

「ICRP Publ.147 放射線防護における線量の使用」 —防護量の更新と再整理について—

岩井 敏
Iwai Satoshi

1. はじめに

実効線量評価に必要となる標準人の様々な解剖学的及び生理学的パラメータは ICRP Publ.89¹⁾ (以下 ICRP を省略) で定義され、Publ.110²⁾ では成人男女の標準人ボクセルファントムが示された。これを用いて、外部被ばくに対応する成人の実効線量換算係数が Publ.116 として公表された。一方 2020 年に刊行された Publ.143³⁾ では、新生児、1 歳、5 歳、10 歳、15 歳の男女の標準人ボクセルファントムが示されたため、6 段階の年齢群の実効線量の実質的な評価が可能となった。

2020 年には ICRU Report 95⁴⁾ が刊行された。実用量は ICRU 球ファントム等を用いて定義された従来の概念から大幅に改訂され、Publ.116 に示された成人の実効線量換算係数をベースとした線量概念となった。

2021 年、「Use of Dose Quantities in Radiological Protection (放射線防護における線量の使用)」と題する Publ.147⁵⁾ が刊行された。これは Publ.103⁶⁾ まです使用されてきた防護量の課題を整理、改訂すると共に、放射線被ばくによる実効線量と確率的影響のリスク (以降リスクという) の最良推定値との距離感について論じたものである。Publ.147 では実効線量はあくまでも防護量であり、リスク量の最良推定値と見なしてはならないことを再度、明確に述べている。

2. 線量の概念

放射線の場合の強度を表す量が「物理量」であり、粒子数や吸収線量等で表される。吸収線量とは放射線が単位質量当たりの物質 (人体も含む) にどれだけのエネルギーを付与したかを示す量である。放射線は種類によって人体へのリスクの程度が異なる。その上、被ばくした臓器・組織によってもリスクの度合いが異なる。これを加味した量が防護量であり、実効線量が主たるものである。しかし、実効線量等の防護量は、人体ファントムを用いてシミュレーション計算等で求められる概念量であり、直接測定することはできない。したがって、現場の放射線管理に用いる測定器のために実用量が定義された。実用量はあくまでも防護量の代用品的な位置づけである。従来の実用量体系では、原則的に実用量の値は防護量に近いが、防護量を下回らない値を示す線量概念であり、測定器の応答の校正に用いられる。防護量は内部被ばくにも使用されるが、実用量は外部被ばくに対してのみ使用される。

3. ICRP Publ.147 で更新された防護量の概念

組織反応 (従来の確定的影響) が線量限度を決める眼の水晶体、皮膚、手足の等価線量を吸収線量に変更することとされた。これは確率的影響の防護を対象とした放射線加重係数を用いた等価線量を、組織反応が防護上問題となる臓器・組織に適用することは適切ではないためである。ただし、高 LET 放射線では放射線加重係数でなく生物学的効果比

(RBE)¹の重み付き吸収線量となると考えられるが、この扱いは現在ICRPのタスクグループTG118で検討中である。

確率的影響の防護に関して臓器、組織の等価線量はあくまでも、実効線量計算プロセスの中間段階の数値と位置づけられた。その代わり臓器、組織の線量は吸収線量(Gy単位)で表すこととなった。例えば¹³¹Iの摂取の場合、Sv単位で表すと、その線量は実効線量であるのか、それとも甲状腺の等価線量であるのか混乱を生じる恐れがあるためである。

4. ICRP Publ.147での実効線量と確率的影響のリスク

実効線量と確率的影響のリスクとの関係が、Publ.60⁷⁾、Publ.103とPubl.147でどのように変遷したか、そしてPubl.147で明記された「確率的影響のリスクの近似的指標」、それは何を意味するかについて以下に説明する。

Publ.60では、実効線量は確率的影響の尺度として使用可能(can be used as a measure of stochastic effect)という位置づけであったが、Publ.103では、リスクに関連する量(risk-related quantity)と表現されており、リスクとの関連性は少し不明瞭に感じられる表現となっている。しかし、Publ.147では、可能性のあるリスクの近似的指標(approximate indicator of possible risk)となり、リスクとの関連性とその限界に関する位置づけが再確認された。近似的指標という意味は、生涯過剰がんリスクが、被ばく時年齢、性別、集団の特性によって異なることを考慮した上で、リスクの程度を判断する目安として使用しても構わない、しかし、被ばくした個人や集団の生涯過剰がんリスクの最良推定値とは区別して考える必要があるという意味である。したがって、極めて小さな個人被ばく線量を集積した大人数の集団実効線量を求め、将来のがん罹患数や死亡数増加を機械的に推定する利用法は適切ではない。

Publ.147では、実効線量は低線量・低線量率被ばくに対して一般的には100 mSv程度以下で使用されるが、緊急時における1 Svまでの急性被ばくへの適

用も放射線防護上の運用目的には可能とされた。

Publ.147ではPubl.143に示された新生児、幼児、小児等成人以外の標準人ボクセルファントムに基づく年齢群別の実効線量を正式に明記したと考えられる。実効線量は年齢群別の標準人ファントムの臓器吸収線量に基づくが、放射線加重係数は動物実験や細胞実験等から得られたRBEに基づき設定された全年齢群、性別共通の数値として扱われている。組織加重係数は各年齢群、性別の確率的影響のリスクに重み付けをした全年齢群共通の総合的な健康損失指標(デトリメント)であり、年齢、性別依存ではない。したがって、実効線量の評価に使用するファントムは年齢群別ではあるものの、被ばくした個人固有の体型や被ばく時年齢による放射線感受性、性別やその人の属する集団特性等の違いが考慮されている訳ではない。

実効線量は職業被ばくや公衆被ばくにおいて、防護の最適化と防護基準(線量限度、参考レベル、線量拘束値)の遵守の実証に用いる放射線防護に用いるツールであり、低線量・低線量率における、確率的影響のリスクの近似的指標として用いられる。実効線量はあくまでも防護体系の運用のための量であり、疫学研究に直接用いる場合、その限界に注意が必要である。

事故や管理できない状況が発生した場合、医学的介入を判断することも含めて対応するために、最初の実効線量の評価が必要となる。しかし遡及的に特定の個人のリスク推定値が必要な場合、個人の臓器・組織の平均吸収線量、性別、被ばく時の年齢、その個人の属する集団特性の情報を用いて、組織反応特有のRBE推定値のパラメータを考慮した評価が必要となることもある。

5. 医療被ばくでの実効線量の適用と限界

5.1 医療被ばくにおける実効線量

近年、放射線画像診療の進展に伴い、医療被ばくに関する関心が高まり、実効線量は患者の体型や年齢、性別を反映した指標でない事が指摘されるようになってきた。実効線量は、本来、職業被ばくや公衆被ばくで放射線防護の目的で使用されるための量であり、患者や被検者個々人の放射線被ばくによるリスク評価に使用するには適切な指標ではない。

1 同一の組織反応(確定的影響)を生じさせる基準放射線の吸収線量を同一の組織反応を生じさせる対象となる放射線の吸収線量で除した値

その理由は、

- 年齢・性別等を平均化している。
- 患者特有の体型が考慮されていない。
- 実際の患者の健康状態を考慮したリスクを正確に反映しない。

つまり患者や被検者個人にとって、放射線画像検査や放射線治療による被ばくのリスクを示す最良推定値としての指標ではない。

しかし、医療関係者（臨床医等）が患者、被検者に対して、検査や治療方法の線量を、日常、個人が良く知っている被ばくのリスクと比べて説明するとき、実効線量を用いることはリスクコミュニケーションのツールとして実用的である。そのため Publ.147 では医療被ばくに実効線量を適用できる用途と、適用が勧告されない用途を具体的に示している。

医療における実効線量は、異なる医学的手法から受ける線量を比較し、正当化の判断に資する情報を提供することに用いられる。そして、装置や手技の改善評価にも用いられる。並びに介護者や医学研究のボランティアの線量拘束値を確立する際にも用いられる。

5.2 実効線量の使用が適切な用途

実効線量は画像診断技術の正当化、最適化、リスクコミュニケーション等の情報提供の目的での使用は奨励されるが、患者、被検者個人々々へのリスク評価には不適切である。適切な使用例として以下の項目が記載されている。

- ①放射線診療の第2レベルの正当化、第3レベル²の正当化
- ②画像診断技術の選択
- ③診断技術の最適化（照射条件の選択）
- ④研究ボランティアの線量評価
- ⑤予期せぬ過剰な被ばくの報告、ただし、数10 mSv を超える場合は年齢、性別等を考慮した個別のリスク評価が必要
- ⑥推定値の必要性

2 放射線診療における正当化は、「放射線による利益が被ばくによる不利益を上回るか」を判断する考え方で、第2レベルは診療行為そのものの有用性の判断、第3レベルは個々の患者への適用性の判断である。

- ⑦健康診断等の画像診断の線量の意味付け
- ⑧患者の介護者の線量評価
- ⑨臨床医や他の従事者の教育訓練

5.3 実効線量の使用が勧告されない用途

実効線量の使用が奨励されない事例としては、実測された情報で十分な情報が提供される場合、並びに、記録の比較を行う場合が考えられる。後者の場合、組織加重係数の更新による実効線量値の変化が問題となる。前者については以下の①と②が、後者については③と④が示されている。

- ①類似した画像診断技術の比較と診断参考レベルの設定
- ②マンモグラフィや脳のCT等単一の臓器のみが被ばくする場合の線量評価
- ③患者線量情報の医療記録
- ④患者線量情報の追跡

5.4 リスクコミュニケーションに有用な実効線量

医療被ばくでのリスクコミュニケーションのツールとしての実効線量は有効に利用できる。Publ.147 に示された医療画像検査と治療の放射線被ばくによるリスクを説明するための実効線量の利用例が Publ.147 の表 5.2 に示されている。リスクコミュニケーションとしては、以下の話をするのが役に立つことがある。

- ①よく知っている状況から受ける実効線量との比較（例：自然放射線の年間被ばく）
- ②リスクを受け入れている実効線量との比較（例：長距離間の航空機被ばく）
- ③放射線被ばくを伴う医療行為と他の手法とのリスクとの比較（例：IVR (Interventional Radiology) と外科的治療のリスク比較）

しかし、患者、被検者個人の生涯過剰がんリスクに関しては、対象となる個人の臓器・組織の平均吸収線量、性別、被ばく時の年齢、その個人の属する集団特性を考慮したリスクの最良推定値が必要となる。

6. ICRP Publ.147 と ICRU Report95 との関係と課題

ICRU Report 39⁸⁾, 43⁹⁾ 及び 51¹⁰⁾ で定義された実用

量は、防護量の容認できる推定値を提供することを目的としていた。この段階では、実用量は数 MeV を越える高エネルギーを除けば、ほぼ防護量よりも保守的であった。

ICRU Report 95 では、従来の ICRU 球ファントムによる体系を改め、ICRP 成人標準人ボクセルファントムに基づく実効線量換算係数を基礎として、新たな実用量体系が構築された。新しい実用量は、複数の照射方向に対する成人ボクセルファントムの実効線量係数のうち、防護上保守的となる値を基準とし、高エネルギーを含む広いエネルギー範囲にわたり、防護量のよりよい推定値を与えることを目的として考案された。そしてその値は成人である職業人だけでなく、幼児や小児を含む公衆にも適用できると考えられる。なお ICRU Report 43 では、実用量は制限量 (Limiting quantity)³ より、相当な (substantially) 過小評価になることを容認していない。

一方、Publ.143 の小児用標準人ファントムも考慮した Publ.147 では、小児を含む年齢別実効線量の重要性も明確化されており、特に低エネルギー光子等では年齢群による実効線量差が無視できない場合がある。例えば幼児や小児は成人に比べて体が小さいため、外部からの放射線、特にエネルギーの低い X 線等が体の中心部まで透過しやすい。その結果、同じ放射線場においても、「成人最大実効線量に基づく実用量が全年齢の実効線量に対して相当な過小評価になる事例があるか」という点については、適切な確認が必要となる可能性がある。一方で、実用量は現場運用のための単純かつ堅牢な管理量として設計されている。そのため、ICRU Report 95 では小児等を含む公衆に対する厳密な保守性保証よりも、実務の一貫性と測定体系の安定性が優先されたとも考えられるが、公衆の年齢群別実効線量体系を、成人標準人に基づく新実用量体系にどのように反映させていくかは、今後詳細な検証が望まれる。

7. まとめ

Publ.147 によって防護量の体系が整理、更新された。具体的には組織反応が問題となる臓器、組織の

防護量は吸収線量となった。確率的影響に関しては実効線量を使用され、等価線量は実効線量を計算する中間段階の量と位置づけられ、独立した防護量としての役割は限定的となった。

実効線量は、放射線防護の運用のための量で、規制、手法の比較、防護の最適化のツールであり、個人のリスク推定や疫学解析に直接使用する量ではない。実効線量の用途や使用上の注意点が以下のように示された。

- ①低線量、低線量率の確率的影響のリスクに関連する線量 (単一の量)
- ②適用範囲については、一般的には 100 mSv 程度以下の被ばくで使用されるが、緊急被ばくにおける 1 Sv までの急性被ばくへの適用も放射線防護上の運用目的には可能
- ③年齢群別の標準人ファントムを用いており、放射線防護上は被ばくした個人や集団の線量として扱われるが、性及び年齢平均の組織加重係数を用いて評価しており、リスクの最良推定値としての使用は不適切
- ④職業被ばくと公衆被ばくでは、防護を最適化するための手段として使用可能
- ⑤小さな被ばくを受けた大人数の集団実効線量をその集団のリスク解析に用いることは不適切 (不確かさが大きい)
- ⑥医療被ばくでは、リスクの近似的指標として、診断手法の正当化、最適化、及びリスクコミュニケーションには使用可能。しかし患者等個人のリスク評価に用いるのは不適切

参考文献

- 1) ICRP Publication 89: Ann. ICRP, **32**, (3-4) (2002)
- 2) ICRP Publication 110: Ann. ICRP, **39**, (2) (2009)
- 3) ICRP Publication 143: Ann. ICRP, **49**, (a1) (2020)
- 4) ICRU Report 95 (2020)
- 5) ICRP Publication 147: Ann. ICRP, **50**, (1) (2021)
- 6) ICRP Publication 103: Ann. ICRP, **37**, (2-4) (2007)
- 7) ICRP Publication 60: Ann. ICRP, **21**, (1-3) (1991)
- 8) ICRU Report 39 (1985)
- 9) ICRU Report 43 (1988)
- 10) ICRU Report 51 (1993)

(元(一社)原子力安全推進協会)

3 線量限度を適用するための基準量 (防護量のこと) であり、1988 年当時、防護量という用語は使用されていなかった。