

【仮訳】放射線防護体系を支援するための研究分野
Areas of research to support the system of radiological protection

D. Laurier, W. Rühm, F. Paquet, K. Applegate, D. Cool, C. Clement on behalf of the
International Commission on Radiological Protection (ICRP)
Radiation and Environmental Biophysics, <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00947-1>
Received: 2 September 2021 / Accepted: 5 October 2021 © The Author(s) 2021

この日本語仮訳は、ICRP の公式的な翻訳ではありません。そのため、ICRP 及び一般社団法人日本保健物理学会はその正確性を保証するものではなく、またその解釈や使用がもたらすいかなる結果についても、一切責任を負いません。

なお仮訳を公開するにあたり CC BY 4.0 のライセンスに準拠していることを確認済みです。詳細は以下をご覧ください。

Rights and permissions

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

概要

本文書は、2017年に発表された「放射線防護体系を支援するための研究分野」に関するICRPの最新ビジョンを示したものである。これは、他の関連する国際機関が推進する研究の優先順位を補完することを目的としており、放射線防護体系の進化の観点からそれらを配置することに特化している。本文書は、ICRP Publication 103の2007年基本勧告を更新する放射線防護体系の見直しと改訂のためにICRPが開始したプロセスに貢献するものである。

キーワード 放射線防護 ・ 放射線影響 ・ 線量測定

緒論

2011年以降、国際放射線防護委員会（ICRP）は、その戦略計画に「放射線防護を支えるために必要な研究を特定し、奨励する」という優先事項を盛り込んでいる。この優先事項は、戦略計画が「ICRP Strategic Priorities 2020-2024」として改訂され、2020年にオンラインで公開された際にも改めて示された（ICRP 2020b）。

本文書は、「放射線防護体系を支える研究分野」に関するICRPのビジョンを示したものである。2017年に発表された前バージョンを更新している（ICRP 2017c）。研究ニーズは、放射線リスク評価を支援するための研究、線量評価を支援するための研究、放射線防護体系の適用・実施を支援するための研究の3つの主要分野に分類されている。それぞれの分野では、短期・中期的に必要な研究（ICRPの次期基本勧告を支援するための研究）と、長期的に必要な研究（10年を超える研究）が区別されている。

放射線リスク評価を支援する研究

短期・中期の研究

放射線健康影響の分類

電離放射線の人体への影響は、ICRP Publication 103 (ICRP 2007)に記載されているように、現在、「組織反応」と「確率的影響」と呼ばれる2つの大きなカテゴリーに分類されている。放射線防護体系の目的は、組織反応を防止し、確率的影響のリスクを合理的に達成可能な限度に制限することである。しかし、放射線による健康への影響に関する知識の進化に伴い、この単純な分類も、最新の科学的研究結果に基づいて再考する必要があるかもしれない。

組織反応のより良い特徴付け

組織反応とは、放射線被ばく後に正常な細胞の集団が傷害されることによって起こる。組織反応の特徴は、しきい値となる線量があり、さらに線量が増すほど反応の重篤度が増すことである。2012年、ICRPはPublication 118 (ICRP 2012)において組織反応に関するレビューを行った。現在、組織反応には様々な疾患が含まれており、高線量被ばく後に短期的に

発生する放射線に特異的なものと、被ばく後数年から数十年後に観察される非特異的なもの（循環器系の疾患など）がある。放射線被ばくが組織に及ぼす影響について、放射線治療やインターベンション治療で得られた経験をよりよく集約する必要がある。組織の応答、その個人間の差異、および線量と影響の発生確率や重篤度との関係をよりよく理解するためには、さらなる研究が必要であり、これらはしきい線量の決定の基礎となる。

確率的影響と放射線デトリメント

電離放射線の確率的影響には、がんと遺伝性影響がある。放射線デトリメントは、人間集団への低レベル放射線被ばくによる有害な確率的影響を定量化するために用いられる概念である。この概念は、放射線被ばく後の疾患の発生確率を考慮し、致死率、生活の質、失われた人生の年数などの観点からその重大性を考慮して、すべての確率的影響を統合することを目的としている。放射線デトリメントの概念は、ICRP により Publication 60 (ICRP 1991)で導入され、Publication 103 (ICRP 2007)でより強固なものにされている。この20年間に、科学技術の進歩により、新たな結果や知見が得られたため、デトリメントの更新が必要となり、特に以下の点を支持する継続的な研究の必要性が強調されている。

● がんリスクモデルと組織加重係数

すべてのがんおよびいくつかの特定のがん部位について、約 100mGy 以下の線量レベルでの線量-リスク関係を示す疫学研究からの証拠が増えている（例えば Grant et al. 2017; Richardson et al. 2015; Little et al. 2017; Lubin et al. 2017; Hauptmann et al. 2020; Wakeford and Bithell 2021 を参照）。多くのがん部位について、性別、被ばく時年齢、被ばく後時間などの修飾因子を組み込んだリスクモデルが利用可能であるが(Cahoon et al. 2017; Brenner et al. 2018, 2020; Mabuchi et al. 2021)、低線量での放射線誘発がんリスクと、線量-リスク関係の形状に関する不確実性は依然として大きい。また、異なる集団間でのリスク推定値の転換もまだ不確かである。追跡期間を延長したさらなる疫学研究は、これらの問題について新たな知見を提供し、線量-リスク関係の修飾因子の特性を改善することで、低線量に関連したがんリスクの評価を確固たるものにするのに役立つはずである。また、これらの結果は、全体的な放射線デトリメントに対するがん部位の相対的な寄与の定量化を改善し、その結果、組織加重係数 w_T を設定する際の基盤を改善するものである。

● 線量率効果とがん

放射線デトリメントの計算は、主に高線量率の電離放射線に被ばくした日本の原爆被爆者から得られたがんリスクに基づいている。一方、医療分野を除く放射線防護では、特定の状況下で累積線量が 100mGy を超えることがあっても、一般的には低線量・低線量率の被ばくを対象としている。同じ線量であれば、低線量率の被ばくの方が高線量率の被ばくよりも発がん性が低いかどうかという問題は、依然として議論の余地がある (Ruhm et al. 2016;

Shore et al. 2017; Leuraud et al. 2021)。したがって、がんリスクの線量率依存性に関する研究は、がんの発生メカニズムに関する放射線生物学的研究に裏打ちされた、人のコホートを対象とした疫学研究を中心に、引き続き重要であると考えられる。超高線量率の照射を用いた FLASH 放射線治療の効果についても、さらなる研究が必要であろう (Griffin et al. 2020)。

- **デトリメント計算における放射線以外の因子の影響**

放射線デトリメントの計算には、様々な組織や臓器の生涯がんリスクの他に、致死率、生活の質、失われた人生の年数など、放射線被ばくに関係のない、いくつかの追加要因が含まれている (ICRP 2007; Cléro et al. 2019)。これらの要因は、ライフスタイルの変化、診断技術とがん治療の進歩、医療制度の状況などに依存するため、定期的な更新が必要である (Breckow et al. 2018; Breckow 2020)。放射線によるデトリメントを計算するための、そして重篤度を調整するための代替的なアプローチが模索されるべきであり、さらなる研究が必要である (Shimada and Kai 2015)。

- **循環器系疾患が放射線デトリメントに与える潜在的影響**

非がん影響の中には、確率的影響に分類した方がよいものがあるかもしれない。低～中程度の線量および線量率の電離放射線に被ばくした後に循環器疾患のリスクが増加するという証拠が、最近 10 年間の疫学研究から蓄積されている (Azizova et al. 2015; Tapio et al. 2021; Little et al. 2021)。これらの結果は、線量に応じて発生確率が上昇し、重篤度には変化がないことを示している。とはいえ、疫学的証拠の一部の面は明確化が必要があり、生物学的メカニズムはまだ不明であり、低線量でのリスクは大きな不確実性を伴う。放射線治療を受けた小児がん生存者を対象とした長期的な調査により、何らかの有益なデータが得られる可能性がある。今後の研究により、循環器系疾患を放射線デトリメントに含めることの妥当性と実行可能性を、そのリスクを定量化するために必要な要素とともに議論するための基礎が得られるはずである。

- **胎内被ばくによる放射線の影響**

胎内放射線被ばくの健康影響の問題は、医療関係者にとって特に重要である。現在のガイダンスの多くは、動物実験や限られた疫学データに依存しているが (ICRP 2003a)、近年、いくつかの新しい結果が発表された。その結果、出生時に頭と胸のサイズが小さいこと、小児白血病や小児がんのリスクが高まること、思春期に収縮期血圧が上昇すること、成人期後半に女性のがんリスクが高まることが明らかになった (Nakashima et al. 2007; Hatch et al. 2017; Sugiyama et al. 2021; Wakeford and Bithell 2021)。胎内低線量被ばくによる長期的な健康影響の理解には、さらなる研究が必要である。

- **子孫および次世代に対する放射線の遺伝性影響**

子孫やその次の世代への影響の可能性については、一般市民にとっては繰り返し起こる大きな関心事であり、職業上、医療上、あるいは環境上の原因で電離放射線に被ばくした親（および将来の親になる可能性のある人）にとっては特に大きな関心事である。今日では、人の放射線被ばくによる遺伝性の悪影響の存在を示唆する疫学研究の証拠はほとんどない（Yeager et al. 2021; Yamada et al. 2021）。しかし、実験動物における証拠に基づいて、遺伝性リスクは全体的な確率的リスクに含まれている（UNSCEAR 2001）。放射線によって誘発される可能性のある遺伝性疾患、特に人生の後の時点で発症する多因子性疾患の基本的なメカニズムと、もしあるならば、有害な結果へのエピジェネティックなプロセスの寄与については、まだ知識が不足している。遺伝学、エピジェネティクス、放射線生物学、毒物学、疫学の分野で、ヒトやヒト以外の生物種における潜在的な遺伝性影響をよりよく特徴づけ、定量化するためには、さらなる研究が必要である。

● 不確実性の分析

低～中程度の線量レベルにおける放射線誘発リスクの推定値は、大きな不確実性を伴う。不確実性の原因は特定できるが（例えば、研究デザイン、対象集団、被ばく評価、線量評価、健康結果評価、交絡因子、統計的手法、モデル化手法など）、リスク推定値に与える複合的な影響はほとんど定量化されていない（UNSCEAR 2015, 2020; Zhang et al. 2020）。放射線デトリメントを定量化するプロセスでは、現在のところ、根本的な不確実性を考慮していない。関連する不確実性を組み込んだ電離放射線被ばくによる健康リスクを推定する方法論をさらに発展させるとともに、放射線防護体系の基礎的な仮定として使用されるリスク推定値にこれらの不確実性を伝播させるアプローチも必要である。

放射線に対する人の個人反応

この20年の間に、電離放射線被ばくに対する集団の感受性の違いをもたらす様々な要因が徐々に考慮されるようになってきた（Applegate et al. 2020）。例えば、性別、被ばく時年齢、および到達年齢は、線量とがんや非がんのリスクとの関係を有意に変化させる可能性がある（Grant et al. 2017）。喫煙などのライフスタイルの特徴による違いも観察されており（Cahoon et al. 2017）、電離放射線が他のリスク因子とどのように相互作用するかという一般的な疑問を提起する。この問題は、バックグラウンドのがん発生率が異なる集団間でのリスク転換にとって根本的である。小児腫瘍学の研究コミュニティでは、小児のがん素因症候群を特定し、これらの小児とその家族に推奨される管理方法を示し、増加するこれらの被ばく状況の中で電離放射線の回避を提案している（Brodeur et al. 2017）。リスク因子の中には、ホルモン、投薬、組織の放射線感受性を高めるその他の要因により一過性のものもある。個人の感受性を決定する上での遺伝的およびエピジェネティックな差異の役割も、放射線防護に大きく影響する可能性があり、したがってさらなる研究が必要である。関連する倫理的側面についても、専門的な研究が必要である。

ヒト以外の生物相に対する放射線の影響

自然環境におけるヒト以外の生物相の防護の焦点は、生殖能力の総体的な減少および将来世代への影響を含む、集団の生存能力である。一連の出版物（ICRP 2008, 2021b; ICRP 2017a）に記載されているように、放射線影響からヒト以外の生物相を防護するための概念がICRPによって展開された。生物やライフステージによる感受性の違いを考慮して、ヒト以外の生物相の被ばく、線量、集団生存率への影響を関連付けるには、さらなる研究が必要である（Garnier-Laplace et al. 2015）。さらに長期的には、電離放射線が生態系の構造と機能に及ぼす影響についても追加的な知識が必要であり、これは生物多様性と生態系サービスの両方をより総合的に考慮することにつながるかもしれない。

長期研究

基礎研究

分子・細胞・組織レベルでの低線量影響のメカニズムに関するさらなる研究と、これらのメカニズムを考慮した線量反応モデルの開発が必要である。疫学的研究や実験的研究で採取された正常組織や疾患組織の生物学的試料は、組織、細胞、細胞内レベルでの変化を観察された健康影響と関連付ける可能性がある（Hall et al. 2017）。特定のがんに対する放射線シグネチャーの同定に関連する研究は、バイオマーカーの同定や非標的メカニズムの特徴づけに関連する研究と同様に継続すべきである。これらのデータをシステムバイオロジーのようなマルチレベルの解析手法と組み合わせることで、放射線影響の理解が深まるはずである。AOP（Adverse Outcome Pathway：有害性発現経路－生物が物質にさらされたときに、毒性作用をもたらすために必要な一連の事象を特定するアプローチ）を考慮するなど、アプローチを統合することで（Preston et al. 2021; Chauhan et al. 2021）、電離放射線被ばくと疾病との間の因果関係を特定するのに役立つはずである。また、放射線防護分野における基礎知識の向上と能力の維持のためには、基礎研究が不可欠である。

複合被ばくの影響

電離放射線への被ばくを伴う状況が単独であることは稀であり、他の汚染物質が放射線に関連するリスクに与える潜在的な影響を評価することは困難である。放射線を環境全体の中で考える必要性は明らかである。例えば、放射線と喫煙の複合的な影響をよりよく定量化することが必要である（Furukawa et al. 2010）。他の要因との潜在的な相互作用やカクテル効果をよりよく考慮できるように、放射線分野でもエクスポソームを考慮するアプローチを開発すべきである（Wild 2012）。この研究には、放射線分野と化学分野の間で毒物学の専門知識を連携させることが必要である。また、線質の異なる電離放射線に複合的にさらされた場合の影響についても、さらに調査が必要である。

線量測定を支援する研究

短期・中期の研究

生物学的効果比、線質係数、放射線加重係数

現行の放射線防護体系では、生物学的効果比（RBE）は、線質係数 Q や放射線加重係数 w_R などの派生量で表される（ICRP 2003b）。RBE は、電離放射線の種類、エネルギー付与密度、線量、線量率、被ばくの分割パターン、生物学的エンドポイントによって実験的に決定される（Ujeno 1983; Rossi and Zaider 1990; Edwards 1999）。RBE は、基準放射線や実験で照射される線量にも影響される。エンドポイントにおける遺伝子の変化だけでなく組織の反応を含めるようにデータを拡大することが望まれる。さらに、軟ベータ粒子、低エネルギー光子によって生成される電子、オージェ電子など、生体組織への透過性が非常に低い低エネルギー電子に特に注意を払うべきである（Paquet et al. 2013）。このような低エネルギー電子を放出する放射性核種が細胞に取り込まれると、細胞死や細胞変異を誘発するのに有効な、細胞内での不均一なエネルギーの付与が起こりうる。現在利用可能な RBE データは、電子エネルギーの範囲をカバーするように拡張する必要がある。

ヒト以外の生物に対する RBE データは、アルファ粒子放出放射性核種とトリチウムのベータ粒子の特定のケース、および動物と植物に関連するエンドポイントについて導き出されている（ICRP 2021b）。ヒトに使用される RBE データは主に動物実験から得られていることを考慮すると、これらのデータを拡張し、異なるエンドポイント（確率的影響、組織反応、生物個体数、生物多様性への影響）を考慮して、ヒトとヒト以外の生物相の両方に対する放射線加重係数の導出を可能にする一般的なアプローチを採用することは価値があるだろう。

医療およびその他の用途のための適切な線量量

実効線量（ E ）は、確率的影響、主になんがに対する防護を管理するためのリスク調整された線量量として ICRP により開発され、あらゆる種類の電離放射線からの線量の算定値を線量限度、線量拘束値および参考レベルと比較可能にする（ICRP 2007）。医学およびその他の用途では、年齢、性別、体格、代謝機能（核医学における放射性医薬品の動態に関して重要）の点で標準人とは大きく異なる限定された患者グループに特化した処置を行う場合には、特に E が適用できないことがある。これは、臓器機能が低下している患者や、臓器を切除した患者（例：甲状腺）、また、特定の性別の患者のみを対象とした検査（例：マンモグラフィ、前立腺がんの診断）の場合にも当てはまる。これらすべての場合において、男性と女性の臓器の線量を平均化し、全人口で平均化された標準人の解剖学、代謝、および加重係数を使用することは、個々の患者やその臨床紹介者（clinical referrers）との話し合いにおいて E の使用を制限する。代わりに、 E に類似した線量量を年齢の異なる男性と女性で別個に規定し、被ばく時の年齢による放射線ドзиментの違いを考慮し、基準となる体格との違いを考慮することが考えられる（ICRP 2021a）。患者の線量評価やその他の被ばく状況で使用するための E の最適な策定を研究・検討することは、このリスク関連量に対する将

来の最も適切な変更を決定するのに役立つだろう。

緊急事態における線量評価

現在の ICRP 線量評価システムは、規制への準拠と、実効線量を被ばく評価に用いた低線量での防護の最適化に焦点を当てている。緊急事態における放射線評価を行うために、現行のシステムを拡張する必要がある。このような状況では、個人の将来および過去の線量評価に加えて、集団の評価にも焦点が当てられる。確率的影響と組織反応の両方、甲状腺ブロックや汚染された傷口などの状況特有の条件、個人の特性（例えば被災地でのヨウ素不足の食事など）を考慮したアプローチを定義することが必要である。複雑なのは、重篤な組織反応を適切に回避するための被ばく量の設定であり、急性の線量と長期にわたる外部・内部線量を考慮する必要がある。また、組織反応に関連して、適切な標的組織および／または組織内の領域を考慮する必要がある（下記の「臓器または組織における線量標的の定義」を参照）。適切なアプローチと反応システムを開発するためには、さらなる研究が必要である。

長期研究

臓器・組織における線量標的の定義

人体の異なる組織や臓器における吸収線量の平均化は、低線量での確率的影響を制限するために使用される防護量の定義の基礎となる (ICRP 2007)。平均吸収線量が局所的な吸収線量をどの程度代表しているかは、入射放射線の体内への透過性、臓器の構造、放射線源や感受性の高い細胞の分布など、いくつかの要因に左右される。透過性が低い、または飛程の限定的な電離放射線（低エネルギー光子、荷電粒子）の場合、生体組織へのエネルギー付与は非常に不均一である可能性があり (Paquet et al. 2013)、そのため損傷の誘発に關与する標的細胞を特定する必要がある。

確率論的影響の場合、標的細胞はほとんどの臓器に均一に分布していると定義されている。ただし、ヒトの呼吸器、消化管、膀胱、骨格、皮膚の場合は例外で、特定の細胞層に対する線量が計算される。このリストに、複雑な内部構造を持つ他の臓器（腎臓、副腎、精巣、前立腺の内部髄質とその周囲の皮質、脳の灰白質、白質など）を追加する必要性については、核医学への応用も含めて検討する必要があるだろう。また、「標的」という概念を見直し、がんの発生における非標的メカニズムの寄与の可能性をよりよく反映させるための研究が必要かもしれない。

組織反応の中には、線量測定の目的上、標的細胞の位置がまだ定義されていないものもある (Gössner 2003)。開発中のファントムでは、組織、性別、年齢の違いを考慮して、線量測定の標的をより明確にし、特定する必要がある。また、循環器系の疾患のように複数の臓器が關与する疾患では、生物学的メカニズムに関する知識の進展に基づいて、複数の標的を考慮することが検討されるかもしれない。

環境防護のための線量測定の標的と方法論の強化

環境放射線防護は、集団レベルで追跡可能な電離放射線被ばくによる有害な影響を扱うものであり、それは被ばく後すぐに明確に現れる。環境放射線防護で考慮される生物学的エンドポイントは、被ばくした生物や生態系における即時または早期の影響に焦点を置く。環境における放射線防護の目的は、生物の多様性に対する放射線の影響を制限し、種の保存と、自然の生息地、コミュニティ、生態系の健康と状態を確保することである（ICRP 2008, 2014a）。現在、環境防護は、限定された標準動植物（RAP）と誘導考慮参考レベル（DCRL）を組み合わせることで対応している。これは、静的状態を仮定し、電離放射線被ばくの有害な影響に関連する生物相への線量率の範囲を示すものである。線量率は、球体や楕円体のように非常に単純化された体形と、平衡濃度係数を用いた最も単純な体内動態の考察を用いて、生物全体の平均値として計算される（ICRP 2008, 2009, 2017a）。

生物は多様性に富んでいるため、組織内の標的の定義とそれに伴う線量モデリングは、すべての種に対する合理的な目標と考えられないであろう。しかし、生殖能力や繁殖能力の低下のような特定の生物学的エンドポイントや、体内の線量分布が非常に不均一になる被ばくの場合には、平均化された全身線量の使用は不十分または情報不足になる可能性があり、そのため、現実的な被ばく条件で対象となる生物の特定の臓器や組織における線量を評価し、生物の現実的な行動を考慮する必要がある。このような状況における放射線防護基準を確立するためには、より現実的な線量評価モデルや体内動態モデルのさらなる開発が必要であり、少なくとも大型の動物については、環境の効果的な放射線防護のために必要な RAP と被ばく状況の範囲を拡大する必要がある。

ヒト以外の生物に対する線量評価を改善するための研究が必要であり、環境を介した放射性核種の移行、外部放射線場と被ばく群の記述、生物と環境の間の放射性核種の濃度比を考慮する必要がある。線量評価における不確実性を考慮することで、最も重要な要素に注意を向けることができる。

動物を患畜として考慮する場合には、より詳細な線量測定が必要となるであろう。ヒトの線量評価に用いられる解剖学的モデルのような高度なものは必ずしも必要ではないが、そのようなモデルの簡易版を開発し、必要に応じて改良することは可能であろう。

人体組織における放射性核種および放射性物質の体内動態モデル

体内動態モデルは、体内での放射性核種の時間依存的な吸収、分布、および保持を記述するものである。動態データは、臓器や組織の線量を計算し、さらに実効線量を計算するために使用される。ICRP は長年にわたり、ヒトの消化管と呼吸気道における放射性核種の沈着と吸収、および体内での分布と滞留を記述する一連のモデルを開発してきた（ICRP 1994, 2006, 2015b, 2016b, 2017b, 2019）。

ICRP が作成した最新の世代のモデルは、元素のリサイクルを考慮し、以前よりも生理学的に現実的なものになっている。これらのモデルでは、作業者と公衆の実効線量を計算でき

るように、年齢に依存した動態パラメータも定義されている。医療分野では、動的なモデルの改良により、新しい放射性医薬品による被ばく線量の推定が容易になる。

母体から胎児への放射性核種の移行、母乳を介した新生児、乳児、幼児への放射性核種の移行を説明するためには、新たなデータが必要である。関連するモデルは、約 20 年前に当時入手可能な最善の知識を用いて作成された (ICRP 2001, 2004, 2015a)。これらのモデルは、これらの過程をより正確に記述する新しいデータによって完成させる必要がある。

放射線防護体系の適用・実施を支援するための研究

短期・中期および長期の研究

放射線技術の開発と利用

放射線の利用は常に拡大・変化しており、放射線防護や医療・獣医療の提供に課題をもたらしている。そのため、医療、獣医学、産業、学術活動を含むすべての領域で効果的な放射線防護体系を適切に構築するためには、電離放射線や放射性物質の様々な利用方法やその代替手段に関する研究開発が重要となる。実装科学とは、エビデンスに基づいた実践、介入、政策を日常のヘルスケアや公衆衛生の場に導入し、統合することを促進する方法を研究する学問である。

● 治療と防護における医療利用の意味合い

医療診断や治療における電離放射線や放射性物質の最善の利用に関連して、研究や情報の照合が継続的に求められている。医療分野には、歯科放射線学、FLASH などの放射線治療における新しいビーム照射方法、核医学、インターベンショナルラジオロジー、ペクトル化放射線治療や theragnostic approach などの新しい技術の急速な発展など、多様な用途がある。これらの治療法では、線量測定の方法、線量や線量率のレベル、体内の線量分布の不均一性が大きく異なる。特に重要なのは、放射線防護や治療プロトコルに影響を与える可能性のある放射線被ばくに対する個人の反応を理解することを含め、被ばく量の評価とリスクが高い集団に対する意味合いである。100mSv を超える線量に達するほど度重なる画像検査や透視ガイド下のインターベンション治療を繰り返す患者には特に注意を払うべきであり (Rehani et al. 2019)、検査の適切な時間間隔も考慮する必要がある。さらなる研究を支援するために、疫学研究コミュニティが利用できる画像診断を受けた患者と放射線治療患者の両方の線量登録台帳の開発を検討すべきである。また、電離放射線被ばくによる有害な影響の可能性と、診断や治療による臨床上の利点とをよりよく関連付けるための研究も必要である。

● 治療と防護における獣医学的実践の意味合い

電離放射線の獣医学的応用においては、個々の動物を防護すべきである。獣医学の分野は急速に拡大しており、もともとヒト用に開発された多くの放射線医学的処置が動物に採用

されている(Pentreath et al. 2020; IAEA 2021; ICRP 2020a)。このことは、電離放射線がどのようにして、またなぜ獣医療の現場で使用されるのか(例えば、医学的に指示されていないような状況で)という疑問を生じさせる。正当化(画像診断と放射線治療の双方についての適切性基準、得られる成果の特徴付け、費用対効果の分析)、最適化(患者の画像診断プロトコルと、画像診断および放射線治療の様式についての診断参考レベル)、および線量限度の問題に役立つ研究が必要であり、放射性医薬品使用に伴い看護中に被ばくする動物の所有者と取扱者の放射線防護、作業場所、処置の形式と環境汚染の可能性も考慮に入る。

● 自然起源の放射性物質(NORM)等の産業および学術用途

電離放射線や放射性物質の利用は常に拡大しており、NORMの再使用や再利用などの新しい開発は、放射線防護に影響を与える可能性がある。このような新しい放射線源からの被ばくの特徴をよりよく把握し、放射線防護の原則に対する意識が比較的低いかもしれない状況下での放射線防護の影響を調査するためには、さらなる調査が必要である。

● 放射線被ばくの自然線源

個人は様々な状況や環境で電離放射線の自然線源に被ばくする可能性があるが(UNSCEAR 2010)、その中には新しい放射線環境もある。住宅のラドンは一般公衆の線量の主要な部分を占めることが多く、室内空気の状態のより総合的な文脈の中で考えるべきである。例えば換気や建材など、建物の変化は、ラドンの被ばくを大きく変える可能性がある(ICRP 2014b)。その他の例としては、航空機による移動(ICRP 2016a)と、宇宙探査や宇宙観光の拡大の可能性(ICRP 2013)がある。とりわけこれらの被ばく状況に関連した線量とリスクの特徴を明らかにし、特定の集団におけるこれらの状況と、リスクの許容範囲と妥当性に関する問題等、防護の意味合いについての理解を支援するために、さらなる研究が必要である。

生態系の防護

ICRPは過去15年間で環境防護に向けて実質的なステップを踏んできた(ICRP 2008, 2009, 2014a, 2021b)。この論題の領域は、放射線の影響に関する研究と線量測定法の開発と連動して、生態系防護のための改善された、より全体的なアプローチの継続的な開発と検討を支援するためのものである。これには、自然環境と、農場や公園など人間が管理する「作られた」環境、さらには人間が実質的に監視する大規模な地域が含まれる。また、植物や動物だけでなく、天然資源の持続可能性と、電離放射線の使用が短期的・長期的に生態系に与える影響など、環境防護に関する最新の動向も含まれている。この研究は、環境放射線防護原則の実施に役立つはずである。特に、放射線源から受容体までの放射性物質の経路、輸送、移行をよりよく理解する必要があり、線量測定と影響(個人からコミュニティまでのあらゆる組織レベルで)、ヒト以外の生物の環境におけるこれらの管理に関する補完的な研究を支

援する必要がある。電離放射線被ばくが生物多様性と生態系サービスに与える影響を理解するための研究が必要である。これには、人間活動によって影響を受け形成された環境と共に、広範な自然環境における天然資源も含まれる。

放射線防護体系の適用に必要な研究

防護体系は、科学、倫理、適用に基づいている (ICRP 2018)。この論題の領域は、放射線防護体系の適用と伝達の成功に貢献する、多くの種類の社会、コミュニケーション、技術評価の研究を広くカバーしている。新しい技術とソフトウェアの革新、検証、試験、シミュレーションについて、そして、研究と品質管理プログラムを必要とする旧来の技術の新たな適用について、防護体系を支援する情報が必要である。

● 人工知能 (AI) の放射線防護実務への影響

AI、特に機械学習の応用・利用の進展は、多くの分野、特に医療用途で急速に拡大している (Geis et al. 2019)。患者の選択 (または選択解除)、治療計画の自動化、画像プロトコルの最適化において、数多くのアプリケーションがすでに開発中である。画像プロトコルの最適化では、専門の放射線技師と比較して、標準化と最適化の改善がすでに示されている (Mukherjee et al. 2020; Pinto et al. 2021)。これらの開発は、線量の精度、予測科学、医療判断の質の向上につながるはずである。しかし、特定の地域と国での研究と検証、トレーニング、政策および倫理的な監督はまだ行われていない (Larson et al. 2021)。医療現場の作業環境の複雑さ、チームワークの必要性、機器やソフトウェアの複数のユーザーインターフェースの統合は、新たに高度な実装と品質保証のプロセスを必要とする (Levenson 2012; Li et al. 2020)。医療以外では、作業者の監視、放射性物質を含むシステムの制御、安全システムの起動にデジタルツイン技術の創出が検討されている。これらの開発の影響を事前に予測することは難しいかもしれないが、患者、職業的に被ばくする個人、そして公衆の放射線防護に大きな影響を与える可能性がある。AI 技術の開発と実装をよりよく理解し、これらを放射線防護体系にどのように反映させる必要があるかを理解するために、継続的な倫理的検討を含め、研究と検討が必要である。

● 放射線とその利用に関する認識・理解の社会科学的研究

人間活動に起因する放射線緊急事態や汚染環境に対する一般公衆の認識と行動反応からは、自然災害や SARS-CoV-2 パンデミックのような放射線以外の事象から得られる情報と共に、学ぶべきことは多い。

放射線リスクに対処すべき状況は、一般的に複雑で学際的かつ多次元的であり、他のリスク (化学的、生物的、経済的、社会的など) との関連で管理される必要がある。さらに、(患者、作業員、公衆、環境に対する) 防護措置の実施は、例えばライフスタイルの変化などにより、人間の健康に影響を与える追加的なリスクをもたらす可能性がある。したがって、現

状での最善の防護策を決定する際には、放射線リスクと他のリスクとのバランスをとる必要がある。バランスをとるべきリスクは非常に多様であるため、共通の枠組みの中で多様なリスクを評価するための強固で有効なアプローチを開発するための研究が必要である。これは、防護の正当化と最適化において、統合的かつ適切に等級付けされた、全方位の危険要因アプローチを促進するのに役立つだろう。例えば、経済的利益、持続可能な開発、福利厚生が果たす役割を調査し、放射線防護体系への影響を明らかにすることができるであろう。

● ステークホルダーの参加とコミュニケーション科学のためのメカニズム

放射線防護は、関連するステークホルダーと意思決定を共有することに大きく依存する。このような意思決定は、医療における日常的な実践で例示されているように、信頼に依存している (Elish and Watkins 2020)。医療やその他の社会科学分野における認識、リスク、信頼、意思決定、異文化適応力、倫理的価値観に関する研究は何十年にもわたって行われてきたが、放射線の理解とその使用に適用する場合には、継続的な研究が必要である (Amoore 2020; Siegrist 2021)。関与には、タイムリーで正確かつ適切なデータや情報をステークホルダーグループが理解できるように提供することが含まれる。また、不確実性の議論、事故の開示、懸念の聴取も含まれる (Goske et al. 2012)。福島第一原子力発電所事故からの長期的な復興は、実行可能で持続可能な成果を生み出すために、ステークホルダーとの対話を確立・維持し、当局、専門家、ステークホルダー間の共同専門知プロセスを促進することの重要性を示した (ICRP 2020c)。様々な被ばく状況に合わせて、ステークホルダーの関与、リスクコミュニケーション、グループやコミュニティにおける能力と回復力の構築のための戦略をさらに理解し、適用するための継続的な努力が必要である (Clement et al. 2021)。

● 倫理

放射線防護の基礎となるのは、ICRP Publication 138 (ICRP 2018)に示されている中核的価値観および手続き上の価値観を含む、基本的な倫理原則である。この広範な領域には、特定の個人、研究対象者、集団、医療従事者や獣医師、患者、環境中のヒト以外の生物相を扱う際の特有の問題が含まれる。今日では、臨床研究と診療の間の明確な区別は少なくなっており、同意や共同意思決定の理解と定義には一層の注意が必要である (Elish and Watkins 2020)。電離放射線への被ばくによる心理的影響も考慮しなければならない。さらに、環境的要因と遺伝的要因の両方から生じる放射線に対する個人レベルのリスクをより正確に定量化する研究が進めば、放射線防護体系は新たな倫理的課題に直面することになるだろう (Applegate et al. 2020)。放射線防護体系を強化するためには、これらの倫理的側面に関するさらなる研究と指針が必要である。

● 行動科学

放射線防護は、個人、組織、および社会（文化）の行動、態度、および経済性やストレス

や未知の状況への対応を含む行動に依存する。例えば、防護のための段階的アプローチ、予期せぬ緊急事態への対応と反応、放射線防護文化の発展と維持、全ての社会的・環境的要因が適切にバランスされた防護の最適化など、相補的な議論の応用と理解において、さらなる発展が必要である。

結論

ICRP は、ICRP Publication 103 に掲載されている 2007 年の基本勧告を更新する、放射線防護体系の見直しと改訂に着手した(Clement et al. 2021)。これは、世界中の組織や個人とのオープンで透明性のある関与など、数年かかるプロセスの始まりである。ICRP の体系は強固であり、これまで十分に機能してきたが、目的に適った体系であり続けるためには、科学や社会の変化に対応する必要がある。

本論文は、放射線防護コミュニティとの間で放射線防護体系の関与、議論、見直しの分野を特定した、より説明的な最近の出版物を補完し、その上に構築することを目的としている(Clement et al. 2021)。これは、「放射線防護体系を支援するための研究分野」という ICRP のビジョンを示している。そうすることで、ICRP は、他の関連する国際機関が推進している研究の優先順位 (Kreuzer et al. 2018; Muikku et al. 2018; Hoeschen 2018; Schneider et al. 2018; Bouffler et al. 2019; NERIS 2019; Perko et al. 2019; Harrison et al. 2021; Impens and Salomaa 2021) を、放射線防護体系の進化という観点から具体的に整理して、調和させ、強調することを目指している。特定された研究ニーズは、人工知能、コミュニケーション科学、線量測定、生態学、疫学、倫理、医用画像と放射線治療、モデリング、放射線生物学、社会科学、技術開発、毒性学、不確実性分析など、幅広い分野をカバーしており、一部は重複している。また、短期・中期的に必要な研究（次の基本勧告をサポートするため）と長期的に必要な研究（10 年以上）を区別している。この区別にとどまらず、委員会は、短期的に成果が期待できる研究であっても、長期的に継続することを妨げるものではないことを意識している。