

IV. 事業の進捗

令和年度事業計画書内ではいくつかの活動についてクレジットが異なる個別の報告書を作成し、それぞれの事業の進捗を記載している。こうした個別報告書は本報告書の付属資料として巻末に添付している。そこで本報告書中では、事業計画書の項目別に

- ・事業計画書と実績との対照（表1）
- ・進捗の概要（個別報告書のサマリー等）

について記載する。詳細に関しては、付属資料を引用することとする。

表 1. 令和 2 年度事業計画と実績の対照

令和 2 年度事業計画	令和 2 年度実績	付属資料 (クレジット)
<p>1. 課題解決型 NW によるアウトプット創出 (1) 国内の放射線防護対策の推進に関する検討 ①放射線防護アカデミアによる放射線防護対策の推進に関する調査と提言</p>		
<p>日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会、日本放射線影響学会及び日本放射線事故・災害医学会に依頼し、放射線防護に係る海外の最新知見の収集(翻訳を含む)や国内の放射線規制の課題に関する調査を行う。また放射線防護対策及び緊急時対応の的確な実施や改善に必要な提言を行うため、アカデミアの合意形成を行う。</p> <p>また上記の 4 学会は、年次大会やシンポジウムなど学会が主催するイベントや Web を通じて、放射線防護人材の確保・育成に関連するセッションを企画・開催し、若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップを支援する場を提供する。</p> <p>さらに学会は、情報収集、調査や検討の結果ならびにセッション開催報告を、事業代表者が定めた書式の報告書を用いてまとめるとともに、アンブレラとしての取りまとめの議論に参加する。</p> <p>加えて日本原子力研究開発機構及び量子科学技術研究開発機構が連携して、必要に応じて放射線防護アカデミアを拡張し、より広範囲の情報収集を行う。</p>	<p>日本放射線影響学会は確定的影響の RBE と大規模災害時の線量推定、日本放射線安全管理学会は放射線施設の事故と緊急時対応、日本保健物理学会は緊急時モニタリングと放射線防護文化醸成といった、それぞれが選択したテーマに関して調査を行い、結果を取りまとめた。代表者会議では、各学会の調査と検討結果をもとに、我が国の放射線防護対策及び緊急時対応の的確な実施や改善に資するための提言の取りまとめに着手した。</p> <p>代表者会議は、アカデミア参加団体と日本原子力学会保健物理・環境科学部会からの推薦者による「実効線量と実用量に関するワーキンググループ(線量 WG)」を組織し、海外の最新情報を集めて、日本として今後取り組むべき問題の整理に着手した。特に今年度は、関係者間での情報共有を優先し、WG が Webinar(5 回シリーズ)の企画・開催した。WG は、Webinar による情報共有の効果を高める目的で、動画配信やパネル討論、質疑への回答などを実施した。</p> <p>学会が提案した重点テーマ候補の研究課題の中から、日本保健物理学会は「トリチウム問題の国際的視点からのアプローチ」に取り組み、国際シンポジウムの成果を誌上発表した。また日本リスク学会内に設置した「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ」に代表者会議メンバーが参加し、</p>	<p>付属資料 1 (代表者会議)</p>

	<p>多分野の専門家やフ海外の専門家と連携して、避難や除染のリスクトレードオフやステークホルダー関与に関する議論を行った。また代表者会議メンバーの意見を参考に、令和3年度の放射線安全規制研究の重点テーマに関するヒアリングに対応した。</p> <p>また学会が主催する年次大会やシンポジウムの中で、放射線防護人材の確保・育成に関連するセッションとして「20代若手会員と中堅・シニア会員とのグループディスカッション(日本放射線影響学会)」、「若手研究者による放射線に関する研究紹介(日本放射線安全管理学会)」および「学友会と若手研活動を通して見えた日本保健物理学会～未来に向けた提案～(日本保健物理学会)」を開催した。またオンラインによる進路等個別相談会を実施し、学会員が相談員を務めた。</p> <p>さらにアカデミア参加学会は、事業代表者が定めた書式を用いて上記の活動をまとめた報告書を作成した。また代表者会議における取りまとめの議論に参加した。</p> <p>原子力機構と量研は、アカデミア参加学会に加えて、医療被ばく研究情報ネットワーク関係者の協力を得て、医療分野における職業被ばく管理の状況について情報収集を行った。また緊急時放射線防護や職業被ばくの最適化進に関係がある国際機関の報告書を翻訳し、本事業の検討に用いるとともに、国際動向報告会で情報展開を行った。</p>	
<p>(2)緊急時放射線防護に関する検討 ①緊急時放射線防護ネットワークの活動</p>		<p>付属資料2 (原子力機構)</p>
<p>分野別の3つのサブネットワーク活動として、放射線防護専門家向け緊急事態対応ガイドの作成に向けて下記の項目に取り組む。</p> <ul style="list-style-type: none"> i) 専門家の要件(人材スペック)の明確化と改善 ii) ガイドの素材整理とガイド素案の作成、教育・訓練カリキュラムの検討 <p>また国内外のグッドプラクティスの把握のため、国等の原子力防災訓練の視察又は参加者等からのヒアリングを行う。</p> <p>さらに専門家と行政機関関係者を結ぶNWの構築のあり方に関する提言に向けて下記の活動を行う。</p>	<p>緊急時放射線防護ネットワーク(緊急時防護 NW)内に、環境モニタリング、放射線管理、個人被ばく線量測定の分野別に3つのサブネットワーク(サブ Gr)を編成し、下記の活動を実施した。</p> <ul style="list-style-type: none"> i) 専門家の要件(人材スペック)の明確化と改善 ・環境モニタリングサブ Gr: 国・県の立場からのコメントを参考に、EMCが実施する環境モニタリング活動を支援する専門家の力量等に関して検討した。 ・放射線管理サブ Gr: 避難退域時検査を支援する専門家の力量等に関する検討を継続した。 ・個人線量測定評価サブ Gr: 個人線量評 	

<p>i)東京電力福島第一原子力発電所事故等過去の原子力事故を教訓とした防災体制に適応したNW活動制度設計の検討</p> <p>ii)人材の登録・認定・管理方法の検討</p> <p>こうした実施に当たっては、実施方針等の適切性確保のため、NWから専門家を10名程度招集し、3回程度の検討会(TVシステムを利用)を開催する。また、進捗状況の確認等のため月一回以上の頻度で緊急時放射線防護NWの責任者と担当者等でTVシステムによる打合せを行う。</p> <p>上記の会議・会合に係る準備及び手配、会計処理、文書作成支援等の業務を行うために派遣により事務処理を行う人材が必要である。</p>	<p>価の枠組み整備について情報収集した。</p> <p>ii)ガイドの素材整理とガイド素案の作成、教育・訓練カリキュラムの検討</p> <p>災害時に派遣される放射線防護分野の専門家に必要な情報や資料について既存の情報を中心に整理した。具体的には環境モニタリングの分野を中心にIAEA等が公表している文献の翻訳状況をリスト化した。また、教育・訓練カリキュラムの検討に向けて内閣府が災害対応要員向けに行っている教育研修事業に関する情報の収集や訓練等の視察による定着状況の把握を行った。</p> <p>またグッドプラクティスを把握するため、原子力事業者が実施している原子力防災に係る教育訓練状況について電気事業連合会の協力を得てアンケート調査を令和3年1月に実施した。</p> <p>さらに専門家と行政機関関係者を結ぶ防護NWのあり方に関する提言に向けて下記の活動を実施した。</p> <p>i)東電福島原発事故等を教訓とした防災体制に適応した緊急時防護NW活動の制度設計</p> <p>運営主体、構成員、サブGr、ネットワークの運営のあり方の案をまとめるとともに、発展的に持続可能な仕組みや既存のネットワークとの連携等の課題に関する対応策を策定した。</p> <p>ii)人材の登録・認定・管理方法の検討</p> <p>先行して実施されている教育研修事業の概要とNEAT指名専門家に期待される役割についてまとめ、それらの調査結果を踏まえてネットワーク活動に反映すべき事項についてまとめた。</p> <p>緊急時防護NWの活動に当たっては、実施方針等の適切性確保のため、緊急時放射線防護NW検討会(以下、検討会)から専門家を招集し、TV会議により検討会を開催した(令和2年11月11日、令和3年2月5日、令和3年2月25日)。</p>	
<p>②ステークホルダー会合の開催</p>		
<p>国内専門家からの意見等の反映のため、日本保健物理学会の年次大会にて上記で</p>	<p>上記の検討結果を踏まえて平常時及び緊急時における防護NW活動の全体像につい</p>	

<p>まとめた内容について意見集約を行う。前年度までにとりまとめた調査検討結果に基づき、放射線防護専門家向けの放射線緊急事態対応ガイドの構成案の検討を行う。専門家と行政機関関係者を結ぶNWのあり方について緊急時対応組織関係者等の意見集約を行い、実効性のある持続的な仕組みの検討を行う。</p>	<p>て図にまとめ、ステークホルダー会合において発表した。国内専門家からの意見等の反映のため、日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会のそれぞれの年次大会において企画セッションを設け、上記の防護NWのあり方の検討結果を発表し、学会関係者からの意見集約と防護NW制度設計への反映を行った。</p>	
<p>(3)職業被ばくの最適化推進に関する検討</p>		<p>付属資料3 (原子力機構)</p>
<p>課題解決型ネットワークの一つとして、職業被ばくの最適化推進を目的としたネットワークを立ち上げる。本ネットワークは、日本原子力研究開発機構を事務局とした二つのサブネットワーク(以下、サブネットワーク)で構成され、以下の事業を行う。両サブネットワークは、日本原子力研究開発機構を中心に有機的に結合して全体目標を共有しつつ検討を進める。検討を進めるにあたり、事業担当者間の打合せ(3回程度@量研千葉地区)並びに本事業に関する打合せ・成果報告(3回程度@東京)を行う。</p>	<p>国家線量登録の確立に向けての具体策を関係機関が共同して検討するため、原子力機構を運営主体とした「国家線量登録制度検討グループ」での検討を昨年度に引き続き実施した。 検討グループの会合は、令和2年9月10日及び令和3年1月15日の2回開催した。今年度は、新型コロナウイルス感染拡大防止対策のため、2回ともオンライン会議開催とした。会合では、昨年度検討した4つの制度案について、日本保健物理学会及び放射線安全管理学会でのステークホルダーからの意見を踏まえて検討を進めた。</p>	
<p>①国家線量登録制度の検討</p>		
<p>国家線量登録制度に関し、これまでの調査結果に基づき、複数の制度案の検討を行い、各制度案の長所・短所及び具体化にあたっての課題を整理する。検討に当たっては、国家線量登録制度検討グループ(構成員7名、うち3名は量研および原子力機構、検討の必要性に応じて関係者を追加)による検討会合をWebシステムを活用し2回程度開催する。また、検討内容を日本保健物理学会の年次大会(大阪)等で報告し、ステークホルダーからの意見を求める。</p>	<p>昨年度の検討結果を踏まえ、4つの制度案と各制度案の長所・短所を整理した内容を日本保健物理学会第53回研究発表会(令和2年6月)及び日本放射線安全管理学会学術大会(令和2年12月)の企画セッションで報告し、ステークホルダーからの意見を求めた。その議論を踏まえて、制度案導入により管理を合理化出来る点や制度構築に向けた展開案を整理するとともに、実現に向けての具体的な課題を明らかにした。 また、昨年度検討した国外における制度の例及び登録すべき情報に関して、欧州のガイドラインの翻訳を行い、その内容に基づき、昨年度の結果を確認した。</p>	
<p>②線量測定機関認定制度の検討</p>		
<p>日本適合性認定協会(JAB)が事務局を務める「放射線モニタリングタスクフォースグループ(TFG)」と連携して、令和元年度に改定した認定基準・技能試験等の具体的な運用・解釈に関する検討を継続する。この検討のため、これまで技能試験に関する基礎データが少ない線種に対する照射試験及び試験結果のデータ解析を外注により行う。また、認定分野の環境放射線モニタリング等への拡大の方向性については、規制庁検討チームの動向に応じて検討する。検</p>	<p>個人線量測定の信頼性確保に係る認定制度の検討については、昨年度と同様に、JABが運営主体であるTFGに一本化して検討を進めた。 個人線量測定サービスの認定制度が開始されたことから、今後定期的に実施する技能試験のために、これまでデータの少ない線種(今年度はβ線)に対する基礎データの収集及び試験結果の解析を実施した。また、次年度の眼の水晶体のモニタリングの変更に備えた3mm線量当量への認定対象の拡大も検討</p>	

<p>討に当たっては、JAB「放射線モニタリングTFG」メンバー(7名、必要に応じて関係者を追加)により、TFG 会合に合わせて2回程度検討会を開催する(TFG 会合と同時開催のため旅費等不要)。また、令和元年度に引き続き、①の調査と合わせて、国際標準化機構(ISO)の原子力専門委員会(TC85)/放射線防護分科会(SC2)/中性子サブグループ会合(Web システムを活用したオンライン会合)等の会合に専門家1名が参加し、放射線標準校正等に係る最新動向を調査する。</p>	<p>した。環境モニタリングへの拡大については、規制庁検討チームの動向を調査したが、拡大方針が示されなかった。</p> <p>さらに、認定に必要な技能試験に係る放射線標準に関する国際規格について国際標準化機構(ISO)の放射線防護分科会(TC85/SC2)基準中性子場に係るサブグループ(WG2/SG3)専門家会合(令和2年11月17日～19日、オンライン会合)に専門家を参加させ、放射線標準校正技術関連の国際規格に関する情報を収集し、検討に反映した。</p>	
<p>(4)放射線防護分野のグローバル若手人材の育成 ①国際的イベントへの若手専門家の派遣</p>		<p>付属資料1 (代表者会議)</p>
<p>放射線防護に関する国際的な機関や委員会が開催する国際的イベントに放射線防護アカデミアに所属する若手専門家を参加させる(2名程度)。</p>	<p>代表者会議が派遣先として提示した3つのイベント(OECD-NEA 主催第3回国際放射線防護スクール/IAEA 主催 NORM の産業利用での管理に関する国際カンファレンス/IAEA 主催放射線安全に関する国際カンファレンス)への参加応募者を募った。あらかじめ定めた選考の手順と基準にのっとり、代表者会議メンバーが選考を行い、IAEA 主催の放射線安全に関する国際カンファレンスに派遣するに若手1名を選考した。しかし、当該イベントが Web 開催となり、若手派遣は行われなかった。</p>	
<p>②若手研究者の主体的活動の支援</p>		
<p>若手研究者の発想を放射線防護上の諸課題の解決に活かすため、放射線防護アカデミアの若手が連携して行う活動を支援する。</p>	<p>放射線防護アカデミア参加学会では、学会の委員会の構成員として若手の登用を進めるとともに、若手を中心とした構成員とする学会内組織の支援を行った。</p> <p>日本放射線安全管理学会では、年次大会のプログラムに若手が企画するセッションを設けるとともに、研究活動の実績となる若手奨励金事業を実施した。日本放射線影響学会では、学会内の主要な委員会に14名の40歳未満の若手会員を委員として加えた。日本保健物理学会は「若手研究会」及び「学友会」組織の運営について、学会理事会が積極的に後方支援した。</p> <p>またオンライン形式による日本保健物理学会若手研究会主催の「内部被曝モデル勉強会(シリーズ)」を支援した。</p>	<p>付属資料1 (代表者会議)</p>
<p>2. 放射線防護アンブレラによる情報共有と合意形成 (1)国際動向に関するアンブレラ内の情報共有 ①国際動向報告会の企画運営・報告書作成</p>		<p>付属資料4 (原安協)</p>
<p>アンブレラ関係者を対象に、ICRP などの放射線影響・防護に係る国際的機関等の動向に関する報告会を開催する。報告会</p>	<p>ICRP 主委員会の甲斐委員を参集して国際動向報告会の企画会議を開催した(令和2年10月27日)。企画会議での決定を受</p>	

<p>では、2名程度の専門家を招聘し、資料や映写された資料やスライドを用いながら講演や討論を行い、ビデオ会議ツール「Zoom」によるライブ配信を行う。報告会の企画にあたり、ICRP 関係者1名程度を参集し、企画会議を開催し、資料を用いて検討を行う。</p> <p>報告会で報告された内容と議論は、報告書にまとめて、公表する。また報告会に關係する記録(報告書ならびに報告会の画像や音声等)は全て電子媒体の形にして事業担当者間で共有・保存する。</p> <p>上記企画会議と国際動向報告会の開催準備・運営・開催後の整理事務、報告書作成事務等を行うために、非常勤の勤務形態で、英語に精通しかつ本事業の専門用語にも対応できる専門性を有する研究参与を含めた4名の職員を必要とする。</p>	<p>けて、「放射線防護の基礎となる放射線リスク評価に関する国際動向」をテーマとした報告会を開催した(令和3年1月8日13-17時、Zoom ウェビナー)。報告会の前半には、UNSCEAR、ICRP 第1専門委員会、NCRP、IAEA-RASSC、OECD/NEA-CRPPHに關連する有識者がテーマに關連する最新の検討状況を紹介した。後半では、上記の有識者にICRP 主委員会、同第2専門委員会、同第4専門委員会、WHO に關連する有識者を加えた9名による円卓討論を行った。ファシリテーターから低線量・低線量率のリスク評価や修飾因子あるいは不確かさといった6つのテーマが提示され、それぞれについて意見交換や情報提供がなされた。100人が参加し、発表や議論を視聴した。チャット機能等を利用して集めた質問は、ファシリテーターが適宜円卓討論に利用した。</p> <p>報告会での報告内容と議論は、報告書にまとめられ、本事業のHP上で公開した。</p>	
<p>②国際的機関からの専門家との意見交換</p>		
<p>放射線防護關連の国際的機関の専門家と国内の専門家が、科学的知見の規制への取り込みにおけるアカデミアの役割を具現化し、意見交換する場を設ける。</p>	<p>ICRP 第4専門委員会委員の Thierry Schneider 氏(Nuclear Protection Evaluation Center、フランス)と量研研究者2名および防災の専門家が原子力災害時の避難に關する国・地方自治体の取り組みに關して意見交換を行った(令和2年11月12日、オンラインにて実施)。意見交換にあたり、日本リスク学会「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ」が Schneider 氏への質問を検討した。この質問をベースに本事業代表がインタビューを行い、フランスにおける防災の取り組みと日本との比較や、東電福島原発事故關連の教訓のフランスでの取入れの見通しについて議論した。</p>	<p>付属資料1 (代表者會議)</p>
<p>(2)放射線防護に關するアンブレラ内の意思決定</p>		
<p>①NW 合同報告会の企画運営・報告書作成</p>		
<p>放射線防護アカデミアや、緊急時対応人材 NW や職業被ばくの最適化推進 NW の活動に關して、アンブレラ内での合意形成や異分野連携に向けたオープンな議論を行うために、報告会を開催し、Web システム(Cisco Webex Events)によるライブ配信を行う。具体的には、アンブレラに所属するNW(放射線防護アカデミアを含む)が活動を報告するとともに、2名程度の指定発言者が今後の取り組みに關してコメントを発表する。また、報告会での発表内容と議論は、報告書にまとめ、公表する。</p>	<p>アンブレラ内での情報共有や合意形成に向けたオープンな議論を行うために、NW 合同報告会を開催した(令和3年2月9日14-17時、Web システムによるライブ配信)。本報告会では、事業担当者や学会関係者が登壇し、事業概要、国際動向報告会、各学会の活動、ネットワーク活動の報告を行った。その後のパネルディスカッションでは、代表者會議メンバーと放射線防護アカデミア外から本事業に参加した2名がパネラーを務め、4年間の事業の振り返りを行った。大学、研究所、省庁、事業者、一般など40名が参加した。報告会での発表内容と議論</p>	<p>付属資料5 (量研)</p>

	は報告書にまとめ、本事業の HP 上で公表した。	
②代表者会議の運営		
アンブレラの構成団体の代表者からなる会議(代表者会議)を年に4回程度開催し、放射線防護対策の推進に関する調査と提言に関する検討結果をまとめるとともに、翌年度の活動や学会やNWの追加加入について議論する。会議開催後は、発言者名及びその意見を記録した議事録を作成し、速やかに原子力規制庁に提出する。なお代表者会議にあたっては、Webシステムを活用する。	今年度は第12回～16回代表者会議を開催した(回数は平成29年度からの通し番号)。第12回Web会合では、議長として甲斐倫明氏(日本保健物理学会、PLANET)を選出し、コロナ禍における今年度の事業計画の見直しおよび学会が行う調査に関する審議を行なった(令和2年6月11日)。第13回Web会合では、今年度の事業計画の修正を確定するとともに、線量WGの設置に関する審議を行った(令和2年8月20日)。第14回Web会合では、国際動向報告会の準備状況と2つのネットワークの活動の進捗確認を行った(令和2年12月25日)。第15回メール会合では、次年度の活動計画の概要に関して審議を行い、事業計画案を決定した(令和3年1月22～29日)。第16回Web会合では、今年度の事業の取りまとめと来年度の事業計画の詳細を検討した(令和3年3月1日)。	<p>付属資料1 (代表者会議)</p> <p>付属資料6 (量研)</p>
(3)アンブレラから社会への情報発信		
<p>学会が主催する年次大会等やHPを介してアンブレラの活動やアカデミアの見解等を紹介する。また国内の放射線防護に関する諸制度と国際的な放射線防護等に関する知見等をWeb上で閲覧できる「放射線影響・放射線防護ナレッジベース」の整備を行い、15件程度の新規項目を追加する。</p> <p>さらに実効線量と実用量に関するWebinar(全5回シリーズ)を開催し、学術コミュニティ内の情報共有を進める。</p>	<p>昨今の放射線審議会の議論や社会的関心等を考慮し、放射線影響・放射線防護ナレッジベース“Sirabe”のコンテンツに追加する新規項目を作成した。具体的には、事故の線量評価、動物実験や疫学によるリスク評価、医療現場の被ばく等に関する原著論文の解説5件、放射性廃棄物、3つの被ばくの状況や眼の水晶体等に関する基本解説5件および用語集11件を新規に執筆した。放射線影響・防護ナレッジベース運用委員会(メール会議、令和3年1月29日～2月17日)および同委員会編集部会(メール会議、令和2年12月17日～令和3年1月8日)において、新規・更新項目の承認ならびに次年度以降の活動方針について審議を行った。</p> <p>代表者会議実効線量と実用量に関するWGが企画・開催した実効線量と実用量に関するWebinar(全5回シリーズ)を、令和2年10月30日、11月24日、12月18日、令和3年1月25日、2月22日に開催し、延べ857名がリアルタイムで視聴した。Webinarに1回以上参加登録した者に5回分の動画配信を行った。</p>	<p>付属資料1 (代表者会議)</p> <p>付属資料7 (量研)</p>
3. 事業進捗のPDCA		
本委託契約期間において、事業担当者で	本委託契約期間において、事業担当者で	

ある量子科学技術研究開発機構、日本原子力研究開発機構および原子力安全研究協会は、事業進捗に関する打合せを6回程度行う(都内もしくは量研千葉地区)。また、原子力規制庁及び同庁が任命するプログラムオフィサーに対し、進捗報告を月に1回程度行うほか、事業実施内容について疑問が生じた場合、その都度助言を仰ぐ。本事業における検討会その他の会合の委員を選定するときは、あらかじめ原子力規制庁担当官の確認を受けるほか、会合を開催する際には原子力規制庁に通知し、その職員の出席を認めることとする。

こうした事業の遂行にあたり、事業代表者である量研では、事業年度の成果のまとめと次年度の計画立案が重なる繁忙期には委託事業経費管理等業務を行う常勤職員が、量研が主催する会合開催や若手派遣事業などの大量の事務作業が生じる期間は本事業の庶務・経理・契約業務に専任する非常勤職員がそれぞれ必要となる。

ある量研、原子力機構、原安協は、代表者会議(5回開催)や緊急時放射線防護NW検討会、(3回開催)、国家線量登録制度検討グループ会合(2回開催)、国際動向報告会の企画会議(1回開催)を活用して、事業進捗に関する打合せを6回行うとともに、メール等で密接に連絡を取り合った。

原子力規制庁担当官とプログラムオフィサーに対し、代表者会議やネットワーク合同報告会、成果報告会準備等の機会を活用して、Web会議等で進捗報告や相談を行った。また随時プログラムオフィサーに対してメールでの相談や報告を行なった。

放射線防護アンブレラ代表者会議、実効線量と実用量に関するWG、緊急時放射線防護NW検討会、国家線量登録制度検討グループの構成員について原子力規制庁担当官の確認を受けた。またこれらの会合には、原子力規制庁担当官とプログラムオフィサーが出席した。

進捗の概要（個別報告書のサマリー等）

1. 課題解決型ネットワークによるアウトプット創出

（1）国内の放射線防護対策の推進に関する検討（付属資料1のサマリーを以下に記す）

①放射線防護アカデミアによる放射線防護対策の推進に関する調査と提言

（ア）海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する調査

（今年度の検討の経緯と成果）

これまで放射線防護アカデミアでは、顕在化している放射線防護の課題の解決に向けた議論を行ってきた。今年度はアカデミアに所属する学会が「原子力災害・放射線事故対応」に関して、それぞれの専門性と関心にあったテーマを選択して、海外の知見収集と国内の実態把握調査を行い、我が国が解決すべき課題の抽出に取り組むこととした。選択したテーマと調査内容は表2の通り。来年度は各学会のクレジットで調査結果を公表するとともに、各学会の報告内容をベースに放射線防護アカデミアとしての提言を取りまとめる。

表 2. 放射線防護アカデミア参加団体による調査と提言

調査者	海外の知見収集による調査	国内の実態把握の調査と提言
日本放射線影響学会	【テーマ：確定的影響の RBE と線量評価】 文献調査によると確定的影響の評価には、RBE で重み付けした吸収線量が適用されていたが、表記法にはばらつきが見られた。動物実験から得られた RBE の値は、被ばくの種類により大きく変動することが確認された。	【テーマ：大規模災害時の線量推定】 被ばく医療支援センターの準備状況、線量評価を担う人材育成、線量評価法の開発や改善に関する取り組みを調査した。その結果、生物学的線量評価分野における「人材不足」や「自施設での若手育成体制が不十分」といった体制面の課題があることが分かった。線量評価法の改良のため、生物学的線量評価分野の「ハイスループット解析の導入」や「実用化に向けた標準化や線量効果曲線の作成」を提案した。
日本安全管理学会	【テーマ：放射線施設の事故】 2000 年以降の INES 尺度 2 以上の事象の一覧を作成した。①異常被ばく事故の線量評価方法、②IVR 施術者における水晶体被ばく、③紛失 RI による被ばく事故事例、④作業中の飛散事故事例については重点的に調査を行った。	【テーマ：放射線施設の緊急時対応】 公開情報から原因を抽出し、予防可能可否の観点から分類した。その結果、特に表示付認証機器の管理や事故時の情報公開など予防策として不十分な点を明らかになった。問題点に対する予防と適切な対処ができるように、放射線障害予防規程や緊急時マニュアルを修正する提案をまとめた。
日本保健物理学会	【テーマ：緊急時モニタリングの測定】 緊急時モニタリングの測定と体制に関して海外の拠点機関における動向を調査し、東電第一福島原発事故前後の我が国のモニタリング体制と比較した。体制、環境/個人モニタリング情報収集と情報伝達、要員並びにアジア圏内での緊急時モニタリングネットワーク構築の重要性・必要性に関する課題を抽出した。	【テーマ：放射線防護文化醸成の仕組み】 安全文化を形成する人や施設ごとの特徴に着目し、我が国における放射線安全文化についての意識と実践に関する詳細な現状調査や海外動向調査やアンケートを行い、課題の抽出・整理を実施した。放射線安全文化の醸成に関連した、学会独自の認定制度、資格制度等の構築の可能性について提案した。

(イ) 実効線量と実用量に関する検討と情報収集・共有

(昨年度までの議論)

昨年度の国際動向報告会「実効線量と実用量-改定の概要となお残る課題」では、日本として今後取り組むべき問題の整理と ICRP を中心とした活動報告が行われた。具体的には以下のような論点が整理された。

- ・ 確定的影響を吸収線量で評価するため、線質の異なる放射線への RBE が必要となる。
- ・ 年齢別標準ファントムによる年齢別の実効線量の評価や個別化する上での線量係数についての研究の進捗が必要である。またデトリメントの不確かさおよびデトリメントを基礎とした実効線量の意味や制約などについて、整理する必要がある。
- ・ 実効線量を便利なツールとしての線量として今後も活用するためには、その制約等の考え方を整理して、広く共有する必要がある。
- ・ 実効線量をベースにした実用量の実務上の課題を明らかにして、対応の準備をする必要がある。

(今年度の検討の経緯と成果)

代表者会議の下部組織として実効線量と実用量に関するワーキンググループ (WG) を立ち上げ、線量に関する諸問題の整理と問題解決に向けた検討を引き継いだ。

WG では、Webinar (全 5 回シリーズ) を企画・開催して、①シーベルトの課題 (発がんリスクに関する誤解、実効線量の正しい使い方)、②線質の異なる放射線ごとの RBE、③デトリメントと組織加重係数、④緊急時に用いる吸収線量と実効線量、⑤実用量の変更による実務上の課題に関する情報収集とアカデミア内での共有を行った。

また Webinar 開催完了後、WG は実効線量と実用量の新たな概念を国内に導入するにあたり、国内での検討が特に必要な観点として、以下を抽出した。

1) 実効線量の評価

- ・ 実効線量の (年齢別の) 評価とその使い方を、国内の専門家により整理し、認識を共通化する必要がある

2) 放射線管理で用いる線量

- ・ 実用量の実務への取り入れ方に関する日本としての取り組みを議論する必要がある
- ・ 実用量と実効線量の言葉の使い方が変わる中で、理解が必要である
- ・ 使用する線量 (等価線量⇒吸収線量へ) に関する情報を整理し、理解する必要がある

3) リスクの説明の問題

- ・ 「実効線量」と「リスク」の関係性、一般社会への「実効線量」の説明の仕方
- ・ 医療現場での実効線量を用いた説明: 従来の見解が変更され、医療被ばくの説明に実効線量の利用が妥当となった。医療人が実効線量の意味や制約を理解して、説明に用いる必要がある。

こうした観点ごとに、国内外の現状や課題と提言 (提言先、提言内容) をまとめた報告書骨子案の作成を開始した。次年度は、骨子案をもとに議論や追加情報収集を行い、WG としての提言の取りまとめを行う。

(ウ) 放射線安全規制研究の重点テーマ候補研究の実施

(昨年度までの議論)

平成 29 年度、アカデミア参加団体である日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会、日本放射線影響学会及び日本放射線事故・災害医学会および放射線リスク・防護研究基盤 (PLANET) は、個別に放射線安全規制研究の重点テーマ候補を提案した。代表者会議では提案された 30 課題のいずれもが放射線防護上の重要な研究であるという結論に至った。

続く平成 30 年度、平成 31 年度には、安全研究に関する原子力規制委員会の方針や放射線審議会での議論を踏まえて、重点テーマの提案を行うとともに、提案した 30 課題を分類し、学会単独あるいは学会連携で実施可能な課題に関しては、本事業で推進を支援することとした。平成 30 年度には「放射線安全規制の基盤となる放射線科学とその認識に関するコンセンサス」を共同提案した日本放射線影響学会と日本保健物理学会が、この課題の遂行のための合同委員会を設置し、平成 31 年度には「低線量リスクに関するコンセンサスと課題」を取りまとめた。

(今年度の検討の経緯と結果)

➤ 令和 3 年度の放射線安全規制研究の重点テーマの提案

今年度は、放射線防護アカデミア参加団体からのボトムアップの提案は求めず、事業代表者が、代表者会議メンバーの意見、放射線審議会での議論や国際動向をもとに重点テーマ案を以下の通り作成し、令和 2 年度第 1 回研究推進委員会にて (令和 2 年 11 月 20 日) にてプレゼンを行った。

① 令和 3 年度に取り組むべき喫緊の課題

- ・ ICR2007 年勧告の国内法令等取入れに関する研究 (NORM に関する国内実態把握等)

② 中長期的視点から見て令和 3 年度に着手が望まれる課題：

- ・ 自然科学と社会科学との融合により、サイエンスを具体的な防護実務に結び付けるプロセスを確立する研究
- ・ 原子力防災分野におけるエビデンスに基づく放射線被ばく状況の迅速な把握や防護方策の意義を説明するための研究
- ・ 国際的な放射線防護課題の解決のための研究、特に若手の育成の観点を重視

令和 3 年度の放射線安全規制研究の「重点テーマ①：放射線防護に係る中長期的課題への対応に向けたフィジビリティ研究」「重点テーマ②：原子力災害時の放射線モニタリング技術・分析技術に関するフィジビリティ研究」にはヒアリングの内容がある程度考慮されたが、社会科学的な要素が強いテーマは採用されなかった。

➤ これまでに提案された重点テーマ候補研究のフォローアップや実施

代表者会議では、提案した重点テーマ候補研究が応募可能な省庁の外部資金に関する情報の収集や、学会やネットワークが着手している研究の進捗状況把握等、フォローア

ップを行った。また今年度から新たに以下の2課題が本事業内で実施された。

- ・トリチウム問題の国際的視点からのアプローチ:各国学会との対話

このテーマは、日本保健物理学会が平成31年度に提案したもので、今年度は同学会が年次大会の中で国際シンポジウムを開催し、成果を誌上発表した。

川口勇生 他、JHPS 国際シンポジウム「トリチウム問題をいかに解決すべきか? -国際的視点および社会的視点から見た放射線防護- 保健物理, 55(4), 173-182 (2020)

- ・防護措置の正当化、意思決定の正当化

このテーマは、平成31年度に提案し、令和2年度の重点テーマとして採用されたものである。実際に「福島原発事故の経験に基づく防護措置に伴う社会弱者の健康影響と放射線リスクの比較検討に関する研究」が採択され、研究が進められているが、当該研究では防護措置の正当化の検証に焦点を当てている。そこでアンブレラ事業内では、意思決定の正当化に焦点を当てた研究・調査に着手した。実施にあたっては、学際性が強い日本リスク学会に「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ (TG)」を設置した。このTGに本事業関係者が参加し、福島原発事故を振り返り、防護方策の判断を正当性、広聴や定期的再評価、トレーサビリティなどの要件に照らし合わせて評価した。日本リスク学会年次大会中に、原子力災害時の避難や除染に関するリスクトレードオフとステークホルダー関与に関する企画セッションを主催した成果を誌上発表した。

神田玲子、本間俊充、高原省五、坪倉正治、大迫政浩、川口勇生、加藤尊秋、原子力災害の防護方策の意思決定 -リスクトレードオフとステークホルダー関与-, リスク学研究 (印刷中)

(エ) 放射線防護人材の確保・育成

(昨年度までの議論)

平成30年度に、アカデミア参加学会の会員の年齢や専門分野に関する調査を行った結果、会員数の変化や会員の年齢分布に関しては4学会間で差がみられた。また日本放射線安全管理学会や日本放射線影響学会が会員の年齢分布について10-20年前と比較したところ、両学会とも20代(主には学生)の割合は増えているが、30-50代の割合が減っていることが明らかになった。平成31年度は、放射線防護アカデミアの4学会の協力を得て、学会員へのWebアンケートを実施し、若手人材が減少している業種や業務の特定および若手のポスト獲得と中堅のキャリアアップに関する構造上の課題の抽出を行うとともに、当事者の生の声を集めた。

こうした調査の結果、若手がアカデミアポストを得るステージや中堅としてキャリアアップするステージにハードルがあり、この年代の会員の割合が減少していることや、若手が情報不足に対して不安を抱いており、研究職以外の仕事の紹介・斡旋、就活の体験談や35歳程度のキャリアパスに関する情報提供を求める声が寄せられた。

(今年度の検討の経緯と成果)

➤ 学会ごとの活動

日本放射線影響学会、日本放射線安全管理学会、日本保健物理学会では、年次大会やシンポジウムなど学会が主催するイベントを通じて、放射線防護人材の確保・育成に関連するセッションを企画・開催し、若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップを支援する場を提供した。また本事業に若手を参画させることで、若手の活性化を行った。

表 3. 放射線防護アカデミア参加学会主催による若手育成関連イベント

学会主催イベント	若手育成関連企画
日本放射線影響学会 第 63 回大会 (Web) 令和 2 年 10 月 14 日	第 7 回キャリアパス・男女共同参画委員会企画セミナー 学生を含めた 20 代若手会員と中堅・シニア会員とのグループディスカッション
放射線安全管理学会 第 19 回学術大会 (Web) 令和 2 年 12 月 11 日	若手セッション「若手研究者による放射線に関する研究紹介」 放射線生物学、核医学、放射線教育分野から 1 名ずつ若手が発表
日本保健物理学会 令和 2 年度企画シンポジウム (Web)令和 3 年 1 月 27 日	若手研究会企画セッション「学友会と若手研活動を通して見えた日本保健物理学会 ～未来に向けた提案～」 若手研、学友会の設立経緯とその活動、実績、課題や展望を報告

➤ 放射線防護アカデミアとしての取り組み

昨年度実施した放射線防護アカデミア参加学会の会員へのアンケート調査では、若手が欲する情報は様々で、個別対応が必要であると思われた。また今年度は、コロナ禍において学会活動に制限があると予想されたことから、急遽、以下の要領で Web による進路等個別相談会の実施を検討した。

- ・相談内容：進学、就職、転職等で、一件当たり 20 分程度
- ・相談機関：令和 2 年 9 月 1 日から 12 月 25 日の平日 16-19 時
- ・相談者：放射線防護アカデミア参加学会会員に限らない。複数名やグループでの申し込みも可
- ・相談員：放射線防護アカデミア学会員から選定
- ・事前予約制：申し込みフォームに記載された相談内容や希望日時から、相談員とのマッチングを行う

令和 2 年 9 月 1 日よりアンブレラ HP や学会のニュースでアナウンスを行うとともに、放射線教育に積極的な教員がいる研究室 8 か所に直接連絡して個別相談の利用を進めた。しかし相談者は、アカデミア参加学会外からの 1 人のみであった。

利用者がきわめて少なかった原因として、①Web は顔見知りのコミュニケーションには適当だが、初対面には向かない、②若手のニーズに合っていない、といったことが考えられる。また若手から積極的なアクションが行われることを前提とする企画は、若手にとって心理的ハードルが高いと思われる。

そこで、次年度は、Webinar 形式で、放射線防護に関する国際的な機関や委員会が保有する若手研究者の受け入れ制度を紹介したり、若手研究者の関心の高いテーマを選び、海外専門家と国内若手研究者が参加したりするイベントを企画・開催する。

(オ) 国際機関の報告書からの情報収集

(昨年度までの議論)

平成 31 年度、職業被ばく最適化推進ネットワークが諸外国における線量登録制度の現状（職業被ばくの種類を含む）について調査した際、「外部放射線に職業被ばくした個人をモニターするための技術的推奨事項（欧州委員会、2009）」を注目すべき文献と判断した。

(今年度の検討の経緯と成果)

原子力機構と量研では、以下の 2 つの報告書を翻訳し、アンブレラ事業内での検討や報告に利用した。

- 外部放射線に職業被ばくした個人をモニターするための技術的推奨事項（欧州委員会、2009）
 - ・報告書の内容：外部放射線の個人モニタリングに直接関連する欧州連合（EU）議会指令と理事会指令の実施面に関する指針に相当する文書。技術的推奨事項は、主に欧州の個人モニタリング・サービス業者の管理陣やスタッフを対象としている。製造業者、型式試験サービスを提供する研究所、承認手順を調整する国の承認当局、さらに政府機関が規制と指針を調和する際の参考になる。
 - ・報告書の利用：職業被ばく最適化推進 NW では欧州における登録制度及び職業被ばくの種類について調査し、各組織の登録や職業分類についてはまとめた（付属資料 3 に掲載）。特徴としては、欧州では測定機関からの線量データ（我が国の 1 cm 線量当量等）が主体であること、また、職業分類はかなり幅広く、自然線源（いわゆる NORM）からの被ばくも含めていることが明らかになった。
- 放射線および原子力災害時の精神保健および心理社会的支援のフレームワーク（WHO, 2020）
 - ・報告書の内容：1986 年のチェルノブイリや 2011 年の福島県で起きた原子力災害の教訓からは、他の災害や緊急事態と同様に、原子力災害は精神保健や心理的、社会的な状態に重大な影響を及ぼし、結果として人々の健康な暮らしや精神、身体面での健康に影響を及ぼすことが明らかである。しかしこれまで精神保健と心理社会的支援を原子力災害対応に融合するための実用的なツールはほとんどなかった。本書では、放射線・原子力災害時の精神保健と心理社会的支援のためのフレームワークを記載し、精神保健と放射線防護の共通項となる既存の知識をとりまとめた。
 - ・報告書の利用：2020 年 11 月に公表された本報告書の概要と作成の経緯等を国際動向報告会（令和 3 年 1 月 8 日）にて紹介した。

(2) 緊急時放射線防護に関する検討（付属資料2のサマリーを以下に記す）

①緊急時放射線防護ネットワークの活動

(ア) 緊急時放射線防護ネットワーク検討会の設置

原子力機構、量研、大学等の放射線防護分野の専門家及び緊急時放射線防護ネットワーク（以下「緊急時防護NW」という。）のサブグループ(Gr)の主査や幹事等から構成される緊急時放射線防護NW検討会（以下「検討会」という。）を設置し（表4）、令和2年度は3回の検討会を開催し、ネットワークの構築、活動のあり方等について検討を行った。

表4. 令和2年度緊急時放射線防護NW検討会構成員

外部有識者	松田尚樹(長崎大)、渡部浩司(東北大)、床次眞司(弘前大)、立崎英夫(QST)、栗原治(QST)、宮澤晃(東電HD)、佐藤将(原安協)、谷口和史(千代田テクノル;オブザーバー)
アンブレラ事業関係者	高橋知之(京大/PO)、神田玲子(QST/ネットワーク形成事業代表者)、大町康、野島久美恵(原子力規制庁)
原子力機構	百瀬琢磨、早川剛、高田千恵、中野政尚、吉田忠義、渡邊裕貴、木内伸幸、住谷秀一、高崎浩司、石川敬二、中根佳弘、山田純也、前田英太、横須賀美幸、富岡哲史

(イ) サブグループ(Gr)による専門家の要件(人材スペック)の明確化と改善およびガイドの素材整理とガイド素案の作成、教育・訓練カリキュラムの検討

緊急時防護NWの専門分野別の活動強化のため、Gr単位で原子力防災対応に係る専門家の支援活動のあり方を検討した。また個別分野毎に人材の確保、育成プラン作り及び教育用教材(専門家向け緊急事態対応ガイド)の作成に関する検討を行った。環境モニタリング、放射線管理、個人線量評価分野の各Grの活動は以下の通り。

▶ 環境モニタリングサブGr

- ・福島第一原発事故による環境影響の検討及び論文作成
茨城県東海・大洗地区の4つの事業所(JAEA原科研、核サ研、大洗研ならびに日本原電東海・東海第二発電所)における環境放射線モニタリングデータの収集・統合・検討結果が、保健物理誌に掲載された。
- ・専門家の要件(人材スペック)の明確化と改善に係る検討
EMCの各グループを構成する各班への派遣専門家が身に着けるべき力量項目及びその詳細についての明確化と改善を継続するとともに、随時ネットワーク検討会や国・県の立場からのコメントを受け、検討を進めた。
- ・ガイドの素材整理とガイド素案の作成、教育・訓練カリキュラムの検討
国内外の法令、指針、環境モニタリング、放射線影響に関する知識、スキル、立地県特有の防災・避難・モニタリング等のマニュアル類、リスク管理・公衆コミュニケーション手法に関する文書等を収集し、取捨選択し、環境モニタリング分

野における専門家が力量を獲得するために必要な教育・訓練カリキュラムの一覧表を作成した。また、コロナ禍の下で、教育・訓練を安全にそして効果的に進めるためのeラーニングの一部適用についても検討を開始した。

➤ 放射線管理サブ Gr

- ・専門家の要件（人材スペック）の明確化と改善に係る検討
避難退域時検査の要員の役割を想定し、自治体から依頼を受けて放射線技師会や事業者等から派遣された多様なレベル・職種・職歴の要員に対して必要な指導・監督を行った。また検査会場の管理運営を担う自治体職員（検査責任者）に対して専門家の視点で指導・助言を行うために備えるべき要件（力量）を整理した。
- ・ガイドの素材整理とガイド素案の作成、教育・訓練カリキュラムの検討
整理した専門家が備えるべき力量のポイントを更にブレークダウンし、それに応じた教材の選定等を進めた。また、力量のクラス分け（初級、中級、上級）を行うことで、依頼側のニーズを明確にすると共に、専門家としての研鑽の目標を明確にした。茨城県東茨城郡大洗町にある株式会社千代田テクノルの原子力防災機器展示棟への視察及び宮城県原子力防災訓練に向けて実施した避難退域時検査訓練の事前演習への視察を行い、知見を反映した。

➤ 個人線量評価サブ Gr

- ・個人線量評価分野におけるネットワーク活動のあり方についての検討
防災基本計画や原子力災害対策マニュアル等の国文書を確認した結果、原子力災害対応における個人線量評価に関しては具体的な活動の目的、スキームが明確にはなっていない現状を確認した。また個人モニタリングの目的等、活動の土台となる考え方が明確化できていない状態であり、今年度中には特段の進展はないことを確認した。

（ウ）東京電力福島第一原子力発電所事故等過去の原子力事故を教訓とした防災体制に適応した防護 NW 活動制度設計の検討

東京電力福島第一原子力発電所事故等過去の原子力事故を教訓として構築された現在の原子力防災対応組織の状況に適合した防護 NW 活動とするため、運営主体、構成員、サブ Gr、ネットワークの運営のあり方の観点について、昨年度までの議論をまとめて、防護 NW と原子力防災対策組織の関係を整理した（図 4）。また平時の活動の中心となる専門家に対する研修開催（力量付与）やネットワーク登録管理の制度案をとりまとめた（図 5）。

また、昨年度抽出したネットワーク制度の運営に係る課題について対応策の方針をまとめた（表 5）。上記の対応策の方針は、ステークホルダー会合や検討会での議論を踏まえて、緊急時防護 NW の平時と緊急時のあり方を確定した。

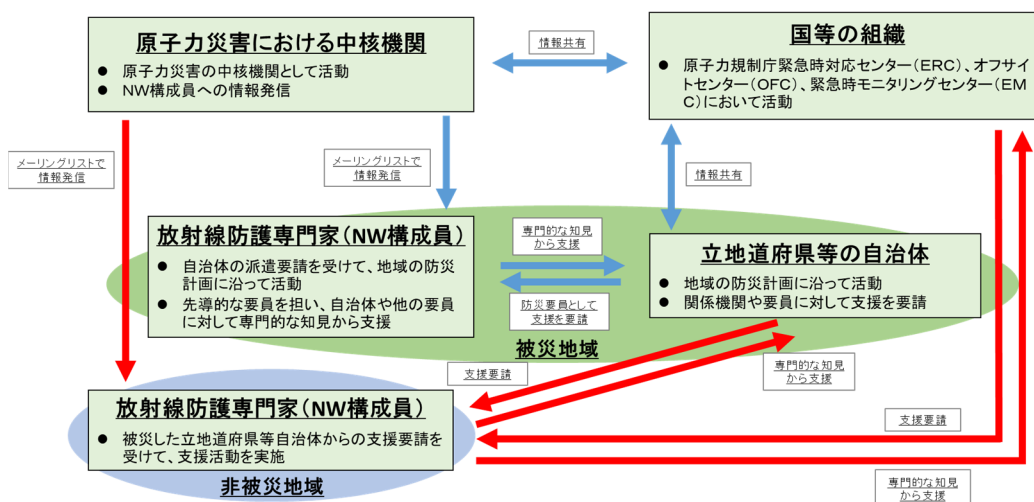
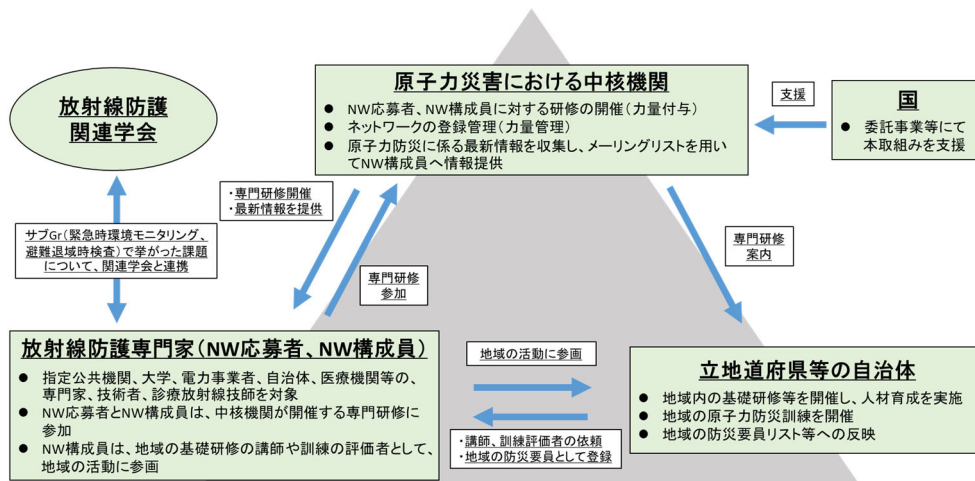
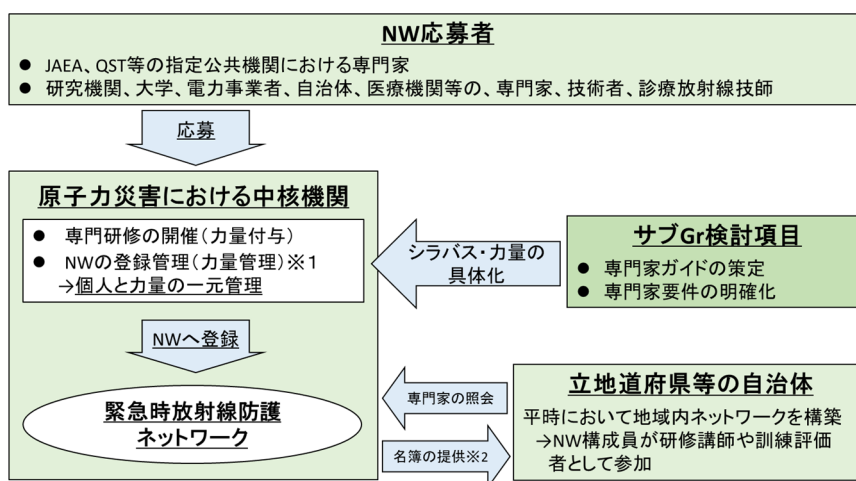


図 4. 緊急時放射線防護ネットワーク制度の全体像 平時(上)、緊急時(下)



※1 JAEA、QST、原安協等が開催する既存研修の受講や国訓練への参加実績等も力量として評価
 ※2 あらかじめ、中核機関と、個人や所属組織等の間で氏名、連絡先等の提供について了承を得る

図 5. 緊急時放射線防護ネットワーク制度による平常時の力量付与及び力量管理

表 5. ネットワーク制度の運営に係る課題と対応策

	課題	対応策
1	発展的に持続可能な仕組み	<ul style="list-style-type: none"> ・国の適切な支援を得て原子力災害における中核機関を指定公共機関(QST、JAEA)とすることについて検討する。 指定公共機関の緊急時支援組織の構成員をコアメンバーとして活動を展開する。指定公共機関から派遣される専門家等に対して定期的実施されている教育研修の仕組みの中に、外部のメンバーが加わる形でネットワーク活動を維持、拡大させていく。外部のメンバーは受講者あるいは講師として教育訓練に参加する。 ・事務局機能を確保するため適切な方法で予算を確保する。
2	既存のネットワークとの連携	<ul style="list-style-type: none"> ・関連する学会と連携して「原子力防災×放射線防護」に関連するシンポジウムを定期的開催していく。 ・大学で実施している専門教育講座(例:弘前大学緊急被ばく医療プロフェッショナル養成講座)との連携。
3	シーズ、ニーズがマッチしたネットワークサブ Gr の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力災害対応体制を考慮して緊急時環境モニタリング、放射線管理(避難退域時検査)、個人被ばく線量測定・評価の3分野でのサブ Gr を設置している。
4	ネットワーク構成員のリストの整備	<ul style="list-style-type: none"> ・ネットワーク登録にあたって実施する教育研修の受講歴、防災訓練参加歴をリストとして維持管理していく。個人の履歴に関する情報のインプット方法は、自己申告、教育訓練主催者等の参加者名簿からの入力など複数の方法を来年度検討する。
5	人材の確保、育成が図られるような教育的な事業の取り組み	<ul style="list-style-type: none"> ・ネットワーク活動の中心的な事業として力量の明確化と力量の付与のあり方を明確化して教育訓練を行う活動を実施する。
6	ネットワークとして取り組むべき技術的な課題の設定とその解決に向けた活動の展開	<ul style="list-style-type: none"> ・教育訓練を通じて見出された技術的な課題に対して、ネットワーク構成員が主体的に研究体制を編成し、研究公募等の仕組みを利用して課題解決を行う。また、関連学会と連携して専門研究会の設置やシンポジウムの開催等課題解決に向けた活動を行う。
7	国際的な標準と整合したアウトプットの創出	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急時放射線防護に関連する国際機関の文書等のリスト等を整備しネットワークメンバーが活用できるようにする。

(エ) 人材の登録・認定・管理方法の検討

先行して実施されている教育研修事業の概要と NEAT 指名専門家に期待される役割についてまとめ、それらの調査結果を踏まえてネットワーク活動に反映すべき事項についてまとめた。

➤ 内閣府による原子力災害対応要員向けの教育研修事業の活用に関する検討

基礎研修は、放射線防護分野の専門家にとっては基礎的な内容であり、ネットワーク構成員は必ずしも受講の必要はないと考えられる。専門研修は、受講対象が限定されているため、教育研究機関や原子力事業者等に所属する放射線防護分野の専門家が受講する機会が得られにくいと考えられる。一方、内閣府の承認が得られれば、教材等を利用して防護ネットワーク活動の一環として防護ネットワークの構成員に対して教育研修を行うことができる可能性がある。

➤ 放射線防護分野における NEAT 指名専門家の役割

関係各機関から参集した原子力災害対応要員は基礎的な教育訓練を受講してい

ても、放射線測定等を日常的に実施している者は限られているので、指名専門家はそれぞれの活動において指導的な役割を期待されることが多い。そこで、原子力防災に関する知識（法令、機構防災業務計画等）や原子力緊急時対応概要に関する知識（緊急時の体制、活動概要、連絡体制、活動場所、招集・参集の方法）なども必要となる。

▶ 人材の登録、認定、管理方法の検討結果

環境モニタリング、放射線管理、個人線量評価等の分野別に専門家の防災対応に係る力量を明示し、標準化された教育教材を用いた講習及び訓練への参加を通じて対応能力の維持向上を進める。

今年度は、オフサイトセンターに設置される緊急時モニタリングセンター（EMC）が実施する緊急時環境モニタリングと、避難退域時検査の対応に係る専門家の力量と力量を付与するための教材に関するリストの作成をおこなった。今後、講習等を受講した人材のリストを整備し、緊急時には行政機関関係者が活用できる仕組みを構築していく。

▶ 専門家向けのガイドの構成案の検討結果

共通編、個別編、資料編から構成された原子力防災を支援する放射線防護関係者のための手引き（仮称）をA4、10ページ程度にまとめる。

②ステークホルダー会合の開催

（ア）ステークホルダー会合の開催

昨年度までに取りまとめたネットワーク制度案を日本保健物理学会第53回研究発表会の企画シンポジウム：放射線防護の喫緊課題への提案「第2部 緊急時対応人材の確保～ネットワーク構築の条件～」(令和2年6月30日)で報告し、ステークホルダーからの意見を聴取した。収集した意見を反映した制度案を日本放射線安全管理学会第19回学術大会企画セッション：令和2年度放射線防護アンブレラ事業緊急時放射線防護ネットワーク構築「緊急時放射線防護ネットワークのあり方について～緊急時環境モニタリングと避難退域時検査の支援のために～」において報告した。収集した意見を参考に制度案をブラッシュアップした。

（イ）原子力事業者へのアンケートの実施

原子力防災に取り組む事業所等のグッドプラクティスを把握し、防護ネットワーク活動の制度設計に資するため、原子力施設の放射線管理を専門的に行う人材を擁する原子力事業者に対してアンケートを実施した。アンケートは電気事業連合会放射線管理委員会の協力を得て、令和3年1月に12社の原子力事業者に対して実施し、2月に各社から回答を受領したところ（回答率100%）である。分析とその結果の反映は次年度実施する。

(3) 職業被ばくの最適化推進に関する検討（付属資料3のサマリーを以下に記す）

①国家線量登録制度の検討

(ア) ステークホルダー会合を踏まえた線量登録制度案の検討

国家線量登録の確立に向けての具体策を関係機関が共同して検討するため、原子力機構を運営主体とした「国家線量登録制度検討グループ」を昨年度に引き続き設置した（表6）。検討グループの会合は、令和2年9月10日及び令和3年1月15日の2回オンラインで開催した。会合では、昨年度検討した4つの制度案について（表7）、日本保健物理学会及び日本放射線安全管理学会でのステークホルダーからの意見を踏まえた検討を進めた。

表6. 国家線量登録機関検討グループの構成員

	氏名	所属
主査	吉澤 道夫	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
委員	飯本 武志	東京大学環境安全本部
委員	伊藤 敦夫	放射線影響協会 放射線従事者中央登録センター
委員	岡崎 龍史	産業医科大学 産業生態科学研究所
委員	渡部 浩司	東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター
委員	神田 玲子	量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所
委員	百瀬 琢磨	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所

➤ ステークホルダー会合（1回目）の概要と制度案への反映

日本保健物理学会第53回研究発表会企画セッション（令和2年6月29日）において、主に放射線管理者を対象に検討した4つの制度案を説明して、今後の進め方（特に医療分野へのアプローチ）を検討した。

4つの制度案のどれを支持するかWeb投票でアンケートを実施した。その結果、①国家線量登録機関による一括管理が54%、②及び③の事業者設置機関が30%、④業界・分野別が14%となり、最も理想的な制度①を支持する者が多かった。ただし④が支持されなかった理由としては、具体的イメージがわからないことも考えられた。また質疑においては、大学単体ではシステム整備が困難なため情報の共通化・標準化が望まれる、医療分野では線量管理自体が課題である、線量管理の一元化の問題は政治的な働きかけがないと進まない、といった意見・コメントが出された。

アンケート結果では、一括管理を支持する者が多かったが、実現へのハードルが高いことから、制度案④をスタートとして、そこから案②や③に展開していく案もオプションとすることとした。また大きなステークホルダーである医療関係者へのアプローチの検討が必要であることから、医療放射線防護連絡協議会に協力を求め、研修会等の機会を活用して説明から始めることとした。なお、費用負担は制度を決める上で

重要な情報であるが、登録者数の仮定やサービスの範囲により登録制度のコスト試算は大きく変わる。特に、医療分野では登録対象となり得る人数（複数事業所で勤務している人数等）が不明なため、次年度に Web 等を活用した実態調査を行うこととした。

➤ ステークホルダー会合（2回目）の概要と制度案への反映

日本放射線安全管理学会第19回学術大会企画セッション（令和2年12月10日）では、各制度案に管理の合理化に関する事項を追加するとともに、各制度の展開案（制度案④をスタートとして、そこから案②や③などに展開していく）を追加した報告を行った。また制度案④の具体例として、原子力（除染）分野の制度立上げ及び大学連携ネットワークでの先行事例も報告した。

意見・コメントとしては、内部被ばく管理の扱い、線量の精度の検討があったが、最も多かったのは費用に関するコメントであった。

これを受けて、費用の検討を更に進めること及び制度構築を分野全体に進めるには国の関与（制度構築に向けた働きかけ等）について議論し、次年度に更に検討する事となった。また、活動の継続については、上記の医療分野への継続的な働きかけとともに、引き続き大学関係ネットワークとの連携を進めることとした。

（イ）文献調査を用いた線量登録制度案の検討

昨年度、諸外国における線量登録制度の現状（職業被ばくの分類を含む）について調査したが、その際、注目すべき文献として、欧州におけるガイドライン Radiation Protection No.160（2009）“Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation”があった。今年度、本文献を翻訳し、欧州における登録制度及び職業被ばくの分類について調査した。その結果、各組織が図6に示す役割で登録等を行っていること、また、その職業分類が表8のとおりとなっていることがわかった。

その特徴としては、欧州では測定機関からの線量データ（我が国の1cm線量当量等）が主体であること、また、職業分類はかなり幅広く、自然線源（いわゆる NORM）からの被ばくも含めていることが挙げられる。

表 7. 線量登録制度案の比較の比較

制度	①国家線量登録機関による一括管理	②事業者設置機関による一括管理	③事業者設置機関による管理(対象限定)	④業界・分野別の管理(対象限定)
対象	全ての放射線業務従事者	全ての放射線業務従事者	一部の放射線業務従事者 1. 複数事業所や異動が頻繁な作業者 2. 一定線量(1 or 2mSv)以上の作業者 ただし原子力・除染は全て(制度有)	一部の放射線業務従事者 1. 複数事業所や異動が頻繁な作業者 2. 一定線量(1 or 2mSv)以上の作業者 ただし原子力・除染は全て(制度有)
目的・役割	1. 規制の有効性確認 2. 日本人の完全な職業被ばく線量統計の作成、国民線量の把握 3. 疫学研究、UNSCEAR等へのデータ提供 4. 労災保険に係る被ばくデータ提供 5. 被ばく前歴等の把握(照会対応) 6. 個人被ばく線量記録の一括保存	1. 被ばく前歴等の把握(照会対応) 2. 労災保険に係る被ばくデータ提供 3. 個人被ばく線量記録の一括保存 ✓ 法的位置付け要 △ 国からの委託等があれば対応 1. 規制の有効性確認 2. 日本人の完全な職業被ばく線量統計の作成、国民線量の把握 3. 疫学研究、UNSCEAR等へのデータ提供	1. 被ばく前歴等の把握(照会対応) 2. 労災保険に係る被ばくデータ提供 3. 疫学研究等へのデータ提供	1. 被ばく前歴等の把握(照会対応) 2. 労災保険に係る被ばくデータ提供 3. 疫学研究等へのデータ提供
費用負担	・機関の運営は国の予算 ・各事業者は人数に応じた手数料負担	・各事業者が人数に応じた費用を負担	・各業界での取組みに依存	・各業界での取組み
制度導入に伴う個人線量管理の合理化	1. 被ばく前歴の把握が容易 2. 線量記録の保管義務の免除 3. ある線量レベルに達した場合の作業者及び雇用主への通知	1. 被ばく前歴の把握が容易 2. 線量記録の保管義務の軽減 3. 5年間積算(実効線量、眼の水晶体線量)が容易	1. 被ばく前歴の照会対応 2. 線量記録の保管義務の軽減? 3. 5年間積算(実効線量、眼の水晶体線量)が容易	1. 被ばく前歴の把握が容易 2. 線量記録の保管義務の軽減? 3. 5年間積算(実効線量、眼の水晶体線量)が容易
線量管理制度としての完全さ	国としての運用で、完全さは高い	参加状況に依存(規制要求必要)	必要な者に限定した制度(規制要求必要)前歴把握の完全さには欠けるおそれ	必要な者に限定した制度。業界の取り組みに強く依存
役割分担の明確さ	国がここまで実施する必要性が論点	基本機能の分担が明確	基本機能の分担が明確	管理制度が統一されないため、曖昧さが残る
費用負担	国の負担が大	受益者負担が明確 事業者の負担大	受益者負担が明確 事業者の負担は②より限定的	管理方式に依存
個人情報管理の徹底度	一括管理のため① ただし、国としては重い	設置機関が一括管理するため①	設置機関が一括管理するため①	各々の制度に依存するが、他に比べて低い

欧州の職業被ばく線量データ管理

・個人線量測定・管理に関する技術的勧告

- Radiation Protection No.160 (2009)
"Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation"

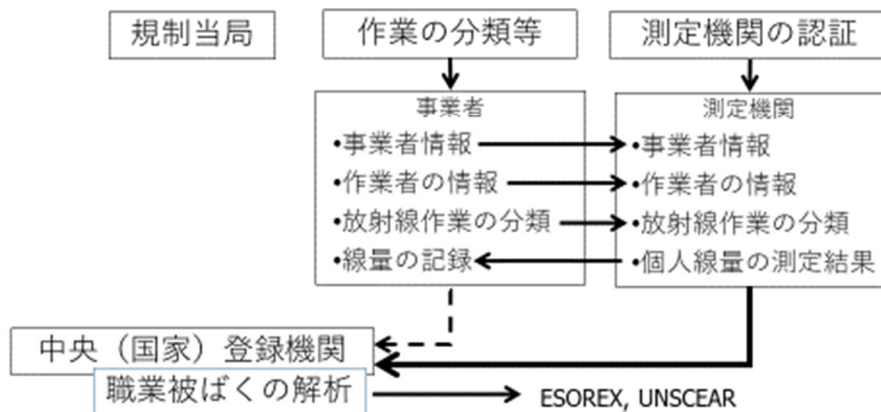


図 6 欧州における職業被ばくデータ管理

表 8. 欧州における職業被ばくの種類(標準例)

活動分野	具体的な行為
原子力	ウラン採鉱(地下/地上)、ウラン精錬、ウラン濃縮及び転換 原子炉運転(常勤)、原子炉運転(保守) 燃料再処理(酸化物/金属) 核燃料サイクルに関する研究
医学	放射線診断(従来法、特殊な方法)、歯科放射線学 放射線治療(外部線源)、小線源法(手動、アフターローディング) 生物医学研究 その他すべての医学利用
工業	工業照射、工業用ラジオグラフィー、発光剤、RI 製造、検層、 加速器運転、その他すべての工業利用
自然線源	民間飛行、ラドン、 採掘(石炭:地下/地上)、採掘(石炭以外:地下/地上) その他の採掘(リン酸塩、石油・ガスなど)
その他	教育機関、獣医学、他 原子力船及び補助施設、その他軍事利用

②線量測定機関認定制度の検討

(ア) 線量測定機関認定制度検討グループによる検討

個人線量測定の信頼性確保に係る認定制度の検討については、昨年度と同様、日本適合性認定協会が運営主体である「放射線モニタリングタスクフォースグループ」に一本化して検討を進めた。当該グループのメンバーを表9に示す。

個人線量測定の信頼性確保に係る認定制度については、審査基準（ISO/IEC 17025「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」）に追加される個人線量測定についての補足要求事項（JAB RL380）にしたがって、個人線量測定サービス機関の認定が実施された。一方、原子力事業者の中には、現在のJAB RL380が対象としていない電子式個人線量計を用いている事業者があることから、昨年度に認定範囲に電子式線量計を含める改訂を検討し、令和2年4月にJAB RL380の改訂版が発行した。

今年度は、次年度に眼の水晶体の線量限度が変更されることに伴い、3mm線量当量を用いた眼の水晶体のモニタリングが開始されることから、これに向けた改訂を検討した。2回の会合（令和2年4月27日及び6月18日、いずれもオンライン会議）を行い、認定対象に眼の水晶体モニタリング用の個人線量計及び3mm線量当量を導入することを検討し、令和2年10月に改定版が発行した。

表9. 線量測定機関認定制度検討グループ

	氏名	所属
主査	吉澤 道夫	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
委員	辻村 憲雄	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所
委員	黒澤 忠弘	産業技術総合研究所 計量標準センター
委員	柚木 彰	産業技術総合研究所 計量標準センター
委員	當波 弘一	放射線計測協会
委員	中村 吉秀	株式会社千代田テクノル
委員	寿藤 紀道	個人線量測定機関協議会
オブザーバ	小口 靖弘	個人線量測定機関協議会
オブザーバ	担当者	原子力規制庁
オブザーバ	担当者	厚生労働省労働基準局労働衛生課
オブザーバ	担当者	関係電力事業者

(イ) 基礎データ収集作業

個人線量測定機関の認定には技能試験を義務づけている。この技能試験では、測定機関の線量計に放射線の種類、エネルギー、入射角度等の条件を変えて照射を行い、測定機関には照射に関する情報は与えずに測定機関から測定値を報告してもらい、その測定値と基準照射量を比較して、一定の許容範囲に入っているかを試験する。我が

国における基礎データが少ないことから米国自主試験所認証プログラム（NVLAP）を参考に現在の許容範囲を設定しているが、その妥当性を確認するため、データが少ない線種で基礎データの収集を行った。

昨年度までは X 線に対するデータを取得したが、今年度は β 線の入射角度を変えた照射について基礎データの収集を行った。照射は、国家標準とトレーサビリティを有する（JCSS 登録機関）で行った。また、関連する JIS の基準及び技能試験の判定基準との比較を行うデータ解析も実施した。その結果、 β 線の角度を変えた照射に対しても、昨年度までの X 線と同様、現在の技能試験の判定基準は妥当であることが明らかになった。

（ウ）外国調査

国際標準化機構（ISO）の放射線防護分科会（TC85/SC2）基準中性子場に係るサブグループ（WG2/SG3）専門家会合（令和 2 年 11 月 17 日から 19 日、オンライン会合）に専門家を参加させ、放射線標準校正技術関連の国際規格に関する情報を収集した。

サブグループ会合では中性子標準場における中性子線の発生方法に関する規格（IS08529-1）の改訂案について前回に引き続き議論した。また、国際規格に関する最新の動向を入手した。この結果は、今後の技能試験方法の検討に活用できる。

(4) 放射線防護分野のグローバル若手人材の育成（付属資料1のサマリーを以下に記す）

①国際的イベントへの若手専門家の派遣

（昨年度までの進捗）

平成29年度より、放射線防護人材の確保や若手の育成の必要性が議論されており、さまざまな若手の活性化方策が提案される中、平成30、31年度は、国際的イベントへの若手専門家派遣事業を行い、放射線防護分野のグローバル若手人材育成のために具体的なアクションを行った。

（今年度の検討の経緯と結果）

第11回代表者会議では、OECD-NEA主催 International Radiological Protection School、IAEA主催 International Conference on the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industry および IAEA 主催 International Conference on Radiation Safety: Improving Radiation Protection in Practice の3つの会合を若手派遣対象会合として決定した。平成31年度に見直した「国際的機関が主催するイベントへの若手派遣事業」の選考の手順と基準に従い、応募者の選考を行い、IAEA主催の International Conference on Radiation Safety に小池弘美氏（東京大学）を派遣することとした。しかしコロナ禍のため、当該イベントがWeb開催となり、若手派遣および派遣者による報告は行われなかった。

②若手研究者の主体的活動の支援

（昨年度までの進捗）

平成30年度のNW合同報告会では、若手の組織の代表2名が若手を活性化するための具体的な方策として、若手同士の交流の支援や表彰、博士号取得への支援、競争的資金の若手枠の設置などを提案した。こうした提案の実現について代表者会議で議論を行い、学会単位での検討を依頼するとともに、アンブレラ事業としてはアンケート調査を通じて、実態把握や若手の声を集めることとした。また平成31年度から学会による若手の支援や若手を交えた検討や若手研究者の主体的活動の支援を開始した。

（今年度の検討の経緯と結果）

- 学会による若手への支援や若手を交えた学会活動
 - ・日本放射線影響学会では、学会とは別組織として活動してきた「若手放射線生物学研究会」を「若手部会」として当該学会に統合し、財政的基盤を安定させた。また学会内の主要な委員会に若手部会が推薦する会員を含めて、14名の40歳未満の若手会員を委員として加えた
 - ・日本放射線安全管理学会では、研究活動実績になる若手奨励金事業を規程化した。
 - ・日本保健物理学会では、「若手研究会（40歳以下の有志学会員）」、「学友会（正・準学会員有志）」、「教員等協議会（教職員有志）」の組織を再整備し、確実な活動

実施のための予算を優先的に確保、担当理事を新たに設置した。また「若手研」「学友会」及び「教員等協議会」の3組織の合同会議を月1回のペースで開催、相互の情報・課題共有や課題解決に向けた議論等を通じて連携を強化した。

➤ 若手研究者の主体的活動の支援

- ・日本放射線安全管理学会では、第19回学術大会（Web）において若手が「若手研究者による放射線に関する研究紹介」を開催し、放射線生物学、核医学、放射線教育分野から1名ずつ発表を行った（令和2年12月11日）。
- ・日本保健物理学会では、令和2年度企画シンポジウム（Web）において若手研究会企画セッション「学友会と若手研活動を通して見えた日本保健物理学会～未来に向けた提案～」が開催され、若手研究会や学友会が、それぞれの検討結果を報告した（令和3年1月27日）。また若手研究会主催の「内部被曝モデル勉強会（シリーズ）」がオンライン形式で開始された。

また、代表者会議や日本放射線安全管理学会では、昨年度行った、放射線防護アカデミア参加学会合同の会員へのアンケート調査結果を誌上発表して、放射線防護人材の枯渇の問題について、エビデンスベースで発信した。

松田尚樹、中島覚、放射線安全管理人材の確保・育成に関する現状把握のための調査結果報告、日本放射線安全管理学会誌、19(2)、118-121（2020）。

神田玲子、飯本武志、甲斐倫明、児玉靖司、小林純也、酒井一夫、富永隆子、中島覚、細井義夫、松田尚樹、杉浦紳之、百瀬琢磨、吉澤道夫、放射線防護関連学会の合同アンケート調査で明らかになった人材確保・育成の課題、日本原子力学会誌ATOMOZ 62(12)、47-52（2020）。

神田玲子、飯本武志、甲斐倫明、児玉靖司、小林純也、酒井一夫、富永隆子、中島覚、細井義夫、松田尚樹、杉浦紳之、百瀬琢磨、吉澤道夫、放射線防護関連学会会員へのアンケート調査の報告—緊急被ばく医療人材に関する現状分析—、日本放射線事故・災害医学会誌（投稿中）

2. 放射線防護アンブレラによる情報共有と合意形成

(1) 国際動向に関するアンブレラ内の情報共有

①国際動向報告会の企画運営・報告書作成

「放射線防護の基礎となる放射線リスク評価に関する国際動向」をテーマに第4回放射線防護に関わる国際動向報告会を開催した（令和3年1月8日、ZOOM ウェビナー）。企画会議（令和2年10月27日）は、ICRP 主委員会の甲斐委員を招へいして開催され、テーマに関連する放射線防護に関連する代表的な国際的機関（原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、国際放射線防護委員会（ICRP）第一専門委員会（C1）、米国放射線防護審議会（NCRP）、国際原子力機関（IAEA）放射線安全基準委員会（RASSC）、OECD/NEA 放射線防護・公衆衛生委員会（CRPPH））の動向の情報共有を行うとともに、放射線リスク評価に関する国際動向というテーマを中心に円卓討議を行うことを決定した。

本報告会は新型コロナウイルス感染防止のため、登壇者はそれぞれ離れた場所からビデオ会議システムに接続し、一般参加者への報告会のライブ配信を行った。登壇者は9名で、一般参加者は100名であった。以下に報告会の概要をまとめる。

(ア)国際機関の活動報告

- UNSCEAR： UNSCEAR におけるリスクの定義が紹介され、2012年附属書Aにおけるリスク推定に関する放射線被ばくと健康影響の帰因性についての概説と附属書Bにおけるリスク推定と予測における不確実性のレビューの紹介があった。
- ICRP 第1専門委員会： C1の下に設置されているTGの紹介があった。TG64ではプルトニウムおよびウランといった α 核種についてがんのリスクの検討がなされており報告書がパブリックコメントの反映を対応していること、TG91では低線量や低線量率の放射線によるリスク推定について検討がなされており、報告書が完成していると紹介があった。TG99はC5からの流れを受け、標準動物や標準植物のモデル化の検討がなされていると報告があった。その他にもTGの前段階として、「予備的な」段階と位置づけされるワーキングパーティについて、「放射線による循環器疾患」「子孫への影響および継世代影響」「異なる線種の影響」「デトリメント算定のためのパラメータの検討」の紹介があった。
- NCRP： 直接しきい線量なし（LNT）モデル/仮説、中枢神経系への宇宙放射線影響に関する検討や低LET放射線による神経変性疾患に関する報告について紹介があった。生物学と疫学の統合に関する検討では、NCRPはCDCから財政支援を受け、CommentaryNo.24とReport No.186を刊行していることや、現在の検討状況について紹介があった。循環器疾患に関する検討ではICRPでのC1傘下でTG設置の検討中であること、またNCRPのCommentaryNo.27とReport No.180の紹介、PAC1での検討状況について報告があった。
- IAEA-RASSC： 令和2年11月に開催された放射線安全に関する国際会合の結論と

して、倫理的な考慮は今後、防護に関する意思決定においてより重要な役割を果たすこと、防護の基本原則である正当化と最適化を改善する必要があること、最適化に関する決定は線量低減に焦点を当てすぎており、総合的なアプローチが必要であること、規制機関はグレーデッドアプローチの適用を強化する必要があること、免除とクリアランスの概念はより広範な応用が必要であることなどの 10 の Key areas の報告があった。また個別安全指針「規制免除の概念の適用」

(DS499) と「ラドン被ばくに対する作業者の防護」(DS519) については、それぞれ国際基本安全基準 (GSR Part 3) の関連する要件が紹介され、指針の策定状況や関連する他文書の紹介があった。

- OECD/NEA-CRPPH：検討が開始された CRPPH 戦略的方向性の更新が紹介され、次期 ICRP 主勧告に対して CRPPH として実践的インプットを提供する戦略目標が強調されていることが紹介された。また最近開催されたワークショップである「ステークホルダーの関与：リスクコミュニケーション (2019)」と「最適化：合理性の技術の再考 (2020)」で得られた知見や課題が報告された。CRPPH では、人と環境の防護のためのリスク管理の全体的な最適化を達成するため、重要な課題についてさらに理解を深めることに特に重点が置かれていることが紹介された。

➤

(イ) パネルディスカッションでの議論

ICRP 第 2 専門委員会、同第 4 専門委員会、WHO、ICRP 主委員会からの活動紹介の後、ファシリテーターから 6 つのテーマが提示され、最新の国際機関の動向を踏まえ、今後どのような分野で知見が変わる可能性があるのか、また我が国で期待される取組みについて、研究や規制の観点から意見交換が行われた。

➤ テーマ 1：低線量・低線量率のがんリスク評価 DDREF 方法論

- ・ NCRP では放射線加重係数と組織加重係数は ICRP の主勧告に従っている。
- ・ JAEA と RERF が共同して、原爆線量評価に用いる人体デジタルファントムの精密化を行っているが、光子エネルギースペクトルとリスクとの関連の議論はまだ行われていない。ICRP TG115 の RBE の議論も組織応答や宇宙を見据えた検討が中心。
- ・ 近年、ロシアのマヤックの疫学データ等、慢性に係る線量率効果の評価のデータがでてきているが、DDREF が 2 を超えるような疫学情報は少ない。
- ・ ICRP の TG では、生物では発がん実験データと疫学データの分析によって検討が行われており、2 を超える値を示す情報は少ないのが現状であるが、環境研と放医研のデータのプール解析から、DREF を 3 と推定した論文が発表された。

➤ テーマ 2：がんリスクの修飾因子

- ・ デトリメント評価では、がんの致死性が配慮されているが、昨今の治癒率の向上をどのようにリスクやデトリメント評価に反映するかは課題。
- ・ 原爆データを現代の日本人や海外の人種に適用する場合、ERR モデルを使うとベー

スラインが重要になってくる。

- ・リスク評価では、非被ばく集団のベースラインの罹患率が重要になってくる。デトリメントには ICRP 主勧告の改訂時期の治癒率・致死率が考慮されるのではないか。
- ・今後はデータを世界で平均化することの意味を考えることが重要になってくる。
- ・がんの修飾因子が問題となるとすれば、高線量の場合である。
- ・リスク評価は複雑化することが許容されるが、放射線防護ではどこまで必要か、不確かさを減らす考慮が必要になる。

➤ テーマ3：ラドン・子孫核種の線量評価とリスク評価

- ・UNSCEAR では2019年レポートの中でラドンの線量評価について記載されているが、線量換算係数に関しては従来の変更に必要はないという結論である。
- ・ICRP では、放射線防護のための線量評価を疫学データの比較から行ってきたが、最新は呼吸気道モデルをベースとする方法に変えた。その結果、不確かさの範囲であるが、線量換算係数にICRPとUNSCEARとの間で違いが生じている。
- ・ラドンの線量換算係数に関するIAEA技術会合では、ラドン222の参考レベルを1,000Bq/m³を超えない値という幅で示しており、直ちに基準に関する要件を変更する必要はないと結論付けている。
- ・現在、IAEAではILOと共同で個別安全指針DS519を作成中であり、今後、ラドンの線量換算係数の使用方法に関する国際的なコンセンサス文書として取りまとめられる予定である。

➤ テーマ4：不確かさ、リスク推定とリスク予測

- ・不確かさには知識の不足によるもの、統計データのばらつきに起因する変動、性差や年齢などの取り扱いの影響などがあり、整理が必要である。防護では、ある程度シンプルにしないと、実務を複雑化することにもなりかねない。
- ・従来、不確かさを避けるために防護上は安全側をとってきた。それとは別に真の値を探すアプローチの継続も必要になってくる。
- ・リスク予測にはリスクの背後にあるメカニズムの理解が必要である。一方で、低線量における生物学的な実証の難しさがあることも認識しておくことが必要である。
- ・過去に起きた事例に対するリスク推定（放射線起因性）と防護上のリスク予測の区別が専門家の間でもできていない。

➤ テーマ5：Graded approach、合理性、規制免除

- ・ICRPでも被ばく状況の違いによるReasonablenessの違いの議論が始まった。
- ・ICRPの考え方は、ALARAを定量化することから被ばく状況が変わってきた。NEAでは放射線だけでなくwell-beingを視野に入れるようになってきた。
- ・ICRPはReasonablenessとTolerabilityのTGをEthicsに位置付けたことから、防護の根本的な考え方の一つとして取り入れるのではないか。
- ・Reasonableにはpracticalやfairnessといった意味もあり、今後は方法論のfairnessが重要になり、より倫理面での議論が重要になる。

➤ テーマ6：リスコミュニケーション

- ・ IAEA は、緊急時におけるパブリックコミュニケーションに関する共通安全指針を令和2年に発行した。この指針では、放射線起因性に関するUNSCEAR2012年レポートを踏まえ、放射線の健康影響を3つの色に分けて、尺度を示しているが、これらの指針の内容が実際の社会でどこまで機能するのか、議論する余地がある。
- ・ WHO は、緊急時のコミュニケーションに関する報告書を公開したが、コミュニケーションがどこまで一般化可能か疑問である。ラドンや小児の医療被ばくのリスクコミュニケーションに関するWHOレポートは、平時用なので日本でも利用可能。

(ウ) 報告会により収集した情報の展開

本報告会で収集した情報は報告書に取りまとめ、本事業HPにおいて公表された。

表 10. 第4回放射線防護に関わる国際動向報告会
(令和3年1月8日、ZOOM ウェビナー)プログラム

時間	内容(敬称略)
13:00～13:10	事務連絡:ウェビナーに関する諸注意
13:10～13:15	開会挨拶:高山 研(原子力規制庁)
13:15～13:30	講演「UNSCEARにおけるリスクに関する検討状況」 講師:川口 勇生(量子科学技術研究開発機構)
13:30～13:45	講演「ICRP 第1専門委員会(C1)における検討状況」 講師:酒井 一夫(東京医療保健大学)
13:45～14:00	講演「米国放射線防護審議会(NCRP)での放射線リスクに関する最近の検討状況」 講師:浜田 信行(電力中央研究所)
14:00～14:15	講演「IAEA 放射線安全基準委員会(RASSC)における最近の検討状況」 講師:荻野 晴之(原子力規制庁)
14:15～14:30	講演「OECD/NEA 放射線防護・公衆衛生委員会(CRPPH)における最近の検討状況」 講師:本間 俊充(原子力規制庁)
14:30～14:40	休憩
14:40～16:55	パネルディスカッション 「放射線リスク評価に関する国際動向」 ファシリテーター:[ICRP MC]甲斐 倫明(大分県立看護科学大学) パネリスト:[ICRP C1]酒井 一夫(東京医療保健大学) [ICRP C2]佐藤 達彦(日本原子力研究開発機構) [ICRP C4]伴 信彦(原子力規制委員会) [ICRP C4/OECD/NEA]本間 俊充(原子力規制庁) [UNSCEAR]川口 勇生(量子科学技術研究開発機構) [IAEA/RASSC]荻野 晴之(原子力規制庁) [WHO]神田 玲子(量子科学技術研究開発機構) [NCRP PAC1]浜田 信行(電力中央研究所)
16:55～17:00	閉会:高橋 知之(京都大学)

②国際的機関からの専門家との意見交換

ICRP 第4専門委員会委員のThierry Schneider氏（Nuclear Protection Evaluation Center、フランス）と量研研究者2名および防災の専門家が原子力災害時の避難の国・地方自治体の取り組みやステークホルダー関与に関して意見交換を行った（令和2年11月12日、オンラインにて実施）。あらかじめ日本リスク学会「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ」が検討した以下の質問に従い、インタビュー形式で意見交換を行った。主な質疑内容を以下に記す。

Q1) 原子力災害時に避難しないという選択をとり得る可能性はあるか。あるとしたらそれはどのような場合か

A1) フランスでは、想定されている第一の選択肢が避難。ほとんどの場合において避難が想定され、防災訓練も行われている。議論の余地があるのは、病院や高齢者がいる特定の施設の場合。この問題は福島事故の後、避難が本当に必要かという議論が行われたが、原則的には、避難が第一選択であることに変更はない。

Q2) 避難してはいけない人を区別する主な基準は何か

A2) フランスの意思決定プロセスは、日本での県知事に相当する、地域の州の責任ある代表者に依存している。この意思決定者は、まず専門家から被ばくのレベルやリスクの情報を得る。しかしこれが唯一の基準ではなく、被ばくのレベルや予測に応じて強制的に避難させられるわけではない。農業等、動物の世話をする必要があるので、そこに人を置いておく必要があるのかも考慮される。また原子力発電所の近くに化学工場がある場合も議論は違ってくる。

Q3) 被ばくリスクのほかに、被ばく以外のリスク、経済、文化的要件など考慮されたことがあるのか

A3) 被ばくリスクは一つの基準になるが、唯一の基準ではない。適切な避難を行うためにはどのくらいの時間が必要なのか、遅すぎないかを評価し、もし遅すぎるなら避難しないということになる。また現在、フランスでは、緊急対策を考えなければならぬ地域を広げようという議論がある。原子力発電所の周辺を数キロから10キロに拡大している。経済、文化的要件など考慮しなければいけない、というより、まずは避難を実施するための手段を確保する、あるいは持っているかどうかということを確認することが重要である。

Q4) 自然災害等、他の緊急事態にも共通の枠組みで対応しているか

A4) 地域の県知事が国民保護に責任を持つという点では同じだが、原発事故については、具体的な規制と具体的な枠組みがある。フランスでは、日本のように自然災害の経験があるわけではないが、ここ数年で自然災害の経験をしている。避難のダイナミックさが原子力災害とは微妙に違うと感じている。情報伝達はまだしも、復旧にプロセスについてはもっと議論をしなければならず、徐々に原子力関係者との交流が組織化されてきているが、枠組みは異なる。

Q5) フランスの研究者が行っている福島原発事故の研究は、フランスの防護措置にどのように反映されているのか

A5) 原子力事故後管理運営委員会（CODIRPA、原子力安全局が設置）がプラットフォームとなり、教訓を反映して、フランスの規制や枠組みに関するロードマップを改訂した。避難指示をどう解除するかは、当局の判断だけではなく、対話の場を設ける、付随する措置を設けるなどのプロセスの設定が必要だとわかった。除染の合理性（除染をどこまでやるのか）を、地域の社会経済活動の将来、環境保護、廃棄物の管理など、より広い視野で除染の問題を統合して考える必要がある。食料生産、農業、海洋環境：事故直後の判断が長期にわたり重要な影響を持つので、しっかりとした準備が必要である。

事業代表者は上記のインタビューの内容を、日本リスク学会第 33 回年次大会企画セッション「原子力災害時の避難や除染に関するリスクトレードオフとステークホルダー関与」で報告した（令和 2 年 11 月 22 日）。

(2) 放射線防護に関するアンブレラ内の意思決定

① ネットワーク合同報告会の企画運営・報告書作成

令和3年2月9日にネットワーク合同報告会を開催し、大学、研究所、学協会、省庁、事業者など様々なステークホルダーが参加した（総数40名）。以下に報告会の概要をまとめるが、報告書(付属資料5)は本事業HPにおいて公表済みである。また代表者会議の活動、国際動向報告会および各学会やネットワークの活動の内容は、本報告書内の1.(1)～(4) および2.(1)での記載と重なるため、詳細については割愛する。

表 11. 第4回ネットワーク合同報告会プログラム(令和3年2月9日)

14:00-14:05	開会のあいさつ	高山 研(原子力規制庁)
14:05-14:40	アンブレラの活動概要 I ～代表者会議や実効線量と実用量に関するWGの活動～ ・全般について(15分) ・国際動向報告会(10分) 〈質疑応答 10分〉	座長:吉澤 道夫(事業担当者、原子力機構) 神田 玲子(量研) 杉浦 紳之(原安協)
14:40-15:10	アンブレラの活動概要 II ～参加学会を中心とした活動～ ・日本放射線安全管理学会(5分) ・日本放射線影響学会(5分) ・日本放射線事故・災害医学会(5分) ・日本保健物理学会(5分) 〈質疑応答 10分〉	座長:百瀬 琢磨(事業担当者、原子力機構) 中島 覚(広島大学、日本放射線安全管理学会) 児玉 靖司(大阪府立大学、日本放射線影響学会) 富永 隆子(量研、日本放射線事故・災害医学会) 飯本 武志(東京大学、日本保健物理学会)
15:10-15:50	アンブレラの活動概要 III ～ネットワーク(NW)を中心とした活動～ ・職業被ばく最適化推進NW(15分) ・緊急時放射線防護NW(15分) 〈質疑応答 10分〉	座長:杉浦 紳之(事業担当者、原安協) 吉澤 道夫(原子力機構) 百瀬 琢磨(原子力機構)
15:50-16:50	パネルディスカッション:放射線防護アンブレラの活動の振り返りと今後 ・パネルディスカッション	座長:神田 玲子(量研) パネラー: 飯本 武志(東京大学、日本保健物理学会) 甲斐 倫明 (大分看護科学大学、日本保健物理学会/PLANET) 小林 純也(京都大学、日本放射線影響学会) 児玉 靖司(大阪府立大学、日本放射線影響学会) 酒井 一夫(東京医療保健大学、PLANET) 富永 隆子(量研、日本放射線事故・災害医学会) 中島 覚(広島大学、日本放射線安全管理学会) 松田 尚樹(長崎大学、日本放射線安全管理学会) 橋本 周(原子力機構、日本原子力学会 保健物理・環境科学部会) 加藤 尊秋 (北九州市立大学、日本リスク学会・原子力災害の防護方策の意思決定に関する検討TG) 百瀬 琢磨(原子力機構) 吉澤 道夫(原子力機構) 杉浦 紳之(原安協) ・原子力規制庁からのコメント 高山 研(原子力規制庁)
16:50-16:55	プログラムオフィサーによる総評	高橋 知之(京都大)

(ア) 開会の挨拶

原子力規制庁の高山氏が、コロナ禍での事業活動と本報告会の位置付けを述べた。

(イ) アンブレラの活動概要 I～代表者会議や実効線量と実用量に関するWGの活動～

本事業代表機関の神田氏（量研）が、アンブレラ事業の組織と事業の概略を説明した。昨年度までの検討をベースに、事業4年目として妥当な事業の進捗とアウトプットの創出が行われたことを説明した。また本事業分担機関の杉浦氏（原安協）が、第4回国際動向報告会の概要と課題について報告した。

(ウ) アンブレラの活動概要 II～参加学会を中心とした活動～

放射線防護アカデミア参加学会の各代表者が、今年度学会が実施した、海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する調査と人材育成・確保に向けた取り組みについて報告した。

(エ) アンブレラの活動概要 III～ネットワーク（NW）を中心とした活動～

本事業分担機関の吉澤氏（原子力機構）が、我が国の現状を踏まえて実現可能な国家線量登録制度を複数案提示し、ステークホルダーを交えて検討を行った結果を報告した。また本事業分担機関の百瀬氏（原子力機構）が、緊急時放射線防護ネットワークの制度案について、ステークホルダーを交えて検討を行った結果を報告した。

(オ) パネルディスカッション:放射線防護アンブレラの活動の振り返りと今後(表12)

事前に代表者会議メンバーにアンケートを実施し、4年間に行った事業について自己評価を行った。このアンケート結果をベースに、これまでの活動を振り返るパネルディスカッションを行った。パネラーは、代表者会議メンバーと今年度から本事業に参加した、日本原子力学会保健物理・環境科学部会と日本リスク学会原子力災害の防護方策意思決定タスクグループからの参加者が務めた。また指定発言者である高山氏（原子力規制庁）からは、学会員と行政・規制側の双方にとってメリットになるような活動がアンブレラ事業の理想であるとのコメントがあった。

(カ) プログラムオフィサー（PO）による総評

本事業POである高橋氏（京都大学）が、本日の議論をベースに最終年度である来年度は今後のネットワーク活動に向けての議論が必要であると述べた。

(キ) 閉会のあいさつ

本事業代表者が、コロナ禍での人材育成への影響を例に、次年度はアカデミアの役割とは何か、学会とは何か、という原点に立ち返って、委託事業終了後の議論をしていきたいと述べた。

表 12. パネルディスカッションのまとめ(パネラーの意見の一覧)

(1) 防護アカデミアが主導的に行った活動

【学会連携全般】

- ・学会として刺激を受けた
- ・当初は、放射線防護に資する活動のイメージがつかみにくく、意義が理解しづらかった
- ・他学会と連携を取ることで、広い意味での放射線防護を考える機会になり、刺激を受けて、国際化を行った
- ・学会の連携は時代の趨勢で合同大会の開催等はしていたが、アンブレラ事業と一緒に仕掛けるものとして一歩前進した

【学会連携による低線量リスクに関するコンセンサスの策定】

- ・非常に実りのある成果につながった
- ・これまで防護が身近な課題ではなかったが、事業に主体的に参加してよかった
- ・関連分野でありながら、密に交流があったわけではなかった学会同士が規制ニーズを視野に連携して、成果物をまとめたのは大きな功績
- ・低線量のコンセンサスは、しばらくバイブルとして使えるもの

【学会員に関する合同調査】

- ・アンケートにより、会員の意見やバックグラウンドがわかり、多様性を持った学会とわかってよかった。特に若手の人材育成や裾野を広げることを考える機会となった
- ・アンケートにより、学会の立ち位置や学会としての特徴、人材育成の重要性が分かった

【学会による重点テーマの検討】

- ・アカデミアの問題意識と規制側が考えているものでは少し違いがあったので、規制側がビジョンを示した上で、アカデミア側が提案すると、もっと効果的だった

【事故・緊急時対応向上のための提言】

- ・放射線防護に関する重要なポイントの掘り起こしにつながる成果
- ・学会として主体的に関われたことは非常に良かった

【その他、学会での活動全般】

- ・学会員の活性化につなげるのが難しかった。現在は、若手と中堅、40代の会員がアンブレラ事業を直接関わるようにしている
- ・放射線生物の分野では、規制に近いところに関心を持っている方は少数派。現在、放射線生物学の出口である応用先として、放射線治療以外に、放射線リスクや低線量影響をイメージする方が増えたのはアンブレラの活動の一つの大きな成果

【課題解決型ネットワークの検討や、アンブレラ側からの関与】

- ・緊急時や線量登録の検討は、非常に成功した例
- ・緊急時放射線防護ネットワークとアカデミアの関係はこれからが佳境。アカデミアからのネットワークへの登録やネットワークの課題解決へ協力を期待
- ・職業被ばくの個人線量管理に関しては、担当者のフィールドを超えて他の大学連携ネットワークや医療分野との連携を進めた。実務に近い安全管理学会との連携やコミュニケーションを意識して活動することで、より分野が広がり、ステークホルダーとの議論もできる

(2) 情報発信

【国際動向報告会】

- ・国際動向報告会は、非常に成功した例(甲斐)
- ・総花的な講演会からテーマを絞った円卓会議とだんだん中身が濃くなってきた。議論した内容の公表と、広い分野が共通して関心なるテーマの設定が今後の課題

【実効線量と実用量に関する WG が行っている Webinar(全 5 回シリーズ)】

- ・学生を含む新しいメンバーたちに、線量についてしっかり知ってもらおう機会であり、我々のような教える側のメンバーにとってもいろいろな気づきがあった。いろんな視点から、今回の Webinar はいい仕組み、いい企画だった
- ・Webinar は分野外からも参加しやすいイベント。Webinar に外部の人を呼ぶためには、放射線防護にも共通する課題があることを示すとよい

(3) 若手人材のための企画

【人材育成全般、すそ野の拡張】

- ・関連分野の学協会が連携して長期に取り組むべき課題で、短期で評価するべきではない。今後の活動の持続が大切
- ・厚労省や環境省等と連携ができれば、この分野の裾野を広げられるのではないかと
- ・学会によって若手育成のとらえ方が違い、計画の練り直しは必要だが、今後も続けなければいけない
- ・副業でやる人をどう増やすかが課題、いいアイデアが出るとよい
- ・放射線の世界を超えたアクセスに関して、保健物理学会の若手との意見交換でも話題として上っている

【国際的機関が主催するイベントへの若手の派遣(グローバル人材の育成)】

若手の研究者を様々な場面で OJT に派遣したことは若手研究者にとって有効

②代表者会議の運営

放射線防護アカデミアに参加する4学会とPLANETの代表者、ならびにアンブレラ事業担当者からなる代表者会議を組織し（表13）、5回の会合を開催した。詳細は付属資料6を参照のこと。

▶ 第12回放射線防護アンブレラ代表者会議（令和2年6月11日）

議長の選出ののち、コロナ禍において、今年度のアンブレラ関連の会合は基本Webで行うことを決定した。また今年度の年間スケジュールを確認し、放射線防護アカデミアによる放射線防護対策の推進に関する調査と提言ならびに放射線防護人材の確保・育成について集中的に審議を行った。さらに国際的機関主催会合への若手派遣事業の応募状況や審査の手順や基準の確認、海外渡航の制限下での対応を審議した。

▶ 第13回放射線防護アンブレラ代表者会議（令和2年8月20日）

オンラインを活用した取り組みを強化することとし、Webによる進路等個別相談会の実施要領や実効線量と実用量に関するWG（線量WG）の立ち上げとWebinarの開催提案について検討した。また学会やネットワークの活動の進捗を確認した。

▶ 第14回放射線防護アンブレラ代表者会議（令和2年12月25日）

学会、ネットワークおよび線量WGにおける活動の進捗を確認した。また国際動向報告会とNW合同報告会のプログラムを確認した。代表者会議メンバーに実施したアンケート結果を報告し、NW合同報告会のパネルディスカッションの進め方について審議した。

▶ 第15回放射線防護アンブレラ代表者会議（令和3年1月22-29日、メール審議）

次年度のアンブレラの事業計画の大枠、特にアカデミアの活動についての議論を行った。その結果、放射線防護アカデミアからの放射線防護対策の提言のとりまとめに重きをおいた次年度計画が承認された。

▶ 第16回放射線防護アンブレラ代表者会議（令和3年3月1日）

今年度の学会やネットワークの報告書のとりまとめについて確認を行った。また次年度の年次計画に関しては、アカデミア参加学会による放射線防護対策の提言の取りまとめのプロセスや若手人材育成のための取り組みの詳細を決定した。さらに次年度の国際的機関主催会合等への若手派遣に関しては、今年度中に募集を開始する必要があることから、詳細について審議し、応募要領を定めた。

表 13. 代表者会議 構成員リスト(令和3年3月31日現在)

参加団体	被推薦者	所属
日本放射線安全管理学会	中島 覚	広島大学 自然科学研究支援開発センター
	松田 尚樹	長崎大学 原爆後障害医療研究所
日本放射線影響学会	児玉 靖司	大阪府立大学大学院 理学系研究科
	小林 純也	国際医療福祉大学 成田保健医療学部
日本放射線事故・災害医学会	富永 隆子	量研 高度被ばく医療センター
	細井 義夫	東北大学大学院 医学系研究科
日本保健物理学会	赤羽 恵一	量研・放医研 計測・線量評価部
	甲斐 倫明	大分県立看護科学大学
放射線リスク・防護研究基盤	甲斐 倫明	大分県立看護科学大学
	酒井 一夫	東京医療保健大学

運営母体	担当者	所属
原子力規制委員会原子力規制庁	高橋 知之	プログラムオフィサー 京都大学 複合原子力科学研究所
	高山 研	原子力規制庁 放射線防護グループ 放射線防護企画課
	大町 康	
	小林 駿司	
	荻野 晴之	
滝 剣朗		
量子科学技術研究開発機構	神田 玲子	放医研 放射線防護情報統合センター
	岩岡 和輝	放医研 放射線防護情報統合センター
	山田 裕	福島再生支援研究部
日本原子力研究開発機構	百瀬 琢磨	核燃料サイクル工学研究所
	吉澤 道夫	原子力科学研究所
原子力安全研究協会	杉浦 紳之	理事長

(3) アンブレラから社会への情報発信

(ア)放射線防護アンブレラの HP の活用

令和2年度は、放射線防護アンブレラの HP (<http://www.umbrella-rp.jp/>) に 15 件の新着情報を配信した。アンブレラ事業に関するアナウンスが 11 件、国際的機関主催のイベントのアナウンスが 3 件、国際的機関の採用情報が 1 件となっている。特に今年度は、Webinar の登録等もアンブレラの HP を活用した。

(イ) 放射線影響・放射線防護ナレッジベース“Sirabe”の利用

放射線防護に関する科学的情報の発信にあたっては、放射線影響・放射線防護ナレッジベース“Sirabe” (<http://133.63.23.55/sirabe/index.php/>) を活用した。このシステムは、国内の放射線防護に関する諸制度と国際的な放射線防護等に関する知見等を Web 上で閲覧できるサイトで、原子力規制委員会からの委託により 5 年間かけて作成し、平成 31 年 3 月に一般公開したものである。

ナレッジベースのコンテンツや機能の追加や更新および運用に関しては、放射線影響・防護に関して幅広い知識を持っている専門家や国際機関活動に参加している専門家、リスクに関する情報発信に経験のある専門家から成る運用委員会とコンテンツの執筆や査読を担当する編集部会が組織されたナレッジベース“Sirabe”のコンテンツの拡充にあたり、今年度は、放射線審議会の議論や社会的関心等を考慮し、今年度の放射線審議会の議論や社会的関心等を考慮し、放射線影響・放射線防護ナレッジベース“Sirabe”のコンテンツに追加する新規項目を作成した。具体的には、事故の線量評価、動物実験や疫学によるリスク評価、医療現場の被ばく等に関する原著論文の解説 5 件、放射性廃棄物や 3 つの被ばくの状況や眼の水晶体等に関する基本解説 5 件、用語集 11 件を新規に執筆した (表 14)。

放射線影響・防護ナレッジベース運用委員会 (メール会議、令和 3 年 1 月 29 日～2 月 17 日) および同委員会編集部会 (メール会議、令和 2 年 12 月 17 日～令和 3 年 1 月 8 日) において、新規・更新項目の承認ならびに次年度以降の活動方針について審議し、トリチウムに関連する項目の拡充等を計画している。

(ウ) 実効線量と実用量に関する Webinar (全 5 回シリーズ) の利用

実効線量と実用量に関する WG が企画・開催した実効線量と実用量に関する Webinar (全 5 回シリーズ) を、令和 2 年 10 月 30 日、11 月 24 日、12 月 18 日、令和 3 年 1 月 25 日、2 月 22 日に開催し、延べ 857 名がリアルタイムで視聴した (表 15、16)。Webinar に 1 回以上参加登録した者に 5 回分の動画配信を行った。

動画配信を行うことを明らかにした 2 回目以降、参加者は 1 回目よりは少なくなったが、それでも対面式のイベントの平均的参加者数 (国際動向報告会では 100 名程度) よりも多い視聴者が毎回リアルタイムに Webinar に参加した。国内の放射線防護

人材の母集団の小ささから考えると、延べ人数 857 という数値は十分大きく、情報共有の効果があったと考える。

なお現在、来年度の Webinar のテーマに関するアンケートを実施しており、特に若手のニーズに配慮した企画を行う予定である。

表 14. 令和 2 年度放射線影響・放射線防護ナレッジベース新規掲載コンテンツ

大項目	分野	タイトル
論文解説 (5 件)	線源	Ohba et al: Reconstruction of residents' early internal doses after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. Sci. Rep. 10:3639 (2020)
	影響	Imaoka et al: Prominent Dose-Rate Effect and Its Age Dependence of Rat Mammary Carcinogenesis Induced by Continuous Gamma-Ray Exposure Radiat Res.191(3):245-254 (2019)
	影響	Sadakane et al. Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009. Radiat Res.192(3):299-310 (2019)
	影響	三浦富智ら, 整形外科医の超局所慢性被曝による染色体異常臨床整形外科 55(2), 109-113 (2020)
	影響	Abe et al: Investigation of the cumulative number of chromosome aberrations induced by three consecutive CT examinations in eight patients. J Radiat Res, 60(6),729-739 (2019)
基本解説 (5 件)	線源	放射性廃棄物の処分
	影響	眼の水晶体
	防護	ICRP の 3 つの被ばく状況
	国際的機関の見解	水晶体等価線量限度の変遷と国内規制動向
	放射線影響・規制に関する諸組織・諸機関等	職業放射線防護評価サービス (Occupational Radiation Protection Appraisals (ORPAS))
用語集 (11 件)	影響	ギムザ染色法
	影響	FISH 法
	影響	(放射線の)間接作用／直接作用
	影響	亜致死損傷回復
	影響	細胞周期チェックポイント
	影響	DNA 二本鎖切断
	影響	前駆症状
	影響	不均等被ばく
	影響	環状染色体
	影響	体細胞分裂
影響	早期影響(晩発影響との違い)	

表 15. 実効線量と実用量に関する Webinar(全 5 回シリーズ)の概要

	開催日	タイトル	講師	座長(WGメンバー)
1 回目	令和 2 年 10 月 30 日	線量の歴史的背景と意味合いー 実効線量を中心としてー	岩井敏(原子力安全推進協会)	岩岡和輝
2 回目	令和 2 年 11 月 24 日	放射線リスクと実効線量	佐々木道也(電力中央研究所)	保田浩志
3 回目	令和 2 年 12 月 18 日	ICRU/ICRP が提案する新たな実用量と課題	小田啓二(神戸大学)	佐々木道也
4 回目	令和 3 年 1 月 25 日	確定的影響と生物学的効果比 (RBE)	保田浩志(広島大学)	床次眞司
5 回目	令和 3 年 2 月 22 日	医療に関わる領域での実効線量表記の問題点と課題ー線量に関するコミュニケーションの観点からー	細井義夫(東北大学) パネラー 赤羽正章(国際福祉医療大学) /立崎英夫(量研)/甲斐倫明 (大分看護科学大学)	細井義夫 (ファシリテーター: 神田玲子)

表 16. 実効線量と実用量に関する Webinar(全 5 回シリーズ)の参加者数

属性	人数					
	1 回目 線量の歴史的 背景	2 回目 放射線リスク と実効線量	3 回目 新たな実用量 と課題	4 回目 確定的影響 と RBE	5 回目 実効線量表 記の問題点	全 5 回 合計
大学(病院以外)	72	51	51	44	47	265
企業	73	46	30	27	18	194
研究所(大学以外)	59	36	37	38	21	191
病院(大学病院含む)	19	16	10	16	45	106
学協会(NPO、法人を含む)	20	11	10	11	6	58
行政	7	4	2	2	2	17
その他(一般の人など)	6	8	6	3	3	26
合計	256	172	146	141	142	857

V. 今年度の成果の概要

1. 成果の概要

本事業では、課題解決に向けたプロセスに大きなウェイトを置き、特にステークホルダー間の合意形成を重視した活動をしている。そのため、情報収集や調査、あるいは提案や提言のように“見える”成果ではないが、情報共有・連携・協調のための仕組みづくりも大きな成果の一つと考えている。

(1) 課題解決に向けたプロセスの定型化

近年、放射線防護方策の決定に、ステークホルダーの合意形成が必要な場面が増えている。課題が生じた際に、専門家が適切にステークホルダーの合意形成に関与するためには、「情報共有」「連携の場」「協調関係」という条件が整っている必要がある。

本事業では、上記の条件を満たす環境を整えるため、様々な性格のネットワーク(NW)を統合したアンブレラ型プラットフォーム(=アンブレラ)を形成するとともに、特定の課題を調査・分析するネットワークを設置し、ステークホルダーとともに議論し、解決案を提示することを目標としている。

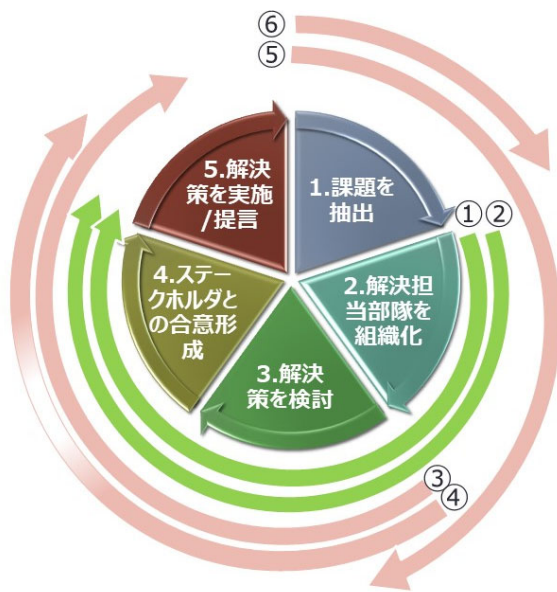
この解決策の提示にあたり、当事業では、5年間をかけて、1.放射線防護アカデミアが課題を抽出し、2.課題解決に取り組む部隊を組織化して、3.解決策を検討して、4.ステークホルダーと調整をして、5.解決策を実施するあるいは解決策を実施すべき主体に提言する、というサイクルを回す仕組み作りを計画している(図7)。

事業内では大きく分けて6つの課題に関して解決策の検討を行っているが、全てが、課題抽出から着手しているわけではない。課題解決型ネットワークである、緊急時放射線防護検討NWと職業被ばく最適化推進NWでは、それぞれ「①緊急時対応人材の育成と確保」や「②職業被ばくの個人単位での一元管理」という課題への解決策を検討しているが、これらの課題は事業開始時からの“決めうち”の課題である。

また放射線防護アカデミアは、学术界の1つのネットワークとして、これまでに「③放射線安全規制研究の重点テーマの提案と実施」「④放射線防護人材の育成・確保」「⑤実効線量と実用量の新しい概念を国内で取り入れる場合の諸問題」「⑥原子力・放射線事故対応の問題」の解決を目指している。

このうち③④は原子力規制委員会や事業代表者からの依頼で検討を開始しており、放射線防護アカデミアが抽出した課題ではない。一方、⑤は、平成31年度に、国際動向報告会の円卓討議で抽出された課題である。今年度は代表者会議内に「実効線量と実用量に関するWG」を設置し、この課題の解決策の検討を引き継いだ。また⑥も放射線防護アカデミアに参加する学会が課題抽出から取り組んだ課題で、来年度、放射線防護アカデミアとして解決策の提言を試みるものである。

このように4年目にして、課題解決のためのプロセスの定型化(各段階での適切な主体による関与を含む)を完了した。



- 事業 1 年目から開始
 - ①緊急時対応人材の育成と確保
 - ②職業被ばくの個人単位での一元管理
 - ③放射線安全規制研究の重点テーマの提案と実施
 - ・研究推進委員会へのテーマ提案
 - ・重点テーマ候補研究の実施
- 事業 2 年目から開始
 - ④放射線防護人材の育成・確保
 - ・現状把握
 - ・若手支援策の実施
- 事業 3 年目から開始
 - ⑤実効線量と実用量の新しい概念を国内で取り入れる場合の諸問題
 - ・国際動向報告会の円卓会議
 - ・WG 組織化、Webinar 開催
- 事業 4 年目から開始
 - ⑥原子力・放射線事故対応の問題抽出
 - ・学会ごとに調査・検討

課題解決のためのプロセス	各プロセスの活動の主体			
	重点テーマ	人材育成	線量の問題	事故対応
1. 課題を抽出			円卓会議パネラー	アカデミア参加学会
2. 部隊を組織			代表者会議	代表者会議
3. 解決策を検討	代表者会議	代表者会議	線量 WG	代表者会議
4. 合意形成	アカデミア 規制側	若手研究者 各学会		
5. 策を実施/提言	学会連携 アカデミア外連携 各学会	アカデミア 各学会	原子力規制委員会	原子力規制委員会 関連省庁

図 7. 定型化された課題解決のためのプロセスと本事業の活動

2) アウトプット創出のための仕組みの有効性 (図 8)

昨年度までに、放射線防護アカデミアが、分野連携の推進や科学的知見の規制への取り入れへの貢献、放射線防護人材の確保・育成といった役割を果たす上での必要な情報共有・連携・協調の場を形成し、その実効性を検証してきた。4 年目にして放射線防護アカデミアと 2 つのネットワークによる課題解決策は、ステークホルダーとの意見交換を経て現実的な形になった。このようにアウトプットが目に見える形となったということは、この間、「情報共有・連携・協調」のために構築してきた仕組みが本事業の目標に合致していたことを意味している。

昨年度は「複数学会合同委員会」と「国際動向報告会」という枠組みを介して顕著

な成果が得られた。

今年度はWebinar（情報集約）や他分野学会との連携（研究・調査の遂行）、ステークホルダー会合（オーソライズや合意形成）の有用性を確認することができた。

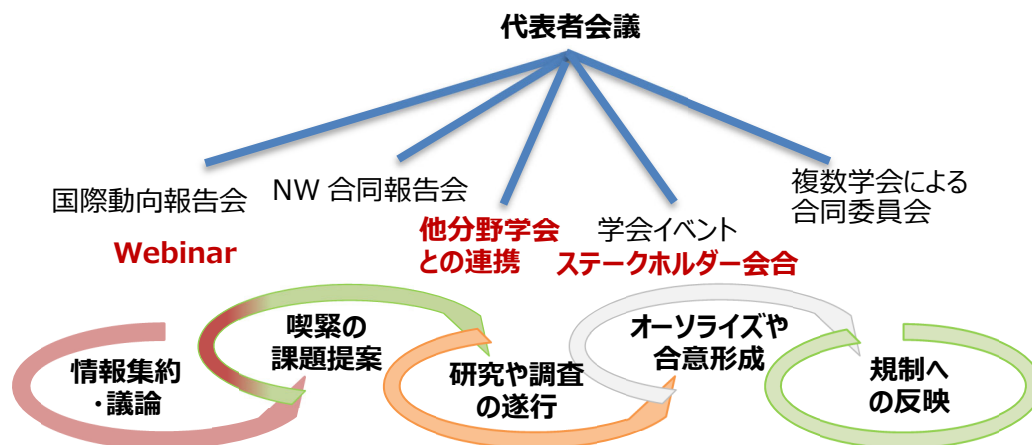


図 8. 情報共有・連携・協調の場として有用であることが検証された仕組み
(赤字は今年度の取り組み)

2. 事業の実績

外部への発信として、誌上発表 7 件、口頭発表 8 件、審議会等での報告 2 件、シンポジウムや学会セッション等の企画 5 件等を行った。特に、誌上発表は昨年度に比べて倍増した。

➤ 誌上発表（7 編）

- Wang, B. and Yasuda, H. Relative biological effectiveness of high LET particles on the reproductive system and fetal development, *Life*, 10(11), 298 (2020)
- 中野政尚 他、茨城県東海・大洗地区における福島第一原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングデータの共有と課題検討活動, *保健物理.*, 55 (2), 102 - 109 (2020)
- 川口勇生 他、JHPS 国際シンポジウム「トリチウム問題をいかに解決すべきか? -国際的視点および社会的視点から見た放射線防護- *保健物理*, 55(4), 173-182 (2020)
- 松田尚樹、中島覚、放射線安全管理人材の確保・育成に関する現状把握のための調査結果報告、*日本放射線安全管理学会誌*, 19(2), 118-121 (2020).
- 神田玲子、放射線防護アカデミア—One team になる、*Isotope News* 2020 年 6 月号 (No769), 3 (2020)
- 神田玲子、飯本武志、甲斐倫明、児玉靖司、小林純也、酒井一夫、富永隆子、中島覚、

細井義夫、松田尚樹、杉浦紳之、百瀬琢麿、吉澤道夫、放射線防護関連学会の合同アンケート調査で明らかになった人材確保・育成の課題、日本原子力学会誌 ATOMOZ 62(12), 47-52 (2020).

- ・ 神田玲子、本間俊充、高原省五、坪倉正治、大迫政浩、川口勇生、加藤尊秋、原子力災害の防護方策の意思決定 -リスクトレードオフとステークホルダー関与-, リスク学研究 (印刷中)
- ・ 神田玲子、飯本武志、甲斐倫明、児玉靖司、小林純也、酒井一夫、富永隆子、中島覚、細井義夫、松田尚樹、杉浦紳之、百瀬琢麿、吉澤道夫、放射線防護関連学会会員へのアンケート調査の報告—緊急被ばく医療人材に関する現状分析—、日本放射線事故・災害医学会誌 (投稿中)

➤ 口頭発表 (8 件)

- ・ 神田玲子、医学と放射線防護のクロスオーバー ～原子力規制委員会委託事業の紹介～、医療被ばく研究情報ネットワーク第 12 回総会 (Web) , 2020 年 4 月 11 日
- ・ 吉澤道夫, 神田玲子, 飯本武志, 伊藤敦夫, 岡崎龍史, 百瀬琢麿, 渡部浩司, 職業被ばくの個人線量管理方法の検討状況, 日本保健物理学会 第 53 回研究発表会, 2020 年 6 月 29 日, Web 開催
- ・ 百瀬琢麿、早川剛、高田千恵、中野政尚、吉田忠義、緊急時放射線防護ネットワーク構築の検討状況, 日本保健物理学会 第 53 回研究発表会, 2020 年 6 月 29 日, Web 開催
- ・ 吉澤道夫, 神田玲子, 飯本武志, 伊藤敦夫, 岡崎龍史, 百瀬琢麿, 渡部浩司, 職業被ばくの個人線量管理方法の検討状況, 日本放射線安全管理学会 第 19 回学術大会, 2020 年 12 月 10 日, Web 開催
- ・ 渡邊裕貴、中野政尚、吉田忠義、高田千恵、早川剛、百瀬琢麿、緊急時放射線防護ネットワークのあり方について ～緊急時環境モニタリングと避難退域時検査の支援のために～, 日本放射線安全管理学会 第 19 回学術大会, 2020 年 12 月 10 日, Web 開催
- ・ 角山雄一、海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集、日本放射線安全管理学会第 19 回学術大会 (Web), 2020 年 12 月 11 日
- ・ 桧垣正吾、国内の放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言、日本放射線安全管理学会第 19 回学術大会 (Web), 2020 年 12 月 11 日
- ・ 松田尚樹、放射線安全管理人材の確保・育成に関する現状把握のための調査結果、日本放射線安全管理学会第 19 回学術大会 (Web), 2020 年 12 月 11 日

➤ 審議会での報告 (2 件)

- ・ 神田玲子：平成 31 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (放射線防護研究分野における課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成)

事業における放射線防護に関する国際動向報告会の開催について、放射線審議会第149回総会，2020年7月17日

- ・ 神田玲子：令和3年度放射線安全規制研究の研究課題について，令和2年度第1回研究推進委員会，2020年11月20日
- シンポジウムや学会セッション等の企画（5件）
 - ・ 国際シンポジウム「トリチウム問題をいかに解決すべきか？」日本保健物理学会第53回研究発表会（Web），2020年6月29日
 - ・ 企画シンポジウム「放射線防護の喫緊課題への提案 ～職業被ばくの個人線量管理と緊急時対応人材の確保～」，日本保健物理学会第53回研究発表会（Web），2020年6月29日
 - ・ 企画セッション「緊急事態対応人材の育成のネットワーク事業」，日本放射線安全管理学会第19回学術大会（Web），2020年12月10日
 - ・ 企画セッション「職業被ばくの一元化のネットワーク事業」，日本放射線安全管理学会第19回学術大会（Web），2020年12月10日
 - ・ 企画セッション「若手研究者による放射線に関する研究紹介」，日本放射線安全管理学会第19回学術大会（Web），2020年12月11日
- 特記事項
 - ・ 2020年10月～2021年2月にかけて、実効線量と実用量に関するWebinar全5回シリーズ（1時間の講演と30分の質疑）を開催した。開催日とテーマは、第1回「線量の歴史的背景と意味合い ―実効線量を中心として―」（講師：岩井敏氏）、第2回「（放射線リスクと実効線量）」（講師：佐々木道也氏）、第3回「ICRU/ICRPが提案する新たな実用量と課題」（講師：小田啓二氏）、第4回「確定的影響と生物学的効果比（RBE）」（講師：保田浩志氏）、第5回「医療に関わる領域での実効線量表記の問題点と課題 ―線量に関するコミュニケーションの観点から―」（講師：細井義夫氏、パネラー：赤羽正章氏、立崎英夫氏、甲斐倫明氏）。参加者（第1回から第4回）はのべ約700名であった。
 - ・ 放射線防護に関する国際動向報告会（「Zoom ウェビナー」によるライブ配信）を令和3年1月8日に開催。参加者は100名であった。「放射線防護の基礎となる放射線リスク評価に関する国際動向」というテーマに基づき、放射線防護に関連する代表的な国際機関（ICRP、UNSCEAR、IAEA、OECD/NEA、NCRP）における最新の動向や議論の状況について、関係者間での議論を深め、それをアンブレラ関係者に情報共有できた。
 - ・ 2020年8月31日～9月2日に開催されたICRPの第1専門委員会会合において、アンブレラ事業の取り組みが紹介された（紹介者：代表者会議前議長で、ICRP第一専門委員会委員の酒井一夫氏）。

VI. 次年度の事業

ここまでに報告した通り、平成 29 年度～令和 2 年度の 4 件間の事業はロードマップおよび各年度の事業計画書に沿って実施した。次年度も基本的にはアンブレラ事業採択時に策定したロードマップに従い事業計画を立案し、事業を進める。また研究評価委員会からのコメント*を踏まえ、研究終了後の課題解決型プラットフォームや放射線防護アカデミアの将来像を意識して取りまとめるための計画を立案した。

*「最終年度となる次年度においては、研究終了後の課題解決型プラットフォーム或いはネットワークの将来像を意識して取りまとめて頂きたい。」

○代表者会議の活動

- ・学会単位で行った海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する今年度の調査結果をベースに、放射線防護アカデミアからの提言を取りまとめる。
- ・実効線量と実用量に関する WG では、新たな線量概念の国内導入にあたり、国内外の現状や課題と提言（提言先、提言内容）の取りまとめを行う。
- ・国際的研究機関が主催する会合への若手派遣や、若手向けの Webinar 開催により、グローバル人材の育成や放射線防護人材のすそ野拡大を行う

○放射線防護アカデミア参加学会の活動

- ・今年度、学会単位で行った調査や検討結果の誌上発表を行う。
- ・学会による若手支援や若手を交えた学会活動、若手が主体的に行う活動の支援等を行う。

○緊急時放射線防護検討ネットワークの活動

- ・緊急時において環境モニタリングと放射線管理を行う人材の育成や確保を行うスキームを原子力機構の原子力等災害支援組織を活用する想定で、制度設計を完了する。
- ・原子力防災を支援する放射線防護関係者のための手引き（仮称）の作成や教育・訓練カリキュラムの策定を完了し、試行する。
- ・講習等を受講した人材のリストを整備し、緊急時には行政機関関係者が活用できる仕組みを検討する。
- ・委託終了後におけるネットワークの運営について、事業のあり方や事業に適合する組織の条件について検討する。

○職業被ばく最適化推進ネットワークの活動

- ・職業被ばくの個人線量管理制度構築にあたっての課題を明らかにして、実現に向けた方策を提言する。
- ・各分野での議論や研究に関する情報を共有・調整する本プラットフォームを自主的

運営する仕組みを検討する。

○事業担当者の活動

- ・(量研) 代表者会議、国際的機関会合への若手派遣事業、放射線防護アンブレラサイトの運営ならびに NW 合同報告会の企画・開催・報告書作成、「放射線影響・放射線防護ナレッジベース」の整備を行う。またアンブレラの活動や放射線防護アカデミアの提言を社会に発信する。さらに委託事業終了後の放射線防護アカデミアや代表者会議の活動の目的や範囲を精査し、適した運営体制を検討する。
- ・(原子力機構) 2つの課題解決型ネットワークの活動を主導する。また量研とともに放射線防護アカデミアと2つの課題解決方ネットワークの連携を進める。
- ・(原安協) 国際的機関に参加する国内の専門家が、各機関の研究ニーズを整理した上で日本として今後取り組むべき問題を円卓会議形式で討論する国際動向報告会を開催する。また報告会で抽出された論点等を誌上発表する。

VII. 付属資料リスト

令和2年度事業計画書内では、いくつかの活動について、クレジットが異なる個別の報告書を作成している。こうした報告書や代表者会議の議事概要、外部発表資料を、本報告書の付属資料とする。以下一覧を示す。

付属資料番号	資料名	事業計画該当番号
1	放射線安全規制研究の推進と若手人材の確保・育成～放射線防護アカデミアからの報告～ (代表者会議) 考資料 1 放射線影響分野における放射線防護対策の推進に関する調査と提言 ならびに放射線防護人材の確保・育成(日本放射線影響学会) 参考資料 2 放射線防護対策の推進に関する調査と提言(日本放射線安全管理学会) 参考資料 3 放射線防護対策の推進に関する調査と提言(日本保健物理学会) 参考資料 4 令和2年度活動報告(日本放射線事故・災害医学会) 参考資料 5 実効線量と実用量に関する Webinar(全5回シリーズ)資料集 参考資料 6 ティエリー・シュナイダー博士へのインタビュー全文	1.(1) 2.(2)②
2	令和2年度「緊急時放射線防護に関する検討」成果報告書(日本原子力研究開発機構)	1.(2)
3	令和2年度 職業被ばくの最適化推進成果報告書(日本原子力研究開発機構)	1.(3)
4	令和2年度 放射線防護に関する国際動向報告会 報告書(原子力安全研究協会)	2.(1)①
5	第4回ネットワーク合同報告会 報告書(量子科学技術研究開発機構)	2.(2)①
6	事業代表機関内設置組織の会合開催記録 ・第13回代表者会議議事概要 ・第14回代表者会議議事概要 ・第15回代表者会議議事概要 ・第16回代表者会議議事概要 ・実効線量と実用量に関するワーキンググループ第1回会合議事概要 ・実効線量と実用量に関するワーキンググループ第2回会合議事概要 ・実効線量と実用量に関するワーキンググループ第3回会合議事概要	2.(2)② 2.(3)
7	令和2年度公表資料集(一般公開されているもののみ) ・Wang, B., Yasuda, H. Relative biological effectiveness of high LET particles on the reproductive system and fetal development, Life, 10(11), 298 (2020) ・中野政尚 他、茨城県東海・大洗地区における福島第一原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングデータの共有と課題検討活動, 保健物理, 55(2), 102-109 (2020) ・川口勇生 他、JHPS 国際シンポジウム「トリチウム問題をいかに解決すべきか? -国際的視点および社会的視点から見た放射線防護- 保健物理, 55(4), 173-182 (2021) ・松田尚樹、中島覚、放射線安全管理人材の確保・育成に関する現状把握のための調査結果報告、日本放射線安全管理学会誌、19(2), 118-121 (2020). ・神田玲子、放射線防護アカデミア—One team になる、Isotope News 2020年6月号(No769),3 (2020) ・令和2年度放射線安全規制研究推進事業の重点テーマについて(令和元年度第1回研究推進委員会ヒアリング資料) ・放射線安全規制研究戦略的推進事業 成果発表会(令和3年2月18日) 発表資料	

令和 2 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(放射線防護研究分野における
課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成)

放射線防護対策の推進に関する調査と提言
～放射線防護アカデミアからの報告～

令和 3 年 3 月

放射線防護アンブレラ代表者会議

本報告書は、第12回代表者会議（令和2年6月11日）、第13回代表者会議（令和2年8月20日）、第14回代表者会議（令和2年12月25日）、第15回代表者会議（令和3年1月22日～1月29日のメール会議）、ネットワーク合同報告会（令和3年2月9日）および第16回代表者会議（令和3年3月1日）での議事内容を基に代表者会議の活動を取りまとめたものである。

目次

1 検討の背景と目的	1
2 検討のプロセス、内容と結果	4
2.1 海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する調査	4
2.1.1 確定的影響の RBE と線量評価および大規模災害時の線量推定	
2.1.2 放射線施設の事故と緊急時対応	
2.1.3 緊急時モニタリングの測定と体制および放射線防護文化の仕組み	
2.2 実効線量と実用量に関する検討と情報収集・共有	5
2.2.1 国際動向報告会による課題の抽出(昨年度の議論)	
2.2.2 課題解決に取り組む部隊の組織化と議論	
2.2.3 Webinar を介した情報の収集・共有と整理	
2.3 放射線安全規制研究の重点テーマ候補研究の実施	9
2.3.1 重点テーマの提案	
2.3.2 重点テーマ候補課題の実施の概要	
2.3.3 放射線防護アカデミア外の学会との連携による社会科学研究の実施	
2.4 放射線防護人材の確保・育成	15
2.5 科学的知見の規制へ取り込むための仕組みづくり	18
3 今後の展望	20

1 検討の背景と目的

「放射線防護研究分野における課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成事業」（以下、「アンブレラ事業」という。）は、原子力規制委員会が平成 29 年度から開始した「放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）」の一課題として採択された事業である。本事業の実施は、原子力規制委員会から量子科学技術研究開発機構（以下、量研）、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）、原子力安全研究協会（以下、原安協）が受託し、この 3 機関がネットワークによる自立的な議論や調査、アウトプットの創出等を支援する役割を担っている。

アンブレラ事業では、放射線防護の喫緊の課題の解決に適したネットワークを形成しながら、放射線防護に関連する学術コミュニティと放射線利用の現場をつなぐことを目的とした活動を行うこととしている。また、放射線防護の専門家集団が課題解決案を国等に提案するのみならず、ステークホルダー間での合意形成や施策の実施にも協力する存在となるため、日常的に国際動向に関する情報や問題意識を共有する環境を 5 年間かけて整備することを、事業目標として掲げている。

その仕組みとして考えているのが、学術コミュニティと課題解決型ネットワークをつなぐアンブレラ型のプラットフォーム、いわゆるアンブレラである（図 1）。アンブレラ事業内では、報告会の開催や HP 作成等、関係者間の情報共有や横断的議論の場を提供するとともに、ネットワークを構成する団体や組織の代表者で構成された「代表者会議」がアンブレラの運営全般に関与することで、放射線防護分野の全ステークホルダーが、個別の課題の解決といった共通の目的に向けて「情報共有」「連携」「協調」を進めている。

放射線影響・防護関連学会のネットワークである「放射線防護アカデミア（以下、アカデミア、と呼ぶ。）」には、日本放射線安全管理学会、日本放射線影響学会、日本放射線事故・災害医学会、日本保健物理学会及び放射線リスク・防護研究基盤(PLANET)が参加している（令和 3 年 3 月現在）。このうち法人格を持つ団体は、アンブレラ事業の実施代表機関である量研との間で業務請負契約を締結し、本事業に協力した。

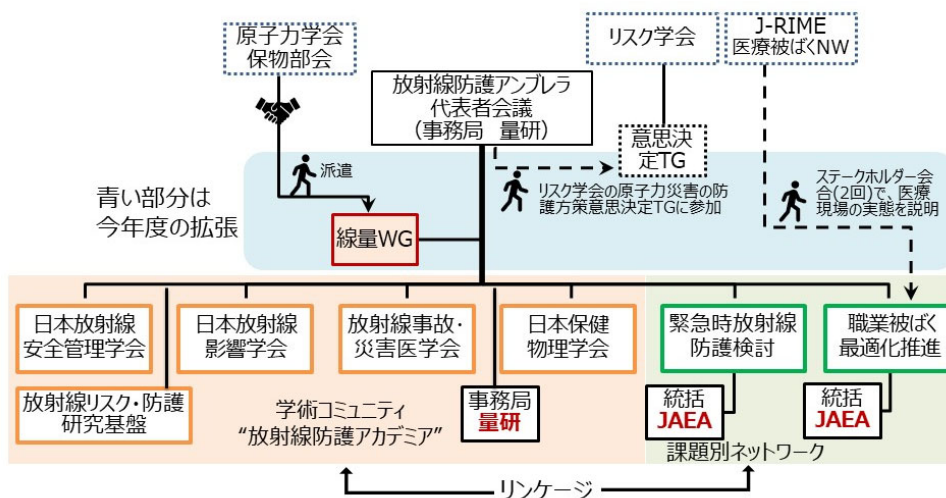


図 1. 課題解決型ネットワークとアンブレラ型プラットフォームの構成
（青い部分は今年度に拡張した分）

今年度、代表者会議では、放射線防護アカデミア以外の学会とも緩やかに連携してアンブレラ型プラットフォームの拡張しつつ、主に以下の5項目について検討を行った。昨年度までの事業の進捗との関係や今年度の検討目的を以下に記す。

➤ **検討項目1：海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する調査**

当事業では、5年間をかけて、①放射線防護アカデミアが課題を抽出し、②課題解決に取り組む部隊を組織化して、③解決策を検討して、④ステークホルダーと調整をして、⑤解決策を実施するあるいは解決策を実施すべき主体に提言する、というサイクルを回す仕組み作りを行うことを計画している。

昨年度から放射線防護アカデミアは課題の抽出に取り組んでおり、今年度は、放射線防護アカデミアに所属する学会が「原子力災害・放射線事故対応」に関して、それぞれの専門性に関心にあったテーマを選択して、海外の知見収集と国内の実態把握調査を行った。

日本放射線影響学会は確定的影響のRBEと大規模災害時の線量推定、日本放射線安全管理学会は放射線施設の事故と緊急時対応、日本保健物理学会は緊急時モニタリングと放射線防護文化醸成というテーマで検討した。また各学会は、検討結果を我が国の放射線防護対策及び緊急時対応の的確な実施や改善に資するための提案をとりまとめることとした。

➤ **検討項目2：実効線量と実用量に関する検討と情報収集・共有**

昨年度の国際動向報告会では、実効線量と実用量の新しい概念や活用をテーマに、国際機関の国内関係者による円卓討議を実施し、日本として今後取り組むべき問題を整理した。生物学的側面（例：生物学的効果比(RBE)）から実務的側面（例：サーベイメーターの改良の必要性）に至るまでの論点が列挙された。この問題の整理を引き継ぎ、検討を深めるために、代表者会議は、アカデミア参加団体と日本原子力学会保健物理・環境科学部会からの推薦者による「実効線量と実用量に関するワーキンググループ（線量WG）」を組織した。

線量WGでは、海外の最新情報を集めてアンブレラ事業としての課題を整理し、次年度に国内規制や研究現場および国際機関に向けた提案をまとめることとした。特に今年度は、関係者間での情報共有を優先し、WGがWebinar（5回シリーズ）の企画・開催を行った。WGは、Webinarによる情報共有の効果を高める目的で、動画配信やパネル討論、質疑への回答などを実施した。

➤ **検討項目3：放射線安全規制研究の重点テーマ候補研究の実施**

当事業の事業代表者は、これまで原子力規制委員会の研究推進委員会から翌年度の放射線安全規制研究の重点テーマについてヒアリングを受けている。4年間の間に40ほどのテーマを提案したが、重点テーマとして配慮されたものや他省庁の競争的研究費のテーマとして考慮されているものは半分程度にとどまっている。これらは代表者会議において重要なテーマと認識したものとして、可能な範囲でアンブレラ事業内での実施を行っている。

特に昨年度は、社会科学的要素の強いテーマ（防護措置の正当化、意思決定の正当化）を提案している。そこで今年度は、日本リスク学会内に「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ」を設置し、多分野の専門家やフリーライター、海外の専門家と連携

して、避難や除染のリスクトレードオフやステークホルダー関与に関する議論を行い、異分野連携の仕組みの良好事例とすることとした。

➤ **検討項目 4:放射線防護人材の確保・育成**

令和元年度、アカデミアに参加する 4 学会は、学会員の人数や専門性等の時系列的变化(将来予測を含む)に関する調査を実施し、代表者会議において、放射線安全規制研究を支える放射線防護人材の確保や若手の育成の方策について議論した。

今年度は調査結果を誌上发表するとともに、学会ごとに、年次大会やシンポジウムなど学会が主催するイベントにおいて、放射線防護人材の確保・育成に関連するセッションを企画・開催し、若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップを支援する場を提供することとした。

またアンケート結果を受けて、オンラインによる進路等個別相談会を実施し、今後、放射線防護人材のすそ野を広げる検討の材料を集めることとした。

➤ **検討項目 5: 科学的知見の規制へ取り込むための仕組みづくり**

上記の通り、本事業では、①放射線防護アカデミアが課題を抽出し、②課題解決に取り組む部隊を組織化して、③解決策を検討して、④ステークホルダーと調整をして、⑤解決策を実施するあるいは解決策を実施すべき主体に提言する、というサイクルを回す仕組み作りを行っている。事業1年目から取り組んでいる「放射線安全規制研究の重点テーマの提案と実施」、2年目から取り組んでいる「放射線防護人材の育成・確保」に関しては、今年度は解決策を実施する段階に入っており、①～⑤までを経験した。そこで、それぞれのプロセスに用いた「情報共有、連携の場、協調関係」のための仕組みを整理し、有用な方法を選別する議論を行った。



図 2. オンラインによる代表者会議の会合の様子

2 検討のプロセス、内容と結果

2.1 海外の最新知見の収集や国内の放射線規制の課題に関する調査

日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会および日本放射線影響学会は、「原子力災害・放射線事故対応」に関して、それぞれの専門性と関心にあったテーマを選択して、海外の知見収集と国内の実態把握調査を行った。

2.1.1 確定的影響のRBEと線量評価および大規模災害時の線量推定

日本放射線影響学会による検討の概要は以下の通り（参考資料1）：

- ・ 確定的影響のRBEと線量評価に関して海外の知見収集を行った。文献調査によると確定的影響の評価には、RBEで重み付けした吸収線量が適用されていたが、表記法にはばらつきが見られた。動物実験から得られたRBEの値は、被ばく条件により大きく変動することが確認された。
- ・ 大規模災害時の線量推定について、国内の状況把握と課題の調査・提言を行った。被ばく医療支援センターの準備状況、線量評価を担う人材育成、線量評価法の開発や改善に関する取り組みを調査した。その結果、生物学的線量評価分野における「人材不足」や「自施設での若手育成体制が不十分」といった体制面の課題があることが分かった。線量評価法の改良のため、生物学的線量評価分野の「ハイスループット解析の導入」や「実用化に向けた標準化や線量効果曲線の作成」を提案した。

2.1.2 放射線施設の事故と緊急時対応

日本放射線安全管理学会による検討の概要は以下の通り（参考資料2）：

- ・ 放射線施設の事故に関して海外の知見収集を行った。2000年以降のINES尺度2以上の事象の一覧を作成し、①異常被ばく事故の線量評価方法、②IVR施術者における水晶体被ばく、③紛失RIによる被ばく事故事例、④作業中の飛散事故事例については重点的に調査を行った。
- ・ 放射線施設の緊急時対応について、国内の状況把握と課題の調査・提言を行った。公開情報から原因を抽出し、予防可能可否の観点から分類した結果、特に表示付認証機器の管理や事故時の情報公開など予防策として不十分な点を明らかになった。問題点に対する予防と適切な対処ができるように、放射線障害予防規程や緊急時マニュアルを修正する提案をまとめた。

2.1.3 緊急時モニタリングの測定と体制および放射線防護文化の仕組み

日本保健物理学会による検討の概要は以下の通り（参考資料3）：

- ・ 緊急時モニタリングの測定と体制に関して海外の知見収集を行った。海外の拠点機関における動向を調査し、福島事故前後の我が国のモニタリング体制と比較した。体制、環境/個人モニタリング情報収集と情報伝達、要員並びにアジア圏内での緊急時モニタリングネットワーク構築の重要性・必要性に関する課題を抽出した。
- ・ 放射線防護文化醸成の仕組みについて、国内の状況把握と課題の調査・提言を行った。安全文化を形成する人や施設ごとの特徴に着目し、我が国における放射線安全文化についての意識と実践に関する詳細な現状調査や海外動向調査やアンケートを行い、課題の抽

出・整理を実施した。放射線安全文化の醸成に関連した、学会独自の認定制度、資格制度等の構築の可能性について提案した。

来年度は、各学会のクレジットで、検討結果を公表するとともに、各学会の報告書の内容をベースに放射線防護アカデミアからの提言を取りまとめる。また日本放射線影響学会による RBE に関する検討は、実効線量と実用量に関する WG の検討の材料としても用いることとする。

なお、日本放射線事故・災害医学会は、本事業の調査、研究に関連する活動として「被ばく医療で目指すべき線量評価のあり方」をテーマとした年次大会を開催した。また量研内に設置された被ばく医療診療手引き編集委員会の活動に協力した（参考資料 4）。

2.2 実効線量と実用量に関する検討と情報収集・共有

2.2.1 国際動向報告会による課題の抽出（昨年度の議論）

昨年度の国際動向報告会「実効線量と実用量-改定の概要となお残る課題」では、日本として今後取り組むべき問題の整理と ICRP を中心とした活動報告が行われた。具体的には以下のような論点が整理された：

- ・等価線量は実効線量を計算する過程での中間的な量となり、確率的影響は実効線量で制限するために評価し、確定的影響の防止には吸収線量で評価する。これによって、確定的影響の吸収線量に線質の異なる放射線に対して RBE が必要となる。
- ・デトリメントを基礎にして、年齢、性、がんベースラインの異なる国ごとのリスクを平均化している組織加重係数は、防護の標準化のために定義されている。よって、年齢別標準ファントムによる年齢別の実効線量の評価や個別化する上での線量係数についての研究の進捗が必要である。またデトリメントの不確かさおよびデトリメントを基礎とした実効線量の意味や制約などについて、整理する必要がある。
- ・実効線量は防護量であるが、UNSCEAR は放射線被ばくを包括的に定量する指標として活用してきた歴史がある。防護量であっても便利なツールとしての線量として今後も活用するためには、その制約等の考え方を整理して、広く共有する必要がある。
- ・実効線量をベースにした実用量は、防護量として理論的に理解しやすくなったが、実務上の課題を明らかにして、対応の準備をする必要がある。

2.2.2 課題解決に取り組む部隊の組織化と議論

今年度、代表者会議の下部組織として実効線量と実用量に関するワーキンググループ (WG) を立ち上げ、アカデミアが共同研究の枠組みで線量に関する諸問題の整理を引き継いだ。また日本原子力学会 保健物理・環境科学部会から組織的な連携を得て、WG メンバーとしての参加を得た。こうした連携により、日本原子力学会内の放射線工学部会、バックエンド部会および社会環境部会にも、放射線防護アンブレラの情報が展開される関係を構築した。

表 1 実効線量と実用量に関するワーキンググループ

実効線量と実用量に関する WG メンバー	推薦元
保田 浩志 (広島大学)	日本放射線安全管理学会
床次 眞司 (弘前大学)	日本放射線影響学会
細井 義夫 (東北大学)	日本放射線事故・災害医学会
佐々木 道也 (電力中央研究所)、主査	日本保健物理学会
橋本 周 (原子力機構)	日本原子力学会 保健物理・環境科学部会
岩岡 和輝 (量研)	事業代表機関

WG では、国際動向報告会や他団体による検討等、既存の情報に加えて、Webinar を通じて実効線量と実用量に関する国際動向の情報を広く収集した後、アンブレラ事業としての課題の整理を行うこととした。

➤ WG の運営と検討の経緯

WG では今年度、3 回会合を開催した。WG 会合には、WG メンバーに加え、代表者会議議長で ICRP 主委員会委員である甲斐氏と高橋プログラムオフィサーが参加した。

第 1 回会合 (令和 2 年 9 月 4 日) では、WG の設置の経緯や今後の議論の進め方についての議論を行った。その結果、今年度は以下のテーマに関する情報収集と共有を目的とした Webinar を開催することを決定した。

- ①シーベルトに関する話題 (発がんリスクに関する誤解、実効線量の正しい使い方)
- ②線質の異なる放射線ごとの RBE
- ③ゲトリメントと組織加重係数
- ④緊急時に用いる吸収線量と実効線量
- ⑤実用量の変更による実務上の課題

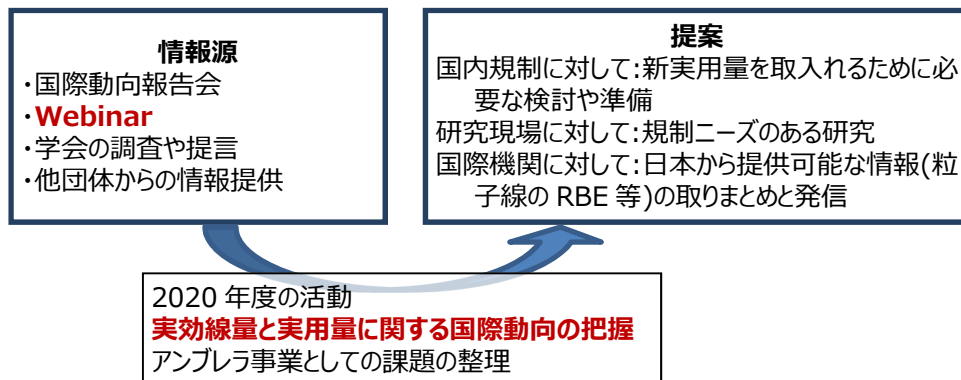


図 3. 実効線量と実用量に関する WG の活動方針

第 2 回会合 (令和 2 年 11 月 18 日) では、第 1 回 Webinar の振り返りおよび参加者の分析結果について議論を行った。また今後の対応として、動画配信や質問への回答に関する具体的な取り決めを行った。

第3回会合（令和3年3月4日）では、代表者会議メンバーも参加し、デトリメントについての情報収集を行った。また、WGが検討すべき課題別に今年度に収集された情報を整理するとともに、今後の検討方針についての議論を行った。

➤ アンブレラ事業としての課題の整理

第3回会合での審議の結果、実効線量と実用量の新たな概念を国内に導入するにあたり、国内での検討が特に必要な観点として、以下が抽出された。

1) 実効線量の評価

- ・実効線量の（年齢別の）評価とその使い方を、国内の専門家により整理し、認識を共通化する必要がある

2) 放射線管理で用いる線量

- ・実用量の実務への取り入れ方に関する日本として議論する必要がある
- ・実用量と実効線量の言葉の使い方が変わる中で、理解が必要である
- ・使用する線量（等価線量⇒吸収線量へ変更）に関する情報を整理して理解する必要がある

3) リスクの説明の問題

- ・「実効線量」と「リスク」の関係性、一般社会への「実効線量」の説明の仕方
- ・医療現場での実効線量を用いた説明：従来の見解が変更され、医療被ばくの説明に実効線量の利用が妥当となった。医療人が実効線量の意味や制約を理解して、説明に用いる必要がある。

こうした観点ごとに、国内外の現状や課題と提言（提言先、提言内容）をまとめた報告書骨子案の作成を開始した。次年度は、骨子案をもとに議論や追加情報収集を行い、WGとしての提言の取りまとめを行う。

2.2.3 Webinar を介した情報の共有と整理

WGでは、全5回シリーズのWebinarを企画し、国際動向報告会等により抽出した課題を検討するにあたり必要な情報を収集するとともに、様々な分野の専門家や行政、一般と共有することとした。なお、情報収集のテーマの一つに挙げられていたデトリメントの不確かさやデトリメントを基礎とした実効線量の意味や制約などについては、Webinarのテーマとするには難解であることから、WG第3回会合において甲斐会長が講演を行うことで情報収集を行った。

Webinarは放射線防護アンブレラのHP上でアナウンスするとともに、防護アカデミア参加学会、日本原子力学会の関連部会、日本リスク学会、医療放射線関連学協会ネットワーク（J-RIME）の主要メンバーに対してアナウンスを行った。また医療現場の線量に関するWebinar（第5回）に関しては日本医学物理学会内でWebinarのアナウンスが行われた。

リアルタイムでの参加人数は、前5回でのべ857人で、各回とも、大学や研究機関、企業、行政、一般からの参加があった。概して大学関係者が多かったが、企業や病院からの参加も多く、いわゆる放射線防護の専門家以外の方が気軽に参加できる企画となった。またイントロダクションの回では企業機関から、確定的影響やRBEの回では研究機関から、医療

現場の線量に関しては病院からの参加が多いなど、参加者層は回（テーマ）による変動する傾向が見られた。このように情報を必要とする/情報に関心のある者が Webinar に参加したことが確認された。

1.5 時間の Webinar では、後半 30 分は参加者からの質問に講師が回答を行った。回答できなかった質問について、アンブレラ線量 WG で回答を検討し、5 回分をまとめて、HP 上で回答を行った。

また当日参加できなかった登録者のために、当日の様子を録画した動画を限定配信している。1 回目から 5 回目の Webinar のうち 1 回でも参加登録していれば、全 5 回の動画にもアクセス可能とした。

表 2 実効線量と実用量に関する Webinar(全 5 回シリーズ)の概要

	開催日	タイトル	講師	座長(WGメンバー)
1 回目	10 月 30 日	線量の歴史的背景と意味合い— 実効線量を中心として—	岩井敏(原子力安全推進協会)	岩岡和輝
情報収集する主テーマ ①Sv に関する話題				
2 回目	11 月 24 日	放射線リスクと実効線量	佐々木道也(電力中央研究所)	保田浩志
情報収集する主テーマ ①Sv に関する話題、③デトリメントと組織加重係数				
3 回目	12 月 18 日	ICRU/ICRP が提案する新たな実 用量と課題	小田啓二(神戸大学)	佐々木道也
情報収集する主テーマ ①Sv に関する話題、⑤実用量の変更による実務上の課題				
4 回目	1 月 25 日	確定的影響と生物学的効果比 (RBE)	保田浩志(広島大学)	床次眞司
情報収集する主テーマ ②線質の異なる放射線ごとの RBE、④緊急時に用いる吸収線量・実効線量				
5 回目	2 月 22 日	医療に関わる領域での実効線量 表記の問題点と課題—線量に関 するコミュニケーションの観点 から—	細井義夫(東北大学) パネラー 赤羽正章(国際福祉医療大 学/立崎英夫(量研)/甲斐倫 明(大分看護科学大学)	細井義夫 (ファシリテ ーター：神 田玲子)
情報収集する主テーマ ①Sv に関する話題、②線質の異なる放射線ごとの RBE、④緊急時に用いる吸収線量・実効線量				

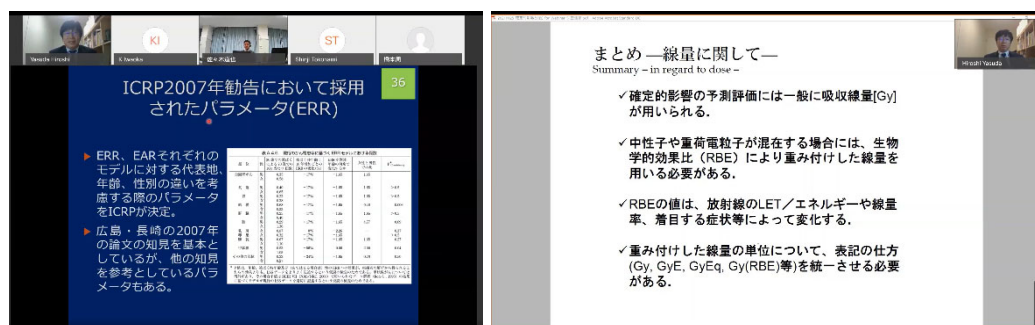


図 4. Webinar 第 2 回の質疑対応(左)と第 4 回の講演(右)の様子

表 3. 実効線量と実用量に関する Webinar(全 5 回シリーズ)の参加者数

属性	人数					
	1 回目 線量の歴史 的背景	2 回目 放射線リスク と実効線量	3 回目 新たな実用 量と課題	4 回目 確定的影響 と RBE	5 回目 実効線量表 記の問題点	全 5 回 合計
大学 (病院以外)	72	51	51	44	47	265
企業	73	46	30	27	18	194
研究所 (大学以外)	59	36	37	38	21	191
病院 (大学病院含む)	19	16	10	16	45	106
学協会 (NPO、法人を含む)	20	11	10	11	6	58
行政	7	4	2	2	2	17
その他 (一般の人など)	6	8	6	3	3	26
合計	256	172	146	141	142	857

動画配信を行うことを明らかにした 2 回目以降、参加者は 1 回目よりは少なくなったが、それでも対面式のイベントの平均的参加者数 (国際動向報告会では 100 名程度) よりはるかに多い視聴者がリアルタイムに Webinar に参加した。国内の放射線防護人材の母集団の小ささから考えると、延べ人数 857 という数値は十分大きく、情報共有の効果があったと考える。

なお現在、来年度の Webinar のテーマに関するアンケートを実施しており、特に若手のニーズに考慮した企画を行う予定である。

2.3 放射線安全規制研究の重点テーマ候補研究の実施

2.3.1 重点テーマの提案

ネットワークの事業代表者は過去 4 年間、原子力規制委員会の研究推進委員会から翌年の放射線安全規制研究の重点テーマについてヒアリングを受けている。

平成 29 年度のヒアリングにあたり、事業代表者は専門家へのアンケートを実施し、その取りまとめの結果を研究推進委員会に報告した。平成 30 年度～令和元年度のヒアリングにあたっては、放射線防護アカデミア参加団体からのボトムアップの提案を代表者会議で議論し、放射線アカデミアとして提案を行った。

今年度は、放射線防護アカデミア参加団体からのボトムアップの提案は求めず、以下のプロセスで放射線防護アカデミアからの重点テーマを取りまとめた：

- ・第 13 回代表者会議 (令和 2 年 8 月 20 日) において、放射線審議会等の議論に関連した研究テーマについて、「規制からのニーズ」として情報共有を行った。
- ・11 月 5～9 日に、代表者会議メンバーに重点テーマの提案を求めた
- ・事業代表者が、代表者会議メンバーの意見、放射線審議会での議論や国際動向をもとに重点テーマ案を作成した
- ・11 月 11～15 日に、重点テーマ案について代表者会議メンバーに意見を求めた。

上記のプロセスで令和3年度の重点テーマは以下の通り取りまとめ、令和2年度第1回研究推進委員会（令和2年11月20日）にてプレゼンを行った。

- 新たに見つかった令和3年度に取り組むべき喫緊の課題：過去1年間の放射線審議会での議論から抽出された国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告の国内法令等取入れに関する研究テーマ
 - 例1：妊婦である職業人の現行基準値とICRP勧告の数値の関係性の検討
 - 例2：NORMの利用や被ばくに関する国内の実態把握
- 中長期的視点から見て令和3年度に着手が望まれる課題：
 - ・自然科学と社会科学との融合により、サイエンスを具体的な防護実務に結び付けるプロセスを確立する研究
 - 例1：専門家、規制管理者、一般社会の間での対話の促進
 - 例2：過去の防護方策の意思決定事例におけるエビデンスやプロセスの検証。
 - ・原子力防災：エビデンスに基づく放射線被ばく状況の迅速な把握や防護方策の意義を説明するための研究
 - 例1：アクチニド分析技術プラットフォームの形成
 - 例2：クライシスコミュニケーションのための情報収集・集約・発信の体制整備
 - ・国際的な放射線防護課題の解決のための研究、特に若手の育成の観点を重視
 - 例1：国際共同研究の枠組みにおける宇宙環境放射線の線量評価研究

令和3年度の放射線安全規制研究の「重点テーマ①：放射線防護に係る中長期的課題への対応に向けたフィジビリティ研究」には「NORM」が、「重点テーマ②：原子力災害時の放射線モニタリング技術・分析技術に関するフィジビリティ研究」には「アクチニド核種分析」の文言は入るなど、ヒアリングの内容がある程度考慮された。一方、社会科学的な要素が強いテーマは採用されなかった。

2.3.2 重点テーマ候補課題の実施の概要

平成30年度から令和2年度の3年間において、放射線防護アカデミアでは、重点テーマとして約40課題を提案している。この中で、原子力規制委員会の重点テーマとして採用されたものや他の省庁の競争的研究費の枠で公募可能な課題は半数に満たない。そこで代表者会議では、アンブレラ事業内で実施可能（実験や開発の要素がないもの）や学会等が単独あるいは連携して主導的に推進可能なものについては、主体的に取り組んできた。

今年度に新たに取り組んだ課題は以下の2つである。

- トリチウム問題の国際的視点からのアプローチ：各国学会との対話
 - このテーマは、日本保健物理学会が平成31年度に提案したもので、今年度、同学会が年次大会の中で国際シンポジウムを開催し、成果については誌上発表を行った。（参考資料3）

➤ 防護措置の正当化、意思決定の正当化/

このテーマは、令和2年度の重点テーマとして採用され、「福島原発事故の経験に基づく防護措置に伴う社会弱者の健康影響と放射線リスクの比較検討に関する研究（研究代表者 福島県立医科大学 坪倉正治教授）」が採択された。採択された研究が防護措置の正当化の検証に焦点を充てているので、アンブレラ事業内では、意思決定の正当化に焦点を当てた研究・調査に着手した。また研究・調査の成果をベースに、今年度「自然科学と社会科学との融合：サイエンスと防護実務に結び付ける研究」を重点テーマとして提案した。

2.3.3 放射線防護アカデミア外の学会との連携による社会科学的研究の実施

平成31年度以降、代表者会議では、自然科学と社会科学の融合研究の重要性を議論する機会が増えている。日本リスク学会は学際性が強く、環境分野や食品分野のリスクコミュニケーションやステークホルダー関与に関して分野横断的な検討を行っている実績を有する。そこで、令和2年度に日本リスク学会内に「原子力災害の防護方策意思決定タスクグループ（TG）」を設置したところ、いろいろな分野の専門家やフリーライターが参加メンバーとして集まった。このTGに代表者会議の議長をはじめ、本事業関係者が参加し、福島原発事故を振り返り、防護方策の判断を正当性、広聴や定期的再評価、トレーサビリティなどの要件に照らし合わせて評価することとした。現在、他の災害の対策の判断や根拠の調査を行っており、各防護方策の正当化判断のプロセスを提案することとしている。講演を依頼した自然災害の専門家がその後TGに参加する等、異分野連携の枠組みが広がっている。

日本リスク学会の年次大会（令和2年11月22日）では、企画セッション「原子力災害時の避難や除染に関するリスクトレードオフとステークホルダー関与」を主催した。原子力防災（行政、研究機関）、健康リスク管理（医師）、廃棄物処理分野の専門家による講演に、福島の復興を支援している専門家や社会心理学の専門家らがコメントを行った。成果の公表は、リスク研究（日本リスク学会の学会誌）に掲載予定である。

この企画セッションの開催にあたり Thierry Schneider 氏（Nuclear Protection Evaluation Center（CEPN）のManaging Director、ICRPの第4専門委員会委員）へのインタビューを行った。質問事項はTG内で議論の上、以下の通り決定した。

- 1) 原子力災害時に避難しないという選択をとり得る可能性はあるか。あるとしたらそれはどのような場合か
- 2) 被ばくリスクのほかに、被ばく以外のリスク、経済、文化的要件など考慮されたことがあるのか
- 3) フランスでは原発事故の事前の備えとして、大規模な避難訓練が実行されていると聞いたことがある。避難訓練は実際に行われているか。
- 4) 原子力大国であるフランスにおいて、原子力防災の中でステークホルダーがどんな関与をしているのか。誰がどのように行っているのか、どんな議論があるか
- 5) CEPNやIRSNからもたくさんの研究者が来日し福島事故後の観察や調査等をされているが、フランスの防護方策にはどんなように反映されたのか、されるのか。

T Schneider氏 (CEPN, 仏)

インタビュー：加藤、川口、神田

TGからの質問(1)

実際に避難しないという選択をとる可能性はあるか、あるとしたらそれはどのような場合か

○フランスでは、想定されている第一の選択が避難で、ほとんどの場合において避難が想定され、防災訓練も行われている。

○議論の余地があるのは、病院や高齢者がいる特定の施設の場合。

○この問題は福島事故の後、避難が本当に必要かという議論が行われたが、原則的には、避難が第一選択であることに変更はない

TGからの質問(2)

避難してはいけない人を区別する主な基準は何か？

○フランスの意思決定プロセスは、日本の県知事に相当する、地域の州の責任ある代表者に依存している。

○この意思決定者は、まず専門家から被ばくのレベルやリスクの情報を得る。しかし、これが唯一の基準ではなく、被ばくのレベルや予測に応じて強制的に避難させられるわけではない。

○職業に関してはどうか、動物の世話をする必要がある、そこに人を置いておく必要があるかどうか、考慮される

○また原子力発電所の近くに化学工場がある場合も議論は違ってくる

TGからの質問(3)

被ばくリスクのほかに、被ばく以外のリスク、経済、文化的要件など考慮されることがあるか

○被ばくリスクの一つの基準になるが、唯一の基準ではない。適切な避難を行うためには、どのくらいの時間が必要なのか、進まないかを評価し、もし進まないなら避難しないということになる。

○また現在、フランスでは、緊急対策を考えなければならない地域を広げようという議論がある。原子力発電所の周辺を数キロから10キロに拡大している。

○経済、文化的要件など考慮しなければいけない、というより、まずは避難を実施するための手段を確保する、あるいは持っているかどうかというのを確認するというのが重要である。

TGからの質問(4)

自然災害等、他の緊急事態にも共通の枠組みで対応しているか？

○地域の県知事が国民保護に責任を持つという点では同じだが、原発事故については、具体的な規制と具体的な枠組みがある。

○フランスでは、日本のように自然災害の経験があるわけではないが、それでも、ここ数年で自然災害の経験をしている。

○避難のダイナミクスが原子力災害とは微妙に違うと感じている。

○情報伝達はまたしも、復旧にプロセスについてはもっと議論をしなければならないが、徐々に原子力関係者との交流が組織化されてきているが、枠組みは異なる。

TGからの質問(1)

フランスの研究者が行っている福島原発事故の研究は、フランスの防護措置にどのように反映されているのか

○原子力事故後管理運営委員会 (CODIRPA、原子力安全局が設置) がプラットフォームとなり、教訓を反映して、フランスの規制や枠組みに関するロードマップを改訂

○避難：避難指示をどう解除するかは、当局の判断だけではなく、対話の場を設ける、付随する措置を設けるなどのプロセスの設定が必要

○除染：除染の合理性 (除染をどこまでやるのか) を、地域の社会経済活動の将来、環境保護、廃棄物の管理など、より広い視野で除染の問題を統合して考える必要がある

○食料生産、農業、海洋環境：事故直後の判断が長期的にわたる重要な影響を持つので、しっかりとした準備が必要。

図 5. 日本リスク学会第 33 回年次大会企画セッションでの報告

なお、平成 31 年度に重点テーマとして提案した「医療分野の職業被ばくにおける防護の最適化」は令和 3 年度の重点テーマとして採用されたが、職業被ばく最適化推進 NW における検討内容と共通項が高いことから、本事業内でも、医療被ばく研究情報ネットワークの協力を得て実施した。具体的には、当該 NW のステークホルダー会合に医療現場の専門家 2 名が参加し、医療分野における職業被ばくの管理の状況をエビデンススペースで報告した。医療法の改正等により、患者の被ばくに関しては医療現場と放射線防護のクロスオーバーが進む中、職業被ばくに関しても現状把握と問題の明確化が進み、具体的な解決策の議論が進む環境が整った。

本事業による放射線防護アカデミアのネットワーク化の目的の一つが異分野連携の共同研究の推進にあると考えると、個人ベースでの新たな共同研究グループ作りという意味では、今年度は良好事例が得られたと考えられる。一方でこうした「他流試合」を研究者個人のモチベーションのみに依存するとなかなか進まない可能性も高い。日本リスク学会内の TG の設置の出発点が、重点テーマ候補研究の重要性にあったように、規制のニーズがあれば、異分野連携が進みやすいと思われる。

表 4. 重点テーマ候補課題の整理(令和3年3月現在) 赤字は今年度提案したもの

重点テーマ候補課題	原子力規制委員会等の対応状況	フォローアップ
I. 放射線の生物学的影響とリスク		
低濃度トリチウム水による内部被ばく影響に関する調査研究(影響学会と保健物理学会からH31に再提案)		
低線量放射線の長期的影響とバイオマーカーの探索		
がんゲノム医療時代における放射線影響リスク解析と疫学への橋渡し方策の検討		PLANETが着手
動物実験データを用いた放射線影響リスク解析と生物学的分析からの洞察		PLANETが提案の一部に着手
線量率効果係数(DREF)推定に必要なデータベース整備と生物学的分析に関する検討(影響学会がH31に再提案)		
放射線業務従事者・放射線治療患者を対象としたバイオバンク構築に関する検討(影響学会がH31に再提案)		保物学会・影響学会が合同で遂行
放射線安全規制の基盤となる放射線科学とその認識に関するコンセンサス		
放射線被ばくによるがんリスク表現の検討		
II. 放射線安全利用		
新しい利用形態への対応-短半減期核種の放射線安全評価法の確立-	H31の重点テーマ研究として採択可	
多種多様な所属の研究者の放射線業務従事者管理についての検討	H31の重点テーマと研究して採択可	
ICRP/ICRUの新しい線量概念の導入に関わる課題への対応研究	R3の重点テーマ研究として採択可	
放射線安全管理方法の最新の知見のサイトの構築		量研がサイトを構築
原子力・放射線事故対応		
福島第一原子力発電所事故汚染地域における動植物データ相互解析および試料収集組織の構築	原子力規制庁より環境省に情報提供	
放射線事故被ばくに対応できる生物学的線量評価の自動化モデルケースの構築	H30の重点テーマ研究として採択可	
放射線緊急時のEPRによるトリアージ手法の研究	H31の重点テーマ研究として採択可	
原子力災害・テロ等における放射線障害の治療の標準化/マニュアル化に関する調査研究	H31の重点テーマ研究として採択可	
内部被ばく線量評価と早期治療介入の手法と体制の開発・調査研究	H31、R2の重点テーマ研究として採択可	
緊急時モニタリング体制の整備に関する調査研究(保健物理学会から再提案)		緊急時NWが学会とも連携して対応
防護措置の正当化、意思決定の正当化(昨年度のNW合同報告会にて規制庁から提案)	R2の重点テーマ研究として採択可	
アクチニド分析技術プラットフォームの形成 (R2年度に提案)	R3の重点テーマ研究として採択可	リスク学会と連携して検討
IV. 環境放射線と放射性廃棄物		
短半減期核種での減衰保管の導入の是非をどう考えるか? -放射性廃棄物の課題に皆で向き合う-		
短寿命核種(Ra-223, Ga-68)の廃棄に関する研究(放射線安全管理学会からH31年度に新規提案)	H31重点テーマ研究として採択可	
短半減期核種の排気濃度限度管理に関する研究(放射線安全管理学会からH31年度に新規提案)		
NORMの利用や被ばくに関する国内の実態把握 (R2年度に提案)	R3重点テーマ研究として採択可	

V. 放射線測定と線量評価			
放射線の検出技術の施設管理への応用			
自然放射線・医療被ばくによる線量評価データベースの設計（保健物理学会から H31 年度に再提案）		H31 重点テーマ研究として採択可	保物学会の臨時委員会で実施
粒子線治療施設における作業従事者のための実用的粒子線被ばく防護基準策定を目指すデータ集積			
幅広い分野での放射線管理における線量拘束値の活用のあるり方に関する研究			
水晶体の医療被ばく管理と合理的な被ばく低減の提案（保健物理学会から H31 年度に新規提案）			量研の共同研究等で一部実施
妊婦である職業人の現行基準値と ICRP 勧告の数値の関係性の検討 （R2 年度に提案）		R2、R3 の重点テーマとして採択可	
VI. 放射線教育、リスクコミュニケーション			
放射線業務従事者に対する放射線教育の充実と不安軽減評価の調査研究			
e-learning を基盤とした放射線業務従事者教育訓練の全国標準オンラインプラットフォーム開発			安全管理学会の委員会で検討
N 災害対応のための消防署員への放射線教育プログラム開発と教育教材の提供			保健物理学会の専門研究会立ち上げ
教育現場における放射線安全管理体制の確立			
義務教育での放射線教育カリキュラム導入を目指した放射線教育担当教員人材育成のモデルケースの構築			
放射線診療における実践的な放射線防護教育に関する研究		R2 より厚労省が着手	
放射線に関する PR 活動の国際状況調査			
トリチウム問題の国際的視点からのアプローチ：各国学会との対話（保健物理学会から H31 に新規提案）			保物学会のシンポジウムで検討
自然科学と社会科学との融合：サイエンスと防護実務に結び付ける研究 （R2 年度に提案）			リスク学会と連携して検討
国際的な放射線防護課題の解決のための研究＝若手育成のための研究 （R2 年度に提案）			

上記提案の取りまとめのプロセス

平成 30-31 年度（平成 31 年度～令和 2 年度の重点テーマの提案）：平成 29 年度に放射線防護アカデミアに参加する団体からのボトムアップからの提案を、平成 30 年度と 31 年度には追加提案を依頼。各提案を代表者会議で審議し、アカデミアからの提案として取りまとめられた。

令和 2 年度（令和 3 年度の重点テーマの提案）：放射線審議会の議論や国際動向、代表者会議メンバーの意見を参考に事業代表者が取りまとめられた。

2.4 放射線防護人材の確保・育成

2.4.1 放射線防護アカデミア参加学会による人材育成の取り組み

日本放射線影響学会、日本放射線安全管理学会、日本保健物理学会では、年次大会やシンポジウムなど学会が主催するイベントやWebを通じて、放射線防護人材の確保・育成に関連するセッションを企画・開催し、若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップを支援する場を提供した。また本事業に若手を参画させることで、若手の活性化を行った。

▶ 日本放射線影響学会の取り組み（参考資料1）

- ・第63回学術大会（WEB開催、福島市）に時期を合わせて、第7回キャリアパス・男女共同参画委員会企画セミナーをオンライン開催した。この取り組みでは、学生を含めた20代若手会員と中堅・シニア会員とのグループディスカッションが行われ、これが、キャリアパスやポスト開拓の話題などに関する若手と中堅・シニア会員との意見交換の場の提供になり、若手会員より参考になったとの好評を得た。
- ・日本放射線影響学会とは別組織として活動してきた「若手放射線生物学研究会」を、2020年3月に「若手部会」として当該学会に統合した。これにより、若手部会の財政的基盤が安定し、若手会員の活躍の場が広がった。
- ・今年度より、若手会員が学会活動に参画し、活躍する機会を増やすために、学会内の主要な委員会に若手部会が推薦する会員を含めて、14名の40歳未満の若手会員を委員として加えた。

▶ 日本放射線安全管理学会の取り組み（参考資料2）

- ・第19回日本放射線安全管理学会学術大会において、若手セッションを企画し、3名の若手が、放射線生物学、核医学、放射線教育分野の発表を行った。
- ・若手奨励金事業を学会規程化し、1名あたり10万円、各年度2名を限度に若手が旅費、研究費として使い、研究活動実績ともなる奨励金を公募選考により授与した。また規程を変更し、准教授以上の授与を避けることにした。
- ・昨年度行った放射線防護アカデミア会員のアンケート調査を分析し、日本放射線安全管理学会の現状報告を行った。

表 5. 放射線防護アカデミア参加学会主催による若手育成関連イベント

学会主催イベント	若手育成関連企画
日本放射線影響学会 第63回大会（福島市Web） 令和2年10月14日	第7回キャリアパス・男女共同参画委員会企画セミナー 学生を含めた20代若手会員と中堅・シニア会員とのグループディスカッション
放射線安全管理学会 第19回学術大会（Web） 令和2年12月11日	若手セッション「若手研究者による放射線に関する研究紹介」 放射線生物学、核医学、放射線教育分野から1名ずつ若手が発表
日本保健物理学会 令和2 年度企画シンポジウム （Web）令和3年1月27日	若手研究会企画セッション「学友会と若手研活動を通して見えた日本保健物理学会 ～未来に向けた提案～」 若手研、学友会の設立経緯とその活動、実績、課題や展望を報告

➤ 日本保健物理学会の取り組み（参考資料3）

- ・「若手研究会（40歳以下の有志学会員）、「学友会（正・準学会員有志）」、「教員等協議会（教職員有志）」の組織を再整備し、確実な活動実施のための予算を優先的に確保、担当理事を新たに設置した。「若手研」「学友会」及び「教員等協議会」の3組織の合同会議を月1回のペースで開催、相互の情報・課題共有や課題解決に向けた議論等を通じて連携を強化した。この成果は、学会企画シンポジウム「学友会と若手研活動を通して見えた日本保健物理学会 ～未来に向けた提案～」(令和3年1月27日)で公表され、学会員と意見交換された。
- ・「若手研」及び「学友会」組織の運営について、学会理事会が積極的に後方支援した。
- ・若手研主催で「内部被曝モデル勉強会（シリーズ）」をオンライン形式で開始した。
- ・IRPAの下で組織されている若手ネットワーク（IRPA-YGN）を通じて、IRPA-15（令和3年1月18～2月5日、オンライン+韓国）で若手企画セッション等の計画・運営を主導的に行った。

2.4.2 放射線防護分野のグローバル若手人材育成

昨年度に引き続き、国際的機関等が主催するイベントに若手を派遣するため、応募要領や対象となる国際的機関の会合、応募期間等については、平成31年度の第11回代表者会議（令和2年1月14日）にて議論され、以下を決定し、放射線防護アカデミアのHP等によりアナウンスを行った。

選考基準：昨年度と同じ

対象となる国際的機関イベント

- ・OECD-NEA 主催 International Radiological Protection School（2020年8月17-21日、ストックホルム）<https://www.oecd-nea.org/rp/irps/>
- ・IAEA 主催 International Conference on the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industry（2020年10月19-23日、ウィーン）<https://www.iaea.org/events/norm-2020>
- ・IAEA 主催 International Conference on Radiation Safety: Improving Radiation Protection in Practice（2020年11月9-13日、ウィーン）<https://www.iaea.org/events/international-conference-on-radiation-safety-2020>

応募期間：令和2年2月4日から令和2年5月31日

コロナ禍において海外渡航が可能か危ぶまれる中、第12回代表者会議（令和2年6月11日）では、今年度の派遣事業を中止するか、あるいは条件を付けて審査を行うか審議を行った。その結果、例年通りの派遣者の選考を行うが、7月末日時点で、量研が渡航を制限している場合、渡航は行わないこととした。

選考の結果、小池弘美氏（東京大学大学院、M1）をIAEA 主催 International Conference on Radiation Safetyに派遣することを決定したが、当該イベントがWeb開催となり、若手派遣および派遣者による報告は行われなかった。

この若手の海外派遣事業については、新型コロナウイルス感染症と関係なく、これまでも若手の海外派遣事業には応募者は少なかった。平成30年度のNW合同報告会では、若手より国際的機関のイベントに限るのではなく、海外で開催される学会も認めたいといった要望があったところである。一方、以前よりは様々な団体により海外助成事業が行われている中、本事業で派遣を行う意義については、繰り返し、代表者会議でも議論を行ってきた。

来年度はコロナ禍の影響が続いていると予想されることや事業の最終年度となることを勘案し、基本、これまでの方針を踏襲しグローバル人材の育成を目的として、若手の海外渡航の対象を広げないこととした。

2.4.3 Webによる進路等個別相談の実施

昨年度実施した放射線防護アカデミア参加学会の会員へのアンケート調査では、若手が欲する情報は様々で、個別対応が必要であると思われた。また今年度は、コロナ禍において学会活動にも制限があると予想されたことから、急遽、Webによる進路等個別相談会の実施を検討した。

第12回代表者会議（令和2年度6月11日）において、事業代表者からの事業計画案が了承され、第13回代表者会議（令和2年8月20日）において、以下の実施要領が検討され、承認された。

- ・相談内容：進学、就職、転職等で、一件当たり20分程度
- ・相談機関：令和2年9月1日から12月25日の平日16-19時
- ・相談者：放射線防護アカデミア参加学会会員に限らない。複数名やグループでの申し込みも可
- ・相談員：放射線防護アカデミア学会員から選定
- ・事前予約制：申し込みフォームに記載された相談内容や希望日時から、相談員とのマッチングを行う

令和2年9月1日よりアンブレラHPや学会のニュースでアナウンスを行うとともに、放射線教育に積極的な教員がいる研究室8か所に直接連絡して個別相談の利用を進めた。しかし、相談者は、アカデミア参加学会外から1人のみであった。

利用者がきわめて少なかった原因として、①Webは顔見知りのコミュニケーションには適当だが、初対面には向かない、②若手のニーズに合っていない、といったことが考えられる。特に、若手から積極的なアクションが行われることを前提とする企画は、若手にとって心理的ハードルが高いと思われる。

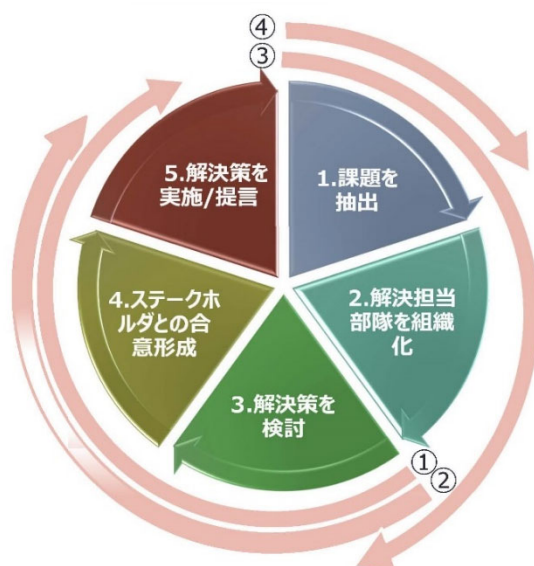
そこで、次年度は、Webinar形式で、放射線防護に関する国際的な機関や委員会が保有する若手研究者の受け入れ制度を紹介したり、若手研究者の関心の高いテーマを選び、海外専門家と国内若手研究者が参加したりするイベントを企画・開催する。

2.5 科学的知見の規制へ取り込むための情報共有、連携の場、協調関係

近年、放射線防護方策の決定に、ステークホルダーの合意形成が必要な場面が増えているが、課題が生じた際に、専門家が適切にステークホルダーの合意形成に関与するためには、事前に「情報共有」「連携の場」「協調関係」という条件が整っている必要がある。

本事業では、上記の条件を満たす環境を整えるため、様々な性格のネットワーク（NW）を統合したアンブレラ型プラットフォーム（＝アンブレラ）を形成するとともに、特定の課題を調査・分析するNWを設置し、ステークホルダーとともに議論し、解決案を提示することを目標としている。

放射線防護アカデミアは、学术界の1つのネットワークとして、①放射線安全規制研究の重点テーマの提案と実施、②放射線防護人材の育成・確保、③実効線量や実用量の新たな概念に関する諸問題、④原子力・放射線事故対応の問題抽出に取り組み、課題解決を目指しながら、「情報共有」「連携の場」「協調関係」の改善を行った。4年目にして、課題解決のためのプロセスの定型化（各段階での適切な主体による関与を含む）を完了した。



- ①放射線安全規制研究の重点テーマの提案と実施（事業1年目から開始）
 - ・研究推進委員会への重点テーマ提案
 - ・アンブレラ事業内での重点テーマ候補研究の実施
- ②放射線防護人材の育成・確保（事業2年目から開始）
 - ・放射線防護人材の現状把握（学会員に関する調査やアンケート）
 - ・若手支援策の実施
- ③実効線量や実用量の新たな概念に関する諸問題（事業3年目から開始）
 - ・国際動向報告会の円卓会議による課題抽出
 - ・WGの組織化、Webinar開催
- ④原子力・放射線事故対応の問題抽出（事業4年目から開始）
 - ・学会ごとに調査・検討の実施

図 6. 定型化された課題解決のためのプロセスと本事業の活動

また昨年度までに、放射線防護アカデミアが、分野連携の推進や科学的知見の規制への取り入れへの貢献、放射線防護人材の確保・育成といった役割を果たす上での必要な情報共有・連携・協調の場を形成し、その実効性を検証してきた。

今年度は、今年度はWebinar（情報集約）や他分野学会との連携（研究遂行）の有用性を確認することができた。

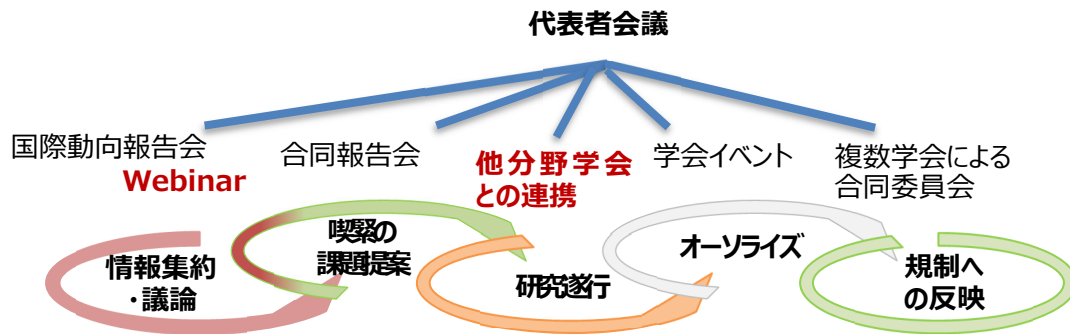


図 7. 情報共有・連携・協調の場として有用であることが検証された仕組み
(赤字は今年度の取り組み)

3. 今後の展望

令和2年12月に、代表者会議では参加メンバーにアンケートを実施し、本事業で行っている活動についての自己評価を実施した。放射線防護アカデミアが関与している活動を大きく分けると、(1) アカデミアが主体的に行っている事業、(2) 活動に関する情報発信、(3) 若手人材のための企画、(4) 活動を企画し、実行する代表者会議のガバナンスに分けることができる。

これらの項目について、放射線防護向上と人材育成確保の2つの観点において、意義があったかどうかを回答した結果を表6に示す。

単純集計の結果、代表者会議メンバーは、放射線防護アカデミアが、一年、一年、方向性を確認しながら進めてきた以下のような活動を高く評価していることが分かった。具体的には以下の3つである。

- 1) 放射線安全規制研究の重点テーマの提案：規制側と専門家の間で認識にはギャップがあることが明らかになり、意見交換する機会を積極的に作った。また学会連携などにより、重点テーマ候補研究を遂行した。
- 2) 放射線防護人材の育成・確保：放射線防護アカデミア内の会員のデータを分析や学会合同でのアンケート調査を実施した。各学会単位での若手人材育成への継続的支援も学会からの期待が高い。
- 3) 国際動向報告会と Webinar：国際動向報告会で抽出したテーマを深く掘り下げるため、実効線量と実用量に関するWGを設置するとともに、Webinarを企画して、広く情報共有を行った。

一方でアンケートの自由筆記欄には改善すべき点についてのコメントも多かった。重点テーマや学会員の調査に関しては、意義はあっても学会全体への浸透は難しく、学会員に理解してもらうのが難しい、あるいは企画委員会に丸投げになったといった意見があった。若手の人材育成の取り組みは、学会の独自性を出すのは難しい、基礎研究の色が濃いと防護人材の育成にはつながらない、といった生の声が聞かれた。

情報発信に関しては、国際動向報告会はアンブレラで実施しなくてもいいという意見や、HPに関して若手が利用する工夫や利用率を上げる工夫が必要という意見があった。

国際機関のイベントへの若手派遣には、応募者が増えるように渡航助成にするという提案や、事前の発表指導も行ってはどうかという意見もあった。

こうした活動の企画、実行を行うにあたっての代表者会議のガバナンスについては、学会や規制側との関係に言及する意見が多かった。具体的には、規制側が学会に何をしているのかを明確にすべき、という意見があった。また学会が防護の課題を抽出することは難しい、規制側との対話は学術的な視点より実務・実学的視点の方がいい、そうすると基礎分野の研究者や基礎研究者が多い学会にとっては関心が高くないといったコメントがあった。さらに学会連携を広げることは、学会と会員にとってメリットが見えない、という意見もあった。

こうしたアンケート結果をベースに、第4回NW合同報告会のパネルディスカッションを実施し、4年間の事業を振り返りを行った。パネルディスカッションには、代表者

会議メンバーのほかに、今年度から本事業に参加した、日本原子力学会保健物理・環境科学部会と日本リスク学会原子力災害の防護方策意思決定タスクグループからの参加があった。放射線防護アカデミア外からは、他分野からの参入に関して、共通課題を示したうえでの Webinar の活用や、副業で放射線防護を担う人材の増加などが具体的な助言が行われた。

こうした自己評価により、比較的学問領域としては近い4つの学会間でも会員の専門性や考え方には違いがあることが再認識された。よって学会連携により様々な専門性と幅広い視点からの検討が可能になるというメリットがある。しかしながら、各学会に横並びの参加を期待するとなると、活動範囲が制限されたり、学会への負荷が大きくなったりするため、持続的な活動は難しくなる。

委託事業終了後、放射線防護アカデミアを自主運営する場合、どういった活動をするのが適当かを、アカデミア内で合意形成を行う必要がある。また活動に適した運営形態を検討し、立ち上げ準備を行うこととなる。

学会のネットワーク化は時代の趨勢ではあるが、今のところその形態はさまざまである。医療被ばく研究情報ネットワーク（J-RIME、現在18学協会が参加）は、会費もなくネットワークの活動全てが参加団体による手弁当で行われている。医療放射線防護連絡協議会（15学協会が参加）では、団体や個人から会費を徴収し、医療放射線防護の広報やICRP委員への支援活動に充当している。また防災学術連携体（58学会・連合が参加）は、日本学術会議の学際連携の発展形として設置されて、日本学術会議との共催シンポジウムの開催が主な活動であるが、緊急事態においては必要な活動を行うこととしている。そのため、参加学会からは会員数に応じた年会費を徴収している。さらには、地球惑星科学連合（現在51団体会員が参加）のように、法人化し、毎春合同の年次大会を開催している例もある。

いずれも、学会にとってネットワークに参加していることにメリットがあることからその活動が支持され、持続している。

こうした学会連携の例も参考にしつつ、学会からの意見を十分吸い上げた上で、次年度は、放射線防護アカデミアの将来像を取りまとめる。

表 6. 代表者会議メンバーへのアンケートの集計結果 (2020 年 12 月に実施)

活動項目	放射線防護向上	人材育成・確保	良かったところ	改善すべき点・考慮すべき点
(1) 防護アカデミアが主導的に行なった活動			<ul style="list-style-type: none"> 他の学会と連携を取れた 現状の規模の学協会の意見交換の場の提供がある点よ 	<ul style="list-style-type: none"> 学会間の連携程度に活動を抑えてはどうか 学会が NW に意味を見いだせたら、手弁当で継続可。事務局も各学会の持ち回りにする。
参加団体が合同で行った活動(低線量コンセンサスの策定や実効線量と実用量に関する WG の活動等)	◎		<ul style="list-style-type: none"> 管理の現場でも必要な知識を提供したアンブレラらしい活動 学会によって防護に関する認識に差異があり、この手の活動が現実的 	<ul style="list-style-type: none"> 若手会員を含めれば良かった
参加団体ごとの検討や調査(重点テーマの提案、学会員の調査、事故・緊急時対応向上のための提言)	◎		<ul style="list-style-type: none"> 若手会員が参加した点 会員の動向を他学会とも共有できた 各学会の視点で共通のテーマにアプローチするといった検討プロセス 	<ul style="list-style-type: none"> 重点テーマの提案は止める 防護に関心がある会員は少なく、活動の意義を学会に理解してもらおうのが難しい 請負事務的で、企画委員会に丸投げ的な対応になった
共通の活動を参加団体ごとに実施(若手人材育成のための取り組みや規制側との対話の場の提供)	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 若手人材の育成は持続的の活動が大切 イベントのプログラムが埋まるのでメリットはあった。 	<ul style="list-style-type: none"> 学会の独自性を出すのは難しい 会員によっては防護への関心に個人差があり、学会全体としては情報が生かされにくい 基礎研究志向だと、防護人材の育成につながりにくい
課題解決型 NW への関与(学会からの参加、議論の場の提供)	○		<ul style="list-style-type: none"> これまでにない試み 	<ul style="list-style-type: none"> NW から学会に対して、推薦依頼が必要 学会への進捗の情報共有が必要 学会の専門研究会等の形式で実施する仕組みはどうか
(2) 情報発信				
国際動向報告会	◎	◎	<ul style="list-style-type: none"> 一般会員のベースラインアップに寄与 	<ul style="list-style-type: none"> 同種の会合は他でも行われている。
NW 合同報告会				
NW が行っているステークホルダー会合				<ul style="list-style-type: none"> アンブレラとは切り離しても良い
実効線量と実用量に関する WG が行っている Webinar (全 5 回シリーズ)	◎	◎	<ul style="list-style-type: none"> 新たなテーマを設定すれば継続可 	
国際的機関からの専門家との意見交換(ICRP 関連の国内会合の開催、専門家の招へい)	○		<ul style="list-style-type: none"> 一般会員のベースラインアップに寄与 	<ul style="list-style-type: none"> 他でもやっているの、アンブレラと切り離してもよい 他でやっている活動と連携するとよい

放射線防護アンブレラ HP(掲示板機能など)の内容更新・システム運用	○		・情報交換に必要である	・人材育成にかかわる情報をもっと掲載し、若手に見もらう工夫ができるといい ・ログ数などデータを解析すべき
放射線影響・防護ナレッジベースの内容充実・更新・システム運用			・役に立つ	・利用率向上のための工夫が必要
(3)若手人材のための企画			良かったところ	改善すべき点・考慮すべき点
国際的機関が主催するイベントへの若手の派遣(グローバル人材の育成)	○	◎		
進路等個別相談会(Web)			・良い企画である ・アンブレラの活動にフィードバックできる／継続的に係られるような人を派遣するシステム	・イベント申込締切の前段階で派遣者を決定する仕組みだと応募者は増える ・行き先を決め打ちする研究職希望者にはあまり馴染まない ・海外発表の経験のない若手を優先的に選び、渡航前に発表練習をさせてはどうか ・ICRPのmentor/mentee制度等を活用してはどうか
(4)代表者会議によるアンブレラのガバナンス			・企画としては良い	・コンサルタントが「進路指導」のスキルを共有してはどうか ・気軽に申し込んでもらう工夫が必要
防護関連の課題抽出のための積極的関与(WGの設置、政策提言など)	○			・規制側が学会に何を期待しているかを明確にすべき。真に必要なことは学会の自主的な活動ではなく委託にすべき。
アンブレラ内での情報発信・共有(具体的なイベントは(2)を参照)			・良い機会になった	・規制側が必要とする標準の策定が適当 ・学会によっては防護の課題抽出への積極的関与は難しい
規制側との対話の場の確保(クロースドの場で)	◎		・アンブレラ内での情報共有は有益 ・こうした場が設けられるだけでも画期的	
市民との対話の場の確保(NW 合同報告会等のオープンの場合)			・代表者会議に放射線防護部署から出席することが必要	・学術的視点より実務学的視点の展開がよい ・基礎研究者にとって規制側からの情報の関心は高い
他学会との連携/アカデミア拡充に向けたリード(産業衛生、原子力、リスク、医療放射線分野など)	○			・放射線影響等も含めた観点で公開の場を設定するとよい ・若手も参画するとよい

回答者の75% (◎) あるいは過半数 (○) が「意義があった」と判断した項目

表 7. 令和 2 年度 代表者会議年間スケジュール

	アンブレラ全体	学会・NW
5月31日	R2年度 若手派遣 締め切り →採択者決定(6月21日に通知)	
6月11日	第12回代表者会議 ・今年度の活動計画の確認	
6月29日		保健物理学会大阪大会(Web)
7月22日	担当者打ち合わせ会議 ・Webinar 開催とWGの作業内容の決定	
7月27日		リスク学会:原子力災害の防護方策の意思決定に関する検討 TG(意思決定 TG)の Web 会合
8月20日	第13回代表者会議 ・代表者会議ならびに学会活動の計画・進捗の確認	
9月1日	Webによる進路相談会事業開始 (~12月25日)	
9月4日		線量 WG 第1回会合
9月16日		原子力学会保健物理・環境科学部会との打ち合わせ
10月3日		放射線事故・災害医学会学術集会(千葉)Web 大会
10月15,16日		放射線影響学会 年次大会(福島) Web 大会
10月23日		リスク学会意思決定 TG Web 会合
10月27日	国際動向報告会企画会議	
10月30日	実効線量と実用量に関する Webinar(1)	
11月18日		線量 WG 第2回会合
11月20日	令和2年度第1回研究推進委員会 重点テーマのヒアリング	
11月21,22日		リスク学会 第33回年次大会
11月24日	実効線量と実用量に関する Webinar(2)	
12月9-11日		放射線安全管理学会 学術大会(沖縄)Web 大会
12月18日	実効線量と実用量に関する Webinar(3)	
12月23日		リスク学会意思決定 TG の Web 会合
12月25日	第14回代表者会議 ・今年度の活動のまとめ ・次年度(最終年度)の事業概要	
1月8日	国際動向報告会	
1月22-29日	第15回代表者会議(メール審議) ・次年度計画決定 ・アンブレラ事業終了後について	
1月25日	実効線量と実用量に関する Webinar(4)	
2月9日	NW 合同報告会	
2月18日	研究成果報告会	
2月22日	実効線量と実用量に関する Webinar(5)	
2月26日		報告書提出(学会)
3月1日	第16回代表者会議(Web 会議) ・次年度の計画	
3月4日		線量 WG 第3回会合(デトリメントに関する講演等)
3月31日	報告書提出(代表者会議)	

表 8. 代表者会議 構成員リスト(令和 3 年 3 月 1 日現在)

参加団体	被推薦者	所属
日本放射線安全管理学会	中島 覚	広島大学 自然科学研究支援開発センター
	松田 尚樹	長崎大学 原爆後障害医療研究所
日本放射線影響学会	児玉 靖司	大阪府立大学大学院 理学系研究科
	小林 純也	国際医療福祉大学 成田保健医療学部
日本放射線事故・災害医学会	富永 隆子	量研・高度被ばく医療センター
	細井 義夫	東北大学大学院 医学系研究科
日本保健物理学会	飯本 武志	東京大学 環境安全本部
	甲斐 倫明	大分県立看護科学大学
放射線リスク・防護研究基盤	甲斐 倫明	大分県立看護科学大学
	酒井 一夫	東京医療保健大学

運営母体	担当者	所属
原子力規制委員会原子力規制庁	高橋 知之	プログラムオフィサー 京都大学 複合原子力科学研究所
	高山 研	放射線防護グループ 放射線防護企画課
	大町 康	
	小林 駿司	
	荻野 晴之	
	滝 剣朗	
量子科学技術研究開発機構	神田 玲子	放医研 放射線防護情報統合センター
	岩岡 和輝	放医研 放射線防護情報統合センター
	山田 裕	高度被ばく医療センター
日本原子力研究開発機構	百瀬 琢磨	核燃料サイクル工学研究所
	吉澤 道夫	原子力科学研究所
原子力安全研究協会	杉浦 紳之	理事長

参考資料リスト

参考資料 1 放射線影響分野における放射線防護対策の推進に関する調査と提言
ならびに放射線防護人材の確保・育成(日本放射線影響学会)

参考資料 2 放射線防護対策の推進に関する調査と提言(日本放射線安全管理学会)

参考資料 3 放射線防護対策の推進に関する調査と提言(日本保健物理学会)

参考資料 4 活動報告(日本放射線事故・災害医学会)

参考資料 5 実効線量と実用量に関する Webinar(全 5 回シリーズ)資料集

参考資料 6 ティエリー・シュナイダー博士へのインタビュー全文

令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(放射線防護研究分野における
課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成)

放射線影響分野における放射線防護対策の
推進に関する調査と提言
ならびに放射線防護人材の確保・育成

令和3年2月
一般社団法人
日本放射線影響学会

目次

1. 放射線防護に係る海外の最新知見の収集	
1.1 確定的影響の RBE とその線量評価における諸問題	1
1.1.1 テーマを選んだ経緯や背景	1
1.1.2 最新知見の収集方法	3
1.1.3 得られた知見と考察	3
2. 国内の放射線規制の課題に関する調査・提言	
2.1 大規模な放射線災害発生時の線量推定法の評価	44
2.1.1 テーマを選んだ経緯や背景	44
2.1.2 調査や提言取りまとめの実施方法	45
2.1.3 調査結果および提言	45
2.1.4 提言を実現する上での課題やロードマップ	55
3. 人材育成	
3.1 放射線防護人材の確保・育成に関連する取り組み	57
3.2 若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップ支援に関する取り組み	57
3.2.1 日本放射線影響学会の取り組み	57
3.2.2 Web による進路等個別相談会への参加	58
4. 特記事項	
4.1 放射線防護アカデミアが提案した重点テーマに関する取り組み	58
4.2 その他	58
5. 参考資料	
5.1 被ばく医療における線量評価に関する調査(アンケート用紙)	別紙
5.2 被ばく医療における線量評価に関する調査(アンケート回答)	別紙
5.3 線量評価手法に関する動向調査結果	別紙
5.4 The 3rd WHO BioDoseNet survey	別紙

1. 放射線防護に係る海外の最新知見の収集

1.1. 確定的影響の RBE とその線量評価における諸問題

1.1.1. テーマを選んだ経緯や背景

日本放射線影響学会では、平成 29 年度より原子力規制庁の放射線安全規制研究戦略的推進事業の一部業務を請け負い、これに対応する組織として「放射線リスク・防護検討委員会」を設置し、関連する課題の検討に取り組んできた。

本年度(令和2年度)には、当該事業のうち「放射線影響分野における放射線防護対策の推進に関する調査と提言ならびに放射線防護人材の確保・育成に関連する業務」の一環として、確定的影響の生物学的効果比(RBE)とその線量評価における諸問題を取り上げ、最新の科学的知見の収集・整理を行うこととした。本節ではその経緯及び背景について概説する。

1.1.1.1. 放射線事故時に生じ得る確定的影響

放射線被ばくが人体にもたらす影響は、その特徴に応じていくつかに分類できる。まず、影響が当人に現れるか子孫に現れるかで「身体的影響」と「遺伝性影響」に区分される。前者の身体的影響は、比較的速やかに現れる「早期影響」と長い潜伏期間を経て現れる「晩発影響」に分けることができる。そして、しきい値となる線量、すなわち「しきい線量」が有るか無いかで「確定的影響(組織反応)」と「確率的影響」に分けられる。早期影響は「確定的影響」になり、白内障は例外的に「晩発影響」だが「確定的影響」に分類される。「確率的影響」には、「晩発影響」のがん・白血病と「遺伝性影響」が含まれる。

放射線が人体に入射すると、遺伝情報を蓄えたDNA鎖が損傷を受ける。損傷が少なければ、その傷は綺麗に修復されて影響は現れないが、DNA鎖が複雑な損傷を受けると、修復できずにその細胞が死に至る、それが同じ組織内の多くの細胞で同時に起こると、組織の機能に障害をもたらす、「確定的影響」として認識され得る。例えば皮膚の場合、皮膚の細胞を作る幹細胞が機能を失うと、紅斑を経てびらんや潰瘍等が生じ、その範囲が大きいと個体が死に至ることもある。なお、「確率的影響」とは、DNAの損傷が誤って修復され、それが変異として残り、時間が経ってからがんや先天性異常として現れる影響を意味する。

1.1.1.2. RBE の定義とその変動要因

γ線と中性子など、種類の異なる放射線が混在した場での被ばくに対しては、その線質毎に生物効果の違いを考慮した重み付けをした上で吸収線量を加算して、その影響を予測評価する必要がある。これを式で表すと次のようになる。

$$D_{Total} = D_{X/\gamma-rays} + RBE \times D_{Particle} \quad [\text{GyEq}] \quad (1)$$

ここで D_{total} は総吸収線量、 $D_{X/\gamma-rays}$ はX線や γ 線など低 LET 放射線の吸収線量、 $D_{particle}$ は中性子など高 LET 粒子、そして RBE は生物学的効果比 (Relative Biological Effectiveness, RBE) である。LET とは、線エネルギー付与 (linear energy transfer) のことで、粒子飛跡の単位長さ (通常は μm) 当たりに組織に付与されるエネルギーを意味する。RBE は、高 LET 粒子の線量 ($D_{particle}$) の重み付けの係数として一般に使われる指標で、対象とする高 LET 粒子が、基準となる放射線 (通常は γ 線又は X 線) に対して、同じ生物効果を生じるのに要する線量の比として定義される。RBE 値の意味を図で表現すると図 1.1.1.2.1. のようになる。

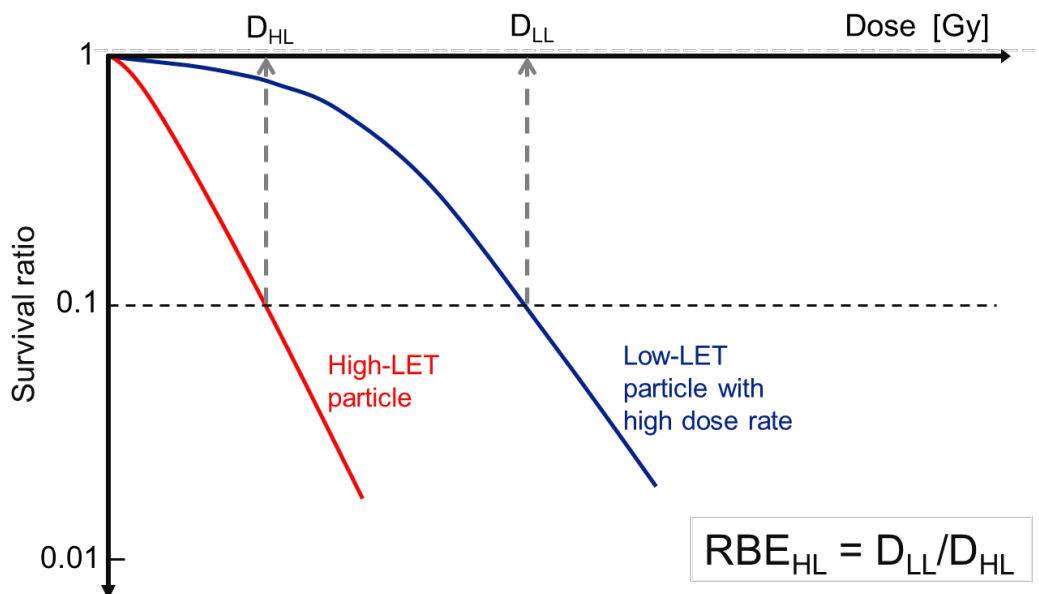


図 1.1.1.2.1. 被ばく線量と生残率の関係. RBE は高 LET 粒子と基準放射線 (低 LET 放射線) の2つの放射線において同じ生物効果をもたらす線量の比として得られる.

この図から推察されるように、高 LET 粒子の種類や基準放射線 (低 LET 放射線) の線量率が異なれば、生物効果の線量応答のカーブが変わり、それによって RBE の値も変化する。また、着目する生残率や重篤度のレベルによっても RBE の値は変化する。したがって、 α 線や中性子などで被ばくした人に対する医学的処置の判断に供する RBE 値の選定においては、その被ばくの状況 (被ばくした組織/臓器、懸念される症状、粒子の種類・エネルギー、線量率等) を正確に把握して、最も適切な値を採用することが重要である。

一方、そうした線質が異なる複数の放射線で高線量の被ばくを受ける事故や事象が発生した場合に、どのように最適な RBE 値を適用して将来発現し得る影響を予測評価するかという点についての具体的な指針は見当たらない。そこで、本学会におい

では、高線量被ばくがもたらす主要な確定的影響の RBE 値に関する最新の情報を収集・整理するとともに、これらの RBE 値を被ばく医療で採用するにあたっての課題について考察することとした。

1.1.2. 最新知見の収集方法

本学会では、本年度(令和2年度)、「放射線リスク・防護検討委員会(委員長:児玉靖司会員)」の下に「確定的影響の生物学的効果比に関する小委員会」(以下「RBE小委員会」という。)を設け、確定的影響についての RBE 値についての情報を収集し整理するとともに、それらを吸収線量の重みづけに用いるうえでの諸問題とそれらの解決に向けた方向性を示すことを目的として、報告書の作成作業に取り組んできた。RBE 小委員会の委員名及び所属を、主な執筆担当分野と共に表1.1.2.1.に示す。

表 1.1.2.1. RBE 小委員会委員の氏名、所属及び主な執筆担当分野
(氏名の五十名順).

委員名	所属	主な執筆担当分野	備考
高橋 昭久	群馬大学	白内障	
永田 健斗	量子科学技術研究開発機構	脳・中枢神経障害	若手推薦枠
長谷川 有史	福島県立医科大学	造血機能・循環器障害	
保田 浩志	広島大学	RBE 概説、全体調整	委員長
吉田 由香里	群馬大学	皮膚障害、消化器系障害、その他	
王 冰	量子科学技術研究開発機構	生殖機能障害、胎児影響	

1.1.3. 得られた知見と考察

RBE 小委員会では、高線量被ばくがもたらす確定的影響の RBE 値に関する広範な情報を、主要な生物学的エンドポイント(造血機能障害、皮膚障害、腸機能障害、中枢神経障害、生殖機能障害、白内障及びその他)毎にとりまとめ、これらの RBE 値を被ばく医療に取り入れる際の課題について考察を試みた。以下、得られた知見等を生物学的なエンドポイントごとに記す。

1.1.3.1. 皮膚機能障害(脱毛含む)

1.1.3.1.1. 皮膚障害のメカニズム

ヒトの身体全体を覆う皮膚は、皮下組織を含むと体重の約 16%を占める人体で最大の面積及び重量を有するひとつながりの臓器である。皮膚は、体内と外界の環境を隔て人体の恒常性を維持する重要な役割を果たしており、それを果たすためにさまざま

まな機能を持ち、それを実現するための複雑な構造を有している(図 1.1.3.1.1.)。

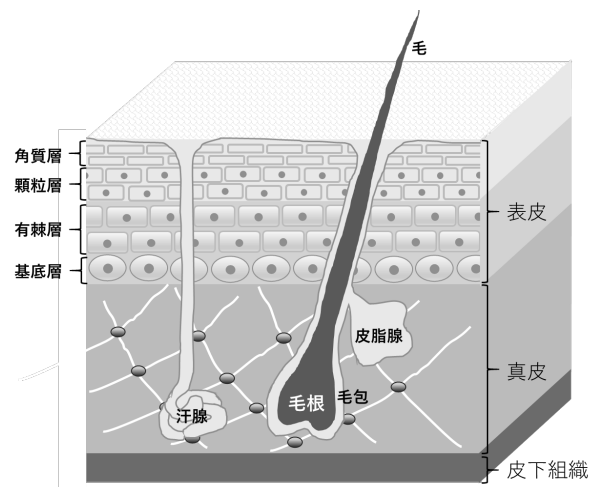


図 1.1.3.1.1. 皮膚の構造.

皮膚は、おおまかに表皮・真皮・皮下組織の 3 層構造をとっている。最も外側の層である表皮は上皮組織であり、成熟段階によって異なる形態の角化細胞が層状に配列し、深部から、基底層、有棘層、顆粒層、角質層の 4 つに分類される。基底層には幹細胞が存在しており、これらが分裂増殖して分化し、成熟して有棘細胞・顆粒細胞になったあと、角化して脱落していく。

放射線により最も大きな障害を受けるのは基底細胞であり、被ばくすると細胞分裂が停止し、被ばく後 3~5 週以内に表皮形成不全が発症する。その重篤度は線量に依存しており、一定の線量以下では、細胞増殖が再開されて重大な障害はなく治癒する。しかし、ある線量を超えると、増殖再開が遅延し、このため、成熟上皮細胞が角化、剥離し続けるのに細胞供給が追いつかないために表皮の組織が失われ、びらんや潰瘍などの湿性落屑として現れる。また、放射線は、毛根の中にあり、毛の基となる毛母細胞の増殖を抑制する。4~10 Gy の一回照射は、一過性又は永久的な薄毛や脱毛症が発生し、分割照射では 40 Gy まで照射しても 1 年以内には毛が再生するが、しばし脱色を伴う。線量がさらに多く、基底細胞が回復不能なダメージを受けている場合は、上皮組織の修復がないために難治性の潰瘍を形成することになる。真皮に存在する血管内皮細胞は緩やかなターンオーバーがあり、放射線により内皮が回復不能な障害を受けると、血流障害や血管閉塞が起こり、皮膚は壊死に陥る。晩期障害は、照射後 26 週以降に生じるが、これらは、皮下組織の比較的太い血管や結合組織などターンオーバーの遅い組織の障害で、毛細血管拡張症や皮下組織の線維化による硬結(菲薄化)、壊死などがある。C3H/He マウスに炭素線を照射した際の実際の皮膚の様子を図 1.1.3.1.2.に示す。なお、この写真における脱毛は実験の都合上、

人為的に行ったもので、放射線による影響ではないことに注意されたい。



紅斑 乾性皮膚剥離 湿性皮膚剥離

図 1.1.3.1.2. 炭素線を照射した際のマウス皮膚の様子
(群馬大学・吉田由香里会員の提供)。

このように皮膚は、それぞれの細胞の放射線感受性、ターンオーバーの速度に依存して、被曝した直後から、年余にわたるまで多彩な放射線障害があり、その発現時期も異なる(表 1.1.3.1.1.)。また特異な場合として、線量が 100 Gy を超えるような場合には、急性皮膚壊死や潰瘍がきわめて早期(10~14 日)に生じる。これは増殖細胞か増殖停止細胞であるかにかかわらず、細胞が有糸分裂を経ずに直接細胞死(いわゆる間期死)を起こすため、急速に増殖細胞層や成熟皮膚細胞が失われるためである。

表 1.1.3.1.1. 被ばく線量による皮膚症状と発症時期 (IAEA, 1998)。

症状	線量範囲 [Gy]	発症時期 [日]
紅斑	3-10	14-21
脱毛	> 3	14-18
乾性皮膚剥離	8-12	25-30
湿性皮膚剥離	15-20	20-28
水泡形成	15-25	15-25
潰瘍(皮膚内)	> 20	14-21
壊死(深部)	> 25	> 21

なお、皮膚の放射線応答については、ICRP が Publication 59 (ICRP, 1992)において詳細な記述をしており、また Publication 85 (ICRP, 2000) 及び Publication 118 (ICRP,

2012)にも要約が記されている。

1.1.3.1.2. 皮膚障害の RBE

皮膚の放射線感受性に最も大きな影響を与える因子は、皮膚組織に入射した粒子の電離密度であり、これは LET で評価される。非常に低い線量かつ分割線量の RBE 値は、高エネルギー高速中性子(42 MeVp+Be 又は 62 MeVp+Be)の場合には 3~4、低エネルギー速中性子(4 MeVp+Be)の場合には約 8 であり、一回線量が 10 Gy を超える場合には 1.5~4.0 であることが報告されている(Hopwell et al., 1988; Joiner & Field, 1988)。分割照射における RBE 値については、速中性子線を用いたマウス実験から、一回線量が大きくなるにつれて RBE 値が小さくなることが報告されている(Denekamp, et al., 1976; Joiner MC., et al 1983)。陽子線においては、早期皮膚反応をエンドポイントとして Spread Out Bragg Peak (SOBP)中心での RBE 値は、⁶⁰Co を基準放射線とした場合には 1.1~1.15 (Raju et al., 1978; Nemoto et al., 1998; Tepper et al., 1977)、X 線 300 kV を基準放射線とした場合には 0.75 (Tatsuzaki et al., 1991)、240 kV の X 線を基準とした場合には 0.90 (Sorensen et al., 2017)と報告されている。他に、これまでに報告されている *in vivo* 実験から得られた皮膚における炭素線の RBE 値について表 1.1.3.1.2.に示す(Karger et al., 2018)。Ando et al.(1998)のデータから、LET が高くなると RBE 値が大きくなることが分かる。

表 1.1.3.1.2. 皮膚における炭素線の RBE 値.

動物種	エンドポイント	基準放射線	分割回数	LET [keV/μm]	RBE 値	文献
ゴールデンシリアンハムスター	Average ventral thoracic skin reaction	X 線 225 kV	1	Modified	1.60	Leith et al., 1981
			2	Bragg	1.80	
			5	peak	1.90	
C3H/HeMsNrsf マウス	湿性落屑	Cs-137 γ 線	1	14	1.45	Ando et al., 1998
				20	1.75	
				42	2.15	
				77	2.50	
			2	14	1.35	
				20	1.40	
				42	1.50	
				77	2.40	

			4	14	1.40	
				20	1.60	
				42	1.85	
				77	3.20	
			8	14	1.60	
				20	1.90	
				42	2.25	
				77	3.20	
CDF1 マウス	湿性落屑	X 線 240 kV	1	65	1.36	Sorensen et al., 2015

1.1.3.2. 消化器系への影響

1.1.3.2.1. 消化管について

消化管は、口腔から食道、胃、小腸、大腸、直腸、肛門部まで通常は閉鎖された管状の器官である。非常に放射線感受性の高い臓器であり、全身被ばくにおいては、消化管障害は生存決定因子の1つとして知られている。放射線による消化管障害の発生率と重篤度は、放射線線量、照射を受けた臓器の体積、分割照射スケジュール、及びほかの要因により異なる。表 1.1.3.2.1.にヒトの急性組織障害及び晩期組織障害について、各臓器の全容積における耐容線量を示した(Joiner & Kogel, 2018)。消化器系の様々な器官における線量—体積効果に関する情報については、QUANTEC (Quantitative Analysis of Normal Tissue Effects in the Clinic)グループによる報告を参照されたい(Deasy et al., 2010; Kavanagh et al., 2010; Michalski et al., 2010; Rancati et al., 2010; Werner-Wasik et al., 2010)。なお、これまで放射線による消化管障害の重篤度は幹細胞／前駆細胞に生じるアポトーシス又はクローン形成細胞死の程度にのみ依存すると考えられていたが、この見解は、放射線が誘発した細胞機能の変化と多くの二次的なプロセスが放射線毒性の病態生理学的な発現に大きく寄与するという認識に取って代わられた(ICRP, 2012)。

表 1.1.3.2.1. 放射線治療によるヒト消化器系の急性組織障害及び晩期組織障害における耐容線量

臓器	エンドポイント	症状が現れるまでの期間	耐容線量 [Gy]
口腔粘膜	潰瘍性粘膜炎	照射期間中(2~3週)	20
唾液腺	萎縮／線維症	数か月～数年	60~70
	一過性の機能損失 (口内乾燥症)	照射期間中(2週目)	10~20
	機能損失 (口内乾燥症)	早期反応からの継続	25
食道	嚥下障害	照射期間中	40~45
	潰瘍	照射期間中～数か月	55
胃	弛緩	照射期間中	20
	潰瘍	数か月	50
小腸	吸収不良	照射期間中	30
	潰瘍／障害	数か月	40
大腸	下痢、痛み	照射期間中～終了後	10~20
	潰瘍／障害	数か月～数年	45
直腸	直腸炎	照射期間中	50
	慢性炎症、潰瘍	数か月～数年	60
肝臓	静脈閉鎖疾患	2~3週	30
膵臓	線維症	数か月～数年	50~60

1.1.3.2.2. 小腸

小腸は消化管の中でも特に感受性が高く、低線量(1 Gy)の被ばく後に、悪心、嘔吐、下痢などの前駆症状がみられる。ヒトの場合には 6 Gy を越える線量の被ばく後に、放射線性消化管症候群(gastrointestinal syndrome; GIS)が発症する。栄養吸収や物理的バリアなどの上皮機能が失われ、吸収障害、下痢、出血に加えて、腸内細菌の組織内侵入に伴う感染症や敗血症といった急性期障害が引き起こされ、被ばく後、通常 10 日以内(ほとんどが 5~7 日後)に死亡する(Waselenko et al., 2004; Berger et al., 2006; ICRP, 2012)。

小腸の粘膜は一層の上皮によって覆われており、管腔側に伸びた突起状の構造をした絨毛と、その下部にある窪みのクリプト(陰窩)に区分される(Potten et al., 2009) (図 1.1.3.2.1.)。絨毛には吸収上皮細胞が非常に多く存在するほか、粘液を産生する杯細胞が存在し、栄養吸収や物理的バリアといった主な上皮機能を司っている。クリプトには腸上皮幹細胞が存在しており、活発に増殖・分化を繰り返している。派生した

娘細胞は成熟して繊毛に移動して上皮層を形成し、最終的には繊毛の先端から管腔内へと脱落する。小腸ではこのような上皮の更新が 3~4 日を周期として絶えず行われている。

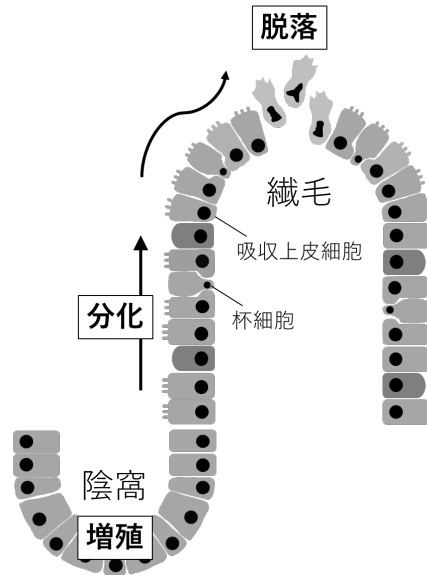


図 1.1.3.2.1. 腸管の構造.

クリプトの腸上皮幹細胞や娘細胞は非常に放射線感受性が高く、中等度の被ばくでは、繊毛の短小化が起こるが、幹細胞が回復すると、失われた細胞が供給されて、繊毛はもとに戻る。しかし、大線量では、幹細胞がほとんど死滅するため、繊毛への細胞供給が途絶えてしまい、上皮構造が破綻して GIS に陥る。被ばく後、数か月あるいは数年で現れる合併症としては、線維化狭窄、腸穿孔及び瘻管形成がある(ICRP, 1984)。分割照射における単回線量の大きさは、主に遅延性傷害に影響を及ぼすのに対して、治療期間は急性期と遅延性の両方の放射線応答に影響を及ぼす(Langberg et al., 1994; Langberg et al., 1996)。

1.1.3.2.3. 肝臓

肝臓もまた放射線感受性が高く、ヒト消化管系の実質臓器のうち、しきい線量が最も低いといわれている。また、明白な体積効果を示し、器官の大部分又は全体が被ばくした場合の障害のしきい線量は低い。通常の 2 Gy 分割で総線量 30 Gy が耐容線量である。放射線肝障害のうち、もっとも重要である肝炎は、急性期(照射後 2~6 週)に出現する。肝全体が通常の分割治療で 30 Gy 受けた場合、一般に 5~10%の肝炎が起こることが知られている(Marks et al., 2010; Pan et al., 2010)。肝小葉の中心静脈の損傷も含めて、血栓症及び門脈圧亢進症を伴う変化は、肝機能不全、肝肥大、腹水の兆候を示し、死に至ることがある(ICRP, 1984)。我々は、ラットに X 線 30 Gy を

全肝照射した場合、照射後 20 週以内に 60%のラットが死亡することを報告している (Imaeda et al., 2014)。肝細胞の入れ替わりは通常遅いため、放射線による急性の肝障害は幹細胞の再生の妨害によるものではない。

1.1.3.2.4. 消化器系障害の RBE

マウス腸管クリプト生残率をエンドポイントとした実験から、腸管の炭素線における RBE 値は LET に依存して大きくなること、照射分割回数に依存して大きくなることが分かっている (Yoshida et al., 2015)。これまでに報告されている *in vivo* 実験から得られた消化器系における炭素線 1 回照射による RBE 値について表 1.1.3.2.2. にまとめた。このほかに、正常マウスの腸管クリプトアッセイをエンドポイントとした陽子線の 1 回照射による RBE 値は 1.08~1.18 であること (Gueulette et al., 2004) や、APC^{1638N/+} マウスを用いた腸及び大腸への腫瘍発生をエンドポイントとした実験において、様々な線種における RBE 値が報告されている (Suman et al., 2016; 表 1.1.3.2.3.)。

表 1.1.3.2.2. 消化器官における炭素線の RBE 値.

臓器	マウス種	エンドポイント	基準放射線	LET [keV/μm]	RBE 値	文献
肝臓 (部分肝切除後)	Balb/c	肝不全 LD50/60	X線 200 kV	50±7	1.86	Tomizawa et al., 2000
腸	Balb/c NMRI C57 black	クリプトアッセイ	⁶⁰ Co γ線	13.7	1.3	Gueulette et al., 2004
				40.9	1.6	
				49.4	1.7	
				70.7	1.9	
	C3H/He	クリプトアッセイ	⁶⁰ Co γ線	42	1.44~ 1.47	Uzawa et al., 2009
				50	1.57~ 1.63	
				74	1.80	
	C3H/He	クリプトアッセイ	X線 200 kV	20	1.01	Yoshida et al., 2015
77				1.72		

表 1.1.3.2.3. APC1638N/+マウスを用いた消化器官の RBE 値; 基準放射線は全て ^{137}Cs - γ 線.

臓器	性別	線種	RBE 値	臓器	性別	線種	RBE 値
腸	オス	^{12}C	1.5	大腸	オス	^{12}C	3.5
		^{56}Fe	2.3			^{56}Fe	5.6
		^{28}Si	4.8			^{28}Si	9.3
	メス	^{12}C	1.6		メス	^{12}C	3.3
		^{56}Fe	2.4			^{56}Fe	5.0
		^{28}Si	3.1			^{28}Si	8.1

1.1.3.3. 造血機能障害及び循環器系への影響

1.1.3.3.1. 造血組織への影響

1.1.3.3.1.1. 造血組織の解剖学的・生理学的特徴と放射線被ばく時の反応

造血機能の中心を担う臓器は骨髄であり、血流により体内を循環する機能細胞としての血球を産生する。造血幹細胞(hematopoietic stem cell:HSC)はあらゆる血球の起源であり、自己複製能と多分化能の双方を持つ。HSC は多能性前駆細胞(multipotent progenitor:MPP)に分化して自己複製能を失った後、骨髄球系とリンパ球系の2系統に分化する。骨髄球系 MPP は顆粒球系、巨核球系、赤芽球系前駆細胞への分化を経て、コロニー形成細胞(colony forming unit: CFU)となり分化を終え、それぞれ赤血球、血小板、好酸球、好塩基球、肥満細胞、好中球、単球へと成熟してゆく。同様に、リンパ球系 MPP は B 前駆細胞、及び T 前駆細胞で分化を終え、Bリンパ球、Tリンパ球、NK 細胞へと成熟してゆく。上記のうち HSC, MPP, CFU が骨髄に存在する(ICRP, 2012)。

放射線被ばくにより、血球産生の幹細胞に細胞死を来すような組織反応が発生し、造血機能が障害されると血球減少が起こる。骨髄を構成する細胞は上述の如く一般に細胞分化能が高い。放射線は細胞分化が活発な組織をより強く障害するため、骨髄構成細胞は放射線感受性が高く、中でも白血球系、特にリンパ球の放射線感受性が高い。そのため、被ばくによる確定的影響では白血球系、血小板系、その後に赤血球系が枯渇して骨髄が無形成に陥り臓器不全に至る。

骨髄が確定的影響を受けるか受けないかは、生存する幹細胞の数に依存する。骨髄が 0.5~1Gy の被ばくを受けると血球減少を来し、2Gy で被ばく部分の骨髄における造血機能障害を来すが、上記の程度の被ばくでは非被ばく部分の機能によって骨髄機能は補完される。5~6Gy の全身照射を受けると 15 日以内に血球が消失する(IAEA, 1971)。ヒトの全身被ばくにおける 60 日間 50%生存率(LD_{50/60d})は低 LET 放射線で 2.5~5Gy とされ、主な死因は感染や出血で、小児は成人に比べて感受性が高いことが知られている(UNSCEAR, 1988; 2013)。

1.1.3.3.1.2. 造血器障害の RBE

骨髓に於ける確定的影響の RBE 値は、主に実験動物における放射線照射後の反応を対照放射線(X 線や γ 線)間で比較することで調査研究されてきた。当初は 30 日間 50%生存率に基づく RBE 値(RBE-LD_{50/30d})が広く用いられたが、放射線以外にも多様な因子が死亡に影響するため、徐々に実験動物の骨髓幹細胞の反応を CFU-S (colony-forming units-spleen)、GM-CSF (Granulocyte Macrophage colony-stimulating Factor)、Meg-CFC (megakaryocyte progenitor cells)など生存率を用いた RBE 値 (RBE₅₀:コロニーや細胞の 50%生存率から得られた RBE 値、RBE₁₀:10%生存率から得られた RBE 値、RBE slope ratio:生存率曲線の傾きから得られる D₀の比)で示されるようになった。

重イオンの RBE 値について、Ainsworth ら(1983)は、400MeV/u の炭素線及びネオン線を全身照射したマウス骨髓中の CFU-S 生存率のデータに基づき、炭素線では RBE₁₀=1.5, RBE₅₀=1.5、ネオン線では RBE₁₀=1.6~1.7, RBE₅₀=2.3~2.5 であると報告した(Ainsworth et al., 1983)。Leith ら(1983)は、全身照射マウス骨髓中の CFU-S をエンドポイントとして、拡散ブラッグピークの炭素線とネオン線の ⁶⁰Co- γ 線(mid-peak 領域)に対する RBE 値を調べ、それぞれ RBE₁₀=1.8 及び RBE₅₀=2.4(炭素線)、RBE₁₀=1.2 及び RBE₅₀=2.8(ネオン線)と報告している(Leith et al., 1983)。坪井ら(1993)は、炭素線を全身照射したマウスの骨髓中細胞の生存率から、炭素線の RBE 値について、RBE slope ratio で 1.68(CFU-S)、1.56(GM-CFC)及び 1.25(Meg-CFC)と報告した。また、炭素線(135MeV/u)全身照射によるマウスの LD_{50/30d}に基づく RBE 値(RBE-LD_{50/30d})は 1.32 と報告し、RBE slope ratio の値に近い数値であったと述べている(Tsuboi et al., 1995)。

中性子の RBE 値についても、上記と同様の手法を用いた知見が蓄積されている。Ainsworth ら(1983)によりレビューされた、CFU-S をエンドポイントとした中性子のエネルギーレベル別 RBE 値のいくつかを抜粋して表 1.1.3.3.1.1.に示す。

表 1.1.3.3.1. CFU-S の 10%生残率をエンドポイントとした中性子の RBE.

中性子のエネルギー 又は線源	RBE 値	文献
Reactor	3.0	Davids (1972)
~2.5 MeV	2.0	Ainsworth et al. (1970)
~6 MeV	2.5	Silini et al. (1965)
14 MeV	1.4	Carsten et al. (1976)
15 MeV	1.2	Broerse et al. (1971)
67 MeV	1.7	Hanson et al. (1981)
600 MeV	1.5, 2.0	Hendry et al. (1979)

これらによれば、中性子線の RBE₅₀ は 1.0~5.6、RBE₁₀ は 1.0~3.0、RBE slope ratio は 0.8~3.2 の値を示した。RBE₅₀、RBE₁₀ は、中性子線のエネルギーレベルによらず、概ね RBE-LD_{50/30d}、RBE slope ratio より高値であった。

中性子照射線量と RBE 値の関係及びその臓器別特徴について、Field ら(1979)は、中性子線を照射したマウス CFU-S 生存率及びマウス致死率から得られた RBE 値と線量反応を臓器別の比較を行っている。その結果、一般的に重イオンや中性子線照射による造血器系の障害 RBE 値は、他の臓器の RBE 値よりも低値である事が明らかにされた。また、他の臓器と同様に、中性子の線量が高くなるほど RBE 値が低下することが示された。

線量及び線量率と RBE 値の関係について、Jones ら(1997)は、0.01 から 4.5Gy の範囲の中性子線量を 1 分、1 時間、1 日、1 週間及び 1 ヶ月に渡ってマウスに様に照射した場合の時間特異的な細胞死(細胞減少)に対する RBE 値を検討した。その結果、中性子照射した造血幹細胞 HSC における細胞減少の時間依存性 RBE 値は 5.02 から 0.22 の範囲と計算された。線量と線量率については、被ばく線量が増加するほど、又、線量率が低いほど、RBE 値が低下することを示している。

X 線の RBE 値について、Scott ら(2013)は ¹³⁷Cs の γ 線(662keV)を対照として 320keV の X 線をマウスに照射して RBE 値を検討した。その結果、320keV の X 線の脾臓細胞における RBE 値は <1 (RBE₁₀=0.623, RBE₅₀=0.763)、一方、骨髓細胞における RBE 値は >1 (RBE₁₀=1.026, RBE₅₀=1.305)であり、照射後 24 時間以内の *in vivo* においては 320keV の X 線の方が γ 線より骨髓細胞に対してやや高い殺細胞性を示した(Scott et al., 2013)。

α 線の RBE 値については、Lorimore ら(1993)がマウス骨髓細胞に α 線を照射して得られた CFU-S の 10~50%生存率から導かれた RBE 値を 2.0~3.5 と報告している(Lorimore SA et al. 1993)。一般的に確率的影響と比較して確定的影響では小さいが、線量が 10 年以上の長期にわたるロシアの Mayak 作業員の様な場合は 5~20 とより高い RBE 値を採用するよう提言されている(Scott B, 1995, USNRC/CEC, 1997)。確定的影響の RBE 値は未だ不明確であるにもかかわらず、過去の線量評価の場面では既にその値が用いられている。Harrison ら(2007)は、Alexander Litvinenko 氏の ²¹⁰Po 摂取の可能性に焦点を当て、²¹⁰Po からの臓器及び組織の線量を推定するための生体動態モデル及び線量測定モデルを用いて臓器別 LD50(50%の死亡を引き起こす線量)、臓器別線量を評価し致死的な損傷を引き起こすのに必要な線量を推定した。その際、 α 線の RBE 値を考慮に入れた推計が行われ、現時点で複数の国際機構が提案する RBE-weighted absorbed dose(ADT) での 2.0 が RBE 値として用いられた。そして摂取から数週間以内に発生する死亡原因に対して骨髓機能障害が重要な影響を与えたとしている。(Harrison et al., 2007; IAEA, 2005; Kutkov et al., 2011)。

1.1.3.3.1.3. 造血器障害の RBE に関する考察

臨界に伴う中性子被ばく事故、 α 核種の体内摂取などの過去の事故においては、造血器障害が患者の生命予後に大きく影響している。造血器障害の原因となるのは骨髄組織の被ばくと考えられる。骨髄組織は他の組織と比較して放射線感受性が高く、RBE 値は高くなく、その RBE 値は被ばく線量が高線量であるほど低値である。これまでの報告からは重イオン、中性子による造血器障害の RBE 値は概ね 2.0 前後と推察された。造血器障害と RBE 値の関係が今後一層明らかになることで、上記の如き事象における線量評価と人体影響の推定に寄与できる可能性が高いと考える。

1.1.3.3.2. 循環器

1.1.3.3.2.1. 循環器の解剖学的、生理学的特徴

循環器は、ポンプとしての心臓と、臓器・組織に酸素を含んだ血液を供給する血管系に分類される。

心臓の主な機能は栄養素と酸素の供給である。従って、心臓の放射線による機能障害は複数の供給先臓器の直接的機能不全を来し、結果的に放射線による多臓器障害の主な原因の一つになりうる。

血管の主な役割は栄養素と酸素の供給経路であり、臓器の支持組織としての役割を果たす。臓器の主な役割を果たす実質細胞と、血管系細胞の放射線感受性の関係は臓器毎に異なる。例えば造血器においては、臓器を構成する骨髄細胞と比較して、支持組織を構成する血管系細胞の放射線感受性は相対的に低い。従って放射線により骨髄細胞が死に至っても、血管系が残って臓器を支持する事が可能であり、それが急性放射線症候群の骨髄不全において骨髄移植治療が有効である一つの根拠となっている。一方、腎臓や神経組織においては、臓器を構成する実質細胞と比較して血管系の放射線感受性が相対的に高いため血管系の放射線による機能障害が臓器不全の決定因子となりうるため注意が必要である。

放射線による臓器障害は、その臓器の主たる役割を担う臓器細胞自身の障害と、臓器の環境条件を維持する支持細胞・組織の障害との 2 つの機序に分類できる。循環器は、上記の后者としての役割が大きいため、その障害はあらゆる臓器に対して重大な臓器障害を来しうる。

1.1.3.3.2.2. 循環器障害の RBE

X 線や γ 線などの低 LET 線の被ばくによる確定的影響に関する知見・勧告について、Hopewell ら(1986)は放射線照射後のブタの直腸動脈において内皮細胞数の減少、壁の肥厚及び局所閉塞、血流の減少が観察され、それらは照射後数ヶ月から数年後に現れることを報告した(Hopewell et al., 1986)。その後近年に至り、複数の疫学研究で放射線被ばくによる心血管系疾患(CVD)の増加が報告されている。Shimizu ら(2010)は LSS において 0.5Gy 以上で被ばく線量依存性の心疾患死亡の増加を示し

た(Shimizu Y et al. 2010)。Darby ら(2013)は乳がん患者に対する放射線療法で治療後の虚血性心疾患発生率の増加を示した(Darby et al., 2013)。ICRP Publication 103 においては低線量被ばく後の循環器疾患発生率がこれまでの予想よりも高い事が示され、水晶体と並び、心血管系への放射線影響には特に注意すべきであると警告されている(ICRP, 2013)。

一方、Thomas ら(2007)はブタ及びウシ大動脈内皮細胞を用いて ^{210}Po の α 線を照射し、細胞生存率、生細胞数の減少率、乳酸脱水素酵素(LDH)の放出、クローン生存率を測定し、上記エンドポイントに応じた α 線の血管障害に関する RBE 値を 1.6 ~ 21 (細胞生存率で 21.2 ± 4.5 、生細胞数の減少率で 12.9 ± 2.7 、培地への LDH 放出で 5.3 ± 0.4 、クローン生存率で 1.6 ± 0.1)と導き出した。クローン生着率における RBE 値が 1.6 と低い理由として、低線量での内皮細胞の X 線感受性の高さが影響していると考察した(Thomas et al., 2007)。

高 LET 線による循環器の確定的影響については、Delp ら(2016)は、宇宙飛行士の心血管系疾病リスクに関する調査の中で、深宇宙で活動した宇宙飛行士において、地球低軌道(LEO)のみで飛行した宇宙飛行士や飛行をしなかった宇宙飛行士と比較して有意に CVD による死亡率が高く、深宇宙活動による CVD のリスクが高いことを示した。その理由として、深宇宙では低軌道に比べて ^{56}Fe などの高エネルギー重イオン(HZE ions: heavier high atomic number and high energy ions)の存在比率が高く、深宇宙特有の重イオンによる被ばくが心血管系に影響を及ぼしていると考察している(Delp et al., 2016; Ghosh et al., 2016)。Young ら(1982)はマウス上半身にネオン線、炭素線を照射し、冠動脈の変成に関して調査を行い、HZE 線による冠動脈平滑筋変成の RBE 値は少なくとも 1 以上ではないかと考察している(Yang et al., 1982)。Grabham ら(2011)は、宇宙空間に於ける放射線影響を解明するため、ゲルマトリックス中のヒト内皮細胞を用いて作成された 3D ヒト血管モデルに鉄イオン線(150keV)を照射し、ヒト成熟血管と新生血管の構造を破綻させる線量を比較した。そして成熟血管の構造を破綻させるために必要な線量を 6.4Gy (γ 線) $\cdot 0.8\text{Gy}$ (鉄イオン線)と計測し、その結果から鉄イオン線による成熟血管障害の RBE 値を 8.0 と導出した。彼らはまた、新生血管の RBE 値は成熟血管と比べて高いことを報告している(Grabham et al., 2011)。

1.1.3.3.2.3. 循環器障害に関する考察

高 LET 粒子が循環器障害をもたらすメカニズムについては未だ十分に解明されていない。一方で、疫学研究により放射線による循環器疾患のリスクが定量化されつつあり、その晩発影響のリスクに警鐘が鳴らされている。また、今後の有人宇宙開発の進展に伴い、宇宙環境における高エネルギー重イオンによる被ばくを扱うための放射線防護体系の拡張が求められることが予想される。そのためにも、循環器障害と RBE の関係を詳細に明らかにするための研究の発展が望まれる。

1.1.3.4. 脳・神経障害

1.1.3.4.1. 疫学的研究による評価

中枢神経系 (Central Nervous System, CNS) への高線量被ばくは、他の器官に比べても重篤度の大きい障害をもたらすとされている。ヒトの場合、高線量の放射線に短時間に被ばくした場合、急性放射線症候群 (acute radiation syndrome, ARS) として、2~3 か月以内に脳細胞の変性、浮腫、炎症等の症状が現れる。線量が 100 Gy 以上の場合には、脳血管系の障害により死に至る (UNSCEAR, 1988)。また、放射線被ばく後の生存期間は、線量に依存することも分かっている。晩発的な障害として、放射線は神経変性障害や認知機能の低下をもたらす (Lumniczky et al., 2017)。一方、中枢神経系への障害に対する治療法は未だ確立されていない。

広島及び長崎における脳・中枢神経系のがんに対する疫学調査では、低線量域で統計的に有意な線量反応関係が認められた (Preston et al., 2007)。また、良性腫瘍の一つである神経鞘腫 (schwannoma) についても線量相関が認められ、とくに女性よりも男性におけるリスクが高い傾向が見られた (Preston et al., 2002)。原爆被曝者やチェルノブイリ原発事故の際に被曝した者、さらには放射線治療を受けた患者に対する疫学的研究により、脳腫瘍における放射線感受性は、成人期に比べて小児期に高いことが報告されている。とくに、頭部 CT 検査の際の被ばくは、成人よりも小児期の生涯リスクを有意に増加させる (Brenner et al., 2001)。中枢神経系における腫瘍の発生は、成人では非常に稀であるが、小児では放射線被ばくが将来の腫瘍発生のリスクを高めることが報告されている (Vienne-Jumeau et al., 2019)。頭部 CT 検査を受けた小児の疫学的研究では、60 mGy 以下の比較的少ない線量の被ばくでも、脳腫瘍リスクが 3 倍になるとの報告がある (Pearce et al., 2012)。

1.1.3.4.2. 放射線が脳・中枢神経系に与える影響

放射線は脳・中枢神経系に様々な影響を及ぼし得る。例えば、放射線被ばくにより、神経前駆細胞の増殖と成長が抑制される可能性がある (Monje et al., 2002)。 γ 線 (50 nSv/h) による被ばくは、神経膠腫 (glioma) である星状細胞腫の発生率に相関があることが報告されている (Justine et al., 2020)。*In vitro* の実験系では、ヒト神経の培養細胞について、低線量率放射線照射により炎症性サイトカインの発現が高まるとの報告がある (Monje et al., 2002)。また、低線量率放射線の慢性的な照射は、アルツハイマー病などの神経変性疾患の病状と類似する効果を与えることから、放射線が同様の効果をもたらす可能性のあることが示唆されている (Stefan et al., 2016)。一方で、100 mGy 程度の低線量放射線 (X 線) は、脳・神経系に大きな組織障害を引き起こさないことも報告されている (Wang et al., 2014)。

放射線によって誘発される神経炎症は、成人期における神経新生を阻害することが示唆されている (Raber et al., 2016)。通常、神経新生にはグリア細胞の一種であるミクログリア (microglia) が関与し、放射線によって活性型ミクログリアへと形態を

変える。ミクログリアは CNS において免疫に関連する細胞であり、免疫応答に関連する細胞は全細胞に対して 12% 存在する (Gebicke-Haerter et al., 2001)。若齢マウスにおいては、放射線被ばくの初期の段階から大脳辺縁系の一部である海馬におけるミクログリアが活性型へと変化し、中枢神経系の修復に関与する (Osman et al., 2020)。一方で、高線量率放射線に被ばくしたマウス脳組織において活性化したミクログリアは、炎症性サイトカインの放出により神経前駆細胞の機能を抑制し、神経新生を抑制することが報告された (Acharya et al., 2019)。神経新生の抑制に伴い、神経新生に関わる血管新生の異常、活性化状態のミクログリア細胞の著しい増加等の中枢神経系における微小環境の顕著な変化が生じる (Monje et al., 2002)。

過度な ROS (Reactive Oxygen Species (ROS)) の生成による酸化ストレスが高線量率放射線によって誘発される (Ye et al., 2016)。放射線被ばく後初期の ROS 生成は神経炎症を誘発するほか、細胞死を誘発する (Kam et al., 2013; Limoli et al., 2004)。一方で、0.2 Gy の低線量放射線は、海馬におけるニューロンのミトコンドリアの活性を高め、神経細胞の保護に寄与することが示唆された (Chien et al., 2015)。ミトコンドリアの酸化還元バランスとミクログリアの反応も、低線量放射線に対する反応を調節する上で重要であるとされる (Doss 2014)。

近年の遺伝子発現解析手法の確立により、分子細胞学的な知見が増えてきている。高線量被ばく (2Gy) もしくは低線量被ばく (0.1 Gy) したマウスの脳では、低線量時にはシナプスを介したシグナル伝達が、また、高線量時にはアポトーシス誘発に関わる経路が異常をきたす (Lowe et al., 2009)。さらに、100 mGy の被ばくでは神経細胞の保護にかかわる遺伝子の発現が変動する (Yin et al., 2003)。

宇宙特有の放射線環境が及ぼす影響についての報告もある。宇宙の微小重力を模擬した尾部懸垂と低線量放射線の相乗効果により、マウスの網膜における細胞死が有意に増えることが観察されている (Mao et al., 2018)。また、微小重力と低線量放射線による複合ストレスは、酸化ストレスをより誘発し、脳損傷を引き起こすことも報告されている (Mao et al., 2016)。また、宇宙線に曝露したマウスでは、海馬の機能が抑制されることで行動異常が認められ、シナプスの異常、神経炎症が長期間持続した (Parihar et al., 2016; Acharya et al., 2019)。

一方で、線量相関関係があるとされる脳・中枢神経系への影響では、より低線量の放射線は神経炎症に対する防御機構を刺激し、酸化ストレスを軽減する可能性があり、ホルミシス効果のように中枢神経系における細胞の増殖や活性に影響を及ぼすことが示唆されている (Betlazar et al., 2016; Gori & Munzel 2011; Ma et al., 2013)。しかしながら、中枢神経系に対する低線量放射線の影響に関してはまだ不確実な部分が多く、低線量及び低線量率という用語の定義に係るコンセンサスも未だ確立していないのが現状である (Betlazar et al., 2016)。

1.1.3.4.3. 脳・中枢神経系に関する RBE

脳・中枢神経系の機能に対する高 LET 粒子の RBE 値については、拡張ブラッグピークの炭素線でラットを照射し磁気共鳴画像 (MRI) で耐容線量を評価した実験において、1.8~2.0 の値が得られている (Karger et al, 2002)。Yoshida et al.(2012)は、炭素線 (18.3 MeV/amu, 108 keV/μm) および基準放射線として 140 kV X 線を用いてラットの正常脳組織培養切片を照射し、組織学的評価により炭素イオンの RBE 値を 1.4~1.5 と報告している。一方、Kaminuma et al.(2010)は、同じ放射線 (炭素線および X 線) の組み合わせでラットの海馬初代培養細胞 (未成熟期) を照射し、アポトーシスをエンドポイントとして 10.2 という比較的高い RBE 値を得ている。また、Isono et al (2015)は、ヒト神経前駆細胞の増殖率をエンドポイントとして、炭素線と X 線の比較で 2.0 という RBE 値を得ている。その他、高エネルギー鉄イオン (1 GeV, LET: 148 keV/μm) について、ヒト神経前駆細胞のアポトーシスをエンドポイントとして ~3.4 の RBE 値が報告されている (Guida et al, 2005)。これらの結果は、原子番号の大きな重イオンは脳・中枢神経系での細胞死をより誘発しやすいことを示唆しており、今後の研究によるデータの集積とその理論的な機構解明が待たれる。

1.1.3.5. 生殖機能障害及び胎児への影響

1.1.3.5.1. 生殖器について

生殖器に対する放射線被ばくの確定的影響は、主として、生殖細胞の死・染色体損傷・形態異常、生殖器官の重量減少及び生殖能力の障害である。

1.1.3.5.1.1. 女性の生殖器への影響

⇒ヒトの女性は、出生時に約 200 万個の生殖細胞を卵巣に有している。卵胞の数は、閉鎖 (atresia) によって、12~16 歳時の約 40 万個から 40~44 歳時には約 8 千個まで急速に減少する。また、約 35 年の生殖期間中に、約 400 個の卵母細胞が排卵される。

ヒトの卵母細胞は放射線感受性が高いことで知られているが、多くの卵母細胞は生殖能力に影響を与えることなく失われていく (UNSCEAR, 1982; 1988)。0.6 Gy までの低 LET 放射線の単回照射は生殖機能に重大な悪影響を引き起こさないが、1.5~6Gy では排卵が抑制され、3~8 Gy では、永続的な不妊を引き起こす可能性がある。年齢が上がるにつれて、プールされている卵母細胞の数が少なくなるため、そうした症状が現れやすくなる (ICRP, 2012)。一方、ネズミの卵母細胞は、ヒトよりも高感受性であることが知られている (ICRP, 1989)。

ヒトの卵巣についての RBE 値のデータは存在しない。マウスについては、未成熟卵母細胞の細胞死をエンドポイントとした場合、0.43 MeV 中性子の RBE 値は 1.7 (Straume et al., 1987)、²⁵²Cf からの中性子では 1.6~3.5 (Satow et al., 1989a) と報告されている。トリチウム水 (HTO) からの β 線の RBE 値は、1.1~3.5 の範囲であった

(Satow et al., 1989a)。着床前期間と主要な器官形成期の間での被ばくでは、0.4 MeV 及び 14 MeV の高速中性子の RBE 値は、それぞれ 1.0 と 1.3 であった(ICRP, 2003)。受胎から泌乳までの最初の 2 週間に被ばくした場合には、HTO- β 線の RBE 値は 1.6 ~2.8 となった(Dobson & Kwan, 1987; Dobson & Kwan, 1976)。

450 MeV/amu のネオン、570 MeV/amu のアルゴン及び 670 MeV/amu のシリコンの RBE 値は、いずれも 0.4~0.6 の範囲にあった(ICRP, 1989)。また、加速されたアルゴンとネオンのピーク時の RBE 値は、マウスの卵巣への初期の影響(細胞枯渇)でそれぞれ 2.2 と 3.0 であった(ICRP, 1989)。加速された炭素(エネルギー 80 MeV/amu、LET >31.3 keV/ μ m)の RBE 値は、未成熟卵母細胞における染色体異常の誘発について、1.32~2.49 の範囲にあった(Zhang et al., 2006)。

^{239}Pu から出る α 粒子の RBE 値は、マウスの雌の生殖能障害について約 2.5 と報告されている(Searle et al., 1980)。

1.1.3.5.1.2. 男性の生殖器への影響

精巣には、様々な分化状態にあり、様々な放射線感受性を持つ、様々な種類の細胞が含まれている。B 型精原細胞は最も高い放射線感受性を示し、0.1Gy の X 線の後期分化精原細胞の細胞死によって精子数が減少し得る。~4 Gy の急性又は分割での被ばくは一時的な不妊を引き起こし、6 Gy を超えると永続的な男性不妊を引き起こす可能性がある(UNSCEAR, 1988)。

ヒトの精子において、構造的染色体異常や染色体異常を含む染色体損傷の誘発をエンドポイントとした場合 ^{252}Cf 核分裂中性子の RBE 値は 1.6~3.9(Tateno et al., 1996)、HTO- β 線の RBE 値は 1.04~3.0 であった(Kamiguchi et al., 1990)。

マウスでは、生物学的エンドポイントとして精子頭部の生存率を用いた場合、3.2~8.8 MeV の α 粒子の RBE 値は最大 7.4 であった(Rao et al., 1989; Howell et al., 1994; Howell et al., 1997)。エネルギーが 1 MeV、2.3 MeV、及び 5.6 MeV の中性子の RBE 値は、精原細胞の枯渇をエンドポイントとした場合、それぞれ 5.7、4.6、及び 3 であった(Gasinska et al., 1987)。5.5 MeV のエネルギーを持つ中性子の RBE 値は、精原細胞の減少とマウス精巣の体重減少をエンドポイントとした場合、それぞれ 4.57 と 4.25 であった(Gasinska, 1985)。また、マウス精巣の重量減少による ^{252}Cf 中性子の RBE 値は 5.1 であった(Hwanget al., 1984)。さらに、ヘリウムの RBE 値(228 MeV/amu)は、マウスの精原細胞の細胞死について 1.15~1.3 であった(Alpen & Powers-Risius, 1981 のデータに基づく)。

核分裂中性子(0.85 MeV)の RBE 値は、精原細胞及び初代精母細胞における染色体異常の誘発をエンドポイントとした場合、10~24 と比較的高値であった(Grahn et al., 1983)。二次精母細胞における染色体異常の誘発をエンドポイントとした場合は、0.4 MeV 中性子の RBE 値は 5.65 であった(Pacchierotti et al., 1987)。一般に、精母細胞における染色体異常の誘発について、核分裂中性子及び ~50 MeV の中性子の RBE

値は 2.0～7.0 の範囲にある(Matsuda et al., 1987; ICRP, 1989; Lee et al., 2008)。

加速された炭素イオン(50 MeV/amu、LET >45 keV/μm)の RBE 値は、精原細胞と精母細胞の染色体異常の誘発について、それぞれ 1.67 と 1.66 であった(Zhang et al., 1998a)。酸素イオン(エネルギー60 MeV/amu、LET > 70 keV/μm)の RBE 値は、精巣重量の減少、精子数の減少、精子の異常について、それぞれ 1.84、1.22、1.29 であった(Zhang et al., 1998b)。

加速された炭素、ネオン、及びアルゴンイオン(400～670 MeV/amu)の精原細胞の細胞死に係る RBE 値は最大 3.0 で、LET が 100 keV/μm を超えて大きくなると減少した。マウスの精巣の減量をエンドポイントとした場合、炭素イオンの RBE 値は 2、ネオンイオンは 2.2、アルゴンイオンは 3.0 となった(Alpen & Powers-Risius, 1981)。

主要器官形成期の胎児ラットを加速された重粒子で照射した場合において、炭素イオン(290 MeV/amu、LET > 13 keV/μm)及びネオンイオン(400 MeV/amu、LET >40 keV/μm)の RBE 値は、原生殖細胞におけるアポトーシスの誘発をエンドポイントとして、それぞれ 1.0～1.4 及び 1.0～1.3 であった。また、繁殖能力の低下(出生前に照射された雄と照射されていない雌を交配することによって得られた平均子孫数)をエンドポイントとした場合、炭素イオンとネオンイオンの RBE 値はそれぞれ 0.9 と 1.0 であった(Wang et al., 2007b)。

1.1.3.5.2. 胚及び胎児の発育について

1.1.3.5.2.1. 発生中の胚及び胎児への影響

発生中の胚と胎児は、細胞の急速な増殖、移動、分化のため、放射線に対して非常に感受性が高い。各臓器の反応は、放射線の線質、線量及び線量率、酸素分圧、細胞の種類、被ばく時の発達段階など、放射線と臓器の両方に関連した多くの要因に依存して変化する。ヒトについての影響に関する信頼できるデータは、主に高線量被ばくで得られたものである。

胚及び胎児の発育にもたらされる確定的影響としては、胚及び胎児の死、先天性異常、小頭症、精神遅滞、知能指数の低下、神経行動学的効果、けいれん性障害、及び成長遅延等がある(Brent, 2015)。

先天性異常は器官形成中に発生する。特定の臓器でその確率が最も高くなるのは、分化のピークが起こる時期である。中枢神経系の異常は、一般に、器官形成の異常と組織形成の異常の 2 つのグループに分けられる。器官形成の異常は、主に器官形成期に発生し、組織形成の異常は脳外套の分化及び成長の過程で発生する。

放射線被ばくのリスクは発達段階に関連しており、器官形成期及び胎児初期段階が最も影響を生じやすい。低 LET 放射線による確定的影響のしきい線量は 100 mGy 以上であり、100 mGy で起こるほとんどの異常は中枢神経系に関連したものである。その他、各発達段階において生じ得る様々な確定的影響のしきい線量については、ICRP によるレビューを参照されたい(ICRP, 1986; ICRP, 2003; ICRP, 2007)。

1.1.3.5.2.2. 発達中の脳への影響

発達中の脳は、その構造の複雑さと長い発達期間、未分化神経細胞の脆弱性、神経機能の細胞の位置及び移動に対する依存性、失われたニューロンを置き換えることができないこと等のため、胚及び胎児の他の組織に比べて放射線の影響を受けやすい。放射線は、グリア細胞及びニューロン前駆細胞の有糸分裂死を誘発するか、有糸分裂後のまだ未成熟なニューロンの死を引き起こす可能性がある。

広島と長崎に投下された原爆で被爆した生存者についての疫学研究では、重度の精神遅滞、頭部のサイズの小ささ、IQ スコアの低下に焦点を当てた調査が行われてきた。これらの人についてのデータは、8 週目から 15 週目までの期間の被ばくについて、重度の精神遅滞に係るしきい線量は 300 mGy 以上であることを支持している (ICRP, 2007)。

1.1.3.5.2.3. 成人になって発症する非がん性疾患への影響

出生前の放射線被ばくの長期的な影響を調べることは、そのリスクを正しく把握するために重要である (Sreetharan et al., 2017)。ヒトについては、マーシャル諸島住民等を対象にした症例報告研究を含む疫学調査により、妊娠 4～11 週から 30～33 週の間医学的治療に使用される線量の放射線を胎児が受けると、(皮質)白内障の誘発、先天性白内障及び総動脈幹 (truncus arteriosus) の発生率が上昇することが示されている (Dekaban 1968; Gustavson et al., 1981; Nembhard et al., 2019)。モデルマウスを用いた実験的研究では、卵割前の卵子 (precleavage ovum) への約 0.09 Gy の低線量 X 線照射で、統計的に有意な白内障誘発の増加が観られている (Rugh et al., 1964; Rugh et al., 1971)。

子宮内で被ばくした原爆被爆者を対象にした疫学研究において、青年期の収縮期高血圧が増加することが報告されている (Nakashima et al., 2007)。こうした心血管疾患のリスクは大きな懸念事項であり、コホートの追跡調査が続けられている (Tatsukawa et al., 2008)。また、マウスを用いた実験で、器官形成期の被ばくによって、マウスの心臓プロテオームにおける変化と心臓機能の障害が観察されている (Bakshi et al., 2016)。

1.1.3.5.2.4. 胚及び胎児の発育に関する RBE

奇形、精神障害、白内障、心血管疾患の誘発等に係る、中性子又はその他の高 LET 粒子の RBE 値を決定する根拠となる、ヒトの子宮内被ばくに関する適切なデータは見当たらない。したがって、ヒトについての臨床的及び疫学的調査の限られたデータを補うものとして、動物を用いた記述的な実験研究が必須である。小動物などを用いて得られたデータは、生物種の違いは存在するものの、同等の発達段階で適切なプロトコルに従って実験を行うことにより、ヒトに関する重要な知見、少なくとも定性的

な知見を提供することができる。

マウスの妊娠期間中における HTO- β 線への子宮内曝露では、出生後の骨髄細胞の染色体異常をエンドポイントとした場合、RBE 値は 1~2 であった(Kozlowski et al., 2001)。胚の生存率をエンドポイントとした場合、エネルギーが 1~800 MeV の中性子の RBE 値は、メダカでは 48.1 と高い値が観られた(Kuhne et al., 2009)。150 MeV 陽子の RBE 値は、ゼブラフィッシュでは 1.13-1.2 であった(Szabo et al., 2018)。マウスでは、着床前期間の接合子初期の被ばくについて、平均エネルギーが約 5.8~6.0 MeV のサイクロトロン中性子の RBE 値は、出生前死亡率に対して 2.3、胎児の奇形に対して 2.0~3.67 であった(Pampfer & Streffer, 1988)。7 MeV の中性子については、胎児の奇形に係る RBE 値は 2.0~3.67 であった(Hillebrandt & Streffer, 2000)。

胚の生存率をエンドポイントとした場合、マウスの着床前培養胚では、中性子の RBE 値は 2.0~10 の範囲にあり(Streffer & Molls, 1987; Streffer & Muller, 1996; ICRP, 2003)、HTO- β 線の RBE 値は 1.0~1.7 であった(Yamada et al., 1982)。染色体異常で観た場合、6 MeV 中性子の RBE 値は 4.7~7.4(Weissenborn & Streffer, 1988)、HTO- β 線では 1.6~2.0 であった(Matsuda et al., 1986)。

マウス胎児の培養中脳細胞では、細胞増殖、分化、DNA 損傷、タンパク質含有量などのさまざまなエンドポイントに対して、トリチウムが有機的に結合した化合物(メチル- ^3H -チミジン)からの β 線の RBE 値は 4.6~8.7 であった(Wang et al., 1996)。着床前胚における小核誘発のサイクロトロン中性子(7.0 MeV)の RBE 値は、2.5~3.5 であった(Pampfer et al., 1992)。マウスを用いた実験的研究において、小核形成、致死性、奇形、体重減少、脳構造の変化を含む出生前及び出生後の発達障害についての高速中性子の RBE 値は 1.8~7.4 の範囲にあり、平均値は 3.65 であった(ICRP, 2003)。ラットについても、0.43 MeV 中性子の RBE 値はこの範囲に入ることが報告されている(Solomon et al., 1994)。マウスの脳の解剖学的欠陥に対する 6 MeV 中性子の RBE 値は 3.0(平均)であった(Konermann, 1986; ICRP, 2003)。

鉄イオン(500 MeV/amu、LET > 200 keV/ μm)で器官形成期のメダカを照射した実験では、発達中の視神経蓋におけるアポトーシスの誘発(Yasuda et al., 2011)をエンドポイントとした場合、RBE 値は 3.7~4.2 であった。中性子(ピークエネルギー 10 MeV)の RBE 値は、胎児マウスの大脳皮質におけるニューロンアポトーシスの誘発で最大 9.8 であった(Ishida et al., 2006)。出生前発育と出生後の神経生理学的達成をエンドポイントとした場合、HTO- β 線の RBE 値はマウスとラットを合わせて 2.3~3.0 となった(Zhou et al., 1989; Wang et al., 2007b)。臓器の異常をエンドポイントとした ^{252}Cf 中性子の RBE 値は 2.3~3.1 であった(Satow et al., 1989b; Satow et al., 1989c)。ヘリウムの RBE 値(エネルギー 530 MeV/amu)は、器官形成初期に被ばくしたラットの胎児の死亡について 1.0~1.4 の範囲にあり、低酸素条件下ではより高い値となった(Ward et al., 1976)。器官形成期のラット胎児を加速された重粒子で照射した実験では、出生前の発達及び出生後の神経生理学的成長に関して、炭素イオン(290 MeV/amu)

及びネオンイオン(400 MeV)の RBE 値はそれぞれ 1.0~2.04 及び 1.0~2.14 の範囲であった(Wang et al., 2005; Wang et al., 2007c; Wang et al., 2008 のデータに基づく)。

これらを含む、生殖器(卵巣及び精巣)及び胚・胎児の発育に関する RBE 値に関する詳細な情報については、最近のレビュー(Wang & Yasuda, 2020)を参照されたい。

1.1.3.6. 白内障

1.1.3.6.1. 白内障とは

白内障とは、眼球の透明な水晶体が混濁することで視力の低下をきたす目の病気である。眼をカメラにたとえると、レンズが濁るせいで光がカメラ内部で拡散して、フィルムに焦点が結ばれずにピンボケのようにボースとした写真になる状態である。水晶体の中心部分を核といい、その周りは皮質で覆われ、その外側は囊(瞳孔側前方の囊を前囊、後ろ側を後囊)という膜が水晶体全体をカプセルのように包んでいる(図 1.1.3.6.1.参照)。水晶体の濁りの部位ごとに、核白内障、皮質白内障、後囊下白内障などにタイプ分けされる。加齢にともない発生頻度の上昇が認められ、誰もが発症する可能性があり、目の老化現象と捉えることができる。この加齢白内障は、主に核と皮質に生じる。

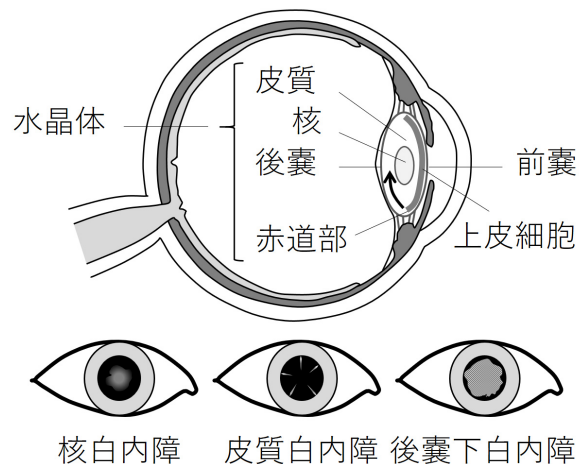


図 1.1.3.6.1. 眼の構造と白内障の種類.

一方、放射線被ばくでも白内障が認められる。放射線白内障は、1897 年に実験動物で、1903 年にヒトで生じることが報告されている。1949 年に原爆被ばく者とサイクロトロン作業で放射線白内障が報告されたことがきっかけで、1950 年、ICRP は白内障を「考慮すべき影響」に含めている(Hamada & Sato, 2016)。高線量では数カ月で、低線量では何年も経ってから症状が現れる。この放射線白内障は、主に後囊下型が最も多いとされている。その発生メカニズムは、放射線によって水晶体の赤道部で盛

んに分裂している上皮細胞が変性し、後嚢下に集まることで生じる。白内障は、蓄積された細胞損傷に起因し、確定的影響として分類されている。

1.1.3.6.2. 白内障の RBE

白内障は、細胞死ではなく異常な分化を反映しており、他の組織よりもとても高い RBE 値を示す。水晶体には血管がなく、酸素が少ないため、低酸素下でも同様に影響が発現する高 LET 粒子に対しては、白内障の RBE 値はより高くなることが予想される。

放射線白内障に関する多くの研究は、前世紀(20 世紀)のものがほとんどである。高速中性子の場合、7.5 MeV の中性子放射線療法を受けている患者の放射線白内障のデータから推定されており、約 3 の RBE 値が報告されている(Roth et al., 1976; Catterall & Bewley, 1979)。2 MeV の中性子を照射したマウスを使った放射線白内障誘発実験では、4.5 の RBE 値が得られている(Merriam et al., 1972)。動物実験では、分割あたりの線量が減少すると放射線白内障の RBE 値が増加し、分割あたり 0.01 Gy で最大 20 の RBE 値が報告されている(DiPaolo et al., 1978)。400 MeV/u ネオンイオンと 570 MeV/u アルゴンイオンを眼に照射したウサギを使った放射線白内障誘発実験の場合、ネオンイオンで 2.1 の RBE 値、アルゴンイオンで 3.3 の RBE 値が報告されている(Lett et al., 1984)。

低 LET 放射線の場合、これまでの疫学データは、レンズの混濁について数百 mGy から 1Gy の間のどこかにしきい線量があることを示唆している(Shore, 2016)。一方、高 LET 粒子の場合、微小混濁のしきい線量がある可能性は低いと考えられている。実際、マウスを用いた実験において、0.15 Gy の X 線に対する 0.4 MeV 中性子の RBE 値は 100 以上(Bateman et al., 1972)又は 300 以上(Worgul et al., 1996)になり、しきい値なしの用量反応関係の可能性が示唆されている(Shore & Worgul, 1999)。今後、原爆被爆者、チェルノブイリの犠牲者、及び職業にさらされたさまざまな個人の継続的な追跡調査により、白内障のしきい線量がより正確に判定されることが期待される(ICRP, 2003)。

1.1.3.6.3. その他の眼の障害

遺伝的背景(遺伝子)の違いで RBE 値が異なる例として、1 GeV の 0.325 Gy の鉄イオンを使った白内障誘発実験の RBE 値は、野生型のマウスで 5~15、ATM+/-のマウスでより高い 5~24 になることが報告されている(Hall et al., 2006)。また、マウスの網膜に生じるアポトーシスをエンドポイントとした実験の RBE 値は、宇宙の太陽高エネルギー陽子イベントを模擬した 150 MeV/amu 陽子で 1.6、銀河宇宙線を模擬した 600 MeV/u 酸素イオンで 2.28 と報告されている(Mao et al., 2018)。

地球低軌道や月へのミッションに参加し高エネルギー陽子や重イオン等の宇宙放射線に曝された宇宙飛行士には、>8 mSv(平均 45 mSv)の比較的低線量の宇宙放射

線でも、白内障の発生率増加と早期出現が認められている(Cucinotta et al., 2001)。しかし、宇宙飛行士の白内障は皮質領域で発生することが最も多く(Jones et al., 2007; Chylack et al., 2009)、視覚障害は脳内圧の変化と電離放射線への曝露の組み合わせが原因である可能性があるため、解釈に注意が必要である。何よりも、宇宙飛行士に限らず、高 LET 粒子に曝された人間のデータが不足しており、今後限られた実験データをどのように適用すべきかが懸念されるため、水晶体防護に係る線量限度を設定する際に使用する重み係数、すなわち RBE 値としてどのような値が推奨されるべきかについては、さらなる慎重な検討が望まれる。

1.1.3.7. その他の組織

1.1.3.7.1. 呼吸器系

呼吸器系には、鼻咽頭、咽頭、喉頭、気管、気管支、肺が含まれる。放射線治療に起因する肺障害は、急性期から亜急性期(照射中後期～終了後半年程度)に発症する放射線肺臓炎と、それに引き続く晩期(照射終了半年以降)の放射線肺線維症に分類される(Abratt et al., 2002; Mehta, 2005)。重症化や致命的な転機となるなど臨床的に問題となるものは主に前者であり(Coggle et al., 1986; McDnald et al., 1995)、放射線肺臓炎のしきい線量は、放射線治療による肺全体の被ばくから求められ、急性被ばくの場合の値は 6.5 Gy、多分割照射による被ばくの場合には 18 Gy である(ICRP, 2007; ICRP, 2012)。鼻咽頭、咽頭、喉頭、気管、気管支においては、2 Gy ずつの分割照射で 30 Gy よりも高い線量の場合に、粘膜炎、潰瘍、萎縮、繊維症などの障害を引き起こす(ICRP, 1984)。

放射線肺障害の発生機序について、照射開始直後～数週間は、細胞の喪失(I 型肺胞上皮細胞の減少、II 型肺胞上皮細胞障害)、毛細血管の透過性亢進、炎症性サイトカイン産生の増大など、臨床的な変化は見られないが細胞内での変化は始まっている時期である。数週～数カ月程度になると、血管内皮細胞障害、リンパ球・形質細胞などの炎症性細胞の浸潤などにより、臨床的な急性から亜急性期の肺臓炎の症状が認められる。その後、数カ月以降になると、毛細管の脱落、コラーゲンの沈着による肺胞隔壁の肥厚と肺胞腔の消失がみられ、線維化が完成する(Hanania et al., 2019; Tsoutsou et al., 2006)。線維化は、広範囲だったり反復される障害を異常修復する結果として生じる。線維化のプロセスには、platelet-derived growth factor (PDGF)や transforming growth factor- β (TGF- β)が肺胞マクロファージや II 型肺胞上皮細胞から産生され、線維芽細胞に対する増殖因子として働く。特に TGF- β は、肺線維芽細胞に作用してその増殖及び遊走を促進させ、さらに、肺線維芽細胞から筋線維芽細胞への分化誘導因子として働き、肺線維化の発症において重要な役割を担っている(ICRP, 2012; Desmouliere et al., 1993)。加藤ら(Katoh et al., 2010)は、マウスを用いた実験で、放射線照射された肺において、タンパク分解酵素阻害剤により TGF- β の発現を阻害すると肺線維化が抑制されること、TGF- β の発現量と肺線

維化に相関があることを明らかにした。

放射線肺臓炎と繊維症の発症を決定づける最も重要な因子は、総線量と照射を受けた肺組織の体積である。呼吸器系の器官における線量—体積効果に関する情報は、QUANTEC グループにより報告されている (Marks et al., 2010; Rancati et al., 2010)。マウスを用いた実験により、肺の線維化をエンドポイントとした場合の炭素線の RBE 値は 1 回照射では 1.62 (Zhou et al., 2019a)、5 回分割照射では 2.75 であると報告されている (Zhou et al., 2019b)。また、中性子 (16 MeV d-Be) については、治療線量の範囲において肺の RBE 値は脊髄や皮膚の RBE 値よりも小さく、1 回線量の増加に伴い RBE 値は小さくなると報告されている (Hornsey, 1982)。

1.1.3.7.2. 泌尿器系

泌尿器系は、腎臓、尿管、膀胱、尿道からなる。腎臓は泌尿器系の中で最も放射線感受性が高く、回復が困難であるとされており、通常分割照射における全腎の TD5/5 (5 年間で 5% に副作用を生ずる線量) は 23 Gy と報告されている (Emami et al., 1991)。放射線による腎障害は、腎臓の炎症及び変性であり、放射性腎炎又は放射性腎症と呼ばれている。臨床的には、急性放射性腎炎と慢性放射性腎炎の経過がある。急性放射性腎炎は、6～12 ヶ月後に発症し、高血圧を認め、心不全、浮腫、蛋白尿、エリスロポエチン欠乏による貧血を合併する。一部は蛋白尿が慢性化し高窒素血症が進展し腎不全に至る。軽度な腎炎は、蛋白尿か高血圧のみの場合もある。慢性放射性腎炎は、急性放射性腎炎が遷延して起こるか 10 年以上経過して遷延して起こる。倦怠感、腎濃縮力低下による夜間尿、低張尿、高尿酸尿、尿中 Na 喪失が起こり、高窒素血症を認め腎機能が低下する。放射性尿管炎、後腹膜線維症などを合併すると腎機能増悪の原因となる。部分照射後の腎機能の耐容線量は、非照射もしくは低線量照射した反対側の腎臓において代償性の機能増強や肥大が起こることにより、全臓器照射の場合よりもかなり高い。この代償性効果によって、重度に被ばくした腎臓において重大な損傷があるにもかかわらず、ほぼ正常な全腎機能を維持することができる (Köst et al., 2002)。マウスの腎における ^{51}Cr -EDTA クリアランスをエンドポイントとした RBE 値は、中性子 (d(4)-Be) の場合、X 線 16 Gy を単回照射したとき 2.57、1 回線量 3.9 Gy で 10 分割照射したときには 5.16 であり、1 回線量が小さくなるのに伴い RBE 値が大きくなる傾向が示されている (Joiner et al., 1987)。また、Stewart らの実験では、高線量域では腎の RBE 値は皮膚の RBE 値よりもわずかに小さいが、腎の RBE 値は 1 回線量の減少に伴って急速に増加し、1 回線量 3.9 Gy 以下では皮膚の RBE 値を上回ることが予想された。併せて、超低線量での RBE 値の上限は 20～26、高線量での下限は 1.2～1.4 であることが予測された (Stewart et al., 1984)。

膀胱の放射線耐容線量は、腎臓と比較してかなり高く、通常分割照射における全膀胱の TD5/5 は 65 Gy と報告されている (Emami et al., 1991)。しかしながら、高線量

もしくは全体の治療期間が短い場合には、障害のリスクが顕著に増加する。これらの損傷には、炎症性膀胱炎、潰瘍形成、瘻孔、繊維症、収縮、尿路閉塞がある。発症には、分割照射治療の終わり頃に生じ、数週間で消失する急性の一過性反応と、治療後 6 カ月ごろから進行する不可逆的な反応がある。膀胱粘膜の炎症と浮腫のために、治療の終わり頃に排尿頻度の一時的な増加が生じる。その後、6 ヶ月から 12 ヶ月頃にかけて、尿路上皮細胞剥離、潰瘍や壊死の形成、膀胱粘膜の毛細血管拡張症とびらん、及び膀胱壁の進行性繊維形成が続く場合があり、膀胱容量の永続的な減少が生じる(Jaal et al., 2006)。尿管は膀胱よりも放射線抵抗性であり、極めて近接に存在する小腸よりもかなり抵抗性がある。2 Gy 分割照射で、総線量 60~70 Gy を照射後の尿管閉塞の発症率は 5%未満である(Marks et al., 1995)。膀胱の中性子線における RBE 値は、単回照射では 3.2、8 分割照射では 5.4 と報告されている(Stewart et al., 1986)。Sullivan らは、豚を用いて、尿管に対する中性子の RBE 値を求めるための組織学的解析を行った。尿管は複雑で RBE を求めることが困難なため、その周辺リスク臓器(直腸、膀胱、子宮頸部)の組織変化から RBE 値が導出された。その結果、早期の線維化をエンドポイントとした場合には 4.34、晩期の線維化をエンドポイントとした場合には 6.73 と推定された(Sullivan et al., 1980)。

1.1.3.8. 結語

ここに集約した情報から、中性子や重イオン等の高 LET 粒子の RBE 値が、線質(原子番号、エネルギー、LET 等)や線量率、又、対象とする生物学的エンドポイント(組織/臓器、症状、障害のレベル等)によって大きく変わり得ることが分かる。一般に RBE 値は、基準放射線の線量率の減少(分割回数の増加)とともに大きくなり、より重篤なレベルの影響に着目するほど小さくなると言えるが、その変化の程度は取扱う対象に応じて複雑に変化する。したがって、災害や事故で被ばくした人への医学的処理を判断するための線量評価を行う際には、被ばくの状況や評価すべき影響をできるだけ正確に把握したうえで、それらに応じた最も適切な RBE 値を選定することが重要であると言える。

近年、大型の加速器を活用して小動物や細胞を中性子や重イオンで照射する実験研究が国際的に広く行われるようになり、従来の疫学的なアプローチによる評価だけでなく、バイスタンダー効果や逆線量率効果等、高 LET 粒子特有の生物学的効果のメカニズムの解明が進展している。これらの新たなデータに基づく理論的考察を経て、被ばくの状況に応じて最適な RBE 値を迅速に決定するための汎用的かつ実用的なプロトコルが確立されることが期待される。

参考文献(1.1. 章)

1. Abratt RP, Morgan GW. Lung toxicity following chest ir-radiation in patients with lung cancer. Lung Cancer. 2002; 35: 103-109.

2. Acharya, MM, Baulch, JE, Klein, PM, et al. New Concerns for Neurocognitive Function during Deep Space Exposures to Chronic, Low Dose-Rate, Neutron Radiation. *eNeuro*. 2019; 6(4).
3. Ainsworth E, Kelly, LS, Mahlmann, LJ, Schooley, JC, Thomas, RH, Howard, J, Alpen, EL. Response of colony-forming units-spleen to heavy charged particles. *Radiat Res*1983; 96: 180-197.
4. Alpen EL, Powers-Risius P. The relative biological effect of high-Z, high-LET charged particles for spermatogonial killing. *Radiat. Res.* 1981; 88: 132-143.
5. Ando K, Koike S, Nojima K, Chen YJ, Ohira C, Ando S, Kobayashi N, Ohbuchi T, Shimizu W, Kanai T. Mouse skin reactions following fractionated irradiation with carbon ions. *Int. J Radiat. Biol.* 1998; 74: 129-138.
6. Bakshi MV, Azimzadeh O, Merl-Pham J, Verreet T, Hauck SM, Benotmane MA, Atkinson MJ, Tapio S. In-utero low-dose irradiation leads to persistent alterations in the mouse heart proteome. *PLoS One*. 2016; 11: e0156952.
7. Bateman JL, Rossi HH, Kellerer AM, Robinson CV, Bond VP. Dose-dependence of fast neutron RBE for lens opacification in mice. *Radiat. Res.* 1972; 51: 381-390.
8. Berger ME, Christensen DM, Lowry PC, Jones OW, Wiley AL. Medical management of radiation injuries: current approaches. *Occup Med.* 2006; 56: 162-172.
9. Berlivet, J, Hémon, D, Cléro, É, et al. Ecological association between residential natural background radiation exposure and the incidence rate of childhood central nervous system tumors in France, 2000-2012. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020; 211: 106071.
10. Betlazar, C, Middleton, RJ, Banati, RB, et al. The impact of high and low dose ionising radiation on the central nervous system. *Redox biology*. 2016; 9: 144-56.
11. Brent RL. Protection of the gametes embryo/fetus from prenatal radiation exposure. *Health Phys.* 2015; 108: 242-274.
12. Catterall M, Bewley DK. Radiotherapy with past neutron beams. Academic Press., 1979.
13. Chien, L, Chen, WK, Liu, ST, et al. Low-dose ionizing radiation induces mitochondrial fusion and increases expression of mitochondrial complexes I and III in hippocampal neurons. *Oncotarget*. 2015; 6(31): 30628-39.
14. Chylack LT Jr, Peterson LE, Feiveson AH, Wear ML, Manuel FK, Tung WH, Hardy DS, Marak LJ, Cucinotta FA. NASA study of cataract in astronauts (NASCA). Report 1: Cross-sectional study of the relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat. Res.* 2009; 172: 10-20.
15. Coggle JE, Lambert BE, Moores SR. Radiation effects in the lung. *Environ Health Perspect.* 1986; 70: 261-291.

16. Cucinotta FA, Manuel FK, Jones J, Iszard G, Murrey J, Djojonegro B, Wear M. Space radiation and cataracts in astronauts. *Radiat. Res.* 2001; 156: 460–466.
17. Darby SC, Ewertz M, McGale P, Bennet AM, Blom–Goldman U, Bronnum D, Correa C, Cutter D, Gagliardi G, Gigante B, Jensen MB, Nisbet A, Peto R, Rahimi K, Taylor C and Hall P. Risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer. *N Engl J Med* 2013; 368: 987–998.
18. Deasy, JO, Moiseenko V, Marks L, Clifford Chao KS, Nam J, Eisbruch A. Radiotherapy dose–volume effects on salivary gland function. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S58–63.
19. Dekaban AS. Abnormalities in children exposed to x–radiation during various stages of gestation: tentative timetable of radiation injury to the human fetus, part I. *J. Nucl. Med.* 1968; 9: 471–477.
20. Delp MD, Charvat JM, Limoli CL, Globus RK, Ghosh P. Apollo Lunar Astronauts Show Higher Cardiovascular Disease Mortality: Possible Deep Space Radiation Effects on the Vascular Endothelium. *Sci Rep* 2016; 6: 29901.
21. Denekamp J, Harris SR, Morris C, Field SB. The response of a transplantable tumor to fractionated irradiation. II. Fast neutrons. *Radiat. Res.* 1976; 68: 93–103.
22. Desmouliere A, Geinoz A, Gabbiani F, Gabbiani G. Transforming growth factor– β 1 induces α –smooth actin expression in granulation tissue myofibroblasts and quiescent and growing cultured fibroblasts. *J. Cell Biol.* 1993; 122: 103–111.
23. Dia Paolo M, Bianchi M, Baarli J. Lens opacification in mice exposed to 14 MeV neutrons. *Radiat. Res.* 1978; 73: 340–350.
24. Dobson RL, Kwan TC. The RBE of tritium radiation measured in mouse oocytes: Increase at low exposure levels. *Radiat. Res.* 1976; 66: 615–625.
25. Dobson RL, Kwan TC. The tritium RBE at low–level exposure: variation with dose, dose rate, and exposure duration. *Curr. Top. Radiat. Res. Q.* 1978; 12: 44–62.
26. Doss, M. Low dose radiation adaptive protection to control neurodegenerative diseases. Dose–response: a publication of International Hormesis Society. 2014; 12(2): 277–87.
27. Emami B, Lyman J, Brown A, Coia L, Goitein M, Munzenrider JE, Shank B, Solin LJ, Wesson M. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1991; 21: 109–122.
28. Field SB and Hornsey S. Neutron RBE for normal tissues. High–LET Radiations in Clinical Radiotherapy G. W. Barendsen, J. J. Broerse and K. Breur, Pergamon. 1979, 181–186.
29. Gasinska A, De Rooter–Bootsma A, Davids JAG, Folkard M, Fowler JF. Survival of mouse type B spermatogonia for the study of the biological effectiveness of 1

- MeV, 2.3 MeV and 5.6 MeV fast neutrons. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1987; 52: 237–243.
30. Gasinska A. Mouse testis weight loss and survival of differentiated spermatogonia following irradiation with 250 kV X-rays and 5.5 MeV fast neutrons. *Neoplasma.* 1985; 32: 443–449.
 31. Gebicke-Haerter, PJ. Microglia in neurodegeneration: molecular aspects. *Microscopy research and technique.* 2001; 54(1): 47–58.
 32. Ghosh P, Behnke BJ, Stabley JN, Kilar CR, Park Y, Narayanan A, Alwood JS, Shirazi-Fard Y, Schreurs AS, Globus RK, Delp MD. Effects of High-LET Radiation Exposure and Hindlimb Unloading on Skeletal Muscle Resistance Artery Vasomotor Properties and Cancellous Bone Microarchitecture in Mice. *Radiat Res*2016; 185: 257–266.
 33. Gori, T, Münzel, T. Biological effects of low-dose radiation: of harm and hormesis. *European Heart Journal.* 2011; 33(3): 292–5.
 34. Grabham P, Hu B, Sharma P, Geard C. Effects of ionizing radiation on three-dimensional human vessel models: differential effects according to radiation quality and cellular development. *Radiat Res*2011; 175: 21–28.
 35. Grahn D, Lee CH, Farrington BF. Interpretation of cytogenetic damage induced in the germ line of male mice exposed for over 1 year to ²³⁹Pu alpha particles, fission neutrons, or ⁶⁰Co gamma rays. *Radiat. Res.* 1983; 95: 566–583.
 36. Gueulette J, Octave-Prignot M, De Coster BM, Wambersie A, Grégoire V. Intestinal crypt regeneration in mice: a biological system for quality assurance in non-conventional radiation therapy. *Radiother. Oncol.* 2004; 73: S148–154.
 37. Guida P, Vazquez, ME, Otto S. Cytotoxic Effects of Low- and High-LET Radiation on Human Neuronal Progenitor Cells: Induction of Apoptosis and TP53 Gene Expression. *Radiat. Res.* 2005; 164: 545–555.
 38. Gustavson KH, Jagell S, Blomquist HK, Nordenson I. Microcephaly, mental retardation and chromosomal aberrations in a girl following radiation therapy during late fetal life. *Acta Radiol. Oncol.* 1981; 20: 209–212.
 39. Hall EJ, Worgul BV, Smilenov L, Elliston CD, Brenner DJ. The relative biological effectiveness of densely ionizing heavy-ion radiation for inducing ocular cataracts in wild type versus mice heterozygous for the ATM gene. *Radiat. Environ. Biophys.* 2006; 45: 99–104.
 40. Hamada N, Sato T. Cataractogenesis following high-LET radiation exposure. *Mutat. Res.* 2016; 770: 262–291.
 41. Hanania AN, Mainwaring W, Ghebre YT, Hanania NA, Ludwig M. Radiation-Induced Lung Injury: Assessment and Management. *Chest.* 2019; 156: 150–162.

42. Harrison J, Leggett R, Lloyd D, Phipps A, Scott B. Polonium-210 as a poison. *J. Radiol. Prot.* 2007; 27: 17–40.
43. Hillebrandt S, Streffer C. Relative biological effectiveness of neutrons: induction of malformations in a mouse strain with genetic predisposition. *Radiat. Res.* 2000; 153: 595–598.
44. Hong, JH, Chiang, CS, Campbell, IL, et al. Induction of acute phase gene expression by brain irradiation. *International journal of radiation oncology, biology, physics.* 1995; 33(3): 619–26.
45. Hopewell JW, Campling D, Calvo W, Reinhold HS, Wilkinson JH, Yeung TK. Vascular irradiation damage: its cellular basis and likely consequences. *Br J Cancer Suppl*1986; 7: 181–191.
46. Hopewell JW, Barnes DW, Robbins ME, Sansom JM, Knowles JF, van den Aardweg GJ. The relative biological effectiveness of fractionated doses of fast neutrons (42 MeVd---Be) for normal tissues in the pig. I. Effects on the epidermis and dermal vascular/connective tissues. *Br. J. Radiol.* 1988; 61: 928–938.
47. Hornsey S. RBE for lung and cord. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1982; 8: 2099–2102.
48. Howell RW, Azure MT, Narra VR, Rao DV. Relative biological effectiveness of alpha-particle emitters in vivo at low doses. *Radiat. Res.* 1994; 137: 352–360.
49. Howell RW, Goddu SM, Narra VR, Fisher DR, Schenter RE, Rao DV. Radiotoxicity of gadolinium-148 and radium-223 in mouse testes: relative biological effectiveness of alpha-particle emitters in vivo. *Radiat. Res.* 1997; 147: 342–348.
50. Hwang NH, Feola JM, Beach JL, Maruyama Y. RBE of CF-252 neutrons by mouse testes weight loss. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1984;10: 901–905.
51. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. Publication 85. 2000.
52. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Biological effects after prenatal irradiation (Embryo and Fetus). In: J. V. Valentin (ed.), *Annals of the ICRP*. ICRP publication 90. Vol. 33, Oxford, UK: Pergamon Press, 2003.
53. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Developmental effects of irradiation on the brain of the embryo and fetus. In: M. C. Thorne (ed.), *Annals of the ICRP*. ICRP publication 49. Volume 16, Oxford, UK: Pergamon Press, 1986.
54. International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. CRP Publication 118. *Ann. ICRP* 41. Elsevier Health Sciences, 2011, 134.

55. International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs -- threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. 2012.
56. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation. ICRP Publication 41. 1984.
57. International Commission on Radiological Protection (ICRP). RBE for Deterministic Effects. In: H. Smith ed.), Annals of the ICRP. ICRP Publication 58. Vol. 20, Oxford, UK: Pergamon Press, 1989, 10–14, 34–35.
58. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 21. Elsevier Health Sciences, 2003, 107.
59. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission of Radiological Protection. In: J. V. Valentin (ed.), Annals of the ICRP. ICRP publication 103. Vol. 37, Amsterdam, Netherlands: ELSEVIER, 2007, 57–59.
60. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann. ICRP 37(2–4), Published for the International Commission on Radiological Protection by Sage, 2007.
61. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin Publication 59. 1992.
62. Imaeda M, Ishikawa H, Yoshida Y, Takahashi T, Ohkubo Y, Musha A, Komachi M, Nakazato Y, Nakano T. Long-term pathological and immunohistochemical features in the liver after intraoperative whole-liver irradiation in rats. *J. Radiat. Res.* 2014; 55: 665–73.
63. International Atomic Energy Agency (IAEA). Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries. Safety Reports Series No.2. 1998.
64. International Atomic Energy Agency (IAEA). EPR-MEDICAL 2005, Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency. 2005.
65. International Atomic Energy Agency (IAEA). Technical Report Series: Manual on Radiation Hematology No.123. 1971.
66. Ishida Y, Ohmachi Y, Nakata Y, Hiraoka T, Hamano T, Fushiki S, Ogiu T. Dose-response and large relative biological effectiveness of fast neutrons with regard to mouse fetal cerebral neuron apoptosis. *J Radiat Res.* 2006; 47: 41–47.
67. Isono M, Yoshida Y, Takahashi A, Oike T, Shibata A, Kubota Y, Kanai T, Ohno T, Nakano T. Carbon-ion beams effectively induce growth inhibition and apoptosis in

- human neural stem cells compared with glioblastoma A172 cells. *J Radiat Res.* 2015; 56: 856–61.
68. Jaal J, Dörr W. Radiation induced late damage to the barrier function of small blood vessels in mouse bladder. *J. Urol.* 2006; 176: 2696–2700.
 69. Joiner MC, Field SB. The response of mouse skin to irradiation with neutrons from the 62 MeV cyclotron at Clatterbridge, U. K. *Radiother. Oncol.* 1988; 12: 153–166.
 70. Joiner MC, Johns H. Renal damage in the mouse: The effect of d(4)–Be neutrons. *Radiat. Res.* 1987; 109: 456 –468.
 71. Joiner MC, Maughan RL, Fowler JF, Denekamp J. The RBE for mouse skin irradiated with 3–MeV neutrons: single and fractionated doses. *Radiat. Res.* 1983; 95: 130–141.
 72. Joiner MC, van der Kogel AJ. *Basic clinical radiobiology.* Fifth edition: CRC Press, Inc., 2018, 160–162.
 73. Jones JA, McCarten M, Manuel K, Djojonegoro B, Murray J, Feiversen A, Wear M. Cataract formation mechanisms and risk in aviation and space crews. *Aviat. Space Environ. Med.* 2007; 78: A56–A66.
 74. Jones TD, Morris MD, Young RW, Kehlet RA. Neutron RBEs for cytopenia and repopulation of stroma and hematopoietic stem cells: mathematical models of marrow cell kinetics. *Health Phys*1997; 72: 530–543.
 75. Kam, WW–Y, Banati, RB. Effects of ionizing radiation on mitochondria. *Free Radical Biology and Medicine.* 2013; 65: 607–19.
 76. Kamiguchi Y, Tateno H, Mikamo K. Dose–response relationship for the induction of structural chromosome aberrations in human spermatozoa after in vitro exposure to tritium beta–rays. *Mutat. Res.* 1990; 228: 125–131.
 77. Kaminuma T, Suzuki Y, Shirai K, Mizui T, Noda S, Yoshida Y, Funayama T, Takahashi T, Kobayashi Y, Shirao T, Nakano T. Effectiveness of carbon–ion beams for apoptosis induction in rat primary immature hippocampal neurons. *J Radiat Res.* 2010; 51: 627–31.
 78. Karger CP, Debus J, Peschke P, Münter MW, Heiland S, Hartmann GH. Dose–response curves for late functional changes in the normal rat brain after single carbon–on doses evaluated by magnetic resonance imaging: influence of follow–up time and calculation of relative biological effectiveness. *Radiat Res.* 2002; 158: 545–555.
 79. Karger CP, Peshke P. RBE and related modeling in carbon–ion therapy. *Phys. Med. Biol.* 2018; 63: 01TR02.
 80. Katoh H, Ishikawa H, Hasegawa M, Yoshida Y, Suzuki Y, Ohno T, Takahashi T, Nakano T. Protective effect of urinary trypsin inhibitor on the development of

- radiation-induced lung fibrosis in mice. *J. Radiat. Res.* 2010; 51: 325–332.
81. Kavanagh BD, Pan CC, Dawson LA, Das SK, Allen Li X, Ten Haken RK, Miften M. Radiation dose-volume effects in the stomach and small bowel. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S101–107.
 82. Kempf, SJ, Janik, D, Barjaktarovic, Z, et al. Chronic low-dose-rate ionising radiation affects the hippocampal phosphoproteome in the ApoE^{-/-} Alzheimer's mouse model. *Oncotarget.* 2016; 7(44): 71817.
 83. Konermann G. Brain development in mice after prenatal irradiations: modes of effect manifestation, dose-response-relationship and RBE of neutrons. In: H. Kriegel, W. Schmahl, G. B. Gerber, et al (eds), *Radiation Risk to the Developing Nervous System*. Stuttgart, Germany: Gustav Fischer Verlag, 1986, 93–116.
 84. Köst S, Dörr W, Keinert K, Glaser FH, Endert G, Herrmann T. 2002. Effect of dose-distribution in damage to the kidney following abdominal radiotherapy. *Int. J. Radiat. Biol.* 2002; 78: 695–702.
 85. Kozlowski R, Bouffler SD, Haines JW, Harrison JD, Cox R. In utero haemopoietic sensitivity to alpha, beta or X-irradiation in CBA/H mice. *Int. J. Radiat. Biol.* 2001; 77: 805–815.
 86. Kuhne WW, Gersey BB, Wilkins R, Wu H, Wender SA, George V, Dynan WS. Biological effects of high-energy neutrons measured in vivo using a vertebrate model. *Radiat. Res.* 2009; 172: 473–480.
 87. Kutkov V, Buglova E and McKenna T. Severe deterministic effects of external exposure and intake of radioactive material: basis for emergency response criteria. *J Radiol Prot* 2011; 31: 237–253.
 88. Langberg CW, Hauer-Jensen M. 1996. Influence of fraction size on the development of late radiation enteropathy. An experimental study in the rat. *Acta Oncol.* 1996; 35: 89–94.
 89. Langberg CW, Waldron JA, Baker ML, Hauer-Jensen M. Significance of overall treatment time for the development of radiation-induced intestinal complications. An experimental study in the rat. *Cancer* 1994; 73: 2663–2668.
 90. Lee H-J, Kim J-S, Moon C, Kim J-C, Jo S-K, Kim S-H. Relative biological effectiveness of fast neutrons in a multiorgan assay for apoptosis in mouse. *Environ. Toxicol.* 2008; 23: 233–239.
 91. Leith JT, Ainsworth EJ, Alpen EL. Heavy-Ion Radiobiology: Normal Tissue Studies. *Advances in Radiation Biology*. 10. J. T. Lett, Elsevier. 1983, 191–236.
 92. Lenth JT, Powers-Risius P, Woodruff KH, McDonald M, Howard J. Response of the skin of hamsters to fractionated irradiation with X rays or accelerated carbon ions. *Radiat. Res.* 1981; 88: 565–576.

93. Lett JT, Cox AB, Berghold DS, Lee AC, Peckering E. Late effects of particulate radiations in primate and rabbit tissues. *Adv. Space Res.* 1984; 4: 251–256.
94. Limoli, CL, Giedzinski, E, Rola, R, et al. Radiation response of neural precursor cells: linking cellular sensitivity to cell cycle checkpoints, apoptosis and oxidative stress. *Radiation research.* 2004; 161(1): 17–27.
95. Lorimore SA, Goodhead DT, Wright EG. Inactivation of haemopoietic stem cells by slow alpha-particles. *Int J Radiat Biol*1993; 63: 655–660.
96. Lowe, XR, Bhattacharya, S, Marchetti, F, et al. Early Brain Response to Low-Dose Radiation Exposure Involves Molecular Networks and Pathways Associated with Cognitive Functions, Advanced Aging and Alzheimer's Disease. *Radiation Research.* 2009; 171(1): 53–65.
97. Lumniczky, K, Szatmári, T, Sáfrány, G. Ionizing Radiation-Induced Immune and Inflammatory Reactions in the Brain. *Front Immunol.* 2017; 8: 517.
98. Ma, S, Kong, B, Liu, B, et al. Biological effects of low-dose radiation from computed tomography scanning. *International journal of radiation biology.* 2013; 89(5): 326–33.
99. Mao XW, Boerma M, Rodriguez D, Campbell-Beachler M, Jones T, Stanbouly S, Sridharan V, Wroe A, Nelson GA. Acute effect of low-dose space radiation on mouse retina and retinal endothelial cells. *Radiat. Res.* 2018; 190: 45–52.
100. Mao, X, Boerma, M, Rodriguez, D, et al. Combined effects of low-dose proton radiation and simulated microgravity on the mouse retina and the hematopoietic system. *Radiation Research.* 2019; 192(3): 241–50.
101. Mao, XW, Nishiyama, NC, Pecaut, MJ, et al. Simulated Microgravity and Low-Dose/Low-Dose-Rate Radiation Induces Oxidative Damage in the Mouse Brain. *Radiat Res.* 2016; 185(6): 647–57.
102. Marks LB, Bentzen SM, Deasy JO, Spring Kong FM, Bradley JD, Vogelius IS, El Naqa I, Hubbs JL, Lebesque JV, Timmerman RD, Martel MK, Jackson A. Radiation dose-volume effects in the lung. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S70–76.
103. Marks LB, Carroll PR, Anscher MS. The response of the urinary bladder, urethra, and ureter to radiation and chemotherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1995; 31: 1257–1280.
104. Marks LB, Yorke ED, Jackson A, Ten Haken RK, Constine LS, Eisbruch A, Bentzen SM, Nam J, Deasy JO. Use of normal tissue complication probability models in the clinic. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S10–S19.
105. Matsuda Y, Ohara H, Tobarí I. Studies on radiation-induced chromosome aberrations in mouse spermatocytes. II. Dose-response relationships of

- chromosome aberrations induced at zygotene stage in mouse primary spermatocytes following fast neutron- and ⁶⁰Co gamma-irradiations. *Mutat. Res.* 1987; 176: 251-257.
106. Matsuda Y, Yamada T, Tobari I. Chromosome aberrations induced by tritiated water or ⁶⁰Co gamma-rays at early pronuclear stage in mouse eggs. *Mutat. Res.* 1986; 160: 87-93.
107. McDonald S, Rubin P, Phillips TL, Marks LB. Injury to the lung from cancer therapy: clinical syndromes, measurable endpoints, and potential scoring systems. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1995; 31: 1187-1203.
108. Mehta V. Radiation pneumonitis and pulmonary fibrosis in non-small-cell lung cancer: pulmonary function, prediction, and prevention. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2005; 63: 5-24.
109. Merriam GR, Schechter A, Focht EF. The effects of ionizing radiation on the eye. *Front. Radiat. Ther. Oncol.* 1972; 6: 346-385.
110. Michalski JM, Gay H, Jackson A, Tucker SL, Deasy JO. Radiation Dose-Volume Effects in Radiation-Induced Rectal Injury. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S123-129.
111. Monje ML, Mizumatsu S, Fike JR, et al. Irradiation induces neural precursor-cell dysfunction. *Nature medicine.* 2002; 8(9): 955-62.
112. Nakashima E, Akahoshi M, Neriishi K, Fujiwara S. Systolic blood pressure and systolic hypertension in adolescence of atomic bomb survivors exposed in utero. *Radiat. Res.* 2007; 168: 593-599.
113. Nakashima E, Akahoshi M, Neriishi K, Fujiwara S. Systolic blood pressure and systolic hypertension in adolescence of atomic bomb survivors exposed in utero. *Radiat. Res.* 2007; 168: 593-599.
114. Nembhard WN, McElfish PA, Ayers B, Collins RT, Shan X, Rabie NZ, Zarate YA, Maity S, Cen R, Robbins JA. Nuclear radiation and prevalence of structural birth defects among infants born to women from the Marshall Islands. *Birth Defects Res.* 2019; 111: 1192-1204.
115. Nemoto K, Pickles T, Minchinton AI, Lam GK. The relative biological effectiveness of the modulated proton beam at TRIUMF. *Radiat. Med.* 1998; 16: 43-46.
116. Osman, AM, Sun, Y, Burns, TC, et al. Radiation Triggers a Dynamic Sequence of Transient Microglial Alterations in Juvenile Brain. *Cell reports.* 2020; 31(9): 107699.
117. Pacchierotti P, Russo A, Metalli P. Meiotic non-disjunction induced by fission neutrons relative to X-rays observed in mouse secondary spermatocytes. II. Dose-effect relationships after treatment of pachytene cells. *Mutat. Res.* 1987; 176: 233-241.

- 118.Pampfer S, Müller W-U, Streffer C. Preimplantation growth delay and micronucleus formation after in vivo exposure of mouse zygotes to fast neutrons. *Radiat. Res.* 1992; 129: 88–95.
- 119.Pampfer S, Streffer C. Prenatal death and malformations after irradiation of mouse zygotes with neutrons or X-rays. *Teratol.* 1988; 37: 599–607.
- 120.Pan CC, Kavanagh BD, Dawson LA, Li XA, Das SK, Miften M, Ten Haken RK. Radiation associated liver injury. *Int. J. Radiat.Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S94–S100.
- 121.Parihar, VK, Allen, BD, Caressi, C, et al. Cosmic radiation exposure and persistent cognitive dysfunction. *Scientific Reports.* 2016; 6(1): 34774.
- 122.Pearce, MS, Salotti, JA, Little, MP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet (London, England).* 2012; 380(9840): 499–505.
- 123.Potten CS, Gandara R, Mahida YR, Loeffler M, Wright NA. *Cell Prolif.* 2009; 42: 731–750.
- 124.Preston, DL, Ron, E, Tokuoka, S, et al. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998. *Radiation Research.* 2007; 168(1): 1–64.
- 125.Preston, DL, Ron, E, Yonehara, S, et al. Tumors of the nervous system and pituitary gland associated with atomic bomb radiation exposure. *Journal of the National Cancer Institute.* 2002; 94(20): 1555–63.
- 126.Raber, J, Allen, AR, Sharma, S, et al. Effects of Proton and Combined Proton and (56)Fe Radiation on the Hippocampus. *Radiat Res.* 2016; 185(1): 20–30.
- 127.Raju MR, Carpenter SG. A heavy particle comparative study. PartIV: acute and late reactions. *Br. J. Radiol.* 1978; 51: 720–727.
- 128.Rancati T, Schwarz M, Allen AM, Feng F, Popovtzer A, Mittal B, Eisbruch A. Radiation Dose–Volume Effects in the Larynx and Pharynx. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S64–69.
- 129.Rancati T, Schwarz M, Allen AM, Feng F, Popovtzer A, Mittal B, Eisbruch A. Radiation dose–volume effects in the larynx and pharynx. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S64–69.
- 130.Rao DV, Narra VR, Howell RW, Govelitz GF, Sastry KSR. In–vivo radiotoxicity of DNA incorporated 125I compared with that of densely ionising alpha–particles. *Lancet.* 1989; 334: 650–653.
- 131.Roth J, Brown N, Catterall M, Beal A. Effects of fast neutrons on the eye. *Br J Ophthalmol.* 1976; 60: 236–244.
- 132.Rugh R, Duhamel L, Chandler A, Varma A. Cataract development after embryonic and fetal X–irradiation. *Radiat. Res.* 1964; 22: 519–534.

133. Rugh R, Wohlfromm M, Varma A, Spencer N, Stanford W. A reexamination of the mouse embryonic radiation cataract studies. *Radiat. Res.* 1971; 47: 182–190.
134. Satow Y, Hori H, Lee JY, Ohtaki M, Sawada S, Nakamura N, Okada S. Effect of tritiated water on female germ cells: mouse oocyte killing and RBE. *Int. J. Radiat. Biol.* 1989a; 56:293–299.
135. Satow Y, Hori H, Lee JY. Teratogenic effect of fission neutron and tritium water on rat embryo. *J. UOEH.* 1989b;11 Suppl: 416–431.
136. Satow Y, Lee JY, Hori H, Okuda H, Tsuchimoto S, Sawada S, Yokoro K. Teratogenic effect of californium-252 irradiation in rats. *J. Radiat. Res.* 1989c; 30: 155–163.
137. Scott B. Early Occurring and Continuing Efforcts. In: *Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis Modifications of Models Resulting From Recent Reports on Health Effects of Ionizing Radiation Low LET Radiation Part 11: Scientific Bases for Health Effects Models.*, UNNRC 1995.
138. Scott BR, Gott KM, Potter CA, Wilder J. A Comparison of In Vivo Cellular Responses to Cs-137 Gamma Rays And 320-kV X Rays. *Dose Response*2013; 11: 444–459.
139. Searle AG, Beechey CV, Green D, Howells GR. Comparative effects of protracted exposures to ⁶⁰Co gamma-radiation and ²³⁹Pu alpha-radiation on breeding performance in female mice. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1980; 37: 189–200.
140. Shimizu Y, Kodama K, Nishi N, Kasagi F, Suyama A, Soda M, Grant EJ, Sugiyama H, Sakata R, Moriwaki H, Hayashi M, Konda M, Shore RE. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950–2003. *BMJ* 2010; 340: b5349.
141. Shore RE, Worgul BV. Overview of the epidemiology of radiation cataracts. In: A. J. Junk, Y. Kundiev, P. Vitte, B. V. Worgul (eds.), *Ocular Radiation Risk Assessment in Populations Exposed to Environmental Radiation Contamination.* Kluwer, The Hague, 1999, 183–189.
142. Shore RE. Radiation and cataract risk: Impact of recent epidemiologic studies on judgments. *Mutat. Res.* 2016; 770: 231–237.
143. Solomon HM, Beckman DA, Buck SJ, Gorson RO, Mills RE, Brent RL. Comparative effects of neutron irradiation and X irradiation on the embryonic development of the rat. *Radiat. Res.* 1994; 137: 226–230.
144. Sorensen BS, Bassler N, Nielsen S, Horsman MR, Grzanka L, Spejlborg H, Swakon J, Olko P, Overgaard J. Relative biological effectiveness (RBE) and distal edge effects of proton radiation on early damage in vivo. *Acta Oncol.* 2017; 56: 1387–

1391.

145. Sorensen BS, Horsman MR, Alsner J, Overgaard J, Durante M, Scholz M, Friedrich T, Bassler N. Relative biological effectiveness of carbon ions for tumor control, acute skin damage and late radiation-induced fibrosis in a mouse model. *Acta Oncol.* 2015; 54: 1623–1630.
146. Sreetharan S, Thome C, Tharmalingam S, Jones DE, Kulesza AV, Khaper N, Lees SJ, Wilson JY, Boreham DR, Tai TC. Ionizing radiation exposure during pregnancy: Effects on postnatal development and life. *Radiat. Res.* 2017; 187: 647–658.
147. Stewart FA, Randhawa V, Maughan R. The RBE for mouse bladders after irradiation with 1 to 8 fractions of d(4)+ Be neutrons. *Br. J. Radiol.* 1986; 59: 61–68.
148. Stewart FA, Soranson J, Maughan R, Alpen EL, Denekamp J. The RBE for renal damage after irradiation with 3 MeV neutrons. *Br. J. Radiol.* 1984; 57: 1009–1021.
149. Straume T, Dobson RL, Kwan TC. Neutron RBEs and the radiosensitive target for mouse immature oocyte killing. *Radiat. Res.* 1987; 111: 47–57.
150. Streffer C, Molls M. Cultures of preimplantation mouse embryos: a model for radiobiological studies. *Adv. Radiat. Biol.* 1987; 13: 169–213.
151. Streffer C, Muller W-U. Malformations after radiation exposure of preimplantation stages. *Int. J. Biol.* 1996; 40: 355–360.
152. Sullivan MF, Beamer JL, Cross FT, Lund JE, Mahony TD, Endres GW, Buschbom RL. Pathologic effects of intracavitary irradiation with Californium-252. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1980; 6: 1613–1627.
153. Suman S, Kumar S, Moon BH, Strawn SJ, Thakor H, Fan Z, Shay JW, Fornace Jr. AJ, Datta K. Relative Biological Effectiveness of Energetic Heavy Ions for Intestinal Tumorigenesis Shows Male Preponderance and Radiation Type and Energy Dependence in APC1638N/+ Mice. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2016; 95: 131–138.
154. Szabó ER, Brand M, Hans S, Hideghéty K, Karsch L, Lessmann E, Pawelke J, Schürer M, Beyreuther E. Radiobiological effects and proton RBE determined by wildtype zebrafish embryos. *PLoS One.* 2018; 813: e0206879.
155. Tateno H, Kamiguchi Y, Watanabe S, Mikamo K, Sawada S. Relative biological effectiveness (RBE) of ²⁵²Cf fission neutrons for the induction of chromosome damage in human spermatozoa. *Int. J. Radiat. Biol.* 1996; 70: 229–235.
156. Tatsukawa Y, Nakashima E, Yamada M, Funamoto S, Hida A, Akahoshi M, Sakata R, Ross NP, Kasagi F, Fujiwara S, Shore RE. Cardiovascular disease risk among atomic bomb survivors exposed in utero, 1978–2003. *Radiat. Res.* 2008; 170: 269–274.

157. Tatsuzaki H, Inada T, Arimoto T, Shimizu T, Sato S, Yaguchi M, Akisada M. Early and late effects of fractionated 250 MeV proton beam irradiation on murine legs. *J. Jpn. Soc. Ther. Radiol. Oncol.* 1991; 3: 171–179.
158. Tepper J, Verhey L, Goitein M, Suit HD, Phil D. In vivo determinations of RBE in a high energy modulated proton beam using normal tissue reactions and fractionated dose schedules. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1977; 2: 1115–1122.
159. Thomas P, Tracy B, Ping T, Baweja A, Wickstrom M, Sidhu N, Hiebert L. Relative biological effectiveness (RBE) of alpha radiation in cultured porcine aortic endothelial cells. *Int J Radiat Biol* 2007; 83: 171–179.
160. Tomizawa M, Miyamoto T, Kato H, Otsu H. Relative biological effectiveness of carbon ions for causing fatal liver failure after partial hepatectomy in mice. *J. Radiat. Res.* 2000; 41: 151–161.
161. Tsoutsou PG, Koukourakis MI. Radiation pneumonitis and fibrosis: mechanisms underlying its pathogenesis and implications for future research. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2006; 66: 1281–1293.
162. Tsuboi A, Kojima E, Tanaka K., Kanai T. RBE of Carbon Beam on Hematopoietic Injury. *NIPPON ACTA RADIOLOGICA* 1995; 55: 247–252.
163. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Source, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. Report to Report to the General Assembly with Annexes.* New York, USA: United Nations, 1982.
164. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Source, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. Report to Report to the General Assembly with Annexes.* New York, USA: United Nations, 1988.
165. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources, effects and risks of ionizing radiation: 1988 report to the General Assembly, with annexes,* United Nations, 1988.
166. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2013 report to the General Assembly with scientific annexes,* United Nations, 2013.
167. USNRC/CEC. *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis. Early Health Effects Uncertainty Assessment. Appendices Vol.2, NUREG_CR-6545,* Washington DC 1997, C31–C60.
168. Uzawa A, Ando K, Koike S, Furusawa Y, Matsumoto Y, Takai N, Hirayama R, Watanabe M, Scholz M, Elsässer T, Peschke P. Comparison of biological effectiveness of carbon-ion beams in Japan and Germany. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2009; 73: 1545–1551.

169. Vienne-Jumeau, A, Tafani, C, Ricard, D. Environmental risk factors of primary brain tumors: A review. *Revue Neurologique*. 2019; 175(10): 664–78.
170. Wang B, Murakami M, Eguchi-Kasai K, Nojima K, Shang Y, Tanaka K, Watanabe K, Fujita K, Moreno SG, Coffigny H, Hayata I. Effects of prenatal irradiation with an accelerated heavy-ion beam on postnatal development in rats: II. Further study on neurophysiologic alterations. *Adv. Space Res.* 2007c; 39: 994–1003.
171. Wang B, Murakami M, Eguchi-Kasai K, Nojima K, Shang Y, Tanaka K, Watanabe K, Fujita K, Moreno SG, Coffigny H, Hayata I. Effects of prenatal irradiation with accelerated heavy-ion beams on postnatal development in rats: III. Testicular development and breeding activity. *Adv. Space Res.* 2007a; 40: 550–562.
172. Wang B, Murakami M, Eguchi-Kasai K, Nojima K, Shang Y, Tanaka K, Watanabe K, Fujita K, Moreno SG, Coffigny H, Hayata I. Effects of prenatal irradiation with an accelerated heavy-ion beam on postnatal development in rats: I. Neurophysiological alterations. *Radiat. Res.* 2005; 164: 561–566.
173. Wang B, Tanaka K, Murakami M, Eguchi-Kasai K, Shang Y, Fujita K, Moreno SG, Coffigny H, Hayata I. Prenatal irradiations with accelerated-heavy-ion beams induced LET-dependent detrimental effects on prenatal development and postnatal neurophysiological accomplishment. *Indian J. Rad. Res.* 2008; 5: 15–23.
174. Wang B, Watanabe K, Yamada T, Shima A. Effects of beta radiation from organically bound tritium on cultured mouse embryonic mid brain cells. *Health Phys.* 1996; 71: 915–921.
175. Wang B, Zhang W, Zhou X-Y. Experimental studies on biological effects of tritium exposure in late last century in P. R. China. *Indian J. Rad. Res.* 2007b; 3: 26–33.
176. Wang B., Yasuda H. Relative biological effectiveness of high LET particles on the reproductive system and fetal development, *Life*, 2020; 10: 298.
177. Wang, B, Tanaka, K, Ji, B, et al. Total body 100-mGy X-irradiation does not induce Alzheimer's disease-like pathogenesis or memory impairment in mice. *Journal of radiation research*. 2014; 55(1): 84–96.
178. Ward WF, Aceto Jr H, Jolly R, Buckle D. R.B.E. and O.E.R. of extended-Bragg-peak helium ions: survival and development of rat embryos. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1976; 30: 317–326.
179. Waselenko JK, MacVittie TJ, Blakely WF, Pesik N, Wiley AL, Dickerson WE, Tsu H, Confer DL, Coleman CN, Seed T, Lowry P, Armitage JO, Dainiak N. Medical Management of the Acute Radiation Syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. *Ann. Intern. Med.* 2004; 140: 1037–1051.
180. Weissenborn U, Streffer C. Analysis of structural and numerical chromosomal

- anomalies at the first, second, and third mitosis after irradiation of one-cell mouse embryos with X-rays or neutrons. *Int. J. Radiat. Biol.* 1988; 54: 381–394.
181. Werner–Wasik M, Yorke E, Deasy J, Nam J, Marks LB. Radiation Dose–Volume Effects in the Esophagus. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2010; 76: S86–93.
182. Worgul BV, Medvedovsky C, Huang Y, Marino SA, Randers–Pehrson G, Brenner DJ. Quantitative assessment of the cataractogenic potential of very low doses of neutrons. *Radiat. Res.* 1996; 145: 343–349.
183. Yamada T, Yukawa O, Asami K, Nakazawa T. Effect of chronic HTO beta or ⁶⁰Co gamma radiation on preimplantation mouse development in vitro. *Radiat. Res.* 1982; 92: 359–369.
184. Yang VV and Ainsworth EJ. Late effects of heavy charged particles on the fine structure of the mouse coronary artery. *Radiat Res* 1982; 91: 135–144.
185. Yasuda T, Oda S, Yasuda H, Hibi Y, Anzai K, Mitani H. Biological effects of high-energy neutrons measured in vivo using a vertebrate model. *Int. J. Radiat. Biol.* 2011; 87: 915–922.
186. Ye, J, Jiang, Z, Chen, X, et al. Electron transport chain inhibitors induce microglia activation through enhancing mitochondrial reactive oxygen species production. *Experimental cell research.* 2016; 340(2): 315–26.
187. Yin, E, Nelson, DO, Coleman, MA, et al. Gene expression changes in mouse brain after exposure to low-dose ionizing radiation. *International journal of radiation biology.* 2003; 79(10): 759–75.
188. Yoshida Y, Ando K, Ando K, Murata K, Yoshimoto Y, Musha A, Kubo N, Kawamura H, Koike S, Uzawa A, Takahashi T, Ohno T, Nakano T. Evaluation of therapeutic gain for fractionated carbon-ion radiotherapy using the tumor growth delay and crypt survival assays. *Radiother. Oncol.* 2015; 117: 351–357.
189. Yoshida Y, Suzuki Y, Al–Jahdari WS, Hamada N, Funayama T, Shirai K, Katoh H, Sakashita T, Kobayashi Y, Nakano T. Evaluation of the relative biological effectiveness of carbon ion beams in the cerebellum using the rat organotypic slice culture system. *J Radiat Res.* 2012; 53: 87–92.
190. Zhang H, Duan X, Yuan Z, Li W, Zhou G, Zhou Q, Bing L, Min F, Li X, Xie Y. Chromosomal aberrations induced by ¹²C⁶⁺ ions and ⁶⁰Co gamma-rays in mouse immature oocytes. *Mutat. Res.* 2006; 595: 37–41. *Mutat. Res.* 2006; 595: 37–41.
191. Zhang H, Zheng RL, Wang RY, Wei ZQ, Li WJ, Gao QX, Chen WQ, Wang ZH, Han GW, Liang JP. Chromosomal aberrations induced by ¹²C⁶⁺ heavy ion irradiation in spermatogonia and spermatocytes of mice. *Mutat. Res.* 1998a; 398: 27–31.
192. Zhang H, Zheng RL, Wei ZQ, Li WJ, Gao QX, Chen WQ, Wang ZH, He J, Liang JP, Han GW, Huang T, Li Q, Xie HM, Zhang SM, Cai XC. Effects of pre-exposure of

- mouse testis with low-dose $^{16}\text{O}^{8+}$ ions or ^{60}Co gamma-rays on sperm shape abnormalities, lipid peroxidation and superoxide dismutase (SOD) activity induced by subsequent high-dose irradiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 1998b; 73: 163–167.
193. Zhou C, Jones B, Moustafa M, Yang B, Brons S, Cao L, Dai Y, Schwager C, Chen M, Jaekel O, Chen L, Debus J, Abdollahi A. Determining RBE for development of lung fibrosis induced by fractionated irradiation with carbon ions utilizing fibrosis index and high-LET BED model. *Clin. Transl. Radiat. Oncol.* 2019b; 14: 25–32.
194. Zhou C, Moustafa M, Zhou Z, Jones B, Brons S, Schwager C, Kriegsmann M, Lasitschka F, Debus J, Abdollahi A. Relative Biological Effectiveness (RBE) for Development of lung fibrosis after single dose carbon ion radiotherapy (CIRT) *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2019a; 105: e644–645 (supple).
195. Zhou XY, Dong JC, Zhou SY, Chen JD, Guo FR. Experimental study on relative biological effectiveness of tritium and risk estimates of genetic damage. *Chin. Med. J.* 1989; 102: 872–878.

2. 国内の放射線規制の課題に関する調査・提言

2.1 大規模な放射線災害発生時の線量推定法の評価

委員長 三浦 富智(弘前大学被ばく医療総合研究所)

古渡 意彦(量研機構高度被ばく医療センター)

濱崎 幹也(放射線影響研究所分子生物科学部)

阿部 悠(長崎大学原爆後障害医療研究所)

吉野 浩教(弘前大学大学院保健学研究科)

2.1.1 テーマを選んだ経緯や背景

2001年、米国で発生した同時多発テロを背景とし、生物学的線量評価に関する課題として大規模放射線災害発生時の線量推定が国際的課題として議論された。特に米国では、ハイスループットシステムの開発に取り組んできた。一方、国内では、後述の大規模放射線災害発生時の対応が遅れている。物理学的線量評価に関して言うと、これまでの原子力災害における職業人及び公衆の外部・内部被ばく線量評価に関し、大規模事故を経るごとに評価手法は確実に高度化・精緻化している。例えば、チェルノブイリ原発事故、及び今般の東京電力福島第一原子力発電所における原子力事故でも、環境中に放出された放射性核種から放出される γ 線による環境中の1cm線量当量率から公衆の外部被ばく線量を推定する手法には大幅な進展がみられる。一方、現時点でも実際に放射線の線量当量率を素早く広範囲に測定する技術と体制整備は追いついておらず、大規模放射線災害時における公衆の外部被ばく線量推定手法の標準化は未整備であり、内部被ばく線量の推定手法は、アウトカムである預託実効線量の不確実性がどの程度になるかも含め、検討の余地が大きい。

わが国では、原子力規制庁より指定を受けた量子科学技術研究開発機構(以下量研機構)、弘前大学、福島県立医科大学、広島大学、長崎大学の高度被ばく医療支援センター(量研機構は基幹高度被ばく医療支援センター)が被ばく医療における線量評価を担う。高度被ばく医療支援センターでは、物理学的線量評価および生物学的線量評価に関する課題や取り組みを協議するため、各センターから推薦された2名の専門家から構成される線量評価部会が設置されている。線量評価部会では、先の福島第一原子力発電所における原子力事故から得た教訓を生かし、世界規模で影響を及ぼす原子力災害に関する対応等について準備を進め、事故対応機能は着実に整備されている。しかしながら、今般、欧州で急速に懸念が増大している、ローンウルフ型テロリストによる大都市圏での放射線テロを想定した、大規模な放射線災害発生時の線量推定法については議論されておらず、国内における大規模放射線災害発生時の対応は定まっていない。

そこで、放射線災害時の線量推定に関する小委員会(以下、小委員会)では、大規模な放射線災害時における線量推定方法に関する調査、および各高度被ばく医療支

援センターの準備状況を調査する。さらに、線量評価を担う若手人材の育成についても調査する。

2.1.2 調査や提言取りまとめの実施方法

各高度被ばく医療支援センター(量子科学技術研究開発機構、弘前大学、福島県立医科大学、広島大学、長崎大学)にアンケート(参考資料 5.1)により調査協力を依頼し、各センターの取り組みや対応について取りまとめ、大規模放射線災害発生時における線量評価の課題を抽出する。さらに、線量評価法の開発や改善に関する取り組みを、日本放射線影響学会、ICRR(International Congress of Radiation Research)、EPRBioDose 等の学会発表から抽出する。

2.1.3 調査結果および提言

2.1.3.1 大規模放射線災害時の線量評価に関する国内外の取り組み

(1) 大規模放射線災害時における線量評価

大規模放射線災害発生時における線量評価の具体的な取り組みを調査する目的で、原子力規制庁より指定された5つの各高度被ばく医療支援センターにアンケートにより調査協力を依頼し、弘前大学、福島県立医科大学および長崎大学から回答が得られた(参考資料 5.2)。大規模放射線災害時の対応としては、基本的に、優先されるべき救命のための医療行為と並行して、傷病者の外傷や愁訴をもとにトリアージをしつつ、傷病者の表面汚染測定や状況の聞き取りと事故現場の情報収集(放射線量等)に可能な限り取り組む。併せて、傷病者の付着物の回収や可能であれば医師の指示のもと、生体試料を回収・保存し、物理学的線量及び生物学的線量評価を行う。線量評価が必要な対象者が多い場合には、複数組織の機能を統合した線量評価や、生理学的に安定している対象者に対しては、全国に分散して対応することの必要性も指摘された。

具体的な線量評価法については、物理学的線量評価として、被災者の個人被ばく線量計(職業人の場合)や環境中で得られた線量率(公衆の場合)等のリモートで得られる情報から推定される外部被ばく線量、表面汚染(GM サーベイ)、NaI サーベイ等による甲状腺放射性ヨウ素モニタリングおよびホールボディカウンターによる内部被ばく検査を行う。また、生物学的線量評価については、二動原体染色体法(トリアージ法)、血液中の各種炎症応答タンパク質の測定(CRP やサイトカイン等)が予定されている。しかし、3 センターともに血球数の変化に着目した線量評価トリアージは優先されていない。血球数測定に用いられる自動血球解析装置の性能は向上し、40 μ L以下の血液量で白血球 5 分画の測定が可能となっている。また、ランセットを使用した微量採血で測定に必要な血液を採取可能であることから、大規模災害時の要線量評価被災者のスクリーニングにおいて有効な手段となると考えられる。今後、緊急時の大規模放射線災害時における血液検査体制についても検討する必要があると考

えられる。

さらに、生物学的線量評価において、海外では放射線被ばくにより誘導される微小核頻度を指標として被ばく線量を推定する細胞質分裂阻害微小核(CBMN)法の高速解析技術が開発されている。微小核は判定が容易であり、自動化が最も進んでいる解析法であることから、大規模放射線災害時のトリアージスクリーニングで有効となる。しかし、国内ではCBMN法をトリアージスクリーニングに利用すると回答した高度被ばく医療支援センターはなく、細胞遺伝学的線量評価法の選択について協議が必要であろう。

国内の線量評価では、数名～10名以内の線量評価への対応を中心に議論されてきた。特に、生物学的線量評価では染色体異常解析に時間を要することから、放射線医学総合研究所において日本染色体ネットワーク会議に属する国内の生物学的線量評価の専門家が連携し、染色体異常解析を協力して実施する体制が構築されていた。しかし、高度被ばく医療支援センターが設置されて以降、その機能が高度被ばく医療支援センター内に設置された線量評価部会に移管されることにより、これまで日本の生物学的線量評価に協力してきた専門家の協力が得られにくい状況となっている。また、各高度被ばく医療支援センターが連携して大規模放射線災害の線量評価を担うためには、染色体画像撮影システムの共通化や画像共有システムの構築が必要となるが、必要な設備の整備は各機関に委ねられており、設備の導入、維持および更新が十分ではない。また、画像共有システムにおいては、未着手である。したがって、高度被ばく医療支援センターの線量評価担当者に加え、国内の専門家を招聘して、設備と人材を拡充し、大規模放射線災害発生に対する体制整備が必要である。

(2) 大規模放射線災害時における線量評価の依頼

高度被ばく医療支援センターのアンケート回答より、線量評価を依頼するタイミングとして、救命のための医療行為に並行し線量評価を依頼する場合、救命処置が済んだ後に依頼する場合、救命処置は不要であるが線量評価が必要で依頼する場合が想定されている。

物理学的線量評価では、被災現場の情報を速やかに収集し、被災者の外部被ばく線量を推定するとともに、災害直後から大気中放射性物質の連続モニタリングを開始し、放射性物質の取り込み状況の情報の取得に努め、吸入被ばく線量の評価が可能である。したがって、線量評価の依頼の有無にかかわらず、事後直後から線量評価に必要な情報収集が開始されるため、必要に応じて線量評価情報を提供することが可能となる。一方、生物学的線量評価では、処理量の限界と処理すべき時間の範囲があるため、現場の状況確認と必要性の判断が極めて重要となる。このことから、現場の情報判断を担う医師や専門家の育成および多検体の生物学的線量評価の必要な場合に対応する専門家並びに解析補助員の体制整備が必要となる。各高度被

ばく医療支援センターにおいて線量評価を担当するスタッフの雇用状況は、センター間で差があり、また、物理学的線量評価に比べて生物学的線量評価のスタッフ数が不足している状況にある。高速解析が可能な技術開発およびシステムの整備には時間を要すると考えられ、現状では大規模放射線災害に対応可能な体制が整っているとは言い難い。

また、線量評価の依頼方法および検体受け渡し方法は 3 センター中 2 センターで検討されておらず、1 センターで協議中であった。さらに、線量評価報告様式については、3 センターともに検討されていなかった。これらの方法及び様式について、早急に協議し、共通ガイドラインを作成する必要がある。

(3) 線量評価における人材育成

アンケートに回答していただいた 3 センターでは、自施設内で院内のスタッフ(放射線技師、看護師)を対象とした被ばく医療患者を受け入れるシミュレーション研修、学部学生や大学院生に対する講義・実習、および基幹高度被ばく医療支援センターが実施する専門研修への積極的な参加により人材育成に取り組んでいる。

(4) 大規模放射線災害発生時における線量評価に関する技術開発

大規模災害発生時における線量評価技術に関し、国内外の学会や研究費の獲得課題を調査(参考資料 5.3)するとともに、これまでの国際的な動向を検索した。

(4)-① 物理学的線量評価技術の開発

物理学的線量評価では、外部からの放射線による被ばく(外部被ばく)、及び吸入・経口摂取により体内に取り込まれた放射性物質から放出される放射線による被ばく(内部被ばく)の両方を評価可能である。外部被ばく線量評価の場合、職業人に関してはモニタリングが義務付けられていることから体幹部等に装着される個人線量計で推定される。公衆被ばくに関しては、環境中の周辺線量当量率と滞在時間、屋内外の遮へい率を考慮して推定されることが一般的である。内部被ばくについては、職業人、公衆の区別なく、体内に取り込まれた残留放射エネルギーを体外から測定する体外計測法に加え、職業人の場合は排泄物を化学分析を経て減容・濃縮された生体試料の放射能濃度の計測から残留放射エネルギーを評価するバイオアッセイ分析に大別される。

大規模放射線災害発生時における物理学的線量評価上の課題は、多種多様な被ばく状況(線量率、ばく露時間、被検者の人数等)に対応するだけのリソースが十分に準備されていないことを背景とした、迅速線量評価法とその体制整備、被ばく者の遡及的線量再構築手法の高度化、及び評価された線量の精度管理といえる。

迅速線量評価法とその体制整備に関しては、原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業(原子力事故時における近隣住民の確実な初期内部被ばく線量の把握に向けた包括的個人内部被ばくモニタリングの確立)において、

- ・ 甲状腺モニター開発

- ・ 被検者の行動データの一元管理

の技術開発及び詳細な調査が実施されており、比較的線量の低い被検者の集団に対する適切な線量評価について極めて有用な知見を与えるものである。一方で、実効性のある施策として社会実装されるには、スクリーニングレベルをどうするか、測定者の教育訓練、測定場所をどこに確保するか、等の議論を経る必要がある。

被ばく者の遡及的線量再構築手法について、我が国では先般の東京電力福島第一原子力発電所における原子力災害(以下、「福島原発事故」という。)における近隣住民の被ばく線量の再構築の試みが精力的に行われている。環境省原子力災害影響調査等事業(放射線の健康影響に係る研究調査事業)(東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価に関する包括研究)において、福島原発事故初期の被ばく線量再構築が行われており、被ばく線量推定値の不確実性を小さくする試みが継続されている。特に、

- ・ 大気拡散シミュレーションで得られる放射能濃度分布からの線量評価
- ・ 行動データを積極的に組み合わせた精緻な線量評価

については、代表的な仮想的住民に対する被ばく線量推定にとどまらず、測定値とのベンチマーク試験により住民個人の被ばく線量を良く反映していることが明らかとなっている。特に、体外計測で得られた体内中の放射性物質(放射性セシウム及び放射性ヨウ素)の残留量から内部被ばく線量を評価した場合と、シミュレーションと行動データにより推定される線量について非常に良い相関が得られている。今後の課題は、線量再構築手法の精緻化・高度化の観点から、他の核種に適応した場合の線量推定値がどの程度の精度で求められるかの検証が不可欠である。また、現存被ばく状況として住民の外部被ばくを個人線量計で実際にモニタリングする試みも各地方自治体で進められており、屋外の周辺線量当量率と個人線量計で得られた個人線量当量に非常に良い相関があることがいくつも報告されている。

原子力事故時における緊急時放射線モニタリング技術の進展は目覚ましいものがある。得られた環境中の1センチメートル線量当量率は、その場に滞在した(または滞在している)住民及び職業人の受ける外部被ばく線量の推定に供される。前述の通り、推定法自体の研究も進められている。モニタリング技術自体の技術開発は、事故後の切迫した要求に応える形で、飛躍的に進展した。

福島原発事故以前から整備済みの、定置式環境モニタリングステーション、可搬型モニタリングポスト及び手持ち式のサーベイメータ式線量計の機能自体には不備はなく、想定では十分機能するよう整備されていた。しかしながら、事故前に考慮された運用方法及び台数は福島原発事故クラスの空間的広がりを到底カバーできるものではなかった。

京都大学原子炉実験所(当時)有志によって開発された KURAMA-system は、原子力・放射線施設でのモニタリングで一般的な NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータにデータロガー、GPS 及び携帯電話回線を接続して連続モニタリングを可能とし

たものである。これらは、福島原発事故当時、レンタカーやタクシーに載せられ、原子力事故前の計画に基づき県及び国が整備したモニタリング車では到底できなかった面積の緊急時放射線モニタリングを短期間で達成している。このミッションは、航空機サーベイよりも迅速に着手されており(平成23年4月末には試験機投入)、ローカルのレベルにはとどまるが、線量率の把握と空間分布及び時間変化の追跡に大きく貢献した。その後の小型軽量化等の大幅な改造が施された KURAMA-II は、国のモニタリング計画に正式採用され、東日本全域を数次にわたり放射性物質の放出・拡散に伴う線量当量率の上昇と空間分布情報を提供し続けている。現在も、福島県内のモニタリングに採用されているほか、原子力規制庁監視情報課発行の放射能モニタリング法 No.17 連続モニタによる環境 γ 線測定法内で公式に採用された手法となっている。また、昨年度には原子力規制庁 放射線対策委託費での研究として、大規模放射線事故を想定した更なる開発も進められている。

「大規模放射線災害時においては、ヨウ素 131 のような短寿命核種を含む放射性物質による広域汚染と多数の汚染・傷病者が発生する。

(中略)

そこで、東電福島第一原子力発電所事故で実績ある KURAMA-II の技術を活用し、小型軽量で人が携行でき連続稼働時間が長くスペクトルデータの取得可能な可搬モニタリングポスト、シングルボードコンピュータベースのモバイルバッテリーで動作する超小型 KURAMA-II を開発する。同時に IoT 分野の活用と相まって技術進展の著しい LPWA (Low Power Wide Area network) による自律的に構成されるメッシュネットワークを活用したデータ通信を活用し、この研究で開発したモニタリングポストや超小型 KURAMA-II と組み合わせることで、大規模災害時の面的なモニタリング展開の困難の一つである通信手段の確保の問題の解決を図る。

(後略)」

令和元年度 原子力規制庁 放射線対策委託費(放射線安全規制研究戦略的推進事業費) 発災直後の面的な放射線モニタリング体制のための技術的研究 報告書より引用。

小型回転翼機(いわゆるドローン)(図 2.1.3.1.1)による放射線モニタリング技術開発も国内外で進められている。国内では、日本原子力研究開発機構が技術開発を進めており、ドローンに小型コンプトンカメラを搭載し、線量率分布の三次元マッピングを可能とした。日本原子力研究開発機構は、福島県の帰還困難区域において当該システム(図 2.1.3.1.2.)を用いた実証試験を行い、環境中に点在する局所的な汚染(ホットスポット)を、これまでより短時間(報告書によると、人力では半日以上必要なところを30分未満で達成)で可視化できる、とのことである。この技術は、大規模放射線事故発生時の緊急時放射線モニタリングにおいて、遠隔・無人で面的線量率測定を可能とする技術であり、大規模放射線事故時の線量評価において非常に有用な技術といえる。海外の事例ではヨーロッパ連合のプロジェクトにおいて同種の技術開発が2016

年からスタートしている(プロジェクト名: Metrology for mobile detection of ionising radiation following a nuclear or radiological incident)。このプロジェクトでも、上記と同様にドローンに放射線検出器を搭載し、線量当量率の空間分布取得技術開発を達成した。上述の国内での開発とは異なり、当該プロジェクトでの実証試験では、 ^{99m}Tc 溶液が使用されている。これは国内の病院でも核医学で使用されている核種である。大規模放射線事故の想定としては、国内外問わず、より起こりえる事象を想定した試験がなされている点は特筆すべきである。

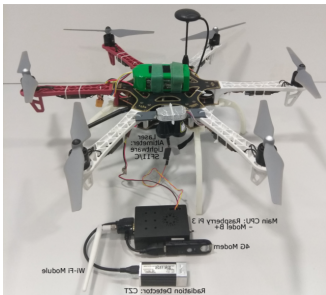


図 2.1.3.1.1. 開発されたドローン



Figure 8. RIMASpec Ground Control Station screenshot and description windows.

図 2.1.3.1.2. 大規模放射線事故時モニタリングに開発されたシステム(例)

Royo, P., et al., “An Unmanned Aircraft System to Detect a Radiological Point Source Using RIMA Software Architecture,” Remote Sens. 2018, 10, 1712; doi:10.3390/rs10111712 より引用。

現在のところ、推定された線量評価値の精度管理の課題は未解決である。職業人の外部被ばく線量モニタリングについては、品質保証制度に戻る精度管理の施策が始まったところであるが、内部被ばく線量評価についての線量評価の精度管理は

未着手である。さらに、事故時における公衆被ばくについても同様に未着手である。

(4)-② 生物学的線量評価技術の開発

生物学(細胞遺伝学)的線量評価では、二動原体染色体(Dic)法、早期染色体凝縮(PCC)法、細胞質分裂阻害微小核(CBMN)法、染色体転座法が用いられる。放射線災害発生時に用いられる生物学的線量評価法は、採血のタイミング、予想される被ばく線量、被ばく者患者数(要線量評価者数)によって異なる(図 2.1.3.1.3.)。国内では、細胞遺伝学的線量評価法におけるゴールドスタンダードである Dic 法の普及率は高く、各高度被ばく医療総合支援センターにおいて実施可能な技術である。また、JCO 臨界事故時に用いられた PCC 法は、高線量被ばく患者の線量評価に必要な技術として国内での認知度が高い。一方、細胞質分裂阻害微小核(CBMN)法の準備状況は不明である。CBMN 法は、細胞分裂を阻害する作用を有するサイトカラシン B を培養液中に添加し、二核細胞を誘導し、二核細胞あたりの微小核頻度を解析する方法であり、二動原体染色体の解析と比べ、解析が簡易である。しかし、年齢依存性の微小核頻度の増加やその頻度において性差が認められることから、二動原体染色体法に比べ、線量推定精度は劣る。国内では Dic 法に関する技術検討は実施されているものの、CBMN 法については議論されていない。また、標本作製に際し、技術的訓練を要することから、微小核の判定技術に加え、標本作製技術の研修等が必要である。

国際的に認証され、標準化されている大規模災害発生時に適用可能な細胞遺伝学的線量評価法には、Dic 法を用いたトリアージ法(50 細胞の解析:ISO 21243:2008)と CBMN 法を用いたトリアージ法(200 二核細胞:ISO 17099:2014)がある(表 2.1.3.1.1.)。ISO 17099:2014 において、CBMN 法はトリアージへの有効性が示されており、大規模放射線災害発生時の大量傷病者の解析に適している。

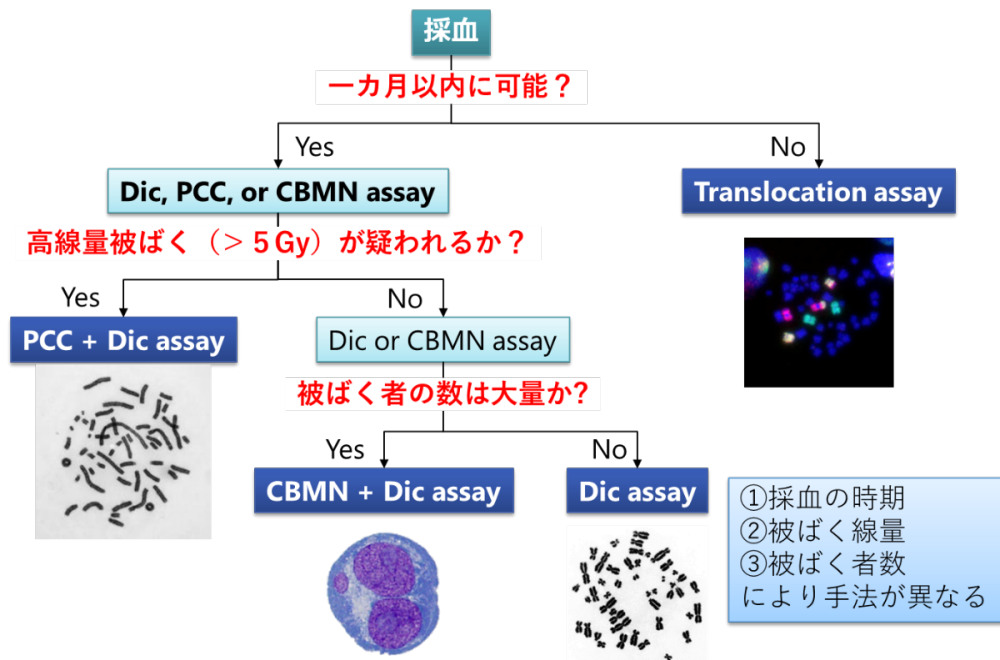


図 2.1.3.1.3. 弘前大学高度被ばく医療支援センターにおける被ばく患者発生時の細胞遺伝学的線量評価法選択フローチャート.

表 2.1.3.1.1. 国際的に認証された細胞遺伝学的線量評価法の比較

	Dic 法		CBMN 法	
	標準法	トリアージ法	標準法	トリアージ法
線量範囲	0.1~5 Gy	0.1~5 Gy	0.3~4 Gy	0.3~4 Gy
解析細胞数	1,000 個	50 個	1,000 個	200 個
ISO	19238:2014	21243:2008	17099:2014	

生物学的線量評価における課題は、血液培養時間を要することと、染色体異常解析に時間を要することが挙げられる。この課題を解決するため、市販のソフトウェアを導入可能であるが、解析精度に課題があり、運用が困難である。国際的には、大規模災害時の対応として以下の取り組みがある。特に、米国では2001年の同時多発テロを機に大規模放射線事故・核テロ、ダーティボムの脅威に対する線量評価の開発が国家的課題として挙げられ、米国とカナダの研究グループは、ハイスループットな解析法の開発に積極的に取り組んでいる。以下のその事例を列挙する。

- ・ 二動原体染色体の自動解析システム開発
- ・ 微小核解析のための自動培養解析システムの開発
- ・ イメージングサイトメーターを利用した微小核ハイスループット解析システムの開発
- ・ 微小染色体標識法による自動二動原体解析システムの開発
- ・ 大量検体培養プラットフォームの開発

一方、国内の取り組みにおいて、日本染色体ネットワーク会議では、Dic 法に関する技術マニュアルの整備が中心議題であり、大規模放射線災害発生時の生物学的線量評価の運用に関しては、議論されてこなかった。また、新規方法やシステム開発に関しては、国際的な取り組みと比較し、国内の研究開発は大きく立ち遅れている。しかしながら、その中でも以下の取り組みが行われている。

- ・ AI 技術を利用した二動原体染色体自動解析法の開発(量研機構)
- ・ 二動原体染色体解析ソフトウェアの開発(福島県立医科大学)
- ・ 自動血球分離培養システムの開発(福島県立医科大学)
- ・ 微小核解析のための細胞固定法の短縮化(弘前大学)
- ・ 微小核解析のための培養時間の短縮化(弘前大学)
- ・ 高線量被ばく患者の線量推定法の短縮化(弘前大学)
- ・ 微小核解析のハイスループット化(弘前大学:米国との共同研究)

さらに、WHO が運営する国際的生物学的線量評価ネットワーク(BioDoseNet)は、世界各国の生物学的線量評価ラボの体制や準備状況について、The 3rd WHO BioDoseNet survey(参考資料 5.4)を実施した。国内生物学的線量評価ラボの回答状況は不明であるが、本調査は 2022 年岡山理科大学を会場として開催される EPR-BioDose2022(当初は 2020 年に開催予定であったが、新型コロナウイルス感染症のパンデミックにより 2022 年に延期)において報告される予定である。国内の生物学的線量評価ラボにおいても同様の調査を実施して現状を把握するとともに、体制の強化を図る必要がある。

国内における最近の研究トレンドとして、血液および尿中代謝物を用いたハイスループットスクリーニングや遺伝子および miRNA 発現解析による線量評価への取り組みが散見される。これらの技術は、自動化およびハイスループット解析が可能な手法であり、大規模放射線災害発生時に有効な手法となることが期待される。一方で、これらの線量評価法において、線量効果曲線(検量線)を如何に作製するかという課題が払拭できていない。現在用いられている細胞遺伝学的線量評価は、個々の手法においてエンドポイントと吸収線量の間で有意な正の相関が認められており、ヒト末梢血を用いた *ex vivo* 照射モデルにより検証が可能である。そのため、国際的に個々の手法の課題解決や改良が行われ、今日に至っている。したがって、代謝物や遺伝子発現等はバイオマーカーとしては有効であるが、ドシメーターとしての実用性という点で、技術的なブレークスルーが必要であろう。

(5) 原子力防災訓練における線量評価の取り組み

原子力関連施設および半径 30km 圏(UPZ)を含む 24 道府県のほとんどで「福島事故と同規模の RI 放出を想定した原子力防災訓練」が例年開催されている。しかし、これらの訓練は、①関係者の通信訓練、②UPZ 内の住民避難訓練、③オンサイトにおける数名汚染傷病者への医療訓練、④その他、環境モニタリングや参集訓練で構成

されており、線量評価に関する内容は訓練に取り入れられていない。被ばく患者を受け入れる原子力災害拠点病院および高度被ばく医療支援センターにおける大規模放射線災害発生時の実効的な線量評価体制を整備するため、今後の原子力防災訓練において線量評価に関する訓練を組み込む必要があると思われる。この取り組みにより、上述の線量評価の依頼方法、検体受け渡し方法および線量評価報告様式に関する共通ガイドラインの作成が可能になると考えられる。

2.1.3.2 提言

(1) 現行技術で想定される大規模放射線災害への対応

現行技術を活用して実現可能な大規模放射線災害における線量評価の対応とその課題は以下のとおりである。

1. 事故現場周辺の線量評価(空間線量等)から、避難指示
【無人飛行体を用いる迅速な広域線量率モニタリング技術】
【事故発生直後からの環境中放射性物質解析】
2. 避難境界での汚染サーベイ(各立地県が策定済み)
【避難住民登録制度(追跡可能なシステム)の準備】
3. 傷病者の外傷や愁訴をもとにトリアージ(要線量評価対象者のスクリーニング)
【トリアージに対応する人材の派遣】
課題:人材が十分か疑問
【物理学的線量評価のフィードバック】
課題:トリアージを行う現場で物理学的線量評価を活用する仕組みの構築
【高線量被ばく患者は速やかに搬送し、血液検査および PCC 法による生物学的線量評価】
課題:各機関で PCC アッセイを実施できるか?
4. 要線量評価対象者の血液スクリーニング
【自動血液測定装置を用いた微量血液での血球数測定(白血球 5 分類 CRP)】
課題:血球数測定によるトリアージ法の確立
5. 要線量評価対象者の病院搬送
課題:被ばく患者の愁訴(急性症状:ARS)の把握によるトリアージが可能か?
6. 要線量評価対象者の線量評価
 - a. 物理学的線量評価
【ホールボディカウンター、甲状腺モニター、肺モニター】
【バイオアッセイ】
課題:必要な人材の確保
 - b. 生物学的線量評価
【Dic アッセイ】
課題:各センター専門家が解析を分担するシステムの構築が必要

【CBMN アッセイ】

課題: メーカーより提供されている自動解析機能の検証

各施設で CBMN アッセイが実施可能か(技術研修が必要)

必要な人材の確保が必要(特に、生物線量評価の現員は少ない)

共通プラットフォーム(画像撮影、画像ファイル形式、解析ソフト)の配備

(2) 大規模放射線災害時の線量推定に関する提言

1. 速やかな対応が必要な事項










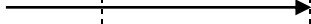
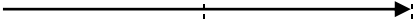

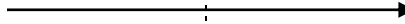
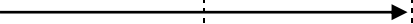



- ・ 実効性を検証するため、原子力災害訓練に組み込む(これまでの訓練には組み込まれていない)
- ・ 線量評価の依頼方法、検体受け渡し方法および線量評価報告様式に関する共通ガイドラインの作成
- ・ 実効性検証結果を踏まえた各センターの線量評価機能の拡充(人的配置を含む。基幹センターのみでは大規模災害へ対応できない。また、新型コロナウイルス感染症などのリスクを分散するためにも、各センターの機能強化が必要である。)
- ・ 共通プラットフォームの整備(これまでは、大規模災害を想定した設備整備がなされていない。分担解析や遠隔評価を可能とする設備を配備)
- ・ 人材育成(基幹センターのみならず、各センターで人材を育成し、人材交流により技術の均てん化を図る)
- ・ 線量評価分科会に専門家を加え、実効的なネットワークを構築(センター以外の専門家を加えることにより人材育成のすそ野を拡大する効果がある)
- ・ 定期的な技術研修(専門化およびラボスタッフ向け)→様々なシナリオへの対応
- ・ 海外施設への人材派遣(国外の先行事例を国内へ導入)

2. 技術開発の促進と新規開発技術の標準化

- ・ 現行技術の改良(自動化・高速化)(短期的解決)
- ・ 新規技術開発の支援(大型研究開発費の助成)
- ・ 新規開発技術の標準化(国際的に認証される必要がある)
- ・ プロトコルの共通化(技術、システム、工程)

2.1.4 提言を実現する上での課題やロードマップ

上記提言を実現する上での課題およびそのロードマップを以下に記す。

課題	2021-2023	2024-2026	2027-2030
1. 原子力災害訓練における線量評価実証試験 ①訓練シナリオ作成 【参加機関の協力が必須】 ②共通ガイドラインの作成 【ワーキンググループの立ち上げ】 ③原子力災害訓練の実施とフィードバック	  		
2. 線量評価機能の拡充 ①線量評価ラボの機能評価 【機能評価基準や評価法の検討、国際基準の調査】 ②プラットフォーム・プロトコルの共通化 ③機器類の整備 【基準の設定と予算確保】 ④人員の拡充 【人材と予算の確保】	   		
3. 実効的なネットワークを構築 ①委員構成の検討 ②各機関の連携協議 ③遠隔サポート体制の構築	  		
4. 人材育成 ①高度専門家育成研修 (量研機構で開始済み) ②拡充人材向け多機関連携検証制度の確立 ③機関間人材交流による均てん化	  		
5. 研究開発 ①現行技術の改良(自動化・高速化) ②新規技術開発 ③新規開発技術の標準化 ④プロトコルの共通化(技術、システム、工程)	   		

3. 人材育成

3.1 放射線防護人材の確保・育成に関連する取り組み

(1) 日本放射線影響学会は、これまで別組織として活動してきた「若手放射線生物学研究会」を、2020年3月に「若手部会」として当該学会に統合した。これにより、若手部会の財政的基盤が安定し、若手会員の活躍の場を広げることになると期待される。また、若手部会としての2020年度の活動として、日本放射線影響学会第63回福島大会において、シンポジウム「細胞競合で考える放射線発がん」(2020年10月15日ライブ配信)を企画・開催した。

(2) 2020年度には、若手会員が学会活動に参画し、活躍する機会を増やすために、学会内に組織されている13委員会のうち以下に挙げた9委員会に、若手部会が推薦する会員を含めて、14名の40歳未満の若手会員を委員として加えた(括弧内は若手会員数を示す)。

企画委員会(1)、学術委員会(1)、賞等選考委員会(1)、広報出版委員会(1)、倫理委員会(1)、放射線災害対応委員会(2)、グローバル化委員会(2)、キャリアパス・男女共同参画委員会(3)、放射線リスク・防護検討委員会(2)

なお、一般社団法人の社員に相当する学術評議員では、2020年度は定員35名中2名を40歳未満の若手会員が務めている。

3.2 若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップ支援に関する取り組み

3.2.1 日本放射線影響学会の取り組み

日本放射線影響学会キャリアパス・男女共同参画委員会が、日本放射線影響学会第63回大会(福島市、WEB開催)に時期を合わせて、2020年10月14日(水)に、第7回キャリアパス・男女共同参画委員会企画セミナーをオンライン開催した。本セミナーの目的は、新型コロナウイルスが猛威を振るう状況下での研究活動のあり方に関する会員間の意見交換の場の提供であり、51名の会員が参加した。参加会員の年齢が、40歳代をピークに20歳代の学生からシニア世代まで分布しており、この中でいくつかのグループに分かれて、グループディスカッションが行われた。開催後のアンケート調査において、グループディスカッションにおけるポスト開拓の話題やキャリアパスについての中堅やシニア研究者による経験談やアドバイスが大変参考になったとの若手会員からの回答がかなりあり、好評であった。このことは、本企画が若手会員とシニア研究者との「交流の場」の場を提供する良い機会になったことを示している。アンケート結果をみると、若手会員とシニア会員との意見交換の場を設けて欲しいとの要望が多く寄せられており、今後も若手と中堅会員との交流の場を設ける企画が望まれる。

3.2.2 Webによる進路等個別相談会への参加

若手会員に情報提供を行ったが、相談はなかった。キャリアアップに関する相談は、相談者の個人情報に関わる内容が含まれる可能性があり、その点で気軽にできる相談ではないことが障壁になっているように推察される。

4. 特記事項

4.1. 放射線防護アカデミアが提案した重点テーマに関する取り組み

放射線防護アカデミアが提案した重点テーマに深く関連して日本放射線影響学会が主導的に取り組んでいる課題は、「低濃度トリチウム水による内部被ばく影響に関する調査研究」である。当該学会の放射線災害対応委員会は、トリチウムに関する健康影響に関する知見を、「トリチウムによる健康影響」として総説(邦文)にまとめ、2019年5月に当学会ホームページに掲載した。

(https://www.jrrs.org/assets/file/tritium_20191111.pdf)

さらに、トリチウムの健康影響に関するテーマは、“Health effects triggered by tritium: how do we get public understanding based on scientifically supported evidence?”というタイトルの英文総説にまとめ、現在、Journal of Radiation Researchに投稿中である。

4.2 その他

2020年度の本事業による出版物は以下の通りである。

- 1) 日本保健物理学会・日本放射線影響学会、低線量リスクに関するコンセンサスと課題、放射線生物研究、Vol. 55, No. 2, 85-172(2020)
- 2) Wang, B., Yasuda, H. Relative biological effectiveness of high LET particles on the reproductive system and fetal development, Life, Vol.10, No. 11, 298 (2020)

5. 参考資料

5.1 被ばく医療における線量評価に関する調査(アンケート用紙)

5.2 被ばく医療における線量評価に関する調査(アンケート回答)

5.3 線量評価手法に関する動向調査結果

5.4 The 3rd WHO BioDoseNet survey

令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(放射線防護研究分野における
課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成)

放射線防護対策の推進に関する調査と提言

令和2年2月

日本放射線安全管理学会

目次

1. 放射線防護に係る海外の最新知見の収集	
1.1 海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集	2
1.1.1 テーマを選んだ経緯や背景	
1.1.2 最新知見の収集方法	
1.1.3 得られた知見と考察	
2. 国内の放射線規制の課題に関する調査・提言	
2.1 国内の放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言	12
2.1.1 テーマを選んだ経緯や背景	
2.1.2 調査や提言取りまとめの実施方法	
2.1.3 調査結果および提言	
2.1.4 提言を実現する上での課題やロードマップ	
3. 人材育成	
3.1 放射線防護人材の確保・育成に関連する取り組み	16
3.1.1 日本放射線安全管理学会の現状報告	
3.1.2 若手奨励金事業	
3.2 若手のポストマッチングや中堅のキャリアアップ支援に関する取り組み	16
3.2.1 第19回日本放射線安全管理学会学術大会における若手セッション	
3.2.2 Webによる進路等個別相談会への参加	
4. 特記事項	
4.1 放射線防護アカデミアが提案した重点テーマに関する取り組み	18
4.2 その他	18
5. 参考資料	20

1. 放射線防護に係る海外の最新知見の収集

1.1 海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集

1.1.1 テーマを選んだ経緯や背景

放射線や放射性物質の不適切な取り扱い、あるいは放射線関連施設管理に関する事故等は、海外においても毎年のように報告されており、中には計画外被ばくを伴う事象も散見される。これらの事故に関する報告の中には、我が国における放射線規制行政の充実向上を目指す上で参照すべき情報も含まれるものと思われる。これまでも海外における放射線関連事故の実態調査が実施されているが¹⁻³⁾、最近の事故事例に関してまとまった調査資料は知られていない。そこで、海外における近年の放射線関連事故事例の情報を収集し、我が国における放射線安全管理や放射線規制行政に有益な情報を抽出して分析、その分析結果を共有することを念頭に当該テーマを選択することとした。

1.1.2 最新知見の収集方法

日本放射線安全管理学会では、令和2年度に原子力規制庁の放射線安全規制研究戦略的推進事業の一部を成す「放射線影響分野における放射線防護対策の推進に関する調査と提言ならびに放射線防護人材の確保・育成に関連する業務」の業務の一部を請け負い、その業務を円滑に遂行することを目的として、学会内に「放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG」と「放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言WG」の2つの小委員会を設け、関連する知見の効率的な収集に取り組んだ。このうち「放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG」では、2000年以降に各国の研究機関や医療施設、産業関連施設などの放射線施設内外で発生した、国際原子力・放射線事象尺度（INES:The International Nuclear and Radiological Event Scale）レベル2以上の放射線安全管理関連事故について、その経緯や事故原因の概要等について調査し、さらに一部の事例については事故の収束に向けた対応等についても情報収集を実施した（核燃関連の事故等については当学会が扱う規制研究の範疇にはないため調査の対象から除くこととした）。

尚、本調査研究は同WGの委員4名が主体となって実施し、必要に応じて外部の意見等を求めた。当該作業を担当したWG委員を表1に示す。

表1. 「放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG」委員名、所属及び主たる担当

委員名	所属	主たる担当
保田 浩志	広島大学	線量・リスク評価関連
山口 一郎	国立保健医療科学院	医療用放射線関連
佐瀬 卓也	核融合科学研究所	紛失密封線源関連
角山 雄一	京都大学	RI 飛散事故関連、総括

- 1) UNSCEAR2008 年報告, 第 2 卷, 附属書 C 「事故における放射線被ばく」
- 2) JERI-Data/Code 98-023 「国際原子力事象尺度 (INES) に基づく事故・故障事例集：和訳版」 1998 年 9 月, 日本原子力研究所
- 3) 平成 19 年内閣府委託事業 「放射性物質の輸送に関する実態及び放射線源に関する事故事象の調査」 別冊 「放射性物質及び放射線の関係する事故・トラブル 国内・海外事例データベース」, 原子力安全技術センター

1.1.3 得られた知見と考察

1.1.3.1 2000 年以降における INES 報告の概要

まずは、海外における近年の放射線関連事故について、その傾向と概要を把握するための情報収集を実施した。INES レベル 2 以上を該当する国際的な放射線関連事故の情報は、国際原子力機関がインターネット上で公開しており、その情報は常に更新されている

(<https://www-news.iaea.org/Default.aspx>)。しかし、このサイトに掲載される情報は直近 1 年間にに関するものまでであり、それ以前の情報については非公開である。そこで、オランダの LAKA (LAndelijk Kernenergie Archief) 財団が公開するデータベース

(<https://www.laka.org/docu/ines/>) から 2000 年以降に発生した事故に関する情報を網羅的に抽出することとした。その結果、欧州や北米からの報告が大半を占め (図 1)、その多くが INES レベル 2 であること (図 1, 2)、また地域に関わらず「異常被ばく」に関する事故報告が多数を占めていること (図 3) などが読み取れた。また、各事故事例について調査すると以下の 4 つの課題があることが明らかとなった。

1. 線量・リスク評価に関する課題
2. IVR 従事者の線量限度を超える放射線曝露に関する課題
3. 紛失密封線源による被ばく事故に関する課題
4. 作業中の非密封飛散事故に関する課題

これら 4 課題については、各 WG 委員が担当し (表 1)、さらなる調査を実施した。その結果については後述する。

		2020年12月4日時点							
INES		0	1	2	3	4	5	7	total
欧州	核燃	9	25	48	2				84
	FI	5	68	68	9	2			152
北米	核燃	8	4	8	2				22
	FI	4	18	89	4				115
南米	核燃	4	2	1					7
	FI	6	3	4					13
アフリカ	核燃			1					1
	FI			1		1			2
オセアニア	核燃			1					1
	FI			2	2				4
アジア (日本以外)	核燃	3	8	7					18
	FI	4	14	15	4	1			38
アジア (日本)	核燃 ^{*1}	2		2	6		3	1	14
	FI		1	1					2
total		45	143	248	29	4	3	1	473

*1: 日本の核燃関連INES3以上は、すべて東京電力福島第一・第二原子力発電所事故に關する報告
データ引用元: IAEA-database of nuclear and radiological incidents, the Laka Foundation, Netherland (https://www.laka.org/docu/ines/)

図1: 2000年以降における INES 報告件数 (核燃・RI 関連/地域別)

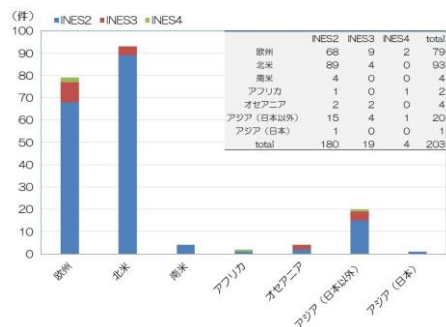


図2: RI 関連施設・INES レベル2以上の事故報告件数 (地域別)

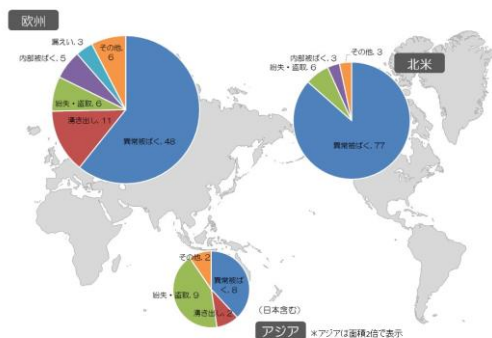


図3: RI 関連施設・INES レベル2以上の事故の報告件数 (種類別)

1.1.3.2 線量・リスク評価に関する課題

海外での放射線被ばく事故において、発生当初に被ばく線量やリスクを過少に評価していたケースは少なくない。初期に当時者を診た医師が、放射線被ばくの可能性に気づかず、将来発現する健康影響を予測できず適切な医学的処置がなされなかったケースも散見される。例えば、1987年9月にブラジル国ゴイアニア市で発生した¹³⁷Cs線源による被ばく事故 (INES レベル: 5) では、被ばく後に体調に異常を感じて来院した人たちを診断した現地の医師は、それをアレルギー反応等と診断して対処していた。当該事故では、それらの症状が放射線被ばくであることが判明するまでに2週間以上を要し、その間に汚染が拡大して被害が増大した (IAEA, 1988)。また、1999年2月にペルー国ヤナンゴ市で発生した¹⁹²Ir線源による被ばく事故 (INES レベル: 3) では、最初に被ばく者を診察した現地の医師は、それを虫刺され (insect bite) と診断した (IAEA, 2000)。当然ながら、被ばくの実態が認識されなければ、被ばく線量の評価は行われず、その間に線量の再構築に有用な情報が失われていき、被ばくの実態を正確に把握することが難しくなっていく。

そこで、規制行政に有益な知見を提供していると思われる最近の施設内被ばく事象

として、2017年にオーストラリア国で発生した品質管理分析者の手の被ばく事象について取り上げ、そこから学べる教訓を抽出した。2017年8月22日、オーストラリア国の原子力科学技術機構（Australian Nuclear Science and Technology Organisation: ANSTO）傘下の組織「ANSTO Health」の品質管理の分析者（以下「作業員」という）が、日常的な品質管理手順中に皮膚を⁹⁹Moで被ばくする事象（INES 3）が発生した。この事故では、作業員が定められた手順に従って⁹⁹Mo（4.5 GBq、0.6 ml）を含む溶液が入ったバイアルの圧着シールを外そうとしたところ、誤って落下させ、溶液が飛散したことによって、手の部位が汚染され被ばくを受けたものである。このとき作業員は二重の手袋をしていたが、手袋のみならず手も汚染していた。この事象の発生を受けてANSTOが行った初期の線量評価では、作業員の手の被ばく線量は等価線量で0.85 Svと算出された。これは皮膚への法定等価線量限度（0.5 Sv/年）を超えるレベルであったが、皮膚の確定的影響（紅斑や潰瘍等）のしきい線量を超えるものではなかった。しかし、被ばくから2週間以上経って、作業員の手に紅斑と水泡の発生が認められ、先述の線量評価レベルとの矛盾が生じた。その後、作業員の手に観察された組織反応の状態に係る医学的観察結果等に基づいて、ANSTOにより再度線量が評価され、被ばくした組織の等価線量は10～20 Sv（皮膚への法定年間等価線量限度の約20～40倍）に相当すると評価された。オーストラリア放射線防護・原子力安全庁（ARPANSA）は、規制当局として、ANSTOから提出された報告内容を精査するとともに、独自に調査を実施して、被ばくの状況や放射線障害の症状等から、作業員の被ばくした部位における等価線量は～20Svと評価することが妥当であると結論付けるとともに、これをINESのレベル3（重大な異常事象）として分類した（ARPANSA, 2021）。一方、ARPANSAは当該被ばく事象の背景にある人的および組織的要因についても分析・特定し、ANSTOに対して、事故現場が適切に保存されておらず個人用防護具の汚染レベルに関する重要な情報が収集されていなかったこと、又、被ばくのリスクが事業者によって十分に理解されておらず適切な対応（線量評価のシステム、被ばく低減策の準備、作業員の教育訓練、ニアミス学習等）が採られていなかったこと等を指摘し、それらに係る指導を行った。

上記のANSTOで起きた事象から得られる主な教訓として、以下の3点を挙げる事ができると考える。

1. 身体のごく一部（四肢や臀部など）が高い線量を受けた場合、等価線量（組織に付与されたエネルギーを組織全体の重量で平均化した量を放射線加重係数で補正）を用いると、対象とする組織の体積を広く取れば線量値が小さくなることから、一部の組織の線量レベルを過小に評価する恐れがある。局所的な被ばくに対しては、被ばくした身体部位の吸収線量の分布をできるだけ正確に把握して、リスク（将来起こり得る炎症や壊死などの確定的影響の程度）の予測評価に供することが肝要である。
2. 局所的な被ばくが生じた（恐れがある）場合には、痛みや嘔吐などの前駆症状が明確に現れない場合もあり、相当の経験がある医師であっても初期の診断でそのリス

クを見過ごす可能性がある。こうした場合には、患者の行動や周囲の状況に関する情報を広範に収集して放射線被ばくの可能性を確認し、それに応じた医学的処置（感染症予防や組織移植の準備等）を判断することが望まれる。

3. 被ばく事象の発生後、時間が経つにつれ、被ばく状況の検証に要する情報が失われ、線量の再構築が正確に行えなくなる。この問題を防ぐには、事象が発生した時点で、線量評価に有用な情報（現場の写真、モニタリングデータ、関係者の供述／行動記録、衣類や爪など遡及的な線量推定に役立つ試料等）をできるだけ詳しく収集・保存し、規制当局や独立した専門機関による遡及的な検証を容易に行えるようにしておく必要がある。

参考文献（線量評価関連）

- 1) International Atomic Energy Agency (IAEA). The Radiological Accident in Goiania. STU/PUB/815, 1988, IAEA, Vienna.
- 2) International Atomic Energy Agency (IAEA). The Radiological Accident in Yanango. STU/PUB/1101, 2000, IAEA, Vienna.
- 3) Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA). Report to Parliament - Radiation exposure of a worker at ANSTO Health, Lucas Heights on 22 August 2017. <https://www.arpansa.gov.au/about-us/corporate-publications/reports-parliament/report-parliament-radiation-exposure-worker-ansto> (accessed on 5 February 2021)

1.1.3.3 IVR 従事者の線量限度を超える放射線曝露に関する課題

海外では、IVR 従事者の医療従事者の異常被ばくの報告が INES を利用してなされている（表 2）。一方、国内では、個人線量測定協議会のデータでは年間の実効線量が 50 mSv を超えた労働者がいることが、毎年、示されている。例えば平成 29 年度は 9 名で内訳は一般医療 8 名、獣医療 1 名となっている。皮膚等価線量限度を超えた労働者数は、個人線量測定協議会では公表していないが、長瀬ランダウア社によると令和元年度に皮膚等価線量が 500 mSv を超えた労働者は 4 名で全て医療従事者となっている。また、引き下げ前の眼の水晶体の等価線量限度である年間 150 mSv を超える労働者が厚労省の検討会での資料では平成 29 年度には 7 名おり、うち 6 名は医療従事者である¹⁾。RI 規制法施行規則第 39 条第 1 項で規定されている報告義務のある計画外被ばくは、2020 年度に医療機関から報告があったが²⁾ IVR の事例ではなく、このような事例は本制度の対象外と考えられるものの電離則第 44 条により事業主は、放射線業務従事者が受ける線量が線量限度を超えたときはその旨を所轄労働基準監督署長に報告しなければならないが、この制度により報告された線量限度を超えた労働者に関する発表はなく、INES への通報事例も、2021 年 1 月現在公表されていない。

表 2. 海外で報告された事例のうち該当する事故

INES	国	場所	事象発生日	事象名
2	英国	ウェールズにある医療機関	2019年12月31日	IVR従事者における水晶体過剰被ばく
2	フランス	サン・ドニにあるドラフォンテーヌ病院	2017年10月20日	IVR従事者における皮膚過剰被ばく

1.1.3.3.1 それぞれの事例の詳細

◎事例 1：UK, 2019 IVR 従事者における水晶体過剰被ばく

管理システムの不具合、個人用防護具（PPE）の誤用、水晶体の等価線量を測定することに適さない線量計の使用など、いくつかの不具合が確認された。水晶体における等価線量は推定 25.8 mSv とされている（欧州連合は、欧州 BSS の法制化を加盟国に求めており、IAEA の GSR part3 の該当事項が法的拘束力を持つ）。線量の推定は、従事者の PPE 使用の記憶に基づき現実的な仮定で実施された。この事例は英国の安全衛生行政機関によって調査され、現在は不起訴の決定を受けて事件としての扱いは終了している。また、日本でも経済的な検討が検討会で示されたが³⁾、英国では規制整備に向けた規制影響分析がなされていた⁴⁾。なお、日本では個人線量測定が未実施だとして書類送検事例がある（限度を超えとそうではない事例に対して）^{5,6)}。なお、医療で用いる X 線はエネルギーが低いので素子の装着法によっては、人体での X 線の減弱により線量を過小評価することが考えられる⁷⁾。このため、測定会社から注意が促されているが⁸⁾、線源利用時にも、線源からの距離が遠くなるために、手背側に装着した素子は手掌側の線量を過小評価する。また日本では指輪タイプの素子は商業サービスではフリーサイズのみとなっており、指が細い労働者では線量が過小評価される可能性がある⁹⁾。

◎事例 2：フランス, 2017 IVR 従事者における皮膚過剰被ばく

2017 年の第 1 四半期に、放射線科医の手の被ばくが年間の等価線量限度（500mSv）を超過した。2018 年 1 月 24 日、フランス原子力安全局 (ASN) はこの事例を検査した。環境法第 125 条の 13 の透明性確保と情報公開の考え方に基づき、検査報告書は ASN のウェブサイトに掲載されている。この検査報告書は詳細なもので参考になる。なお、ASN は、すべての利害関係者 (AFIB、AFPPE、G4、SFPM、SNITEM、ANSM) と協力して、2016 年 6 月 13 日に、線量最適化機能をよりよく利用できるように、新しい機器を設置する際にオペレータに提供される訓練を強化することを目的とした勧告を発表している。

1.1.3.3.2 国内の事例との比較

個人線量測定協議会などのデータから日本でも線量限度を超過している事例があると考えられるが、線量限度超が判明した事例は労災申請がなされたものか勤務時間管理などの

問題での立入時の判明に限られており、データ間で事実関係の乖離がある。線量限度超の事例に対する調査報告書は日本では公開されていない。関係学会での取り組みは日本でも進められており¹⁰⁾、行政機関により事業所への幅広い援助もなされている¹¹⁻¹⁴⁾

1.1.3.3.3 検討から得られた提言

- リスクに応じた管理が行えるように IAEA GSR part3 の段階的な放射線管理を規制に導入する。
 - 規制影響分析を行い規制整備に役立てる。
- 各事業所は電離則第 44 条を遵守する。
- 行政機関は、電離則第 44 条に基づき報告された事例を集計して INES 通報し、公開する。
- 報告された事例に対して、関係機関が協力して、当該事業所の背景も踏まえて解決の援助を行う。

- 1) <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000477102.pdf>
- 2) https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku_new/220000042.html
- 3) <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000477111.pdf>
- 4) <https://www.hse.gov.uk>
- 5) <https://www.rodco.co.jp/news/81887/>
- 6) <https://www.rodco.co.jp/news/66845/>
- 7) https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/wpcontent/uploads/2010/04/niph_yamaguchi.pdf
- 8) 『ガラスリングは、放射線を手の甲側から受ける場合は手の甲側にラベルを向け、手の平側から受ける場合は手の平側にラベルを向けてください。』 http://www.c-technol.co.jp/monitoring/pdf/pdf_all.pdf
- 9) https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/images/dental/5-7NIPH_dental2020.pdf
- 10) <https://www.kyoto-msc.jp/news/suishoutai2020/>
- 11) <https://ms.nustec.org/>
- 12) <https://tgn-hojokin.nustec.org/>
- 13) <https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/000622433.pdf>
- 14) https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudouki_jun_anzen/0000186714_00003.html

1.1.3.4 紛失密封線源による被ばく事故に関する課題

海外では ^{192}Ir 線源による異常事象または事故が度々発生している（表3）。また、我が国においても INES 導入以前の 1971 年に非破壊検査装置からの ^{192}Ir 線源の脱落による比較的重大な被ばく事象が発生している。

表3. Ir-192 線源による異常事象または事故の事例（INES 3 以上）

年	国	概要	INES
2019	スイス	造船所で使用していた非破壊検査用の線源が脱落し、知らずに拾った作業員と同僚の計6名が外部被ばく。線源に直接接触した者が放射線熱傷を発症した。	3相当
2000	エジプト	40Ci の線源が紛失し、その後に民家で発見される。少なくとも7名が被ばくし、うち2名が死亡した。	4
2014	ペルー	脱落によってガイドチューブ先端に引っかかっていた線源に気づかず、3名の作業員が被ばく。作業員1名の股関節に発赤。推定全身被ばく線量 0.5Gy 未満。	3
2015	イラン	格納ミスによってガイドチューブ内に残った線源を気づかず自動車内に放置、2名が車内にて長時間の被ばく。推定全身被ばく線量 1.6~3.4Gy。	3
2018	イラン	脱落によってガイドチューブ内に残った線源に気づかず、2名の作業員が被ばく。手指の局所放射線障害が発生した。推定全身被ばく線量 0.3~0.4Gy。	3

これら殆どの事例は、作業後のサーベイを確実に行っていけば防げた事象であった。また多くの事例で個人被ばく線量計の未装着がみられ、被ばく線量の正確な評価に手間を要した。高線量の密封線源の使用に際しては、これらについて徹底することが必須であることがあらためて示唆された。

1.1.3.5 作業中の非密封 RI 飛散事故に関する課題

作業者が不安全な操作により飛散した RI 溶液等を被り目や手などを汚染させる事故が世界でも散発的に発生している（表4）。非密封 RI を取り扱う作業に従事する現場において、今後、参考となる対策等がないか調査した。

表 4. 作業中の非密封 RI 飛散事故例

INES	国	場所	事象発生日	事象名
2	スイス	病院の薬剤部	2019年6月21日	Ga-68溶液の飛沫による眼の汚染
2	オーストラリア	オーストラリア原子力科学技術機構	2017年8月22日	品質管理分析者（QC Analyst）の手の被ばく

1. 1. 3. 5. 1 各事例の詳細と事故後に提示された原因と対策

◎事例 1：スイス，2019 Ga-68 溶液による眼の汚染

放射性薬剤を取扱う従事者が、ドラフト内で品質管理のため 700 MBq の Ga-68 溶液を含む密閉バイアルからサンプルを取り出す操作を行っていた。バイアルの開口部を注射器で突き刺したところ、液滴が飛び散り右目を汚染した。作業員は保護眼鏡をかけていなかった。作業終了 8 分後に目に布をあててから流水で洗眼した。放射線防護担当者が測定を行ったが少量の汚染が検出されたため追加洗浄。眼の水晶体の等価線量は 27 mSv と計算された（スイスの線量限度を各年度に単純に割り当てた場合の年間割当値となる 20 mSv を超える）。作業員はその後 2 週間以内に眼科医の診察を受けた。右眼の角膜に軽度のびらんを伴う炎症が認められ人工涙液の定期的な塗布が処方された。なお、4 日後の再検査ではこれらの病変の大部分は寛解しており追加のケアやフォローアップは必要ないとの結論に至った。事故後、再発防止のため以下の対策を講じた。：①保護眼鏡の着用を徹底する。②早急な除染を徹底する。③ドラフト内の鉛シールドを人間工学に基づいて調整する。

◎事例 2：オーストラリア，2017 品質管理分析者（QC Analyst）の手の被ばく

本事例は 1. 1. 3. 2 「線量・リスク評価に関する課題」でも取り上げた。事故の経緯についてはそちらを参照のこと。事故後の報告書には、発生原因について、①軽微なトラブルやヒヤリハット事例から効果的に学ぶ仕組みが組織に欠如していた。②作業員の事故時のリスクに関する認識が不十分であった。③当該研究所のマニュアル等において、作業に危険性に対する注意喚起が記載されていなかった。④作業の安全性に関する訓練は、訓練者の指導能力に過度に依存しており、また訓練の有効性についての検証はなされていなかった。等の分析がなされている。また、中長期的な再発防止策として、①リスク低減のため、従来の作業員の手動による作業を自動化するなど、品質管理工程の見直しを行う。②品質管理サンプル中の放射性物質濃度を低くする。等が提示されている。

以上の事例を俯瞰すると、その発生原因は凡そ共通しており、

- 1) 作業員が作業中に発生し得るリスクを十分に認知していなかった。
- 2) 事故が発生する可能性について施設全体として情報を共有しておらず、何ら対策をとっていなかった。

の二点に集約される。事故前にも軽微なトラブルやヒヤリハットが発生しており、飛散や落下等の可能性がありえることが事前に十分想定できたはずである。にもかかわらず作業への慣れ等から作業環境の改善やマニュアルの整備等を怠っていた。

我が国においても常に同様の事故が発生する可能性がある。ヒヤリハット事例から学び、定期的に安全管理体制を更新し続けるなど、いわゆる PDCA の徹底が必須である。

2. 国内の放射線規制の課題に関する調査・提言集

2.1 国内の放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言

2.1.1 テーマを選んだ経緯や背景

1.1.2に述べたように、学会内に「放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG」と「放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言WG」が設立された。このうち、「放射線事故が発生した際の放射線施設の緊急時対応の調査と提言WG」では、原子力規制庁が事業者からの国内の法令報告事象の情報をwebサイトで公開していることから、この事例から原因や対処における問題点を明らかにし、各事業所の放射線障害予防規程や緊急時対応マニュアルに、事態を想定した対応を予め準備するよう提言をまとめることを目的とした。

2.1.2 調査や提言取りまとめの実施方法

委員の構成は、以下の通りである。

WG長：桧垣 正吾（東京大学アイソトープ総合センター）

委員：久下 裕司（北海道大学アイソトープ総合センター）、志水 陽一（京都大学医学部附属病院）、富田 悟（東京工業大学放射線総合センター）、廣井 朋子（聖マリアンナ医科大学大学院アイソトープ研究施設）、古澤 哲（東京ニュークリア・サービス株式会社）

WGでは、以下の方針で調査活動を行った。

1. 原子力規制庁webサイトに公開されている法令報告事象に該当する事故トラブル情報、また危険時の措置の届出のうち、2013年4月から2020年11月までの29件について、事業者の報告書を精査し、事故の原因や対応に関する問題点を抽出した。
2. 法令報告事象に該当する事象を、以下のように「予防できそうなもの」、「予防できないもの」に分類した。
「予防できそうなもの」計画外被ばく、所在不明、漏水、汚染の拡大を含む漏洩
「予防できないもの」悪意のある盗取、墜落による所在不明、線源製造上の不具合を含む漏洩、火災
3. 事故トラブル等29件のうち、4件の事例から抽出した問題点8点を、WG委員が所属する放射線施設で事前に整備されている放射線障害予防規程や緊急時対応マニュアルのままで、「予防できそうなもの」について予防方法は十分か、「予防できないもの」について問題なく対処することは可能かを確認した。また、WG委員だけではなく、会員有志の協力を募るため、アンケート調査を行った。
4. 予防方法が十分ではない、あるいは対処に問題があるとの回答が多い事項は、同じ事象が起こった際に不十分な対応となる可能性が高いことを意味する。そのため、放射線障害予防規程や緊急時対応マニュアルに、事態を想定した対応を予め準備するようWGで提言をまとめた。

2.1.3 調査結果および提言

調査に使用した4件の事例の概要および抽出した問題点8点を以下に示す。

1. 非密封 RI の所在不明 (2017年12月21日発生、企業)

概要：滅菌処理後、保管廃棄するまでの間に、保管中の ^{14}C 投与動物死体を紛失（おそらく他の動物サンプルと共に処理された）。

問題点①：保管中の動物死体および動物乾燥用金属カゴを定期的に在庫確認する仕組みがなく、RI管理上、使用中である動物死体を一時的に冷凍庫へ保管あるいは冷凍庫から持ち出す際に、記録を残していなかった。

2. 表示付認証機器の所在不明 (2019年12月16日発生、企業)

概要：照射線量率標準ガンマ線源 ^{137}Cs の所在不明。

問題点②：管理手順書がない、出入庫の記録がホワイトボードへのメモ程度しかなく、装備機器の説明書にあった専用容器への収納、施錠付き金庫への収納が行われていなかった。

3. 破損（経年劣化）による漏洩 (2013年10月29日発生、大学)

概要：保管していたトリチウム密封線源から汚染が拡大した。

問題点③：古い線源から経年劣化によりトリチウムを含む金属が剥落、あるいは、吸蔵合金から常温でのゆっくりしたガス状トリチウムの放出があったため、線源に対する情報の不足と認識の誤りがあった。また、密封線源から汚染が発生すること自体が異常事態であったが、密封線源施設、通報判断基準に対する認識の誤りがあり、異常事象に対する行動基準が整備されていなかった。

4. 火災 (2016年7月1日発生、大学病院)

概要は省略。

問題点④：すぐに正しい線量率を測定できるか。

(注) 消防は、高い線量を想定して電離箱式サーベイメータを持参することがある。ただ、線量が低い場合 ($1\mu\text{Sv/h}$ 未満) には有意な値が計測されない。この例では $0.5\mu\text{Sv/h}$ が計測された。有意な値ではないが、数字だけ見るとバックグラウンドレベルの10倍の線量があるように見え、正しくない数字だけが一人歩きし、混乱をもたらす可能性がある。

問題点⑤：非密封 RI 使用記録の作成は本当にいつも十分なされているか。

(注) 使用記録と、実際の使用との不整合があった。

問題点⑥：すぐに情報公開ができる体制にあるか。

(注) 使用していた核種・数量の把握ができず情報公開が遅れた。その結果、規制庁への通報・近隣住民への説明（情報公開）が遅れた。

問題点⑦：管理組織体制は適切か。

(注) 火災があった施設の場合、建屋の管理、RI室管理、放射線取扱主任者の部局がバラバラであったため、緊急時に情報共有が遅れ組織としての対応が難しかった。

問題点⑧：放射線取扱主任者の代理者は設定されており、連絡体制が整っているか。

(注) 火災時、主任者は短期出張のため不在で、代替りの対応者が決められていなかったため、規制庁への連絡が遅れた経緯がある。

委員および会員有志の施設における取りまとめ結果を以下の表に示す。

表 委員および会員有志の施設における取りまとめ

	①投与動物の使用記録	②表示付認証機器の使用記録	③密封線源に対する認識	④線量率測定	⑤使用記録	⑥情報公開	⑦管理体制	⑧主任者の代理者
対応できる	5	7	7	11	11	9	11	11
どちらとも言えない	3	2	4	3	3	3	2	3
対応できない	2	3	3	1	1	3	1	1
該当しない	6	4	2	-	-	-	-	-
対応できる割合(%)	50	58	50	73	73	60	79	73

上記の結果より、対応できるとの回答の割合が低かった点、すなわち、放射線障害予防規程や緊急時対応マニュアルに、事態を想定した対応を準備するよう提言すべき項目を順に示す。

①投与動物の使用記録

③密封線源に対する認識

②表示付認証機器の使用記録

⑥情報公開

具体的な提言は以下の通りとなる。

1. 非密封 RI では、その全ての使用を追うために適切な記録が残されているか、盲点となっている取り扱いはないか、記録を付けるユーザーに周知が徹底されているか、を確認することが必要である。
2. 密封線源では、線源の健全性が保たれなくなったことによる汚染拡大が起りうる。定期的に漏洩の有無を確認することが必要である。また、発生した場合の対処について通報判断基準を含めて定めておく必要がある。