

平成 30 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

藤田医科大学

平成 31 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	研究実施内容.....	1- 3
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.....	1- 3
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- 4	
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	標準的な水晶体等価線量モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討・提案.....	1- 6
1.4	協力及び連携.....	1- 6
1.5	研究全体の進捗状況の把握等.....	1- 6
1.6	学会等での成果発表実績一覧.....	1- 7
	参考文献.....	1- 9
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- 3
2.2.1	原子力発電所.....	2- 3
2.2.2	非破壊検査.....	2- 4
2.3	測定方法.....	2- 7
2.3.1	作業場の線量率の測定方法.....	2- 7
2.3.2	γ線スペクトル測定方法.....	2- 7
2.3.3	従事者の個人線量計着用試験方法.....	2- 7
2.3.4	倫理面への配慮.....	2- 8
2.4	研究結果及び考察.....	2-11
2.4.1	1F以外の原子力発電所における着用試験実施場所の線量率の測定.....	2-11
2.4.2	従事者の個人線量計着用試験.....	2-15
2.4.3	非破壊検査.....	2-18
2.4.4	胸部線量と頭部線量の関係.....	2-19
2.5	結論.....	2-20
	謝辞.....	2-22
	参考文献.....	2-23
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	β 線マスク遮へい実験： β 線スペクトロメータによる測定.....	3-10
3.2.4	β 線マスク遮へい実験：頭部ファントムと個人線量計による測定.....	3-10
3.3	研究結果.....	3-14
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.....	3-14
3.3.2	作業現場における γ 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	3-16
3.3.3	β 線のマスク遮へい実験（ β 線スペクトロメータによる測定）.....	3-33
3.3.4	β 線のマスク遮へい実験（頭部ファントムと個人線量計による測定）.....	3-36
3.4	考察.....	3-38
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	3-38
3.4.2	作業現場における γ 線スペクトル測定とファントムを用いる線量計の照射実験	3-39
3.4.3	β 線のマスク遮へい実験.....	3-42
3.5	結論.....	3-43
3.6	研究発表.....	3-45
3.7	謝辞.....	3-46
	参考文献.....	3-46
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	対象診療科と職種.....	4- 2
4.2.2	計測方法.....	4- 3
4.2.3	教育効果の検証.....	4- 4
4.2.4	診療科横断ガイドライン作成に向けた準備.....	4- 5
4.3	研究結果.....	4- 5
4.3.1	計測結果のまとめ.....	4- 5
4.3.2	被ばく線量低減対策.....	4-10
4.3.3	効果的な教育.....	4-11
4.3.4	診療科横断ガイドライン作成に向けた取り組み.....	4-12
4.4	考察.....	4-16
4.5	結論.....	4-17
4.6	研究発表.....	4-17

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- 2
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- 2
5.2.2	透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価.....	5- 6
5.3	研究結果.....	5- 9
5.3.1	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- 9
5.3.2	透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価.....	5-11
5.4	考察.....	5-15
5.5	結論.....	5-16
	参考文献.....	5-17
	参考資料.....	5-18
6.	標準的な水晶体の等価線量モニタリング手法と適切な管理、防護策に対する提案	6- 1
6.1	意見具申内容を補完する提案.....	6- 2
6.1.1	既存のマニュアル、文献等の記載.....	6- 3
6.1.2	意見具申の趣旨を踏まえた眼の水晶体の等価線量を算定するための線量計の測定 位置の考え方の提案.....	6- 5
6.2	各分野における水晶体の線量管理・防護に関する提案.....	6- 8
6.2.1	水晶体線量モニタリング・測定の考え方.....	6- 8
6.2.2	原子力発電所.....	6-11
6.2.3	原子力研究施設.....	6-13
6.2.4	医療分野 透視手技・核医学診療・放射線治療.....	6-13
6.2.5	医療分野 一般撮影・CT介助、看護分野の観点から.....	6-13
6.2.6	水晶体等価線量モニタリングに用いる線量計.....	6-14
6.2.7	業務の分配による被ばく低減.....	6-14
	参考文献.....	6-15
7.	最後に.....	7- 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4月にICRPが計画被ばく状況下での職業被ばくに対する水晶体の等価線量限度に関する声明を発表後¹⁾、これに関連したさまざまな国際的な動きのある中、2014年にIAEAがICRPの新しい水晶体の等価線量限度を取り入れた国際安全基本原則(BSS)²⁾を発刊し、2018年には2013年に発刊した技術報告書(TECDOC-1731)³⁾に代わる安全指針(GSG-7)として「職業上の放射線防護」を発刊した⁴⁾。また、欧州連合(EU)では2013年に、2018年2月までに加盟国の規制へ水晶体の線量限度を取入れるようにEURATOM指令⁵⁾が出され、英国やノルウェー等が期限までに規制に取り入れたことについては、昨年度のわれわれの成果報告書で述べたとおりである⁶⁾。その後、2018年6月にはスウェーデンやフランスも規制改定を行った^{7,8)}。スウェーデンにおいては2019年1月からすでに施行され、フランスにおいては2023年7月から施行予定である。また、カナダでも、2016年にカナダ原子力安全委員会が水晶体の等価線量限度として、ICRPと同じ50 mSv/年かつ100 mSv/5年を示した **Technical Note: Proposed Changes to the Equivalent Dose Limit for Lens of the Eye** を取りまとめた後⁹⁾、最近になって、水晶体の等価線量限度を規制へ取入れるために、webinarを開催し、国際的な動向や各国の状況等の本格的な調査を開始した¹⁰⁾。

わが国の関連行政機関においては、昨年度の報告書に述べたとおり2018年(平成30年)3月に放射線審議会が、関係行政機関に向けて、眼の水晶体の放射線防護検討部会がとりまとめた報告書「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」を参考に所要の措置を講ずるよう意見具申を行った¹¹⁾後、第142回の審議会においてその後の関係行政機関の検討状況が提示された¹²⁾。これによると、2021年(平成33年)をめどに各関連規制に取り入れることを検討しているとのことである。

2018年(平成30年)12月には、厚生労働省が「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」を開催し、水晶体等価線量限度、測定及び算定方法の電離放射線障害防止規則(電離則)等の見直し及び、緊急時の限度、除染等業務者の限度、しきい線量等について、電離則における取扱いに関する検討を開始したところである¹³⁾。

本研究は、平成29年度より2年間の予定で、放射線安全規制研究戦略的推進事業の5つの重点安全研究テーマ研究のうち、③水晶体の等価線量限度の国内規制取入れ・運用のための研究の一環として実施されたものである。

われわれは、原子力分野、医療分野等の実態調査を踏まえ、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よう、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、適切な管理及び防護策の提案することを目指して、4つの課題に取り組んできた。

本年度は研究期間2年間の最終年度となる。各研究課題の成果を取りまとめるとともに、これまでの研究成果を踏まえ、関連規制への提案と標準的な水晶体線量モニタリングのあ

り方、適切な防護や管理に関する提案を行った。本報告書では、これらを総括して報告することとする。

1.2 研究課題及び研究体制

研究課題及び研究体制については、平成 29 年度より一部研究協力者の一部変更があったものの、実施計画や内容に変更はなく、計画通り遂行した。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。なお、本年度の各研究班の研究協力者等については、各章のはじめに記載した通りである。

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

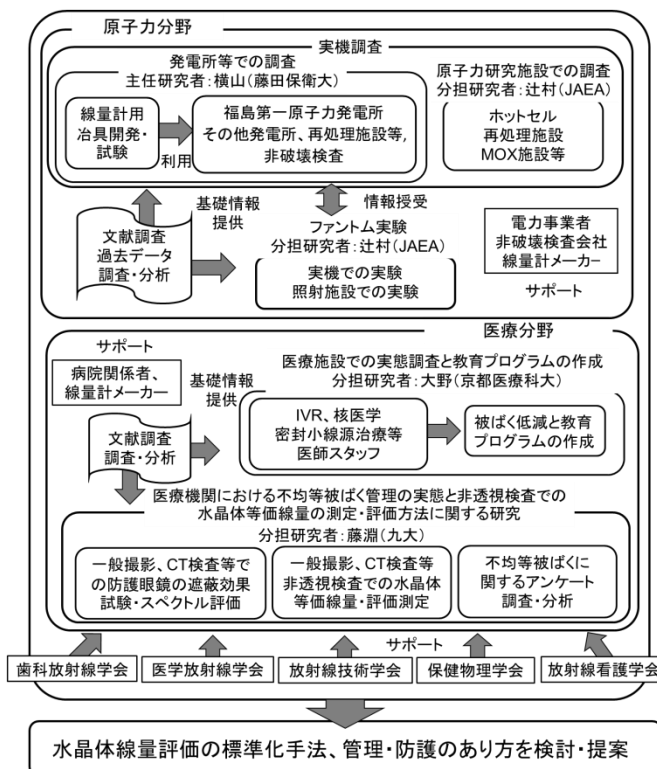


図 1-1 実施体制図 (全体)

1.3 研究実施内容

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

平成 29 年度は、原子力施設で線量測定を行うにあたり、線量計装着方法の検討をおこなうとともに、原子力施設等の従事者のうち、不均等かつ高線量被ばくをとまなう可能性のある作業として以下の項目を抽出した。

①事故後の廃止措置を行っている東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（1F）における汚染水タンク解体（ β 線場）及び原子炉建屋周辺での作業（ γ 線場）、②石油コンビナート等での X線及び γ 線源を使用した放射線透過検査を実施している非破壊検査作業について従事者の水晶体の等価線量測定を実施した。また、③通常の運転を行っている原子力発電所（PWR）の定期検査時の作業として、高線量かつ/または不均等被ばくが予想される原子炉容器周辺作業、蒸気発生器周辺での作業等を抽出し、個人線量計着用試験を開始した。併せて、①及び③では作業場の線量率測定や γ 線エネルギースペクトル測定も実施した。①での線量率測定については、分担研究者である辻村らが測定した結果を用いて解析を行った。なお、平成 29 年度の成果報告書では、①及び②の結果を中心に成果を報告した。③については、分析中であったため、本年度の報告書において成果を報告する。

平成 29 年度は、文献調査も実施し、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 等で収集した。

平成 30 年度は、①通常運転を実施している原子力発電所（PWR）での追加調査のほか、②運転停止中の原子力発電所（BWR）の定期検査時における調査及び③廃止措置を実施している発電所（BWR）における追加的な調査を行った。作業場の線量率測定のほか、従事者への個人線量計着用試験では、頭部及び胸部に着用した線量計から 1 cm 線量当量（Hp(10)）、3 mm 線量当量（Hp(3)）及び 70 μ m 線量当量（Hp(0.07)）を算定し、Hp(10)、Hp(3)及び Hp(0.07)の関係、頭部 Hp(3)/胸部 Hp(10)の比に関するデータを取得するとともに、これらの値と作業場の線量率や γ 線エネルギースペクトル測定による核種同定及び散乱線の影響評価の結果との関係を得た。④1Fの原子炉建屋周辺（ γ 線場）における作業についても、昨年度に実施した頭部及び胸部位置での測定に加え、頸部位置での線量測定も実施し、原子力発電所における水晶体等価線量測定に適した線量計着用位置の検討を行った。⑤非破壊検査作業の従事者に対する着用試験についても追加調査を実施した。

さらに、主任研究者の実施項目として挙げていた、標準的な水晶体等価線量モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討と提案についても、分担研究及び研究協力者とともに実施した。概要については、1.3.5 に述べる。

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

平成 29 年度の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。

平成 30 年度は、引き続き日本原子力研究開発機構におけるこれまでの被ばく記録の調査、東京電力福島第一原子力発電所作業現場でのファントム実験、標準校正場における頭部ファントムに取り付けた個人線量計と β 線スペクトロメータを用いた測定によって東電 1F で使用されている全面マスクの β 線遮へい性能の評価を行った。

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(生体を傷つけること)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不可欠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 150 mSv から 20 mSv 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。

平成 29 年度は、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。

平成 30 年度は整形外科の診療所での計測を追加し全計測結果をまとめた。その結果 CT 透視下の手技と、消化器内科の手技を行う医師は、適切な防護板とラバーシールドの使用により患者の散乱線を防護することが、年間 20 mSv 以下の被ばくを担保するには必須と考えられた。また、整形外科領域を対象とした医療スタッフへの効果的な教育手法としては、施設共通の資料ではなく、教育対象者が実際に利用する装置に置き換えた教材の利用が理解を促進するとの結果を得た。これらの調査結果を周知する目的で医療の安全に関するフォーラムを開催し、医療関係者、放射線防護の専門家によるパネルディスカッションを開催した。また、放射線診療に関わる 14 の学協会に呼びかけて診療科横断的なガイドラインの作成を決定し、予備的な会合を開いてガイドラインの骨子案を作成した。

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、実際には 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っているのが現状である。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した。

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比較的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やむを得ず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。平成 29 年度は、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。

平成 30 年度は、平成 29 年度に作成した、「医療機関を対象とした医療施設における不均等、特に水晶体被ばく管理の実態調査」項目について web アンケートを実施した。結果、施設により不均等被ばく管理の基準が統一されておらず、統一した不均等被ばく管理の基準が現場で求められていることが明らかになった。また、血管造影だけでなく、透視検査室をはじめ他のモダリティ（医療機器）での被ばくに対する防護策は浸透しておらず、対策を進めることの必要性が明らかになった。

透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価においては、CTでのファントム測定の実施と、モンテカルロシミュレーションによる検査部位別CT検査室内および一般撮影時の検査室内散乱線分布および線量の評価を実施した。検査部位により、同じ介助位置でも線量に差がみられ、特に腹部CTではガントリの反対側に回った際に被ばく量が低減した。モンテカルロシミュレーションでもファントム測定と同様の傾向が確認された。散乱線の広がりや3次元的に確認することで、被ばく線量の低い介助位置を事前に把握できることから、被ばく低減に有効であることが明らかとなった。

1.3.5 標準的な水晶体等価線量モニタリング手法と適切な管理、防護策の検討・提案

上述した研究により取得した成果及び知見等を踏まえ、以下の提案を行った。

- ① 意見具申内容を補完する提案
- ② 標準的な水晶体モニタリング、適切な防護、管理方法（選択肢）の提案

①では、意見具申では水晶体の等価線量を算定するための線量計の装着位置について具体的な言及がなかったことを踏まえ、政策立案者向けに意見具申を補完するものとして、水晶体の等価線量をより正確に算定することが必要となると見込まれる場合、現行法令で義務付けられている装着位置に加え、「眼の近傍」で測定した結果を用いて眼の水晶体の等価線量を算定すること、また、既存のマニュアルや国際的な基準、ガイドライン等の記載をもとに「眼の近傍」の定義についても提案した。

②では、各分野における水晶体等価線量の実態調査の成果を踏まえ、事業者や従事者が水晶体の等価線量限度を遵守するために、水晶体線量モニタリングや各分野における防護及び管理方法について提案した。

1.4 協力及び連携

昨年度と同様に、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と意見交換を行い、助言を求めた。

1.5 研究全体の進捗状況の把握等

研究進捗状況については、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（PO）、PO 補佐に対し、進捗報告を月に1回程度行い、助言を得た。概ね計画通り研究を遂行できたものと考えられる。

昨年度の研究成果は、平成30年3月に開催した日本保健物理学会のシンポジウムで報告するとともに、平成30年5月のアジアオセアニア放射線防護協会（AOCRP-5）、6月に開催された日本保健物理学会の研究発表会等において発表した。今年度の成果については、平成30年10月の日本放射線技術学会、第55回アイソトープ・放射線研究発表会、平成30年12月の第17回日本安全管理学会において発表を行った。また、平成31年3月に開催される日本原子力学会2019年春の年会においても発表を行う予定である。本研究の成果報告実績を以下に示す。

1.6 学会等での成果発表実績一覧

平成 29 年度

1. 横山須美, 全体概要, 日本保健物理学会シンポジウムⅡ, 2018年3月 東京.
2. 横山須美, 原子力発電所等における水晶体の等価線量の実態調査, 日本保健物理学会シンポジウムⅡ, 2018年3月 東京.
3. 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, 2018年3月 東京.
4. 大野和子, 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, 日本保健物理学会シンポジウムⅡ, 2018年3月 東京.
5. 五十嵐隆元, 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日本保健物理学会シンポジウムⅡ, 2018年3月 東京.

平成 30 年度

1. Y. Hirata, T. Fujibuchi et al., Shielding effect of the crystalline lens by direction by radiological protection glasses, AOCRP 5 2018年5月, メルボルン.
2. 横山須美他, 東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体の等価線量評価(1): 概要及び個人線量測定結果, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月 札幌.
3. 江崎巖他, 東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体の等価線量評価(2): 個人線量測定概要と線量計比較, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月 札幌.
4. 吉富寛他, 東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体の等価線量評価(3): 光子スペクトル測定に基づく水晶体線量評価, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月 札幌.
5. 星勝也他, 東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体の等価線量評価(4): ベータ線スペクトル測定に基づく水晶体線量評価, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月 札幌.
6. 辻村憲雄他, 東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体の等価線量評価(5) 頭部ファントムを用いた水晶体用個人線量計の光子照射試験, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月 札幌.
7. 藤淵俊王他, 放射線防護メガネによる入射角度別の水晶体遮蔽効果の検証, 日本保健物理学会第51回研究発表会, 2018年6月, 札幌.
8. 辻村憲雄, 様々な方向から放射線が入射する場合の個人線量計の指示値の解釈について, 第55回アイソトープ・放射線研究発表会, 2018年7月, 東京.
9. 堀田昇吾他, 医療施設における不均等被ばく管理の実態調査, 第46回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2018年10月, 仙台.
10. 辻村憲雄他, 水晶体モニタリングを行うべき線量レベルについて, 日本安全管理学会第17回学術大会, 2018年12月, 名古屋.
11. 大野和子, 放射線診療従事者の水晶体被曝管理に関する研究第321回日本医学放射線学会関西地方会 2019年2月, 大阪.

12. 大野和子他，パネル討論、水晶体被ばく線量引き下げに伴う個人被ばくの課題医療放射線防護連絡協議会第40回放射線の安全利用フォーラム，2019年2月，東京.
13. 横山須美他，原子力発電所定期検査時の放射線業務従事者の水晶体被ばく，日本原子力学会2019年春の年会，2019年3月，水戸.
14. 星勝也他，東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体等価線量評価法の検討（1）人体形状ファントムを用いたフィールド実験，日本原子力学会2019年春の年会，2019年3月，水戸.
15. 青木克憲他，東電福島第一原子力発電所作業者の水晶体等価線量評価法の検討（2）ファントム実験と作業着着用実験の関係，日本原子力学会2019年春の年会，2019年3月，水戸.

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) International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 (2014).
- 3) International Atomic Energy Agency, Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye, IAEA TECDOC 1731 (2013).
- 4) International Atomic Energy Agency, IAEA General Safety Guide No.GSG-7 Occupational Radiation Protection (2018).
- 5) 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>
- 6) 平成29年度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(2018)。
- 7) Swedish Radiation Safety Authority, New regulations introduce obligatory notification (2018), 2019年3月11日閲覧.
<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/new-regulations-introduce-obligatory-notification/>
- 8) Decree No. 2018-437 of 4 June 2018 on the protection of workers against the risks of ionizing radiation (2018), 2019年3月11日閲覧.
<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2018/6/4/2018-437/jo/texte>
- 9) Canadian Nuclear safety Commission, Technical Note; Proposed Changes to the Equivalent Dose Limit for Lens of the Eye, April 6 (2016).
- 10) Canadian Nuclear Safety Commission, Webinars on lens of the eye, 2019年3月11日閲覧.
<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/consultation/history/dis-13-01-webinar.cfm?pedisable=true>
- 11) 放射線審議会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について, (2018), , 2019年3月11日閲覧. <http://www.nsr.go.jp/data/000226076.pdf>
- 12) 放射線審議会, 142-1号:「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」(意見具申)を踏まえた関係省庁における検討状況について(2018)。
- 13) 厚生労働省, 第1回眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会資料4, (2018)。

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 藤田医科大学
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	谷村 嘉彦	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
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
研究参加者	立木 秀一	学校法人 藤田学園 藤田医科大学

2.1 背景・目的

本課題は、原子力発電所等の従事者の水晶体の等価線量の実態を調査することにより、この分野における標準的な水晶体等価線量モニタリングの方法、適切な管理、被ばく低減方法の検討に資するために研究を進めてきた¹⁾。

平成 29 年度は、原子力発電所の中でも、通常運転中の原子力発電所とは異なるとともに、高線量被ばくをともなう可能性のある従事者数が多い東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下、東電 1F)を調査対象として、個人線量計着用試験を実施した。東電 1F では、事故後の廃炉作業を進めており、世界的にも例のない作業現場で従事者が作業を行っている²⁾。特に、 β 線の線量が高いタンク解体作業については、線量評価や放射線管理に対して配慮が必要であると考えられた。そこで、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切かについて検討を行った。また、通常の運転を行っている原子力発電所の定期検査作業における高線量かつ/または不均等被ばくをともなう可能性のある作業の抽出と従事者の個人線量計着用試験や非破壊検査作業に携わる従事者の個人線量計着用試験を開始した。原子力発電所においては、個人線量計着用試験に合わせて、対象作業場の線量率測定や γ スペクトル測定を実施した。東電 1F での調査については、頭部及び胸部で測定した結果の比較や現行法令に基づいて算定した場合との比較を行い、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： $H_p(10)$ 、70 μm 線量当量： $H_p(0.07)$ 、3 mm 線量当量： $H_p(3)$ の換算係数の関係から考察した。

平成 30 年度は、平成 29 年度に実施した東電 1F 及び非破壊検査作業について追加的な個人線量計着用試験を実施するとともに、それ以外の原子力発電所における従事者の個人線量計着用試験及び作業場の線量率測定及び γ 線スペクトル測定とその分析を実施し、頭部線量と胸部線量との関係、従事者の線量と場の特性や線量分布との関係等の分析を行った。東電 1F 以外の発電所では、平成 29 年度から 30 年度にかけて実施した測定結果の分析から浮き彫りになった課題を明らかにするため、作業対象を追加して調査を実施した。また、加圧水型原子炉(PWR)だけでなく、まだ再稼働には至っていないものの沸騰水型原子炉(BWR)や通常運転を終えて廃止措置を行っている発電所(BWR)等も対象とした。調査は、概ね平成 29 年度と同様に実施した。東電 1F では、 γ 線による高線量被ばくをともなう従事者の水晶体の等価線量評価のための適切な線量計着用位置を検討するため追加測定を行った。非破壊検査作業については、従事者の個人線量計着用試験において、線量計の違いによる値の違いを除くため、頭部線量と胸部線量を同じ種類の線量計を用いて追加測定を実施した。

2年間の研究期間を終え、東電 1F を含む 5 事業者の原子力発電所に従事する 119 名の個人線量計着用試験結果及び非破壊検査作業に従事する 23 名に対する個人線量計着用試験結果、4 事業所の作業場の線量率測定結果を得た。これらの成果は、後述する標準的な水晶体等価線量モニタリング方法や適切な管理、さらには、事業者の自主的な被ばく低減に役立つものと考えられる。

なお、標準的な水晶体モニタリング、適切な管理や防護策に関する提案については、第6章で述べることとする。

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

2.2.1 原子力発電所

平成30年度に実施した原子力発電所での作業項目の抽出については、平成29年度に測定を開始した発電所での作業項目¹⁾やスウェーデンの原子力発電所で実施されている線量測定試験³⁾を参考に、高線量かつ/または不均等被ばくをともなうおそれのある作業に着目して抽出することとした。また、原子力発電所の運転状況や定期検査の時期等も参考に、事業者と意見交換を行い、本研究において水晶体の等価線量測定を実施する原子力発電所及び作業を決定した。

(1) 東電1F以外の原子力発電所

東電1F以外の原子力発電所において、高線量かつ/または不均等被ばくをともなう作業が予想される作業として通常運転中の定期検査時の作業を抽出することとした。現在、再稼働をしている原子力発電所はすべてPWRである。BWRの発電所では、運転を停止しているため、従事者の被ばく線量が高くなるような作業はない。しかしながら、将来運転が再開された際の補助的なデータとなるよう、これらの原子力発電所においても作業の抽出を行い、従事者の個人線量計着用試験を実施することとした。

平成29年度に個人線量計着用試験のために抽出・選定した原子力発電所の作業及び平成30年度に抽出・選定した作業項目を表2-1に示す。

平成29年度に実施した試験における線量計の着用期間は、着目した作業の実施期間と所定の線量（電子線量計で0.2 mSv以上）に達するまでの期間とした。しかしながら、これらの作業を行う従事者は、その他の作業にも従事することから、平成30年度は、短期間（1週間未満）と長期間（1週間以上）の線量計着用の場合の違いについて比較検討するため、発電所によっては、同一作業に対して2つの期間の調査を行った。

(2) 東電1F

東電1Fでの個人線量計着用試験は、平成29年度にも実施し、β線による寄与が大きいタンク解体、運搬作業における従事者に対して、内部被ばく防護のために装着している全面マスクによるβ線の遮蔽効果が高いことを明らかにした。また、2号機原子炉建屋周辺で作業をする従事者に対する個人線量計着用試験より、γ線場においては、全面マスクによる線量低減がみられないこと、眼の左右外側及び額中央に着用した線量計の測定結果に、有意な差はなく、眼の近傍（左右眼尻及び額）に個人線量計を着用していれば、どの位置で測定しても、水晶体の等価線量の算定は可能であることを明らかにした。

平成30年度は、主にγ線場での作業に着目し、水晶体の等価線量を測定する位置として、頭部及び胸部のほかに頸部位置での測定について検討するため、追加的に従事者に対する

個人線量計着用試験を実施した。平成 29 年度及び平成 30 年度に試験を実施した作業項目、期間、内容等を表 2-2 に示す。

2.2.2 非破壊検査

平成 30 年度は、平成 29 年度の試験¹⁾と同様に X 線源を使用する作業及び γ 線源（主に ^{192}Ir ）を使用する作業を抽出した。表 2-3 に非破壊作業内容等一覧を示す。詳細は、次節以降で述べるが、平成 29 年度の試験では、頭部と胸部で異なる種類の個人線量計を用いた。作業場が石油コンビナート等であり、作業場の放射線エネルギー分布や空間の線量分布は把握が困難であった。このため、頭部線量と胸部線量の値の違いが、線量計の種類の違いによるものか、その他の要因によるものかを特定することができなかった。そこで、平成 30 年度の追加試験では、頭部と胸部に同じ種類の線量計（水晶体線量測定専用熱ルミネッセンス線量計, TLD）を着用して測定を実施した。

表 2-1 原子力発電所における着用試験での作業内容等一覧

発電所	線量計着用期間*1(平成 30 年)		作業内容	人数*2
A-1 (PWR)	2月24日～2月25日	短期	原子炉容器開放作業	4名
	3月19日～3月23日	短期	蒸気発生器 ECT 検査	4名
	4月12日、4月21日	短期	1次冷却材ポンプインターナル分解点検	4名
	3月19日～3月21日	短期	蒸気発生器マンホール開放作業	4名
	3月26日～3月27日	短期	加圧器スプレイ弁分解点検	4名
A-2 (PWR)	4月23日～4月29日	長期	仮設遮へい設置工事	4名
	4月23日～6月12日	長期	放射線の測定作業	4名
	5月7日～6月15日	長期	供用期間中検査	4名
	5月15日～6月14日	長期	弁類分解点検	6名
B (PWR)	8月7日～8月10日	短期	原子炉容器点検工事	3名
	8月7日～8月31日	長期	原子炉容器点検工事	3名
	8月15日～8月17日	短期	蒸気発生器細管検査付帯工事	3名
	8月12日～8月24日	長期	蒸気発生器細管検査付帯工事	3名
	8月4日～10月8日	長期	除染工事仮設遮蔽設置	3名
	8月17日～9月18日	長期	1次系一般弁点検工事	3名
	8月7日～9月17日	長期	放射線の測定作業	3名
C (BWR)	12月3日～12月7日	短期	計装設備 SA 電路設置工事	8名
	12月4日～12月12日	短期	格納容器内シール他調査・撤去	5名
D (BWR) 廃止措置	9月25日～10月26日	長期	炉内除染準備工事/化学除染付帯工事	7名
	9月25日～10月30日	長期	放射線の測定作業	2名
	12月17日 ～翌年1月31日	長期	炉内除染準備工事/CRD 関連作業	7名

*1 線量計着用期間は従事者によって異なるため、実施した最長の期間を記載した。また、「短期間」とは、線量計着用期間が7日未満の場合、「長期間」とは7日以上の場合である

*2 検出下限未満や測定不能等であった者も含む。

表 2-2 福島第一原子力発電所における作業着用試験での作業内容等一覧

発電所	線量計着用期間*1	作業内容	人数*2
東電 1F 平成 29 年度	11 月 21 日～12 月 15 日	タンク仮組、運搬、仮置き(β線)	10 名
	11 月 30 日～12 月 15 日	2 号機周辺作業(γ線)ガレキ撤去等	8 名
東電 1F 平成 30 年度	12 月 1 日～12 月 10 日	1 号機原子炉建屋北側ガレキ撤去	9 名
	12 月 4 日～12 月 14 日	排水効率向上工事 (3, 4 号機海側)	4 名

*1 線量計着用期間は従事者によって異なるため、実施した最長の期間を記載した。

*2 検出下限以下や測定不能等であった者も含む。

表 2-3 非破壊検査作業内容等一覧

	線量計着用期間*1	作業内容	人数*2
平成 29 年度	12 月 1 日～12 月 30 日	X 線源使用	4 名
	12 月 1 日～12 月 30 日	γ 線源使用	6 名
平成 30 年度	10 月 1 日～10 月 30 日	X 線源使用	3 名
		γ 線源使用	4 名
	11 月 1 日～11 月 30 日	γ 線源使用	3 名
		X 線源/γ 線源使用	3 名

*1 線量計着用期間は従事者によって異なるため、実施した最長の期間を記載した。

*2 検出下限未満や測定不能等であった者も含む。

2.3 測定方法

2.3.1 作業場の線量率の測定方法（東電 1F 以外の原子力発電所）

東電 1F 以外の原子力発電所においては、測定が可能な範囲で各作業場において、線量率の測定を行った。測定高さは、一般成人男性の膝（約 50 cm）、胸部（約 120 cm）、眼（約 150~160 cm）、頭頂部（約 170~180 cm）の位置での測定を行った。測定位置は作業姿勢を考慮して、屈んだ姿勢で作業する場においては、その姿勢での各高さとした。

作業場の線量率測定には、発電所 A、B 及び D においては電離箱サーベイメータ (AE-133B, 応用技研社製) を使用した。この電離箱サーベイメータでは $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ (または、 $H^*(10)$ 及び $H'(0.07)$) の測定を行った。また、事業者が通常管理に使用している電離箱サーベイメータ ($H^*(10)$) を用いて本研究のために測定した結果や作業管理のために測定した結果 ($H^*(10)$) 等も使用した。なお、通常管理に用いる電離箱サーベイメータは、JIS Z4333⁴⁾ に適合したものが用いられている。図 2-1 に発電所 A-2 において 1 次冷却系ポンプインターナル分解点検作業場における線量率測定の様子を示す。

なお、東電 1F での作業場の線量率、次節の γ スペクトル及び β 線スペクトルの測定については、分担研究者の辻村らが実施した。

2.3.2 γ 線スペクトル測定方法

東電 1F 以外の原子力発電所においては、線源となる放射性核種の同定及び散乱線（低エネルギー γ 線）の影響を評価するため、 γ 線スペクトルの測定を行った。測定は CdZnTe 検出器を搭載した γ 線スペクトロメータ (GR-1, Kormek 社製) を使用した。図 2-2 に発電所 A-1 における蒸気発生器マンホール開放作業の様子を、図 2-3 に発電所 A-1 における蒸気発生器周辺でのスペクトル測定の様子を示す。

2.3.3 従事者の個人線量計着用試験方法

(1) 原子力発電所

従事者に対する個人線量計着用試験では、平成 29 年度に使用した個人線量計と同様なものを使用した。発電所 A~D の対象者が着用した線量計の着用部位及び種類並びに着用個数を表 2-4 に示す。個人線量計の着用例を図 2-4 に示す。頭部の線量計の着用位置は、額中央、ヘルメット外側（つば近くの部分）、防護用シールドの内側等、作業性を考慮し、各自、不快にならない位置に着用してもらうこととした。着用位置については、着用者ごと、入出ごとに記録用紙に記録をしてもらった。

発電所 C においては、平成 30 年度の東電 1F での測定と同様に、頸部への着用を追加した。頸部に着用した線量計は、頭部と同様に後述するシリコン製のゴムバンドを用いて固定した。東電 1F では遮蔽ベストを着用することがあることから、遮蔽ベスト着用時には、線量計を遮蔽ベスト外側の上腕部及び遮蔽ベスト内側の胸部に着用してもらうこととした。

平成 29 年度の個人線量計着用試験においては、頭部（水晶体）の線量を測定するため、全面マスク用の個人線量計取付け治具を使用した方法及びゴムバンドに個人線量計を取り付け、頭部に装着する方法を採用した。平成 30 年度は、東電 1F 以外の原子力発電所では、全面マスクを常に着用して作業を行う事例は少ないこと等から、ゴムバンドにより頭部に個人線量計を着用する方法で測定を行った。線量計を装着するバンドには衛生面や取り付け易さ、全面マスク着用時の気密性を考慮してシリコンゴム（1cm 幅、1 mm 厚）を用いた。シリコンゴムバンドに取り付けた個人線量計着用時の全面マスクの気密性は、着用試験を実施する前に（株）千代田テクノルがフィッティングテスター（MT-05 型、柴田科学）を用いて確認を行った。その結果、本仕様での全面マスク内部への漏洩率は、電力事業者が設けている基準である 2% 以下であった。

個人線量計の管理及び配布は、間違いや着用忘れがないように、管理区域入退チェックを行う場所や各事業者の休憩場所等で、放射線管理担当者等に管理してもらい、使用時には着用者に線量計一式を配布してもらうこととした。バックグラウンド補正用のコントロール線量計は、線量率の低い場所で保管してもらうこととした。

線量計の着用期間は、使用した個人線量計の検出下限値及び測定精度を考慮して、所定の線量（電子線量計の $H_p(10)$ の値が 0.2mSv 以上）になるまでとした。ただし、作業内容によっては、作業実施中に定めた線量に達しない場合もあった。その場合には、作業終了とともに線量計の着用を終了した。

(2) 非破壊検査

非破壊検査作業については、平成 30 年度は前述したとおり、線量計が異なることによる頭部と胸部位置での測定値の違いをなくすため、同種類（TLD）の線量計を頭部及び胸部に着用して測定を行った。なお、胸部には昨年度の着用試験に使用した型の線量計（RPLGD）も着用した。頭部線量計への着用方法は、(1) に示した方法と同様である。表 2-5 に線量計の着用部位及び線量計の種類を示す。非破壊検査作業の従事者については、線量計の着用期間を 1 か月とした。

(3) 線量評価・算定方法

個人線量計により測定した線量評価・算定方法（現行法令に基づく算定方法を合わせて記載）を表 2-6 に示す。なお、通常の管理における線量モニタリングでは、 $H_p(3)$ は提供されていないが、本研究では X・γ 線の $H_p(3)$ を参考値として提供してもらうこととした。また、通常の管理における線量モニタリングサービスでは小数第二位が四捨五入されるが、本研究では小数第三位まで提供してもらうこととした。

2.3.3 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、藤田医科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 2-4 着用試験で使した個人線量計の種類と着用部位

発電所等	着用部位	線量計の種類及び着用個数
A・B・D	頭部	水晶体線量測定用 TLD* ¹ 1 個
	胸部	水晶体線量測定用 TLD 1 個 蛍光ガラス線量計* ² 1 個 通常管理用の電子線量計 1 台
C	頭部	蛍光ガラス線量計 1 個
	頸部	蛍光ガラス線量計 1 個
	胸部	蛍光ガラス線量計 1 個 通常管理用の電子線量計 1 台
東電 1F (平成 29 年度)	頭部	水晶体線量測定用 TLD 1 個 (全面マスク内)
	胸部	水晶体線量測定用 TLD 1 個 蛍光ガラス線量計 1 個 通常管理用の電子線量計 1 台
東電 1F (平成 30 年度)	頭部	蛍光ガラス線量計 1 個 または 光刺激ルミネッセンス線量計* ³ 1 個
	頸部	蛍光ガラス線量計 1 個 または 光刺激ルミネッセンス線量計 1 個
	胸部または上腕部	蛍光ガラス線量計 1 個 または 光刺激ルミネッセンス線量計 1 個 遮蔽ベスト着用時： 遮蔽ベスト外側 上腕部 1 個 遮蔽ベスト内側 胸部 1 個

*1 DOSIRIS, (株)千代田テクノ提供

*2 ガラスバッジ, (株)千代田テクノ提供

*3 ルミネスバッジ, (株)長瀬ランダウア社製

表 2-5 非破壊検査作業での線量計着用部位及び線量計の種類等

	着用部位	線量計の種類及び着用個数
平成 29 年度	頭部	水晶体線量測定用 TLD 1 個
	胸部	蛍光ガラス線量計 1 個 通常管理用の電子線量計 1 台
平成 30 年度	頭部	水晶体線量測定用 TLD 1 個
	胸部	水晶体線量測定用 TLD 1 個 蛍光ガラス線量計 1 個 通常管理用の電子線量計 1 台

表 2-6 線量評価・算定条件

	蛍光ガラス線量計* ¹ , RPLGD	光刺激ルミネッセンス 線量計,OSL	水晶体線量測定用 熱ルミネッセンス線 量計,TLD
測定値	X・γ線：Hp(10)、Hp(0,07) β線：Hp(0,07)		Hp(3) (X・γ・β線の区 別なし)
水晶体の 等価線量評価	X・γ線 Hp(10)又は Hp(0,07) の大きい方 +β線 Hp(0,07)		Hp(3)
最小測定範囲 (mSv)	X・γ線：0.05 以上 β線：0.1 以上	X・γ線：0.01 以上* ² β線：0.1 以上	0.1 以上
検出限界(mSv) (95%以上)	X・γ線：0.011 β線：非公開	(公的記載なし)	0.05
本試験における 結果	小数第三位四捨五入* ³ コントロール値を減算した線量		
エネルギー範囲	X・γ線：0.16～6.4 MeV β線：0.2～0.8 MeV (平均エネルギー)	X・γ線：0.05～10 MeV β線：0.15～10MeV	X・γ線： 0.08～1.25MeV β線：0.8 MeV (平均エネルギー)

*1 本研究では中性子測定は対象外とした。

*2 0.01 mSv 単位で申し込みの場合

*3 通常のモニタリングサービスにおける線量算定値は、小数第二位を四捨五入。

2.4 研究結果及び考察

2.4.1 東電 1F 以外の原子力発電所における着用試験実施場所の線量率の測定

(1) 発電所 A-1 及び A-2

発電所 A-1 において、電離箱サーベイメータで測定した $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ の値、胸部位置の線量率に対する各部位の値の比及び測定場所の一例を図 2-5 から図 2-8 に示す。発電所 A-1 では、定期検査開始(平成 30 年 1 月 29 日)から約 2 か月半後(平成 30 年 4 月 14 日)に、発電所 A-2 では、定期検査開始より約 1 か月半後(定期検査開始:平成 30 年 4 月 23 日、測定:平成 30 年 6 月 11 日)に場の線量率測定を実施した。

① 原子炉容器開放作業場(原子炉容器上蓋周辺)

原子炉容器開放作業場においては、図 2-5 に測定場所①及び④の結果を示したように $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ の値に有意な差はみられなかった。図 2-6 に示すように①から④で測定を実施しているが、これらの位置による線量率及び高さ方向の分布に大きな違いはみられなかった。場の線量率は、周囲に仮設遮蔽が設置されていることもあり、後述する蒸気発生器周辺に比べて低かった。高さ方向の線量率の分布は、頭部上が高く、眼、胸部、膝の順に低くなる傾向を示した。一方、眼の位置の値よりも膝の位置の値が高くなる場所も存在した。胸部位置の線量率に対する眼の位置の線量率の比は 0.9~1.1 であった。

② 蒸気発生器マンホール開口部周辺

図 2-7 に示すとおり蒸気発生器マンホール開放時の開口部近傍においても、 $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ の値に有意な差はみられなかった。線量率の高さ分布は、マンホール開口部近傍で眼の位置の線量率が最も高くなる可能性があることを示唆する結果となった(頭部上は測定不可のため)。眼の位置の線量率は胸部位置の最大 5.5 倍となった。しかしながら、1 m 離れた場所では、マンホール近傍の線量率の 20 分の 1 程度となり、高さ方向の分布は均一であった。図 2-8 に蒸気発生器マンホール周辺での線量率測定位置を示す。

③ 1 次冷却材ポンプインターナル分解点検作業場

測定結果を図 2-9 に示す。1 次冷却材ポンプの内部を取り出し、仮置き場にて反転して各部位の分解・点検を行う。分解点検時にはインターナル周辺に足場を組み、1 階から 3 階で作業を行う。線量率測定は、グリーンハウス内 1 階、2 階及び 3 階の①から③の場所(図 2-9 の番号)で実施した。1 階においては、頭部位置での線量率が最も高く、胸部位置に比べて約 3 倍となった。2 階、3 階では、高さ方向の線量率の分布は、ほぼ均一となり、2 階では 1 階頭部の線量率の 3 分の 1 程度、3 階では 10 分の 1 程度となった。

④ 加圧器室

加圧器スプレイ弁分解点検の作業場となる加圧器室の線量率は $200 \mu\text{Sv/h} \sim 300 \mu\text{Sv/h}$ であり、胸部と眼の位置の線量率はほぼ同等であった。

⑤ 発電所 A における全測定場所の頭部/胸部線量率の関係

図 2-10 に発電所 A-1 で測定した場の線量率の結果のうち、蒸気発生器マンホール開口部近傍及び 1 次冷却材ポンプインターナル分解点検での 1 階作業場で測定した結果を除いた胸部位置の $H^*(10)$ と眼の位置の $H^*(10)$ または $H'(3)$ との関係を示す。局所的に高くなる場所を除くと、頭部/胸部線量率の比は 1.1 から 1.2 となることが確認できた。

(2) 発電所 B

発電所 B においては、定期検査開始（平成 30 年 8 月 3 日）運転停止から約 10 日後（平成 30 年 8 月 14 日）に場の線量率測定（ $H^*(10)$ 及び $H'(0.07)$ ）を実施した。

個人線量計着用試験のために抽出した作業は、発電所 A-1 と同じく原子炉容器点検工事のほか、蒸気発生器細管検査付帯工事、1 次系一般弁点検工事、除染工事仮設遮蔽設置、放射線の測定作業である。特にここでは、蒸気発生器細管検査付帯工事の作業場となる蒸気発生器マンホール開口部周辺、仮設遮蔽設置作業場となる A ループ室及び 1 次系一般弁点検工事の作業場となる加圧器室での測定結果について述べる。

① 蒸気発生器細管検査付帯工事（蒸気発生器マンホール開口部周辺）

図 2-11-1 に示す通り、発電所 B では蒸気発生器マンホール開放時に開口部近傍において、線量率 $H'(0.07)$ は $H^*(10)$ の最大約 5 倍となった。これは、運転停止から測定までの期間が短かったことから、後述するように、冷却水中に生成された Co-58 や Co-60 といった放射性腐食生成物から放出される β 線による影響が顕著に表れたものと考えられる。一方、マンホール開口部から 1 m 離れた場所では、 $H^*(10)$ の値と $H'(0.07)$ の値との間に有意な差はみられなかった。また、マンホール閉止時にも $H^*(10)$ の値と $H'(0.07)$ の値との間に有意な差はみられなかった(図 2-11-2)。

② 仮設遮蔽設置作業場（A ループ室）

図 2-12-1 に示すように、仮設遮蔽設置場所の中には、頭部上方に配管が配置している場所があった。このような場所において遮蔽設置前後での線量率分布を確認した結果を図 2-12-2 に示す。遮蔽設置前後で線量率は約 3 分の 1 程度に低減するものの、仮設遮蔽設置前後で、線量率の高さ方向の分布にはほとんど変化がなく、眼の位置での線量率は胸部位置の線量率に対して 1.3~1.4 倍高い値を示した。また頭部上では、胸部の 1.7~1.9 倍となった。このような場所での作業を行う場合には、従事者の身長が高い場合、より頭部線量が高くなる可能性があると考えられる。

③ 1次系一般弁点検工事作業場（加圧器室）

図 2-13 に示すとおり、発電所 A と同様に、加圧器室においては、頭部から膝にかけて、ほとんど勾配がないか、膝の方が低い結果となった。さらに、眼の位置の線量率と胸部位置の線量率をみると、有意な差がみられなかった。(3) 発電所 C

発電所 C は、BWR 型原子炉であり、2011 年 8 月より停止しており、定期検査中である。このため、著しく高線量被ばくをともなう作業は存在しないと考えられる。

本研究では、計装設備 SA 電路設置工事及び格納容器内シール他調査・撤去作業を対象とした。着用試験を協力会社 2 社に依頼し、このうち、1 社の作業実施場所となる原子炉容器内の上部ドライウェル(DW)内余熱除去系(RHR)ノズルフロア(2階から6階)にて線量率測定を実施した。図 2-14 に測定結果を示す。当該作業場の特徴として、頭部位置の線量率が胸部位置の線量率と同程度かそれよりも低い傾向を示した。

(4) 発電所 D

発電所 D (BWR) では、平成 21 年に運転を終了し、廃止措置段階にある原子炉建屋内、ドライウェル (DW) 内、ペDESTAL (DW 内) 内での汚染状況の調査・検討、系統除染、建屋・設備・機器の解体撤去の準備作業を対象とした。

ドライウェル内の給水 (FDW) 系、炉心スプレイ (CS) 系及び主蒸気 (MS) 系配管切断作業時には、配管切断前後の配管表面及び 30cm 離れた場所での線量率測定を実施した。表 2-7 及び表 2-8 に FDW ノズル周辺及び FDW ノズル鉛毛マット付近での線量率測定結果を示す。測定位置を図 2-15 に示す。配管表面の線量率 $H^*(10)$ は 0.15~0.77 $\mu\text{Sv/h}$ であり、180 度 (下部) 方向の線量率が高く、表面では、最も低い 0 度 (上部) 方向の 1.5~3 倍となった。表面から 30 cm 離れた場所では 1.5~2.8 倍となった。配管切断前後で比較すると、周辺線量に大きな違いはなかった。また、鉛毛マット付近では、場所によっては最大で 5.4 倍異なる場合もあった。この傾向は、CS ノズル切断時でも同様であった。一方、MS ノズル切断作業周辺では、切断前後で線量率に変化はないものの、0 度に対する 180 度方向の線量比が表面においては最大でも 1.7 であり、30cm 離れた場所では、180 度方向の線量率の方が低くなり、最小で 30% 程度となった。この結果から、切断作業においては、姿勢や作業位置により胸部と頭部の線量の関係が異なる可能性があるが、一方向のみを向いて作業することは少ないものと予想される。したがって、頭部と胸部の線量の差はそれほど大きくならないものと考えられる。

1 号機原子炉建屋 DW1 階、4 階及び 5 階の線量分布 ($H^*(10)$) を図 2-16-1~3 に示す。5 階に MS ノズルが存在する。5 階の線量測定結果は、いずれも MS ノズル周辺である。図 2-15 の MS ノズル周辺では、90 度から 270 度で高さ方向の線量率は大きな差はなかった。①においては、眼の位置の線量率と胸部の線量率はほぼ同程度であるが、頭部上では、胸部の約 2.5 倍となった。なお、合わせて $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ も測定を行ったが、いずれも、 $H^*(10)$ と値は同等であった。

2 号機においては除染準備として、ペDESTAL 内での養生作業等を対象とした。図 2-17-1 及び図 2-17-2 に 2 号機のペDESTAL 1 階及び地下 1 階の線量率測定結果を示す。2 号機 1 階の線量率は場所による差はほとんどなく、上部の線量率が高くなる傾向を示した。胸部に対する各位置の線量率の比は、眼の位置で 1.0~1.3 となった。頭部上においても最大 1.6

である。地下1階においては、局所的に眼の位置での線量率が高いエリア（胸部位置に対して最大2.5倍）があったがそれ以外の場所では、2倍を超えることはなく、眼の位置の線量は他の部位の高さとほぼ同レベルであった。制御棒駆動機構（CRD）ハウジング旧閉止フランジ取外し、洗浄、梱包、搬出、新閉止フランジ取付時及びCRDサーマルスリーブ取外し、搬出、養生、仮置、新閉止フランジ取付時においては、地下1階の線量分布は、X19の地点を除き、いずれも下方向（膝）の線量の方が高く、眼の位置では、胸部位置よりも線量率が低くなった。

表 2-7 給水（FDW）ノズル切断時の配管表面及び30cm離れた場所の線量率（ $H^*(10)$ ）

条件	ノズル名	測定位置	$H^*(10)$ mSv/h			
			0°	90°	180°	270°
切断前	FDW(A)	表面	0.23	0.50	0.63	0.44
		at 30cm	0.14	0.30	0.23	0.26
	FDW(B)	表面	0.27	0.48	0.77	0.55
		at 30cm	0.13	0.19	0.40	0.42
	FDW(C)	表面	0.15	0.38	0.43	0.30
		at 30cm	0.11	0.20	0.17	0.21
	FDW(D)	表面	0.27	0.40	0.40	0.39
		at 30cm	0.16	0.25	0.29	0.31
切断後	FDW(A)	表面	0.23	0.50	0.71	0.45
		at 30cm	0.14	0.31	0.27	0.28
	FDW(B)	表面	0.27	0.50	0.75	0.55
		at 30cm	0.17	0.22	0.47	0.38
	FDW(C)	表面	0.15	0.38	0.42	0.30
		at 30cm	0.11	0.20	0.17	0.20
	FDW(D)	表面	0.27	0.40	0.50	0.40
		at 30cm	0.17	0.25	0.29	0.32

表 2-8 鉛毛マット付近の線量率（ $H^*(10)$ ）

条件	ノズル名	測定位置	$H^*(10)$ mSv/h			
			0°	90°	180°	270°
鉛毛付近	FDW(A)	表面	0.16	0.39	0.86	0.33
	FDW(B)	表面	0.25	0.30	0.66	0.30
	FDW(C)	表面	0.12	0.48	0.25	0.24
	FDW(D)	表面	0.19	0.34	0.42	0.48

(5) γ 線スペクトル測定

発電所 A 及び B の蒸気発生器マンホール開口部周辺、ループ室、加圧室において γ 線スペクトル測定を行った結果を図 2-18-1 及び 2-18-2 に示す。主な放射性核種は Co-58(β +E_{max}: 474keV, 半減期 77.27 日)及び Co-60(β E_{max}: 317.9 keV, 半減期 271.79 日)であった。 $H'(3)$ の測定結果に影響を及ぼす β 線のエネルギーは 800keV 以上である。同定された放射性核種の最大エネルギーは 500keV 以下であることから、 $H'(3)$ の測定結果に影響を及ぼさないと考えられる。

また、散乱線(低エネルギー γ 線)の影響を確認するため、 γ 線の波高分布に対して、検出器の応答関数を考慮したアンホールディング処理を行うことにより、 γ 線スペクトルを導出した⁵⁾。この γ 線スペクトルより低エネルギー成分を算定した結果、いずれの作業場所においても 500keV 以下の成分は全体の 20~30%程度であった。

以上のことから、 β 線及び散乱線の水晶体の等価線量への寄与は小さいと考えられる。また、個人線量計着用試験で用いた TLD は N-100(実効エネルギー: 82.9keV)よりもエネルギーが低下すると、相対レスポンスが高くなる。例えば、N-80(実効エネルギー: 64.1 keV)では 10%程度高くなる⁶⁾が、この影響もほとんど無視できるものと考えられる。

図 2-18-3 及び 2-18-4 に発電所 D のドライウエル(DW)内の各階、原子炉建屋内の余熱除去系(RHR)配管周辺及び CRD 補修室内の γ 線スペクトル測定結果の一例を示す。検出された主な核種は Co-60のみであった。発電所 D では 2009 年に運転を終了していることから、Co-58 は減衰して検出下限未満であったと考えられる。後述するように従事者の個人線量計着用試験の結果についても同じ位置で算定した個人線量計の $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ の読み値に違いがないことから、水晶体の等価線量への β 線の寄与はなく、散乱線の影響も小さいものと考えられる。

2.4.2 従事者の個人線量計着用試験

(1) 発電所 A-1 及び A-2 (PWR)

図 2-19-1 に発電所 A-1 及び図 2-19-2 に A-2 で実施した個人線量計着用試験における着用者ごとの頭部 $H_p(3)$ (TLD)、胸部 $H_p(3)$ (TLD)及び $H_p(10)$ (RPLGD 及び電子線量計)、 $H_p(0.07)$ (RPLGD)の結果を示す。なお、2.3 でも述べたとおり、図に示した線量は任意の期間のものであり、従事者の 1 か月間の線量を示したものではない。

胸部に着用した RPLGD の線量計の $H_p(3)$ の読み値に対する胸部に着用した TLD の $H_p(3)$ の読み値の比は、発電所 A-1 において 1.03 ± 0.10 、発電所 A-2 において 0.99 ± 0.07 となり、差は約 10%程度であった。また、胸部に着用した RPLGD の線量計の $H_p(10)$ に対する胸部に着用した RPLGD の読み値 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ の読み値の比は、 1.00 ± 0.02 及び 0.99 ± 0.02 になった。2.4.1 でも述べたとおり、作業場の線量率や核種同定の結果、 $H_p(3)$ への β 線や散乱線(低エネルギー光子)の影響はないと考えられた。これは、着用試験の結果、各線量当量の読み値からも確認できた。

電子線量計の $H_p(10)$ と RPLGD の $H_p(10)$ の読み値を比較すると、電子線量計の読み値は 0.89 ± 0.09 となった。電子線量計は、RPLGD よりも約 10%低くなる傾向を示す。これは、電子線量計と RPLGD の測定可能なエネルギー範囲の違い等が原因として考えられる。

胸部 $H_p(10)$ に対する頭部 $H_p(3)$ の比は、発電所 A-1 及び A-2 の全ての対象者の平均は 1.26 ± 0.28 となった。図 2-20 に示すとおり、このうち、3 名が 1.5 以上を超える結果となった。これらの対象者が着用試験中に実施した作業は、原子炉容器開放・復旧作業、1 次冷却材ポンプインターナル分解点検及び放射線の測定作業である。1 次冷却材ポンプインターナル分解点検では、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は 2.0 となった。当該作業を実施した対象者は 4 名であったが、うち 3 名は頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は 0.92~1.05 であり、頭部 $H_p(3)$ と胸部 $H_p(10)$ との間に大きな差はなかった。頭部/胸部比の高い対象者 1 名は、1 階で作業をしていたことから、2.4.1 で示したとおり、場の線量率勾配が大きいこと（眼部 $H'(3)$ /胸部 $H^*(10)$ が 3.1 から 3.5）によるものであると考えられる。しかしながら、着用試験結果の頭部/胸部線量比は場の眼/胸部線量率比よりも低かった。これは、作業の姿勢が変化することで、常に眼の位置の線量が高くなるわけではないことが影響しているものと考えられる。このため、顕著な線量勾配のある場において、場の線量分布から単純に従事者の頭部/胸部線量比を推定すると過大あるいは過小評価する可能性がある。

原子炉容器開放作業を実施した対象者のうち、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が 1.5 を超えた者は、作業場所を確認したところ、主に、原子炉容器から少し離れた場所で作業を行っていた。常に、線源となる原子炉容器上蓋の近傍にいたわけではないが、一時的に頭部が原子炉容器上蓋に近づくことがあったものと考えられる。その際に受けた線量が対象者の線量に大きく寄与したのと考えられる。もう 1 名の対象者は、1.5 を超えてはいないが、他者に比べて頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ が 1.4 と比較的高かった。この対象者は、上半身が原子炉容器上蓋（線源）に向かって身を乗り出した形で作業をしていた。しかしながら、その際、胸部線量も同時に線量が高くなるため、頭部/胸部比が他の作業者と比べても顕著な差にはならなかったものと考えられる。

放射線の測定作業を実施した対象者の頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が高くなるケースは他の発電所でもみられた。事業者からの意見聴取によると、放射線の測定作業担当者は、測定を実施する場所の線量が高いことを事前に把握している。このため、放射線防護の観点から、できるだけ線源から体幹部が離れるような姿勢で測定を行うことがあるとのことであった。したがって、サーベイメータを持つ手を伸ばして測定する際に、頭部が胸部よりも線源に近くなることにより、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が高くなったものと考えられる。

蒸気発生器周辺での作業（蒸気発生器マンホール開放、蒸気発生器 ETC 検査付帯工事等）においては、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は他の作業に比べて、若干高めであったが 1.5 を超えることはなかった。中には、頭部 $H_p(3)$ と胸部 $H_p(10)$ がほぼ同程度の対象者（1 名）がいた。同じ作業項目であっても、蒸気発生器マンホール開口部よりも少し離れた場所で作業している場合には、2.4.1 の場の線量率測定結果からもいえるように、頭部 $H_p(3)$ と胸部 $H_p(10)$ の間に大きな違いはみられないものと考えられる。

加速器スプレイ弁の分解点検作業を実施する対象者については、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が 0.88~1.28 となり、これらの比は他の作業に比べて小さかった。2.4.1 の場の線量率測定結果からも加速器室内では、下部の線量率が高くなる場所があることがこのような結果となった要因として考えられる。

発電所 A-2 では、頭部の線量がかならずしも高くない可能性のある作業を含む 1 週間以上に及ぶ作業を抽出した。しかし、頭部の線量が高くなる可能性のある作業に限定し

た短期間作業を抽出した発電所 A-1 の場合と同じく頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が 1.5 を超えることもあった。これは、高線量率となる不均等な作業場で受ける線量が、対象者の線量を有意に高めるためであると考えられる。

(2) 発電所 B (PWR)

発電所 B における個人線量計着用試験結果を図 2-21 に示す。対象者のうち、ID-7 については検出限界未満のため、結果を示していない。発電所 B においては、2.4.1 で述べたように、線量率としては、 $H^*(0.07)$ が $H^*(10)$ よりも高い場があったが、着用試験においては、同じ位置で算定した $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ に顕著な差はみられなかった。

頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比については、図 2-22 に示すとおり、1.5~2.0 となる人が 4 名存在した。この作業内容としては、原子炉容器点検工事作業 (1 名)、蒸気発生器細管付帯工事 (1 名) 及び放射線の測定作業 (2 名) であった。発電所 B は、発電所 A とほぼ同型の PWR である。比が高くなった要因についても発電所 A と同様であると考えられる。また、発電所 B では、同種類の作業について、線量計着用期間を 1 週間未満(短期間)と 1 週間以上 (長期間) とし、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比の違いがあるかを調べた。しかし、この比が高くなった蒸気発生器細管検査付帯工事を実施した対象者は、長期間着用者であり、発電所 A の結果と同様に期間の違いによる顕著な差はみられなかった。

(3) 発電所 C (BWR)

図 2-23 に発電所 C における対象者ごとの個人線量計着用試験結果を示す。すべての部位において RPLGD を用いて個人線量測定を実施した。発電所 C においては、頸部にも RPLGD を着用して線量の測定を実施した。着用者 ID-9 の対象者の頸部線量は検出下限未満であった。

胸部に着用した RPLGD で測定した $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ の読み値は、他の発電所と同様に、いずれも有意な差はなかった。頸部で測定した値は、胸部で測定した値と同等か、それより低い値を示した。頭部の線量と胸部の線量との関係は、作業の種類または作業場により傾向が異なった。着用者 ID-1~9 の対象者は頭部、頸部及び胸部の線量はほぼ等しく、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比の平均は 1.01 ± 0.04 (0.91~1.05) であった。着用者 ID-10~13 では頭部の線量がその他の部位で測定した結果より高く、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は平均 1.39 ± 0.02 (1.36~1.41) であった。2.4.1 に示した通り、ID1~8 の対象者の作業場の線量率は、眼の位置の $H^*(10)$ が胸部位置の $H^*(10)$ に対して 0.8 程度であった。このことから、ID-1~9 と ID-10~13 の頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比の違いは、作業場の線量勾配の違いによるものと考えられる。

(4) 発電所 D (BWR : 通常運転終了後の廃止措置)

図 2-24 に発電所 D の着用者ごとの線量測定結果を示す。発電所 D では、作業場の線量が低いため、およそ 1 か月間、対象者に線量計を着用してもらった。着用者 ID-1~7 は 1 号機での作業、着用者 ID-10~16 の対象者は 2 号機での作業であった。1 号機の作業では、全面マスク着用者は 2 名 (37 回中 12 回、42 回中 29 回) であった。平成 29 年度の東電 1F での着用試験の結果から、 γ 線の場合、全面マスクによる遮蔽効果は考慮しなくてよいこ

とがわかっている。線量計の着用位置は、1号機及び2号機での作業とも、額中央に着用してもらった。1号機での作業においては、頭部線量が高くなる傾向があり、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は、 $1.22 \pm 0.14(1.08 \sim 1.47)$ となった。

一方、2号機での作業では、全員が1度は全面マスクを着用して作業を行っている（22回から50回入域に対して、3～37回全面マスク着用）。2号機では、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は $1.14 \pm 0.31(0.90 \sim 1.63)$ であった。頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比が1.5を超えた対象者は、1号機において1名、2号機において2名であった。また、放射線の測定作業を行う対象者2名のうち、1名は頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ の比が1.5となった。

(5) 東電 1F における原子炉建屋周辺での作業

東電 1F 原子炉建屋周辺での作業を行う対象者の線量測定結果を図 2-25 に示す。着用者 ID-1～9 は 1 号機建屋周辺、着用者 ID-10～13 は 3 及び 4 号機の海側エリアでの作業である。線量着用期間は最長で 10 日であった。ID-1～9 は光刺激ルミネッセンス線量計(OSLD)を、ID-10～13 は RPLGD を使用して測定を行った。図 2-25 において頭部の結果を $H_p(3)$ の値と記しているが、OSLD では $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ のみが提供された。しかしながら $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ の読み値はどちらも同じ値であったこと、ID-10～13 に対して RPLGD より算定した結果に対して $H_p(10)$ と $H_p(3)$ の平均値に差がないことから、ID-1～9 についても $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ にほとんど差がないと考えられる。

東電 1F においても、平成 30 年度は(3)に示した発電所 C と同様に頸部での測定のほか、上腕部の遮蔽ベスト外側を追加して測定を行った。作業場所の違いにより線量に差があるが、頭部は頸部や胸部よりも高く、頭部 $H_p(3)$ または $H_p(10)$ /上腕遮蔽ベスト外側の $H_p(10)$ の比は作業場所の違いによって顕著な差はなく、平均 1.29 ± 0.10 となった。頸部 $H_p(10)$ は、上腕遮蔽ベスト外側 $H_p(10)$ の 1.02 ± 0.13 となり、頸部と上腕遮蔽ベスト外側の結果はほぼ同じになることが確認できた。

また、遮蔽ベスト外側上腕の $H_p(10)$ に対する遮蔽ベスト内側胸部の $H_p(10)$ は、平均 0.67 ± 0.16 であり、遮蔽ベストにより遮蔽ベスト内の線量が 30%程度低下することを確認した。

2.4.3 非破壊検査

図 2-26 に平成 29 年度及び平成 30 年度に実施した非破壊検査作業における個人線量計着用試験結果を示す。平成 29 年度の着用試験の結果、胸部に RPLGD を着用して $H_p(10)$ を測定した結果に対する頭部に水晶体線量測定用の TLD 線量計を着用して測定した $H_p(3)$ の比は $0.96 \sim 2.5$ となった。X 線源 (200kV) を使用する対象者もいたため、これらの対象者に対しては TLD 線量計の測定結果に対してエネルギー補正を行った。この結果、補正値は $0.89 \sim 2.17$ となった。非破壊検査作業は原則線源から 5 m 以上離れることとなっており、石油コンビナート等における非破壊検査の作業場としては、均一な線量分布となる場とみなすことができると考えられる。

平成 29 年度に実施した着用試験結果が、線量計の違いによる影響を排除しきれていない可能性を考え、平成 30 年度の着用試験では、頭部と胸部に同じ水晶体線量測定用 TLD を着用し、胸部には TLD との比較のため、RPLGD も着用して試験を実施した。この結果、

TLD で測定した頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(3)$ 比の平均は $1.13 \pm 0.33(0.77 \sim 1.80)$ となった。頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(3)$ 比が最も高かった対象者の線量計の値は 0.09 mSv であり検出下限の値に近い。このことから、測定結果の不確かさが寄与したものと考えられる。昨年度の試験結果をみると、頭部 $H_p(3)$ (TLD) /胸部 $H_p(3)$ (RPLGD) 比 1.8 を超えたものは1名のみであった。この着用者の胸部 RPLGD の測定値も 0.06 mSv と検出下限値に近い値であった。平成 29 年度の結果についても、この着用者の結果を除くと、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(3)$ 比の平均は 1.32 、最小値は 0.96 、最大は 1.65 となり、今年度の測定結果の範囲内に収まる。非破壊検査作業においては、試験期間を1か月間としていること、検出下限に近い線量の対象者もいることから、測定結果のばらつきが大きくなったものと考えられる。

2.4.4 胸部線量と頭部線量の関係

全発電所の着用試験対象者の胸部 $H_p(10)$ と頭部または胸部 $H_p(3)$ の関係を図 2-27 に示す。全発電所の着用試験対象者の胸部 $H_p(10)$ に対する胸部 $H_p(3)$ の傾きは 1.0 及び胸部 $H_p(10)$ に対する頭部 $H_p(3)$ の傾きは 1.13 となった。発電所ごとにこのグラフの傾きを求めると $1.08 \sim 1.17$ であった。本研究で対象とした発電所の作業は、頭部線量が胸部線量よりも高くなる可能性のある場を抽出した。しかしながら、下部のほうが低い作業場も存在し、このような場においては、頭部線量と胸部線量がほぼ等しい結果となった。

また、東電 1F の着用試験対象者に対する胸部 $H_p(10)$ と頭部 $H_p(3)$ または頭部 $H_p(10)$ の関係を図 2-28 に示す。OSLD での測定結果は $H_p(3)$ を算定していないため $H_p(10)$ で示した。ただし、 $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ に違いがないため、 $H_p(3)$ についても $H_p(10)$ とは差がないものと考えられる。東電 1F においても、この傾きは 1.23 となった。辻村らのファントム実験時に測定した原子炉建屋周辺の高さ方向の線量勾配ともよく一致した。

一方、非破壊検査作業においては、図 2-29 に示すとおり、ばらつきが大きいものの、勾配は 1.14 となった。非破壊検査においては、原則として、照射方向には立たない、線源から 5 m 離れることとなっている。したがって、線量分布が均一な場とみなすことができる。このような均一な場においても、頭部線量が胸部線量に比べてわずかに高くなった。

発電所（東電 1F を含む）及び非破壊検査作業については、作業姿勢が変化することから常に一方向から照射されるのではなく、全方向から被ばくするものと考えられる。したがって、照射条件としては ROT(回転)とみなすことができる。原子力発電所の主な線源は Co-60 及び Co-58 であることから、ROT の条件で照射された場合、頭部と胸部のジオメトリ（幾何学的形状）の違いにより、頭部 $H_p(3)$ ($20 \text{ cm } \phi \times 20 \text{ cm}$ の円筒)の胸部 $H_p(10)$ （縦横 $30 \text{ cm} \times$ 厚さ 15 cm スラブ）に対する比は 1.04 倍となる¹⁾。このような頭部と胸部のジオメトリの違いもまた、頭部 $H_p(3)$ と胸部 $H_p(10)$ の違いに影響を及ぼすものと考えられる。作業場の線量勾配等が従事者の頭部/胸部線量比への影響が大きいものと考えられるが、作業場の線量率の勾配が明らかに下方に向かって高くなる場合でも、頭部 $H_p(3)$ が胸部 $H_p(10)$ と同程度まで低下しない原因のひとつとして、このような頭部と胸部のジオメトリが影響している可能性がある。

2.5 結論

主任研究者らの課題では、原子力施設、特に原子力発電所における従事者の水晶体被ばくに着目した。この実態を探るため、現在、通常の管理で実施している胸部に線量計を着用して測定した値 ($H_p(10)$) と試験的に頭部（水晶体位置）に線量計を着用して得られた測定結果 ($H_p(3)$) とを比較して、従事者の水晶体等価線量の管理方法を検討することとした。

対象作業としては、線量限度の遵守と放射線防護の最適化、被ばく低減の観点から、比較的高線量の水晶体被ばくをとともなう可能性のある作業を抽出することとした。原子力分野の中でも高線量被ばくをとともなう従事者が多い東電 1F での作業、特に、高線量 β 線被ばくの作業場としては、Sr-90/Y-90 汚染水を貯蔵したフランジタンクの解体作業及び原子炉建屋周辺での比較的高線量の γ 線による被ばくをとともなう作業に着目した。

東電 1F 以外の原子力発電所としては、現在稼働中の PWR の原子力発電所の定期検査作業、中でも不均等被ばくをとともなう可能性のある原子炉容器開放や蒸気発生器周辺での作業等に加え、まだ再稼働には至っておらず運転を停止しているが、将来の運転に備えて、BWR の原子力発電所の検査作業、さらには、通常運転を終了し、廃止措置を行っている原子力発電所における配管切断や除染作業準備等の作業に着目した。また、石油コンビナート等での非破壊検査作業についても調査し、これらの従事者に対して個人線量計着用試験を実施した。

東電 1F での試験の結果、 β 線による被ばく線量が高いタンク解体作業の現場では、内部被ばく防護のために装着している全面マスクによる β 線の遮蔽効果が高く、全面マスク内での水晶体測定用線量計 (TLD) により算定した水晶体の等価線量 ($H_p(3)$) はマスク外の RPLGD による水晶体等価線量の算定値 (γ 線: $H_p(10)$ と $H_p(0.07)$ のどちらか大きい方 + β 線 $H_p(0.07)$) の約 13% (5~25%) まで低減されることを確認した。平成 30 年度より、東電 1F では水晶体の等価線量の自主管理基準を導入し、年間 50 mSv を遵守するとしている。また、年間の水晶体等価線量が 15 mSv 超える場合は、頭部に線量計を着用することとしている。すでに測定を実施している従事者の結果は、全面マスク内の線量が全面マスク外の線量の 10%~30% まで低減していることが報告されており⁷⁾、本研究の結果ともよく一致している。

東電 1F における原子炉建屋周辺での作業を対象とした個人線量計着用試験では、頭部 $H_p(3)$ は遮蔽ベスト外側の上腕部 $H_p(10)$ と比較して、平均で約 1.2 倍高い値となった (1.1~1.5)。この結果は辻村らのファントム実験の結果ともよく一致する。辻村らの作業場の線量率測定結果では、原子炉建屋周辺の作業場では、眼の位置での測定結果の方が胸部位置での測定結果に比べて 1.2 倍高い結果が得られている。この空間の線量勾配と着用試験結果ともよく一致することから、空間の線量勾配が頭部線量に影響しているものと考えられる。

本年度は、頸部にも線量計を着用し測定を実施した。その結果、頸部位置に着用した線量計の結果 ($H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ または $H_p(0.07)$) については、胸部位置の測定結果との違いは見られなかった。遮蔽ベスト等の防護衣を着用しない場合の水晶体等価線量を測定する位置としては、均等被ばく管理においては胸部、眼の近傍での直接測定が必要な不均等被ばく時

は、胸部とのジオメトリの違いを考慮すると頸部ではなく、頭部（ γ 線の場合、頭部であれば位置は特に関係ない）が望ましいと考えられる。

稼働中の原子力発電所における定期検査時の実態調査においては、従事者の個人線量計着用試験とともに、作業場の線量率測定及び γ 線スペクトル測定も実施した。作業場の線量率測定の結果、多くの作業場では、 $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ の値はほぼ等しいことがわかった。しかし、蒸気発生器マンホール開口部分において、 $H'(0.07)$ が $H^*(10)$ より5倍程度も高くなる場が存在した。しかし、核種同定の結果、存在する主な放射性核種はCo-58またはCo-60であった。これらの核種から放出される β 線はエネルギーが低いことから、水晶体の等価線量に影響を与えることはない。また、 γ 線スペクトル解析の結果、500 keV以下の散乱線成分についても20～30%程度であることが明らかとなった。個人線量計の補正が必要なエネルギー範囲のエネルギー(100 keV未満)を持つ散乱線はより少ないことが予想されること、及び個人線量計着用試験結果から、同じ場所に着用した線量計から算定した $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ はほぼ等しい値になるものと考えられる。

BWRの原子力発電所及び廃止措置を実施している発電所における個人線量計着用試験の結果、定期検査時のPWR発電所と同様な傾向がみられた。以上のことから、原子力発電所の従事者の水晶体の等価線量の評価を行う上では、 $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ のいずれの値を用いて評価しても、著しい過大または過小評価にはならないといえる。

本研究で対象とした作業について、原子力発電所全体でみると、場の高さ方向の線量勾配が従事者の頭部 $H_p(3)$ と胸部 $H_p(10)$ との関係をよく表している。

対象作業の中で、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ の比が1.5を超える対象者が確認された作業は、原子炉開放作業、蒸気発生器マンホール開放作業（マンホール開口部の近傍での作業）、蒸気発生器細管検査付帯工事、一次冷却材ポンプインターナル分解点検、廃止措置における除染作業、放射線の測定作業であった。このような作業場の線量率は、眼の近傍が2倍から5倍程度高くなる傾向を示した。蒸気発生器マンホール開口部の近傍では、眼の位置の $H'(3)$ が胸部位置の $H^*(10)$ の約5倍、一次冷却材ポンプインターナル分解点検では、1階の作業場において、約3倍、蒸気発生器配管検査付帯工事場所では約2倍であった。ただし、場の線量が2倍から5倍となったとしても、従事者の頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は、2を超えることはなかった。これは、常に線量の高い場所に頭部(水晶体)がさらされているわけではなく、作業姿勢や立ち位置（線源からの距離）が変化することが影響しているものと考えられる。同様に、作業場の下方部の線量が高い場合（頭部/胸部線量比が0.7）、頭部 $H_p(3)$ /胸部 $H_p(10)$ 比は1に近くなったが、作業場の線量勾配と同程度まで低下するわけではなかった。これも作業姿勢等の影響によるものと考えられる。また、辻村らが昨年度の報告書で述べたとおり、作業姿勢が変化するという事は、すなわち回転（ROT）条件での照射となることから、作業場の線量勾配ほどではないが、頭部と胸部のジオメトリの違いも影響しているものと考えられる。

非破壊検査作業については、作業場は均一な線量分布になると予想されるが、頭部 $H_p(3)$ は胸部 $H_p(10)$ に比べ、わずかに高くなる傾向を示した。ばらつきが大きかったものの、頭部と胸部線量の違いに対しては、頭部と胸部のジオメトリの違いを全く無視することができないことを意味しているものと考えられる。

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、金濱英昭氏、上野敏弘氏、小島綾華氏、飯塚正人氏、込山有人氏、中村智之氏、五十嵐仁氏、福島第一原子力発電所及び柏崎刈羽原子力発電所の皆様、中部電力（株）吉田博氏、出来島誠氏、望月和博氏、福井重次氏、稲垣博光氏、鈴木達也氏、鴨川孝一郎氏、門奈健彦氏、森藤洋輔氏、世古俊也氏、山元章生氏、畦地直也氏、稲益誠氏、浜岡原子力発電所放射線管理課の皆様、関西電力（株）中村年孝氏、西谷英樹氏、高木正茂氏、三浦晃三氏、林敬氏、鶴野善之氏、秋宗尚弥氏、福田和大氏、佐々木憲文氏、北村正志氏、高浜発電所の皆様、九州電力（株）畠埜恭介氏、廣瀬友紀氏、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、電気事業連合会放射線管理委員会の皆様、（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、松田成史氏、佐々木厚氏、小菅大裕氏、萱野明広氏、黒澤優太氏、牟田雄一氏、小淵亮太氏、橋本紘佑氏、岡崎勇人氏ほか皆様、長瀬ランダウア（株）八木信行氏、関口寛氏、日本原子力研究開発機構 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、一瀬昌嗣氏（H29）、大町康氏、吉住奈緒子氏、佐藤直己氏、鹿島建設（株）、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）関電プラント、関電パワーテック、日本建設工業（株）、清水建設（株）、大成建設（株）、日立 GE、アトックス、中部プラントサービス、テクノ中部、（株）重松製作所、柴田科学（株）他、ご協力いただきましたすべての皆様

参考文献

- 1) 平成 29 年度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（2018）．
- 2) 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．
- 3) 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）．
- 4) 一般財団法人日本規格協会，X 線， γ 線及び β 線用線量当量（率）サーベイメータ JIS Z4333（2014）．
- 5) 谷村嘉彦，福島周辺家屋における γ 線スペクトルの評価，保健物理，51(3) 141-146（2016）．
- 6) 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, 2019 年 3 月 11 日閲覧。
<http://dosimetre.irsn.fr/en-us/Documents/Product%20files/DOSIRIS%20EN%20WEB.pdf>
- 7) 厚生労働省，眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会資料 2: 東京電力福島第一原子力発電所廃炉作業における自主的な取組と取組結果，
<https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000477103.pdf>, 2019 年 3 月 11 日閲覧．



図 2-1 1 次冷却材ポンプインターナル分解点検作業場における電離箱サーベイメータによる線量率測定の様子



図 2-2 蒸気発生器マンホール開放作業の様子



図 2-3 蒸気発生器マンホール開放後の作業場周辺の γ 線スペクトル測定の様子

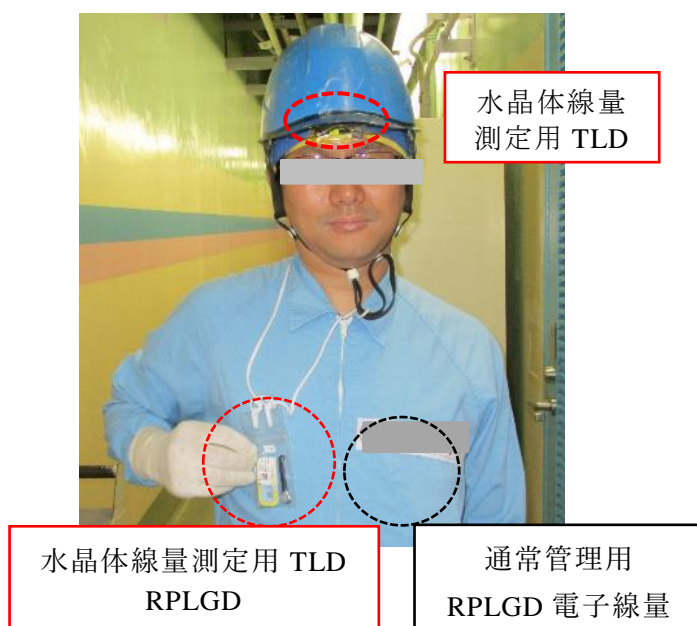


図 2-4 原子力発電所における個人線量計の着用例

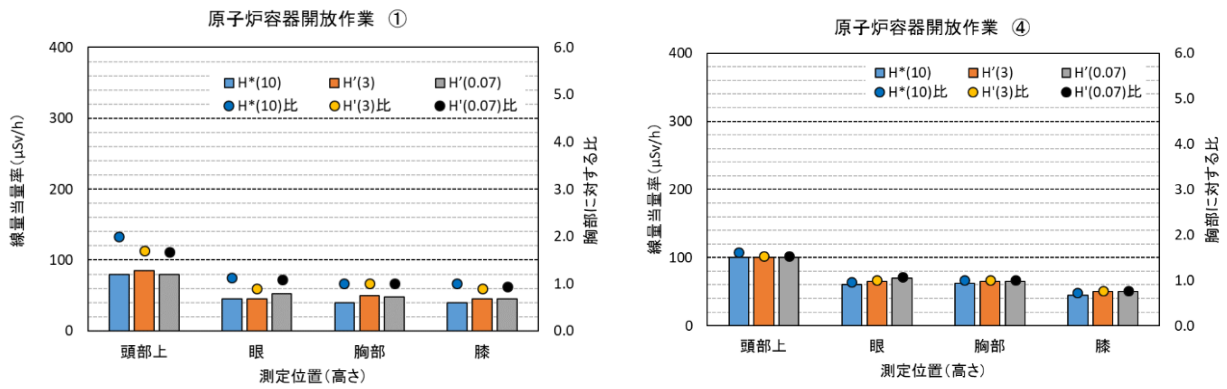


図 2-5 発電所 A における原子炉開放作業の場（原子炉容器上蓋周辺）の線量率

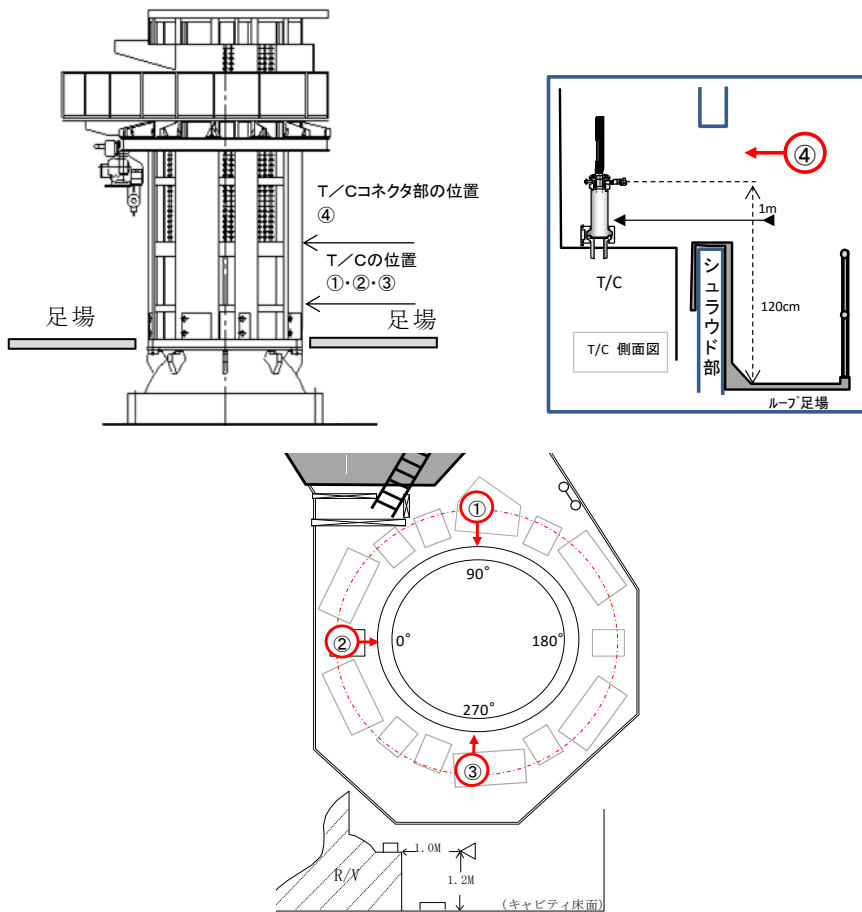


図 2-6 発電所 A における原子炉開放作業の場（原子炉容器上蓋周辺）の線量率測定場所

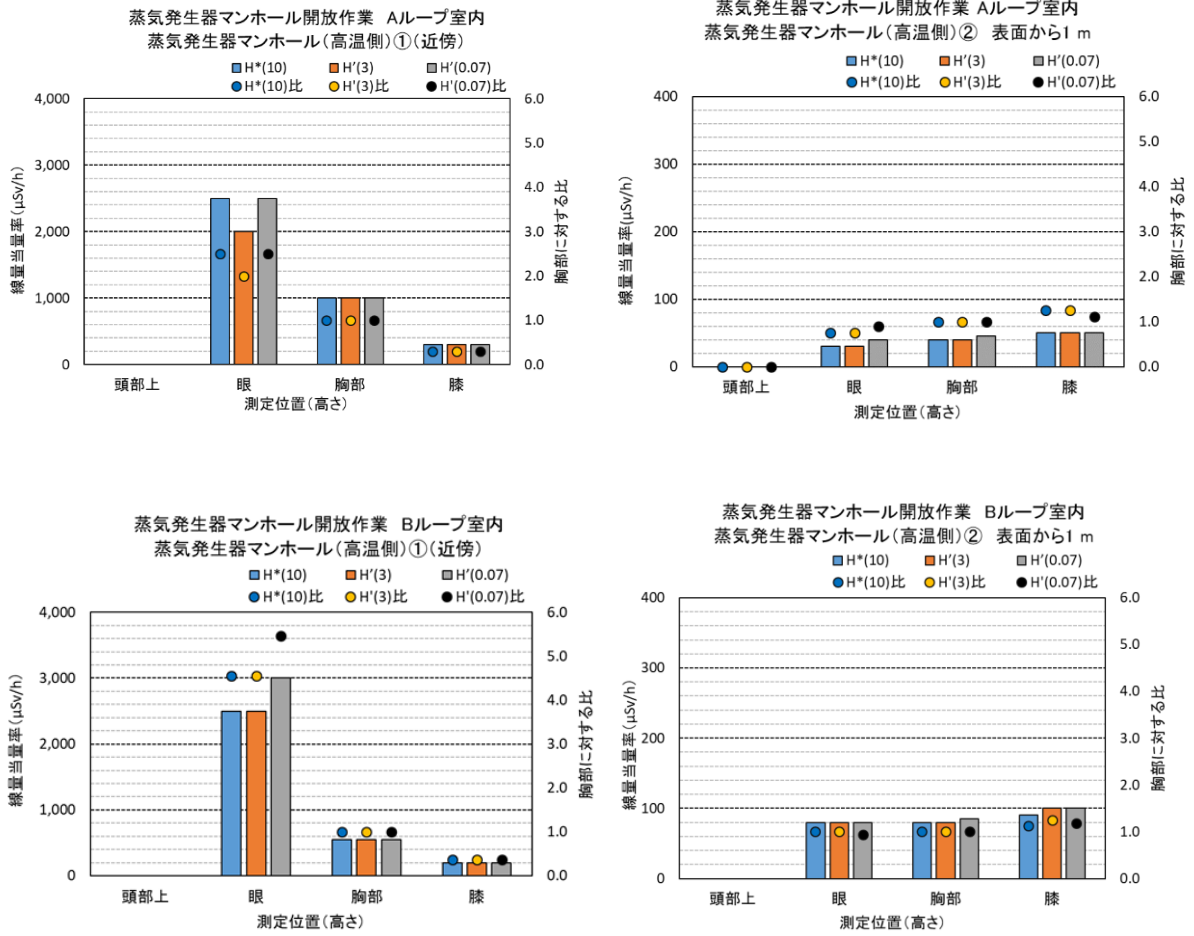


図 2-7 蒸気発生器下部マンホール周辺の線量率と胸部位置での測定結果に対する各位置の値の比

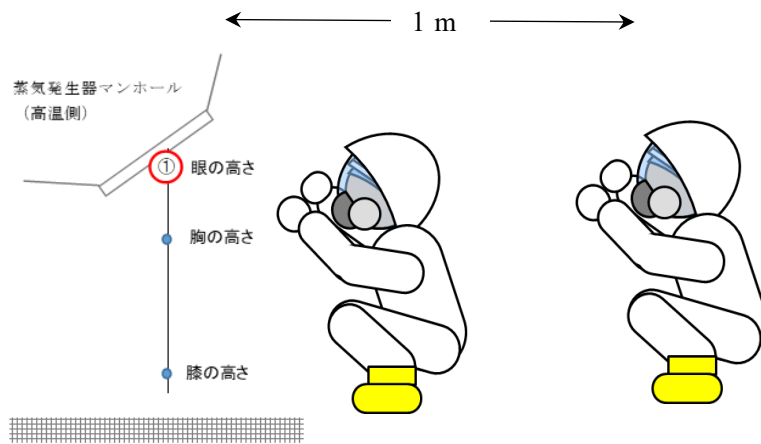


図 2-8 蒸気発生器マンホール周辺での線量率測定位置

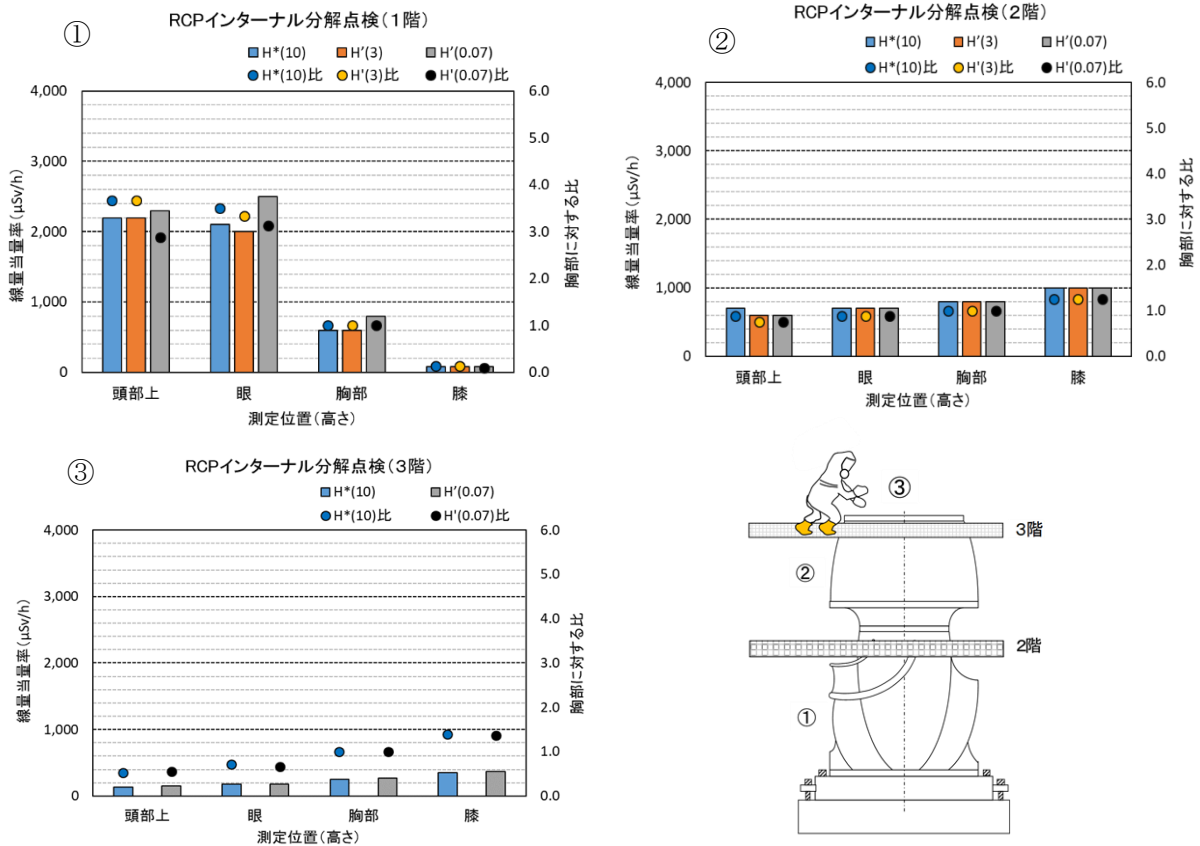


図 2-9 発電所 A における一次冷却材ポンプインターナル分解点検作業場の線量率、胸部位置の線量率に対する各位置の線量率の比及び線量測定場所

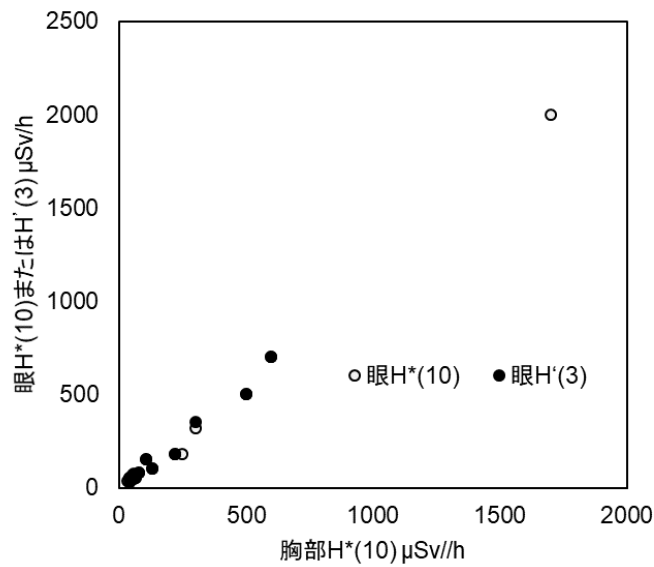


図 2-10 発電所 A における線量率測定結果 (蒸気発生器マンホール開口部近傍及び 1 次冷却材ポンプインターナル点検作業場の 1 階での測定を除く。)

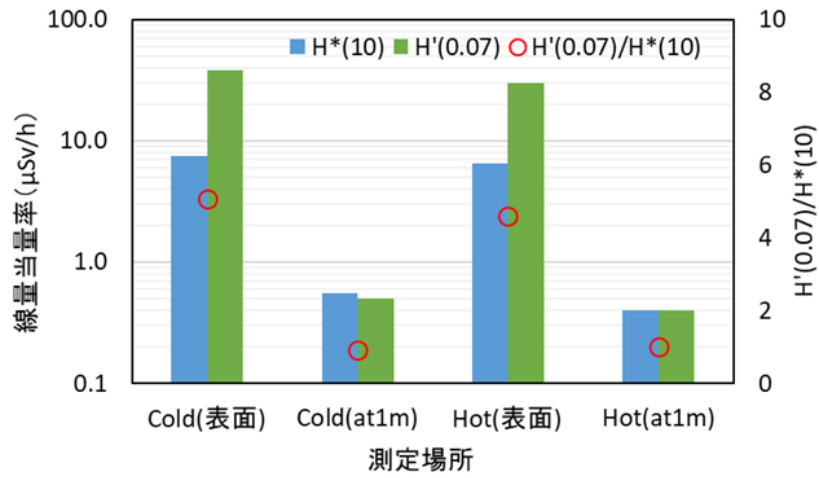


図 2-11-1 蒸気発生器 A マンホール開放時のマンホール近傍の線量率及び H* (10)に対する H' (0.07)の比(発電所 B)

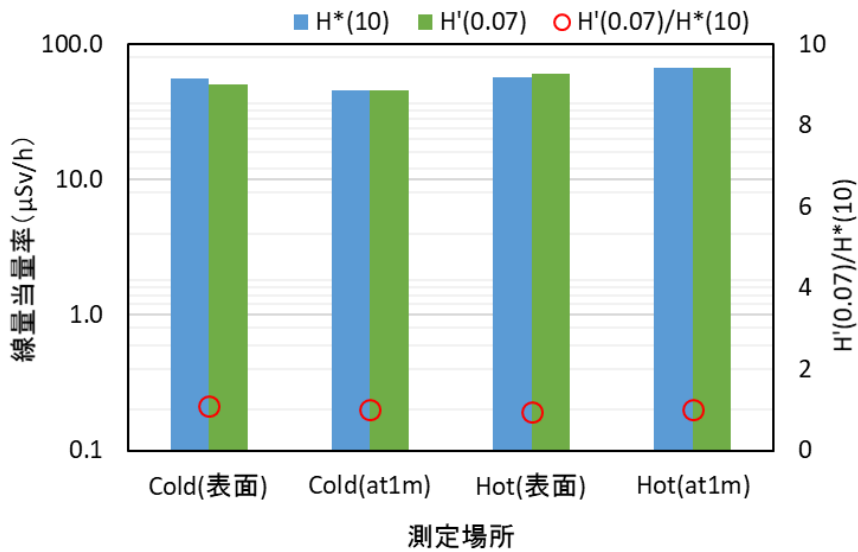


図 2-11-2 蒸気発生器 C マンホール閉止時のマンホール近傍の線量率及び H* (10)に対する H' (0.07)の比(発電所 B)



図 2-12-1 仮設遮蔽場所(A ループ室)の線量当量率測定の様子

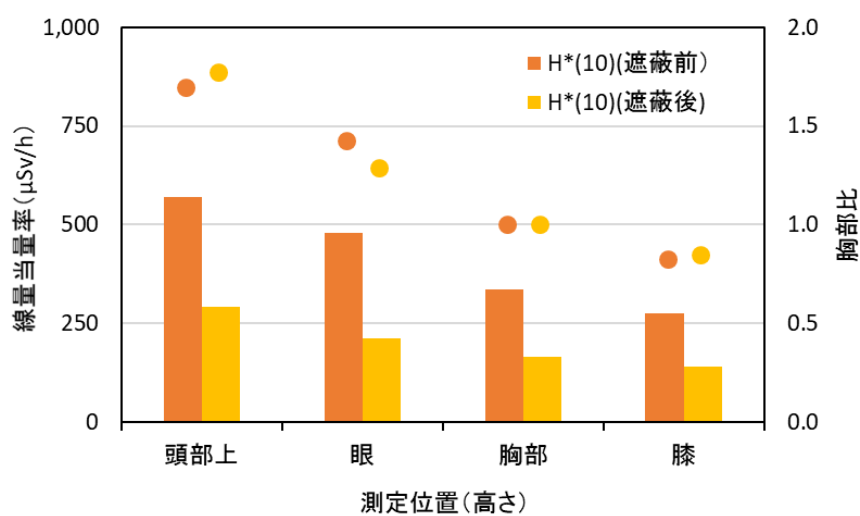


図 2-12-2 A ループ室における仮設遮蔽設置前後の各高さでの H*(10)及び胸部高さの値に対する各高さの値の比 (発電所 B)

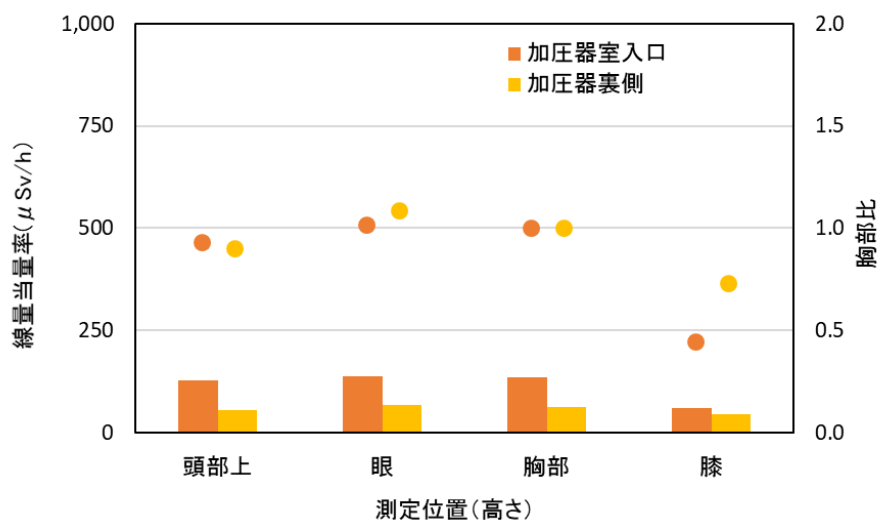


図 2-13 加圧器室における各高さでの H*(10)及び胸部高さの値に対する各高さの値の比 (発電所 B)

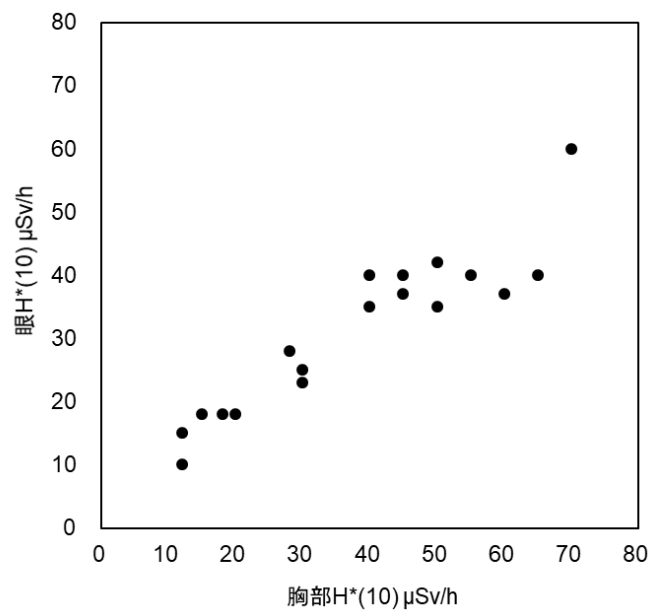


図 2-14 胸部位置での H*(10)と眼の位置での H*(10)の関係(発電所 C)

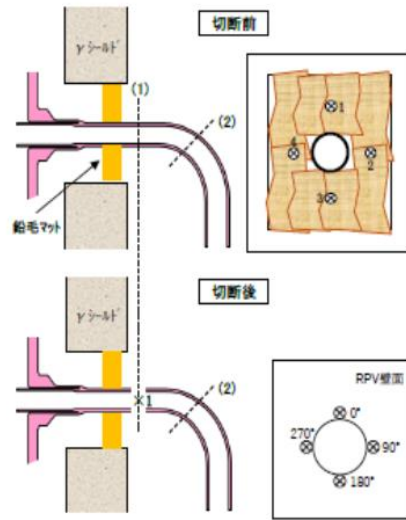


図 2-15 配管切断時の配管表面線量率測定場所（発電所 D）

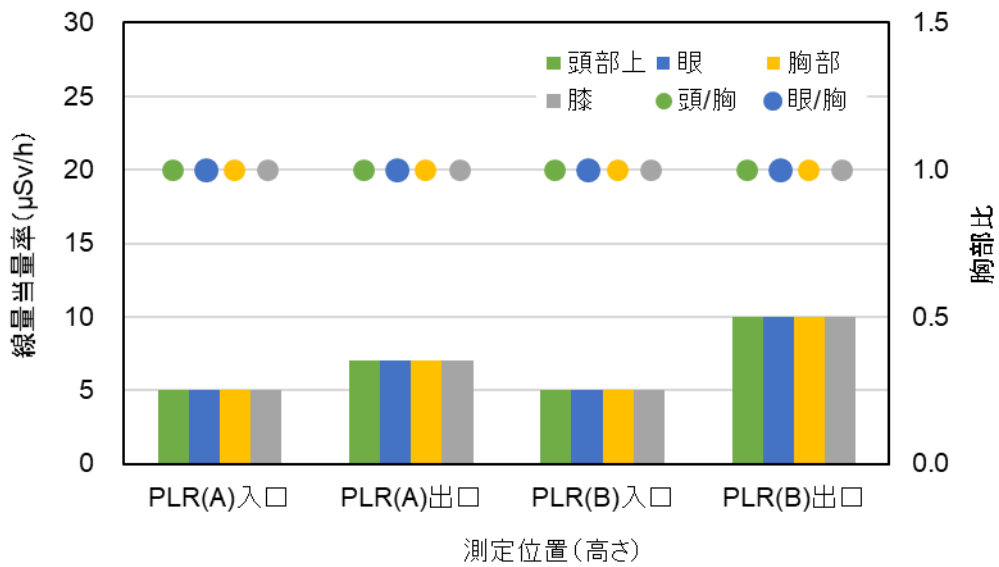


図 2-16-1 発電所 D の 1 号機原子炉建屋ドライウエル (DW) 1 階の H*(10)及び胸部位置の値に対する各高さにおける値の比

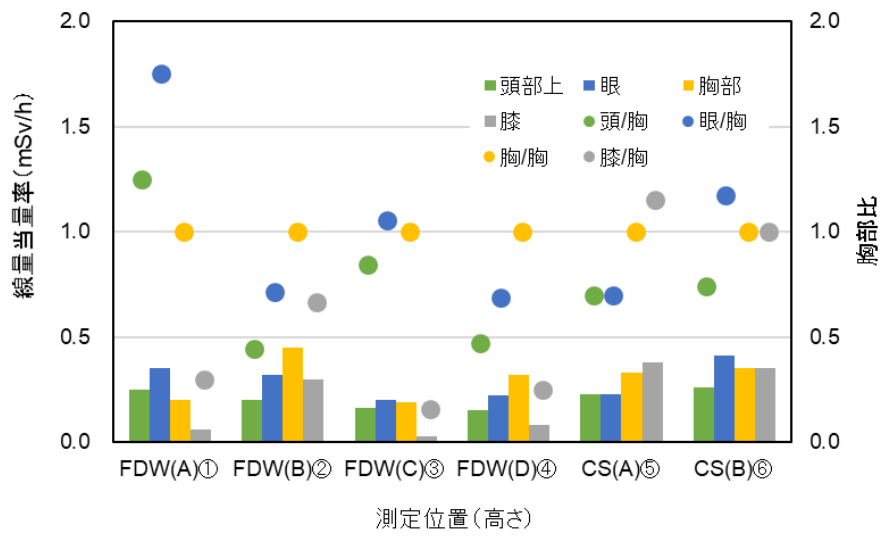


図 2-16-2 発電所 D の 1 号機原子炉建屋 DW4 階の H*(10)及び胸部位置の値に対する各高さにおける値の比

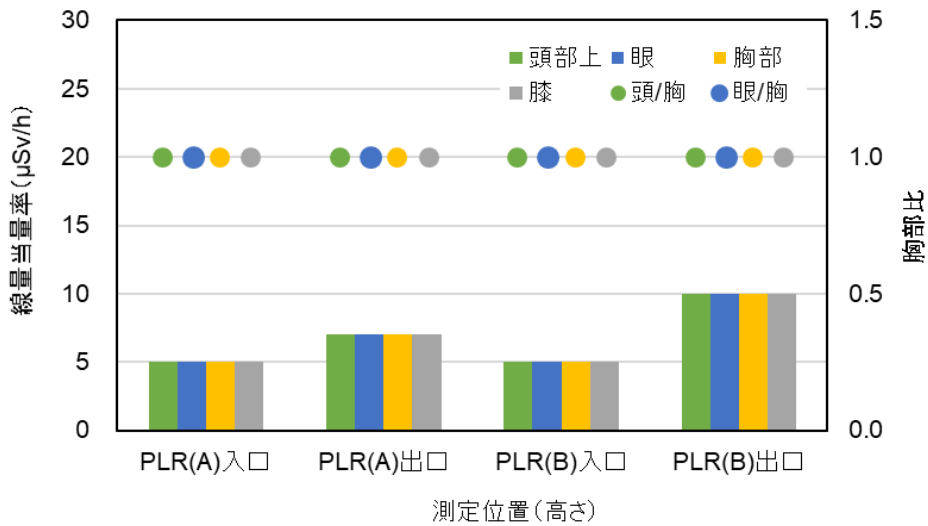


図 2-16-3 発電所 D の 1 号機原子炉建屋 DW5 階の H* (10) 及び胸部位置の値に対する各高さにおける値の比

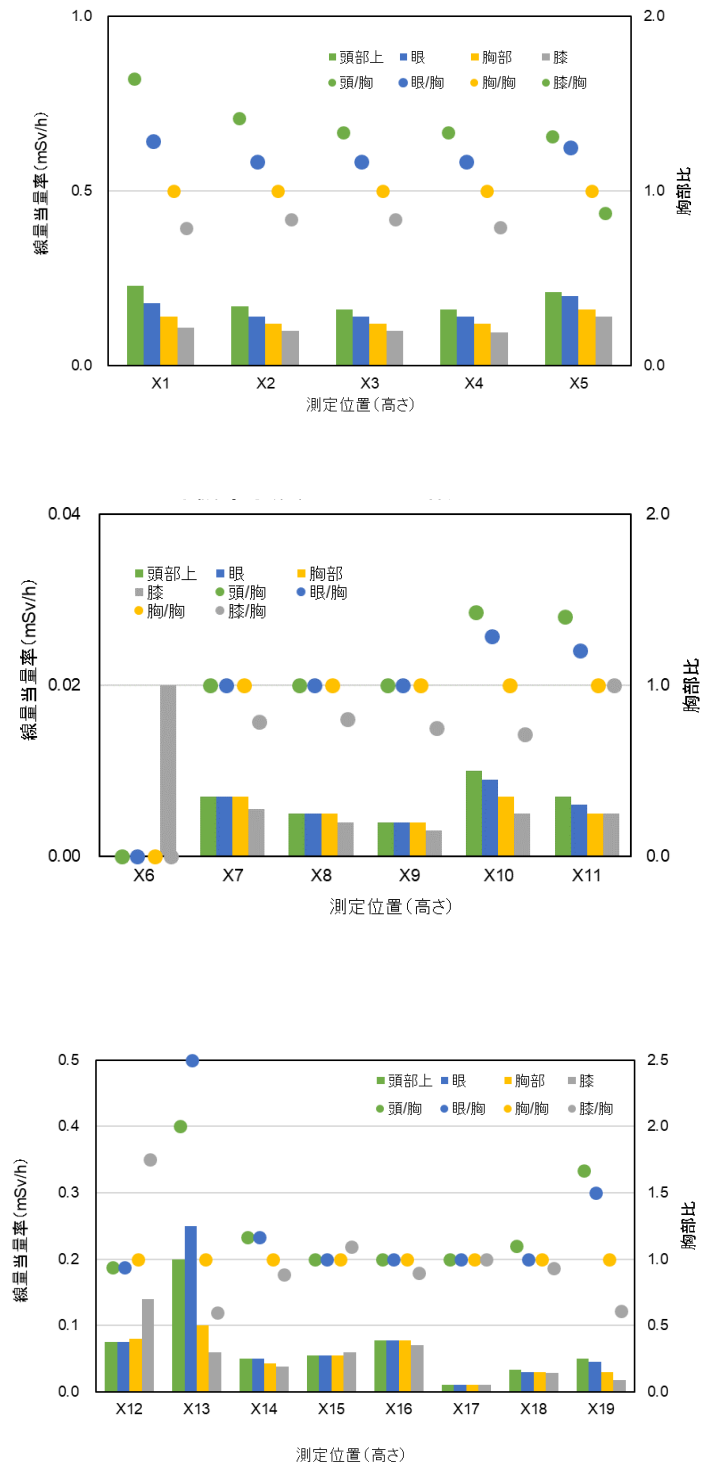


図 2-17-1 発電所 D の 2 号機 DW 内のペデスタル内の線量率及胸部位置の線量率に対する各高さでの線量率の比 (ペデスタル内養生時) (X1~X11 : 1 階、X12~X19 : 地下 1 階)

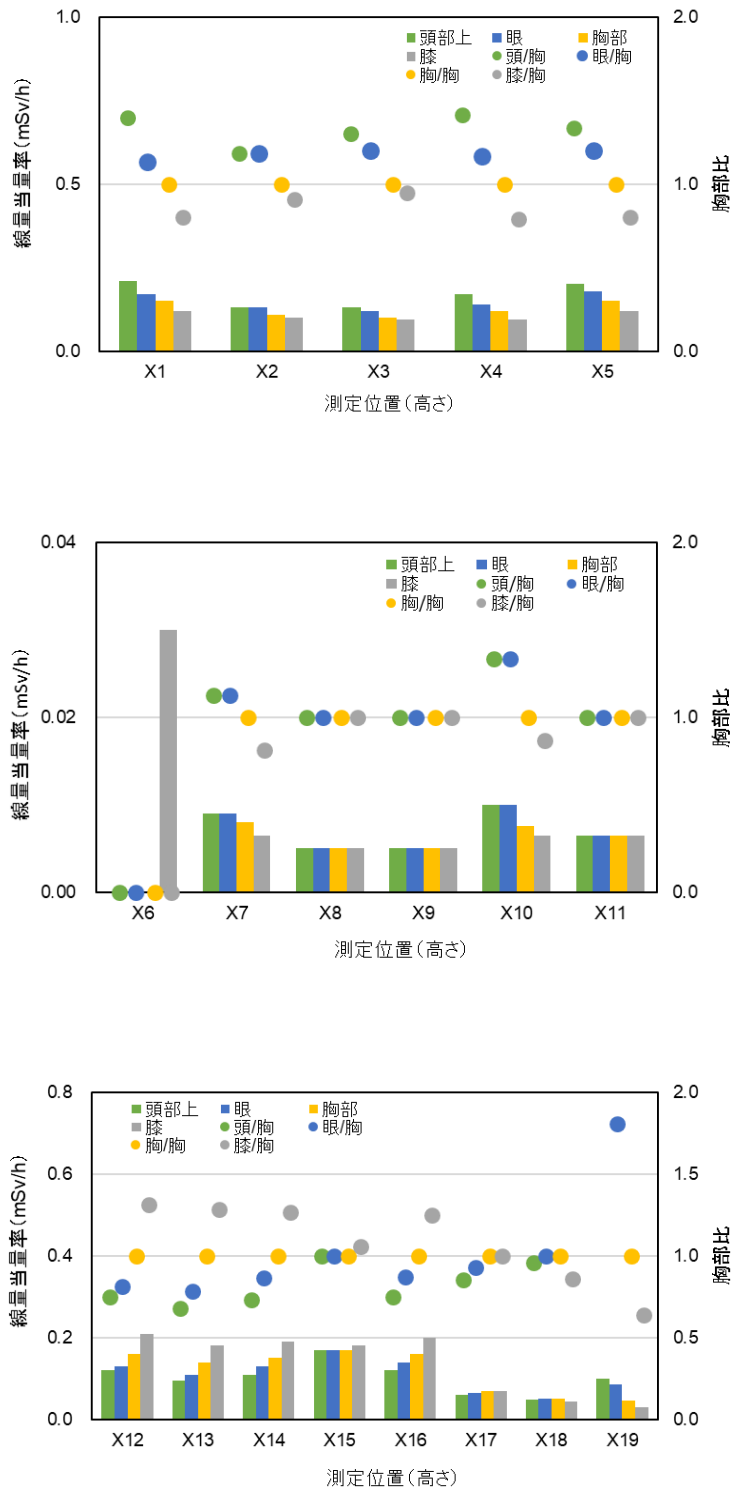


図 2-17-2 発電所 D の DW 内のペデスタル内の線量率及胸部位置の線量率に対する各高さでの線量率の比 (2号機) (CRD サーマルスリーブ取外し、搬出、養生、仮置、新閉止フランジ取付時) (X1~X11 : 1階、X12~X19 : 地下1階)

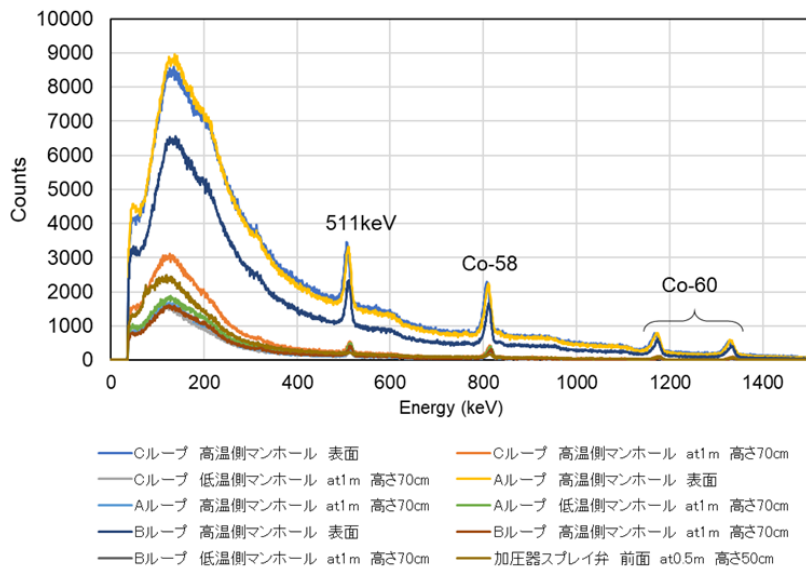


図 2-18-1 蒸気発生器マンホール周辺（マンホール開放時）の γ 線スペクトル測定結果（発電所 A-1）

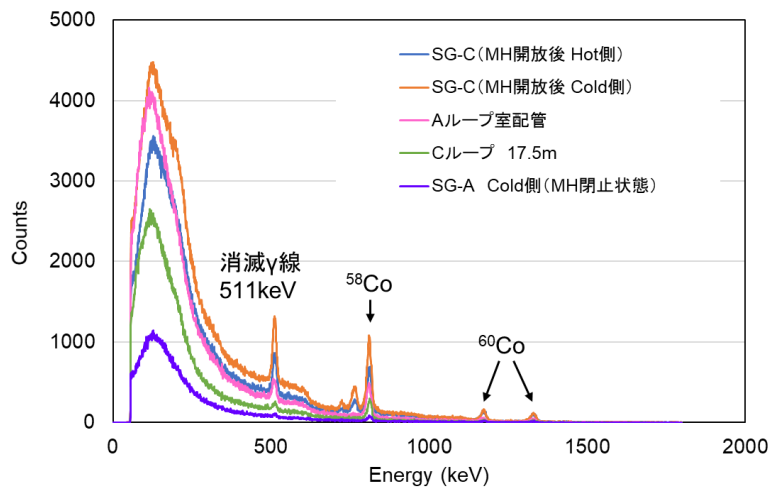


図 2-18-2 蒸気発生器マンホール周辺（マンホール開放時）の γ 線スペクトル測定結果（発電所 B）

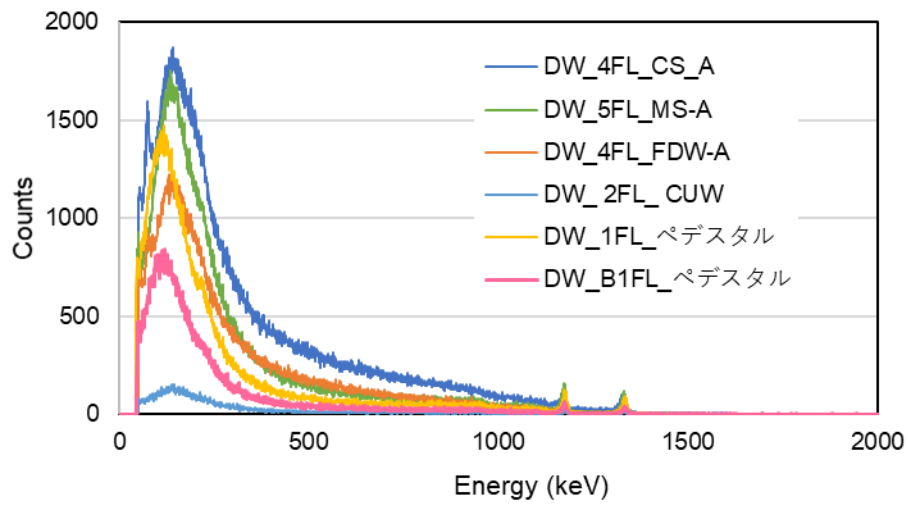


図 2-18-3 DW 内地下 1 階、1、2、4、5 階及び原子炉建屋内 1 階余熱除去系配管周辺 (RHR) における γ 線スペクトル測定結果 (発電所 D)

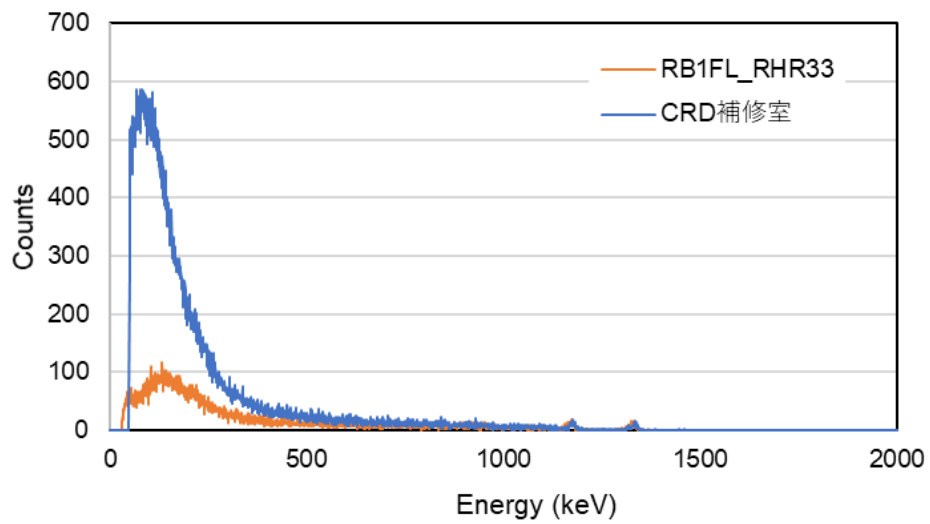


図 2-18-4 原子炉建屋内 1 階余熱除去系配管周辺 (RHR) 及び CRD 補修室における γ 線スペクトル測定結果 (発電所 D)

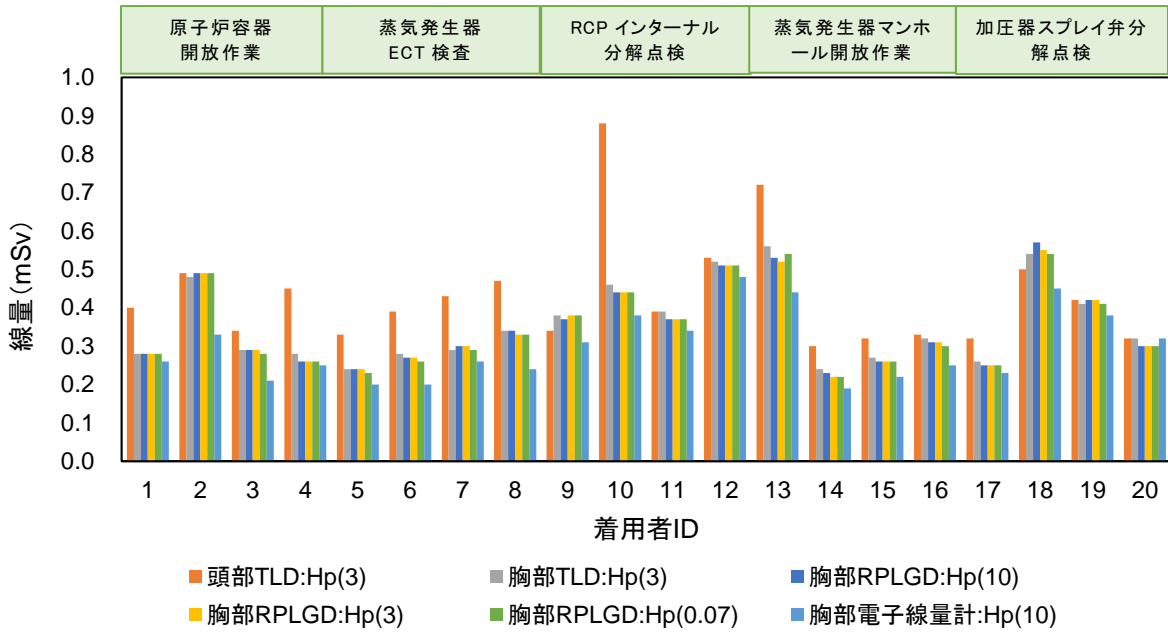


図 2-19-1 対象者ごとの個人線量計着用試験結果（発電所 A-1）

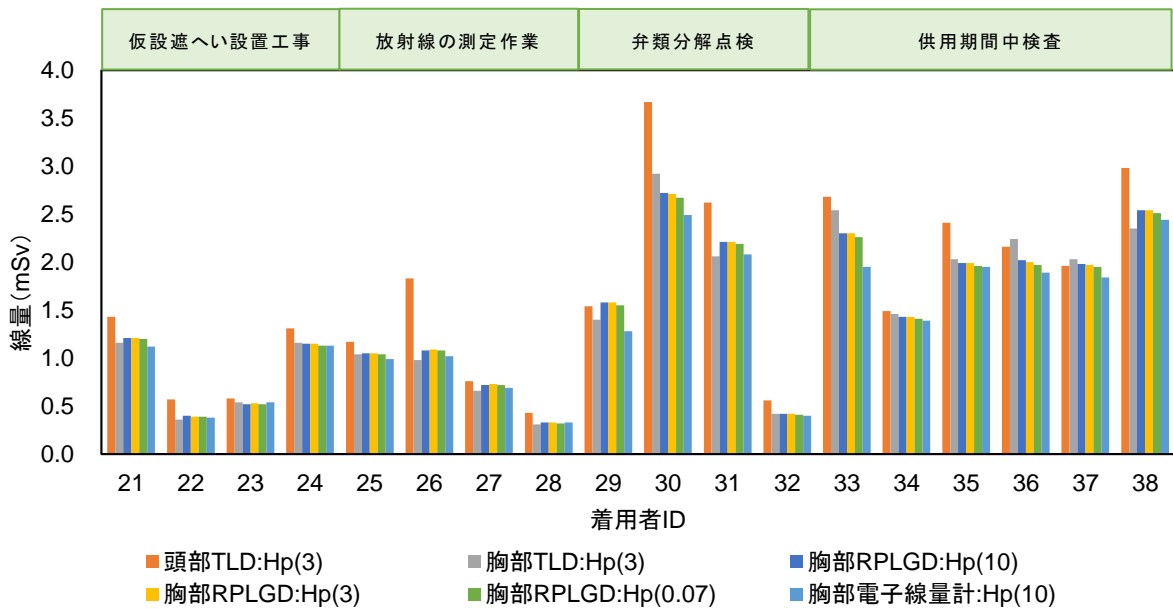


図 2-19-2 対象者ごとの個人線量計着用試験結果（発電所 A-2）

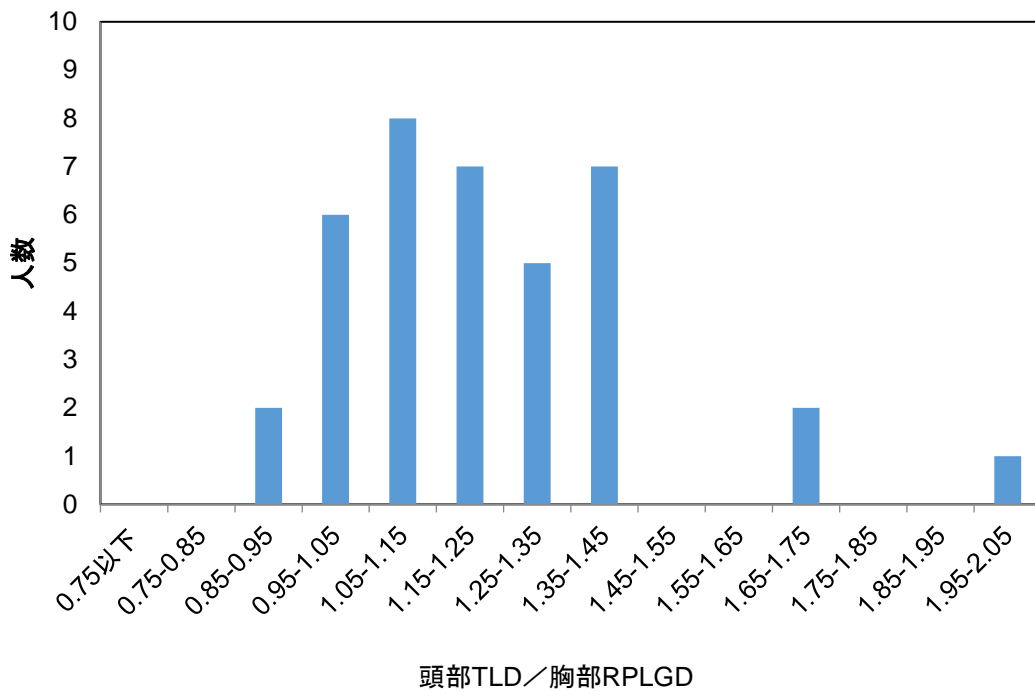


図 2-20 個人線量計着用者の頭部 Hp(3)/胸部 Hp(10)の分布(発電所 A)

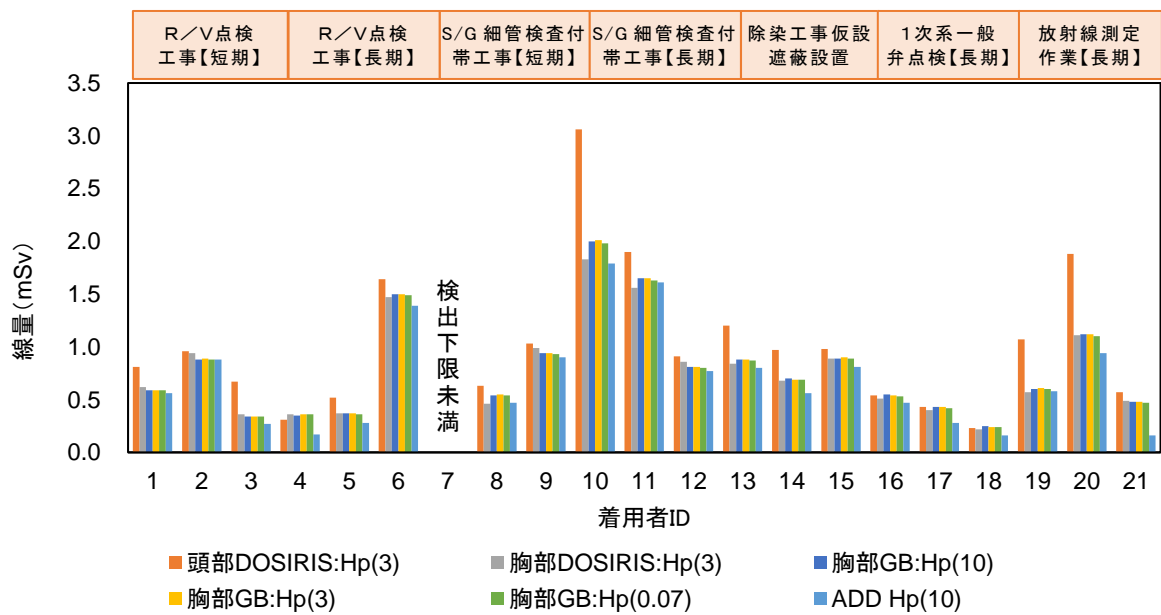


図 2-21 対象者ごとの個人線量計着用試験結果 (発電所 B)

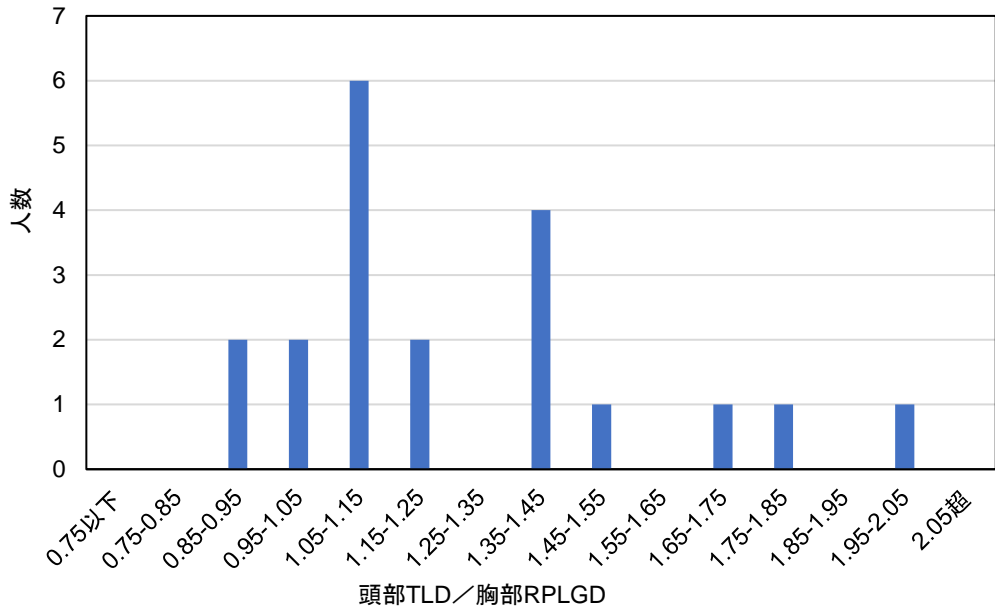


図 2-22 個人線量計着用者の頭部 Hp(3)/胸部 Hp(10)の分布(発電所 B)

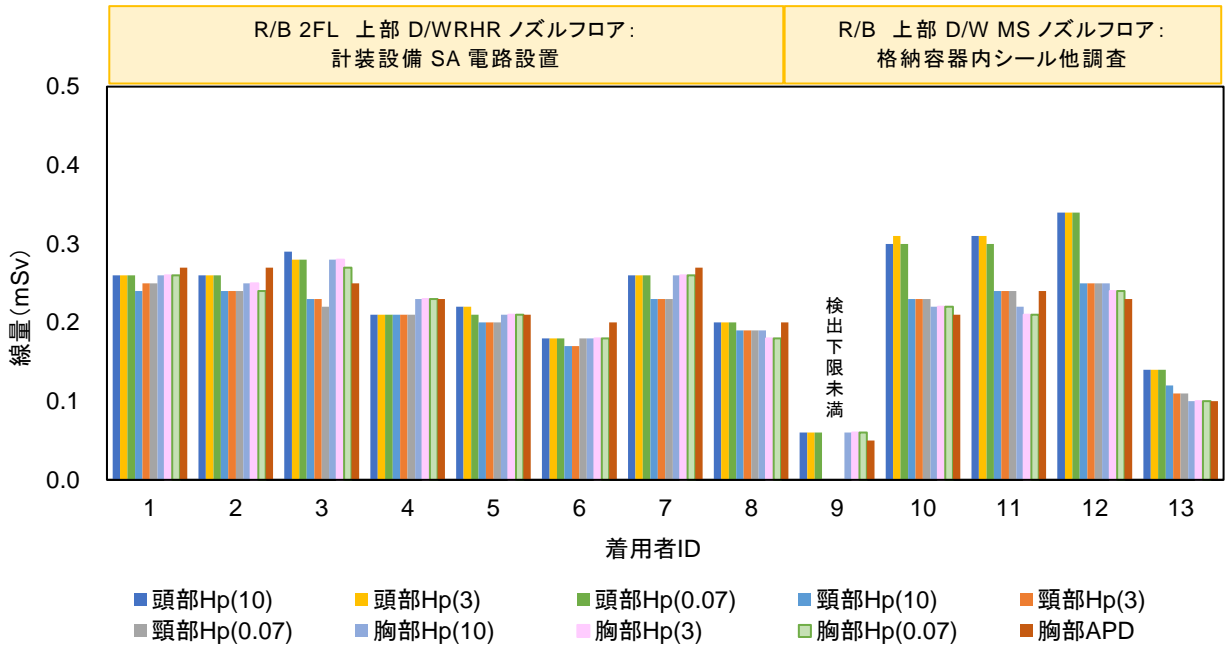


図 2-23 対象者ごとの個人線量計着用試験結果 (発電所 C)

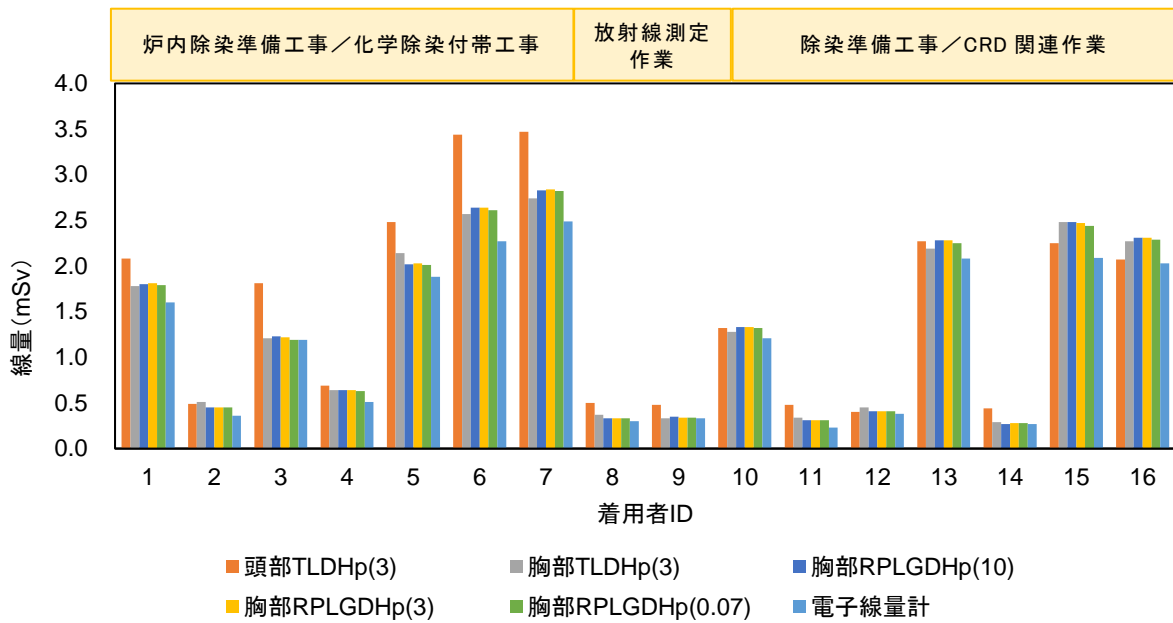


図 2-24 対象者ごとの個人線量計着用試験結果（発電所 D）

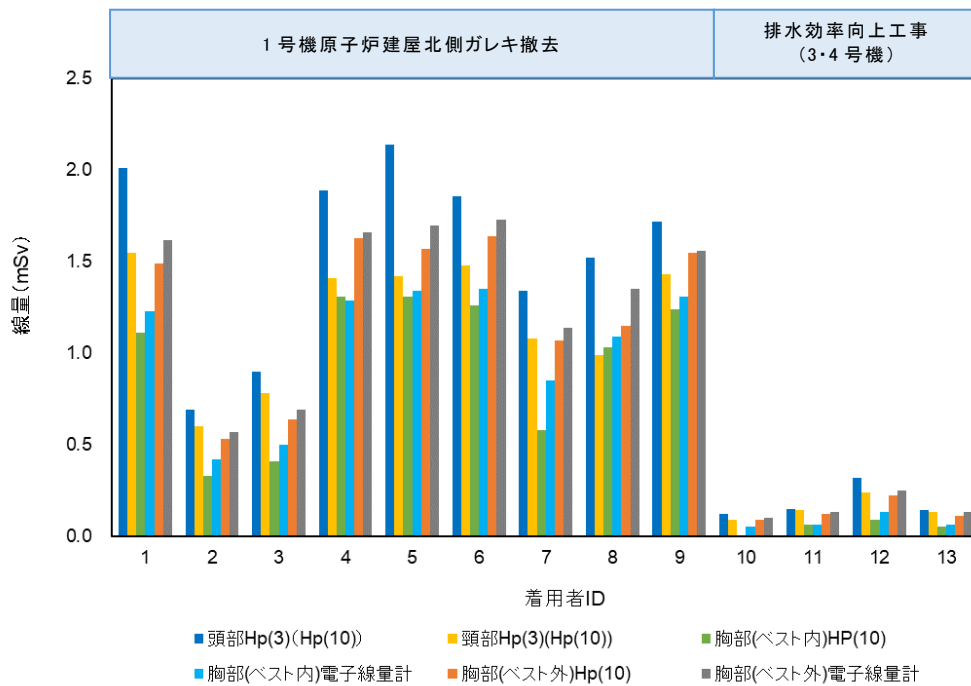


図 2-25 対象者ごとの個人線量計着用試験結果（東電 1F 原子炉建屋周辺）

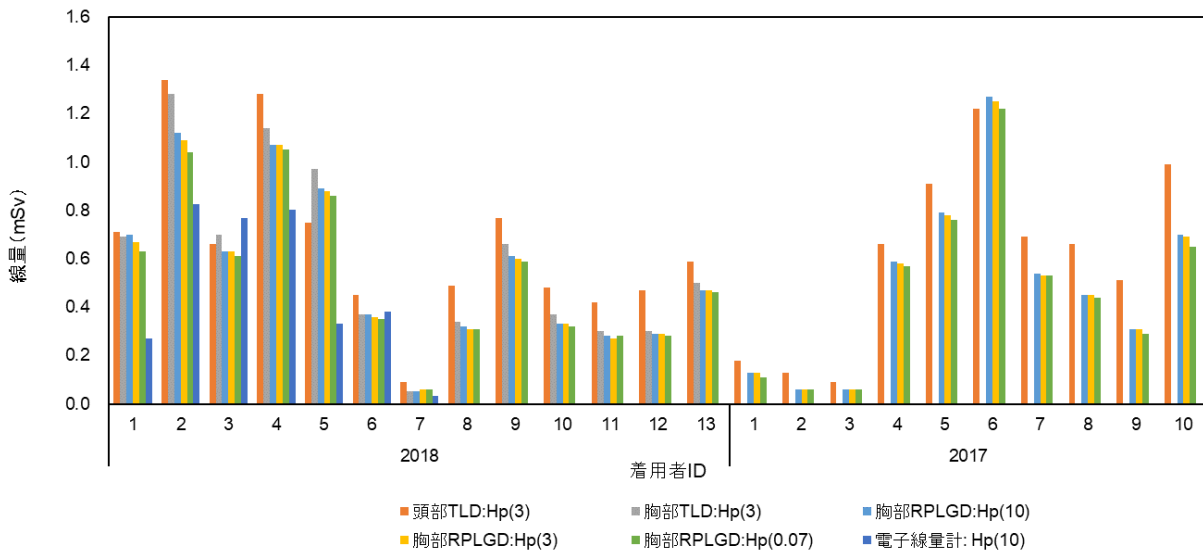


図 2-26 対象者ごとの個人線量計着用試験結果（非破壊検査）

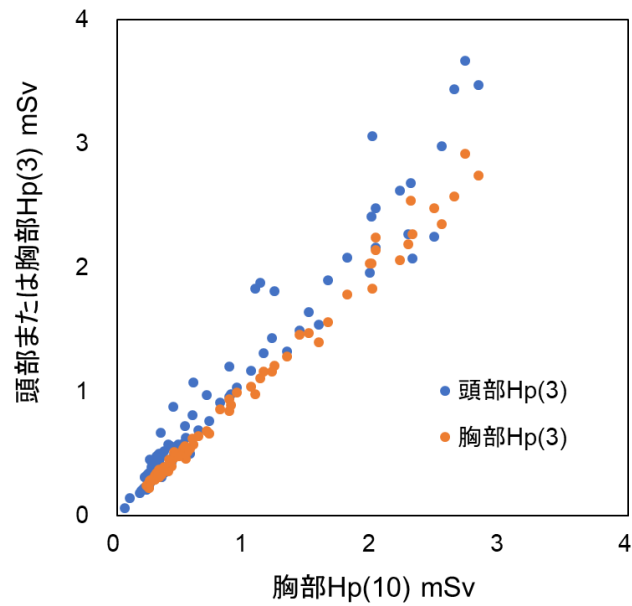


図 2-27 全発電所着用試験対象者の胸部 $H_p(10)$ と頭部または胸部 $H_p(3)$ の関係（東電 1F 除く）

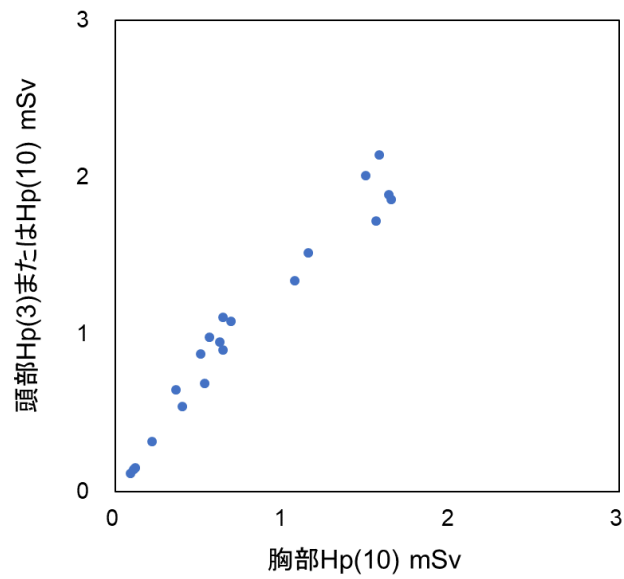


図 2-28 東電 1F における着用試験対象者の胸部 $H_p(10)$ と頭部 $H_p(3)$ または $H_p(10)$ の関係

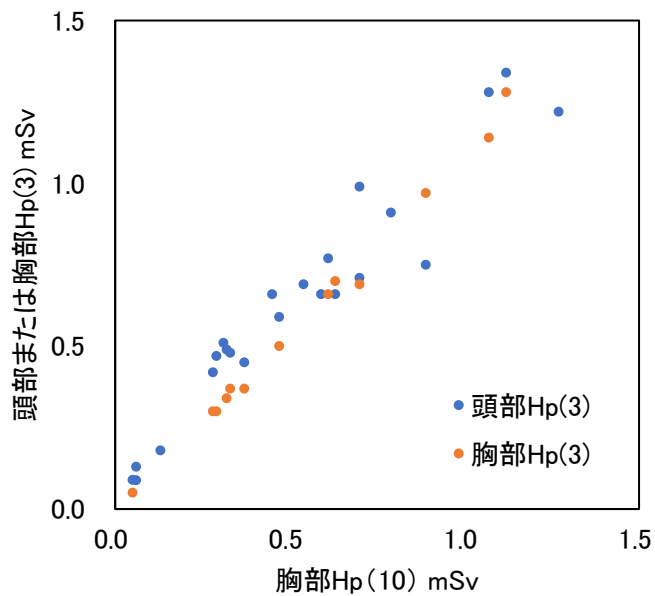


図 2-29 非破壊検査作業における胸部 $H_p(10)$ と頭部または胸部 $H_p(3)$ との関係

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

本研究は, (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。

2年計画の2年目である平成30年度は, (1)について, 引き続き日本原子力研究開発機構(以下, 「原子力機構」と記す)におけるこれまでの被ばく記録の調査, (2)について, 東京電力福島第一原子力発電所(以下, 「東電1F」と記す)作業現場での実験, (3)について, 頭部ファントムに取り付けた個人線量計と β 線スペクトロメータを用いた測定によって東電1Fで使用されている全面マスクの β 線遮へい性能の評価を行う。それぞれの実施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

原子力機構において, 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: 再処理施設(1983(昭和58)年度に行われたセル内作業)及びMOX燃料施設(2002~2017年度: 平成29年度報告書に2014年度以降のデータを追加)

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

東電 1F の実際の作業現場において、 γ 線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、3 mm 線量当量、1 cm 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。

本実験の日時と場所、使用した測定器を以下に記す。計 3 回の現場実験のうち第一回については平成 29 年度報告書で既に報告済みであるため、本報告書では第二回と第三回について記す。

(1) 日時と場所

第一回 平成 29 年 11 月 30 日～12 月 1 日

東電 1F：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，3 号機タービン建屋東側

第三回 平成 30 年 12 月 20～21 日

東電 1F：2 号機・3 号機原子炉建屋間道路わき（第二回実験とほぼ同じ場所）

(2) 測定機器

(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。第二回及び第三回測定では，検出器にコリメータを装着し，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。各測定は，コリメータ開口部をアダプターで塞いだ場合（アダプターあり）と塞がない場合（アダプターなし）の 2 回行う。
- 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（Inspector 2000）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。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の応答関数は，検出器に 4 π 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⁾。コリメータ付き CdZnTe 検出器については，アダプターなしの波高スペクトルから，アダプターありの波高スペクトルを差し引いた差波高スペク

トルに対して、アンフォールディング処理を行うことによって、光子スペクトルを導出する。アンフォールディングに用いた応答関数は、まず、アダプターありなしで、前方から入射する単一エネルギー光子線（5 keV 刻み）に対するコリメータ内の検出器の応答をモンテカルロ計算により評価し、検出器の分解能を再現するためにガウス分布により広がりを持たせた後、アダプターなしの検出器応答からアダプターありの検出器応答を差し引き、応答関数とした。両検出器ともに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、ICRP 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) 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（詳細については平成 29 年度報告書 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。表 3-1 にそれぞれの個人線量計の仕様を示す。

① 立方体ファントム（図 3-3）：外寸 30 cm × 30 cm × 15 cm のアクリル樹脂からなる。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。ここで、電子式個人線量計は、ファントム表面に埋め込まれるよう切削した穴にはめ込まれる。本ファントムは、第三回実験の際に簡易人体形状ファントムの隣に設置した。

② 簡易人体形状ファントム（図 3-4）：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¹⁰⁾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、一体は静止させた状態で、もう一体は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。

本簡易人体形状ファントムの設置位置は、第二回実験では、2号機・3号機原子炉建屋間道路の3号機側路肩（ファントム正面を3号機の側に向けて）、3号機タービン建屋の東側（正面を3号機側に向けて）、また、第三回実験では、第二回実験と同じく2号機・3号機原子炉建屋間道路の3号機側路肩（正面を3号機の側に向けて）である。さらに、第三回実験では、胴体部分に遮へいベスト（信越化学工業株式会社製、放射線遮蔽シリコンゴム「ラディバリヤーシリーズ」）を被せ、それが個人線量計指示値に与える影響を調べる。第三回実験の様子を図 3-5 に示す。

(c) 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。

(3) 特記事項

本実験に参加した分担研究者と協力者ら計5名は、放射線業務従事者としての個人被ばく管理の目的の個人線量計とは別に、水晶体用個人線量計(長瀬ランダウア社 Vision)を頭部と胴体部に装着した。それら線量計の指示値と、ファントム実験から得られる線量計指示値との関係について補足的な検討を行う。

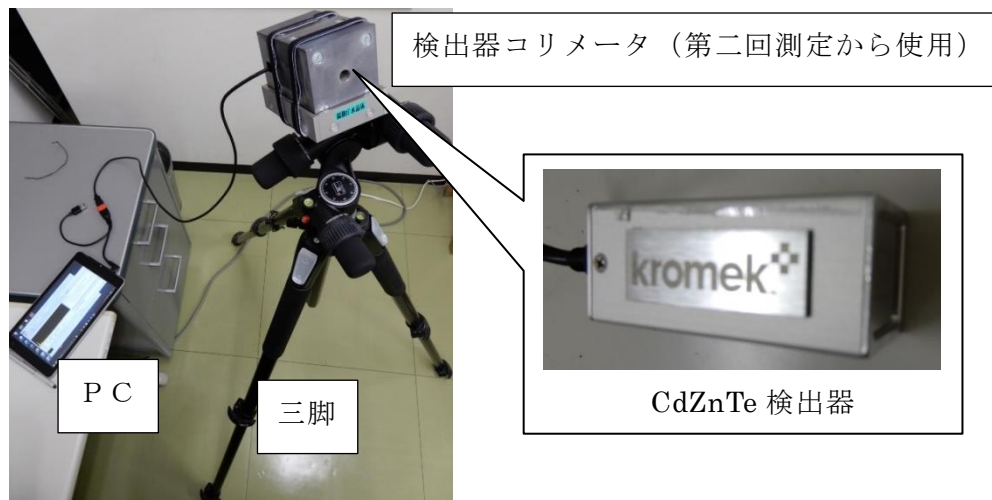


図 3-1 γ 線スペクトロメータ (CdZnTe 検出器)

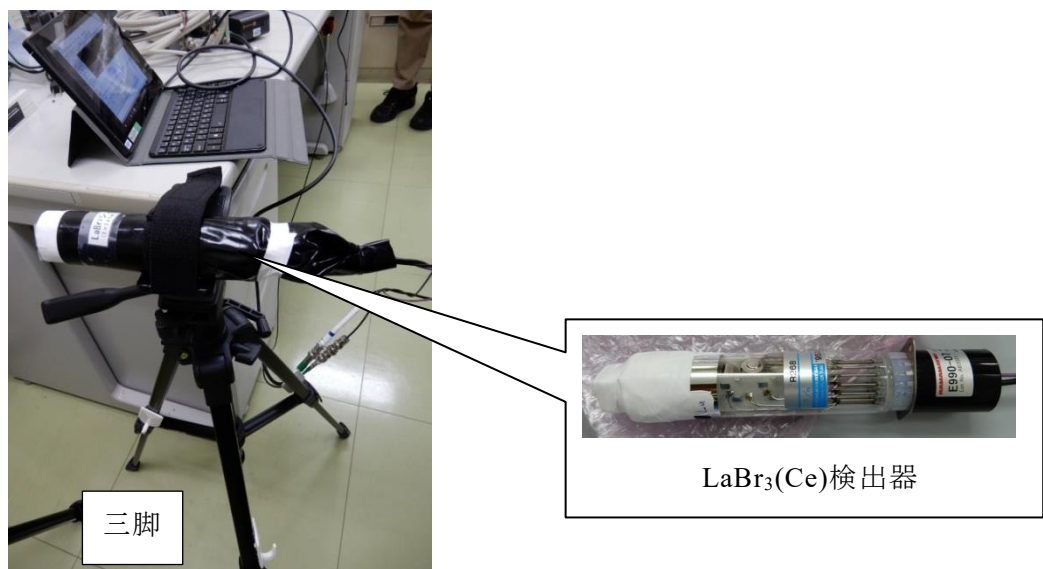


図 3-2 γ 線スペクトロメータ (LaBr₃(Ce)シンチレータ)

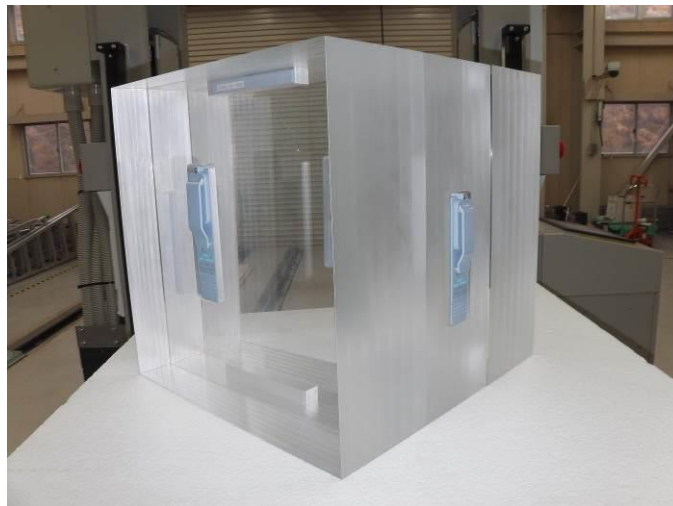


図 3-3 立方体ファントム(写真は電子式個人線量計を取り付けた状態)

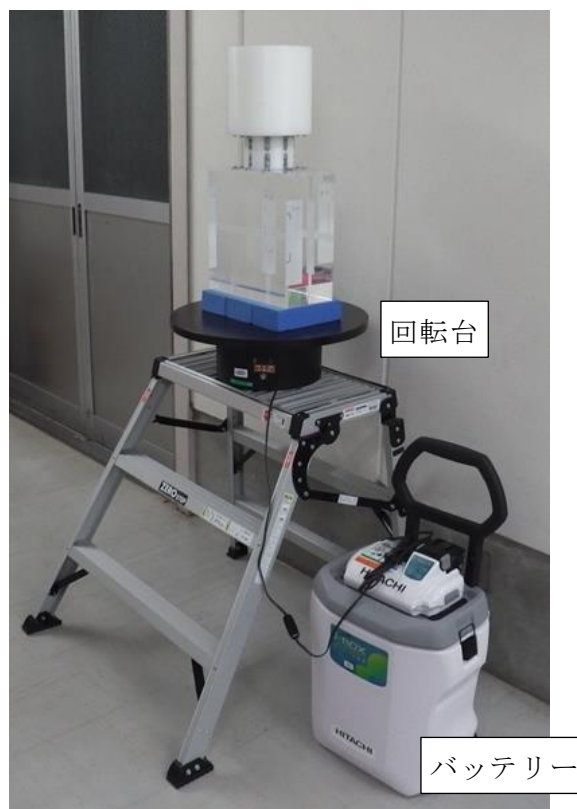


図 3-4 簡易人体形状ファントム

写真中の自動回転台(バッテリー駆動で連続 6 時間作動)は第二回実験で使用された。一方、第三回実験では、胴体部分に取り付けた防護ベストの重量が自動回転台の積載能力を超える恐れがあったため、一定時間ごとに 90 度間隔でファントム全体を手動で回転させた。



図 3-5 第三回実験の様子

上段:簡易人体形状ファントム(右は胴体部分に防護ベストを胴体部に取り付けた状態),下段:写真手前から簡易人体形状ファントム(回転),簡易人体形状ファントム(静止),γ線スペクトロメータ(静止ファントムの陰で見えない),立方体ファントムであり,それらの間隔は1.7 m,1.3 m及び2.0 mである。(ファントム設置場所は図3-11の■印を参照)



図 3-5 第 3 回の様子(続き)

上段: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器(左)とコリメータ付き CZT 検出器(右)。ともに高さは 120 cm。(測定位置:
図 3-11②)

下段: 防護ベスト内での $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器による測定

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 β 線照射試験
千代田テクノロ Dosiris	LiF 熱ルミネセ ンス線量計	水晶体用線量計	20cm ϕ \times 20cm 円柱 ファントム	RANDO ファントム 頭部(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 \times 20cm 円柱 ファントム	
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)
千代田テクノロ 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 \times 20cm 円柱 ファントム 30cm \times 30cm \times 15cm アクリル平板ファントム	RANDO ファントム 頭部(前額)
パナソニック ZP-1461	Si 半導体	全身用個人線量計	30cm \times 30cm \times 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 \times 30cm \times 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 又は AE-133B/ Λ 2 ⁺	電離箱式	γ 線 $H'(10)$, $H'(3)$, $H'(0.07)$ β 線 $H'(10)$, $H'(3)$, $H'(0.07)$ ^注	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。

注: β 線の場合, 方向性線量当量 $H'(3)$ 及び $H'(0.07)$ は, 個人線量当量 $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ と等価であるため, 本報告書では, 相互に交換できる用語として使用する。

3.2.3 β 線のマスク遮へい実験： β 線スペクトロメータによる測定

東電 1F で使用されている全面マスクについて、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線の遮へい性能を β 線スペクトロメータによる測定によって評価する。

実験で使用した β 線スペクトロメータは、直径 25.4 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¹¹⁾。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) の飛程に相当するので、シンチレータ前面の直径 25 mm の入射窓 (アルミ蒸着マイラー: 2.7 mg/cm²) を通り抜けた β 線はシンチレータ中ではほぼフルストップする。したがって、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 - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 線源からの内部転換電子 (625 keV) を利用し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入射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。ここで使用する換算係数は、ICRP Publ. 74 (Table A.44)⁸⁾ の 70 μm 線量当量 (方向性線量当量 $H'(0.07)$) と 3 mm 線量当量 (方向性線量当量 $H'(3)$)、さらに Cross¹²⁾ の計算に基づく水中の任意深さでの吸収線量である。後者の換算係数は、線量の深さ分布を得ることを意図したものである。

β 線源には、Amersham-Buhler 社製 ^{90}Sr - ^{90}Y (公称放射能 74 MBq) を用いる。本線源は、距離 30 cm における $H'(0.07)$ 及び $H'(3)$ が電子技術総合研究所 (現在の産業技術総合研究所) の基準移転用電離箱による測定によって決定されている。実験では、 β 線スペクトロメータの β 線入射窓を線源から距離 30 cm に固定し、その前面に全面マスクのバイザー部分を設置する。図 3-6 に、実験で使用した全面マスク等の写真一覧をバイザー部分の公称厚さ (一部は実測による) と共に示す。ここでは、それぞれのマスクに記号 A~G を便宜的に割り当てるが、東電 1F で最も広く使用されているものは、A (3M 製、型式: 6000F) と B (重松製作所製、型式: GM-185-1) である。実験の様子を図 3-7 に示す。

3.2.4 β 線のマスク遮へい実験：頭部ファントムと個人線量計による測定

成人男性を模擬する頭部ファントムに水晶体用個人線量計を取りつけ、 β 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、頭部パーツのうち目を含むスライスを、組織等価プラスチック (京都科学製タフウォーター) の切削によって作成した複製品と入れ替えて使用する。この複製スライスは、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、一部の照射試験では、線量計が適切な校正がなされているかどうかを確認する目的で標準的なアクリル平板ファントム (厚さ 5 cm) も用いる。

(2) 個人線量計

使用する個人線量計は、DOSIRIS 及びガラスバッジ (GB) である。前者は、両目尻付近に、後者は前額にとりつける、全面マスクによる β 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 TLD を設置する。これらの線量計の仕様は表 3-1 に示した通

りである。

(3) β 線源

RANDO ファントム照射には、公称放射能 1.85 GBq の ^{90}Sr - ^{90}Y 線源を用いる。本線源は、3.2.1 の公称放射能 74 MB 線源と同様に電総研による測定によって、距離 30, 50, 70, 及び 90 cm における $H'(0.07)$ と $H'(3)$ が決定されている。実験では、両目を含む範囲における β 線強度の一様性を確保するため線源から距離 50 cm の点を使用する。この距離では、ビーム中心から半径 5 cm 内における $H'(0.07)$ の変化は、最大で 5% (直径 2.5 cm に入射窓面積を絞るアパチャーを取り付けた AE-133B 電離箱式サーベイメータによる測定に基づく) である。頭部ファントムの左右の眼に埋め込んだ TLD の中間位置を上記 50 cm の点に固定し、ファントムが線源の側 (正面側) に向いた状態 (0 度) と、その点を通る垂直軸の周りに頭部ファントムそのものを 45 度回転させた状態で照射を行う。

また、アクリル平板ファントムでの照射では、前述の ^{90}Sr - ^{90}Y (74 MBq) を使用し、ファントム表面に貼付した個人線量計に対して、標準的な校正条件 (距離 30 cm, 平坦化フィルタあり, 正面照射) で β 線を照射する。

(4) 全面マスク

前述したマスク A 及び B を用いる。図 3-8 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。



A: 全面マスク
バイザー厚さ: 2 mm



B: 全面マスク
バイザー厚さ: 2.35 mm
(Gと組み合わせて使用)



C: 全面マスク
バイザー厚さ: 1.5 mm
(緊急作業時に使用されていたもので現在は使用されていない)



D: 全面マスク
バイザー厚さ: 2.8 mm



E: 全面マスク
バイザー厚さ: 1.5 mm
(Fと組み合わせて使用)



F: 防護面
厚さ: 2 mm



G: 遮へい面
厚さ: 10 mm

図 3-6 β 線遮へい実験で使用した全面マスク等



図 3-7 β 線のマスク遮へい実験の様子
線源： ^{90}Sr - ^{90}Y (公称 74 MBq, 平坦化フィルタ使用せず), β 線スペクトロメータの前面に全面マスク E と防護面 F の組み合わせを設置



図 3-8 頭部ファントムと個人線量計を用いる β 線照射試験の様子
ガラスバッジは額中央, Dosiris は両目尻に取り付けた。また, RANDO ファントム頭部の乳白色部分が組織等価プラスチックで製作した部分である。

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:MOX 燃料施設

2002(平成14)年度～2017(平成29)年度にかけて、MOX 燃料施設従事者のうち年間を通して体幹部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3-3に示す。水晶体等価線量が20 mSv/年を超えた事例は、2014(平成26)年度に施設廃止措置作業に従事した作業員2名(23.3 mSv, 20.7 mSv)であった。また、2006(平成18)年度を始期とする5年ブロックで集計した結果を表3-4に示す。5年ブロックでの水晶体等価線量の最大は71.9 mSv、50 mSvを超えた者は約20名であった。

表3-3 MOX 燃料施設における実効線量及び水晶体等価線量(2002～2017年度)

年度 ^{注1}	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) ^{注2}	242	5.8	15.2	21	9%
2014 (H26)	266	5.2	23.3	20	8%
2015 (H27)	197	8.3	13.5	14	7%
2016 (H28)	199	4.6	14.0	8	4%
2017 (H29)	187	5.4	12.8	13	7%

注1: 法改正に伴うデータベース移行と作業員の所属コード変更等のため2001年度データの抽出に一部障害が見られたため2002年度以降のデータを記す。

注2: 文献13で報告した数値と異なるが、これは、施設・設備の廃止措置に関する作業員のデータを2013年度分から追加したことによる。

表 3-4 MOX 燃料施設におけるブロック 5 年での実効線量及び水晶体等価線量
(2006～2010, 2011～2015, 2016～2017 年度)

年度	対象 人数	実効線量 5 年間 最大(mSv)	水晶体等価線量		
			5 年間 最大(mSv)	50 mSv 超え人数	50 mSv 超え割合
2006 (H18)～2010 (H22)	417	34.5	71.9	13	3%
2010 (H23)～2015 (H27)	282	20.9	64.0	9	2%
2016 (H28)～2017 (H29)	213	8.6	25.3	0	0%

(2) 核燃料サイクル工学研究所:再処理施設

再処理施設では、胸腹部に比べて頭部(水晶体)に特異的に高い γ 線被ばくを受ける作業は少ない。これまでの経験によれば、そうした事例は、上半身だけを線源に相対的に近づけた姿勢で行われた作業のみ(平成 29 年度報告書, p.3-15)である。そうした特殊事例とは別に、1983(昭和 58)年度に作業者の全身がセル内に入域して行われた作業(酸回収蒸発缶修復工事¹⁴⁾)の際に、個人線量計を身体各部位に取り付けることによって線量の位置分布を調べた結果を図 3-9 に示す。左は、胸と背中に取り付けた個人線量計による γ 線 $H_p(10)$ 、右は、胸での γ 線 $H_p(10)$ と末端部(手の指及び足首)での γ 線 $H_p(0.07)$ の比較である。いずれの部位についても胸での線量とほぼ 1:1 であり、極端に大きな相違—例えば高さ勾配—は見当たらず、ほぼ全身均等被ばくである。

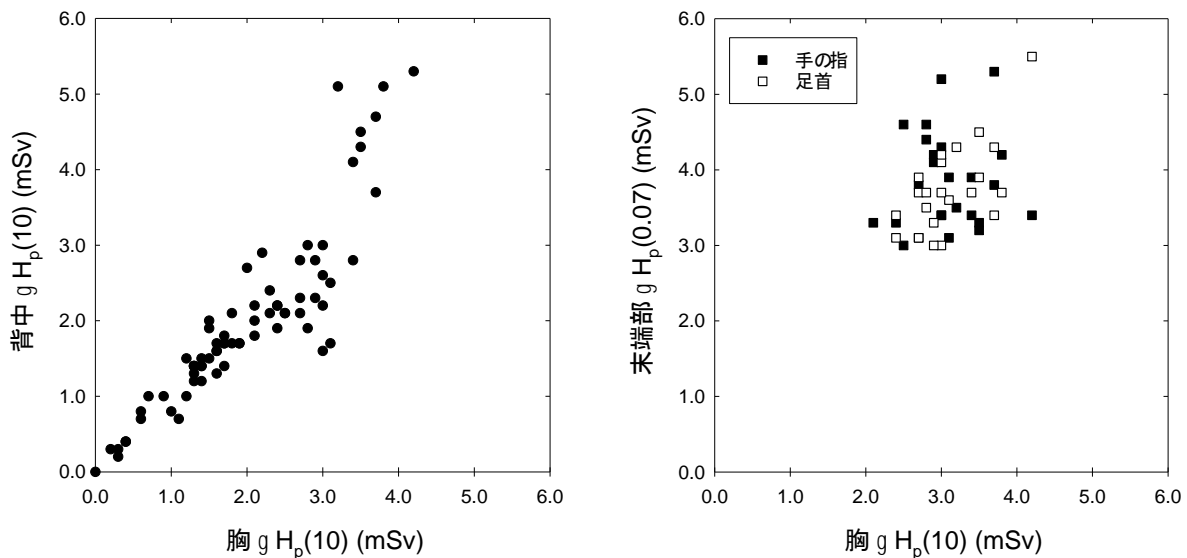


図 3-9 1983 年に実施された再処理施設セル内作業での身体各部位の γ 線による線量の関係
注:本図の数値は、当時の線量評価値(単位:rem)を 100 mrem = 1 mSv として換算したものであり、厳密な意味では今日の $H_p(d)$ ではない。ただし、当該作業での主たる γ 線源は ^{137}Cs であるので、当時使用した個人線量計の特性を考慮すると、数値的に $H_p(d)$ と同等と見なして差支えないと考えられる。

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

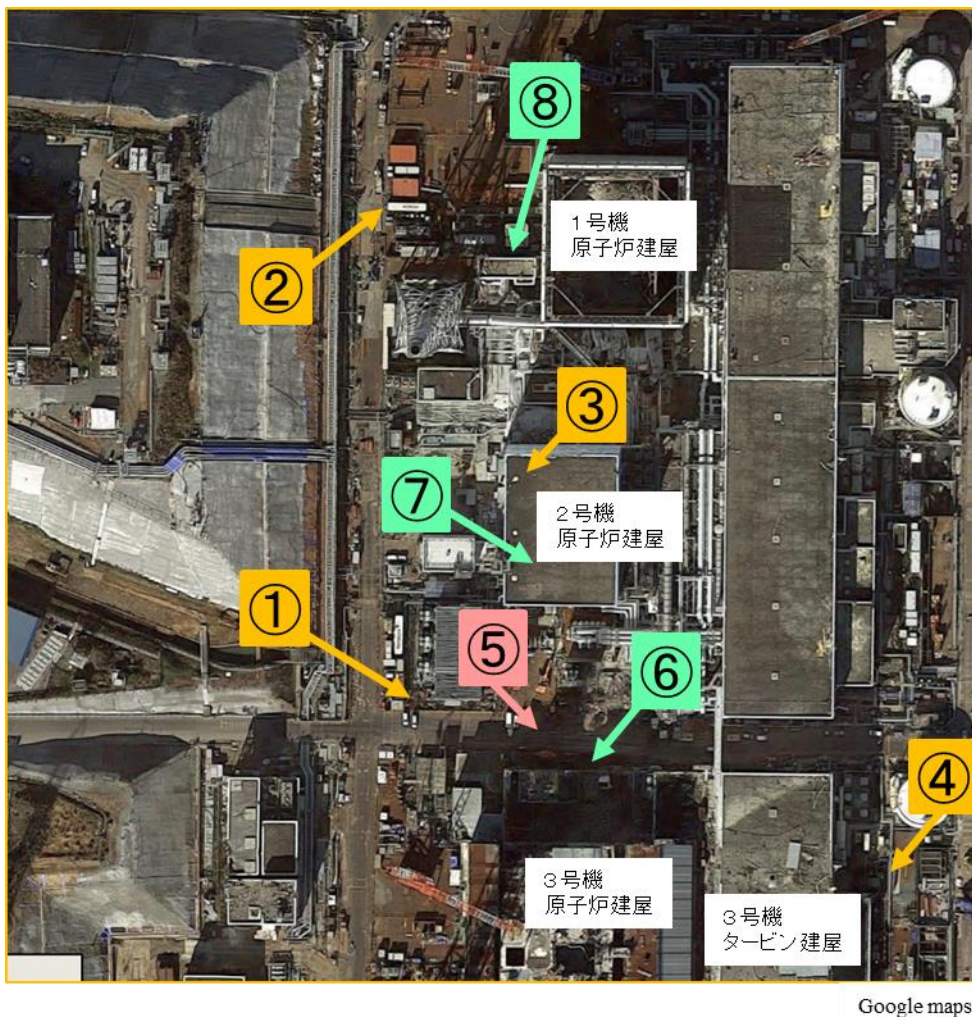
(1) γ 線スペクトル

第一回及び第二回実験及び第三回実験での γ 線スペクトルの測定位置を図 3-10 及び図 3-11 にそれぞれ示す。

LaBr₃(Ce)検出器を用いて測定した γ 線パルス波高スペクトルは、アンフォールディング(3.2.2(2)参照)によって γ 線スペクトルに変換された。その変換手順の一例として、図 3-12 に、第一回及び第二回実験で得たパルス波高スペクトル(上段)とそれを変換した γ 線スペクトル(下段)を示す。 γ 線スペクトルは、¹³⁷Cs(662 keV)及び¹³⁴Cs(563, 569, 605, 796, 802 keV)に起因する直接線ピークとそれらの散乱線からなる。特に、200 keV 付近の盛り上がりは、測定場所の周囲の配置から判断して放射性セシウムの γ 線が上空で後方散乱して生じたスカイシャイン線によるものと考えられる。

第三回実験で得られた γ 線スペクトルを図 3-13～図 3-18 に示す。図中は、それぞれの測定位置における 1 cm 線量当量率($H^*(10)$)とフルエンス平均エネルギーも記す。 γ 線スペクトルの基本構造は第一回及び第二回実験で観測されたものと同様であり、フルエンス平均エネルギーは 0.3～0.5 MeV の範囲であった。また、図 3-15～図 3-17 は、ファントム実験で使用した遮蔽ベスト内部におけるスペクトルを測定した結果であるが、36 keV 付近に遮蔽ベストの主要構成元素であるバリウムの特性 X 線の鋭いピークが観測された。なお、遮蔽ベストなしでも同じピークが観測されているが、これは、周辺にある放射性セシウムの改変に伴い放出されるバリウムの特性 X 線である。また、遮蔽ベストにより、低エネルギー光子、特に 100 keV 以下で顕著に低減されていることがわかる。一方、放射性セシウムからの直接線(662 keV 等)については、低減効果がほとんど期待できないことが確認された。

コリメータ付き CdZnTe 検出器については、次項で述べるファントムを設置した場所において、150 cm 高さでコリメータ開口部がファントム前面と一致する方向を、0° 方向(前方方向)とした。測定角は、水平方向は 60° 毎、垂直方向は-90°(下向き)から+90°(上向き)まで 30° 毎に変えて測定した。図 3-19 及び図 3-20 に、第二回実験で得られた、水平角(θ)を変化させたときの($\theta, 0$)方向の光子フルエンススペクトル $d\Phi_{\theta,0}(E)/d\Omega$ 及び垂直角(ϕ)を変化させたときの($0, \phi$)方向の光子フルエンススペクトル $d\Phi_{0,\phi}(E)/d\Omega$ をそれぞれ示す。また、図 3-21 及び図 3-22 は第三回実験で得られた同様のスペクトルである。これらの光子スペクトルは、LaBr₃(Ce)検出器による測定で得られたスペクトルと同様、¹³⁷Cs 及び¹³⁴Cs の直接線に起因するピークとそれらの散乱線からなる。80 keV 近傍のピークは、コリメータの鉛の特性 X 線に起因するものである。得られた各フルエンススペクトル $d\Phi_{\theta,\phi}(E)/d\Omega$ に 3 mm 線量当量への換算係数 $H_p(3,\theta,E)/\Phi$ を作用させることによって、3 mm 線量当量率の各方向成分を求めた。 $dH_p(3,\theta=0^\circ,\phi=0^\circ)/d\Omega$ で規格化したときの 3 mm 線量当量率の各方向成分を図 3-23 及び図 3-24 に示した。第三回実験では第二回実験に比べて測定地点が東にやや移動しており、第三回実験では 0° 方向に加えて 300° 方向(正面方向に対して左側 60°)からの線量寄与が大きい。また、双方ともに垂直方向に関しては上方 30° 方向の線量寄与が大きく、これは損壊した 3 号機原子炉建屋を望む方向と一致する。



Google maps

図 3-10 第一回及び第二回実験における γ 線スペクトル測定場所

周辺の線量低減対策が進んでいる場所:

- ① 2号機原子炉建屋南西側作業場所
- ② 1号機原子炉建屋周辺通路
- ③ 2号機原子炉建屋屋上作業場所
- ④ 3号機タービン建屋周辺作業場所(簡易人体形状ファントム設置)

鉛遮蔽退避場所:

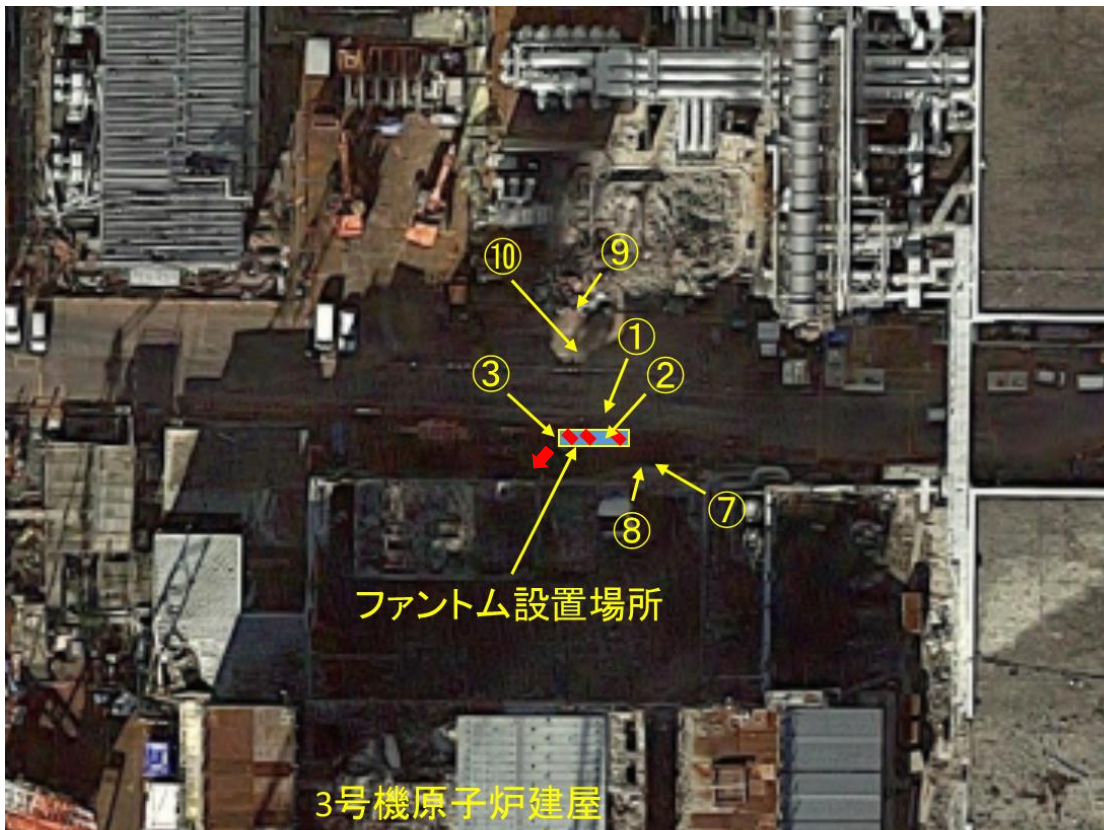
- ⑤ 2-3号機周辺鉛遮蔽退避場所

周囲の線源からの影響が強い場所:

- ⑥ 3号機原子炉建屋周辺作業場所(簡易人体形状ファントム設置)
- ⑦ 2号機原子炉屋上(タイル残存箇所)
- ⑧ 1号機原子炉建屋付近



画像 ©2019 Google、地図データ ©2019 ZENRIN 50 m



画像 ©2019 Google、地図データ ©2019 ZENRIN

図 3-11 第三回実験での γ 線スペクトル測定箇所
 簡易人体形状ファントム及び立方体ファントムは、図中に示した位置(■:左から簡易人体形状ファントム(回転), 同(静止), 立方体ファントム)に設置された。また、矢印(➡)方向をファントム「正面」とした。

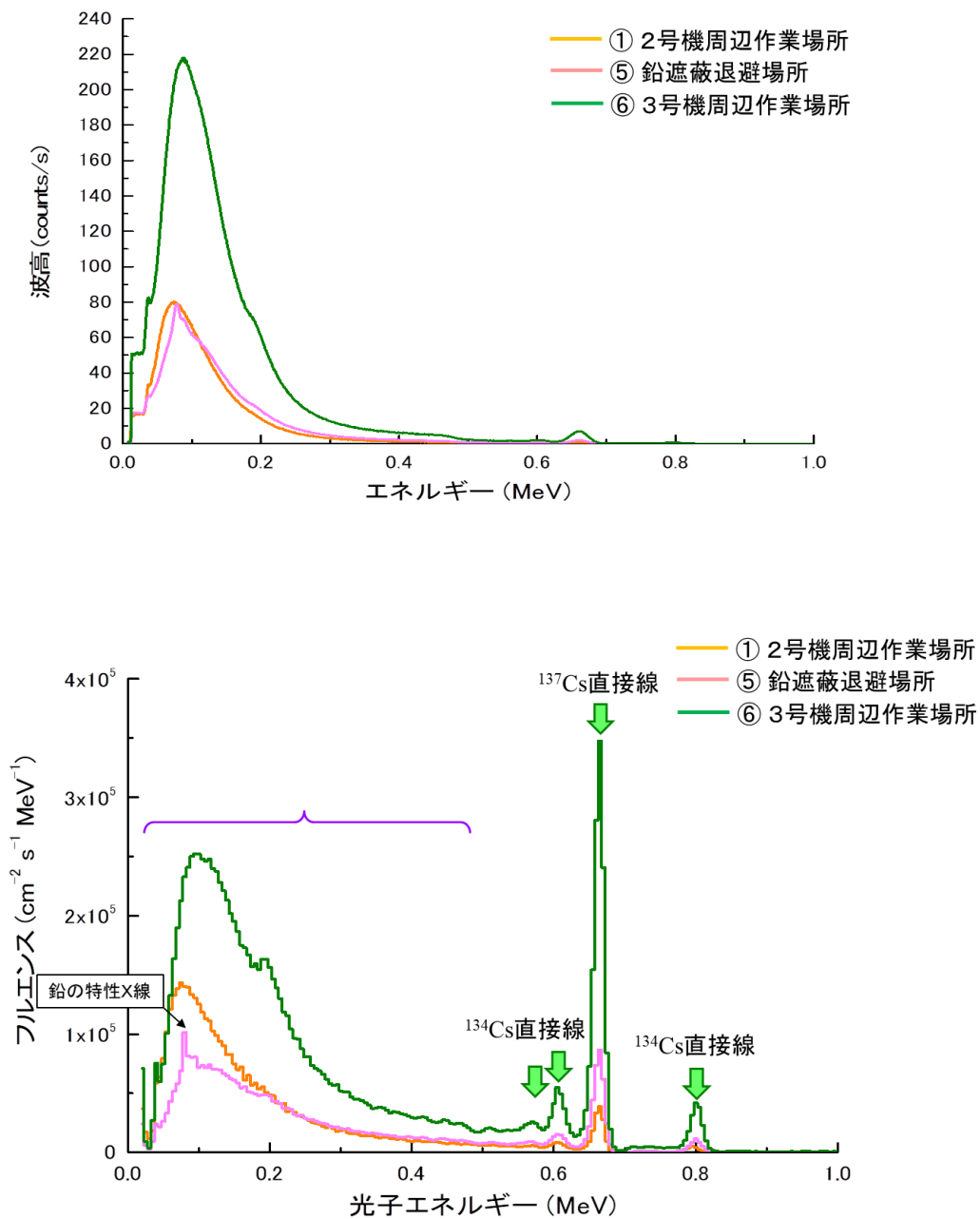


図 3-12 LaBr₃(Ce)検出器で観測されたパルス波高スペクトルをアンフォールディングによってγ線スペクトルに変換した例(第一回及び第二回実験)

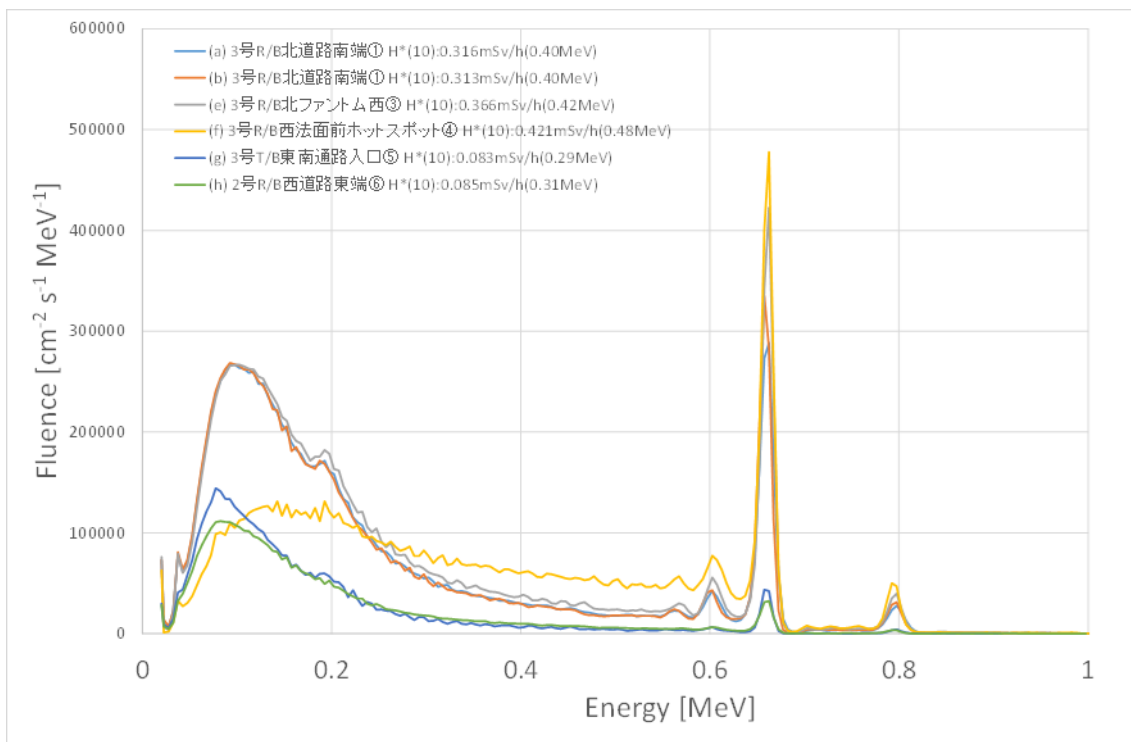


図 3-13 LaBr₃(Ce)測定による γ 線スペクトル(第三回実験, 測定点①~⑥)

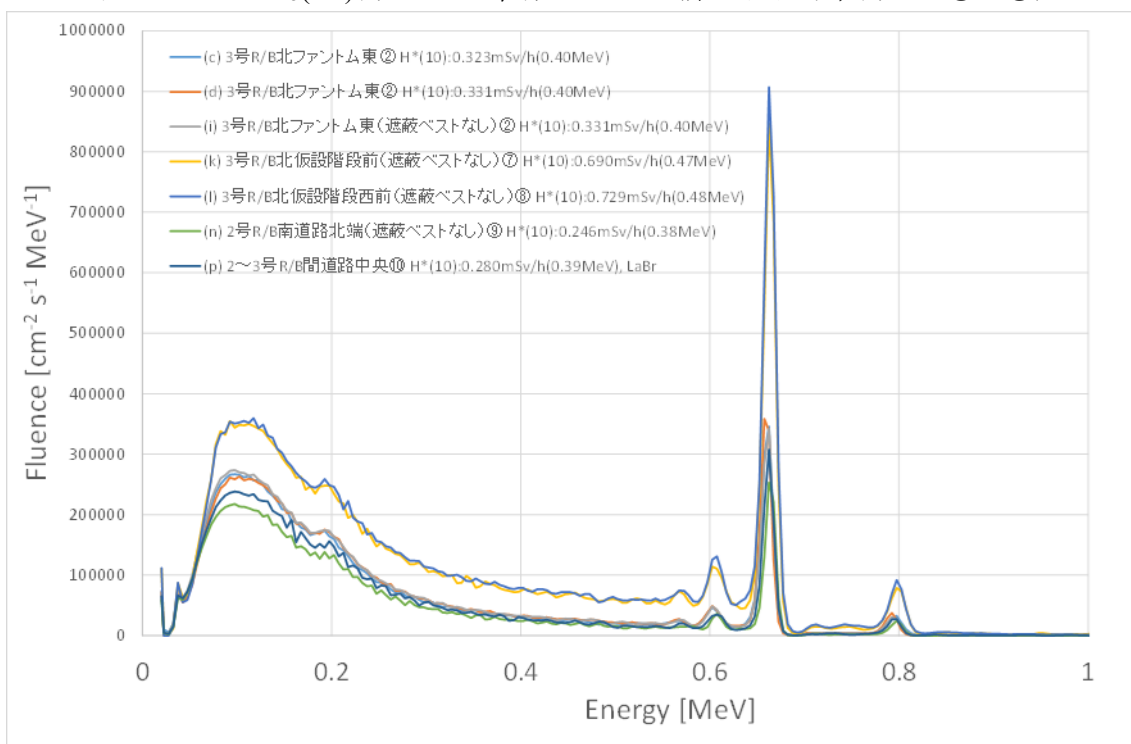


図 3-14 LaBr₃(Ce)測定による γ 線スペクトル(第三回実験, 測定点⑦~⑩)

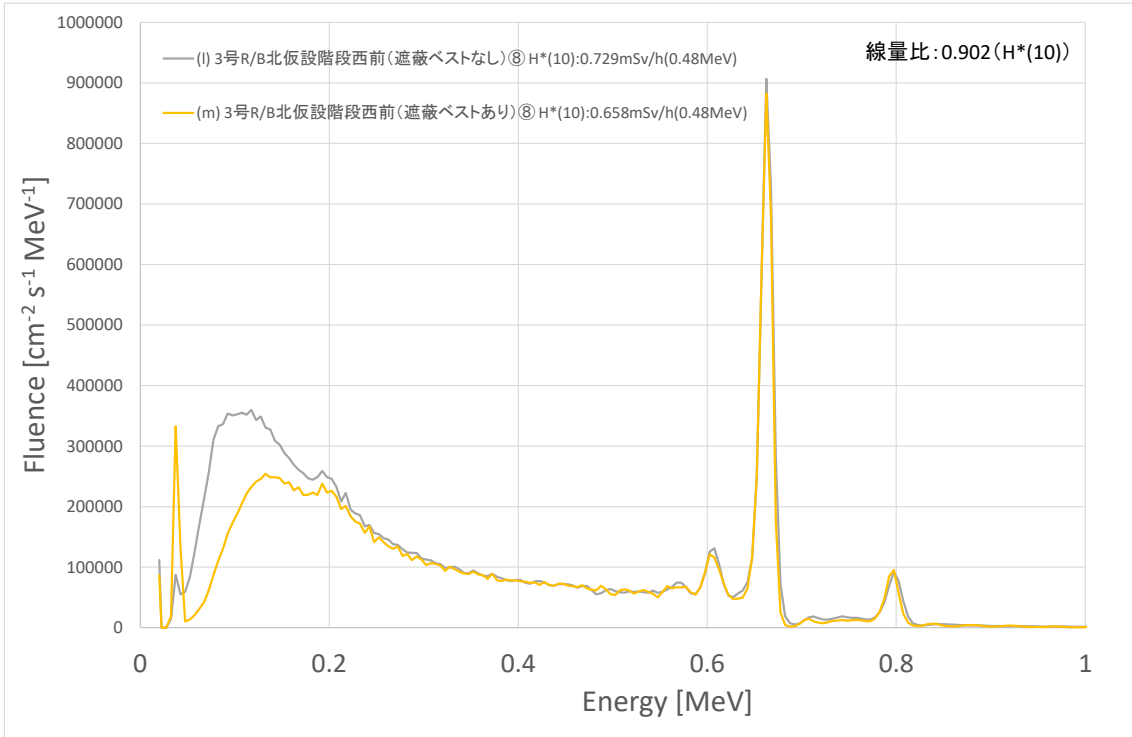


図 3-15 LaBr₃(Ce)測定による遮蔽ベスト有無での γ 線スペクトルの比較 (第三回実験, 測定点⑧)

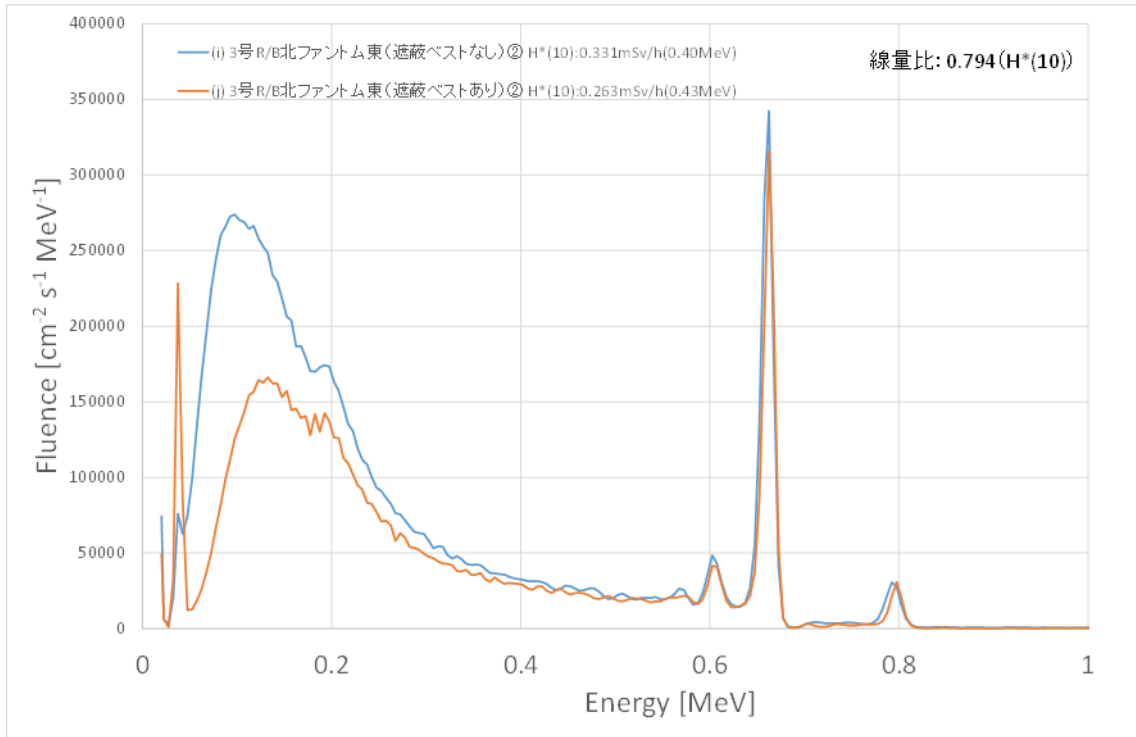


図 3-16 LaBr₃(Ce)測定による遮蔽ベスト有無での γ 線スペクトルの比較 (第三回実験, 測定点②)

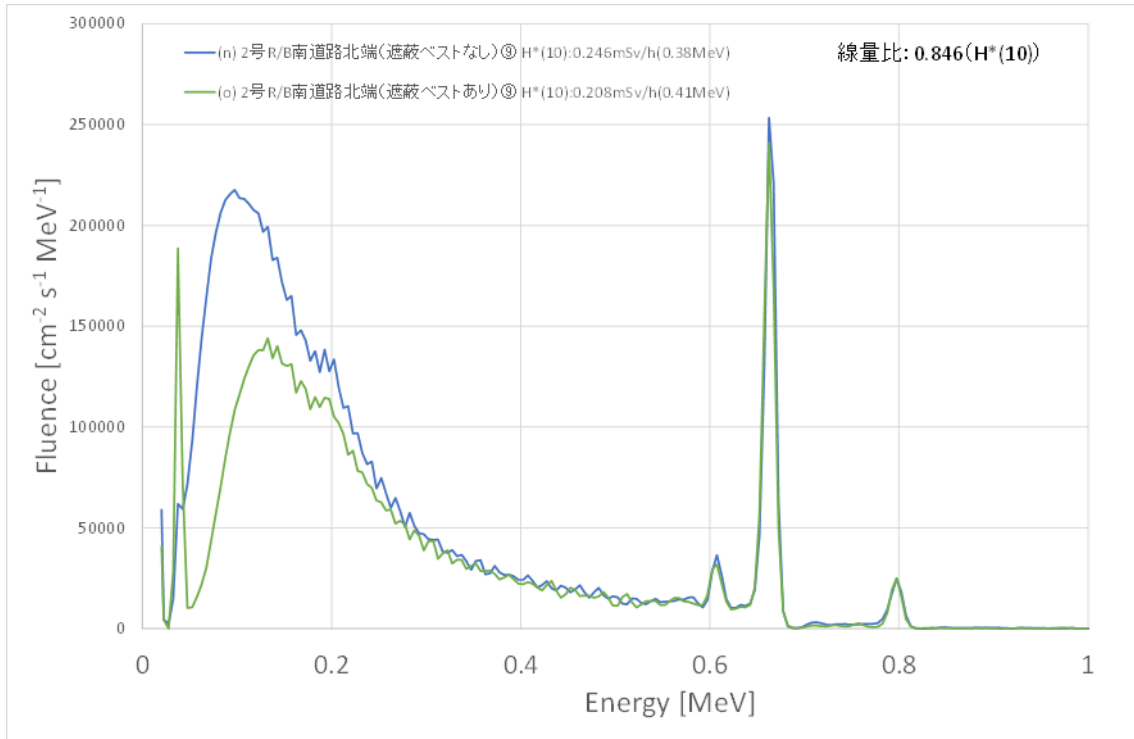


図 3-17 LaBr₃(Ce)測定による遮蔽ベスト有無での γ 線スペクトルの比較(第三回実験, 測定点⑧)

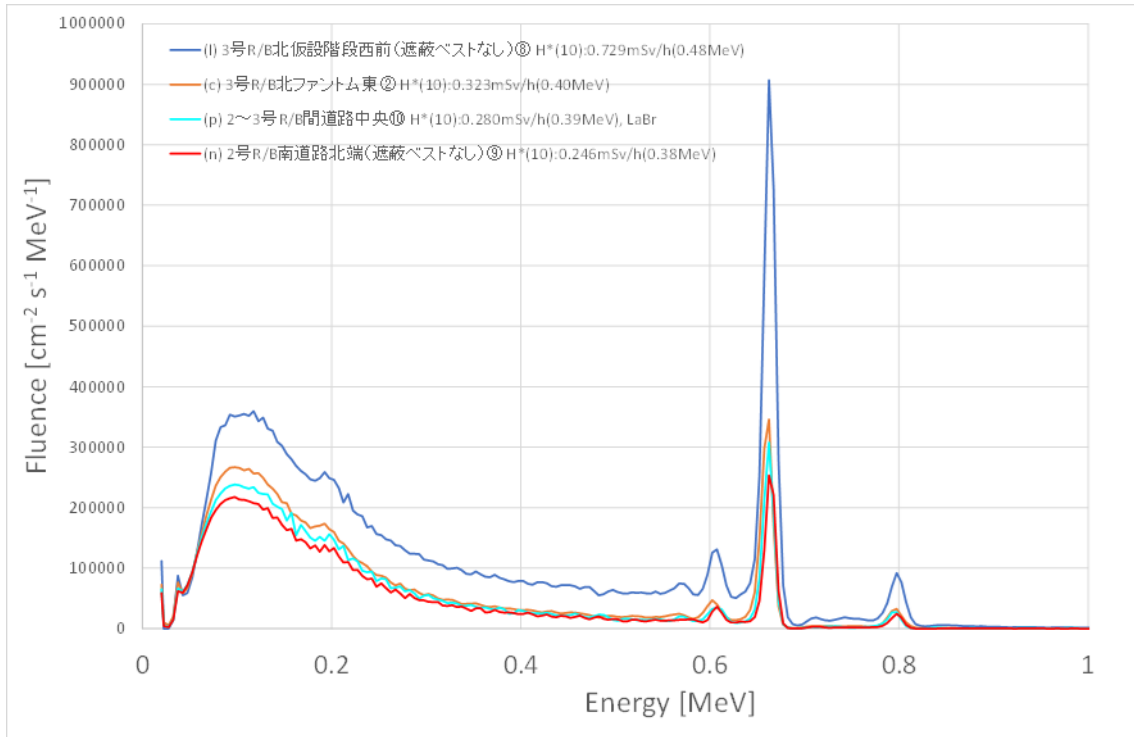


図 3-18 LaBr₃(Ce)測定による γ 線スペクトル(第三回実験, 3号機から2号機側への移動による γ 線スペクトルの変化)

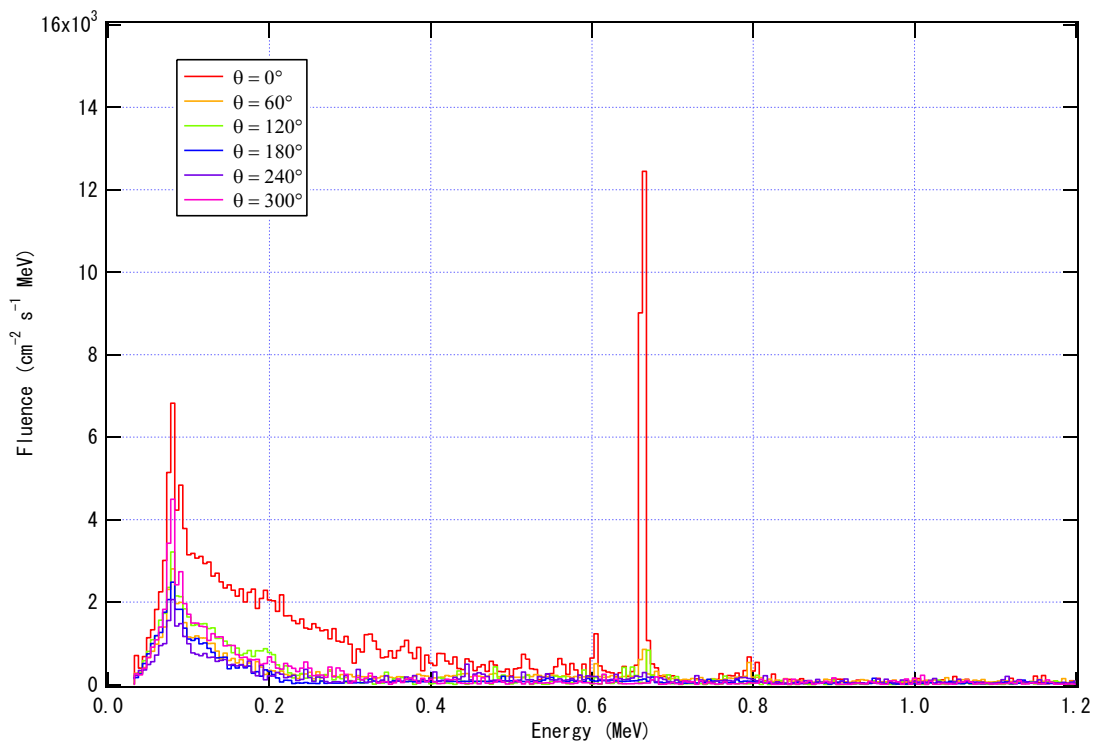


図 3-19 CdZnTe 検出器測定による水平角 θ 変化時の $(\theta, 0)$ 方向の光子スペクトル (第二回実験)

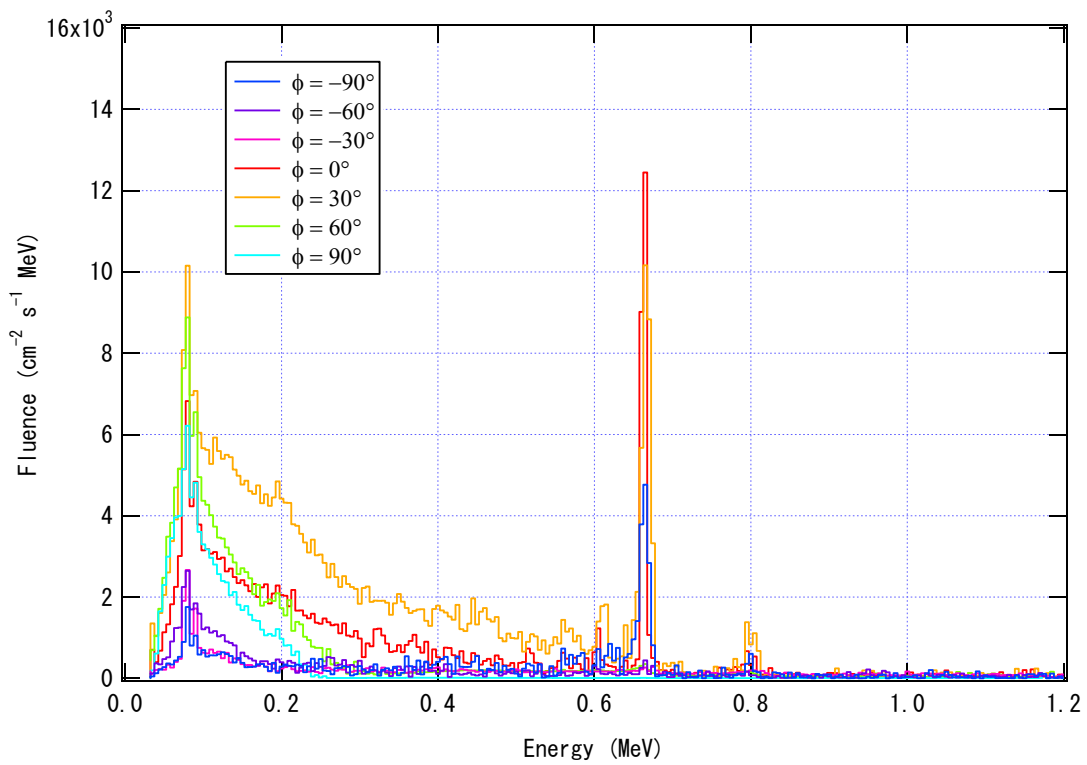


図 3-20 CdZnTe 検出器測定による垂直角 (ϕ) 変化時の $(0, \phi)$ 方向の光子スペクトル (第二回実験)

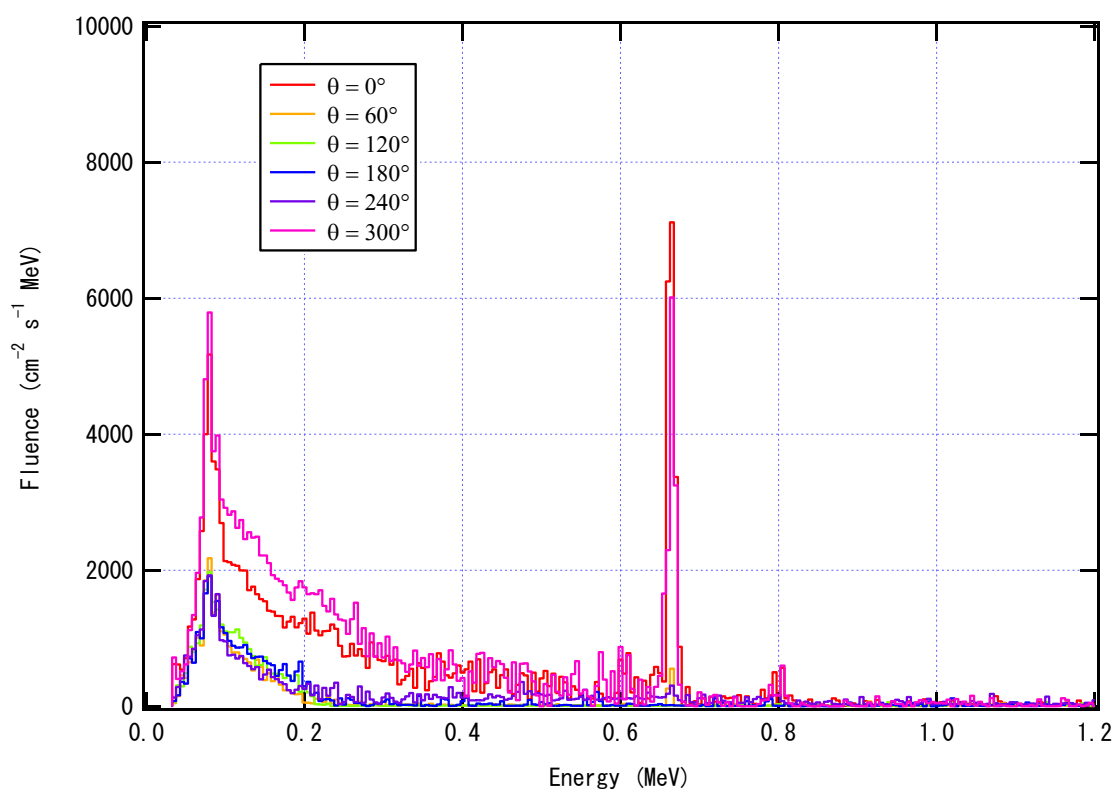


図 3-21 CdZnTe 検出器測定による水平角 θ 変化時の $(\theta, 0)$ 方向の光子スペクトル (第三回実験)

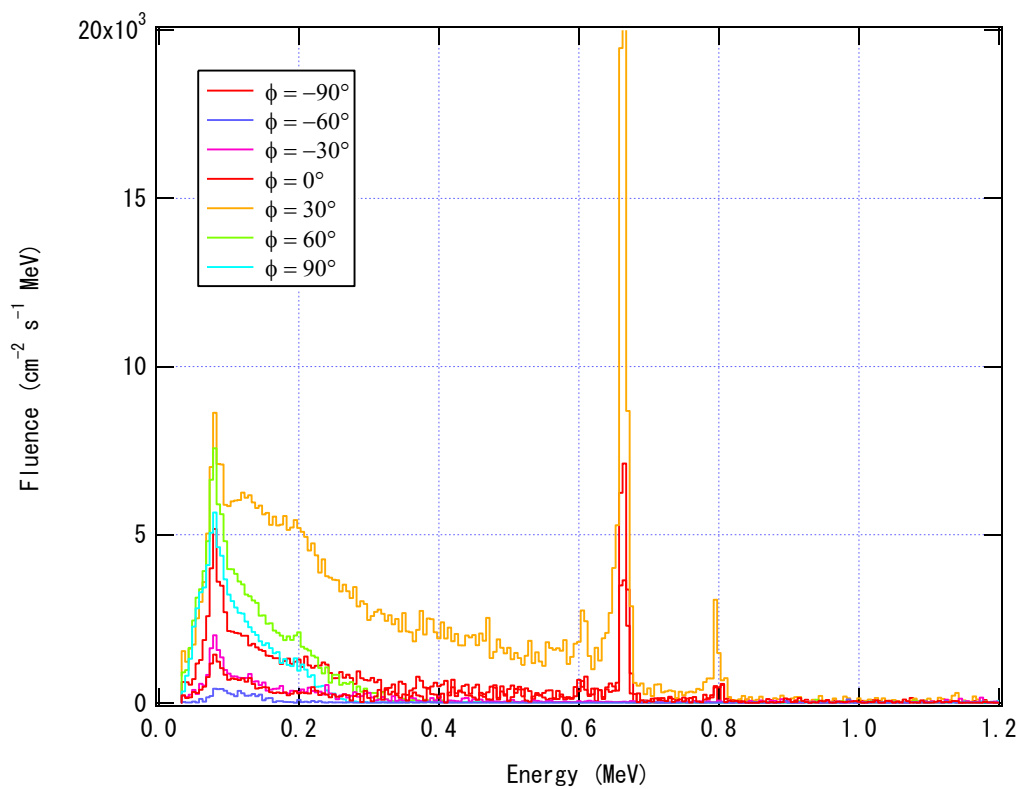
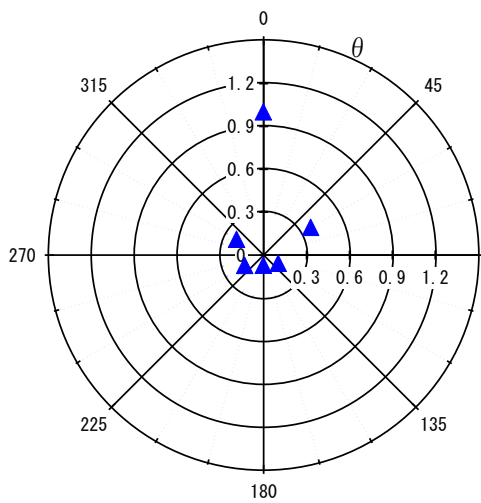
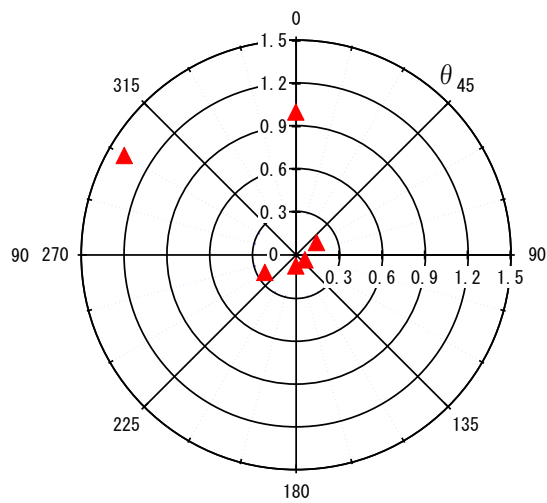


図 3-22 CdZnTe 検出器測定による垂直角 (ϕ) 変化時の $(0, \phi)$ 方向の光子スペクトル (第三回実験)

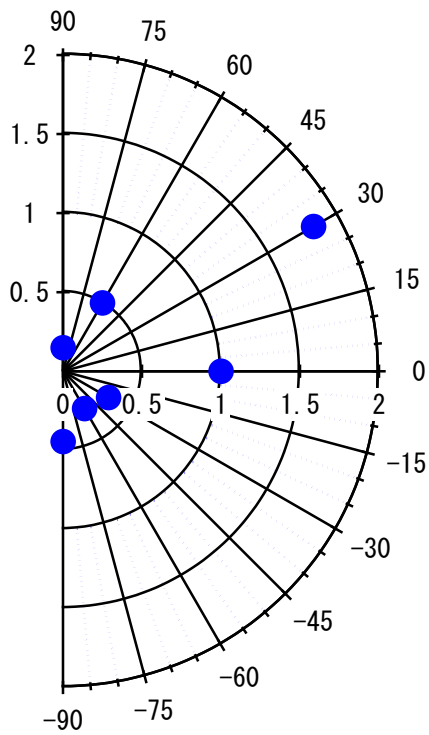


① 第二回実験

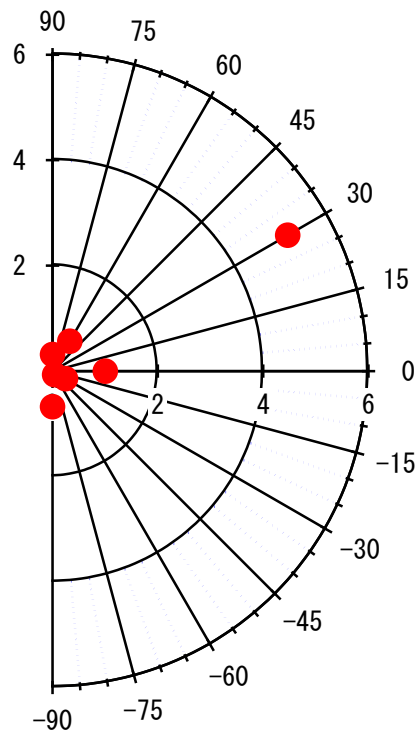


② 第三回実験

図 3-23 3 mm 線量当量率の水平方向分布 ($dH_p(3, \theta, \varphi=0^\circ)/d\Omega$)



① 第二回実験



② 第三回実験

図 3-24 3 mm 線量当量率の垂直方向分布 ($dH_p(3, \theta=0^\circ, \varphi)/d\Omega$)

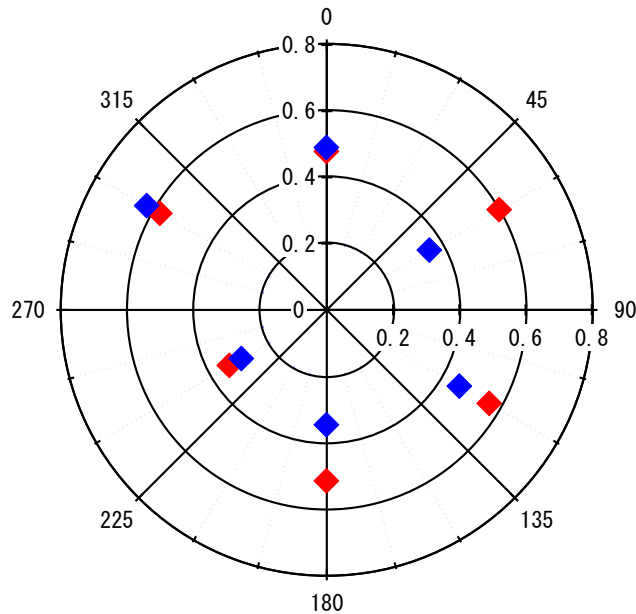


図 3-25 3 mm 線量当量率の水平方向分布 ($dH_p(3,\theta,\varphi=0^\circ,E)/d\Omega$) における 0.5 MeV 以下の散乱線割合 (青点は第二回実験, 赤点は第三回実験を示す)

(2) ファントム実験

(a) 立方体ファントム

第三回実験において図 3-11 の②に設置した立方体ファントムに取り付けた電子式線量計の γ $H_p(10)$ 指示値を表 3-5 に示す。電離箱式線量当量率サーベイメータ(AE-133B)による現場での観測に基づき, その 1cm 線量当量率が最大の向き, すなわち左斜め側に 3 号機原子炉建屋が位置する向き(図 3-11 の \rightarrow 方向)を「正面」とここでは設定した。ファントム設置時間は約 4 時間(12:21 ~16:10), 地表からファントム中心までの高さは 1.2 m であった。

測定された最大線量(率)は, 正面, 次いで上側, 左側の順であった。したがって, 当該実験位置は, 3 号機原子炉建屋の方向から, さらに上側から入射する成分も含む, やや指向性を持った γ 線場であることが確認された。この傾向は, コリメータ付き CdZnTe 検出器による線量分布測定結果(図 3-25)とも一致した。

表 3-5 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
(単位: mSv, カッコ内の数値は正面に対する相対値である)

正面	右側面	左側面	背面	上面	下面
0.997	0.473	0.822	0.369	0.951	—
(1.00)	(0.47)	(0.82)	(0.37)	(0.95)	

下面:ファントム自身の加重によって測定途中で線量計の電源スイッチがオフしたため指示値が得られなかった。

(b) 簡易人体形状ファントム

第二回及び第三回実験において以下の条件で簡易人体形状ファントムの現場照射を行った。

	日時	場所	AE-233V $H^*(10)$ 線量当量率	備考
第二回	2018年3月8日 11:39~15:12	図 3-10⑥	0.28 mSv/h at 70 cm	
			<u>0.35 mSv/h at 120 cm</u>	
			<u>0.36 mSv/h at 153 cm</u>	
	2018年3月9日 10:51~13:25	図 3-10④	0.08 mSv/h at 70 cm	
			0.09 mSv/h at 120 cm	
			0.10 mSv/h at 153 cm	
第三回	2018年12月20日 12:00~16:00	図 3-11 ■印	0.30 mSv/h at 70 cm	胴体部に遮へいベスト着用
			<u>0.34 mSv/h at 120 cm</u>	
	2018年12月21日 10:40~14:00	同上	<u>0.40 mSv/h at 153 cm</u>	

第二回実験の位置⑥と第三回実験のファントム設置場所は、ほぼ同じ(2号機と3号機の原子炉建屋間道路の3号機側路肩)である。電離箱式線量当量率サーベイメータによる測定によれば、第二回実験でのその場所における頭部ファントムの中央高さ(153 cm)と胴体部ファントムの中央高さ(120 cm)での $H^*(10)$ の勾配、すなわち水晶体/胴体比は、ほぼ1であった。一方、第三回実験での水晶体/胴体比は $1.18 (= 0.40 \text{ mSv/h} / 0.34 \text{ mSv/h})$ であった。同様の結果は、同じ場所での別の電離箱式サーベイメータ(AE-133B)による $H^*(3)$ の測定 ($1.17 = 0.35 \text{ mSv/h} / 0.30 \text{ mSv/h}$) からも確認された。第二回実験と第三回実験の間におけるこの線量当量率の高さ勾配の変化の理由は不明である。

表 3-6 及び表 3-7 に、第二回及び第三回のファントム実験で得られた個人線量計の指示値をそれぞれ示す。ファントムに取り付けた個人線量計の指示値は、ZP-1461 電子式個人線量計(以下、「EPD」と記す): γ 線 $H_p(10)$, ガラスバッジ: γ 線 $H_p(10)$, $H_p(0.07)$ 及び $H_p(3)$, Dosiris: γ 線 $H_p(3)$, Vision: γ 線 $H_p(3)$ である。このうち、ガラスバッジについては、報告されたそれら数値間で相違がなかったため $H_p(10)$ と $H_p(3)$ だけを示す。また、Dosiris については、 ^{137}Cs γ 線と X 線(平均エネルギー 83 keV)それぞれで校正した場合の数値が報告されたが、ここでは ^{137}Cs γ 線校正の結果のみを示す。なお、一部の Vision については、頭部だけでなく、胴体部分にも取り付けたが、これは、同じ校正条件での線量計を用いることで、その取り付け位置(例えば地面からの高さ)によってどの程度指示値が変化するかを調べることを意図したものである。いずれの実験においても、胴体部に取り付けた EPD とガラスバッジ、頭部に取り付けたガラスバッジ、Dosiris 及び Vision は同等の指示値を示した。

2号機と3号機原子炉建屋間で実施したファントム実験位置での γ 線の主たる入射の向きは、3号機側からであった。ここでは静止ファントムの正面と背面で線量計指示値に約2倍の違いが見られた。一方、同じ位置でファントムを水平回転させた場合には、ファントムの正面と背面とでほぼ同じ指示値が得られた。後者の条件は、現場で動き回る作業者の被ばく状況—いわゆる ROT ジオメトリでの被ばく—を再現するものと考えられる。一方、3号機タービン建屋の東側(図 3-10④)で実施した実験では、静止ファントムと回転ファントムとで線量計指示値の違いは見られなかった。この位置は回り一面に放射性物質が広く分布した環境であると考えられ、作業員自信の動きとは関係なく、

ROT ジオメトリに近い条件での被ばくをもたらすと考えられる。

図 3-26 に、胴体部(すなわちスラブファントム)に取り付けた EPD とガラスバッジの $H_p(10)$ を比べた結果を示す。この図では、ファントムの正面・背面及び静止・回転に関係なくプロットした。EPD とガラスバッジの指示値はよく一致した。なお、図の左下プロットは 3 号機タービン建屋の東側(図 3-10④)で得たデータである。

図 3-27 は、頭部(円柱)ファントムに取り付けたガラスバッジと、 $H_p(3)$ 測定用に開発された Dosiris 及び Vision を比べた結果である。ここでもファントムの正面・背面及び静止・回転に関係なくプロットした。全体的に、Dosiris 及び Vision > ガラスバッジの傾向が見られ、特に 12 月の第三回実験でその傾向が強い。3 月の第二回実験あるいは校正場での実験(平成 29 年度報告)ではこうした傾向は見られなかったため、その直接の原因は不明である。ただし、複雑なフィルタ構造を持たない Dosiris や Vision の方がガラスバッジよりも方向依存は相対的に小さいと予想されるので、入射方向分布が複雑になればなるほど両線量計の指示値に若干の差が生じる可能性がある。

図 3-28 に、胴体部ガラスバッジの $H_p(10)$ と頭部ガラスバッジの $H_p(3)$ を比較した結果を示す。電離箱式サーベイメータによる測定で頭部と胴体部間で線量率に高さ勾配の見られなかった第二回実験及びそれが確認された第三回実験のいずれにおいても、全体的に頭部 $H_p(3)$ > 胴体部 $H_p(10)$ となる傾向が見られた。ガラスバッジの場合、同一線量計の指示する $H_p(10)$ と $H_p(3)$ はほぼ同じ値なので仮に図の横軸を $H_p(3)$ に置き換えたとして胴体部と頭部の線量の相対関係は変わらない。また、静止条件(正面側(主たる線源の側): ●と○)と回転条件(▲と▼)の比較では、頭部/胴体比は、後者の方がやや大きくなった。図 3-29 は、胴体部と頭部に取り付けた Vision による $H_p(3)$ の比較である。スラブファントムでの $H_p(3)$ ($H_p(3)_{slab}$) と円柱ファントムでの $H_p(3)$ ($H_p(3)_{cyl}$) に相当すると解釈してもよい。全体的な傾向は、図 3-28 に示したガラスバッジの結果と同様であり、頭部 > 胴体部となる傾向が得られた。なお、図 3-28 及び図 3-29 に示した実線は、第三回実験において電離箱式サーベイメータで測定した $H^*(10)$ の頭部と胴体部での高さ勾配である。

また、第三回実験で使用した遮へいベストは、その存在が頭部と胴体部の線量比に与える影響を調べることを意図したものである。回転ファントムのデータに着目すると、遮へいベスト有りでの頭部ガラスバッジ $H_p(10)$ と胴体部側面のガラスバッジ $H_p(10)$ の比は $1.27(=1.12/0.88)$ であった。一方、遮へいベスト無しでの頭部ガラスバッジ $H_p(10)$ と胴体部のガラスバッジ $H_p(10)$ の比は $1.20(=0.90/0.75) \sim 1.25(=0.86/0.69)$ であった。前者の比は、遮へいベストを着用する作業者の頭部/上腕部の線量比、後者の比は、遮へいベストを着用しない作業者の頭部/胴体部の線量比の模擬である。上腕部の模擬であるファントム側面に取り付けたガラスバッジに入射する γ 線が遮へいベストによって部分的に遮られ、その指示値が下がることによって、前者の線量比がわずかに大きくなったようにも見えるが、劇的というほどではない。今回使用した遮へいベストの γ 線遮へい性能(ベスト内外に取り付けた EPD の $H_p(10)$ 指示値変化によれば 5~15% の線量低減)がそれほど大きくなかったこともあり、今回のファントム実験結果からだけでは、遮へいベストが頭部/胴体部と頭部/上腕部の線量比に大きな違いをもたらすかどうかの十分な確認はできなかった。

表 3-6 第二回実験:簡易人体形状ファントムに取り付けた個人線量計の指示値(単位: mSv)

日時 場所	部位	線量計 設置 位置	地上高	静止ファントム										回転ファントム									
				正面側					背面側					正面側					背面側				
				EPD	GB		DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB		DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB		DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB		DOSI RIS	VISIO N
				H _p (10)	H _p (10)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (10)	H _p (10)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (10)	H _p (10)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (10)	H _p (10)	H _p (3)	H _p (3)	H _p (3)
2018/3/8 図3-10 ⑥	頭	中央	+153cm		1.19	1.18	1.24	1.1		0.65	0.63	0.66	0.6		1.05	1.02		1.0		1.05	1.02		1.0
					1.12	1.10	1.21	1.1		0.60	0.58	0.76	0.6		1.08	1.05	1.07	1.0		1.02	0.99	1.13	1.0
	胸	+10cm	+130cm					1.0					0.6					0.9					0.9
								1.0					0.5					0.9					0.9
		中央	+120cm	1.05	1.06	1.03		1.0	0.57	0.57	0.57		0.5	0.92	0.89	0.88		0.9	0.89	0.89	0.86		0.9
						1.0					0.5					0.8					0.8		
	-10cm	+110cm					0.9					0.5					0.8					0.8	
							0.9					0.5					0.8					0.8	
2018/3/9 図3-10 ④	頭	+5cm	+158cm					0.2					0.2					0.2					0.2
		中央	+153cm		0.21	0.20	0.23	0.2		0.19	0.19	0.19	0.2		0.19	0.18		0.2		0.19	0.18		0.2
					0.19	0.18	0.24	0.2		0.16	0.15	0.19	0.2		0.17	0.16	0.23	0.2		0.17	0.16	0.22	0.2
		-5cm	+148cm					0.2					0.2					0.2					0.2
	胸	+10cm	+130cm					0.2					0.2					0.2					0.2
								0.2					0.2					0.2					0.2
		中央	+120cm	0.17	0.19	0.18		0.2	0.14	0.14	0.13		0.1	0.16	0.16	0.15		0.2	0.15	0.16	0.15		0.2
							0.2					0.1					0.2					0.1	
	-10cm	+110cm					0.2					0.1					0.2					0.2	
							0.2					0.1					0.2					0.2	

・回転ファントムは、自動回転台を使用して連続回転させた。

・個人線量計は、頭部及び胴体部ファントムのそれぞれ中央付近に設置されたが、一部の個人線量計(Vision)については、線量の高さ勾配を調べる目的で、中央から±10 cm(又は±5 cm)にも設置された。

表 3-7 第三回実験:簡易人体形状ファントムに取り付けた個人線量計の指示値(単位: mSv)

日時 場所	部位	遮蔽 ベスト	地上高	静止ファントム												回転ファントム																				
				正面側				背面側				右側面側				左側面側				正面側				背面側				右側面側				左側面側				
				EPD	GB	DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB	DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB	VISIO N		EPD	GB	VISIO N		EPD	GB	DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB	DOSI RIS	VISIO N	EPD	GB	VISIO N		EPD	GB	VISIO N		
				H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)	H _e (3)	H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)	H _e (3)	H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)		H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)		H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)	H _e (3)	H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)	H _e (3)	H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)		H _e (10)	H _e (10)	H _e (3)		
2018/12/20 図3-11 ■	頭		+153cm		1.32	1.32	1.51 1.46	1.56 1.55		0.82	0.81	1.00	0.88 0.81						1.12	1.11	1.23 1.17	1.19 1.24		1.12	1.11	1.32	1.19 1.27									
	胸	ベスト内	+120cm	1.11	1.17	1.17		1.26 1.28	0.63	0.63	0.63							0.73	0.76	0.76	0.85 0.84	0.73	0.78	0.78		0.77 0.78										
		ベスト外	+120cm	1.17	1.16	1.16			0.68	0.64	0.64			0.97	0.93	1.07			1.36	0.84	0.87	0.86			0.86	0.87	0.87			0.88	0.88	0.96				
2018/12/21 図3-11 ■	頭		+153cm		1.13	1.12	1.24 1.19	1.27 1.22		0.64	0.63	0.73	0.69 0.65						0.86	0.85	1.01 0.92	1.03 1.03		0.90	0.89	1.06	0.98 1.03									
	胸		+120cm	1.04	1.06	1.05		1.07 1.14	0.52	0.51	0.51			0.78	0.78	0.92	1.08		1.05	0.68	0.69	0.69			0.73	0.75	0.74		0.81 0.74	0.66	0.71	0.79	0.74			

- 回転ファントムは、手動により一定時間間隔で 90 度ずつ回転させた。
- 12 月 20 日の実験では、胴体部ファントムに遮へいベストを取り付け、ファントムの正面及び背面(30 cm × 30 cm の面)を覆った。EPD 及びガラスバッジ(GB)は、ベストの内側と外側にそれぞれ取り付けた。
- 遮へいベストに覆われない両側面(30 cm × 15 cm の面)にも個人線量計を設置した。(EPD 及びガラスバッジは右側面に集中して設置したが、立方体ファントムの測定の結果(表 3-5)から、左側面の側の方が高線量だったことが後から判明した)

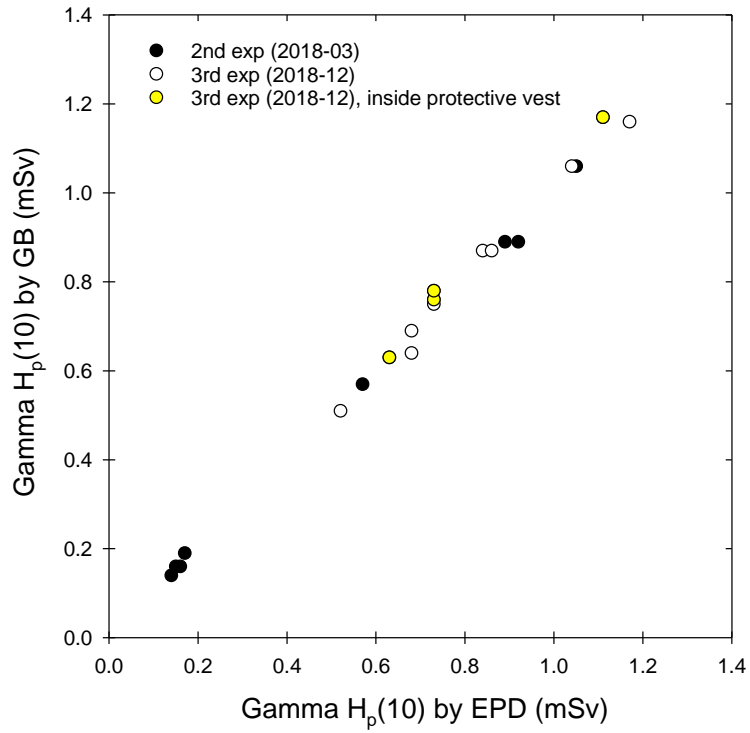


図 3-26 胴体部(スラブ)ファントムに取り付けた EPD とガラスバッジ(GB)による $\gamma H_p(10)$ の比較

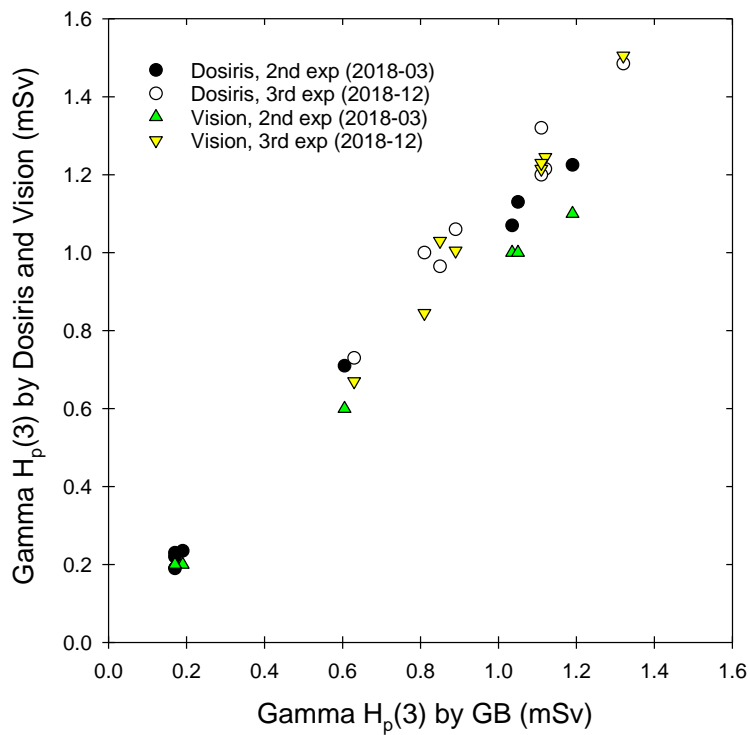


図 3-27 頭部(円柱)ファントムに取り付けたガラスバッジ(GB)による $\gamma H_p(3)$ と Dosiris 及び Vision による $\gamma H_p(3)$ の比較

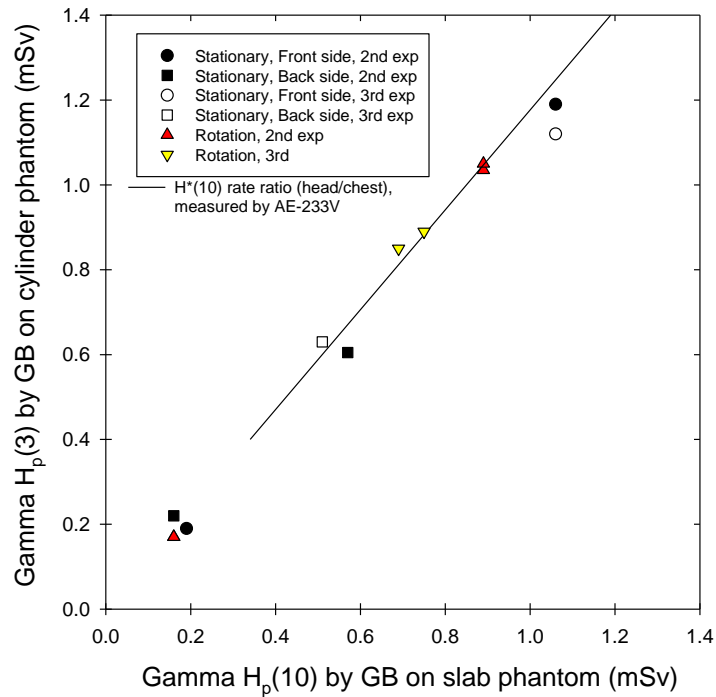


図 3-28 胴体部（スラブ）ファントムに取り付けたガラスバッジ（GB）による $\gamma H_p(10)$ と頭部（円柱）ファントムに取り付けたガラスバッジによる $\gamma H_p(3)$ の比較（防護ベスト有りでのデータは含まず）

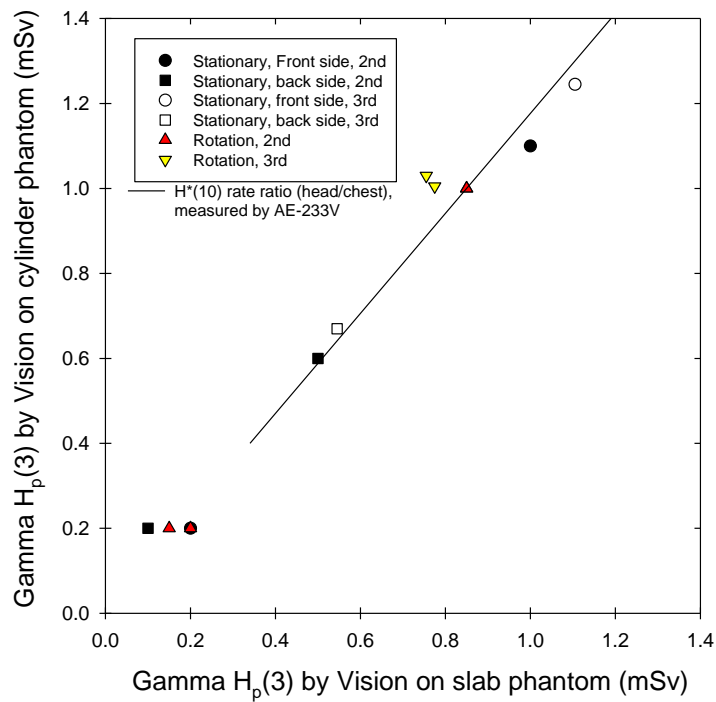


図 3-29 胴体部（スラブ）ファントムに取り付けた Vision による $\gamma H_p(3)$ と頭部（円柱）ファントムに取り付けた Vision による $\gamma H_p(3)$ の比較（防護ベスト有りでのデータは含まず）

3.3.3 β 線のマスク遮へい実験： β 線スペクトロメータによる測定

^{90}Sr - ^{90}Y からの β 線を全面マスク等 (A~G) のバイザー裏側で β 線スペクトロメータによって測定した結果を図 3-30 に示す。横軸はエネルギー、縦軸は計数率を入射窓面積で除したフラックス (注：厳密にはカレント(current)を入射窓面積で除したもの) である。

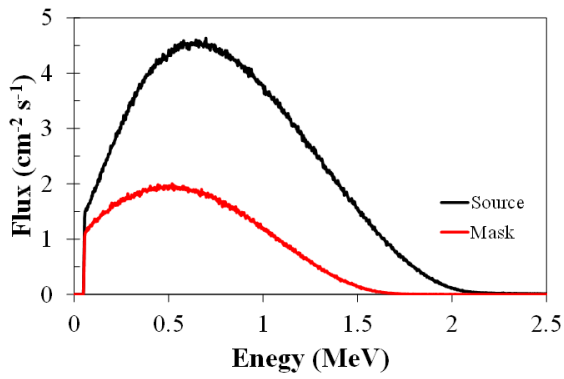
使用した ^{90}Sr - ^{90}Y 線源は、その表面が金属板で覆われているため、 ^{90}Sr β 線は遮へいされ、事実上、 ^{90}Y の単体線源に近い。マスク無しでの最大波高は約 2.1 MeV であり、 ^{90}Y の最大エネルギーにほぼ対応する。マスク有りの場合、最大エネルギーはさらに下がるとともに、フラックスも激減する。全面マスクに防護面又は遮へい面を組み合わせた状態では、 β 線は、ほとんど、あるいはまったく透過しない。

観測された波高スペクトルから β 線による $H'(0.07)$ と $H'(3)$ を算出し、比較した結果を表 3-8 と図 3-31 に示す。全面マスク無し(あるいは全面マスクの外側)の β 線 $H'(0.07)$ を 1 とするとき、全面マスク A~E 内側の $H'(0.07)$ は 0.30~0.42、同様に内側の $H'(3)$ は 0.048~0.092 であった。また、全面マスク無し(あるいはマスクの外側)の β 線 $H'(3)$ を 1 とするとき、全面マスク A~E 内側の $H'(3)$ は 0.11~0.21 であった。これら全面マスクに、防護面又は遮へい面を組み合わせた場合の遮へい効果はさらに大きい。また、表には、マスク A 及び B について、東電 1F で採取された汚染水を紙に浸して作成された β 線源 (以下、「汚染水線源」と記す) を用いて同様の測定を行ったときの結果 (平成 29 年度報告書, 表 3-13) を丸括弧内に示す。

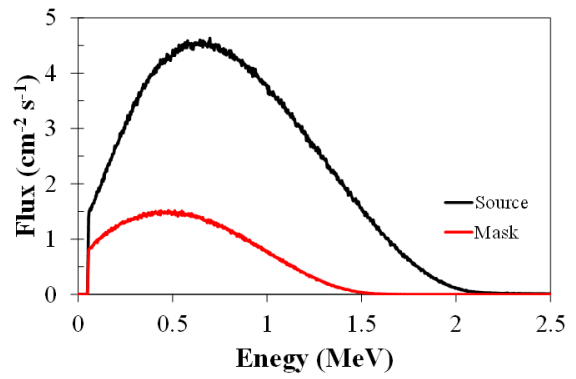
表 3-8 β 線のマスク遮へい実験結果： β 線スペクトロメータによる測定
(丸括弧内の値は汚染水線源での測定結果である)

全面マスク等	バイザー厚さ (mm)	マスク内/マスク外		マスク内 $H'(3)$ マスク外 $H'(0.07)$
		$H'(0.07)$	$H'(3)$	
なし	—	—	—	0.43 (0.31)
A	2	0.42 (0.22)	0.20 (0.15)	0.087 (0.047)
B	2.35	0.31 (0.21)	0.11 (0.14)	0.048 (0.044)
C	1.5	0.44	0.21	0.092
D	2.8	0.30	0.11	0.049
E	1.5	0.35	0.14	0.060
F	2.0 ^注	0.62	0.37	0.16
G	10	4.7E-3	3.9E-4	1.7E-4
E+F	3.5	0.095	0.013	5.4E-3
B+G	12.35	1.2E-3	1.4E-4	5.8E-5
アクリル板 (参考)	2	0.46	0.20	0.080

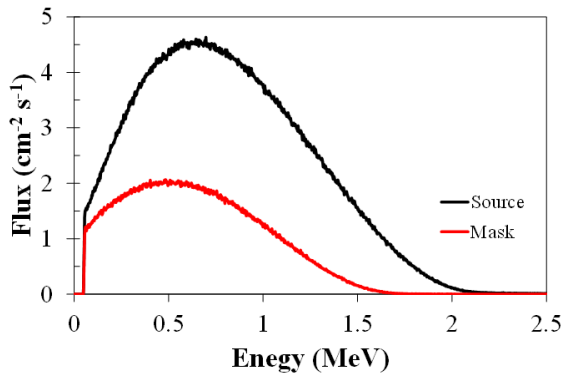
注：防護面 F は全面マスク A~E に比べて遮へい効果が小さい。F のバイザー厚さ 2.0 mm は、バイザー外縁部でマイクロメータにより実測した数値であるが、正面中央部分とは厚さが異なる可能性がある。



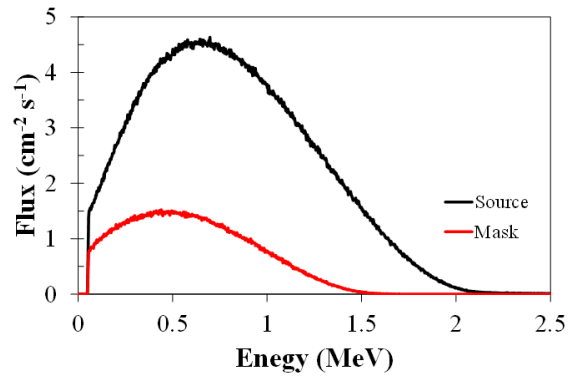
全面マスク A



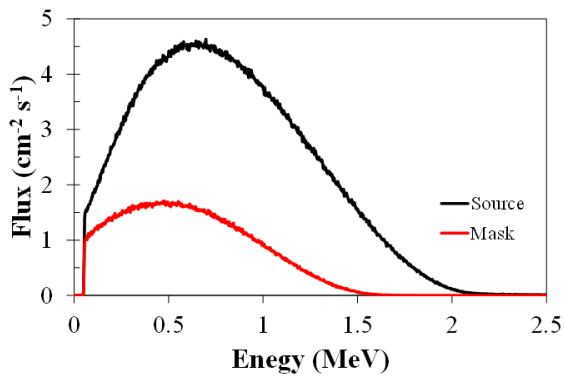
全面マスク B



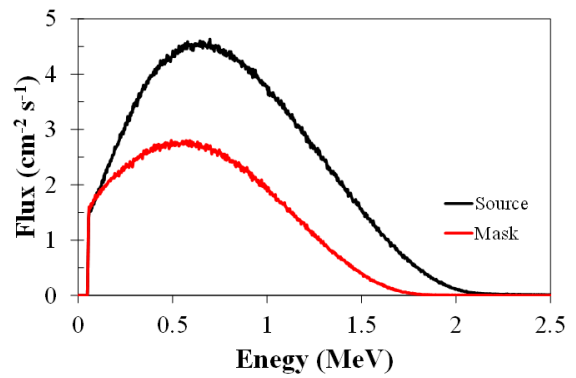
全面マスク C



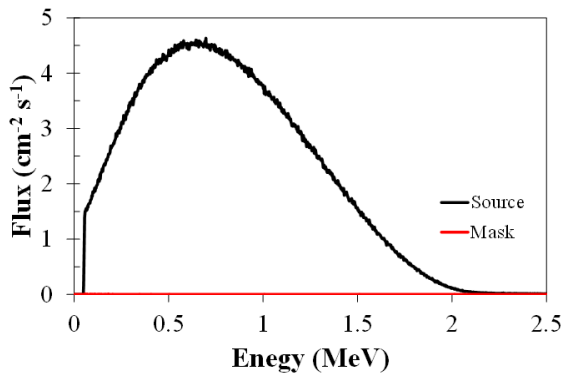
全面マスク D



全面マスク E

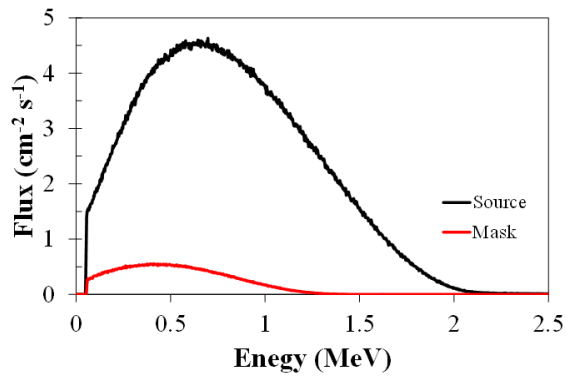


防護面 F

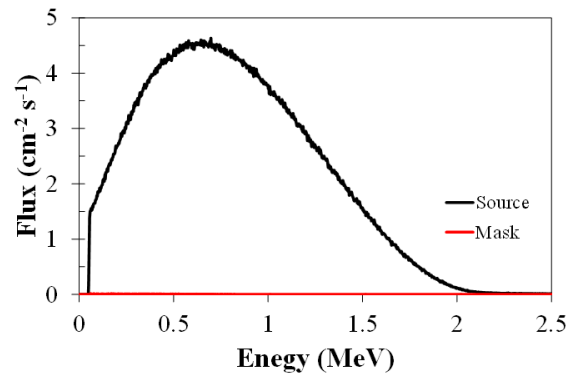


遮へい面 G

図 3-30 全面マスクのバイザー裏側で測定した⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線のパルス波高スペクトル(全面マスク有り・無しの比較)



全面マスク E+防護面 F



全面マスク B+遮へい面 G

図 3-30(続き) 全面マスクのバイザー裏側で測定した ^{90}Sr - ^{90}Y β 線のパルス波高スペクトル(全面マスク有り・無しと比較)

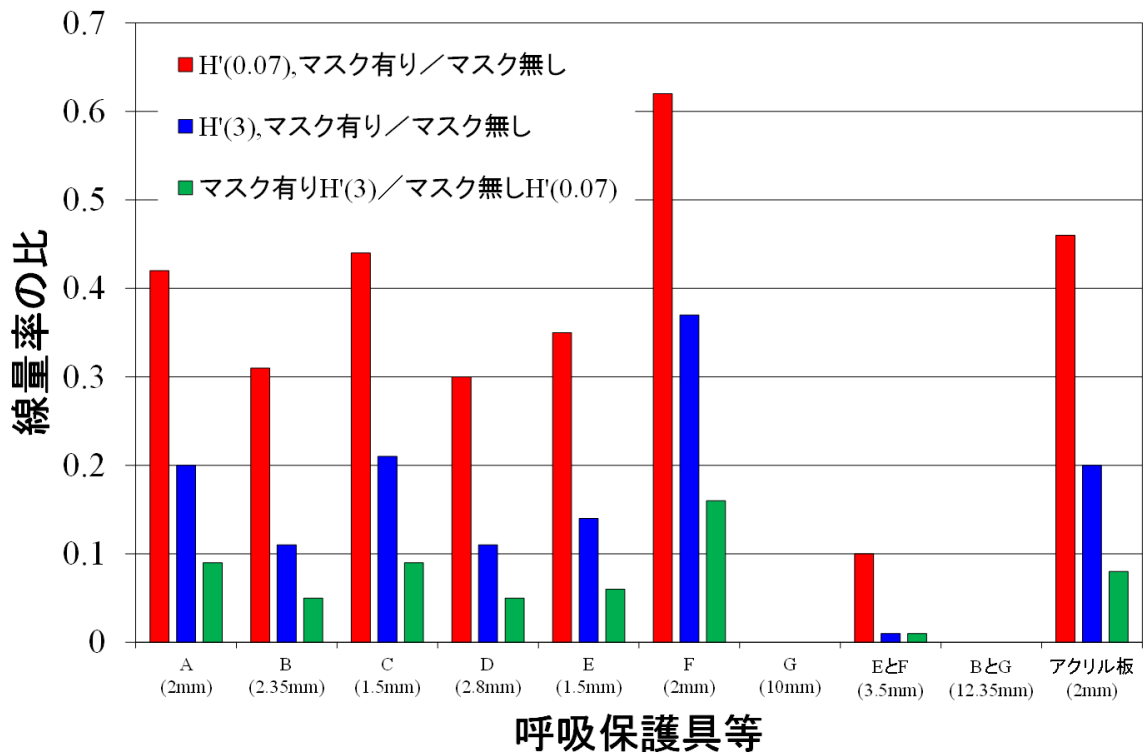


図 3-31 全面マスク等の ^{90}Sr - ^{90}Y β 線の遮へい効果

3.3.4 β 線のマスク遮へい実験: 頭部ファントムと個人線量計による測定

^{90}Sr - ^{90}Y β 線の照射に対する, RANDO ファントム頭部の水晶体位置に埋め込んだ UD-807 TLD による $H_p(3)$ 指示値と $H_p(3)$ 基準値の比を図 3-32 に示す。ここで分母とした $H_p(3)$ 基準値は, β 線校正場に値づけられた, つまり全面マスク等遮へい無し, かつ正面入射での値である。これらと TLD の指示値を直接比較できる照射条件 (図の最上部に示したマスク無し RANDO ファントム正面照射と最下部に示したスラブファントム正面照射) において, 指示値/基準値の比は約 1 であることから, 水晶体位置に埋め込んだ TLD は, 全面マスク有りあるいは正面照射以外の条件でも $H_p(3)$ を精度よく測定すると考えられる。従って, 図に示した結果は, 同じ β 線場で作業をするとき, 全面マスク着用の有無や顔の向きによって水晶体位置の $H_p(3)$ がどれだけ変化するかを表したものと考えてよい。例えば, 頭部を天頂から見て反時計回りに 45 度回転させると, 線源に近づく右目で相対的に高い値, 線源から離れ, かつ鼻梁によって部分的に β 線が遮へいされる左目で相対的に低い値となる。ただし, 両者の平均をとると正面照射の場合にほぼ近い値となる。また, 全面マスク有り無し (すなわち内外) での $H_p(3)$ の比は, 0.13~0.14 であった。これは表 3-8 の第 4 カラムの結果にほぼ等しい。

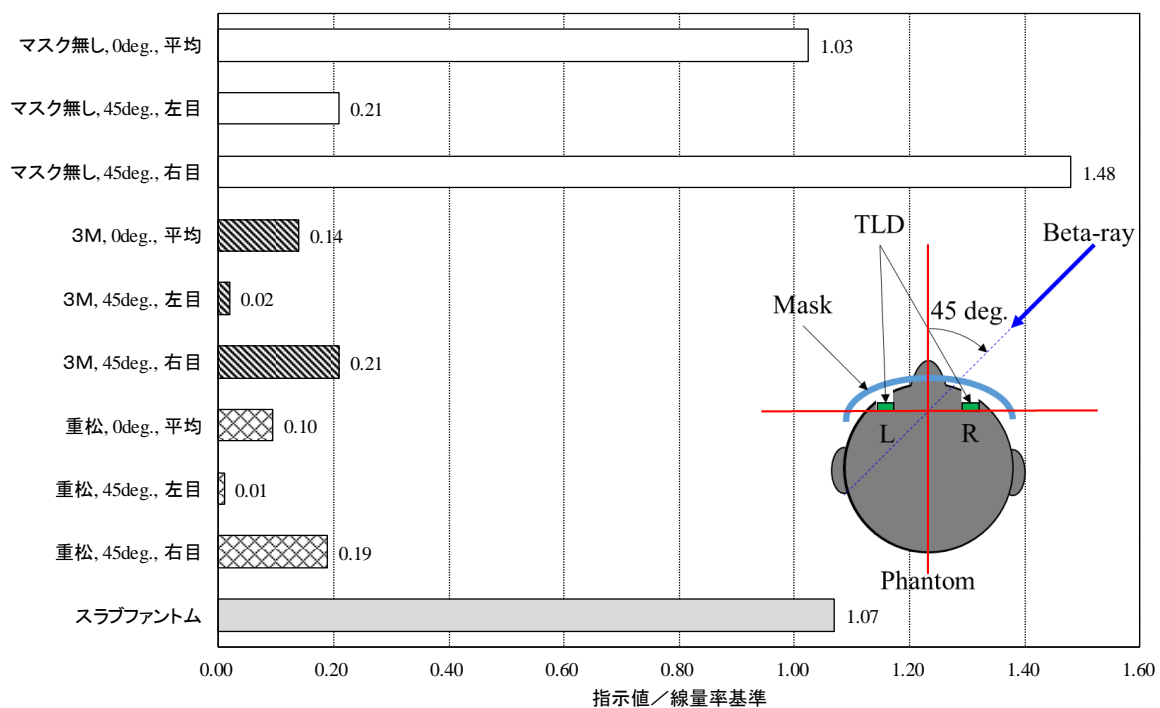


図 3-32 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線の照射に対する, RANDO ファントム頭部の水晶体位置に埋め込んだ UD-807 TLD による $H_p(3)$ 指示値と $H_p(3)$ 基準値の比較 (ここで, 線量率基準は, マスク等遮へいなし, かつ正面入射での値である)

表 3-9 に, TLD による $H_p(3)$, Dosiris による $H_p(3)$ 及びガラスバッジによる $H_p(0.07)$ のそれぞれ測定値を示す。表の第 8 及び第 10 カラムは, TLD の値に対するそれぞれ Dosiris 及びガラスバッジの相対レスポンスである。ここで, 両目尻にとりつけた前者 Dosiris については, 同じ側の目の位置につけた TLD の値を, 額中央に取り付けたガラスバッジについては, 両目につけた TLD の平均値

を基準とした。なお、アクリルファントム上で照射した#7の結果を見ると、Dosirisによる $H_p(3)$ 測定値及びガラスバッジによる $H_p(0.07)$ 測定値は、校正場のそれぞれの量の基準線量にほぼ一致しているため、いずれの線量計も標準的な照射条件で適切な校正がなされていると考えられる。

ランドファントムでの照射試験で、Dosirisは、TLDに対して約0.4~1.7の相対レスポンスを示した。正面からの照射でやや低めなのは、Dosirisの設置箇所(両目尻)がTLDの位置よりもさらに外側(線量率の低い側)であったためと考えられる。また、Dosirisは、顔の向きによっては、その設置位置がより線源に近づく等の理由によってTLDを超える値を示す場合もあった。作業者が絶えず動き回り、ある特定の方向だけから β 線を受けることは稀である点を考慮すれば、平均化された照射条件でのDosirisのレスポンスは1に近づくと予想される。一方、ガラスバッジは、そもそも $H_p(3)$ ではなく $H_p(0.07)$ を測定していることもあって、相対レスポンスは2.5~8.4であった。これは、全面マスクの有無あるいは顔の向きに関係なく、いずれの条件においても $H_p(3)$ を大きく過大評価することを意味する。

表 3-9 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対する、RANDOファントム頭部に取り付けたDosiris(両目尻)及びガラスバッジ(額中央)の指示値と、TLDによる $H_p(3)$ 測定値に対する相対レスポンス

照射#	マスク	入射角度(度)	校正場の基準線量(mSv) $H_p(3)$ [$H_p(0.07)$]	位置	TLD $H_p(3)$ (mSv)	Dosiris (^{137}Cs γ 校正)		ガラスバッジ	
						$H_p(3)$ (mSv)	TLDに対するレスポンス	$H_p(0.07)$ (mSv)	TLDに対するレスポンス
1	無し	0	2.18 [5.28]	左 右	2.13 2.34	1.39 1.30	0.60	5.51	2.5
2	無し	45	2.17 [5.25]	左 右	0.46 3.22	0.62 2.98	1.4 0.93	4.72	2.6
3	A	0	32.4 [78.5]	左 右	4.50 4.52	2.50 2.40	0.54	32.5	7.2
4	A	45	32.5 [78.7]	左 右	0.56 6.94	0.21 11.4	0.38 1.6	27.8	7.4
5	B	0	32.6 [78.9]	左 右	3.03 3.10	1.55 1.71	0.53	25.6	8.4
6	B	45	32.7 [79.2]	左 右	0.32 6.37	0.19 11.0	0.59 1.7	13.8	4.1
7	無し	0	2.09 [5.17]	/	2.31 2.18	2.52 2.39	1.1	5.05 5.06	2.3

(#1~6はRANDOファントム、#7はアクリル平板ファントムで照射)

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

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必要がある。原子力科学研究所では、nanoDot(OSL)を利用した線量計を現在開発中である。一方、核燃料サイクル工学研究所では、体幹部用個人線量計である TLD バッジで現在使用している β γ 線用 UD-808 線量計に厚さ 1 mm のアクリル板を取り付けて TLD の深さを 3 mm 相当に調整したものを当面使用する準備を進めている。ただし、現時点で両研究所共に、そうした水晶体モニタリング専用の線量計の使用を必要とするような(比較的大規模な)セル内等作業の予定がない。そうした作業を新規に立案する段階で、必要な線量計を判断し、かつ現場の放射線場に対応した適切な校正を実施するといった対応を今後行っていくことになる。

核燃料サイクル工学研究所の MOX 燃料施設では、鉛エプロンが常用されており、エプロン外側の頸部に取り付けた個人線量計の $H_p(10)$ 指示値を基に水晶体等価線量の算定が行われている。2001年の放射線防護関連法令の改正以降、年 10 mSv を超える水晶体等価線量を受けた者は平均して年間 17 人、年 20 mSv を超えた事例は僅かに 2 件(2014 年度、廃止措置作業)であった。現在、核燃料サイクル工学研究所では、適切な被ばく管理の遂行を目的に、四半期当たり実効線量で 3.7 mSv(1 年間で 15 mSv に相当)という値を「原因調査レベル」として設定している。このレベルは、「限度」ではないものの、事前の計画なしにそれを超える被ばくを受けた場合に、その原因を究明したり再発防止対策を講じたりといった対応が要求されるため、通常はそれを超えないよう、一種の管理目標のような運用がなされている。水晶体等価線量については、これまで原因調査レベルを特に設定していなかったが、2014 年度に廃止措置関連作業で年 20 mSv を超える作業者が生じた以降、特定の人員に作業(被ばく線量)が偏らないよう人員の計画的ローテーションが現場レベルでの自主的な取り組みとして行われている。これは、水晶体等価線量への管理目標レベル設定によるソフト的な対応にほかならない。水晶体等価線量についても、実効線量と同様に原因調査レベルを設定するかどうかは現時点では決まっていないが、核燃料サイクル工学研究所の現時点での水晶体等価線量の被ばく状況においては、そうした取り組みだけで水晶体等価線量限度の変更に対応できると考えられる。また、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管理方法を、大きく変える必要はないと思われる。

防護メガネの使用とそれを使用する際の線量評価(補正)法については、それを必要とする喫緊のニーズがない(補正せずとも年 20 mSv を超えない)ため、詳細な検討がまだなされていない。ただし、再処理施設等でのセル内作業の場合、作業期間中における全面マスク等呼吸保護具の使用は徹底されるため、例えばマスクの外側に取り付けた線量計の指示値からマスク内での水晶体等価線量への換算は技術的に困難ではない。一方、グローブボックス作業の場合、モニタリング期間を通しての防護メガネの着用は徹底されるとは必ずしも限らないので、一律の補正係数の適用は、正しくない線量評価をもたらしかねない。年 20 mSv を超える、あるいはそれに近づく作業の計画が立案された段階で、その作業に適切な防護装備(その着用を徹底させる方策の検討を含む)と補正係数について、あらためて議論をすることになると考えられる。

3.4.2 作業現場における γ 線スペクトル測定と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

東電 1F で測定された γ 線スペクトルは、 ^{137}Cs (662 keV)及び ^{134}Cs (563, 569, 605, 796, 802 keV)に起因する直接線ピークとそれらの散乱線からなる。全線量当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、代表的な作業現場(こうした場所では周囲の線量低減対策が進んでいる)では70%以上であった。

第三回実験において $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ で測定した γ 線スペクトルに基づき、AP 及び ROT ジオメトリでの円柱ファントムでの $H_p(3)$ 、スラブファントムでの $H_p(10)$ 及び人体形状ファントムでの水晶体等価線量を計算し、これらの比を評価した結果を図 3-33 に示す。単純な数値の大小の比較という意味では、いずれの線量も互いに $\pm 10\%$ 内であり、特に $H_p(3)$ と $H_p(10)$ とで数値に大きな相違が生じるような要因は、東電 1F で観察される γ 線スペクトル(エネルギー)にはない。換算係数の選択によって生じる $\pm 10\%$ の相違は、平成 29 年度報告書でも説明したように、測定に伴う一般的な誤差に比べて十分に小さく、これらは放射線管理実務の上では等価な量と見なして差し支えない。

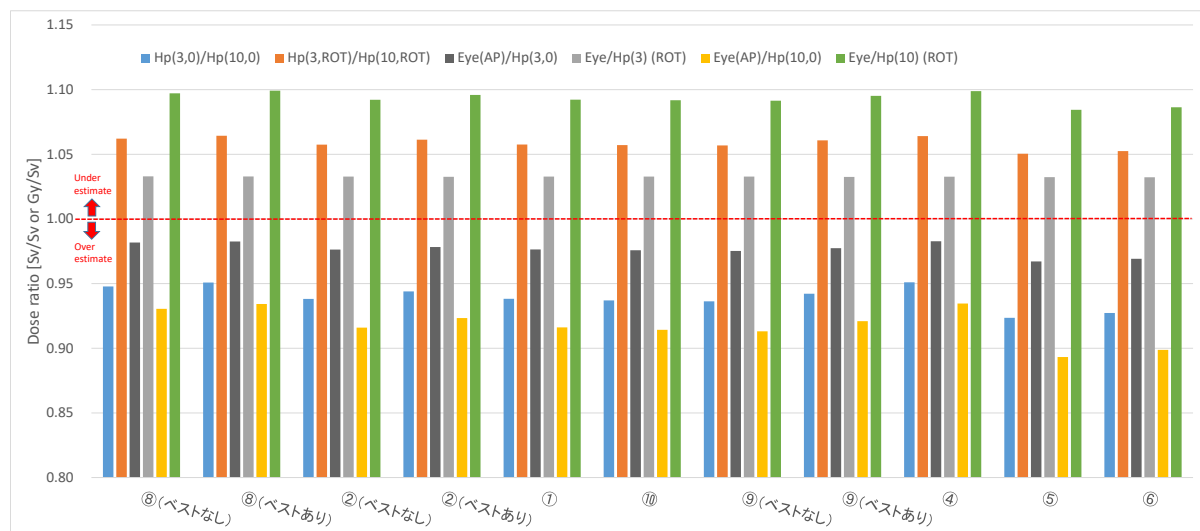


図 3-33 東電1F で測定した γ 線スペクトルをもとに算出した $H_p(3)$ 、 $H_p(10)$ 及び水晶体等価線量(Eye)の様々な照射ジオメトリにおける相対的な関係

また、コリメータ付き CdZnTe 検出器による測定結果から、 γ 線のエネルギーのみならず入射方向に関する情報が得られた。これらの結果は、ファントム実験の照射場として、静止させたファントム(主線源である3号機を向いて地上で作業する作業者を模擬)は、上方 $0\sim 30^\circ$ から前方—後方への照射、回転させたファントム(周辺を動く作業者を模擬)は、上方 $0\sim 30^\circ$ からの回転照射となっていたことを示している。一方、3 mm 線量当量率における散乱線の寄与割合は、水平方向は $0.3\sim 0.6$ とあまり変化しない。一方で、垂直方向に対しては、鉛直下向きでは 0.25 程度で直下の地面からの直接線の影響が大きい、上向きになるにしたがって662 keVのピークも観測されなくなつて散乱線割合は増加し、 0.9 に達する。これは、スカイシャインによるものと考えられる。

(2) ファントム実験

3.2.2(3)で説明したように、第二回及び第三回実験の実施に当たり、参加した分担研究者と協力者ら計5名の実験参加者は、放射線業務従事者としての個人被ばく管理の目的とは別に、水晶体用個人線量計（長瀬ランダウア社 Vision）を頭部と胴体部に装着した。これらの指示値からファントム実験結果の考察を充足する情報が得られたので、ここに紹介する。なお、実験参加者らの個人線量計の数値はいずれも任意単位としてここでは示す。

まず、参加者らが胴体に取り付けた個人線量計は、 γ 線エネルギー特性の異なる2つの素子の信号比をとることで作業場の平均的な γ 線エネルギーを知ることができる。信号比は、 ^{137}Cs γ 線などが主たる線源である再処理施設では通常1倍、 ^{241}Am からの60 keV γ 線が主たる線源であるMOX燃料施設では約8倍であるのに対し、東電1Fでは約2倍であった。これは、実効エネルギー約200~300 keVの γ 線に相当する。このことは、作業現場は ^{137}Cs あるいは ^{134}Cs γ 線の直接線ではなく、むしろその散乱線からなるとする γ 線スペクトル解析結果を支持するものである。

図3-34に、胸に装着したEPDによる $H_p(10)$ とVisionによる $H_p(3)$ の比較を示す。後者の線量計の指示値はスラブファントムでの $H_p(3)$ と等価であると解釈できる。両者の一致は良い。図3-35は、胸と背中に取り付けたVisionの指示値を比べたものである。線量計の指示は胴体の前面側と背面側とでほぼ同じ値であり、明らかにROTジオメトリに近い条件での被ばくであったことを示す。このことは、参加者らが、図3-10及び図3-11に示した実験位置の近くで、あるいはそれらの実験位置を巡回する過程で特に体の向きを定めることなく動き回っていたという事実とも符合する。ROTジオメトリは、特に屋外において、あらかたの作業者の被ばくジオメトリの代表であると考えられる。

図3-36に、胴体と頭に取り付けたVisionの指示値の関係を示す。ここで、胴体については、胸側と背中側とで指示値に差がないので両者の平均を、頭部についても、メガネのフレーム又は管理区域内帽子の左右のこめかみ部分に取り付けた線量計の指示値の平均をとった。また、図には、第三回実験の際に参加者らの主たる作業場でもあったファントム実験実施位置で測定された $H^*(10)$ の高さ勾配（ $1.18 = 400 \mu\text{Sv/h at } 153 \text{ cm} / 340 \mu\text{Sv/h at } 120 \text{ cm}$ ）を実線で、 ^{137}Cs γ 線に対する円柱ファントムでの $H_p(3)$ とスラブファントムでの $H_p(10)$ の換算係数（H29報告書、3-12頁参照）についてAP条件でのそれらの比を一点鎖線（青）で、ROT条件での比を破線（赤）で示す。参加者によって実際に頭と胴体に着用された線量計の指示値の比（約1.2）は、実線で示した線量率の高さ勾配、あるいは破線で示したROT条件での円柱 $H_p(3)$ とスラブ $H_p(10)$ の比に近い値であった。これら二つの要因の相乗効果によって、頭部に取り付けた線量計の指示値が胴体に取り付けた線量計の指示値よりわずかに大きくなったと考えられる。

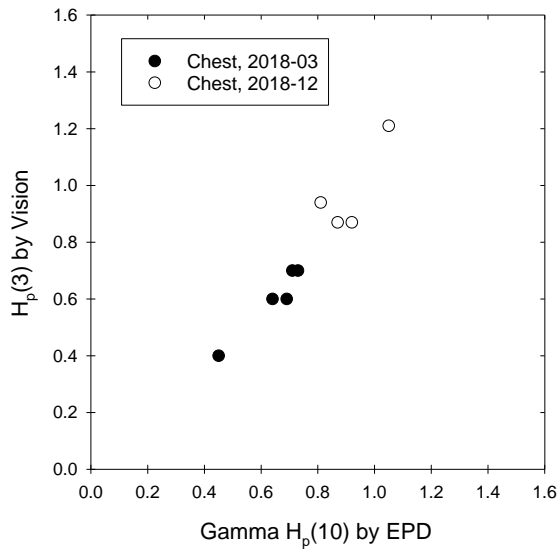


図 3-34 実験参加者が胸に着用した EPD による $H_p(10)$ と Vision による $H_p(3)$ の比較 (線量の値は任意単位である)

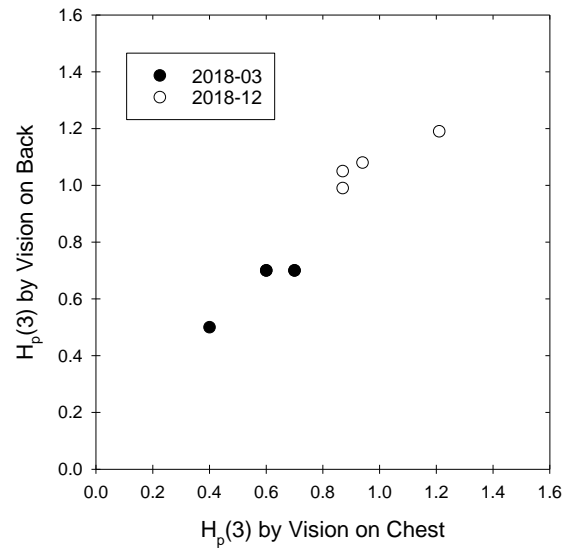


図 3-35 実験参加者が胸と背に着用した Vision による $H_p(3)$ の比較 (線量の値は任意単位である)

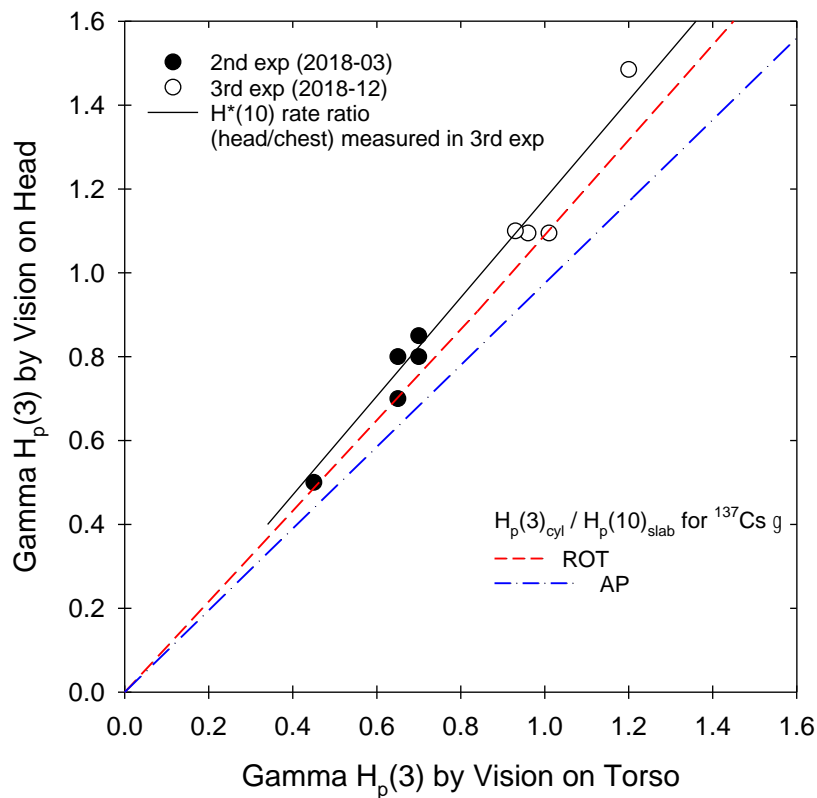


図 3-36 参加者によって胴体と頭に取り付けられた Vision による $\gamma H_p(3)$ の比較 (線量の値は任意単位である)

実線：第三回実験のファントム実験位置で観測された $\gamma H^*(10)$ の胸と頭での高さ勾配
 破線： ^{137}Cs γ 線に対する ROT ジオメトリでの $H_p(10)_{\text{slab}}$ に対する $H_p(3)_{\text{cyl}}$ の比
 一点鎖線： ^{137}Cs γ 線に対する AP ジオメトリでの $H_p(10)_{\text{slab}}$ に対する $H_p(3)_{\text{cyl}}$ の比

2号機と3号機の原子炉建屋間で実施したファントム実験から得られた頭部と胴体部に取り付けた同じ種類の個人線量計の指示値を比べた結果を表 3-10 に示す。この実験場所では、3号機側からの線量寄与が大きく、3号機側に面した条件ではいわゆる AP ジオメトリに近い条件で γ 線を受ける。測定されたガラスバッジの頭部 $H_p(3)$ /胴体部 $H_p(10)$ の比は 1.06~1.24, Vision の頭部 $H_p(3)$ /胴体部 $H_p(3)$ の比は 1.10~1.36 の範囲であった。いずれも参加者らが実際に装着した線量計から得られた結果(図 3-36)と合致する。

これらのうち、線量率に高さ勾配があまり見られなかった第二回実験では、頭部/胴体部の比は、静止ファントムに比べて回転ファントムの方がやや大きくなった。これは、平成 29 年報告書でも述べたように、頭部 $H_p(3)$ と体幹部 $H_p(10)$ (又は $H_p(3)$) の方向依存の違いによるものと考えられ、寸法の大きい、すなわち背面側から入射する成分に対して遮へい能力が特に大きくなるファントムで定義される後の方が、あらゆる方向から放射線が入射する ROT ジオメトリで数値がやや小さくなることに起因する。一方、第三回実験では、頭部と胴体部の線量は、第二回試験に比べて、静止ファントムと回転ファントムとで差がさらに広がったように見える。これは、実験位置で観測された約 1.2 倍の線量率高さ勾配による影響がさらに加わったためと考えられる。

表 3-10 ファントム実験で得られた胴体部の $H_p(10)$ (又は $H_p(3)$) に対する頭部 $H_p(3)$ の比
(丸括弧内の値は、参加者らが着用した個人線量計の結果である)

	静止ファントム		回転ファントム	
	ガラスバッジ	Vision	ガラスバッジ	Vision
第二回 (図 3-11⑥)	1.06~1.10	1.10~1.20	1.17~1.18	1.18 (1.08~1.23)
第三回 (図 3-12■) 防護ベスト無し	1.07~1.24	1.13~1.23	1.20~1.23	1.30~1.36 (1.08~1.24)

第二回及び第三回実験において東電 1F の屋外の作業場で観測された、胴体部の $H_p(10)$ (又は $H_p(3)$) に対する頭部 $H_p(3)$ の比 (最小 1.06~最大 1.36) は、AP・ROT いずれの被ばくジオメトリによってもたらされるものであれ、放射線管理の観点では、「ほぼ均等被ばくである」又は「不均等被ばくとはいえない」と分類されるべき状況と考えられる。

3.4.3 β 線のマスク遮へい実験

東電 1F で使用している全面マスク等について ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対する遮へい性能を調べ、一覧表として整理した。中でも最も広く使用されている全面マスク A と B については、 $H'(0.07)$ 及び $H'(3)$ ともに、汚染水線源(主たる線源は β 線スペクトル形状から ^{90}Sr - ^{90}Y と見られる)を用いて得られた実験結果をほぼ再現する結果を得た。ただし、 ^{90}Sr - ^{90}Y 線源を用いて得られた遮へい効果の方が汚染水線源でのそれよりもやや小さい傾向が見られた。これは、使用した ^{90}Sr - ^{90}Y 線源の方が汚染水線源に比べて β 線スペクトルがやや硬い(高エネルギー側に分布している)ためと考えられる。

また、RANDO 頭部ファントムに取り付けたガラスバッジ及び Dosiris について、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対

するレスポンスを調べた。水晶体深さに埋め込んだ TLD によって評価した $H_p(3)$ に対して、両目尻に取り付けた Dosiris は平均的に見れば近い $H_p(3)$ の値を示した一方、ガラスバッジ ($H_p(0.07)$) は大幅な過大評価を示した。一つ興味深い結果としては、ガラスバッジによる $H_p(0.07)$ に対して照射 #7 で得た相対レスポンス 2.3 の逆数を一律の補正係数 ($H_p(0.07)$ から $H_p(3)$ への換算係数に相当する) として #1~#6 の結果に適用すると、相対レスポンスは 1.1~3.7 に改善されることである。このことは、ガラスバッジが β 線 $H_p(3)$ で校正されるようになれば、より改善した $H_p(3)$ 測定が可能になること、かつその方法で全面マスク内の水晶体位置での $H_p(3)$ を過小評価しそうにないことを示唆する。また、顔の向きによる影響を受けにくいという意味では、額中央は、個人線量計の取り付け箇所としてもつとふさわしいかもしれない。

3.5 結論

2 年間にわたる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。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。2001 年度以降、年 20 mSv を超えた事例はわずかに 2 件(グローブボックスの廃止措置作業: 23.3 mSv と 20.7 mSv) であり、新たな線量限度に対応することは困難ではない。現在、この廃止措置関連作業では、特定の作業者に作業が偏らないよう人員を計画的にローテーションすることによって、年 20 mSv を超えることがないよう作業担当部署による自主的な管理が既に行われている。放射線管理マニュアルに適切な管理レベル(administrative control 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。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

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、一般的な作業場では 70% 以上であった。測定された γ 線スペクトルと ICRP Publ 74 等文献値の換算係数の積から、実用量(円柱 $H_p(3)$ とスラブ $H_p(10)$) 及び水晶体等価線量を算出したところ、これらの量の相違は、仮定したいずれの入射ジオメトリにおいても高々 10% 程度であった。これらのことから、水晶体と胴体部が同じ γ 線に曝される条件のもとでは、胴体部で測定した $H_p(10)$ (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放射線管理の実務上の対応として可能であると考えられる。また、コリメータ付き γ 線スペクトロメ

ータは、エネルギー分布のみならず入射方向分布の測定が可能であり、こうした情報はファントム実験や作業者の被ばくデータ解析に有用である。

β線：一部の作業現場で測定した $H'(0.07)$ (= $H_p(0.07)$) 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広く使用されている 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(内)での $H'(3)$ は全面マスク無し(外)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ことを意味する。同様の結果は、 ^{90}Sr - ^{90}Y β線源を用いた全面マスク等の遮へい性能試験でも確認された。水晶体等価線量限度が今後大幅に下がることを考えると、β線については、 $H_p(0.07)$ の測定をそのまま代用して記録するのではなく、何らかの補正 ($H_p(3)$ への換算) あるいは $H_p(3)$ のより直接的な測定が望ましい。

ファントム実験：東電 1F の 2 号機・3 号機原子炉建屋間の屋外作業現場等を中心に、円柱(頭部)と平板(胴体部)からなる簡易人体形状ファントムに取り付けた様々な個人線量計のフィールド照射試験を実施した。以下に示すような結果が得られた。

- 1) ファントムの同一位置に取り付けた同じ種類の線量計が示す γ 線 $H_p(10)$ 、 γ 線 $H_p(3)$ 及び γ 線 $H_p(0.07)$ 間に有意差は見られない。これは、 γ 線スペクトル測定の結果とも一致する。水晶体と胴体が同じ γ 線に曝される条件のもとでは、胴体部で測定した $H_p(10)$ 等で水晶体等価線量を管理することもできると考えられる。
- 2) ファントムの同一位置に取り付けた異なる種類の線量計の指示値間の一致度は良い。
- 3) 同じ種類の線量計の指示値に着目して頭部/胴体部の比を調べると、1.06～1.36 の範囲であった。これは、照射ジオメトリ(あらゆる方向から放射線が入射する場合に相違がやや大きくなる)と頭部と胴体部の間の線量(率)勾配(今回の試験では線量率に若干の高さ勾配が見られた)の二つ要因の相乗効果によるものと考えられる。また、試験実施期間中に分担研究者を含む実験参加者が着用した個人線量計からも同様の傾向を示す結果が得られた。ただし、放射線管理の観点では、この程度の頭部～胴体間での線量の相違は、「ほぼ均等な被ばく」又は「不均等な被ばくとはいえない」と認識されることが一般的である。胴体に着ける個人線量計に追加して頭頸部にも個人線量計を着けるかどうかの最終的な判断は、そうした線量の相違だけでなく、その場で受ける線量の大小も考慮に入れる必要があると考えられる。この点に関するさらなる論考については 6.2.1 及び 6.2.5 で述べる。

(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ほとんど影響されないことが確認された。

また、 ^{90}Sr - ^{90}Y β線源を用いて同様の照射試験を実施した。目尻に取り付けた $H_p(3)$ 用に設計された線量計による $H_p(3)$ は、水晶体位置に埋め込んだ TLD によって評価した $H_p(3)$ と平均的には

大きく変わらない値であった。一方、額中央に取り付けたガラスバッジによる $H_p(0.07)$ 測定値はTLDによる $H_p(3)$ を過大評価したが、その値を $H_p(3)$ に換算する補正係数を適用する(校正する)ことによって過大評価の程度の大きな改善が期待される。個人線量計で β 線 $H_p(3)$ を測定するには、新たに開発された $H_p(3)$ 用線量計を使用する方法と従来からの線量計による $H_p(0.07)$ を $H_p(3)$ に換算する方法の二つの選択肢をとることができるが、実験結果は、いずれの方法でも適切に水晶体の β 線被ばく管理が可能であることを示す。線量計の取り付け位置は、顔の向きによる影響を受けにくいという意味では、額中央が好ましいかもしれない。ただし、これは、作業性(良好な視野等)の確保とのトレードオフになるであろう。また、全面マスク等防護具の内側に個人線量計を取り付けることが望ましいが、それが困難な場合、全面マスク等の外側で測定した $H_p(0.07)$ に、例えば、表 3-8(第 5 カラム)に示した係数を適用するといった方法も容認するべきである。

3.6 研究発表

平成 30 年度

- 1) 吉富寛, 谷村嘉彦, 星勝也, 青木克憲, 辻村憲雄, 横山須美; 東電福島第一原子力発電所作業員の水晶体の等価線量評価(3) 光子スペクトル測定に基づく水晶体線量評価, 日本保健物理学会第 51 回研究発表会 B1-9(札幌)
- 2) 星勝也, 辻村憲雄, 青木克憲, 吉富寛, 谷村嘉彦, 横山須美; 東電福島第一原子力発電所作業員の水晶体の等価線量評価(4) β 線スペクトル測定に基づく水晶体線量評価, 日本保健物理学会第 51 回研究発表会 B1-10(札幌)
- 3) 辻村憲雄, 吉富寛, 星勝也, 青木克憲, 谷村嘉彦, 西野翔, 横山須美; 東電福島第一原子力発電所作業員の水晶体の等価線量評価(5) 頭部ファントムを用いた水晶体用個人線量計の光子照射試験, 日本保健物理学会第 51 回研究発表会 B1011(札幌)
- 4) 辻村憲雄; 様々な方向から放射線が入射する場合の個人線量計の指示値の解釈について, 第 55 回アイソトープ放射線研究発表会 IIP-02(東大)
- 5) 辻村憲雄, 吉富寛, 横山須美; 水晶体モニタリングを行うべき線量レベルについて, 放射線安全管理学会第 17 回学術大会 2B2-1(名大)
- 6) 星勝也, 辻村憲雄, 青木克憲, 吉富寛, 谷村嘉彦, 横山須美; 東電福島第一原子力発電所作業員の水晶体の等価線量評価法の検討(1) 人体形状ファントムを用いたフィールド試験, 日本原子力学会 2019 年春の年会 2H11(水戸)(予定)
- 7) 青木克憲, 横山須美, 星勝也, 吉富寛, 谷村嘉彦, 辻村憲雄; 東電福島第一原子力発電所作業員の水晶体の等価線量評価法の検討(2) ファントム実験と作業員着用線量計の関係, 日本原子力学会 2019 年春の年会 2H12(水戸)(予定)

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，内田真弘氏

株式会社千代田テクノルの江崎巖氏，前俊一郎氏，黒澤優太氏

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

(株)E&E テクノサービスの土子泰弘氏，藤本正巳氏

3.8 追記(2019年3月21日)

日本原子力学会 2019 年春の年会において，産業技術総合研究所の加藤らは， ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源にエネルギーを変化させるフィルタを取り付けるなどして校正エネルギー点を増やした β 線 $H_p(3)$ 校正場の開発について報告(発表演題: 水晶体被ばく線量測定における 1 MeV 以上の β 線校正場の開発)した。この校正場を利用すれば，例えばガラスバッジについても，様々な β 線スペクトルに対して β 線 $H_p(3)$ を評価するよう測定信号の演算処理のためのアルゴリズムを構築することが可能になる。3.5(3)で，個人線量計による β 線 $H_p(3)$ 測定には二つの選択肢—すなわち，(i) $H_p(3)$ 専用に設計された線量計による測定と (ii) 複数の検出素子とフィルタ材からなるガラスバッジのような線量計の測定信号から演算処理によって算出した $H_p(0.07)$ を ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源等の一点での校正によって $H_p(3)$ に換算する方法—があると述べた。これらに，(iii) ガラスバッジのような線量計の測定信号から演算処理によって $H_p(3)$ を算出する方法が，第三の選択肢として追加されることになる。

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) 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).
 - 11) 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).
 - 12) W. G. Cross, N. O. Freedman, and P. Y. Wong, AECL Report, AECL-10521, (1992).
 - 13) 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).
 - 14) 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).

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	菊地 透	原子力安全研究協会 研究参与
研究協力者	清川文秋	公益財団法人大原記念倉敷中央医療機構倉敷中央病院 放射線センター放射線安全管理室 診療放射線技師
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 38 万人:平成 29 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。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のまとめと、線量低減方法の検討および効果的な教育資料作成の要点抽出を目的として研究を実施した。さらに、眼の水晶体の放射線防護の在り方に関する放射線審議会からの意見具申 (報告) (平成 30 年 3 月 14 日) に記載された、関係学会によるガイドラインの策定の期待とこれに対する関係行政機関の支援を期待する、という主旨にも対応するために、診療科横断的なガイドライン作成にむけた関係学会との調整にも取り組むとこととした。

4.2 研究方法

4.2.1 対象診療科と職種

平成 29 年度は研究協力者が勤務する施設を中心に 12 施設を選定した。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 120 名を対象とした (表 4-1)。平成 30 年度は整形外科診療所の 9 名 (対象は医師 2 名看護師 7 名) も対象に追加した。また、線量が高い消化器内科医師

3 名には対応策を提案後再度計測した。

教育は、整形外科領域の手技を担当する医師、看護師、診療放射線技師の 28 名を対象とした。

表 4-1 研究に参加した診療科・職種

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、診療放射線 技師

4.2.2 計測方法

平成30年度も平成29年度と同様の計測方法とした。以下に概略を示す。

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。この線量計は現在長瀬ランダウア社が販売中の線量計とは若干仕様が異なるが、平成29年度からの継続した計測調査のため、開発時のモデルを今年度も使用した。線量計は素子に $3.2\text{ mm} \times 3.2\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$ の LiF:Mg,Ti を使用した熱ルミネセンス線量計で 3 mm 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、 ^{137}Cs 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.3 を用いた。線量測定範囲は $0.1\text{ mSv} \sim 1,000\text{ mSv}$ である。

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。防護眼鏡も装着しない者には線量計を装着する目的で素通しの眼鏡(伊達眼鏡)を提供した。具体的な記録項目は、以下のとおりとした。



図 4-1 防護眼鏡と線量計

IVR(放射線科、脳神経外科、循環器内科、消化器内科)

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 と総 DLP (診断参考レベルにも用いられている値。撮影毎に装置に表示される)
7. 照射方向
8. 装置表示空気カーマ (mGy)
9. 総面積線量 ($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)
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

整形外科透視手技

1. 手技名
2. 患者の慎重、体重
3. 手技時間
4. 透視時間 (min)
5. 従事者の立ち位置
6. 防護衣着用の確認、防護眼鏡着用の有無

7. 天吊り防護版の使用の有無

核医学診療

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

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

救急医の放射線診療業務

なお、救急医の特殊な業務は、重篤な状態の患者の気道を挿管で確保した状態での CT 撮影である。緊急状態での実測協力が困難と考えられたため、救急医に CT 室内の立ち位置を設し、一般的な救急外来での撮影条件を用いたファントム実験を行った。

① 結果の整理

診療科により治療や検査内容が異なるため、診療科毎に結果を分類した。術者が患者に対して斜めまたは直行する位置に立つことが多く、眼鏡の左右に装着 (図 4-1) する線量計の管球からの距離が 20cm 程度異なることが予測された。このため集計は線量計 (素子) 毎とした。年間 20mSv を超える恐れがある場合は、具体的な記録項目を確認しその原因を調査・検討した。また、防護眼鏡を装着した者については防護眼鏡の内側で計測した値を用いて集計した。防護環境の外側の計測値については、年 20mSv を超える恐れがある計測結果の素子について、防護眼鏡による遮蔽効果を個別に確認した。

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。

4.2.3 教育効果の検証

本研究参加を呼び掛けた際に、具体的な現場教育の有無についても確認をしたところ、整形外科の情報提供を受けた全施設から、院内での具体的な現場教育の経験に乏しく、教育の必要性を感じているとの連絡があった。その他の領域は施設での現場教育を実施していたため、本研究の教育対象は整形外科領域とした。IAEA の術者の要点 10 の日本語訳を基本教材とし、整形外科の 1 施設を訪問し当該病院の装置とファントムを用いて、術者の要点 10 の内容を具体的に再現するスライドを作成した。特に防護衣、防護具、術者の位置への配慮の有り、無しのパターンでの術者の被ばく線量を明記した。講義終了後に内容に関する参加者からの

聞き取り調査を実施した。

4.2.4 診療科横断ガイドライン作成に向けた準備

放射線診療に関連する医師・歯科医師の学会に対して、個別にガイドラインの必要性を説明し、代表者の検討を依頼した。水晶体の線量管理の必要性と各診療科の放射線防護への取り組みを紹介するフォーラムを開催した(第40回医療放射線の安全利用フォーラム。主催:医療放射線防護連絡協議会、平成30年2月17日、首都大学東京 荒川キャンパス)さらに、各学会からの代表者による会議を開催し、フォーラムでの総合討論の内容を踏まえて、診療科横断的なガイドラインの骨子について検討した。

4.3 研究結果

4.3.1 計測結果のまとめ

小児領域の結果を例に(表4-2、表4-3、図4-2)領域毎の検討手順を示す。

線量測定機関から送付される個別の線量結果は表4-2の様式であった。防護眼鏡の内外ともに検出限界以下、検者2は防護眼鏡の装着はなく、伊達眼鏡に装着した線量計(外)は0.2mSv、検者3は右が検出限界以下、左が0.1mSvを示す。依頼した施設で匿名化された検者ごとに1ヶ月間の手技内容が記録されている(表4-3)。術者の立ち位置を図示(図4-2)しているため、防護板との関係や撮影時の立ち位置を容易に推察できる。小児領域では、年間20mSvを超える恐れは無かったが、3名の主義内容を確認すると検者2は防護板を活用していなかった。

表4-2 線量測定機関から送付される個別の線量

印字氏名1は防護眼鏡の内外ともに検出限界以下、検者2は防護眼鏡の装着はなく、伊達眼鏡に装着した線量計(外)は0.2mSv、検者3は右がM(検出限界以下、0.1mSv以下)、左が0.1mSvであった。

印字氏名	着用開始日	着用期間	右 or 左	通し番号	内 or 外	色	3mm線量当量(mSv)
00001	180201	M1	右	1000321R	内	紺	M
00001	180201	M1	左	1000322R	内	紺	M
00001	180201	M1	右	1000323R	外	紫	M
00001	180201	M1	左	1000324R	外	紫	M
00002	180201	M1	右	1000325R	内	紺	0.2
00002	180201	M1	左	1000326R	内	紺	0.2
00003	180201	M1	右	1000327R	内	紺	M
00003	180201	M1	左	1000328R	内	紺	0.1

表 4-3 印字氏名1(表 4-2)の手技の記録

1 か月間に2症例(記録事項1と2)を行っている。

記録事項	日時	場所	手技名	患者の身長cm / 体重Kg	手技時間min	透視時間 (min) / 主に使用した秒間パルス数	撮影回数	Cone-beam CT (またはCT) の撮影回数/ IVR-CTでは代表的なCTDI、総DLP
1	2018/3/6	心カテ室	脳血管造影	82.2/10.23	63	17min/4	8	該当なし
2	2018/3/13	心カテ室	脳血管造影	106/20	28	5min/4	2	該当なし

記録事項	照射方向	装置表示空気カーマ (mGy)	総面積線量 (Gy・cm ²)	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	防護衣着用の確認/防護眼鏡着用の有無	天吊り防護版の使用の有無
1	正側2方向	121.8	1800.9 μ Gy・m ²	立ち位置主に①、2回目撮影時12時28分から16.6秒間(②)、3回目撮影時12時35分から20.4秒間(②)、5回目撮影時12時46分から7秒間(②)、6回目撮影時12時46分から13.98秒(②)、7回目撮影時12時52分から18.77秒(②)、8回目撮影時13時1分から19.3秒(②)	防護衣着有用/ 防護眼鏡着用有	有
2	正側2方向	64.4	999.38 μ Gy・m ²	立ち位置主に①(患者の腹部付近)、1回目撮影時11時36分から15秒間(②)2回目撮影時11時41分から13秒間(②)	防護衣着有用/ 防護眼鏡着用有	有

検者立ち位置

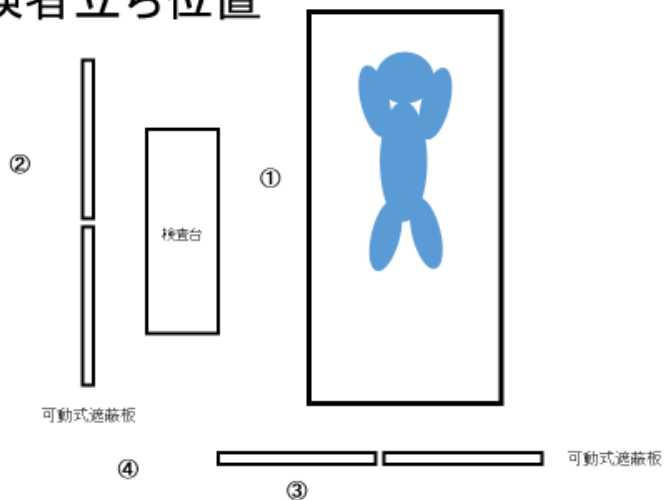


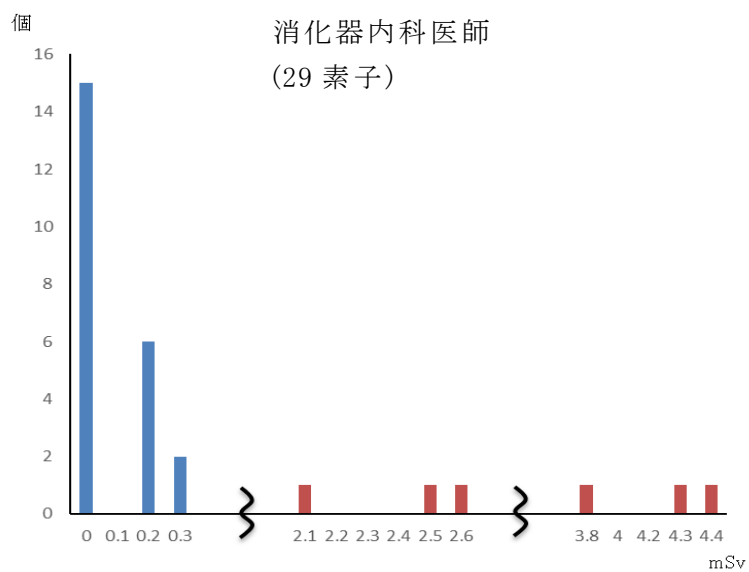
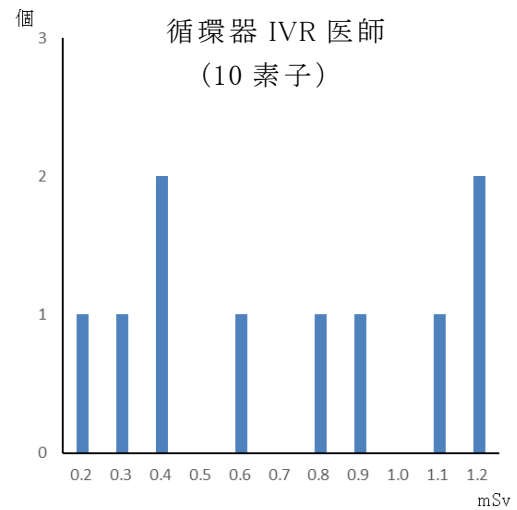
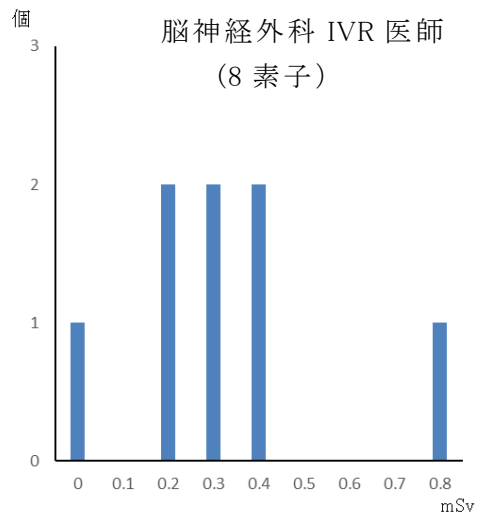
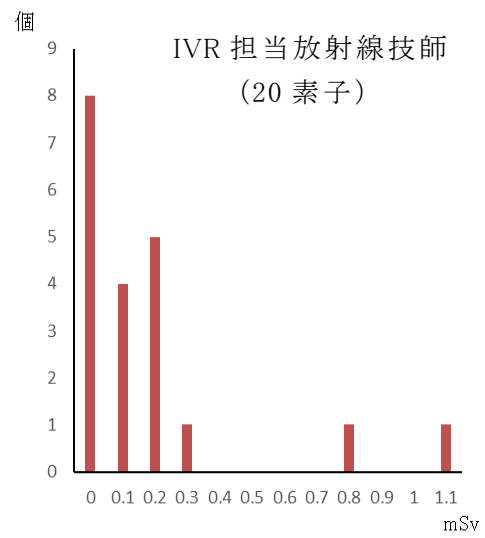
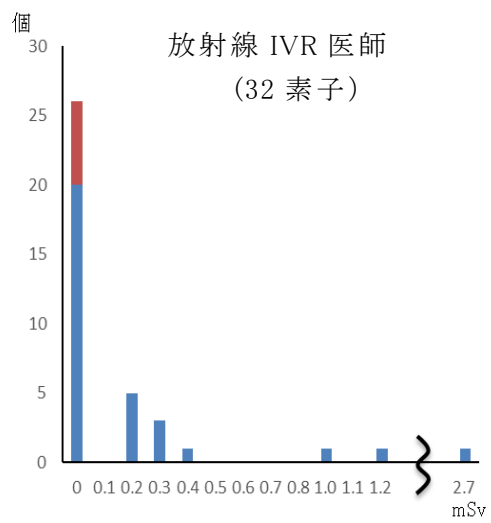
図 4-2 検者立ち位置概略図(青は患者)

その他の領域の結果を図 4-3 に示す。集計期間は平均的な 1 か月間である。平成 29 年度に計測と集計が完了した小線源治療の結果は、本研究の平成 30 年 3 月発行の成果報告書と同じためグラフから割愛した。

放射線科医師 1 名と消化器内科医師 3 名の水晶体線量が年間 20mSv を超えるおそれがあった。個々の記録内容を確認すると、放射線科医は他の放射線科医師の手技とは異なり、CT ガイド下の RF 波を用いた腫瘍の焼却術という特殊な手技を専門に行っていた。専用の天鈞アクリル防護版が施設に装備されていたが、利用していなかった。消化器内科医師 3 名は、線量の低い医師と比較して透視時間が長い等の手技上の問題は無かった。しかし、防護眼鏡を使用していなかった。また、患者の散乱線を防止する防護用ラバーシールドを施設が準備していたが、これを活用していなかった。また、施設の放射線安全教育で指摘した術者の立ち位置を可能な範囲で患者の足側にする(照射野から離れることを意味する)との注意事項も遵守していなかった。

その他の領域は、診療放射線技師 1 名が右眼 0.8mSv、左眼 1.1mSv を示した。この技師は上記 CT ガイド下の手技を担当していた。脳神経外科領域は医師 1 名の左眼が 0.8mSv であった、この医師の右眼は 0.4mSv を示した。循環器 IVR は医師 1 名の左眼が 1.2mSv 右眼が 1.1mSv、もう 1 名は左眼が 1.2mSv 右眼が 0.6mSv を示した。核医学診療は左眼が 0.6mSv 右眼が 0.5mSv を示した医師は 1.9GBq の放射性ヨウ素を 40 分間かけて患者に投与する手技を担当していた。その他のスタッフは回診や検査薬の調剤および投与であった。歯科領域は左右の眼ともに 0.5mSv を示した歯科医師の被ばくが最も高かった。業務内容は検死で口内法用のフィルムを一度に 10 枚以上挿入して撮影していた。

防護眼鏡を装着しなければ年 20mSv 以上の水晶体線量になるおそれがある素子が 4 素子存在した。脳神経外科 IVR 医師で 1.8mSv から 1.1mSv、放射線科 IVR 医師で、2.4mSv から 1.2mSv に、循環器 IVR 医師で 4.2mSv から 1.2mSv、2.5mSv から 1.2mSv と 2.4mSv から 1.1mSv、整形外科医師は 3.4mSv から 0.7mSv、3.3mSv から 0.8mSv に低減していた。放射線科医で防護眼鏡の内側が 2.7mSv の医師の外側は 4.4mSv であった。



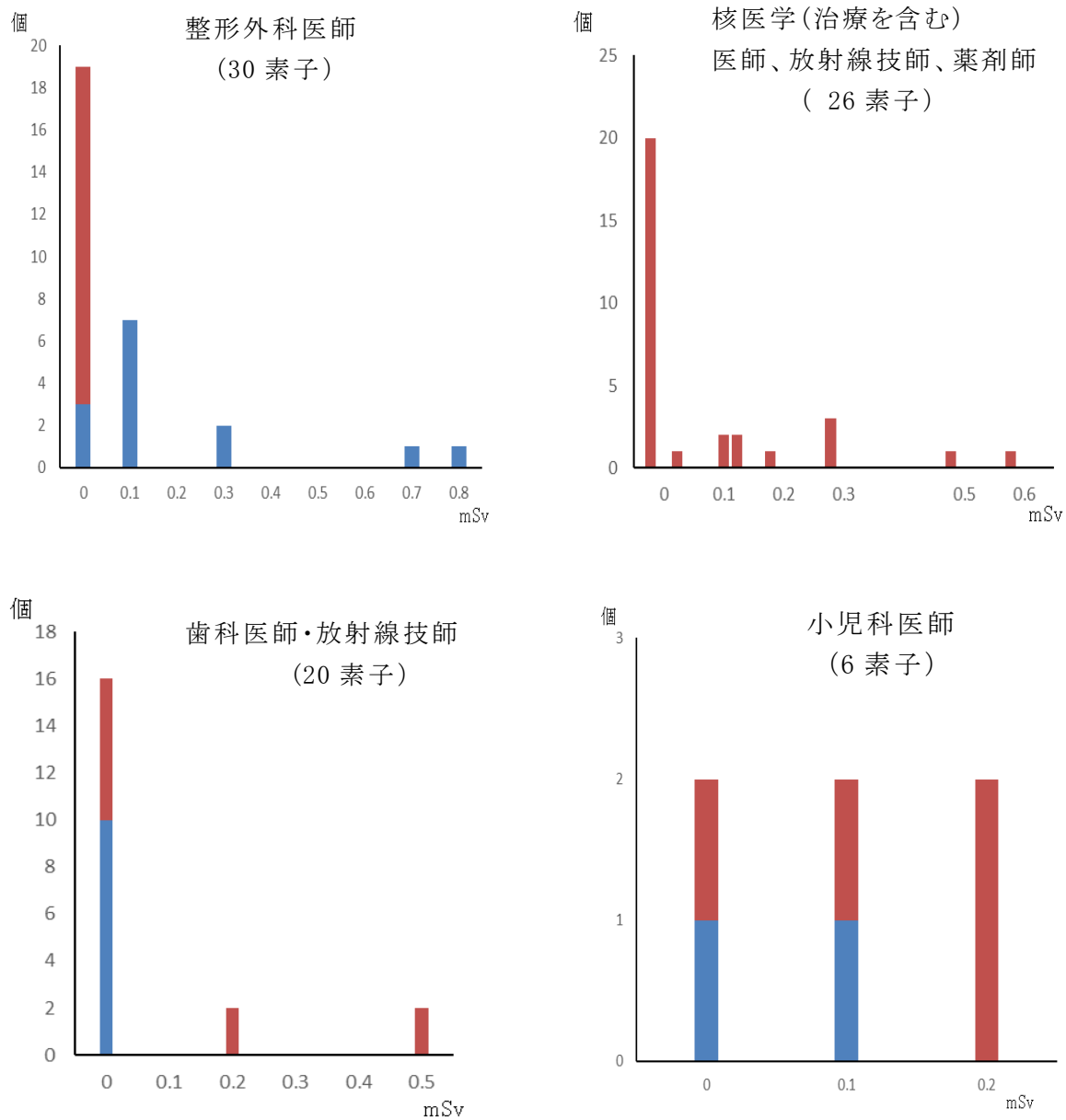
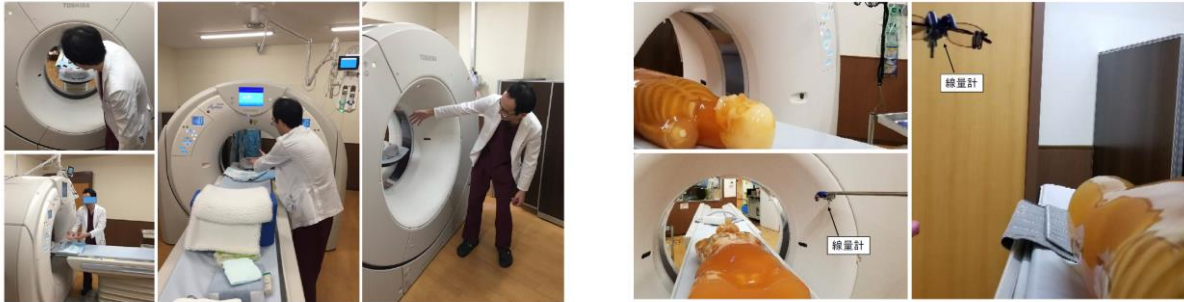


図 4-3 診療科別の 1 ヶ月間医師等の水晶体線量 (■ 眼鏡なし ■ 眼鏡あり)

放射線科医師1名と消化器内科医師3名の水晶体線量が年間 20mSv を超える恐れがあった。

救急の医師の被ばくについては、図2の設定をしてファントムを用いて計測した。患者側に立つ場合が多いため、同部は防護眼鏡の内側と外側を計測した。ガントリの奥は防護眼鏡なしの場合のみ計測した。結果は、1回の標準的な造影CT検査のプロトコールで照射した場合、患者側が防護眼鏡ありでは左右とも0.1mSv 防護眼鏡なしでは左が1.8mSv 右が1.5mSv、ガントリ側では左が2.3mSv 右が2.0mSvであった。



計測のジオメトリ

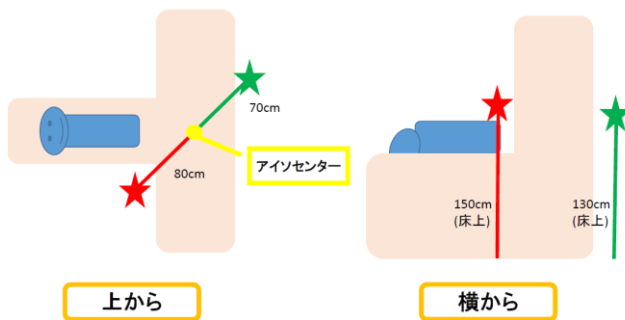


図 4-3 救急の医師の CT 検査時の被ばく推計結果
 右上図の医師の位置をもとに左上図の線量計を設置
 患者側に立つ場合(赤)とガントリ側(緑)の両者を設定した

4.3.2 被ばく線量低減対策

CT ガイド下の治療と、消化器内科に加に対して改善策を検討した(表 4-4)。

表 4-4 手技毎の術者の水晶体線量低減対策

手技	対策
CT 透視下の腫瘍治療	CT 専用の遮蔽板を必ず利用すると、被ばく線量は 90%程度低減できる。
消化器内科の治療	患者に防護衣用いて散乱線を低減する。術者立ち位置を管球近傍から患者足側に変更する。

CT 透視用の防護板は特殊で(図 4-5)施設の追加投資が必要だが、その他の領域においては、特別な費用負担無く、教育の徹底により実現可能な対策である。



図 4-5CT 専用防護板

4.3.3 効果的な教育

医療関係者向けの資料は、研究協力者らのこれまでの各施設での放射線安全教育の経験を基に作成した。生物的影響や物理的内容については最小限に留め、主に患者者防護のための要点:10 について解説した(図 4-6)。

エックス線透視における 従事者防護の要点:10

1 防御デバイスの使用

前合わせのプロテクター
0.25mm鉛当量を
使用すれば、
前方0.5mm鉛当量、
後方0.25mm鉛当
量の遮蔽能力を持つ。

スカートタイプ
のプロテクター
重さを分散できる。

防護メガネ
側面まで防護可能

頸部の防護

2 時間・距離・遮蔽の3原則

1 時間
短い時間で

2 距離
放射線発生源からの
距離を取る

3 遮蔽
遮蔽板・
防護衣の
活用

3 遮蔽板の利用

これらの活用により、
散乱線を90%以上低減
できます。

天井吊り遮蔽板
(鉛板アラミガラス)

可動型の遮蔽板

X rays

テーブル
カーテン板

シネ血管撮影時は、可動型の
遮蔽板が望ましい。

**4 透視の視野に
手を入れないように
する**

90%の
低減能力

透視の中央部に手を入れることは、照射条件(kV, mA)の増加につながり、患者とスタッフの放射線被ばくが増加します。どうしても避けることができない場合は、手を入れないようにします。

**5 患者に照射された線量の
1~5%だけが患者を通り
抜ける**

X線検出器(受像面)側に立つこと。検出器側の線量は
入射線量のわずか1~5%となり、そこからの散乱線も
同様に減少しています。

正解 X線管球 X線管球
誤り X線管球 X線管球

**6 X線管球は常にテーブ
ルの下にあること**

テーブルの上側にX線管球が位置する状態では、できる限り
使用しない。アンダーチェアシステムは、散乱線の防止に効
果的です。

正解 X線管球
誤り X線管球

7 個人線量計を着用する

少なくとも2つの線量計を装着すること

1個目▶胸部レベルの防護衣内側

2個目▶頸部または目のレベル

防護衣の外側で、さらに手がX線直接線に近くで作業する
場合、指リング線量計の追加使用がのぞましい。
リアルタイム線量測定システムは、術者が手技等に線量を
確認できるため、被ばくの低減に有効です。

天井用防護板

指リング
線量計

患者

頸部または
目のレベル
に装着

1個目 胸部のレベル
で防護衣の
内側に装着

防護衣

防護用
テーブルカーテン

**8 放射線被ばくに
関する、あなたの
知識を常に更
新すること**

**9 放射線防護上
の疑問点につ
いては「放射線科
専門医」へ相談
する**

QA

**10 透視装置の品質管理
を怠らず、また特性に
沿った適切な使用を
心がけ、安全かつ安定
した性能を保つこと**

患者被ばくの減少は、つねに医療従事者の被ばく軽減につながります

日本医学放射線学会
日本インターベンショナルラジオロジー学会
医療放射線防護連絡協議会

<https://www.iaea.org>

図 4-6 従事者防護の要点:10

IAEA に許可を得て日本の放射線診療の現状に合わせて修正している。

医療放射線防護連絡協議会 HP からダウンロード可能

その後、項目の順をおって該当施設の装置を用い、整形外科の手技に置き換えた場合の具体的な線量の変化を示した(図 4-7)。

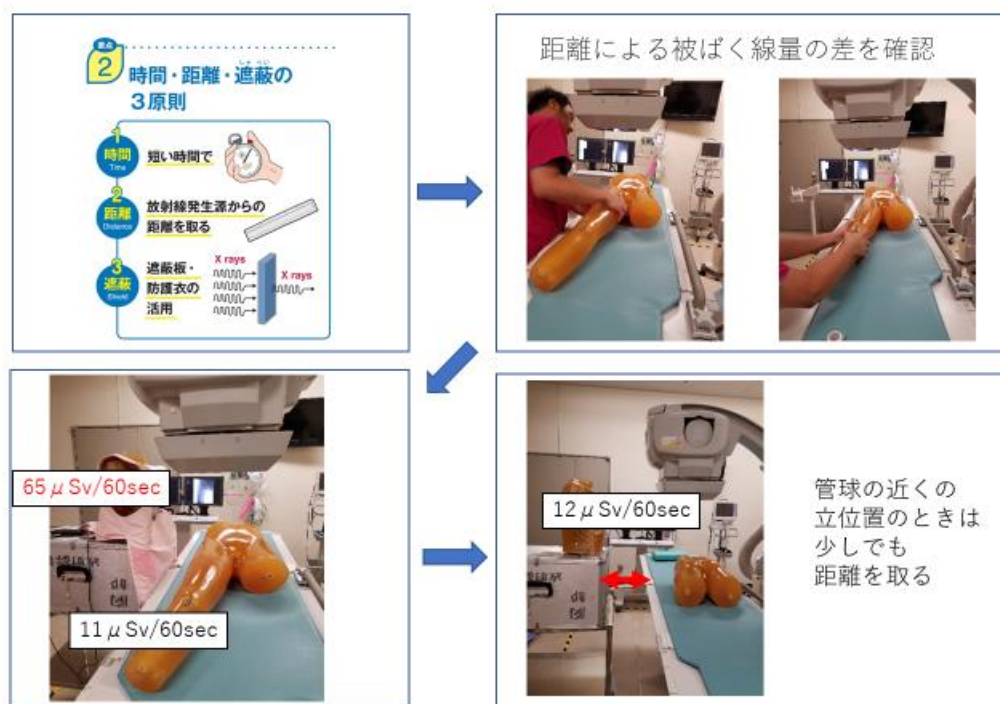


図 4-7 整形外科への講義スライドの一例

防護のポイントを日常診療の内容に置き換えて提示をした。

講義後の聞き取り調査では、放射線防護に関する講義は過去にほとんど受けた経験がないが、内容の難易度はちょうど良いと全員が回答した。

また、明日から実践できると思った防護策については、術者の被ばく低減に確実に繋がる事項を挙げていた(図 4-8)。

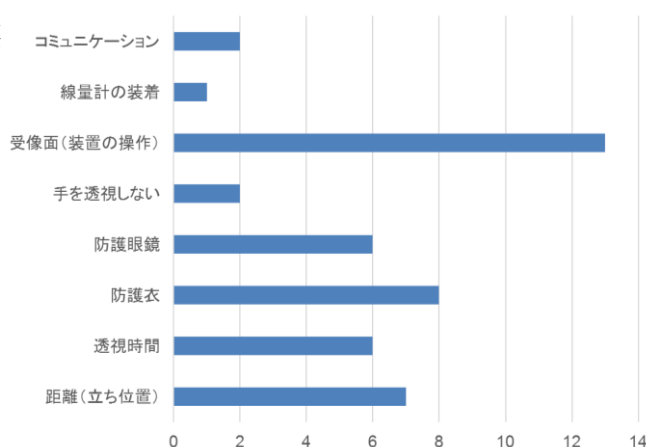


図 4-8 明日から実践できる項目
(複数回答)

4.3.4 診療科横断ガイドライン作成に向けた取り組み

ガイドライン作成に関して放射線診療に関係する 15 の学協会の理事会承認を得ることができた(日本医学放射線学会、日本 IVR 学会、日本循環器学会、日本小児科学会、日本救急学会、日本整形外科学会、日本脳神経外科学会、日本消化器病学会、日本小児科学会、医療放射線防護連絡協議会、放射線看護学会、日本歯科放射線学会、日本放射線技術学会、IVR 専門技師認定機構、日本放射線技師会)。

これらの学協会の中には放射線防護に関するガイドラインを作成した経験が無い団体も複数

有るため、水晶体の被ばく線量管理の重要性に関する現状認識と意見統一の目的で、医療領域の水晶体の被ばく管理に特化した放射線の安全利用に関するフォーラム(主催医療放射線防護連絡協議会)を開催した。以下にプログラムを示す。水晶体の線量限度改定の経緯と具体的内容の紹介、各診療科の取り組み紹介と、ガイドライン作成に向けた問題点整理に関する総合討論を行った。

~~~~~フォーラムプログラム~~~~~

開催の挨拶:「眼の水晶体のしきい線量」—ICRP 刊行物 118 の記載から—

佐々木 康人(医療放射線防護連絡協議会 会長)

基調講演:「診療放射線従事者に対する個人管理の現状と課題」

樺田尚樹(産業医科大学)

パネルディスカッション:

「水晶体被ばく線量引き下げに伴う個人被ばくの課題」座長イントロダクション

横田須美(藤田保健衛生大学)

講演 1 「実用量と防護量」 黒澤忠弘(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

講演 2 「医療分野におけるガイドライン作成状況—放射線科から—」

大野和子(京都医療科学大学)

講演 3 「循環器分野における従事者防護の状況」 天野英夫(東邦大学)

講演 4 「整形外科分野における従事者防護の状況」 平泉 裕(昭和大学)

総合討論 診療科横断的ガイドラインにむけて

~~~~~

フォーラムには、ガイドライン参加を決定している学会の代表者や保健物理関係者等 88 名が参加した。なお、佐々木康人氏の開会挨拶文を当日の抄録から許可を得て転記する。

眼の水晶体のしきい線量 —ICRP 刊行物 118 の記載から—

医療放射線防護連絡協議会会長 佐々木康人

2 年前の第 38 回「医療放射線の安全利用」フォーラムでのご挨拶で、組織反応(確定的影響)のしきい値について述べ、最後に ICRP 刊行物 118¹⁾を紹介しました。この刊行物の第 1 部は「組織反応についての ICRP 声明」(5 パラグラフ、2 頁)です。パラグラフ(2)と(3)で、近年の知見から、これまで考えられていたよりしきい線量が低いかもしれない組織反応があり、眼の水晶体のしきい線量は、今や吸収線量で 0.5 グレイ(Gy)と考える。水晶体の職業被ばく等価線量限度は、「5 年間平均で年間 20 ミリシーベルト(mSv)、但しどの 1 年間も 50mSv を超えない」と勧告すると声明しました。ICRP2007 年勧告(刊行物 103)は眼の水晶体の等価線量限度を年間 150mSv とし、脚注で「この限度は ICRP 作業グループで現在検討中である」と記し、「視力障害に関する眼の放射線感受性についての新しいデータが期待されている。委員会はこれらデータ及び眼の水晶体の等価線量限度の考える意義について、データが利用できるようになった時点で考察するであろう。」(パラグラフ(249))と記載しました。これに答える形で、2011 年 4 月に

韓国ソウル市で開催された主委員会で承認し、公表したこの声明は「ソウル声明」とも呼ばれます。なお、組織反応と考えられている白内障に対して、確率的影響の指標である等価線量 mSv を適用することについては、「その理由は、委員会が、確定的影響に関連する生物学的効果比 (RBE) 値は確率的影響の放射線加重係数 (W_R) 値よりも常に低いと仮定しているためである。」(パラグラフ 250)と解説しています。

ICRP1990 年勧告 (刊行物 60) で公衆被ばくについて、「委員会は任意に選んだ低減係数 1/10 を採用して、水晶体に対して年限度は $15mSv$ と勧告する」(パラグラフ (194)) と記載しています。今回公衆被ばくの眼の水晶体線量限度を変更しなかった理由について、刊行物 118 の Guest Editorial でクレメント ICRP 事務局長は「委員会は現在の限度が防護を十分保証するので、限度を引き下げると不必要な制限を負荷することになるから」と説明しています。

刊行物 118 第 2 部には眼の組織反応について詳細な記載がありますので、以下に要約します。

人の水晶体は無色透明で水晶体囊に包まれて凸レンズの形をしています。毛様体と呼ばれる筋肉の収縮で厚くなり、その弛緩で薄くなることで遠近のピント合わせをします。血管はなく、栄養は周囲の水溶性液体及び硝子体液から供給されます。前方の角膜面にある単層の上皮細胞が分裂増殖して下層の成熟線維細胞が作られます。上皮細胞は生涯にわたり分裂と分化を続け、核を囲む皮質からなる水晶体が成長します。線維細胞には核もミトコンドリアもないため、エネルギー補給は上皮細胞に依存しています。上皮細胞層の機能が正常なうちは水晶体の透明度が保たれますが、種々の原因で混濁が生じます。混濁がひどくなると視力障害が起こります。この状態が白内障です。混濁の起こる部位により皮質白内障、核白内障、後囊下白内障に分類され、放射線は後囊下白内障を起こしますが、後囊下白内障の原因は放射線だけではありません。加齢が原因で起こる加齢白内障の頻度が高く、60 才以上の人口の 96% 以上が加齢性白内障を持つと言われていています。筆者も御多分にもれず 20 年程前に、眼科医の同級生から白内障と診断されました。運転免許更新が難しい程視力が低下したため、3 年前に手術をしました。手術直後にパソコン画面がとても明るく見えて感動しました。点眼麻酔下で、超音波で水晶体を破碎し、囊にあけた小さな穴から吸引して取り出し、折り畳んだ人工レンズを挿入して広げで手術は終了しました。術後 1 年で右眼の視力が低下し始めて、後期白内障と診断されました。一部取り残した上皮細胞が人工レンズの上で増殖した状態で、レーザーで細胞を吹き飛ばす治療を受け、視力を回復しました。この時上皮細胞の生命力を実感しました。

放射線白内障は確定的影響で、しきい線量を超えて被ばくした時にのみ発症すると考えて ICRP は眼の放射線防護基準を勧告してきました。検出可能な水晶体混濁のしきい線量は、急性被ばくでは $0.5-2Gy$ 、慢性被ばくでは $5Gy$ と ICRP2007 年勧告では推定しています。視力障害を生ずる白内障のしきい線量はもっと高く、急性被ばくで $2-10Gy$ 、慢性被ばくで $8Gy$ 以上としています。

長期の観察に基づく疫学研究と動物実験で、しきい線量をもっと低いことを示唆する知見が得られ、今回の声明が出されました。リスクの高い職業人を防護する必要性を認識して線量限度を変更したと説明しています。職業被ばく限度だけを変更し、公衆被ばく限度は据え置くなど、やや中途半端な感じは否めませんが、2007 年勧告の一部を急いで改訂した事情は理解できません。

さらに、しきい線量はないとした方が合理的である、すなわち放射線白内障は確率的影響で

あるかもしれないとの考えもでています。この考えは、水晶体の検出可能な混濁は年月を経て視力障害にまで進行するとの仮定に基づいています。一個の水晶体上皮細胞の放射線による傷が、細胞分裂と分化の過程で、傷を受けた細胞の子孫細胞である一群の欠陥水晶体線維細胞になると説明できます。放射線白内障発症が確率的影響であることを支持する数々の疫学研究と動物実験を紹介しています。

一方、放射線白内障は組織反応(確定的影響)であることを示す研究も紹介した上で、将来人の疫学研究と動物実験の組み合わせによって、この重要な課題に対する回答が得られるであろうと予想しています。

ICRP の声明に基づき IAEA の基本安全基準(BSS)が変更され、欧州の放射線防護規制に EURATOM 加盟国が取り入れる方針です。我が国では放射線審議会に設置された検討部会が、「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」を 2018 年 2 月に公表しました。その内容は「NL だより」No.488, 489(2018)などで解説されています。職業別眼の水晶体線量調査が行われ、放射線診療現場、特に画像診断的介入治療(IVR)や核医学及び福島第一原子力発電所(F1)の廃炉作業、その他一部の職場での管理の重要性が認識されています。F1 作業員については既に自主的に管理が始められています。筆者は昨年 10 月に見学した折に額にガラスパッチを取り付けた試作顔面マスクを試着する機会を得ました。眼角部に小モニターを付けた防護眼鏡が輸入販売されていることも仄聞します。厚労省は「眼の水晶体の被ばく限度見直し等に関する検討会」を昨年 12 月に立ち上げています。

この流れに沿って、若し日本の法規制が変更されると、医療現場を含む一部の職場では個人モニターの変更が必要となります。

- 1) ICRP Publication 118 ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs—Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. Annals of the ICRP Volume 41 Nos. 1-2, 2012

フォーラム終了後、ガイドライン作成に関する各学会代表者による打ち合わせ会議を開催した。ガイドラインの方針と具体的なコンテンツについて、以下のように決定した。普遍的な内容のガイドラインとは別に、今後内容が経時的に変更される可能生がある技術マニュアルを別立てとした。

ガイドラインタイトル案:

放射線診療従事者における水晶体防護の最適化に係るガイドライン

ガイドライン目次

1. ガイドライン作成の背景
(水晶体線量計の必要性の有無の判定も紹介)
2. 放射線の安全利用(診療科共通)
 - 2-1 透視検査・治療
 - 2-2 エックス線診療での介助
3. 放射線の生体影響
 - 3-1 水晶体への放射線影響

3-2皮膚障害のしきい線量

3-3妊娠と放射線検査

4. その他

患者の皮膚障害に関するガイドラインと対応(小改訂)
歯科領域の放射線防護(災害対応を中心に)

ガイドラインに準拠した技術マニュアル目次

1. 水晶体の線量計測方法

(日本保物学会から発行準備中の内容に準拠する)

2. 放射線診療における線量測定法

3. 装置の QAQC

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等から年間約 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。今回の計測結果からは、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、特別な配慮をする必要性は低いと考えられた。

循環器 IVR 医師の 1 ヶ月の手技件数は最多の医師で 50 件であったが、最も被ばくが多い医師 1.2mSv よりも被ばくは少なく、当該医師の水晶体の線量計測結果は 0.8 mSv で推計 9.6 mSv/年であった。患者が全国から訪れる施設の医師で、いわゆるスーパードクターであるが、施設が十分な教育と防護眼鏡、防護衣の個人への至急、スタッフによる適切な防護板の準備等の十分な防護策が取られていた。一方、被ばく線量が年間 20mSv 以上となる恐れがあった手技では、いずれも患者からの散乱線を制御する防護板や防護眼鏡の適切な着用がなかった。消化器内科領域の計測に参加した施設は、放射線の安全管理者が過去に種々の対策を講じていた。しかしその内容を取り入れた者と実行していない者との間に大きな被ばく線量の差が生じていた。教育効果の実効性を下げた要因は担当医師のみで手技を行っていたことにあると考えられた。また、施設の安全管理担当者にも検討への参加を依頼したところ、記録事項の他に拡大透視を多用していることも明らかとなった。本報告書には改善後の実測結果までの収載はできないが、今後はチーム医療として全ての手技に取り組む改善がなされており、放射線安全管理の推進により被ばく線量は低下すると予測できる。

整形外科の開業医は水晶体の被ばく線量が 0.1mSv と少ない被ばく線量であった。しかし、防護板を覆うための滅菌されたビニールが市販されている等の情報が無く、防護板は未使用であった。対策を講じれば検出限界以下になると推察できる。

防護眼鏡の着用効果は、着用しない場合に20mSv を超える恐れがある場合、60%~80%との低減効果を認めた。整形外科領域では 80%の低減効果を認めたが、循環器 IVR 等 IVR は低減効果が整形外科よりも低かった。管球が多方向に移動する装置を用いるためと考えるが、高線量領域では一定の効果があり、眼鏡の着用が望ましいと考える。

救急の医師の被ばくは CT 撮影室内に検査終了まで入る場合を想定した。今回想定したような最も重篤な患者の CT 検査の頻度は低く、また病院により施行頻度も異なると思われる。し

かし、被ばくは1回の検査で約 2.0mSv と最も高線量であった。しかし、防護眼鏡の効果が高く、着用すれば 0.1mSv に低下するため、防護眼鏡の装着は必須と考える。

従事者への教育は、実際の手技に準じた具体策の提示が有効であった。本研究班で作成した資料をテンプレートとして各施設の装置に置き換えて利用出来る形態として関連するウェブサイトで提供する予定である。

研究班の調査を通して、放射線を利用する学協会に呼びかけた結果、15 の学協会から診療科横断的なガイドライン作成への賛同が得られ準備を始めることとなった。班研究の成果を展開する目的で開催した放射線の安全利用に関するフォーラムでも、放射線を利用した手技の歴史が浅い診療科も参加した診療科横断的なガイドラインの必要性が確認された。放射線看護学会からの参加もあり、医療スタッフ全員が理解しやすい内容にすることが必要と考える。

ガイドラインに参加予定の学会代表者との会議では、水晶体の線量管理に必要な基本的な防護の項目を洗い出し、全体像を決定した。今後は本研究班に参加した医学放射線学会と放射線技術学会の関係者が中心となり早急に叩き台を作成することが決まっている。診療科横断のガイドライン作成後はそれぞれの学会が主体となって、会員へ周知する。これにより、日本の放射線診療における安全文化の醸成が進むと期待する。また、ガイドライン作成の経験により、放射線規制に係る情報を確実に伝える体制が自ずと構築されると考えている。

4.5 結論

年間 20mSv を超える可能性がある手技は CT 透視下と消化器内科の手技に限定されていた。これらの手技では確実な防護用具の利用と防護眼鏡の着用が有効であった。この防護策を徹底するためには、チーム医療での取り組みと、対象者が日常診療で用いる装置を用いた教育が有効である。

日本国内に広く、水晶体の適切な防護を含む放射線の安全利用の文化を根付かせるために診療科横断的なガイドライン作成が必須と考えられた。

4.6 研究発表

平成 31年 2月 9日 第 321 回日本医学放射線学会関西地方会、放射線診療従事者の水晶体被曝管理に関する研究

平成 31年 2月 17日 医療放射線防護連絡協議会第 40 回放射線の安全利用フォーラム、パネル討論、水晶体被ばく線量引き下げに伴う個人被ばくの課題

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

水晶体線量限度を引下げする際、医療現場では線量限度を超過する可能性があることから、積極的な防護対策が必要となる^{1,2)}。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、原則として防護エプロンやメガネ等の防護具を着用するが、その場合防護具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り不均等被ばくとなる。不均等被ばく状況下では、体幹部のほかに最大となる線量を評価することが法律上義務付けられており、防護エプロンを着用する場合は、防護されていない頭部の線量評価をするために頸部モニタの装着が必要となる。しかし実際には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比較的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やむを得ず被ばくする可能性がある³⁻⁶⁾。平成 29 年度の成果及び先行研究において、特に CT 検査の介助においては、検査時間は短いものの線量率が非常に高いことから、1回の介助で 100 μ Sv を超える被ばくする可能性もあることが明らかとなった。

そのような背景をもとに、平成 29 年度から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を進め、平成 30 年度は、下記の 2 点を実施した。

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調査

平成 29 年度に作成した、「医療機関を対象とした医療施設における不均等、特に水晶体被ばく管理の実態調査」項目について web アンケートを実施した。

2. 透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価

平成 29 年度は一般撮影、CT 担当の医療従事者に水晶体線量計(Vision)を装着し、水晶体線量の実態調査および一般撮影での介助時のファントムを利用した水晶体線量測定を実施した。平成 30 年度は CT でのファントム測定の実施と、モンテカルロシミュレーションによる検査部位別 CT 検査室内の検査室内散乱線分布および線量の評価を実施した。さらに、平成 29 年度に実施した放射線防護眼鏡の方向別遮蔽率の結果と本年度の結果を組合せ、医療現場での適切な防護方法について検討した。また関連する文献の内容を調査し、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た。

5.2 研究方法

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

5.2.1.1 アンケート調査方法

アンケートは、Google form により web を介し、無記名自記式の質問紙調査とした。日本放射線技術学会ホームページ、メールマガジンでアンケートについて広報した。対象は、

病院・診療所に勤務する放射線管理者等で、各施設の代表者 1 名のみに回答いただくこととした。

5.2.1.2 アンケート調査内容

アンケート調査項目は 6 項 25 問である。アンケート内容を以下に示す。

1. 施設の概要

1-1 貴施設の開設者をお答えください。

- ・ 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

1-2 貴院の病床数をお答えください。

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

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)

- ・ 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

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。

- ・ 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

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。

- ・ 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

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。

	全員バッジ2 個 (頸部+ 胸/腹部)	所属部署に よってはパ ッジ2個	業務内容に よってはパ 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"/>

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)

- ・ 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

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。

	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"/>

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。

- ・ 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

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。

- ・ はい、いいえ

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)

- ・ 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

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)

- ・ 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

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。

	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"/>

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

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

4-3 貴施設ではスタッフが甲状腺用プロテクタを装着していますか。

- ・ はい、いいえ

4-4 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)

- ・ 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:

4-5 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

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。

- ・ はい、いいえ

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)

- ・ 掲示物、e-Learning、その他、なし

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

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。

- ・ はい、いいえ

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。

- ・ はい、いいえ

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。

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。

5.2.2 透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価

5.2.2.1 CT 検査時の介助者位置での水晶体線量測定

CT 検査時の介助者位置での水晶体線量をファントム実験により評価した。Vision 線量計を防護メガネ (HF-400) の前後に張り付けた頭部ファントムを、Fig.5.1 に示す a, b 及び c 点に配置した。CT 装置のアイソセンタから a, b 点までの距離は 70 cm、c 点までの距離は 100 cm である。

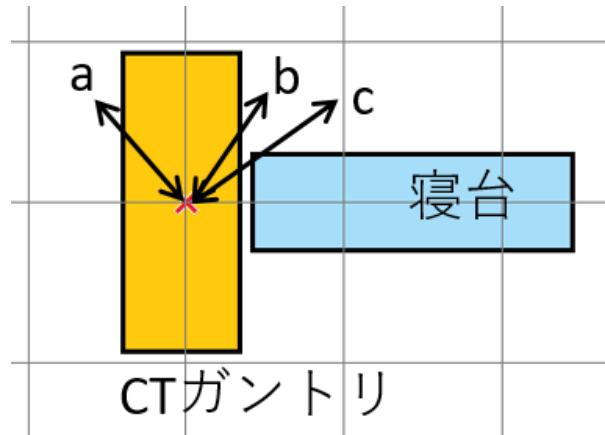


Fig.5.1 CT 検査での介助者 (ファントム) の線量測定位置 (天井から眺めた図)。a および b は CT ガントリの中心から 70cm の位置、c は 100 cm の位置

管電圧 120 kV、管電流 200 mA、1 回転当たりの照射時間 1 秒、pitch factor; 1 で人体ファントムに頭部、胸部、腹部 CT 撮影した際の従事者位置の水晶体線量を測定した。測定時の写真を Fig.5.2 に示す。スキャン長は、頭部; 120 mm、胸部; 305 mm、腹部; 305 mm であった。X 線 CT 装置は、Alexion Access (キヤノンメディカルシステムズ) を使用した。

介助者を想定した頭部ファントム、防護メガネの内外に Vision 線量計を装着



Fig.5.2 ファントムによる CT 検査時の水晶体線量評価

左：腹部 CT、患者から 100 cm 離れた位置での介助者の水晶体線量評価、右：頭部 CT、患者から 70 cm 離れた位置での介助者の水晶体線量評価

5.2.2.2 CT 検査時の室内の散乱線分布評価

CT 検査室内の散乱線分布をモンテカルロシミュレーションで詳細に評価した。コードには PHITS を使用した。CT 装置のガントリや寝台、ICRP110 ボクセルファントム (男性) をコンクリートに囲われた室内に設置した。Fig.5.3 に構築した CT 検査室を示す。

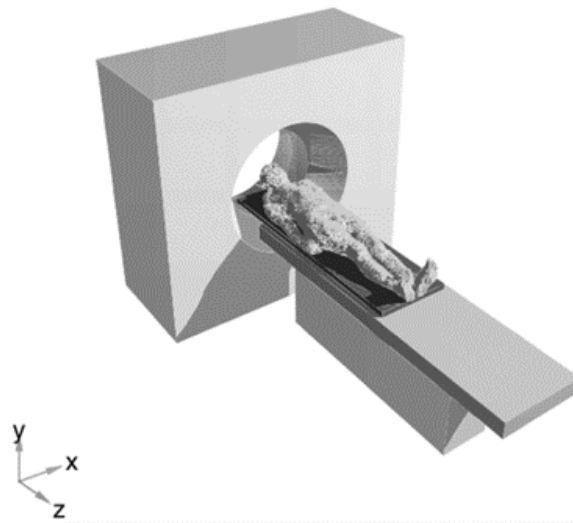


Fig.5.3 X線CT検査室の体系

線源として、X線管を固定した状態での120 kV X線エネルギースペクトルをCdTeスペクトロメータにより測定し、ボウタイフィルタを組み込んだX線管を再現した。36方向からアイソセンタに向かい照射する体系を構築した。

人体ファントムを頭部から骨盤部まで1cmずつ移動させながら、各スライスでの検査室内の3次元線量分布を計算した。また、CT検査中の介助者の立ち位置として考えられる3点、いずれも高さ95cmであり、ガントリの奥側の点で線源からの距離は1mにA点、ガントリの手前側の点で線源からの距離が1mにB点、ガントリの手前側の点で線源からの距離が0.5mにB'点を介助者の評価点として設定した(Fig.5.4)。各CT検査における線量を評価した。

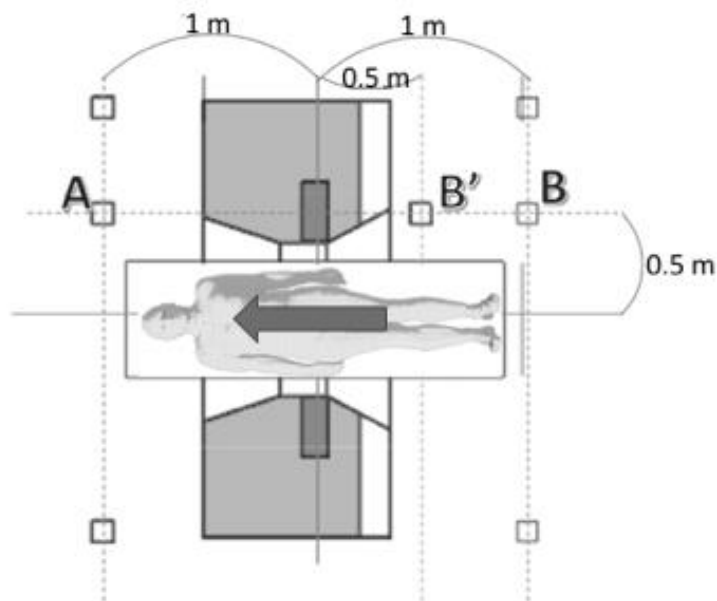


Fig.5.4 CTのガントリ周辺と評価点

5.2.2.3 防護眼鏡による適切な防護方法についての検討

本評価結果及び平成 29 年度の放射線防護眼鏡の方向別遮蔽率の結果を組合せ、医療現場での適切な防護方法について検討した。また関連する文献の内容を調査し、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た。

5.3 研究結果

5.3.1 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

アンケート回答数 153 件（有効回答数 151 件）で、施設概要として 75 施設は 400 床以上、121 施設は血管造影施行、うち 75 施設は血管撮影 1000 件/年以上、145 施設は TV 透視施行、うち 99 施設は TV 透視 1000 件/年以上であった。

不均等被ばく管理を行う基準の有無を Fig.5.5 に示す。内規やマニュアルを所持する施設、口頭や慣習で管理する施設が 7 割程度であるが、基準のない施設も 3 割あった。自由記載回答欄として、手引きが欲しい、制度が必要、測定方法を統一してほしい、との意見があった。

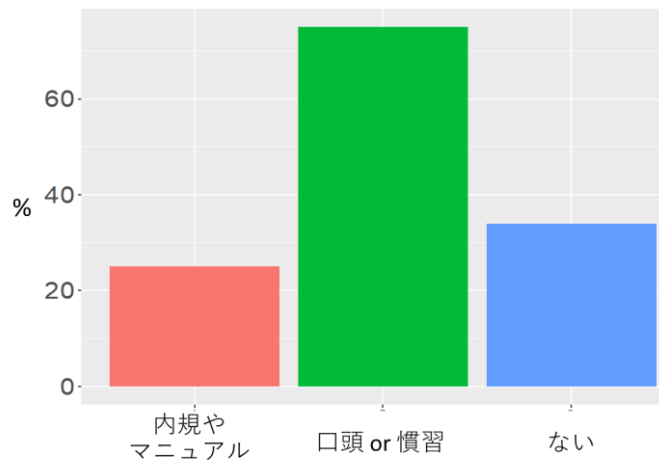


Fig.5.5 不均等被ばく管理を行う基準の有無

各職種の被ばく線量計測方法を Fig.5.6 に示す。TV 透視、血管撮影を施行していても「全員バッジ 1 つ」と回答した施設もあった。

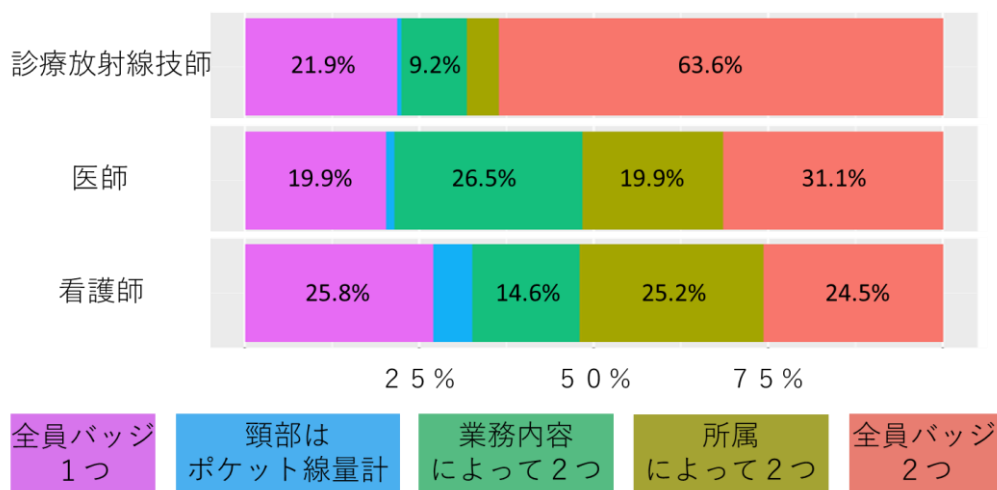


Fig.5.6 各職種の被ばく線量計測方法

防護メガネの所有率を Fig.5.7 に示す。TV 透視、血管撮影では多くの施設で防護メガネを所有しているが、その他の診療室では 2 割以下の所有率であった。

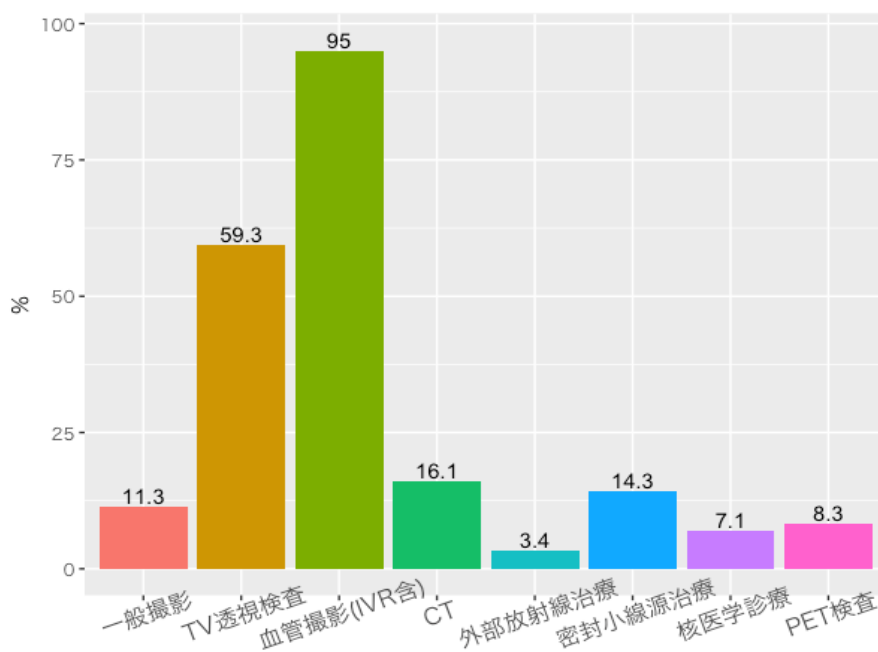


Fig.5.7 防護メガネの所有率

TV 透視室、血管撮影室における防護メガネ以外の防護具の有無を Fig.5.8 に示す。血管撮影室では、防護カーテンや防護板が充実している施設が多かったが、TV 透視室では所有率は低かった。

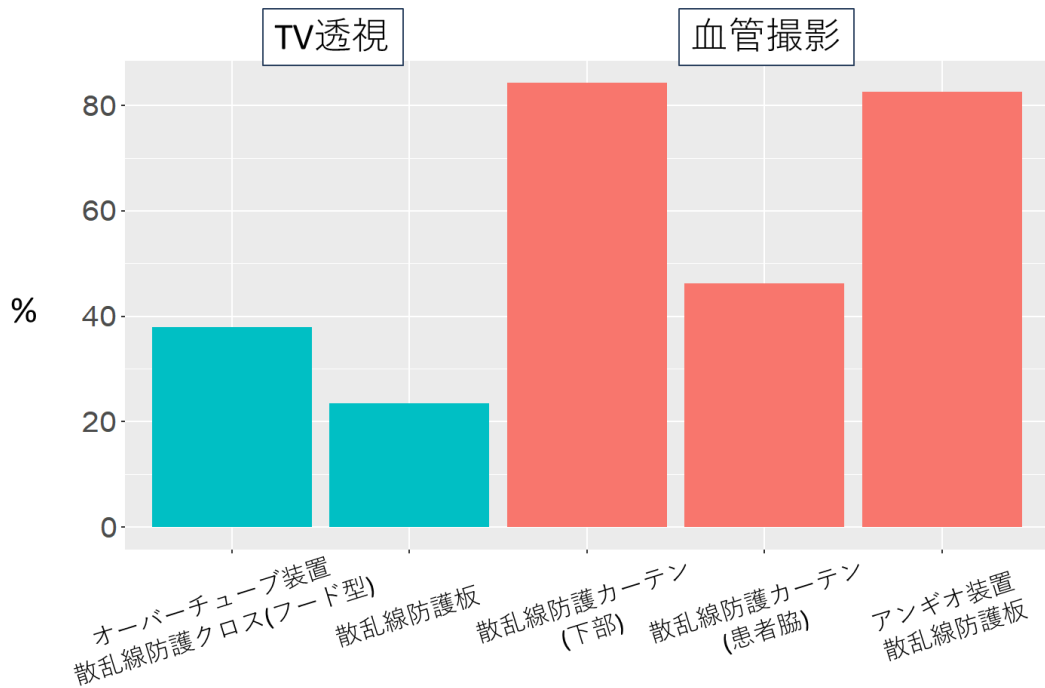


Fig.5.8 TV 透視室、血管撮影室における防護メガネ以外の防護具の有無

その他、各設問のアンケート結果は本章末に参考資料として示す。

5.3.2 透視以外の検査介助等における水晶体被ばく評価

5.3.2.1 CT 検査時の介助者位置での水晶体線量測定

Vision 線量計による CT 検査介助時の水晶体線量を Table 5.1 に示す。防護メガネの外側で患者ファントムに接近した状態では、0.5 mSv 近くになることが確認された。防護メガネによる遮蔽効果は約 50%だった。

Table 5.1 CT 検査時における水晶体位置の線量 [mSv]

検査部位 メガネ内外	頭部		胸部		腹部	
	内	外	内	外	内	外
a	0.13	0.26	0.13	0.36	0.06	0.15
介助者の位置 b	0.13	0.30	0.27	0.58	0.18	0.44
c	-	-	0.13	0.20	0.09	0.18

* 120 kV、200 mA、1 sec/rot の場合。スキャン長は、頭部；120 mm、胸部；305 mm、腹部；305 mm。介助者の位置は、fig.5.1 の点

5.3.2.2 CT 検査時の室内の散乱線分布評価

Fig.5.9 に天井側から見下ろしたアイソセンタを通る平面での頭部、胸部、腹部の各検査部位スキャン時の二次元空間線量分布を示す。Fig.5.10 検査室を横から見た二次元空間線量分布

を示す。さらに、Table 5.2 には各検査部位におけるスキャンでの3つの測定点における空間線量の積算値を示す。

線源からの距離が0.5 mのB'点は、1 mのB点と比べ、頭部撮影では約7.2倍、胸部撮影では約4.7倍、腹-骨盤部撮影では約4.0倍も線量が高かった。ガントリの奥であるA点とガントリの手前であるB点を比較すると、頭部撮影ではA点がB点より1.7倍高く、胸部撮影ではA点がB点より2.5倍高く、腹-骨盤部撮影ではB点がA点より1.6倍高かった。

Table 5.2 各測定点における検査部位別空間線量

検査部位	各測定位置における空間線量 [$\mu\text{Sv}/100 \text{ mAs} \cdot \text{scan}$]		
	A	B'	B
頭部	199	336	46.2
胸部	304	685	145
腹部	261	1660	418

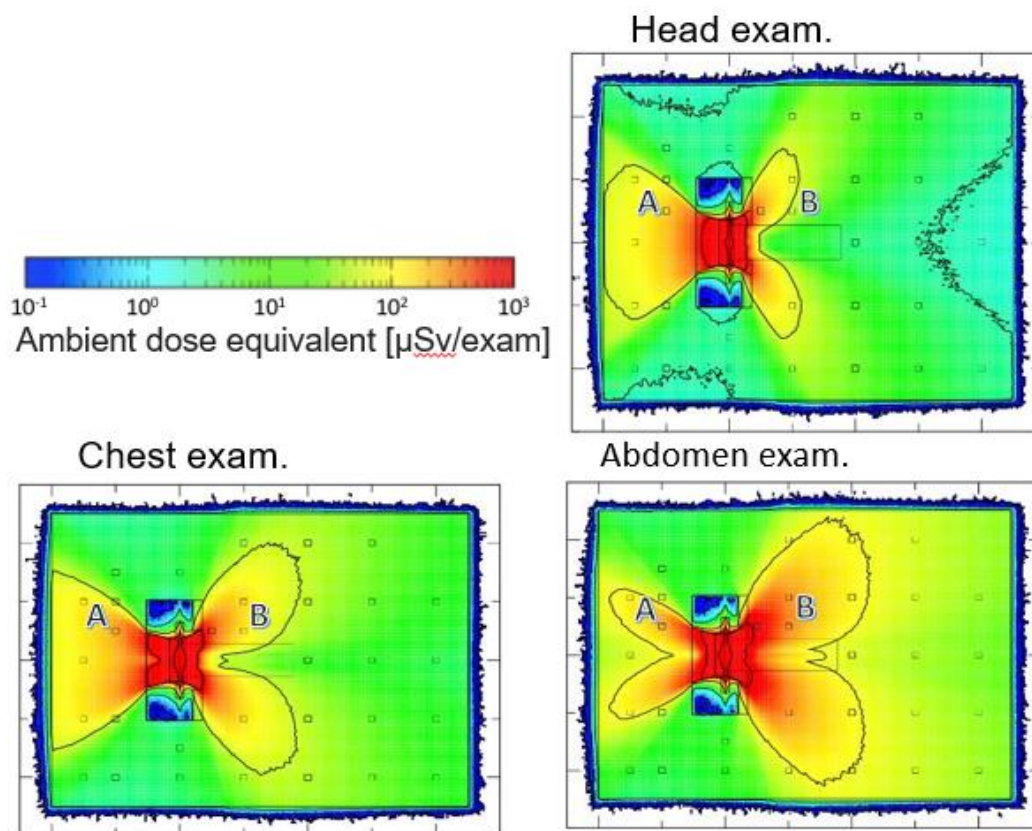


Fig.5.9 頭部、胸部、腹部の各検査部位検査時の二次元空間線量分布（天井から眺めた図）

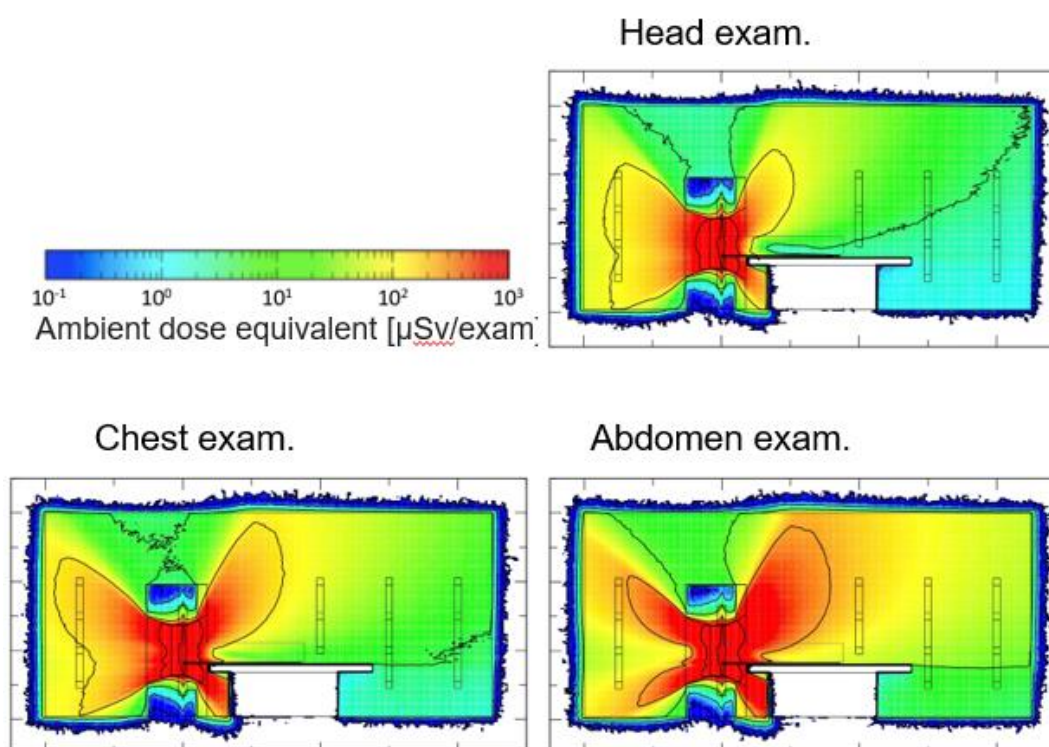


Fig.5.10 頭部、胸部、腹部の各検査部位検査時の二次元空間線量分布（横から眺めた図）

5.3.2.3 防護眼鏡による適切な防護方法についての検討

平成 29 年度の調査の結果から放射線防護眼鏡には多くの種類があることが分かった。測定結果を踏まえ明らかにした防護眼鏡の遮蔽能力に関わるパラメータを Table 5.3 に示す。

Table 5.3 防護眼鏡の遮蔽能力に関するパラメータ

パラメータ	例、備考
鉛当量	0.07、0.1、0.15、0.5、0.6、0.75 mmPb 等
レンズの位置	前面のみ、前面及び側面(別々のもの)、前面から側面が曲面となっているもの
レンズの形状	レンズの縦および横方向の長さ
レンズと水晶体の隙間	特に足側からみて、頬とレンズの隙間が大きいほど、足側からの散乱線の遮蔽能力が低下する(H29 報告)
フレームの種類	材質、ヘルメット型、裸眼・コンタクトレンズで直接使用するタイプと通常のメガネの上に掛けるオーバーグラスタイプ

鉛当量が高いほど遮蔽能力も高くなるが、X線の物質中の減弱は指数関数を示すことから、ある程度の厚さではほぼ頭打ちとなる。平成 29 年度からの遮蔽率の評価結果では、0.07 mmPb で 50%、0.15 mmPb で 70%、0.5 mmPb で 94%、0.75 mmPb で 95%と、0.5 mmPb

以上で遮蔽率に大きな差はみられなかった。レンズの位置により、遮蔽可能な散乱線の入射方向が異なる。フロントタイプでは正面しか遮蔽できず、サイドにもレンズがついているものは側面からの散乱線も遮蔽可能となる。レンズの形状が大きいほど、斜入する散乱線の遮蔽可能な角度が大きくなる。レンズと水晶体との距離、具体的にはレンズと頬との隙間が大きい場合、そこから入射する散乱線の防護効果が低減する。メガネのフレームには基本的に放射線遮へい能力がみられず、散乱線の入射角度によってはレンズとレンズの隙間のフレームから散乱線が水晶体に入射する。ヘルメット型の場合は広範囲に遮蔽されているが、足側の隙間が大きく、足側からの散乱線を遮蔽できない。オーバークラスタイプは、通常のものに比べ一回り大きくなる。通常メガネを間に挟む分、隙間がしやすい。

分担研究者らが関連する日本放射線技術学会と日本放射線看護学会では「放射線診療従事者の不均等被ばく、とくに水晶体の管理に関する実態調査」学術調査研究班を平成 29 年度に立ち上げ、医療現場における検査別、職種別の水晶体等価線量の実態調査を実施した。調査結果は学会発表され、厚生労働省の第 2 回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会でも参考資料として提示された⁸⁾。この報告によると、医師では循環器内科、消化器内科、消化器外科、放射線診断科、整形外科で、眼の水晶体の等価線量が 20 mSv/年を超える割合が高いこと、看護師では内視鏡、外来に携わる者の水晶体の等価線量 20 mSv/年を超える割合が高いこと、診療放射線技師では一般撮影、CT 検査担当の水晶体の当か線量が高いことが示された。医師の診療科別水晶体等価線量分布を Table 5.4 に、看護師の担当部署別水晶体等価線量分布を Table 5.5 に示す。ただしこれらのデータは頸部及び体幹部の個人線量計の測定結果であり、防護眼鏡による遮蔽は考慮していない。そのため、実際の水晶体線量は、防護メガネを掛けていればより低いことが考えられる。

Table 5.4 医師の診療科別水晶体等価線量分布

管理 水晶体 mSv/ 年	均等	不均等被ばく管理										
	整形外 科	循環器 内科	消化器 内科	消化器 外科	放射線 診断科	整形外 科	泌尿器 科	放射線 科	脳神 経外 科	呼吸 器内 科	臨床 研修	不明
0	62	63	73	32	63	78	49	54	57	87	142	9
≤2.5	6	71	85	27	37	38	40	20	39	69	158	7
≤5		28	37	3	7	6	8	5	14	31	26	1
≤10		49	28	5	16	4	2	14	9	15	9	5
≤20	1	58	45	1	6	10		9	9	6	3	4
≤30		30	11	3	6	4	2	3	2	3	2	1
≤50	1	18	11	2	2	1	2					1
≤70		1	6			2			1			
≤100			5									
総計	317	318	301	73	137	143	103	105	131	211	340	28
20 mSv 超過	1	49	33	5	8	7	4	3	3	3	2	2
	0.3%	15.4%	11.0%	6.8%	5.8%	4.9%	3.9%	2.9%	2.3%	1.4%	0.6%	7.1%

Table 5.4 看護師の担当部署別水晶体等価線量分布

水晶体 mSv/ 年	外来	救急 救命 センター	血管 撮影	歯科	手術 室	心臓 血管 外科	診療 看護師	内視 鏡	病棟	不妊 診療 科	放射 線科	放射 線治 療科	放射 線診 断科	麻酔 科	集計
0	178	1		1	255	2	5	1	57		2			3	505
≤2.5	137	2	11		52	2	13		27	1	8	1	1	2	257
≤5	48	2	2		2		2	1			10				67
≤10	31		4		1		1		3	1	16				57
≤20	25		7					5			9				46
≤30	4							3							7
≤50								2							2
≤70								1							1
≤100								1							1
総計	423	5	24	1	310	4	21	14	87	2	45	1	1	5	943

頸部バッジと水晶体等価線量の関係について、文献調査によると、防護メガネを用いない場合はやや頸部バッジのほうが高い値を出すのが優位な差は認められないとの報告がある^{9,10)}。しかし防護メガネを着用することにより鉛当量に応じて水晶体線量は低くなり、頸部バッジの値は過大評価となる。

5.4 考察

不均等被ばく管理に関するアンケート調査の結果から、施設により基準が統一されておらず、統一した不均等被ばく管理の基準が現場で求められていることが明らかになった。医療機関では多くのスタッフが放射線診療に関わり、また業務のローテーションや掛け持ちもあったり、救急患者で急な放射線作業が発生することもあることから、業務形態が複雑である。個人線量計を所持するにはコストもかかることから、どのようなスタッフを不均等被ばく管理とするか、また管理区域入室時のルールを明確にして管理する必要がある。放射線防護具について血管撮影室の防護具は普及しているが、それ以外の TV 透視や CT 検査室では、被ばくに対する認識が不足しており、防護策を徹底していく必要があることが明らかになった。

CT 検査での介助者の水晶体線量評価に関して、昨年度の調査では 1 介助当たりの水晶体線量実態調査結果として防護メガネの外側で 200 から 640 μSv を示した。今回のファントム実験結果では、防護メガネの外側での線量が 150 から 580 μSv であったことから、測定点や照射条件は異なるものの、いずれも 1 介助あたり 100 μSv を超える線量がか確認された。CT のアイソセンタから距離が離れるほど線量は低下した。検査部位により、同じ介助位置でも線量に差がみられ、特に腹部 CT ではガントリの反対側に回った際に被ばく量が低減した。

モンテカルロシミュレーションでもファントム測定と同様の傾向が確認された。さらに散乱線の広がりをも 3 次元的に確認でき、検査時においても被ばくを意識して、できる限り散乱線の少ない位置を認識し介助にあたることは被ばく低減に有効である。

放射線防護メガネの遮蔽能力に関するパラメータについて、鉛当量、レンズの大きさや形状、レンズと水晶体の隙間が関係する。鉛当量が大きくレンズの大きな防護メガネほど遮蔽効果は高いが、そのような防護メガネの重量が増す。医療行為に伴い防護メガネを使用する際、特に IVR や透視など長時間の作業では重たいメガネは耳等に負担がかかり、装着者に大きな負担となる。反対に作業時間の短い CT や一般撮影の介助では重さによる負担としては比較的小さくなる。これらのことから、防護メガネの遮蔽能力と、使用する場の散乱線の入射方向や状況を考慮して使用する防護メガネを選択することが望ましい。例として、IVR の場で医師が使う場合、主な散乱線源は患者で術者の頭の斜め下から散乱線が入射してくることから、正面だけでなく術者の頭の横や下からの散乱線にも遮蔽能力のある防護メガネが有効である。

医療分野での職種別、検査別の水晶体線量実態調査の結果から、業務内容により水晶体被ばくの実態が大きく異なることが明らかになった。特に診療放射線技師では IVR による被曝はほとんどなく、一般撮影や CT 検査での被ばくが多い。これは本分担研究で検討した内容と矛盾なく、研究内容の妥当性を裏付ける形になった。医療分野の中でも水晶体の被ばくの状況は検査の種類や職種により様々であり、状況に応じて先に述べた適切な防護メガネの選択が防護対策の一つとなる。

頸部バッジの値から水晶体等価線量への換算について、大きな課題として、防護メガネの遮蔽効果を一律に定めることが難しい点が挙げられる。不均等被ばく管理の放射線診療従事者でも防護メガネを必ず着用するとは限らない。さらに、鉛当量によって遮蔽効果が異なること、散乱線の入射方向により遮蔽効果は異なることから、頸部バッジの値から正確に水晶体線量に換算するには不確定な要素が多く、特に高線量を被ばくする可能性の高い者の確実な評価には水晶体近傍の実際の線量を測定することが望ましいと考えられる。

5.5 結論

適正に水晶体線量の管理を実施するにあたり、施設間で統一した不均等被ばく管理の基準が求められている。また、水晶体被ばくの低減に向け、血管撮影だけでなく、他のモダリティによる被ばくを防護する対策を進めていく必要がある。

CT 検査介助時の水晶体被ばくは、実態調査だけでなくファントム実験およびシミュレーションでも確認された。検査時間、介助時間は IVR や透視検査に比べ短い、1 回当たりの被ばくが高いことから防護メガネの積極的な着用が必要である。また診療時の 3 次元空間分布を把握しておくことで防護の観点から適切な介助位置を把握することが可能である。

防護メガネにもさまざまな種類があり性能が異なることから、現場の状況（業務に応じた散乱線の入射方向）に適したメガネの選定を検討する必要がある。医療現場において医師は循環器内科と消化器内科、看護師は外来や内視鏡室担当、診療放射線技師は一般撮影

やCT担当と、担当業務により水晶体の被ばく量も異なり、被ばくする可能性の高い場では防護メガネをはじめとした対策が求められる。

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).
- 8) 樺田尚樹: 眼の水晶体の等価線量分布 (医療分野) 第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料 5, (2019)
- 9) Y Haga, K Chida, Y Kaga, et. al, Occupational eye dose in interventional cardiology procedures, Scientific report 7:569 (2017)
- 10) 富田 博信: 医療分野における放射線防護と被ばく低減効果第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料 6, (2019)

参考資料

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の結果

1-1 施設の開設者

開設者	計
個人	2
公的 1(都道府県、市区町村)	12
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)	34
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)	30
国立大学法人	28
私的 1(医療法人)	33
私的 2(私立学校法人)	3
私的 3(公益法人、社会福祉法人、医療生協、会社、その他)	6
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)	1
総計	149

1-2 施設の病床数

病床数	計
0	5
1-19	1
101-200	18
20-100	6
201-300	17
301-400	28
401-500	24
501-600	13
601-700	22
701 以上	16
総計	150

1-3 施設ごとに行なっている放射線診療

放射線診療	計
X線診断(単純撮影)	150
CT	149
TV透視検査(内視鏡含む)	145
血管撮影(IVR含む)	121
手術室透視検査	125
核医学診療	99
PET検査	48
放射線治療	87
密封小線源治療	35
アイソトープ内用療法	63
その他	22

1-4 血管撮影件数の年間件数(平成28年度)

件数	計
50件以下	22
100件以下	7
250件以下	8
500件以下	14
750件以下	7
1000以下	10
1500件以下	21
2000件以下	17
2001件以上	27
総計	133

1-5 TV透視検査の年間件数(平成28年度)

件数	計
50件以下	11
100件以下	7
250件以下	11
500件以下	15
750件以下	6
1000以下	15
1500件以下	18
2000件以下	15
2001件以上	51
総計	149

2-1 誰に不均等被ばく管理を行うか定めた基準の有無

項目	計
ない	34
口頭もしくは慣習としてあるが、文書にはない	75
内規やマニュアルなど文書としてある	25
総計	134

2-2 被ばく管理対象者の計測方法

計測方法	診療放射線技師	医師	看護師	臨床検査技師	臨床工学士	その他
ポケット線量計で頸部バッジの代用	1	2	8	2	3	7
業務内容によってはバッジ2個	14	40	22	15	21	12
所属部署によってはバッジ2個	7	30	38	5	11	6
全員バッジ1個	33	30	39	36	47	40
全員バッジ2個（頸部+胸/腹部）	96	47	37	16	36	8
総計	151	149	144	74	118	73

2-3 不均等被ばく管理を行う際にポケット線量計を用いる理由

理由	計
経済的理由	21
管理的な理由	17
業務的に線量が低いと判断	39
その他	26

3-1 平成28年度の1年間で、水晶体の等価線量が20mSv/年を超えた医療職者の有無

項目	診療放射線技師	医師	看護師	臨床検査技師	臨床工学士	その他
いない	131	95	120	77	105	78
いる	8	38	7			
測定していない	8	10	11	25	16	24
把握していない	2	4	4	1	2	2
総計	149	147	142	103	123	104

3-2 水晶体被ばく線量の前歴把握方法

方法	計
放射線管理担当者による面接で口頭による確認	13
採用時の健康診断の問診	48
前の職場で発行した書面の提出	43
何もしていない	57
その他	11

3-3 貴施設で眼の周囲に装着する線量測定器(Vison や DOSIRIS、小型のガラス線量計、OSL線量計)の使用の有無

項目	計
いいえ	139
はい	8
総計	147

3-4 スタッフが正しくバッジを装着できていない場面

不正確な装着場面	計
胸/腹部用バッジと頸部用バッジを逆に装着している	41
胸/腹部用バッジをプロテクタの外側に装着する	50
頸部用バッジをプロテクタの内側に装着する	43
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	91

3-5 頭頸部に装着するモニタリングバッジを正しく装着できていないと思われる職種(複数回答可)

職種	計
診療放射線技師	14
医師	94
研修医	35
看護師	51
臨床検査技師	5
臨床工学士	11
その他	4

4-1 放射線防護メガネを所有している部門数(複数回答可)

放射線診療部門名	計
一般撮影	136
TV透視検査(内視鏡含む)	144
血管撮影(IVR含む)	129
CT	133
放射線治療	94
密封小線源治療	70
核医学診療	97
PET検査	70

4-2 使用中の防護メガネの中で鉛当量が最も高いもの

防護メガネの鉛当量	計
0.07mmPb	49
0.15mmPb	35
0.75mmPb	41
0.75mmPbより多い	2
総計	127

4-3 甲状腺用プロテクタを装着するか

項目	計
装着しない	30
装着する	121
総計	151

5-1 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るか

項目	計
いいえ	59
はい	89
総計	148

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を行っているか。(複数回答可)

項目	計
なし	113
e-Learning	2
テキスト配布	1
ポータルサイトの放射線科の中に資料を掲載し、周知もしている。	1
医療安全講習	1
院内講習会	1
掲示物	19
掲示物;検査室の壁にポスター	1
掲示物;入職時に GB 着用方法や防護具、被ばく低減方法についての説明書を配布している	1
掲示物による啓蒙を検討中	1
口頭にて	1
資料による配布は行っています	1
初めて透視、血管造影に入る職員への口頭説明	1
全職員対象の講演	1
担当医などに資料提示	1
被ばく線量が基準値（ローカル基準）を超えた者に直接指導	1
被ばく線量が多い場合口頭で注意する	1
放射線安全管理委員会時や、毎月の被ばく線量の高い方にはそのつど個別に注意喚起を行っている	1
放射線安全講習会等（年2回）	1

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があるか

項目	計
いいえ	114
はい	36
総計	150

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るか

項目	計
いいえ	107
はい	43
総計	150

6-3 医師・看護師から受けた相談内容（自由記載）

- ・ CT透視中の不均等被ばくがどの位の線量を被ばくしているのかを知りたい。
- ・ IVR 介助看護師から、看護師も防護眼鏡を使用したほうがよいのかどうか。ネックガードは必要なのか。
- ・ OPE 室で透視を夜使用するため気になる
- ・ TV と血管造影での線量の違いなど
- ・ TV 透視補助にて従事し、プロテクタのみで不安がありました。
- ・ X線透視検査の介助看護師より、頸部バッジの必要性について
- ・ ガラスバッジの装着個数が異なるのはなぜか
- ・ クイクセルバッジの装着法および意義について（看護師）
- ・ どうすれば水晶体被ばくが測定できますか？どのくらい被ばくしますか？
- ・ どのくらいの線量か
- ・ プロテクタの外に出ている部分の線量を知りたい
- ・ 胸部と頭部での測定意味の説明を求められた（医師、看護師）
- ・ 均等被ばくと不均等被ばくの違いについて
- ・ 甲状腺や胸部領域についてプロテクタでどこまで防護するべきか？等
- ・ 甲状腺内服治療をした看護師から・線量計を着用したまま仕事をして問題はないか・甲状腺内服治療による被ばく線量と仕事で被ばくした線量は区別できるのか"
- ・ 指の不均等被ばくの相談
- ・ 視力の低下に関する相談（加齢に起因すると考えられたが眼科の診察を説明）
- ・ 実線量を知りたいの要望があり測定した。
- ・ 若い医師から白内障が心配なので、防護メガネを備えてほしいとの要望あり
- ・ 水晶体の感受性は。閾値など。
- ・ 水晶体の被ばく線量について（数値）
- ・ 水晶体の被ばく線量の実際について、測定方法（大きさ、装着方法）測定料金
- ・ 正確な線量を知りたい
- ・ 線量計の正しい装着部位。防護メガネの遮蔽効果や必要性。防護メガネの使用中の視界の悪さについて。甲状腺被ばく防護について。
- ・ 装着部位についての確認と同室検査に立ち会った時の不均等被ばくについて
- ・ 装着方法、被ばく線量限度について
- ・ 装着方法と測定結果の正確性について
- ・ 測定器の装着部位やどれくらいの線量を被曝するかなどの質問を受けます
- ・ 当院での実測値

- ・ 内視鏡室看護師の不均衡被ばくについて
- ・ 脳神経外科 IVR 担当医師より、不均衡被ばくの申請方法について相談があった。
- ・ 白内障について 線量限度の質問あり
- ・ 被ばくは大丈夫か？
- ・ 被ばく限度と低減方法について
- ・ 被ばく線量が多い職員が、気にしていた。
- ・ 被ばく線量の数値とその影響
- ・ 被ばく量について
- ・ 不均衡被曝測定用のガラスバッジを支給してほしい
- ・ 放射線防護、許容値と放射線の影響について
- ・ 防護メガネの効果について
- ・ 立ち位置でどのくらい被ばくしているか。プロテクタの意義などです。

6. 標準的な水晶体の等価線量モニタリング手法と適切な管理、防護策に対する提案

主任研究者	横山 須美	学校法人 藤田学園 藤田医科大学
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
分担研究者	大野 和子	学校法人 津島学園 京都医療科学大学
分担研究者	藤淵 俊王	国立大学法人 九州大学

6.1 意見具申内容を補完する提案

「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申）」（平成 30 年 3 月 2 日原規放発第 18030211 号放射線審議会）¹）においては、「今後、正確に水晶体の等価線量を算定することが事業者等にとって必要となると見込まれることを踏まえれば、現行規定を見直し、個人の外部被ばく線量の測定方法として $H_p(3)$ を位置付けるとともに、 $H_p(3)$ で水晶体の等価線量を算定することを可能とするべきである」とされている。また、「頭頸部の測定では過小評価や過大評価となるおそれがある等の場合、眼の近傍での測定を追加してもよい」とされた。今後、これらの記述を踏まえて眼の水晶体の等価線量の算定方法が見直されることが見込まれる。

正確に水晶体の等価線量を算定するためには、算定方法として評価する深さを 3mm とするだけでなく、線量計の測定位置についても整理する必要がある。

現行法令では個人の外部被ばくに係る個人線量計の着用部位は、基本的に、

- － 体幹部^{*1}の基本部位である胸部又は腹部^{*2}
- － 不均等な被ばく^{*3}となる場合（線量が最大となる部位が胸部（腹部）以外の場合）には、外部被ばく線量が最大となるおそれのある部位

で行うこととされており（図 6-1）、その結果に基づいて眼の水晶体の等価線量を算定することとされている。このような考え方を基礎とすると、例えば防護眼鏡を装着しているなど眼の水晶体が受ける放射線量が胸部又は腹部よりも小さい場合に眼の水晶体の等価線量をかなり過大評価することとなる。

このような課題は従前から潜在的には存在していたが、これまでの眼の水晶体の等価線量限度が実効線量限度よりも数倍大きな値であり、実際上の課題として認識されてこなかった。今後は、上述のような現在の測定の考え方を厳密に適用し続けると、実際にはさほど被ばくしていないにもかかわらず、眼の水晶体の等価線量は限度に達してしまう（かつ、実効線量限度には達していない）場合が想定される。

これは、上記意見具申が「正確に水晶体の等価線量を算定」する、すなわち、過小あるいは過大評価をすることがないようにするため $H_p(3)$ を算定方法として認めるべきと提言した趣旨に反することとなる。特に、医療分野においては、防護眼鏡等を着用した場合には眼の水晶体の等価線量を他の部位の線量よりも大幅に低減できる可能性があるため、新たな等価線量限度を遵守する上で、防護眼鏡等の導入及びその装着による効果を反映した正確な等価線量の測定・算定が不可欠となる。

そこで、本研究では、既存のマニュアル、文献等の記載を確認した上で、眼の水晶体の等価線量を算定するための線量計の測定位置について、意見具申の趣旨を踏まえた考え方を提案する。

6.1.1 既存のマニュアル、文献等の記載

(1) 「被ばく線量の測定・評価マニュアル」²⁾

「被ばく線量の測定・評価マニュアル」は、様々な放射線管理の実際の現場で広く用いられているマニュアルであり、眼の水晶体の等価線量の測定について、以下の記載がある。

「頭部及び頸部を除く体幹部を覆う白衣型防護衣を着用した場合、防護衣の内部の胸部、防護衣の外側の襟部などにそれぞれ1個、合計2個の線量計を着用する。」

「防護衣の外側に着用した線量計は、防護衣に覆われていない頭部及び頸部、上腕部、眼の水晶体の線量当量評価に利用する。」

「防護眼鏡を使用している場合には、防護眼鏡によってしゃへいされた条件での眼の水晶体の等価線量を評価することが望ましいが、個人線量の測定サービスを外部業者に委託している場合や、H 3mm の値が線量限度を十分に下回っていることが明らかな場合には、しゃへいされていない条件下での H 70 μ m の値を個人の被ばくとして記録することも容認されるだろう。」

また、線量計の着用個数については、「作業携帯や被ばく状況によっては、必ずしも複数個の線量計によるモニタリングの実施を必要としなくとも良い場合がある。」「放射線防護の専門家の判断により決定すべきである」としている。

(2) IAEA 関連文書

① IAEA TECDOC 1731, Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye³⁾.

IAEA TECDOC 1731 は、IAEA が新たな水晶体等価線量限度の取り入れに当たって技術的な情報をまとめたものであり、職業被ばくに関する全般的な安全指針 (GSG; General Safety Guide) が取りまとまるまでの暫定的な文書として作成された。本文書の中では、

- －不均等な場で中性子、光子を扱う場合
- － β 線を扱う場合 (ただし、十分に遮へいされる場合を除く。)
- －防護眼鏡を装着している場合
- －体幹部に鉛エプロンなどの防護衣を装着しており、その下に線量計を装着すると眼の水晶体の外部被ばく線量を過小評価してしまう場合

には、眼の近傍での測定が必要 (“ Monitoring near the eyes is necessary.”) としている。また、光子を扱う場合であって防護眼鏡を装着している場合には、直接測定せずに防護眼鏡を考慮した適切な補正係数を適用することも認められることとしている (“ Otherwise, appropriate correction factors to take the shielding into account should be applied.”)。

② IAEA General Safety Guide No.GSG-7, Occupational Radiation Protection⁴⁾.

IAEA GSG-7 は、全般的な安全要件 (GSR; General Safety Regulation) の下位文書に当たり、加盟国が制度運用に当たって指針とすべき内容が記載されている。本文書では、①の記載内容以外に、(実効線量測定用の線量計とは) 別の眼の水晶体用の線量計の必要性及び測定位置は、放射線の種類、エネルギー、方向及び均等性並びに遮蔽の有無によるとしている (“ The need for a separate eye lens dosimeter and its positioning on the body depend on the type,

energy, direction and homogeneity of the radiation field, as well as on the use of shielding.”)。

また、光子を扱う場合に防護眼鏡を装着する場合には眼鏡の後ろに線量計を装着することが望ましく、これが現実的でない場合には、線量計を眼の上、または横に着用し、眼鏡の減衰を模擬したフィルタで覆う必要があるとしている (“ If eye shielding in the form of lead glasses is used, the dosimeter should preferably be located behind the eye shielding; where this is not practicable, the dosimeter should be worn above, or next to, the eyes and possibly covered by a filter that mimics the attenuation provided by the lead glasses.”)

(3) ISO 15382, Radiological protection Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities⁵⁾.

国際標準化機構 (ISO) は、水晶体のモニタリング方法を ISO 15382⁸⁾にまとめている。水晶体の等価線量の測定のための線量計の着用位置については、できる限り眼の近くに、できれば皮膚に密着させ、線源の方向に向けて着用しなければならないとしている。

(The dosemeter for the lens of the eye shall be worn as close as possible to the eye, if possible in contact with the skin, and facing towards the radiation source.)

また、防護眼鏡やマスク使用した場合、線量計はそれらの後ろ (内側) に着用したほうが良い。しかし、これは、実用的ではない場合もあり、防護眼鏡の外側や脇につけることもある。この場合は、補正係数を適用する必要があるとしている。(When using protective lead glasses or face masks, the dosemeter shall be worn preferably behind them. In this case, some correction factors should be applied. This is often not very practical, and a dosemeter on the outside or next to the lead glasses can be chosen.)

防護眼鏡によっては、斜めから入射した放射線に対して適切な防護ができない可能性についても言及している。(It shall be realized that some types of lead glasses do not offer adequate protection for oblique angles)

実際には、眼の上、額、顔の側面、眼の間などさまざまな場所に着用される場合があるとしている。(In practical situations, eye lens doseimeters are often placed in various positions: above the eyes, at the forehead, at the side of the head, between the eyes.)

(4) IRPA guidance on implementation of eye dose monitoring and eye protection of workers⁶⁾

国際放射線防護学会 (IRPA) では、2013 年より水晶体の等価線量限度の適用に関するタスクグループを設置し、欧州を中心に各国の水晶体線量限度の各国規制への取入れ状況、モニタリングのための線量計や方法の準備状況、課題等についてアンケートを過去 2 回実施している。わが国の加盟学会も、過去 2 回のアンケート調査に参加した。現在、加盟国に向けて 3 回目のアンケートへの回答を募集している。

IRPA は、合わせて 2017 年にこのタスクグループにより取りまとめられた水晶体の等価線量モニタリング及び職業人の眼の防護に関するガイダンスを発刊している。

IRPA は、ガイダンスの中で、水晶体の等価線量の最も正確な測定方法は、眼のできるだけ近くに着用した線量計で個人線量の 3mm 線量当量を測定することであるとしている。

(The most accurate method for monitoring the equivalent dose to the lens of the eye is to measure the personal dose equivalent Hp(3) with a dosimeter worn as close as practicable to the eye.)

また、防護具等で覆われていない襟や胸部 (頸部) に着用した 1 つの線量計を使用して

水晶体の線量を測定する場合には、眼の近くで測定された 3mm 線量当量と襟や胸部に着用した値との間の換算係数を決定するために、現場での調査を推奨するとしている。(When using a single unprotected dosimeter worn at the collar or thorax, especially for measured annual doses above 6 mSv, it is recommended that a work-place study is undertaken to determine a conversion factor between this measurement and $H_p(3)$ measured close to the eye.)

(5) SFRP Technical Information Sheets; Eye lens: Regulatory limits, measurement, dosimetry and medical surveillance⁷⁾

フランス放射線防護学会は、水晶体の規制限度、測定、線量評価及び健康診断について、水晶体被ばくの現状と線量測定方法、防護具、線量評価の考え方について取りまとめたシートを提供している。

水晶体専用の個人線量計はどこに着用されるべきかについて、水晶体の等価線量の過小評価を避けるために、最も被ばくする眼のできるかぎり近くに着用するか、両眼に対して二重測定するかをして、できる限り標的臓器の近くに装着すべきであるとしている。(A personal dosimeter should be worn as close as possible to the target organ, either as close as possible to the most exposed lens, or with dual measurement for both lenses, to avoid underestimated exposure readings.)

6.1.2 意見具申の趣旨を踏まえた眼の水晶体の等価線量を算定するための線量計の測定位置の考え方の提案

本研究では、以下のとおり、個人線量計の装着位置に関する考え方を提案する。

(1) 眼の水晶体の等価線量を算定するための測定を行うときは、現行法令の

- － 体幹部^{*1}の基本部位である胸部又は腹部^{*2}
- － 不均等な被ばく^{*3}となる場合（線量が最大となる部位が胸部（腹部）以外の場合）には、外部被ばく線量が最大となるおそれのある部位

以外の部位に線量計を装着することも選択肢として認められるべきである。ただし、意見具申が対応を求めている「正確に水晶体の等価線量を算定することが事業者等にとって必要となると見込まれる」場合とは、等価線量限度を超えるおそれがあるなどの場合に限定されると考えられ、そうした場合以外に追加的な線量計の装着を義務付けると事業者にとって過剰な負担となることから、このような装着は追加的な選択肢として提示することが望ましい。図 6-2 に水晶体等価線量算定のための追加測定位置を示す。

(2) (1)のときの追加的な線量計の装着部位は、「眼の近傍」とすべきである。眼の近傍とは、頭頸部のうち、眼の水晶体が受ける放射線量を直接測定するために適切な位置のことをいい、両眼が受ける線量が最も高い位置から当該線量と有意な線量（率）勾配がないと判断できる位置までの範囲をいう。防護眼鏡等を着用している場合にあっては、防護眼鏡等の遮蔽効果を考慮して判断する。また、線量計の着用に当たっては、両眼からの距離が

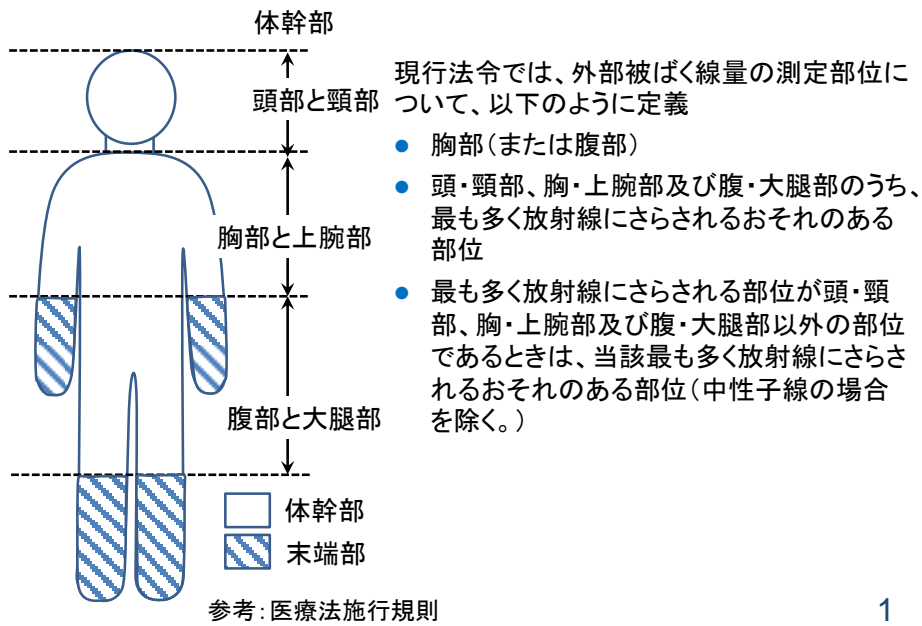
近いほど望ましい。

なお、意見具申において「防護策を講ずるだけでなく、労働衛生管理の観点で踏まえて ALARA の原則に従い、被ばく線量低減のための取組を実施することが重要」と述べられているように、実際にどの位置に個人線量計を装着するのが適切なのかは、事業者自らが最適化の観点から取組を進める中で、眼の近傍での線量計着用の必要性の有無も含めて、放射線の種類、線源の位置、作業環境等を十分に考慮した上で、予め検討しておくことが望ましい。

また、当該検討に当たっては、本研究で示した方法やこれまでの様々な研究が参考になるだろう。

- *1 医療法施行規則第 30 条 18 において、「人体部位のうち、頭部、頸部、胸部、上腕部、腹部及び大たい部をいう」とされている。
- *2 女子（妊娠不能と診断された者及び妊娠の意思のない旨を許可届出使用者又は許可廃棄業者に書面で申し出た者を除く。ただし、合理的な理由があるときは、この限りでない。）にあつては腹部。
- *3 外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針（放射線審議会基本部会平成 11 年 4 月）3.不均等被ばくの評価については、「胸部・上腕部（女子では腹部・大腿部）以外の部位（頭頸部、腹部・大腿部または胸部・上腕部）の線量当量が最大となるおそれのある場合（以下、「不均等被ばくの場合」という。）といった記載がある。
- *4 「被ばく線量の測定・評価マニュアル」（原子力安全技術センター2000）に、手、前腕部及び足とくるぶし等との記載がある。

現行規制の実効線量と等価線量の測定位置



1

図 6-1 現行規制の実効線量と水晶体等価線量の測定位置

水晶体等価線量算定のための追加測定位置

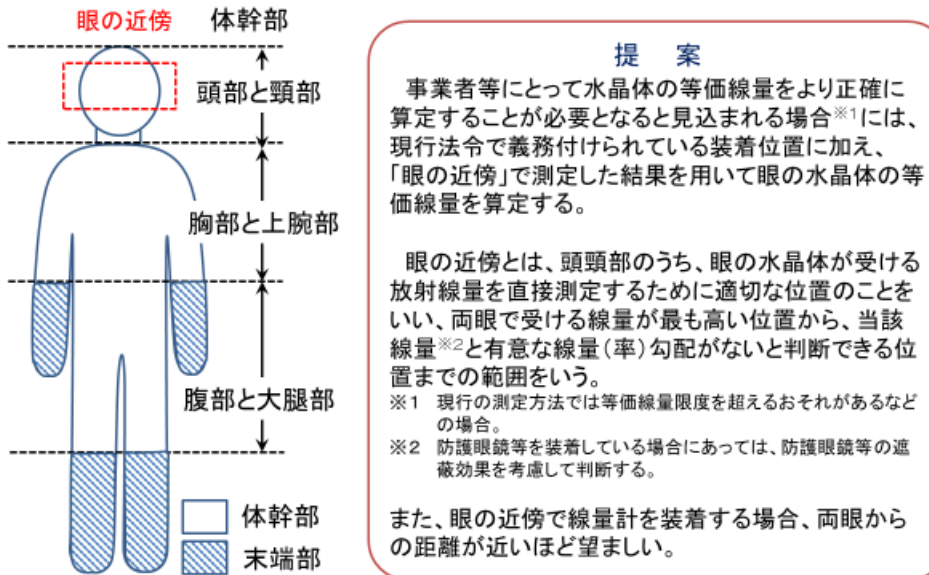


図 6-2 水晶体等価線量算定のための追加測定位置

6.2 各分野における水晶体の線量管理・防護に関する提案

6.2.1 水晶体線量モニタリング・測定のお考え

現在行われている個人モニタリングは、胸腹部に着用する個人線量計(D₁)を基軸に、部分被ばくを受ける可能性のある場合に必要に応じて別の線量計—体幹部不均等被ばく管理用個人線量計(D₂)及び末端部用個人線量計(D₃)—を追加することによって行われる。このうち、D₁とD₂は、基本的に同一スペックの汎用線量計であり、現在はH_p(10)及びH_p(0.07)を測定しているが、いずれもH_p(3)の測定にも対応するはずである。線量計D₃は、H_p(0.07)だけを測定する特定部位に着けるタイプのもの(例えば指リング形)が普及している。これらは、個人線量計測定サービス会社から、決められた組み合わせで供給されている:全身均等被ばくの場合はD₁、体幹部が不均等被ばくを受ける場合はD₁+D₂、さらに末端部が被ばくを受ける場合は、D₁+D₃あるいはD₁+D₂+D₃。

水晶体等価線量は、均等被ばくの場合はD₁、体幹部が不均等被ばくを受ける場合はD₂(ここでは頭頸部に着用されていることを前提)の指示値から算定される。これらD₁~D₃に、水晶体モニタリングの目的で近年開発されたH_p(3)を測定する小型線量計(D₄)(例えばDOSIRISやVision)が加わることになるわけであるが、これらは一体どのような組み合わせで今後運用されるのか。水晶体モニタリングに着目すれば、考えられる組み合わせは、D₁+D₄又はD₁+D₂+D₄の二種類しかない。前者は、一見してシンプルに見えるが、その組み合わせで体幹部不均等被ばくでの実効線量を算定するような測定サービスは供給されない*1と考えられるので、その用途は、限られる*2。従って、多くの場合、D₄の供給は後者のD₁+D₂+D₄の組み合わせということになる。つまり、線量計使用者は、水晶体モニタリングのために、従来からのD₁+D₂に加えて新たにD₁+D₂+D₄という2つの選択肢を持つことになる。このD₄を追加する必要があるかどうかの選択は、D₂による水晶体等価線量の算定で十分な防護あるいは管理が可能かどうかだけで決まるであろう。例えば、線量限度に近い被ばくを受ける可能性があるためより正確な測定が望ましい場合は、D₂ではなくD₄を使う積極的理由と言えるし、防護メガネの内側にD₄を取り付けることで防護メガネの遮へい効果を適切に線量評価に反映させたい場合も同様である*3。この選択基準は、作業や被ばく状況等に依存して変わるが、線量計使用者がそれを判断するにあたって何らかの目安は必要であるため、以下に論考する。

これまでに様々な国際団体等によって水晶体モニタリングの実施に関する指針等が提示されている。IAEA-TECDOC-1731³⁾では、作業現場での予測に基づき、水晶体等価線量が年5 mSv(ドラフトでは年6 mSv)のオーダーの線量を超えそうであれば、定期的な個人モニタリングをするべきであるとする。ISO 15382:2015⁵⁾では、推奨されるモニタリングレベルとして、(複数年にわたる場合)年6 mSvを超える合理的な可能性があれば、水晶体のためのモニタリングをすべきであるとする。また、IRPAガイドライン⁶⁾では、年1~6 mSvの場合、襟又はヘッドバンド位置で定期的なモニタリングの実施を推奨し、年6 mSv超えの場合、それを要求するとしている。年5 mSv又は6 mSv、これらは年限度20 mSvとする場合の約30%に相当する値であるが、この程度の線量レベルであれば、我が国では、従来からのD₁+D₂による測定で過不足なく水晶体被ばく管理ができていた事業者は少なくないと思われる。IAEAとISOの勧告は、上記の線量計分類で言うとD₄の使用を想定したものであるが、こうした国内状況を考えた場合、年6 mSvでD₄を積極的に使用する理由は見当たらない。IRPAの勧告は、線量計はD₂又はD₄どちらとも読める書き方になっており、また線量レベルに応じて測定の要求の程度にメリハリをつけるなどより現実的なものに見える。ただし、年6 mSvというモニタリング要求の線量レベルは、上述したようにD₄を要求するには低すぎるし、一方、

D₂ の要求には逆に高すぎる。なぜなら、冒頭でも述べたように、体幹部が不均等被ばくを受ける場合に使用する線量計 D₂ は、胸腹部に着ける線量計 D₁ と同じスペックを持ち 0.1 mSv/月 (1 ヶ月交換であれば年間約 1 mSv に相当) まで測定可能で、仮に 0.5 mSv/月 (1 ヶ月交換であれば年間 6 mSv) もの被ばくがあれば、水晶体モニタリングのためというよりも実効線量を算定するために通常使用される。このことは、結果的にはあるが、我が国では、D₁+D₂ の組み合わせによって、年 6 mSv よりもはるかに低い線量レベルで水晶体モニタリングが既になされてきたことを意味する。

実態という意味では上記のとおりであるが、では実際問題として、どれくらいの線量レベルから水晶体モニタリングを行うべきなのか。これについては、我が国には明確に文書化したものはない。ただし、実効線量については、ICRP Publ. 60⁸⁾ や Publ. 75⁸⁾ に基づき、年 1 mSv を超えそうな者をモニタリングすることは広く認識されてきたし、その Publ. 75 は、等価線量について、その限度の約 10% に基づき記録レベル (個人線量計が記録すべき最小線量) を設定することを勧告する。この考えに従うなら、水晶体等価線量限度 20 mSv/年 の場合、2 mSv/年 の水晶体等価線量を記録できるだけの水晶体モニタリングの手立てを準備することになる。この 2 mSv/年 は、既存の線量計で対応可能で、かつ従来 of 慣行とも矛盾しない現実的な数値に見える。

次に、水晶体モニタリング専用の線量計である D₄ は、どれくらいの高線量レベルから追加使用されるべきか。この検討にあたっては、Bordy の提案¹⁰⁾ が参考になる。Bordy は、水晶体線量 H_p(3) を、眼の傍に取り付けた水晶体モニタリング用線量計によって直接的に測定する方法と、別の場所に取り付けた線量計から換算係数 R を用いて間接的に評価する方法に分け、それらを使い分けるための考え方を提示した (図 6-3)。ここで、図の横軸でもある換算係数 R (不確かさは U(R)) は、眼の位置での評価すべき H_p(3) と眼の近傍以外の位置に取り付けた個人線量計の指示値の比に相当する。図の縦軸は、横軸 R を乗じたとき、水晶体等価線量限度にちょうど相当する値を指し示す個人線量計 H_p(10) である。このとき、個人線量計の容認された不確かさ (高線量域でファクター 1.5、低線量域でファクター 2) が考慮されている点がユニークである。例えば、線量限度 20 mSv に対応するライン (実線で記されている) に着目すると、横軸 R が 1 に対応する縦軸 H_p(10)_{max} は約 13 mSv になる。これは、不確かさ (ここではファクター 1.5) を見込んだとしても、間接評価で使用する個人線量計の指示値 H_p(10) が 13 mSv 以下であれば、H_p(10) × (R+U(R)) が限度 20 mSv を超過しないことを意味する。Bordy は、このグラフを用いて、図中の実線 (限度 20 mSv の場合) 又は点線 (限度 50 mSv の場合) の上側の領域に該当する状況下であれば、直接測定を強く推奨し、逆に下側であれば、間接評価も容認できるとした。

ここで議論の主題である、線量計 D₄ を追加すべき線量レベルはどれくらいに立ち返るが、主に頸部の襟付近に取り付ける D₂ の場合、眼の H_p(3) への換算係数 R は 1 に近い数字になると考えられる。その場合、図から、約 13 mSv までであれば、その指示値の持つ不確かさを考慮したとしても水晶体限度 20 mSv を超えることにはならず、D₂ による間接評価は容認されると考えることができる。Bordy の提案は、間接評価を正当化するにあたってロジカルな説明を試みたものであるが、やや複雑に過ぎるきらいがある。そこで、D₁+D₂ から D₁+D₂+D₄ の切り替えは、ここで示された約 13 mSv を含む 10~15 mSv の範囲を「線量限度に近い高線量」と定義し、その範囲内で事業者が任意に定めた線量で行うとするのが現実的であると考えられる。ただし、これらはあくまでも一般化した議論であり、高線量域であっても D₂ による H_p(3) の測定に特段の技術的問題がなければ、D₁+D₂ の継続使用も可能であろう。

以上の論考を、線量計の選択の例示とともに以下に整理する。

線量計使用者は、従事者指定に先立って、まず自身の実効線量が 1 mSv/年あるいは水晶体等価線量が 2 mSv/年を超える可能性があるかどうかを考える。ともに超えそうになれば従事者指定の必要はない。どちらか一方が超える場合は、従事者となり、体幹部が均等被ばくを受けるか不均等被ばくを受けるかで、線量計 D_1 又は線量計 D_1+D_2 を選択する(末端部用の D_3 はここでは議論しない)。また、水晶体等価線量が 10~15 mSv になる可能性がある場合、 D_1+D_2 を使い続けるかそれとも D_4 を追加使用するかを検討する。防護メガネ等の内側に線量計を取り付け、その遮へい効果をそのまま線量評価に反映させたい場合等は D_4 を使う十分な理由になるだろう。

なお、現時点でさらなる考察が今後必要な事項として、均等被ばくと不均等被ばくの定義をどうするかがある。ここでの論考の中で出てきた数値を使うことで二つの案が提示できる。第 1 は、実効線量の記録レベル(1 mSv/年)と水晶体等価線量の記録レベル(2 mSv/年)の比に基づき、均等/不均等の定義を 2 倍とする案である。第 2 は、個人線量計による不確かさの水準として広く使用されているファクター 1.5 をそのまま均等/不均等の定義とする案である。いずれの案が適切であるかは、今後よく検討していく必要がある。

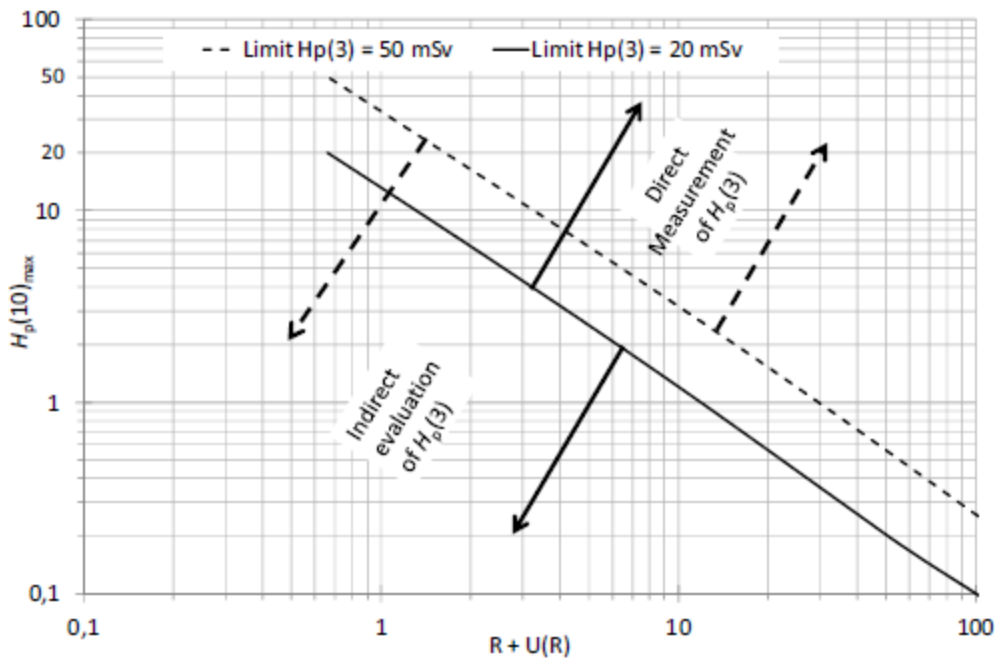


図 6-3 水晶体 $H_p(3)$ の直接測定法と間接評価法の使分けの考え方⁹⁾

- *1 線量計 D_4 が $H_p(10)$ ではなく $H_p(3)$ を測定することも理由の一つであるが、それ以上に、 D_4 が、防護メガネの内側等で使用される可能性があること、すなわち頭頸部全体の被ばく線量を代表しない可能性があるため、 D_1+D_4 の組み合わせでは実効線量の算定ができない。
- *2 Bordy の提案によれば、仮に均等被ばく ($R=1$) であっても、限度に近い高線量域では胴体に取り付けた線量計(この場合 D_1)からの間接評価よりも、目の傍に取り付けた線量計 (D_4) による直接測定の方が好ましいとされる。したがって、 D_1+D_4 の組み合わせも考えられなくはない。ただし、そうしたモニタリングが要求されるのは、再処理施設のセル内での作業や何らかの事故対応のような特殊な状況であり、その場合、 $H_p(3)$ しか測定できない線量計よりも $H_p(10)$ や $H_p(0.07)$ を測定できる(つまり β 線と γ 線を分離評価できる)汎用線量計の使用が好ましいの

で、 D_1+D_2 の組み合わせが第一の選択肢になるに違いない。

- *3 通常の $D_1+D_2+D_4$ の測定サービスでは、 D_2 から算定される $H_p(3)$ と D_4 から算定される $H_p(3)$ に有意差が生じる場合、後者の値が水晶体等価線量記録として優先される。

6.2.2 原子力発電所

(1) 頭部 $H_p(3)$ が胸部 $H_p(10)$ よりもわずかに高い場合の考え方

辻村らが実施した東電 1F におけるファントム実験により、頭部 $H_p(3)$ が胸部 $H_p(10)$ よりもわずかに高くなる傾向がみられた。この $H_p(3)/H_p(10)$ 比は 1.2~1.3 倍であった。また、主任研究者らが実施した原子力発電所の従事者に対する個人線量計着用試験でも、高線量をとまう可能性のある作業として抽出した原子力発電所の作業(東電 1F を含む)や非破壊検査の作業場においても、場の線量が著しく頭部位置において高くなるような場合を除き、頭部 $H_p(3)/$ 胸部 $H_p(10)$ の比は 1.5 を超えないものであった。この著しくというのは、本研究から 2 倍から 5 倍程度であると考えられる。この程度の頭部 $H_p(3)$ と胸腹部 $H_p(10)$ に違いが生じる線量(率)勾配のある放射線場でどのような個人被ばく管理が一般に行われるべきかを以下に例を挙げて考えてみる。

例えば、ファントム実験を行うために、東電 1F で 2 日間滞在した場合、作業現場の線量率と滞在時間から、胸腹部の $H_p(10)$ で 1 mSv の被ばくを受けたとする。

- ・当然のことながら、胸腹部に個人線量計を着用する。
- ・作業内容と予想される積算線量から、遮へいベスト等は着用しない。
- ・四肢等末端部が特別に高い被ばくを受ける要因がないとする。この場合は、末端部線量計の着用は不要である。
- ・同様に、1.2~1.3 倍程度の線量率高さ勾配は実効線量を評価する上では、体幹部が不均等被ばくを受ける条件には当てはまらない。その理由は別途以下に説明する。
体幹部が不均等被ばくとみなされないため、頭頸部への線量計の着用も不要と判断する。

ただし、作業期間が 20 日以上延長されたとする。この場合、胸腹部での積算 $H_p(10)$ が年 20 mSv の実効線量限度及び水晶体等価線量の新しい限度(適用以降)に近づくおそれがあり、線量限度を超えることがないように管理するために頭頸部に線量計を取り付ける必要性を検討することとなる。

上記において、1.2~1.3 倍程度の線量率の高さ勾配を不均等被ばくと考える必要がないとした理由は以下のとおりである。

たとえば、これを体幹部不均等被ばくとして線量計を頭部と胸部に着用したとする。胸部 $H_p(10)$ 1 mSv とすると、頭部で $H_p(10)$ 1.3 mSv の被ばくを受けることになる。この場合、実効線量は $1.03 (= 1.0 \times 0.89 + 1.3 \times 0.11)$ mSv と算定される。この値は、胸部に線量計を着用した場合の $H_p(10)$ と僅か 3% の違いに過ぎない。ベスト内に個人線量計を 1 個だけ着用する管理と事実上違いがない。したがって、実効線量に関しては、胸腹部に着用する個人線量計だけで十分な管理が可能となる。

上記において頭頸部に線量計を追加するとすれば、それは「体幹部が不均等な被ばくを受けるから」ではなく、上記のとおり、「線量限度に近づく（高線量被ばくになる）から」を、ある特定の作業だけに当てはまる理由としてではなく、すべての放射線作業に適用可能な一般理由として考えるべきである。なお、この論考にあたって、均等被ばく・不均等被ばくの定義の議論が必要であるが、これについては 6.2.1 に述べた。

(2) 作業場の線量(率)分布が著しく異なり、水晶体の等価線量が線量限度に近くなる場合
第 2 章に示したように、場所によっては、線量(率)が頭部と胸部で 2~5 倍程度の差がある場合があった。このような場合には、個人線量計で測定した頭部と胸部の線量比は後述する ICRP がいう不確かさの 1.5 を超える可能性がある。しかしながら、第 2 章に示したような通常の定期検査の作業であれば、水晶体の等価線量は胸部の 2 倍を超えることはないものと考えられる。

(1)でも提案したとおり、この場合においても、年間もしくは月当たりの積算線量が線量限度と比較して十分に低い場合には、同様に均等被ばく管理が可能であると考えられる。

しかしながら、本研究で抽出した原子力発電所での作業はいずれも高線量となる可能性のある作業である。

ICRP は、Publication75⁹⁾において「作業場においては、放射線場のエネルギースペクトルと方向は一般によくわかっておらず、個人線量計で測られた測定値の不確かさは著しく大きいであろう。放射線場が均質でなく、方向がはっきりしないことによって、標準モデルの使用には誤差が生じる。関連する線量限度付近の実効線量を推定する際の 95%信頼度での総合的な不確かさは、光子についてはプラスマイナスどちらの方向についても係数 1.5 となり、エネルギー不明の中性子及び電子についてはもっとずっと大きくなる。あらゆる線質に対し、低レベルの実効線量ではさらに大きな不確かさもまた免れない。」としている。これを水晶体の等価線量の測定に置き換えることができるものと考えられる。後述する Bordy¹⁰⁾の考え方がまさにこれに該当するものと考えられる。

著しく不均等をともなうような場合には、頭部と胸部の線量比として 2 倍を超えない範囲で水晶体の等価線量が線量限度を超えることがないような基準を定めることが適切であると考えられる。

また、このような著しい線量勾配がない場で、均等被ばくとして、胸部線量計のみで管理をしているならば、従事者の水晶体の等価線量が線量限度に近づく場合、より正確な評価を行うために、本研究から得られた頭部と胸部線量比 1.2 程度を参考に、水晶体の等価線量が線量限度を超えないよう、あらかじめ水晶体の等価線量を補正して算出しておくか、または、眼の近傍での測定を開始するための線量管理基準を定めておくことも一案である。

(3) β 線の被ばくに伴う水晶体の等価線量管理について

個人線量計着用実験及びファントム実験から明らかなおおりに、 β 線による被ばくをともなう作業場では、内部被ばく防護の観点から全面マスクの着用が一般的である。全面マスクは水晶体の被ばく防護の目的ではない。しかし、その被ばく低減効果は著しく、マスクの内側ではマスクの外側の線量を 30% 以下にまで低減する。正確な線量を評価する上では、マスクの遮蔽効果を考慮した評価を行うことが望ましい。

マスクの厚みが前方向と側面とで大きく異なる場合があるのでその場合には注意が必要である。β線の線量計での測定には、上述した通り、γ線と比較してより大きな不確かさが含まれるものと考えられる。本研究で試験を行った全面マスクでは、マスクにより十分に低くなった後の線量に対して前面と側面との差は10~20%程度であったことから、不確かさの範囲内と考え、マスク内のどの場所で測定をしても問題はないものとする。

6.2.3 原子力研究施設

原子力機構の代表的施設で、水晶体に比較的高線量の被ばくまたは不均等な被ばくを受ける可能性のある作業は、高線量率下でのセル内作業とMOX燃料の取扱い等で鉛エプロン等防護衣を着用する作業に限られる。ただし、いずれの作業においても20 mSv/年を超えることは稀であり、作業計画の立案段階で管理目標等を設定することによって、水晶体被ばく線量の上限のコントロールが行われる。また、現在使用している(又は一部開発中の)個人線量計及びそれらを使ったモニタリング手法は、 $H_p(3)$ の測定並びに水晶体等価線量の算定にそのまま利用可能である。

一方、現段階で十分な事前検討がなされていない事柄として、防護メガネ等を使用し、それによる遮へい効果を線量評価に反映する際のルール作り、特にその測定・算定値や補正根拠をどのように記録として残しておくべきかがあげられる。例えば、3.4.1で述べたように、セル内作業の場合は作業中の全面マスク等呼吸保護具の着用は徹底されるため、全面マスクの外側に取り付けられた線量計の $H_p(10)$ や $H_p(0.07)$ 等測定値から全面マスク内での水晶体等価線量への換算は技術的には可能である。このとき、その換算に使用した情報のうちどういったものを記録としていつまで残しておくべきかについての何らかの指針が必要であるとする。これは、グローブボックス作業に従事した作業員や医療系従事者が使用する防護メガネでの補正の場合も同様である。

6.2.4 医療分野 透視手技・核医学診療・放射線治療

医療分野で従事者が水晶体に高線量の被ばくを受ける可能性がある手技には、術者がCT検査室内に入って行うCTガイド下の治療と、熟練者でも比較的最長の時間の透視が必要となる消化器内科領域の十二指腸乳頭切開術等がある。これらの手技に於いては、患者からの散乱線を防護する目的の適切な防護板やラバーシールドの利用が必要となる。多くの施設ではこれらの防護用具は装備されているため、今後はその有効な利用方法を医療スタッフに広く教育し、放射線安全の意識を持つことが、水晶体の適切な被ばく管理には重要となる。また、透視下に行う手技全体において、透視台の管球の位置近くで主に手技を行う医師や医療スタッフは、管球ができる限り透視台下になるように配慮することと、線量率の調節や絞りの活用、また、有効な遮蔽能力を持つ防護眼鏡を利用することにより水晶体の線量を低減することができる。

6.2.5 医療分野 一般撮影・CT 介助、看護分野の観点から

医療機関において水晶体被ばくを適切に管理するには、防護衣を着用する場合は不均等被ばく管理が必要である。施設により基準が明確となっていないこともあることから、統一した不均等被ばく管理の基準を定める必要がある。一般撮影やCT検査においても患者の介助などのためにX線照射中に入室せざるを得ない機会があり、照射時間は短いものの線量率が高いことから1回当

たりの被ばくが高く、放射線防護メガネやその他の防護具の積極的な活用が必要である。またそのような状況にあることを管理者及び介助者本人が理解しておく必要がある。

6.2.6 水晶体等価線量モニタリングに用いる線量計

6.2.1 でも述べたように、胸腹部に着用する個人線量計及び部分被ばくを受ける可能性のある場合に着用する線量計(体幹部不均等被ばく管理用個人線量計)については、現在は $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ を算定しているが、いずれ $H_p(3)$ の算定にも対応可能となるであろう。JIS Z 4345¹¹⁾にも、スラブファントムに対する ISO シリーズ X・ γ 線の $H_p(3)$ の換算係数やスラブファントムに対する Sr-90/Y-90 の β 線に対する $H_p(3, \alpha)$ への換算係数が提供されている。また、当該事業において、水晶体等価線量 β 線水晶体等価線量 β 線の校正場も開発された¹²⁾

本研究の原子力発電所における従事者の線量計着用試験では、現在一般的に線量管理用として普及している RPLGD を用いて従事者の線量測定を実施したが、この際、参考値として $H_p(3)$ の提供を線量モニタリングサービス会社より受け、水晶体の等価線量を算定した。このように、これまで使用してきた受動形個人線量計を用いて線量管理を行う上では、 $H_p(3)$ による水晶体の等価線量を算定することに対して、事業者や従事者が特別な配慮をする必要はないものと考えられる。

一方、眼の近傍で水晶体の等価線量($H_p(3)$)を測定するための特別な線量計については、すでに1社がモニタリングサービスを開始している。また、本研究では主に医療分野の従事者の水晶体等価線量測定に使用した開発中の線量計についても、近いうちにサービスが開始されるだろう。このため、いまずぐにでも眼の近傍における水晶体の等価線量測定を実施することは可能である。しかしながら、本研究での線量計着用対象者からは、視界を遮ることがない、脱着が容易、不快感が少ない、管理がしやすい等、線量計に対するさまざまな要望の声が聞かれた。本研究では、原子力発電所の従事者の着用試験において、全面マスクに線量計を固定するための治具を用いた測定を試みた。今後、このような労働衛生面からの配慮についても十分になされた線量計が必要であろう。

6.2.7 業務の分配による被ばく低減

原子力発電所において、頭部と胸部の線量比が1.5倍～2倍程度になる従事者について、不均等被ばく管理をおこなうかどうか(眼の近傍もしくは頭部に線量計を着用する必要があるかどうか)については、慎重な判断が必要である。線量計の着用や防護具の着用等がなされる場合、その作業効率が低下するといった問題が生じるためである。もし、従事者の実効線量を十分に低減することができ、水晶体の等価線量が線量限度よりも十分に低いならば、不均等被ばく管理の必要はない。

本研究で対象とした原子力施設における従事者のうち、水晶体が高い被ばくをとともう可能性のある者は、高い熟練度を必要とする作業に携わっていることが多いようである。もし、これらの作業が複数人によって分配されるなら、水晶体の等価線量に限らず、従事者の被ばく低減が実現できる。したがって、このような高線量被ばくをとともう可能性があり、高い熟練度を必要とするような作業を行う従事者の人材育成を行うことも重要であると考えられる。また、これは原子力分野に限らず、医療分野においても同様である。

参考文献

- 1) 放射線審議会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について(意見具申) (2018).
- 2) 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).
- 3) International Atomic Energy Agency, Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye, IAEA TECDOC 1731 (2013).
- 4) International Atomic Energy Agency, IAEA General Safety Guide No.GSG-7 Occupational Radiation Protection (2018).
- 5) International Organization for Standardization, Radiological protection — Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities, ISO 15382 (2015).
- 6) International Radiation Protection Association, IRPA guidance on implementation of eye dose monitoring and eye protection of workers (2017).
- 7) French Radiological Protection Society, Technical Information Sheets: Eye lens: Regulatory limits, measurement, dosimetry and medical surveillance (2016).
- 8) ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
- 9) ICRP, General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27 (1) (1997).
- 10) J.-M. Bordy, Monitoring of eye lens doses in radiation protection, Radioprotection **50**(3), 177–185 (2015).
- 11) 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).
- 12) 放射線審議会, 第143回放射線審議会資料(2018).

7. 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、教育プログラム開発、不均等被ばく管理の実態調査、過去文献調査等を実施した。

また、最終年度となる今年度は、昨年度より実施してきた研究の継続、追加調査を実施するとともに、主任研究者及び分担研究者の各課題から得られた研究成果を踏まえ、規制への提言と各分野における水晶体の線量管理・防護に関する提案を行った。

現在、放射線審議会の意見具申を踏まえ、関係行政機関において、各規制への水晶体の等価線量限度の取入れの検討が進められているところである。本提案により、水晶体等価線量限度が関連規制へ円滑に取入れられることを期待する。また、後者については、事業者の自主的な取り組みに関連するものである。本研究班としての提案であるが、これらが事業者の自主的な取り組みに反映されるためには、より多くの関係者の間で検討・精査され、コンセンサスが得られる必要があるものと考えられる。また、特に、医療分野においては、水晶体の等価線量限度の遵守や最適化のための被ばく低減への取り組みをきっかけとして、放射線防護そのものに対する意識がさらに高まるよう働きかけていくことが重要である。

水晶体の等価線量限度の規制取入れ及び運用に関する研究が平成 29 年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業の重点研究として取り上げられたことにより、本研究班のみならず、現在、わが国の水晶体関連研究の成果や知見の多くがこの原子力規制庁の傘下に集まっている。これらの知見や成果が分散することなく、大きな推進力となって、放射線安全・防護への取り組みにつながっていくことに期待する。また、われわれ自身はその活動に尽力し、継続していく必要があるだろう。

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。