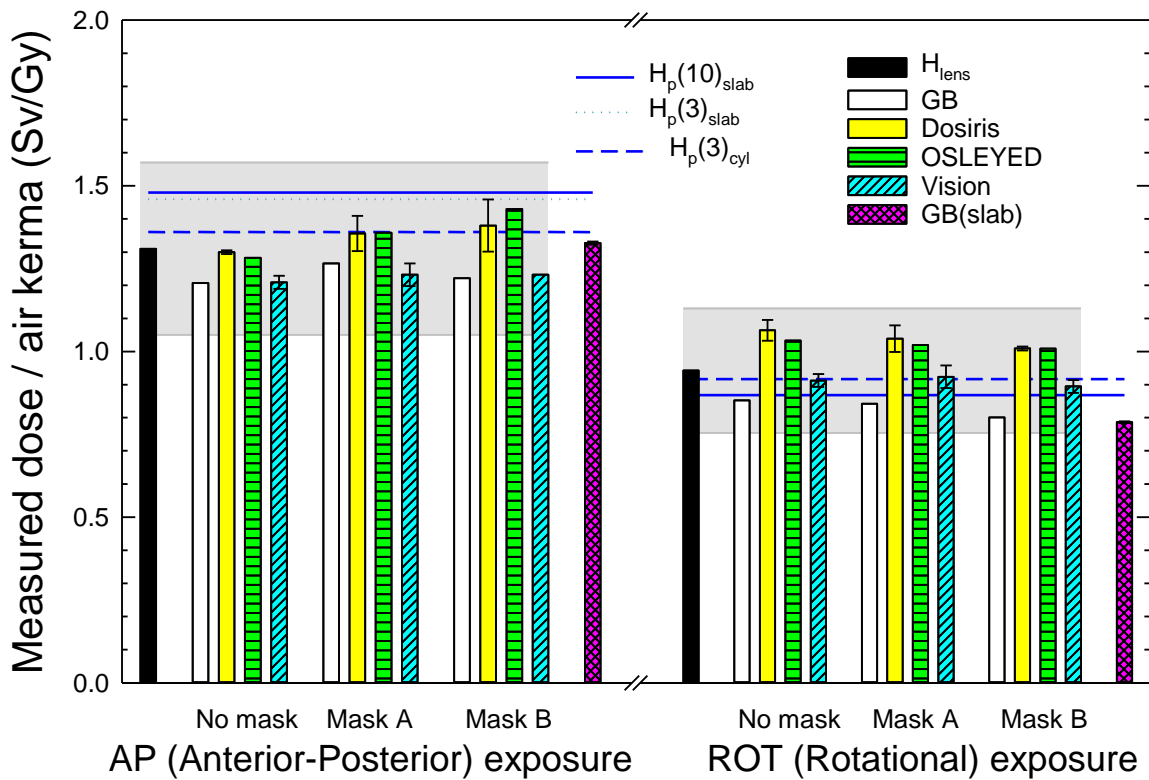


図 3-15 空気カーマ当たりの水晶体等価線量及びそれぞれの個人線量計の指示値 (N-250)

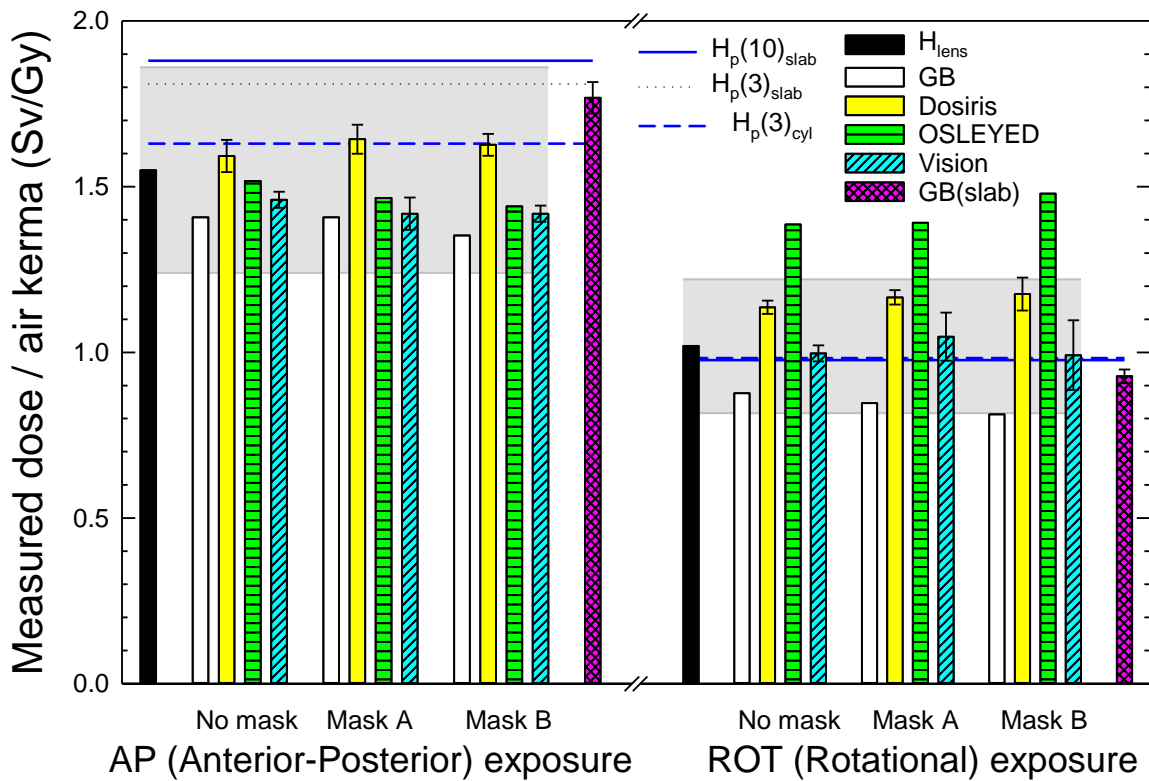


図 3-16 空気カーマ当たりの水晶体等価線量及びそれぞれの個人線量計の指示値 (N-100)

3.4 考察

3.4.1 原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査

(1) 現状調査

原子力機構の代表的な研究施設において水晶体に高線量の被ばくまたは不均等な被ばくを受ける作業は、高線量率下でのセル内作業と鉛エプロン等防護衣を着用する作業に限られる。

前者の高線量率下でのセル内作業のうち、 γ 線による被ばくについては、おおむね全身均等被ばくであるが、一部の特殊な姿勢での作業に備えて、頭部に取り付ける個人線量計を用意しておくことが望ましい。一方、 β 線と γ 線の混在場については、防護装備による遮へい効果を見込まない場合、水晶体等価線量を過大に評価・記録する場合があるので、その評価方法に工夫が必要である。全面マスクについては放射線の透過率を実験的に得る試みが進められている。

鉛エプロン等防護衣を着用する作業では、頸部に取り付ける個人線量計の指示値をもとに水晶体等価線量の算定が行われている。新たな線量限度(20 mSv/年)を超える事例は少数であるので、その限度に対応する適切な管理レベル(administration level)をそれぞれの施設の放射線管理マニュアル等に導入することによって、たとえば年 15 mSv を超えないように水晶体等価線量を管理できると考えられる。核サ研 MOX 燃料施設の廃止措置作業で 20 mSv/年を超える者が平成 26 年度に 2 名生じたが、現在は、関連作業に従事する人員のローテーション化が進み、特定の人員に作業が偏らないような措置がとられている。これらのことから、線量限度が年 20 mSv に下がる場合でも、鉛エプロン外側の頸部につける個人線量計から水晶体等価線量を算定するという現在の方法論を、大きく変える必要はないと思われる。ただし、個人線量計を取り付ける頸部と眼の位置の間での線量率勾配について、必要に応じて補正するなどの対応が必要になるかもしれない。核サ研 MOX 燃料施設のグローブボックス付近で行われたファントム実験の結果によれば、眼近傍での $H_p(3)$ は頸部の $H_p(10)$ と同程度であると報告されている²⁷⁻²⁸⁾。本実験は現在継続中である。

(2) 課題

現在の水晶体等価線量の算定の考え方の背景には、その測定が厳密な意味で必ずしも正確ではなくとも、年限度 150 mSv を超えないことさえ確認できればよいという管理上の割り切りがある。しかしながら、水晶体の線量限度の引き下げは、必然的に、その測定に対する正確さ要求を増すことを意味する。眼の近傍に $H_p(3)$ を直接的に測定することができるよう設計された個人線量計を利用する方法は、現時点でも最も正確な水晶体等価線量の算定手段と考えられるが、そうした方法をとるべき場合と、従来からの方法(例えば、頸部に着けた個人線量計による $H_p(10)$ から水晶体等価線量を算定する)でも十分な場合との適切な使い分けの考え方を整理していく必要があると考えられる。

3.4.2 作業現場における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験

(1) γ 線スペクトル測定

東電 1F で測定された γ 線スペクトルによると、全線量率に占める散乱線(0.5 MeV 以下の成分とした)の寄与の割合は、測定点①で 40~50% に対し、測定点②では 70% 以上であった。後者は、周囲の線量低減対策が進んでいるため、低エネルギー散乱成分の寄与が大きい。これは、代表的な作業現場の多くで共通の特徴と考えられる。

表 3-6 に、ガンマ線スペクトルに基づき算出した水晶体等価線量 H_{lens} 、円柱ファントムでの $H_p(3)$ 及び平板ファントムでの $H_p(10)$ の比較を示した。ただし、この計算で使用した ROT 条件での $H_p(3)$ 及び $H_p(10)$ の換算係数は、ICRP 等に与えられたものではなく、その本来の定義を拡張したものであるため、ここでは、AP 条件と ROT 条件とで、それぞれの線量(さらに、それを測定する個人線量計の指示)がどのように変化するか傾向を表す情報と考えるとよい。

表 3-4 に示した、単色(相当)エネルギーにおける換算係数間の直接比較から予想されるように、円柱ファントムでの $H_p(3)$ は、 γ 線の入射方向によらず、 H_{lens} にほぼ等しい。 $H_p(3)$ と H_{lens} の間で、計算形状の違いに起因するわずかな相違が見られるが、円柱ファントムが、 $H_p(3)$ を定義するにあたっての単純性や校正目的での利便性を備えている点を考慮すれば、これら数値の違いは些細であり、すなわち $H_p(3)$ と H_{lens} は等価であると解釈すべきである。したがって、東電 1F の作業現場では、実用量 $H_p(3)$ を測定(あるいは算定)する個人線量計は、 H_{lens} のモニタリングに適切である。

次に、平板ファントムでの $H_p(10)$ との比較であるが、AP 照射の場合、 $H_p(10) > H_{lens}$ であるため、水晶体と胸腹部とが同じ γ 線に曝されるという条件のもとでは、胸腹部に取り付けた個人線量計で測定した $H_p(10)$ をもって H_{lens} とみなす管理も可能であると考えられる。一方、ROT または ISO 照射の場合、 $H_p(10)$ は H_{lens} に比べて 10% 程度小さな値になる。しかしながら、この違いも、個人線量計による線量当量の正確さに関する一般的な要求(68%信頼度で $\pm 20\%^3$) に比べて十分に小さいと言えるため、AP 照射の場合と同様に、水晶体と胸腹部とが同じ γ 線に曝されるという条件のもとでは、胸腹部で測定した $H_p(10)$ から H_{lens} を評価することも可能であると考えられる。なお、東電 1F の作業現場の γ 線スペクトルの場合、 $H_p(10)$ と $H_p(3)$ 又は $H_p(0.07)$ の間に大きな数値の違いはないので、ここで $H_p(10)$ は $H_p(3)$ 又は $H_p(0.07)$ としても論旨は変わらない。

(2) β 線スペクトル測定

観測された β 線スペクトルは基本的に ^{90}Y のものである。 $H'(0.07)$ に対する $H'(3)$ の比は、解体タンク片で 1/5~1/7、汚染水線源で 1/3~1/4 であった。後者の値は、理論計算による $H'(3)/H'(0.07)$ 比(ICRU Report 56²⁹⁾、表 C.16 から ^{90}Sr - ^{90}Y で 0.22、 ^{90}Y で 0.59) の範囲内であった。

また、表 3-8 に示した全面マスクの遮へい効果は、 ^{90}Sr - ^{90}Y 線源を用いて滝本らが MSA 社製全面マスク(Ultra-Twin)について電離箱式線量当量率サーベイメータや TLD 等を用いて測定した結果とほぼ同じであった。東電 1F で現在使用されている全面マスク(全部で数種類ある)について、 ^{90}Sr - ^{90}Y 線源と β 線スペクトロメータを用いて、 β 線遮へい性能の検証を現在行っている。

表 3-13 全面マスクの β 線遮へい効果まとめ

	マスク無し $H'(0.07)$	マスク無し $H'(3)$	マスク有り $H'(0.07)$	マスク有り $H'(3)$
東電 1F 汚染水線源	1	0.31	0.21~0.22	0.044~0.047
滝本ら ²¹⁻²²⁾ ^{90}Sr - ^{90}Y	1	—	0.18~0.34	0.03~0.04

³ ICRP Publ. 75 の線量当量の正確さ要求(95%信頼度でファクター1.5)を、95%信頼度で $\pm 40\%$ に相当すると解釈した。

3.4.3 人体形状ファントムを用いる模擬照射実験

(1) 全面マスクの γ 線遮へい効果

RANDOファントム頭部の水晶体に埋め込んだUD-807熱ルミネセンス線量計の空気カーマ当たりの指示値を、理論値(ICRP Publ 116)と比べた結果を、図 3-17 に示す。ここで、指示値はそれぞれの線質の全面マスク無し・AP 照射条件での理論値に規格化した。全面マスク有り無しとで線量計指示値に大きな変化がないことから、今回試験した γ 線エネルギー範囲においては、全面マスクによる γ 線遮へい効果はほとんど期待できないと考えられる。同じような結果は、頭部ファントムの表面に取り付けた個人線量計の指示値からも観察された。

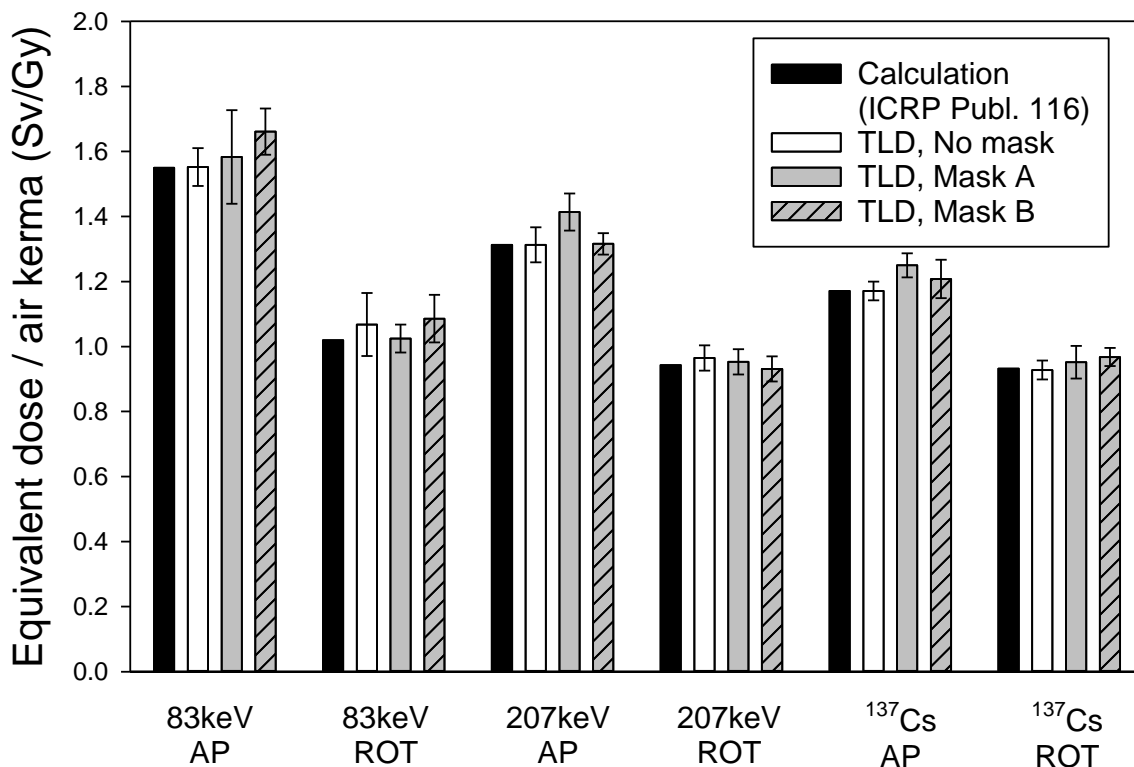


図 3-17 全面マスク有り無しにおける水晶体等価線量の変化

(2) 頭部ファントムへの個人線量計の取付け位置

眉間と両眼尻に取り付けた個人線量計(DOSIRIS, Vision)の指示値に有意差はない。これは、全面マスクを被せた場合も同様であった。

(3) AP 照射と ROT 照射での違い

線量計毎に、ROT 照射と AP 照射での指示値の比を計算した結果を表 3-14 に示す。指示値の ROT/AP 比は、頭部ファントムに取り付けた線量計については水晶体等価線量の ROT/AP 比、水平板ファントムに取り付けた線量計については $H_p(10)_{\text{slab}}$ の ROT/AP 比をほぼ再生した。後者の比は前者の比よりも小さい。これは、頭部ファントムに比べて寸法が大きい平板ファントムの場合、個人線量計装着面のたとえば斜め後方等から入射する γ 線に対する遮へい力が増すためである。

このため、同じ作業者が、頭部と胸腹部に個人線量計を装着した場合、それぞれの個人線量計

から算出される $H_p(3)$ (又は $H_p(10)$) は, AP 照射条件でほぼ同等の値, ROT 照射条件でわずかに頭部 > 胸腹部となる値を示す可能性がある。これは, 3.4.2 で述べた γ 線スペクトル測定に基づく予想と同じである。実際の作業現場において, 頭部に取り付けた個人線量計による $H_p(3)$ と胸腹部に取り付けた個人線量計による $H_p(10)$ (又は $H_p(3)$) がどの程度一致するかについては, 実際の作業による個人線量計の試験着用の結果 (2.4.1 参照) 及び現在実験データをとりまとめ中である簡易人体形状ファントムでの照射実験結果と照合しつつ, 分析を進める必要がある。

表 3-14 AP 照射条件に対する ROT 照射条件での線量計の指示値の比

線源	マスク	頭部ファントム						水スラブファントム			
		UD-807	GB	Dosiris		OSLEYED	Vision		GB		
N100	マスク無し	0.69	±0.07	0.62	0.71	±0.03	0.91	0.68	±0.02	0.52	±0.02
	マスクA	0.65	±0.06	0.60	0.71	±0.02	0.95	0.74	±0.06		
	マスクB	0.65	±0.05	0.60	0.72	±0.03	1.03	0.70	±0.08		
N250	マスク無し	0.74	±0.04	0.71	0.82	±0.02	0.81	0.75	±0.02	0.59	±0.00
	マスクA	0.67	±0.04	0.66	0.77	±0.04	0.75	0.75	±0.03		
	マスクB	0.71	±0.03	0.66	0.73	±0.04	0.71	0.73	±0.02		
^{137}Cs	マスク無し	0.79	±0.03	0.78	0.82	±0.07	0.78	0.83	±0.04	0.71	±0.00
	マスクA	0.76	±0.05	0.81	0.82	±0.02	0.75	0.79	±0.04		
	マスクB	0.80	±0.05	0.77	0.85	±0.04	0.81	0.86	±0.04		
^{60}Co	マスク無し	0.86	±0.05	0.94	0.85	±0.04	0.93	0.85	±0.04		

3.5 結論

本研究によって得られた結論を以下にまとめる。

(1) 原子力研究施設における水晶体に高線量・不均等な被ばくを受ける作業の調査

原子力機構(核サ研・原科研)においてこれまでに実施された作業について、過去の放射線記録等をもとに、水晶体に高線量の被ばく及び不均等な被ばくを受ける作業状況等を調査した。その結果、水晶体に高線量の被ばくまたは不均等な被ばくを受ける作業は、高線量率下でのセル内作業と鉛エプロン等防護衣を着用する作業に限られる。このうち、高線量率下でのセル内作業については、一部の特殊な状況での作業において、頭部により高い線量を受けた事例の報告があるが、ほとんどの場合は γ 線による全身均等被ばくである。 β 線が混在する場では、全面マスク等防護装備による遮へい効果を考慮せずに水晶体等価線量を過大に評価・記録する場合もあったが、今後はその補正が行われる予定である。一方、鉛エプロン等防護衣を着用する作業では、頸部に取り付ける個人線量計の指示値を基に水晶体等価線量の算定が行われている。年 20 mSv を超える事例は極めて少数であるので、新たな線量限度に対応することは困難ではない。適切な管理レベル(administration level)を導入することによって、例えば年 15 mSv を超えないように水晶体等価線量をコントロールすることは可能である。

水晶体等価線量限度が今後引き下げられたとしても、水晶体モニタリングに係る現在の管理・測定方法を大きく変更する必要はないと考えられる。ただし、水晶体等価線量が年 20 mSv に近づいたり超えたりするなど、より厳密な管理と正確な線量測定を必要とするケースにおいては、眼の近傍に個人線量計を取り付けるなどのオプション的対応について、そのルール作りを進めていく必要がある。

(2) 東電 1F における γ 線及び β 線スペクトル測定と簡易ファントムを用いる線量計の照射実験

東電 1F 構内の高線量率作業場において γ 線及び β 線スペクトルを測定し、実用量($H_p(3)$)と $H_p(10)$)及び水晶体等価線量を評価した。

γ 線: γ 線スペクトルを分析した結果、全線量率に占める散乱線(0.5 MeV 以下)の寄与の割合は、周囲の線量低減対策があまり施されていない場所で 40~50%であるのに対し、対策が進んだ場所では 70%以上であった。AP 照射を仮定した場合、実用量($H_p(3)$)または $H_p(10)$)は水晶体等価線量よりも過小な値にならない。ROT(回転)照射及び ISO(全方位)照射を仮定した場合、 $H_p(10)$ は水晶体等価線量よりもやや小さな値になるが、その相違は高々 10%程度であった。これらのことから、水晶体と胸腹部が同じ γ 線に曝される条件のもとでは、胸腹部で測定した $H_p(10)$ (あるいは数値的にほとんど違いのない $H_p(3)$ や $H_p(0.07)$)を用いて水晶体モニタリングを行うことも可能であると考えられる。

β 線: $H'(0.07)$ (= $H_p(3)$)に対する $H'(3)$ (= $H_p(3)$)の比は、解体されたタンク片で 1/5~1/7、汚染水線源で 1/3~1/4 であった。また、汚染水線源を用いて一般的に使用されている 2 種類の全面マスクの β 線遮へい効果を評価したところ、全面マスク有りでの $H'(3)$ は全面マスク無しでの $H'(0.07)$ の 0.044~0.047 倍であった。すなわち、全面マスクを着用しているにも関わらず、胸腹部で測定された $H'(0.07)$ =水晶体等価線量と一律にみなす管理を行う場合、水晶体等価線量を約 20 倍も過大に評価する。

ファントム実験:平成 30 年 3 月に実施したファントム実験については、現在データを分析中である。

同様の実験を、設置場所を変えて次年度も行う予定である。

(3)人体形状ファントムを用いる模擬照射実験

RANDO ファントムの頭部の目の近傍(眉間および両目尻)に $H_p(3)$ 用個人線量計等を取り付け、平均エネルギー83 keV~1.25 MeV の光子を照射し、その指示値を得た。照射条件は、AP 及び ROTとし、さらに、東電 1Fで広く使用されている全面マスク(2種類)をファントムに被せることで全面マスクによる遮へい効果も調べた。その結果、実験で使用した個人線量計の指示値は、いずれも水晶体等価線量に±20%内で一致する値を示すこと、その取り付け位置やマスクの有無にあまり影響されないことが確認された。一方、頭部ファントムに取り付けた個人線量計と体幹部に取り付けた個人線量計の間で、AP 照射条件と ROT 照射条件の指示値の比に、ファントムそのものによってもたらされる遮へいに起因する系統的な違いが観察された。作業者が実際に着用する個人線量計から得られる指示値との関連性について、今後、研究を進める必要がある。

3.6 研究発表

辻村憲雄, 原子力研究施設における水晶体被ばくの調査とファントムを用いる水晶体等価線量測定の実験的研究, 日本保健物理学会シンポジウム II 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング, 適切な管理・防護はどうあるべきか? ~水晶体被ばくの実態から探る~ 平成 29 年度 放射線安全規制研究戦略的推進事業, 2018 年 3 月 20 日, 東京大学

3.7 謝辞

本研究にご協力及びご助言いただきました以下の皆様に心から御礼申し上げます。
日本原子力研究開発機構の谷村嘉彦氏, 青木克憲氏, 片山淳氏, 菅巧氏, 内田真弘氏, 高橋聖氏, 上野有美氏, 株式会社千代田テクノルの江崎巖氏, 前俊一郎氏, 長瀬ランダウア株式会社の関口寛氏, 東京電力HD株式会社の林田敏幸氏, 吉田武史氏, 佐藤暢秀氏, 夏目良典氏, 林宏二氏, 向田直樹氏, 木村義昭氏, 菊地弘幸氏, 高平史郎氏, 金濱秀昭氏, 松澤俊春氏, 牧平淳智氏, 宇津木弥氏, 新妻直人氏

参考文献

- 1) S. Yokoyama, N. Hamada, T. Hayashida, N. Tsujimura, H. Tatsuzaki, T. Kurosawa, K. Nabatame, H. Ohguchi, K. Ohno, C. Yamauchi-Kawaura, T. Iimoto, T. Ichiji, Y. Hotta, S. Iwai, and K. Akahane; Current situations and discussions in Japan in relation to the new occupational equivalent dose limit for the lens of the eye, *J. Radiol. Prot.* **37**, 659–683 (2017).
- 2) 林田敏幸, 佐々木洋, 浜田信行, 立崎英夫, 初坂奈津子, 赤羽恵一, 横山須美; 東京電力福島第一原子力発電所事故復旧時の放射線管理の課題—水晶体の被ばく・生物影響の観点から—, *保健物理* **52** (2), 88–99 (2017).
- 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(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).
- 4) 谷村嘉彦; 私信.
- 5) M. Reginatto, P. Goldhagen, and S. Neumann; Spectrum un-folding, sensitivity analysis and propagation of uncertain-ties with the maximum entropy deconvolution code MAXED, *Nucl. Instr Meth.* **A476**, 242–246 (2002).
- 6) ICRP; Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures, Publication 116, *Ann. ICRP* **40** (2/5), (2010).
- 7) Vanhavere F., Carinou E., Gualdrini G., Clairand I., Sans Merce M., Ginjaume M., Nikodemova D., Jankowski J., Bordy J-M., Rimpler A., Wach S., Martin P., Struelens L., Krim S., Koukorava C., Ferrari P., Mariotti F., Fantuzzi E., Donadille L., Itié C., Ruiz N., Carnicer A., Fulop M., Domienik J., Brodecki M., Daures J., Barth I., Bilski P.; ORAMED: Optimization of radiation protection of medical staff. EURADOS report 2012-02 (2012).
- 8) ICRP; Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiations, Publication 74, *Ann. ICRP* **26** (3/4), (1996).
- 9) 吉富寛; 私信
- 10) K. Hoshi, T. Yoshida, N. Tsujimura, and K. Okada; The Evaluation of the 0.07 and 3 mm Dose Equivalent with a Portable Beta Spectrometer. *JPS Conf. Proc.* **11**, 070009-1–070009-6, (2016).
- 11) H. Yoshitomi, M. Hagiwara, M. Kowatari, S. Nishino, T. Sanami, and H. Iwase; Assessment of equivalent dose of the lens of the eyes and the extremities to workers under nonhomogeneous exposure situation in nuclear and accelerator facilities by means of measurements using a phantom coupled with Monte Carlo simulation, *Proceedings of IRPA-14* (2016).
- 12) 古渡意彦, 吉富寛; 放射線業務従事者の水晶体等末端部等価線量の適切な評価及び被ばく低減下に関する研究, 平成 28 年度厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金報告書 (2017).
- 13) ISO; X and gamma reference radiation 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 (1999).
- 14) R. Behrens; Air kerma to dose equivalent conversion coefficients not included in ISO 4037-3, *Radiat. Prot. Dosim.* **147**(3), 373–379 (2010).
 - 15) R. Behrens; Air kerma to Hp(3) conversion coefficients for a new cylinder phantom for photon reference radiation qualities, *Radiat. Prot. Dosim.* **151**(3), 450–455 (2012).
 - 16) 山崎巧, 高田千恵, 辻村憲雄, 岡田和彦; MOX 燃料施設における眼の水晶体の線量評価の現状と課題, *保健物理*, **52**(3), 167–170 (2017).
 - 17) 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).
 - 18) 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).
 - 19) 中川貴博, 高田千恵, 辻村憲雄, 山崎巧, 樫村慎也; 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).
 - 20) 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).
 - 21) 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).
 - 22) 滝本美咲, 奥山駿, 山崎巧, 伊東康久, 高田千恵, 辻村憲雄, 柴浩三, 岡田和彦, 並木篤; β 線 3mm 線量当量の測定方法と水晶体の防護策の検討(3)作業への適用, 日本保健物理学会第 50 回研究発表会要旨集 B2-4 (2017).
 - 23) 滝本美咲, 山崎巧, 今橋淳史, 川崎位, 吉田忠義, 高田千恵, 辻村憲雄, 岡田和彦; β 線 3mm 線量当量の測定方法と水晶体の防護策の検討(1)サーベイメータによる測定, 日本保健物理学会第 48 回研究発表会要旨集 3B5-1 (2015).
 - 24) 山崎巧, 滝本美咲, 吉田忠義, 高田千恵, 辻村憲雄, 岡田和彦; β 線 3mm 線量当量の測定方法と水晶体の防護策の検討(2)TLD による測定, 日本保健物理学会第 48 回研究発表会要旨集 3B5-2 (2015).
 - 25) 鳥居洋介, 山外功太郎, 加藤拓也, 吉富寛; 呼吸用保護具の放射線遮蔽効果とセル内作業者の眼の水晶体の被ばく線量調査, 日本保健物理学会第 48 回研究発表会要旨集 3B5-3 (2015).
 - 26) 保健物理—管理と研究—No.41, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Review 2000-001 (1998).
 - 27) 森下祐樹, 佐川直貴, 菅巧, 山崎巧, 辻村憲雄, 吉田忠義, 永井博行; MOX 燃料施設におけるグローブボックス周囲の線量率マッピング, 第 47 回日本保健物理学会研究発表会 C11 (2014).
 - 28) 菅巧, 森下祐樹, 佐川直貴, 山崎巧, 吉田忠義, 辻村憲雄, 永井博行; MOX 燃料施設における人体形状ファントムを用いた水晶体及び体表面線量分布の測定, 日本原子力学会 2015 年春の年会 L49 (2015).
 - 29) ICRP; General principles for the radiation protection of workers, ICRP Publication 75, Ann.

ICRP 27 (1), (1997).

30) ICRU; Dosimetry of external beta rays for radiation protection, ICRU Report 56, (1997).

4. 医療施設における水晶体の等価線量の実態調査と防護方法に関する効果的な教育プログラムの開発

分担研究者	大野和子	京都医療科学大学	医療科学部	放射線技術学科	教授
研究協力者	黒川典枝	山口大学	医学部		教授
研究協力者	松本一真	兵庫医科大学病院		診療放射線技師	
研究協力者	高山賢二	京都大学附属病院		助教	
研究協力者	原田康雄	明海大学	歯学部		講師
研究協力者	奥村泰彦	明海大学	歯学部		教授
研究協力者	栗井一夫	榊原記念病院		放射線部技師長	
研究協力者	安陪等思	久留米大学医学部		教授	
研究協力者	鹿江 寛	京都市立病院		整形外科部長	
研究協力者	野坂俊介	成育医療センター		放射線部部長	
研究協力者	絹谷清剛	金沢大学	医学部		教授
研究協力者	茂松直之	慶応大学	医学部		教授
研究協力者	関口 寛	長瀬ランダウア株式会社		技術室統括	

4.1 研究目的

国際放射線防護委員会 (ICRP) は職業被ばくについて、水晶体の等価線量を所定の 5 年間の平均値として 20mSv/年とし、いずれの年も 50mSv を越えないように勧告している。日本もこの勧告を法令に取り入れることとしているが、職業被ばくの最大の集団である医療従事者 (約 3,5 万人:平成 27 年度個人線量計測定結果より推計)の中には、水晶体の等価線量が現行の年間 150mSv から 20mSv に引き下げられると、線量限度を超える可能性のある者が一定数存在すると考えられる (約 3,000 人:平成 27 年度個人線量計測定結果より推計)。しかし、患者から見れば、この数年急速に発展した IVR 手術・手技は低侵襲性で、外科的手術を受けることができない部位の治療も可能とし、また、高齢の患者にとっては、この手法が唯一の救命方法ともなっている。医学的に必要性が高いこれらの手術・手技に関与する専門医、専門スタッフの数は限られおり、日本の新たな規制下で継続的にこれらの診療を発展させるためには、現状を正確に把握し、それぞれの専門的な手技に合わせた従事者の線量低減方法を考案し、その内容を周知する従事者教育手法の確立が不可欠である。今年度は日本国内で放射線診療に従事する様々な診療科の作業者を対象とした水晶体の等価線量の実態把握を目的として研究を実施した。

4.2 研究方法

4.2.1 対象選定

研究協力者が勤務する施設を中心に選定した。放射線科、循環器内科、消化器内科、整形外科、小児科、歯科の各診療科でインターベンション手術、核医学検査、RI 内用療法、小線源治療、透視検査を担当する医療従事者約 120 名を対象とした (表 4-1)。

表 4-1 研究に参加した領域毎の診療科と参加者職種一覧
9 の診療科 5 種類の職種が参加している。

領域	診療科	職種
IVR	放射線科、循環器内科 脳神経外科、整形外科 小児科	医師 診療放射線技師 看護師
放射線治療	放射線科、泌尿器科	医師、看護師
核医学	核医学治療・診断科	医師、看護師、薬剤師
CT	救急救命科	医師
歯科	歯科放射線科	歯科医師

4.2.2 計測方法

対象者の同意を得た後に長瀬ランダウアと産総研の協力を得て、目尻近傍に容易に装着できる専用の線量計 (Vision, 長瀬ランダウア社開発) を配布した。この線量計は、長瀬ランダウア社がフランスランダウア製の眼の水晶体測定用線量計『VISION』を元に JIS Z 43451 の適合品として開発中のものである (長瀬ランダウア社が開発中の『Vision』は頭文字を大文字、それ以外を小文字表記とする。)。現在、開発中の線量計のため、製品版では仕様が変わることがあるが、線量計は素子に 3.2 mm×3.2 mm×0.9 mm の LiF:Mg,Ti を使用した熱ルミネセンス線量計で 3mm 線量当量を測定対象としている。校正は、スラブファントムを用い、¹³⁷Cs で行い、空気カーマからの Hp(3) への換算係数は JIS Z 43451) 附属書 JA 表 JA.7 を用いた。線量測定範囲は 0.1mSv～1,000mSv としている。

通常、防護眼鏡内側の線量を計測するよう設計されているが、本試験のため防護眼鏡外側の線量を計測するタイプも製作した。測定は両目とし防護眼鏡を着用する者は眼鏡の内と外側、計4カ所で計測した (図 4-1)。計測は任意の1ヶ月間とした。また、この間の個々の手技内容と防護対策を記録した。具体的な記録項目は、以下のとおりとした。

IVR は 12 項目を記録

1. 手技名
2. 患者の身長、体重
3. 手技時間
4. 透視時間 (min)、主に使用した秒間パルス数
5. 撮影回数
6. Cone-beam CT (または CT) 撮影回数、IVR-CT では代表的な CTDI、総 DLP
7. 照射方向
8. 装置表示空気カーマ (mGy)
9. 総面積線量 (Gy・cm²)
10. 従事者の立ち位置 位置が変わった時はその時間の記録および撮影時の室外退避の有無
11. 防護衣着用の確認、防護眼鏡着用の有無
12. 天吊り防護版の使用の有無

核医学診療は 5 項目を記録

1. 放射性医薬品名
2. 投与量 (MBq)
3. 手技時間 (調剤担当者の場合は調剤にかかった時間も記載する)
4. 防護用具の有無 (有の時は具体的に)
5. 防護眼鏡着用の有無

小線源治療は5項目を記録

1. 手技名

2. 挿入線量
3. 手技時間
4. 防護用具の有無(有の時は具体的に)
5. 防護眼鏡の有無



図 4-1 防護眼鏡と線量計

防護眼鏡の左右の端に線量計を2個ずつ装着。防護眼鏡による遮蔽後の線量も測定する目的で眼鏡の外と内の線量を計測した。防護眼鏡を着用しない手技では眼鏡のフレーム左右1個ずつ線量計を装着し、目尻近傍の線量を計測した。

① 結果の整理

診療科毎に結果を分類した。同一施設内で相対的に被ばく線量が高い者については、その原因を調査・検討した。

② 倫理面への配慮

個人情報保護の観点から、京都医療科学大学の倫理審査委員会で具体的な研究方法についての審査を受けその内容を順守して調査を実施した。

4.3 研究結果

4施設50名について平成30年2月現在計測が終了したる計測結果を集計した。図2に示すように、4領域のいずれも年20 mSvを超える可能性がある者は存在しなかった。最も線量が高い循環器内科医(0.8 mSv/月、推計9.6 mSv/年)の1ヶ月の手技件数は50件で、非常に詳細な手技を要する、大動脈弁狭窄症に対する経カテーテル大動脈弁治療(TAVI)がこのうち8件含まれていた。

それぞれの領域で最も被ばく線量が高くなった者については、その原因を施設で検討した。その結果、放射線科領域では防護眼鏡を使用していない、循環器内科領域では手順として院内で決めている遮蔽板の不使用、小線源領域では新人のため透視時間が他より長い、という被ばく量増加につながる要因が明らかとなった。

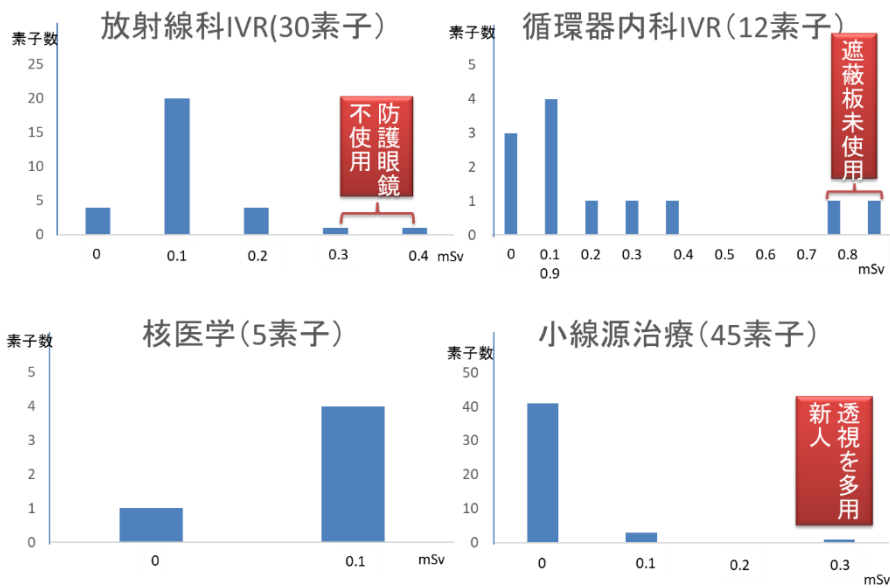


図 4-2 4 領域における平均的な 1 か月間の水晶体線量計測結果

両目に素子を装着して計測した。47 名 92 素子の計測結果(脱落 2 個は削除)となった。年間 20 mSv を超える恐れのある結果は無い。各領域で最も計測結果が高くなったスタッフには、防護眼鏡不使用、手順通りの遮蔽版未使用、透視を多用する新人、など改善可能な要因を認めた。

4.4 考察

水晶体の線量限度が年間 20mSv に低下すると、個人線量計測定機関の公表データを参考にすると、年間約 3,000 人の医療関係者が線量限度を超えると推察されている。しかし、今回の計測結果からは放射線科や循環器内科領域のように、以前から放射線診療を行っている領域では、一ヶ月の手技数が 50 件以上(最大 54 件)の従事者においても年間 20mSv を下回ることが確認できた。この一因として、現状の水晶体等価線量は防護眼鏡の着用結果を反映していないことが考えられる。被ばく線量の多い従事者においては今回のような正確な計測が有効と考える。

また、核医学検査や小線源治療においては、被ばく線量は少なく、特別な配慮を必要性は低いと考えられた。

今後は、手技毎の線量も詳細に評価し、注意すべき手技を抽出する。また、図 3 に示すように放射線診療への参加の歴史が浅い診療科では防護教育が学会の専門医制度カリキュラム等でも整備の途中である。今後整形外科領域や消化器内科、歯科といった、比較的最近放射線診療を盛んに行うようになった診療科の結果も解析し追加の防護策の必要性について検討し、有益な放射線診療の安全な継続を目指す予定である。

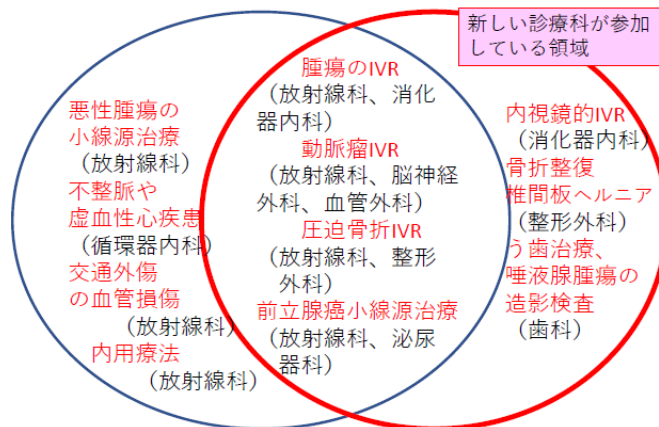


図 4-3 放射線を利用する診療科と主な手技

さまざまな診療科が放射線に関与している。赤色の円の中は新しい診療科が参加している領域を示す。

4.5 結論

放射線科と循環器内科の IVR、核医学検査、小線源治療領域では、年間 20mSv を超える可能性がある手技は認めなかった。H30 年度には残る診療科の実態調査結果を整理し、被ばく線量が高い手技が存在した場合には、これらの低減方法を検討し、そこから各診療科に有効な教育プログラムを作成し、その効果を検証する。

4.6 次年度の活動概要

平成 30 年度は以下の研究を展開する。

(1) 計測結果の整理と検討

平成 30 年 3 月までの全計測結果を、診療科毎、手技毎に分類し結果を評価する。各個人の今回の水晶体の計測結果と通常の個人線量から得られた実効線量と水晶体の等価線量を比較検討し、今後も特別な水晶体の計測が必要な手技の有無を考察する。手技の具体的内容調査と防護対策の現状調査をもとに、被ばく線量が相対的に高い手技と年間 20mSv を超える手技については、医療の質を低下させない効果的な線量低減策を検討する。

(2) 教材作成

医療関係者が理解しやすいように、各診療科向けの教育プログラムを作成する。

また、研究協力者の施設で教育プログラムの効果を評価する。評価方法は個別アンケート、

放射線管理者に対する作業環境、作業状況の変化に関する聞き取りを基に点数方式で行う。評価結果をもとに、教育プログラムを推敲し完成させる。プログラムの詳細は日本医学放射線学会等の関連学会を通して広く周知する。

4.7 研究発表

平成 30 年 3 月 20 日 保健物理学会シンポジウム II 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？
～水晶体被ばくの実態から探る～平成 29 年度 放射線安全規制研究戦略的推進事業

5. 医療機関における不均等被ばく管理の実態と非透視検査での水晶体等価線量の測定・評価方法に関する研究

分担研究者	藤淵俊王	九州大学
研究協力者	五十嵐隆元	国保旭中央病院
研究協力者	西丸英治	広島大学病院
研究協力者	藤田克也	東京病院
研究協力者	桜井礼子	東京医療保健大学
研究協力者	堀田昇吾	東京医療保健大学
研究協力者	小野孝二	東京医療保健大学
研究協力者	竹井泰孝	川崎医療福祉大学
研究協力者	松原孝祐	金沢大学
研究協力者	小林正尚	藤田保健衛生大学
研究協力者	林 裕晃	金沢大学

5.1 背景・目的

国際放射線防護委員会（ICRP：International Commission on Radiological Protection）が2011年4月に発表した組織反応（確定的影響）に関する声明（ソウル声明）では、水晶体のしきい線量が0.5 Gyに引き下げられ、計画被ばく状況下にある職業被ばくのうち眼の水晶体の等価線量限度について、「5年間の平均が20 mSv/年を超えず、いかなる1年間においても50 mSvを超えないようにすべきである」ことが示された¹⁾。2012年8月ICRPはPublication118を出版し、これらの線量限度の引き下げ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。1) これらを受けて現在わが国において原子力規制委員会において放射線審議委員会の下に、眼の水晶体の放射線防護検討部会を2017年7月に設置し、新たな水晶体等価線量限度の法令への取り入れが検討されている。この部会においては、被ばく管理を必要とする原子力発電関係者、医療従事者においての水晶体被ばくの実態、国外の動向、新たな水晶体等価線量限度の取入れにおける課題について議論が行われている。課題の一つとして、この新たな水晶体等価線量限度（水晶体の等価線量限度である年間20 mSv）のもとでは、過去の実態データを参照すると約2,000名の医療従事者が線量限度を超えてしまうことになるという点があげられる²⁾。

医療現場において、放射線診療従事者が被ばくする可能性のある場所で作業する際、原則として防護プロテクタを着用しているが、その場合プロテクタを着用している部位とそうでない部位で被ばく量が異なる不均等被ばくとなる。水晶体の線量を把握するためには、不均等被ばくを評価するため頸部モニタの装着が必要であるが、1つの個人モニタ装着でしか管理していない施設もあり、不均等被ばく、とくに水晶体の管理状況は施設間で異なる。施設間による被ばく管理の非統一性は、放射線診療従事者の正確な水晶体被ばく管理ができないことにつながる可能性がある。また水晶体被ばくが多いとされるIVR等透視を使用した放射線診療については多くの水晶体被ばくに関する調査報告があるものの、透視を使用しないX線CT検査や一般撮影においても介助時に被ばくする可能性があるが、それらの放射線診療での水晶体被ばくに関する調査はほとんど報告されていない³⁻⁵⁾。さらに、水晶体の被ばく低減目的で防護メガネを着用する場合、頸部モニタの値を利用すると過大評価になってしまう。頸部モニタの値からより正確な水晶体等価線量を評価しようとする際の補正方法は確立されていない。

本研究では、①医療機関における不均等被ばくの管理状況の実態を明らかにするためのアンケートを作成する。また②X線CT検査や一般撮影等透視を使用しない放射線検査介助時における水晶体被ばくの程度を評価する。さらに、③防護メガネの照射方向別の遮蔽能力について評価することで、頸部モニタから水晶体等価線量への換算する際の基礎データを取得する。これらのデータと過去の国内外の水晶体被ばくに関する文献資料を基に、医療現場における適切な水晶体被ばくの管理方法および評価方法を提案する。

本研究の特色・独創的な点として、これまで医療現場での不均等被ばく管理の状況は正確につかめていないことから、全国の病院で不均等被ばく管理に関するアンケートを実施することで現状を明らかにし、医療従事者の被ばく管理の在り方に関する貴重なデータとする。またIVRなど透視を利用した放射線診療における水晶体被ばくの調査は国内外で多く実施されているが、一般撮影やX線CT検査での報告は少なく貴重なデータとなる。さ

らに様々な防護メガネの鉛当量別遮蔽能力に関するデータは、頸部モニタから水晶体等価線量に過小評価することなく換算するにあたっての重要な基礎データとなる。

5.2 研究方法

本研究では、以下の内容について実施する。

5.2.1 放射線診療従事者の不均等被ばく管理の実態に関するアンケート

医療施設において、水晶体被ばくの管理状況は施設間で異なっており、医療従事者が安全な環境で安心して働くためには、各施設の水晶体被ばくの管理の実態を明らかにし、今後の不均等被ばく管理の在り方を検討する必要がある。そこで、不均等被ばく管理の有無、着用する防護具の種類、放射線診療従事者の設定方法について、医療機関の放射線管理者を対象にインターネットを介したアンケートにより不均等被ばくの管理について全国の実態を調査することとした。平成 29 年度はアンケート内容について、倫理的配慮を含め協議し、インターネット上のフォームを作成した。

大項目として、1. 施設の概要、2. 不均等被ばく管理について、3. 不均等被ばくの線量測定、4. 水晶体の防護方法について、5. 不均等被ばくに関する教育・訓練、6. その他（スタッフの水晶体被ばくへの関心）とした。

5.2.2 非透視系放射線検査での水晶体等価線量の実態調査

水晶体線量(3 mm線量当量)評価用の線量計 (Vision : 長瀬ランダウア開発) を用い、医療従事者の防護メガネに装着することで、1 ヶ月、1 介助・検査あたりの水晶体被ばくの実態を明らかにした。なお、Vision の詳細については第 4 章 (4.2.2) に記載してある。

実態調査を実施するにあたり、最初に Vision の放射線診断領域の X 線での基本特性を評価した。

まず、単色エネルギーおよび、2.5mmAl のフィルタを入れた 40 から 140 kV の連続エネルギースペクトルの X 線(図 5-1)を用い、空気中およびファントム上での空気カーマに対する Vision 内の LIF 素子の吸収線量の比をモンテカルロシミュレーションコードである EGS-5 を使用して評価した。

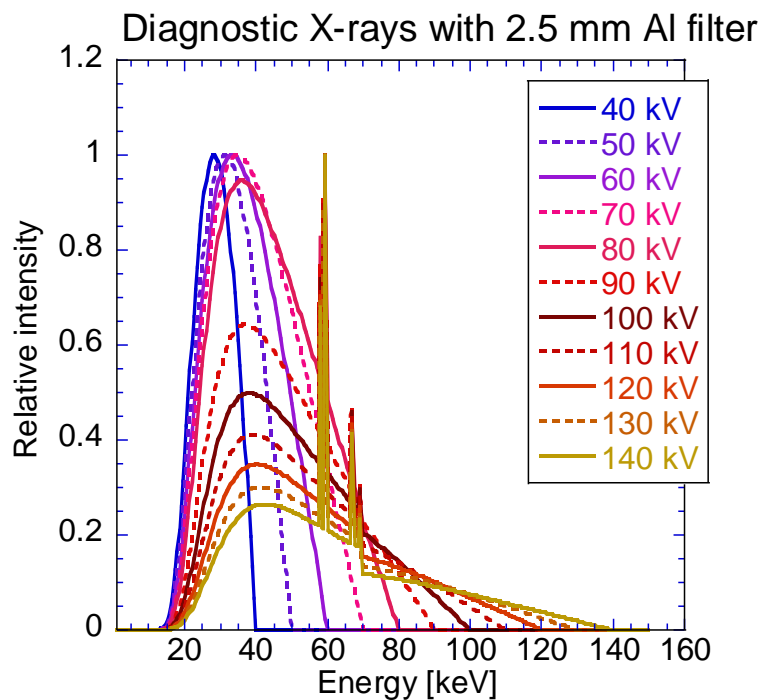


図 5-1 シミュレーションに使用した X 線連続エネルギースペクトル

空中での空気カーマの計算は、仮想空気検出器：10×10×1 mm、粒子数：10⁷ run、照射野：直径 2 cm 円形、X 線スペクトルに μ_{en}/ρ を掛けて算出した。Vision 吸収線量の計算は、Vision 素子：3.2×3.2×0.9 mm、粒子数：10⁹ run、照射野：直径 2 cm 円形、検出器領域で吸収された粒子のスペクトルから算出した。空中でのシミュレーションの幾何学的配置を図 5-2 に示す。

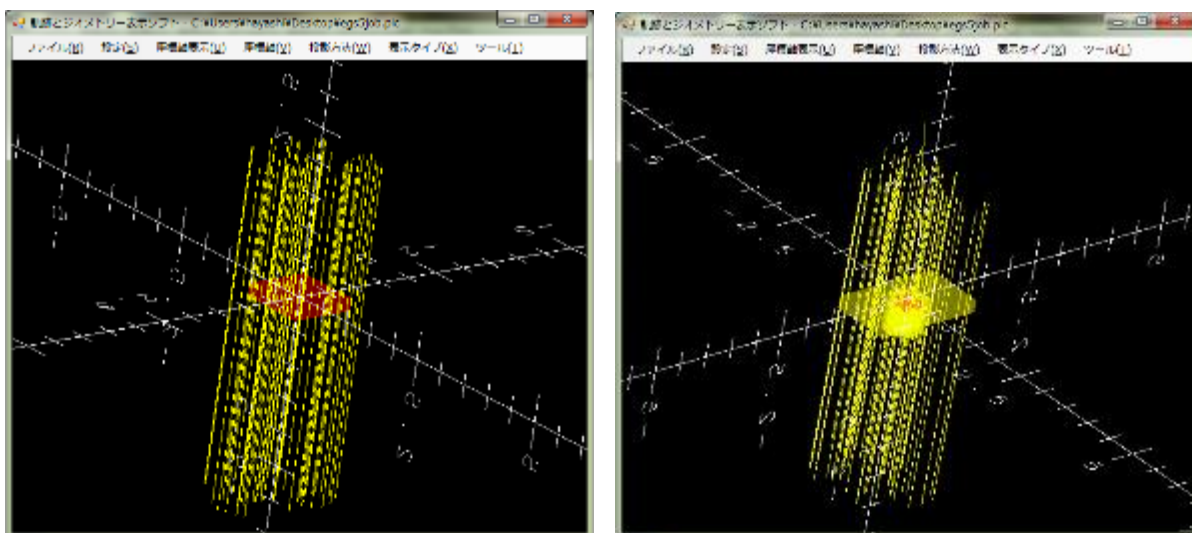


図 5-2 空中での空気カーマおよび Vision の吸収線量比の照射体系

ファントム上での評価として、空気カーマの計算は、仮想空気検出器：10×10×1 mm +2 mm のアクリルキャップ、粒子数：10⁷ run、照射野：直径 10 cm 円形、X線スペクトルに μ_{en}/ρ を掛けて算出した。Vision 吸収線量の計算は、Vision 検出器：3.2×3.2×0.9 mm +半円アクリルキャップ：2 mm +後方散乱体：30 cm×30 cm×15 cm、粒子数：10⁹ run、照射野：直径 10 cm 円形、検出器領域で吸収された粒子のスペクトルから算出した。ファントム上でのシミュレーションの幾何学的配置を図 5-3 に示す。

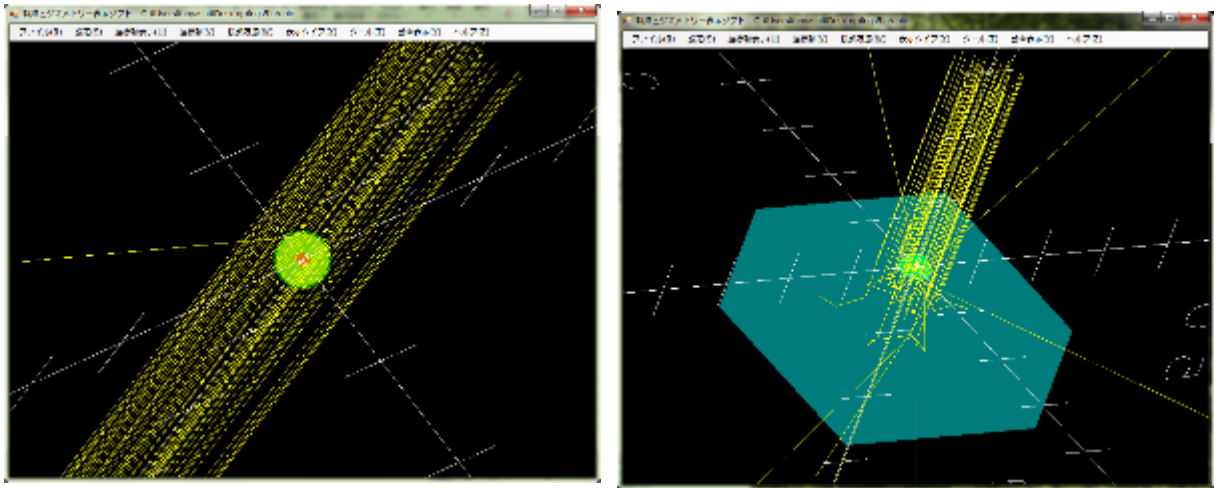


図 5-3 ファントム上での空気カーマおよび Vision の吸収線量比の照射体系

次に Vision の放射線診断領域の X 線でのエネルギー特性と方向特性を確認するため、半導体式の基準線量計（AGMS-D+, Radcal）による空気カーマと Vision を正面および側面から照射したときの値を比較した。

照射条件を以下に示す。

- ・ 80 kV (2.76 mmHVL Al)、200 mA、 1.0 sec×3 回
- ・ 120 kV(4.16 mmHVL Al)、200 mA、 1.0 sec×3 回
- ・ 線源-検出器間距離：100 cm
- ・ 床から検出器までの距離：40 cm
- ・ 照射野：5 cm × 5 cm (@検出器位置)

照射時の配置図を図 5-4 に示す。

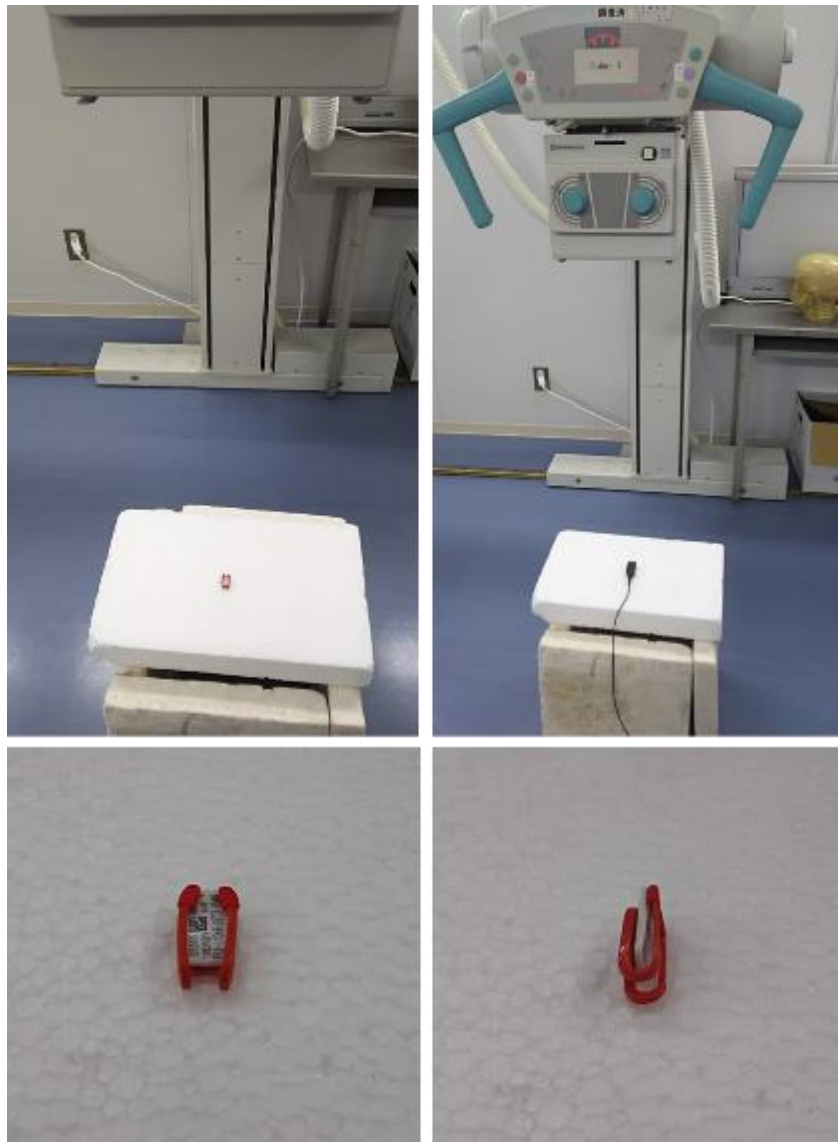


図 5-4 Vision のエネルギー特性、方向特性評価時の配置

実態調査は、国内の 7 病院（川崎医科大学附属病院、川崎医科大学総合医療センター、岡山大学病院、倉敷中央病院、広島大学病院、国保旭中央病院、藤田保健衛生大学病院）において、一般撮影、病棟（ポータブル）撮影、救急撮影、ICU、透視検査、X 線 CT 検査で医療従事者（診療放射線技師、看護師）が介助するために入室した際の 1 ヶ月当りの水晶体の線量を評価した。

放射線防護メガネの左右のレンズの前後に線量計を配置し、1 か月間メガネに線量計を装着した状態で、介助や撮影した回数、検査の種類を控え、集計した。本報告での結果は 2018 年 1 月末までの集計結果を示す。

防護メガネの片側のレンズに線量計を配置した写真を図 5-5 に示す。



図 5-5 防護メガネと線量計

次に、患者を模擬した体幹部のファントムおよび医療従事者の頭部を模擬したファントムを用い、医療従事者が胸部および腹部 X 線撮影の介助をする際の水晶体線量を同じ線量計を用いて評価した。

胸部撮影介助の条件は、以下の通りである。

- ・ 管電圧：120 kV、管電流：200 mA、照射時間 1 秒 ×10 回
- ・ 焦点-X 線検出器間距離：200 cm
- ・ 照射野中心および従事者ファントムの水晶体位置：床から 120 cm
- ・ 患者入射表面から従事者の水晶体までの距離：30 cm
- ・ 患者入射表面と従事者の水晶体の角度：20 度

国内での一般的な胸部撮影条件である 120 kV、5 mAs で照射した際の水晶体線量を評価した。実験時の写真を図 5-6 に示す。



図 5-6 胸部撮影介助時の医療従事者の水晶体線量評価の配置図

腹部撮影介助の条件は、以下の通りである。

- ・ 管電圧：80 kV、管電流：200 mA、照射時間 1 秒 ×10 回
- ・ 焦点-X線検出器間距離：200 cm
- ・ 照射野中心および従事者ファントムの水晶体位置：床から 100 cm
- ・ 患者入射表面から従事者の水晶体までの距離：30 cm
- ・ 患者入射表面と従事者の水晶体の角度：20 度

測定結果から、国内での一般的な胸部撮影条件である 80 kV、30 mAs で照射した際の介助者の水晶体線量を評価した。実験時の写真を図 5-7 に示す。



図 5-7 腹部撮影介助時の医療従事者の水晶体線量評価の配置図

5.2.3 防護メガネの鉛当量による遮蔽効果の評価

水晶体の放射線防護用に専用のメガネが複数のメーカーが市販されているが、それぞれ鉛当量や形状が異なる。先行研究では防護メガネは形状により角度方向ごとに遮へい効果が異なる、IVR (Interventional Radiology) のような散乱線源が変化する状況においては遮へい効果が必ずしも鉛当量によらないことが報告されている⁶⁾。本研究においては、直接 X 線を照射することで、防護メガネの鉛当量や形状による遮蔽能力の違いを評価した。人体やファントムからの散乱線の影響を排除するため、頭部を模した発泡スチロール製のファントムに複数の防護メガネを掛け、水晶体の位置に線量計を設置し 120 kV の X 線を照射した際の、照射角度を変化させ防護メガネの角度方向による遮へい効果の違いを比較した。

防護メガネとして鉛当量 0.07 mmPb の HF-400S (東レ・メディカル)、鉛当量 0.15 mmPb の EC-06 (青山光学)、鉛当量 0.75 mmPb の PT-53 (Protec Leaded Eyewear Inc.) を使用した。それぞれの外観を図 5-8 に示す。



図 5-8 方向別水晶体線量遮蔽能力に使用した防護メガネ
 左上：HF400-S、右上：EC-06、左下：PT-53

水晶体の位置の線量を評価する線量計として容積が 0.125 cc の電離箱線量計 N31005 (PTW-FREIBURG)、電位計として EMF520 (EMF ジャパン) を使用した。照射角度を変更させるために回転台を使用した。回転台の中心と発泡スチロール製頭部ファントムの水晶体位置に設置した電離箱線量計の位置合わせに墨出し器として HC3 (恒昌光電) を 2 台使用した。遮へい率測定のための幾何学的配置を図 5-9 に示す。幾何学的配置は日本工業規格 JIS (Japanese Industrial Standards) Z4501-2011 の鉛当量試験方法⁷⁾を参考に X 線管—電離箱線量計間距離 (SCD: source-chamber distance) を 150 cm とし、床からの散乱線の影響を防ぐため電離箱線量計を床から 100 cm の高さにした。

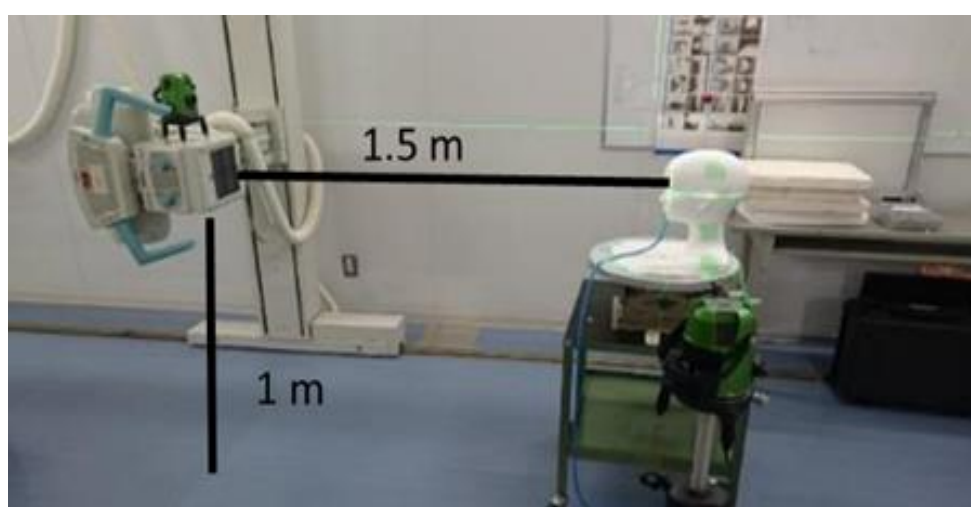


図 5-9 防護メガネの方向別遮蔽能力試験の配置図

本実験では防護メガネの各角度方向においての遮へい率を測定するために、回転台を回転させることで照射角度を変化させた。左右方向、上下方向それぞれにおいて-90°から90°の範囲で30°ずつ変化させ、墨出し器のレーザーと区切り線を合わせることで位置合わせを行った。左右方向の線源側から見た各角度における発泡スチロール製頭部ファントムをそれぞれ図 5-10 に示す。また上下方向においては右眼を上にした側臥位にして回転させた。上下方向の線源側から見た各角度におけるスチロール製頭部ファントムをそれぞれ図 5-11 に示す。

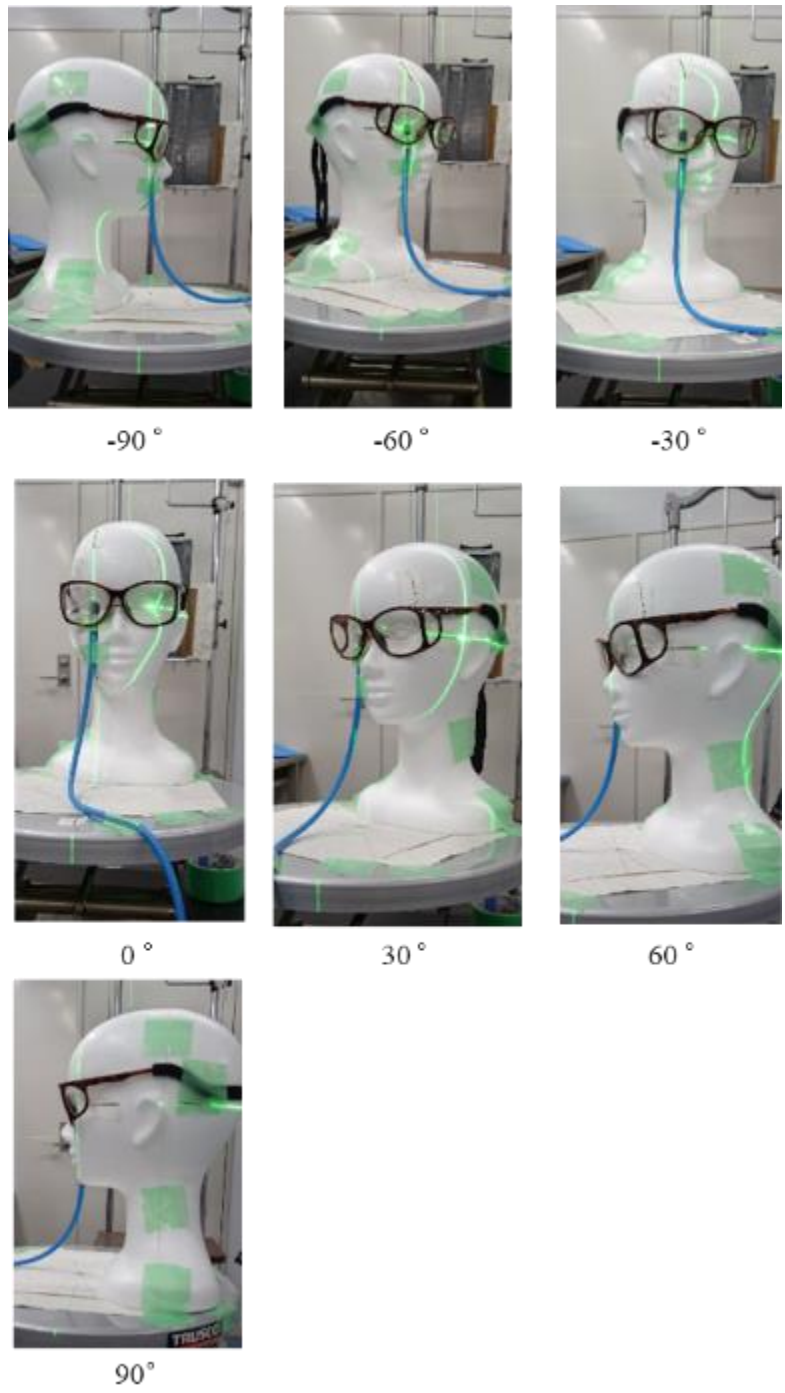


図 5-10 左右方向の遮蔽能力評価の防護メガネおよびファントム配置図

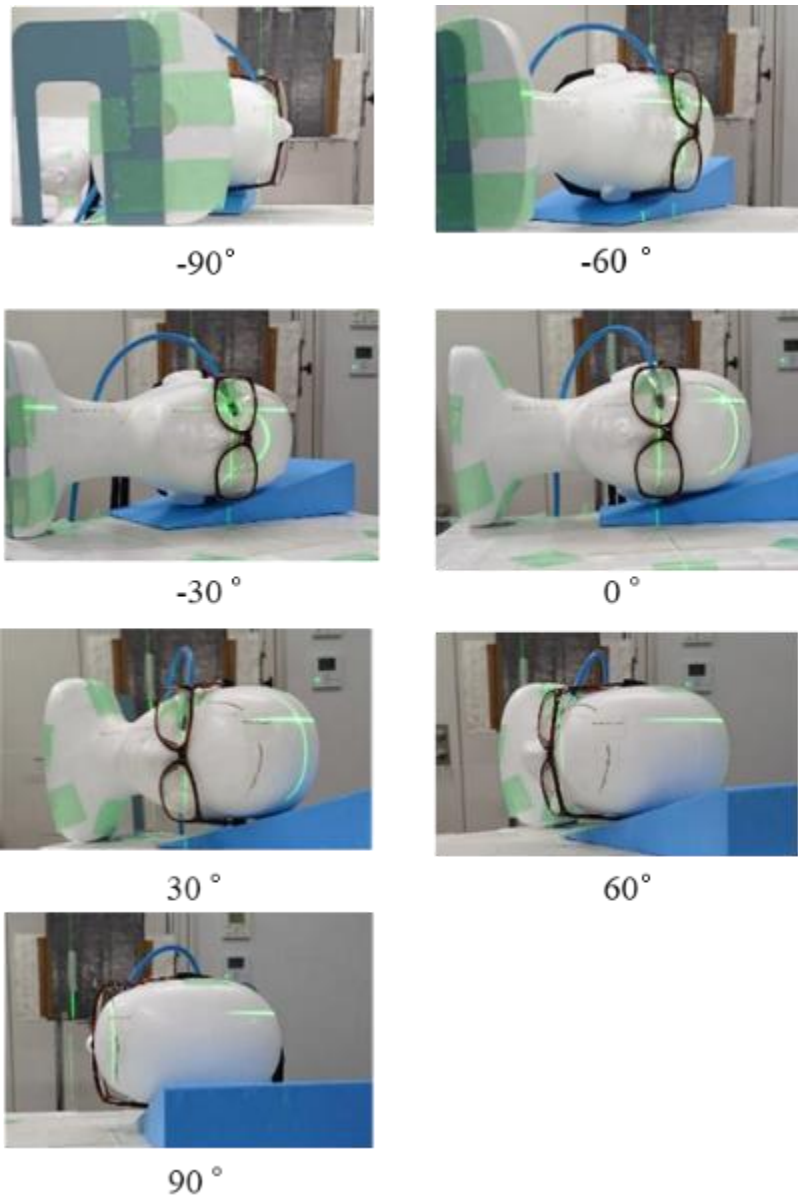


図 5-11 上下方向の遮蔽能力評価の防護メガネおよびファントム配置図

5.3 研究結果

5.3.1 医療機関における不均等被ばくの管理状況のアンケート

作成したアンケート内容を以下に示す。

1. 施設の概要

1. 1-1 貴施設の開設者をお答えください。

1 つだけマークしてください。

- ・ 国 (厚生労働省、国立病院機構、国立高度専門医療研究センター、労働者健康福祉機構、地域医療機能推進機構)
- ・ 国立大学法人
- ・ 公的 1(都道府県、市区町村)
- ・ 公的 2(済生会、日本赤十字、北海道社会事業協会、厚生連、国民健康保険団体連合会)
- ・ 社会保険関係団体(健康保険組合およびその連合会、共済組合およびその連合会、国民健康保険組合)
- ・ 私的 1(医療法人)
- ・ 私的 2(私立学校法人)
- ・ 私的 3(公益法人、社会福祉法人、医療生協、会社、その他)
- ・ 個人

2. 1-2 貴院の病床数をお答えください。

1 つだけマークしてください。

- ・ 0
- ・ 1-19
- ・ 20-100
- ・ 101-200
- ・ 201-300
- ・ 301-400
- ・ 401-500
- ・ 501-600
- ・ 601-700
- ・ 701 以上

3. 1-3 貴施設で行なわれている放射線診療をお答え下さい。(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ X線診断(単純撮影)
- ・ CT
- ・ TV透視検査(内視鏡含む)
- ・ 血管撮影(IVR含む)

- ・ 手術室透視検査
- ・ 核医学診療
- ・ PET 検査
- ・ 放射線治療
- ・ 密封小線源治療
- ・ アイソトープ内用療法
- ・ その他
- ・

4. 1-4 血管撮影件数の年間件数(平成 28 年度)をお答えください。

1 つだけマークしてください。

- ・ 50 件以下
- ・ 100 件以下
- ・ 250 件以下
- ・ 500 件以下
- ・ 750 件以下
- ・ 1000 以下
- ・ 1500 件以下
- ・ 2000 件以下
- ・ 2001 件以上

5. 1-5 TV 透視検査の年間件数(平成 28 年度)をお答えください。

1 つだけマークしてください。

- ・ 50 件以下
- ・ 100 件以下
- ・ 250 件以下
- ・ 500 件以下
- ・ 750 件以下
- ・ 1000 以下
- ・ 1500 件以下
- ・ 2000 件以下
- ・ 2001 件以上

2. 不均等被ばく管理について

6. 2-1 貴施設で誰に不均等被ばく管理(頭頸部用バッジもしくは目の周囲に線量計をつける)を行

うか基準はありますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ 内規やマニュアルなど文書としてある
- ・ 口頭もしくは慣習としてあるが、文書にはない
- ・ ない

7. 2-2 貴施設における被ばく管理対象者の計測方法を教えてください。

1 行につき 1 つだけマークしてください。

	全員バッジ2 個 (頸部+ 胸/腹部)	所属部署に よってはバ ッジ2個	業務内容に よってはバ ッジ2個	ポケット線量計 で頸部バッジの 代用	全員 バッ ジ1個
診療放射線技師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
医師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
看護師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
臨床検査技師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
臨床工学技士	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
その他(薬剤師、 事務員 等)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

8. 2-3 貴施設で不均等被ばく管理を行う際に、ポケット線量計を用いる場合、その理由を教え

てください。(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ 人数が多く、経済的な理由
- ・ 人数が多く、管理的な理由
- ・ 業務的に線量が低いと判断しているため
- ・ その他:

3. 不均等被ばくの線量測定

9. 3-1 平成 28 年度の 1 年間で、水晶体の等価線量が 20mSv/年を超えた方はいますか。

1 行につき 1 つだけマークしてください。

	いる	いない	測定していない	把握していない
診療放射線技師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
医師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
看護師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
臨床検査技師	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
臨床工学技士	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
その他(薬剤師、事務員 等)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10. 3-2 貴施設に異動してきた医療スタッフの前の職場における水晶体被ばく線量(前歴)の把握は

どのように行っていますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ 採用時の健康診断の問診
- ・ 放射線管理担当者による面接で口頭による確認
- ・ 前の職場で発行した書面の提出
- ・ 何もしていない

11. 3-3 貴施設で眼の周囲に装着する線量測定器(VISION や DOSIRIS、小型のガラス線量計、OSL

線量計)などを用いて水晶体の被ばく線量を測定していますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ はい
- ・ いいえ

12. 3-4 胸/腹部用バッジと頸部用バッジを装着するスタッフが正しくバッジを装着できていない

場面を見かけることがありますか。(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ 胸/腹部用バッジと頸部用バッジを逆に装着している
- ・ 胸/腹部用バッジをプロテクタの外側に装着する
- ・ 頸部用バッジをプロテクタの内側に装着する
- ・ バッジを支給しているが、放射線検査時に装着していない

13. 3-5 頸部用バッジを正しくバッジを装着できていないと思われる職種をお答えください。(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ 医師
- ・ 研修医
- ・ 看護師
- ・ 診療放射線技師
- ・ 臨床検査技師
- ・ 臨床工学技士
- ・ その他(薬剤師、事務員 等)

4. 水晶体の防護方法について

14. 4-1 貴施設では各部門に放射線防護メガネを所有されていますか。

当てはまるものをすべて選択してください。

	ある	ない
一般撮影	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TV透視検査(内視鏡含む)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
血管撮影(IVR含む)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CT検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
外部放射線治療(治療計画用CT,シミュレータを含む)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
密封小線源治療	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
核医学診療	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PET検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

15. 4-2 貴施設でご使用中の防護メガネの中で鉛当量がもっとも多いものをお答えください。

1 つだけマークしてください。

- ・ 0.07mmPb
- ・ 0.15mmPb
- ・ 0.75mmPb
- ・ 0.75mmPb より多い

16. 4-3 貴施設ではスタッフが甲状腺用プロテクターを装着していますか。

1 つだけマークしてください。

- はい
- いいえ

17. 4-3 防護メガネ以外で水晶体の被ばく線量を低減するために貴施設で行なっている防護はあ

りますか。(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ TV透視時にオーバーチューブ装置 散乱線防護クロス(フード型)等を使用
- ・ TV透視時に散乱線防護板を使用
- ・ 血管撮影で散乱線防護カーテン(下部)を使用
- ・ 血管撮影で散乱線防護カーテン(患者脇)を使用
- ・ 血管撮影時にアンギオ装置 散乱線防護板を使用
- ・ その他:

18. 4-4 上記質問で「その他」と回答くださった方は具体的にお答えください。

5. 不均等被ばくに関する教育・訓練

19. 5-1 バッジを装着者が受講する必要がある放射線に関する教育・訓練において、不均等

被ばく(水晶体の被ばく)について教育内容として含めていますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ はい
- ・ いいえ

20. 5-2 教育・訓練の場(研修会等)以外で、不均等被ばくに関する啓発は行っていますか。
(複数回答可)

当てはまるものをすべて選択してください。

- ・ 掲示物
- ・ e-Learning
- ・ その他
- ・ なし

21. 5-3 上記質問でその他と回答された方は具体的にどのような啓発活動を行っていますか。

6. その他

22. 6-1 医師や看護師、診療放射線技師、その他スタッフから、不均等被ばくについて測定の要望を受けたことはありますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ はい
- ・ いいえ

23. 6-2 医師や看護師、診療放射線技師、その他スタッフから、不均等被ばくについて相談され

たことはありますか。

1 つだけマークしてください。

- ・ はい
- ・ いいえ

24. 6-3 上記質問で、相談されたことがあると回答した方に伺います。具体的にどのような相談内容でしたか。

25. 6-4 不均等被ばく管理に対する要望・不安等ございましたらご記載ください。

5.3.2 X線 CT 検査や一般撮影等透視を使用しない放射線検査介助時における水晶体被ばくの評価

Vision のシミュレーションによる空中でのエネルギー依存性の評価結果を図 5-12 に示す。

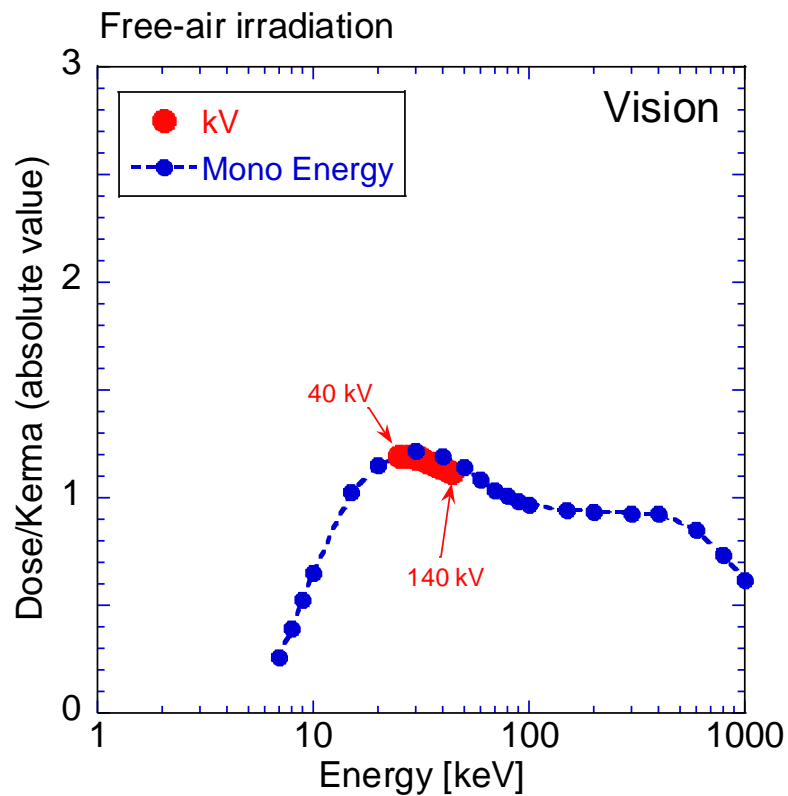


図 5-12 空中での空気カーマに対する Vision 線量比
放射線診断領域の連続エネルギースペクトルの X 線で、1.2 程度の値を示した。

Vision のシミュレーションによるファントム上でのエネルギー依存性の評価結果を図 5-13 に示す。

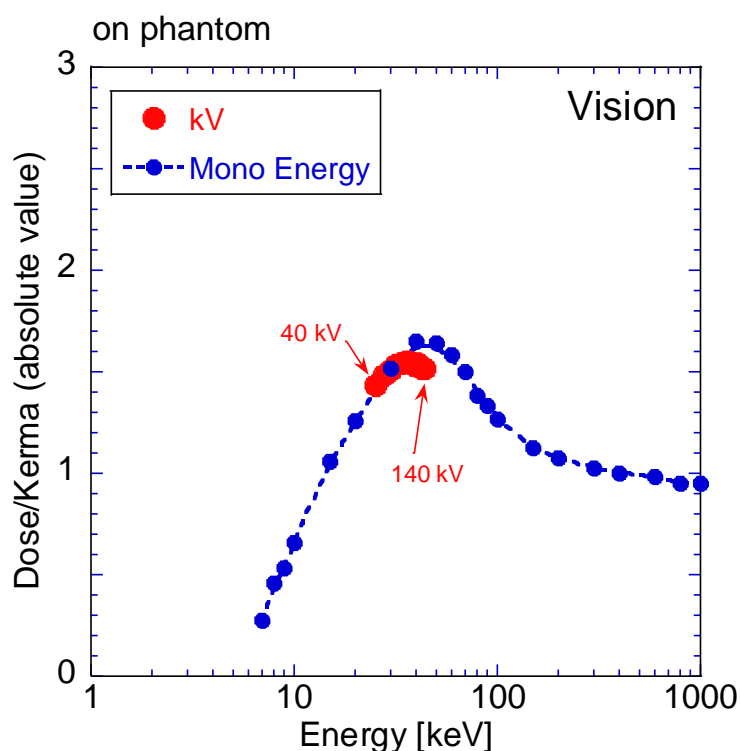


図 5-13 ファントム上での空気カーマに対する Vision 線量比
放射線診断領域の連続エネルギースペクトルの X 線で、1.5 程度の値を示した。

Vision の放射線診断領域でのエネルギー特性、方向特性の結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 Vision の放射線診断領域でのエネルギー特性、方向特性

管電圧	①Vision 正面	②Vision 側面	③AGMS	①/②	①/③	②/③
	空気カーマ					
[kV]	Hp(3) [mSv]	Hp(3) [mSv]	[mGy]		Sv/Gy	Sv/Gy
80	18.5	16.6	13.4	1.12	1.38	1.23
120	35.6	31.6	26.9	1.13	1.32	1.17

空気カーマ 1 mGy 当たりの 3mm 線量当量は、80 kV に対する 120 kV の比は 1.05 だった。正面と側面での感度差は 10%程度 であった。ISO 4037-1 で示されている 3mm 線量当量-空気カーマ換算係数は、実効エネルギー 33 keV で、1.29 となっており、今回の結果は矛盾のない値を示した。

複数の施設で実施した一般撮影（救急撮影、ポータブル、ICU を含む）の介助、撮影における 1 ヶ月当たりの医療従事者の水晶体線量の測定結果を、表 5-2 に示す。

表 5-2 一般撮影（救急撮影、ポータブル、ICU 含）の介助、撮影における 1 ヶ月当りの医療従事者の水晶体線量

施設 ID	線量計ID	3mm線量当量 [mSv]	介助、撮影回数	1介助当りの被ばく [mSv]	防護メガネ	職種	備考
1	ウカ ⁷ 001	0.2	213	0.001	HF-350 0.07mmPb	診療放射線技師	一般撮影担当
	ソカ ⁷ 001	0.8		0.004			
	ウカ ⁷ 002	0.3		0.001			
	ソカ ⁷ 002	0.8		0.004			
2	ウカ ⁷ 009	0.1	258	0.000	HF-350 0.07mmPb	診療放射線技師	ICU担当
	ソカ ⁷ 009	0.2		0.001			
	ウカ ⁷ 010	0.1		0.000			
	ソカ ⁷ 010	0.2		0.001			
2	ウカ ⁷ 011	0.1	36	0.003	HF-350 0.07mmPb	診療放射線技師	一般撮影担当
	ソカ ⁷ 011	0.1		0.003			
	ウカ ⁷ 012	0.1		0.003			
	ソカ ⁷ 012	0.1		0.003			
4	ウカ ⁷ 019	0.4	102	0.004	HF-350 0.07mmPb	診療放射線技師	一般撮影担当
	ソカ ⁷ 019	-		-			
	ウカ ⁷ 020	0.4		0.004			
	ソカ ⁷ 020	1.2		0.012			
6	ウカ ⁷ 033	0.1	162	0.001	PT-99AL-S 0.75mmPb	診療放射線技師	一般撮影、ポータブル、救急撮影担当
	ソカ ⁷ 033	0.7		0.004			
	ウカ ⁷ 034	0.1		0.001			
	ソカ ⁷ 034	0.7		0.004			
6	ウカ ⁷ 035	0.5	229	0.002	PT-99AL-S 0.75mmPb	診療放射線技師	入院患者・救急一般撮影担当
	ソカ ⁷ 035	5.1		0.022			
	ウカ ⁷ 036	0.6		0.003			
	ソカ ⁷ 036	6.0		0.026			

医療機関や担当者により介助、撮影回数が異なるものの、1 介助当りの防護メガネ外側の 3mm 線量当量は、1 から 26 μ Sv となった。防護メガネの鉛当量が大きいくほど遮蔽能力が高いことがわかった。

CT 検査の介助における 1 ヶ月当りの医療従事者の水晶体線量の測定結果を、表 5-3 に示す。

表 5-3 CT 検査での介助、撮影における 1 ヶ月当りの医療従事者の水晶体線量

施設ID	線量計ID	3mm線量当量 [mSv]	介助、撮影 回数	1介助当りの被ばく [mSv]	防護メガネ	職種	備考
1	ウチガワ 003	0.4	2	0.200	HF-350 0.07mmPb	診療放射 線技師	胸部一骨盤CT
	ソトガワ 003	0.6		0.300			
	ウチガワ 004	0.4		0.200			
	ソトガワ 004	0.8		0.400			
4	ウチガワ 017	0.3	3	0.100	HF-350 0.07mmPb	診療放射 線技師	救急頭部CT対応
	ソトガワ 017	0.6		0.200			
	ウチガワ 018	0.3		0.100			
	ソトガワ 018	0.6		0.200			
6	ウチガワ 039	1.0	5	0.200	HF-350 0.07mmPb	診療放射 線技師	小児頭部CT対応
	ソトガワ 039	3.2		0.640			
	ウチガワ 040	0.8		0.160			
	ソトガワ 040	2.4		0.480			
6	ウチガワ 037	2.1	28	0.075	HF-350 0.07mmPb	看護師	全身のCT対応
	ソトガワ 037	6.3		0.225			
	ウチガワ 038	2.2		0.079			
	ソトガワ 038	-		-			

CT 検査の介助では、防護メガネの外側で 1 介助当り 200 から 640 μ Sv と、一般撮影での介助に比べ 100 倍近く高い結果となった。防護メガネによる遮蔽効果はおよそ半分程度であった。

ファントム実験による胸部撮影、腹部撮影介助時の水晶体線量の測定結果を表 5-3、4 に示す。

表 5-4 胸部撮影（120 kV）の介助時の従事者の水晶体線量

線量計位置	1 介助当りの 3 mm線量当量[mSv/5mAs]	20 mSv に到達する回数
右眼ウチ	0.003	6154
右眼ソト	0.008	2667
左眼ウチ	0.004	5333
左眼ソト	0.013	1600

表 5-5 腹部撮影（80 kV）の介助時の従事者の水晶体線量

線量計位置	1 介助当りの 3 mm線量当量[mSv/30mAs]	20 mSv に到達する回数
右眼ウチ	0.030	667
右眼ソト	0.113	178
左眼ウチ	0.033	606
左眼ソト	0.180	111

胸部撮影での介助に対し、腹部撮影の介助では晶体線量が 10 倍以上高くなった。管電流-時間積の違いに加え、胸部は内部が肺のような低密度の材質であるのに対し、腹部は比較的高密度の者が充填されていることが影響していると考えられる。

5.3.3 防護メガネの照射方向別の遮蔽能力について評価

鉛ガラスによって遮へいされている角度において 0.75 mmPb の PT-53 は約 95%、0.15 mmPb の EC-03 は約 75 %、0.07 mmPb の HF400-S は約 60 %の遮へい率となった。このことより鉛ガラスによって遮へいされている角度においては鉛当量が大きいほど遮へい率が高くなった。

左右方向においての 3 つの防護メガネそれぞれの遮へい率をまとめたグラフを図 5-14 に示す。

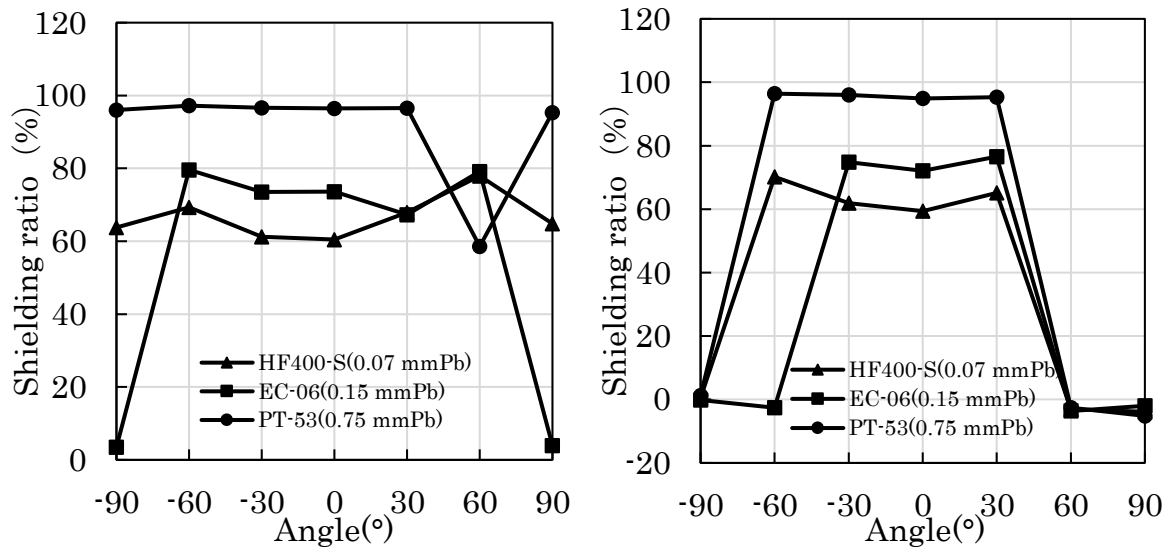


図 5-14 上下および左右方向から X 線を照射した際の、防護メガネの水晶体位置の遮蔽効果

HF400-S は鉛当量が 0.07 mmPb と今回用いた 3 つの防護メガネの中で最も小さい。また、側方までしっかり鉛ガラスが配置されている。そのためどの角度方向においても約 60 %以上の遮へい率をであった。

EC-06 は鉛当量が 0.15 mmPb である。また鉛ガラスが両眼の中心にしか配置していない。そのため-90°、90°において遮へい率が約 5 %以下と急激に低下した。

PT-53 は鉛当量が 0.75 mmPb と 3 つの防護メガネにおいて最も大きい。また側方にも鉛ガラスが配置されている。そのためほとどの角度方向においても約 95 %以上の遮へい率を持つことが分かった。ただし正面の鉛ガラスと側方の鉛ガラスをつなぐフレーム部分を通ると遮へい率が低減する。今回の測定では 60°において、これが原因と考えられる遮へい率の低減が見られた。

頭部ファントムの水晶体位置に金属マーカーをつけ、各防護メガネを装着した状態での X 線画像を図 5-15、16 に示す。

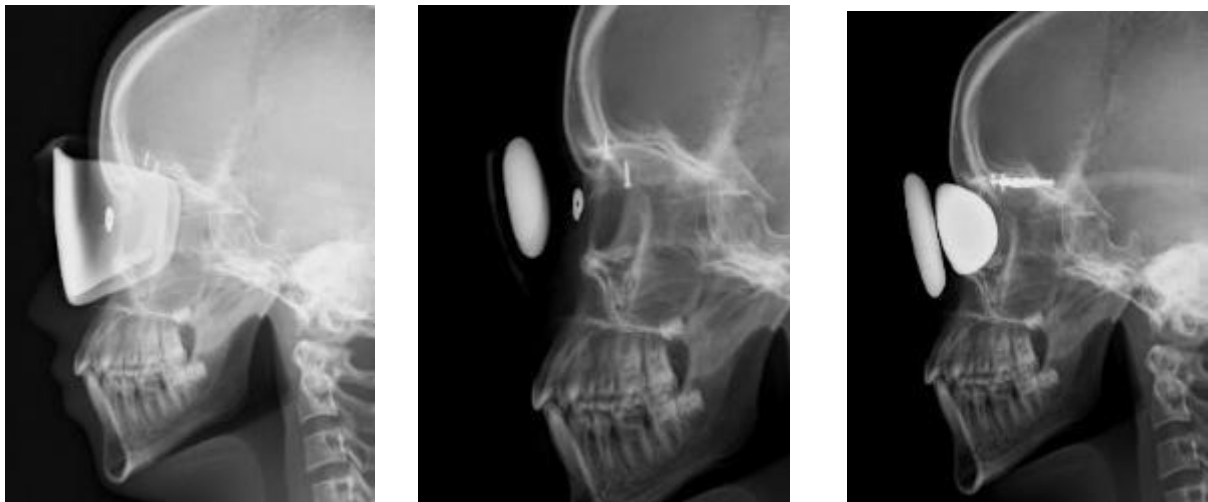


図 5-15 側面から照射した際の防護メガネと水晶体の関係。左から、HF400-S、EC-06、PT-53

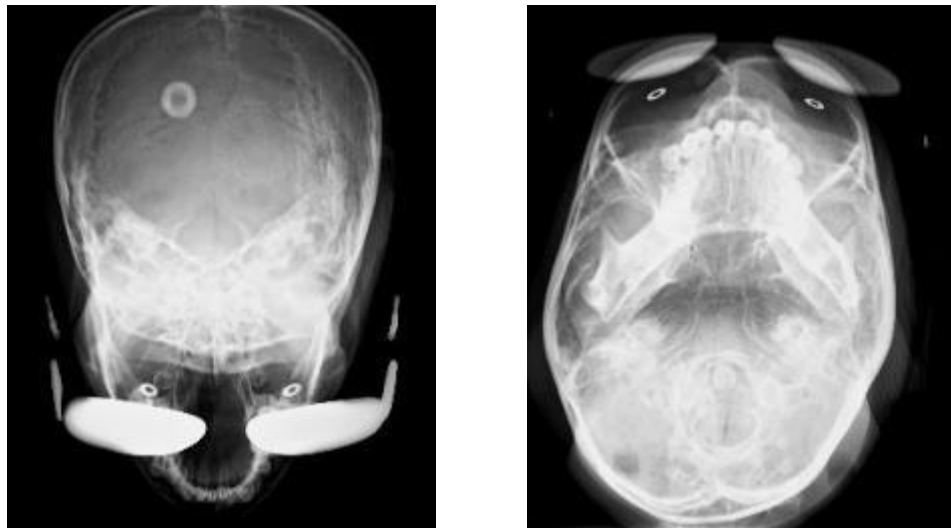


図 5-16 上下方向から照射した際の防護メガネ（PT-53）と水晶体の関係。左：上から、右：下からの照射

5.4 考察

5.4.1 医療機関における不均等被ばくの管理状況のアンケート

今回、全国の不均等被ばく管理の実態を明らかにするためにアンケートを計画した。第3回 眼の水晶体の放射線防護検討部会 「資料2 個人線量測定サービス機関の統計データにみる眼の水晶体線量の分布状況」によると、医療分野の中で不均等被ばく管理をしている従事者は30%程度であると報告されている。白内障のしきい線量引き下げや、水晶体線量限度の引下げ勧告といった情報を、放射線診療従事者がどこまで把握しているか、また少ない場合には積極的な教育訓練等を活用し防護対策を啓発する必要がある。

5.4.2 X線CT検査や一般撮影等透視を使用しない放射線検査介助時における水晶体被ばくの程度を評価

Visionによる放射線診断領域のX線での特性は良好であることを確認した。ただし、Visionは防護メガネのレンズの真裏に装着するタイプであり、この場合はレンズの遮蔽効果が確実に反映される。しかし現実には、防護メガネと水晶体の間にすき間があり、この間に入射した散乱線の影響で、実際の水晶体線量はより高くなる可能性があり、Visionの値は過小評価となりうる。なるべく安全側で正確な水晶体線量の評価のために、線量計の適切な配置の検討が課題となる。

一般撮影における医療従事者の介助時の水晶体被ばくは、一介助あたり数 μSv であった。医療機関の規模や診療科、患者数により異なるが、1月当たり100回を超える介助数となることもあり、防護メガネ外では1月あたり1 mSv を超えることもあった。一般撮影において基本的に撮影時に入室することはないが、特に入院患者で自立が困難であったり、手術後、救急撮影時には、医療安全の観点からも患者の転倒、転落を避けるために医療従事者は細心の注意を払う必要があり、被ばくする機会も多くなる。その際にいかに作業に支障なく適切な防護をすることが重要となる。

CT検査においては、一般撮影ほど介助数は多くないものの、水晶体被ばくは1介助当たり数100 μSv となった。これは患者の転落防止や静止、呼吸管理のために散乱線源となる患者に近づく必要があり、大線量で数秒間照射するため、検査時間は短くても、高い被ばくとなる。介助回数によっては年間20 mSv を超える可能性もあり、防護メガネを装着するなど適切な防護が必要である。

ファントム実験による、胸部撮影、腹部撮影介助時の水晶体線量は、上記の実態調査と類似した結果となった。腹部撮影では1介助当たり100 μSv 近くの水晶体線量を示したが、実態調査では、様々な部位の介助を実施し、散乱線源となる患者の形状が腹部より小さいことなどが結果に影響していると考えられる。

今回の結果より、医療分野で以前から問題となっていたIVR術者の水晶体被ばく以外でも、20 mSv/y を超える水晶体線量となる可能性があることが明らかになった。水晶体の放射線防護に対して短時間の手技や介助でも防護メガネを使用することを推奨される。また、上記に出てきた「資料2 個人線量測定サービス機関の統計データにみる眼の水晶体線量の分布状況」によると、不均等被ばく管理状況にある従事者が均等被ばく管理として登録されていると3から10倍近く過小評価となっている可能性がある。このことから水晶体被ばく管理をするには、防護衣を着て介助行為をする可能性がある場合には、不均等被ばく管理を徹底する必要がある。

5.4.3 防護メガネの照射方向別の遮蔽能力について評価

左右に鉛ガラスが配置されているHF400-S、PT-53では -90° から 90° において、ほぼ一定の遮へい率を得た。これは図5-15のX線画像からわかるように 90° においてでもHF400-S、PT-53では鉛ガラスによって遮へいされていることが確認できる。一方EC-06においては、左右に鉛ガラスが配置されておらず、鉛ガラスの大きさも小さいため遮へいされていないことが確認

できる。しかし前述したとおり、PT-53の60°でのように防護メガネのフレームなどが遮へい率の低下の原因となりうる。

3つの防護メガネは上下方向においていずれも60°近くから遮へい率が大きく低下した。これらの要因として図5-16のX線画像を見てわかるように防護メガネを装着すると、通常顔面との間に隙間ができてしまうことがあげられ、これらの要因に関して3つの防護メガネいずれにおいても十分に加味されていない。またEC-06においては-60°においても遮へい率が大きく低下した。これはEC-06の鉛ガラスの上下方向の長さが短いことが要因としてあげられる。

本実験において鉛ガラスによって遮へいされている角度においては、鉛当量が大きいくほど遮へい率が高くなることが分かった。このことより、鉛当量による遮へい率が大きくなることを最大限効果的にするために、防護メガネの使用者は線源を最も鉛当量に準じた遮へい率を発揮する正面に位置させることを意識することが必要である。

5.5 次年度の活動概要

平成30年度は以下の研究を展開する。

5.5.1 不均等被ばく管理実態調査アンケートの集計と解析

アンケート結果を基に、国内の不均等被ばく管理の実態を明らかにする。

5.5.2 実態調査結果の整理と検討

平成30年3月までの測定結果をまとめ、結果を評価する。介助の種類ごとにどの程度被ばくするか、介助時の注意点や適切な防護方法について検討する。

5.5.3 過去の水晶体被ばく、防護に関する文献調査と本研究の取りまとめ

ICRP publ.118が勧告されて以降、国内外を問わず多くの施設や研究機関で水晶体の被ばくや防護に関する研究が実施され報告されている。これらの文献の内容を詳細に調査し、検査別の被ばく量や、頸部モニタから水晶体等価線量への換算方法など水晶体の被ばく管理に必要な情報を取りまとめる。

5.6 研究発表

平成30年3月20日	日本保健物理学会シンポジウム
平成30年5月20-23日	AOCR-5
平成30年6月29, 30日	日本保健物理学会研究発表会

参考文献

- 1) ICRP Publication 118 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, 3, 313 – 327 (2012).
- 2) 壽藤紀道: 個人線量測定サービス機関の統計データにみる目の水晶体線量の分布状況, 第三回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会, 2017,
<http://www.nsr.go.jp/data/000205420.pdf>
- 3) IAEA, Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, TECDOC No. 1731 (2014).
- 4) F.Vanhavere, E.Carinou, G.Gualdrini, et. al, Optimization of radiation protection of medical staff, EURADOS report 2012–02 (2012).
- 5) E. Vano, N. Kleiman, A. Duran, M. Romano-Millerand M. Rehai, Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments, J. Vasc. Interv. Radiol., 24, 197–204 (2013).
- 6) 赤羽正章: 放射線診断領域における放射線防護に関する研究, 厚生労働科学研究, 1-9 (2015).
- 7) JIS Z 4501: X線防護用品類の鉛当量試験方法, (2011).

6. 最後に

本研究では、わが国の規制への新しい水晶体の等価線量限度を取入れるにあたり、標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な防護や管理を行うための方法を提案するため、原子力・医療分野等における放射線業務従事者の水晶体の等価線量の測定やファントムを用いた実験的研究、過去文献調査等を実施した。

今年度は、いずれの課題に対しても、研究参加者及び研究協力者から測定や解析への協力・支援、助言等を得て、主任研究者及び分担研究者は、概ね計画通りに研究を進めることができた。しかしながら、より良い提案を行うためには、引き続き各分野でのデータの蓄積が必要である。

次年度においても、主任研究者及び分担研究者は、課題解決に向けて、相互に協力、情報を共有して各課題に取り組む。また、今年度と同様に研究参加者や研究協力者の支援、協力、助言等を得るとともに、線量測定を実施する機関（事業者や施設）、関連する学協会、関連研究機関等にも助言を求め、計画に沿って研究を進めるものとする。

また、今年度及び次年度の結果を踏まえ、主任研究者、分担研究者等がともに、標準的な水晶体の等価線量モニタリングの在り方や適切な管理及び防護方法を検討し、ガイドライン等の作成に役立つ提案を行うものとする。

