線量概念の概要と防護量

本稿では、物理量に基礎を置きながら ICRP/ICRU によって構築されてきた線量概念である防護量と実用量を含む放射線防護線量体系全体を説明し、その中で放射線健康リスクと関連のある線量概念である防護量(実効線量など)の成立の経緯について解説する。

I. 概 論

1. グレイとシーベルトが使用される分野

放射線被ばく量の指標である「線量」は、使用される分野と目的によって異なった単位が用いられる。例えば、放射線生物学、放射線物理学、放射線治療等の分野では主にグレイ (Gy) という単位が使用される。一方、通常の放射線防護の分野では、シーベルト (Sv) という単位を用いて線量が表されるが、医学検査による被ばくでも使用されることがある。なお、放射線による被ばく事故の線量を表す場合、被ばく状況によりグレイまたはシーベルトが用いられる。グレイは、放射線による単位質量あたりの吸収エネルギーを表現する基本的な物理指標である「吸収線量」という概念に使用される単位である。シーベルトは、人の放射線健康リスクと関連を持つ放射線防護の線量概念に用いられる単位である。

2. 放射線防護に使用される種々の線量の関係

放射線防護に使用される線量概念には、大きく分けて2種類の量がある。ひとつは国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) が定義する「防護量」(protection quantity)であり、もうひとつは国際放射線単位および測定委員会 (International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU) が定義する「実用量」(operational quantity)である。防護量は、線量当量の概念から始まり、実効線量当量を経て、等価線量、実効線量へと発展した線量概念であり、人の放射線健康リスクと関連付けた指標として、放射線防護のために線量限度と比べる量である。一方、実用量は、最大線量当量 (maximum dose equivalent: MADE) に始まり、線量当量指標を経て、場のモニタリングのための周辺線量当量および方向性線量当量、また個人モニタリングのための個人線量当量が用いられるようになった。

防護量である実効線量と等価線量、臓器吸収線量は、照射条件がわかれば計算で求めることができる量である。しかし、これらの量は実測可能な量ではないため、放射線モニタリングには直接使用できない。そのため、防護量の評価のために実用量が、ICRP の1977年の勧告 (ICRP Publication 26) に応じて開発された。この実用量の目的は、防護量の推定値を提供すること (ICRU Report 39と ICRU Report 43) と、モニタリングに用いる線量計の校正目標量として使用することである¹⁾。

実用量は、場のモニタリング用 (エリアモニタリング) として周辺線量当量と方向性線量当量が使用され、人体の装着する個人線量計を用いる個人モニタリングには個人線量当量が用いられる。実用量は、防護量の推定値を適切に表す測定可能な量として、防護量を下回らないように設定されている。しかし、人体の後方から放射線が入射するような場合には、個人線量当量は実効線量よりも明らかに小さな値を示すことがあることも注意が必要である。放射線防護に直接係わる防護量と測定に係わる実用量は、放射線に関する基本物理量 (フルエンス、カーマ、吸収線量など) と計算 (換算係数^{a)}) によって関連付けられる。これら3者の量の関係を第1図に示す。

第1図 放射線防護に係る三種類の量の関係

The Concept of Dose System for Radiological Protection –Radiological Protection Quantity ; Working Group on the Concept of Dose under the Division of Radiation Science and Technology.

(2012年 11月14日 受理)

^a 換算係数は、物理量である粒子フルエンス、または同様に物理量である自由空気中の空気カーマで規格化されて表現される。

Ⅱ．防護量の概念

1. 防護量の体系

防護量は、物理量を基本として放射線健康リスクと関連性を持たせた指標であると考えることができる。被ばくを受ける各器官または組織の防護量が等価線量であり、全身の防護量が実効線量である。

等価線量 H_T は、組織・器官の放射線 R による平均吸収線量 $D_{T,R}$ を放射線生物学の知見に基づき、放射線の種類の違いによる確率的影響と関連を持つ放射線加重係数 w_R で加重合計した量であり、(1)式で表される。

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (1)$$

実効線量 E は(2)式に示すように、組織・器官の確率的影響に関する放射線感受性を示す組織加重係数 w_T を用いて、等価線量 H_T を加重合計したものであり、確率的な健康影響と関連を持つ指標と考えることができる。

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (2)$$

以上で述べた防護量の体系を第2図に示す。

2. 放射線加重係数

組織・器官の吸収線量が同じでも、放射線の種類が違くと影響も違ってくる場合がある。放射線加重係数は、放射線防護上で最も大きな関心事である確率的影響に焦点を当て、放射線の種類の違いによる差を補正するための係数である。この放射線加重係数は、これまでに様々な議論や変更を経て現在使われている形になった。以下に、その経緯を解説する。

放射線加重係数 w_R の設定においては、低線量被ばくの確率的影響に関する生物効果比 (relative biological effectiveness: RBE) の最大値 RBE_M が重要な意味を持っている²⁾。RBE の概念は、1931年に Fillia と Henshaw が放射線生物学の分野で最初に使用した³⁾。次に1945年には、Cantril と Parker が異なった種類の放射線からの害

(harm) の程度を比較する生物学的な相対係数 (relative biological factor) を示した⁴⁾。放射線防護の分野では、ICRP が1950年の勧告で基準放射線 (0.5 mm 厚白金で覆ったラジウムからの γ 線) と同等の生物学的効果を起こす吸収線量の逆比として生物学的相対効率 (relative biological effectiveness) を定義した⁵⁾。また1954年には、ICRP は生物効果比 (relative biological effectiveness) という用語を用いた⁶⁾。

放射線生物学と放射線防護では、当初からやや異なった目的で RBE が使用されてきた。放射線生物学では、同じ生物学的影響を発生させる線質 (放射線の種類やエネルギー) の異なった2種類の放射線の吸収線量の比として扱われ、その値が関心の対象となった。しかし、放射線防護の分野では、RBE は線質の異なった放射線の吸収線量に乗じる係数として位置付けられ、放射線防護上関心のある線量範囲で、線質の異なる放射線による線量の比較と加算を可能にした。ICRU は、1959年に ICRU Report 9 で RBE は放射線生物学でのみ使用する用語とし、1962年には ICRU Report 10a で RBE の概念を放射線防護の目的では線質係数と呼ぶこととして、 QF という記号を提案した。この段階で、線質係数は放射線生物学的な評価値である RBE から分離された。1977年の ICRP 勧告 (ICRP Publication 26) では、線質係数を確率的影響に関連付けた係数とし、ICRU Report 19 では QF に替えて Q という記号を用いた。ICRU Report 40 では、ヒトのリンパ球の二動源染色体異常に基づく RBE_M のデータから線質係数 Q をマイクロドジメトリ^bで測定可能な線エネルギー y (細胞、細胞核レベルの微小体積中に吸収された電離放射線のエネルギーをその微小体積を横切る平均飛程長で割った計測量であり、確率分布を持つ統計量) の関数として提示した。1990年の ICRP 勧告 (ICRP Publication 60⁷⁾) では、線エネルギー y ではなく、 Q を水中の荷電粒子の線エネルギー付与 L (Linear Energy Transfer: LET; ある物質中を通過する荷電粒子が経路の単位長さあたりに失う平均エネルギーであり、統計的確率密度分布は持たない量) の関数に変換した $Q(L)$ を勧告した。それに加え、放射線防護の現場での便宜性の観点から、放射線加重係数 w_R という新たな係数を導入した。放射線加重係数は、外部被ばく、内部被ばくを問わず、線質による効果の違いを表すため組織・器官の平均吸収線量に掛けて防護量である等価線量の計算の目的に用いられる係数であり、線質係数と似た概念であるが、LET の関数という概念から切り離されている点が大きく異なる。一方で、線質係数 $Q(L)$ は実用量の計算に引き続き用いられる係数となった。ICRP

第2図 防護量の体系

^b 放射線による生物影響を調べる手法の一つで、細胞、細胞核、染色体、DNA など微小なターゲットへの放射線損傷のメカニズム等を研究するための微視的な吸収線量計測学の分野。

の1990年勧告の段階では、放射線加重係数 w_R と線質係数 $Q(L)$ の整合性は十分には考慮されていなかった。しかし、ICRP の2007年勧告では、整合性を考慮して、中性子と陽子の放射線加重係数の値を線質係数 $Q(L)$ との整合性が取れる方向で変更された。ICRP の2007年勧告 (ICRP Publication 103⁸⁾) の放射線加重係数の値を第1表に示し、中性子の放射線加重係数を第3図に示す。

3. 組織加重係数

放射線加重係数 w_R は、確率的影響に関して組織・器官に依存せず放射線の種類だけに依存する係数である。他方、人体の組織・器官に割り振られた組織加重係数 w_T は、確率的影響に対する相対的な放射線感受性を表す係数であり、合計すると1になるように設定されている相対値である。組織加重係数は、等価線量から実効線量を求めるために導入された係数である。

組織加重係数は、組織・器官ごとのがんや遺伝的影響などの確率的影響から評価した係数として、当初“weighting factor (荷重係数と訳していた)”という名称でICRP の1977年勧告 (ICRP Publication 26) で導入された。その後、原爆被爆者等のがん死亡率等の疫学データ等の改定に基づいて、1990年勧告 (ICRP Publication 60) で数値が改定され、2007年勧告 (ICRP Publication 103) でも、致死がん・非致死がんの罹患率、致死割合、寿命損失および生活の質 QOL (Quality of Life) を考慮したなど、疫学データ等の改定に基づいて再度改定された。ICRP の2007年勧告で使用された組織加重係数の求め方を第4図に示す。

第1表 ICRP の2007年勧告の放射線加重係数

放射線の種類	放射線加重係数
光子	1
電子とミュオン	1
陽子と荷電パイ中間子	2
α 粒子, 核分裂片, 重粒子	20
中性子	第3図に表示

第3図 ICRP の2007年勧告の中性子の放射線加重係数

第4図 ICRP の2007年勧告における組織加重係数の求め方

1990年勧告から2007年勧告への大きな変化は、放射線誘発遺伝性疾患はヒトでは実証されていないことが原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) の2000年報告書⁹⁾で結論付けられたこと、遺伝的疾患のリスクが下がったこと、乳房のがんリスクが増加したことであり、それらは組織加重係数の数値改定に反映された。両勧告の組織加重係数の値を第2表に示す。

このように、防護量である等価線量および実効線量を求めるために使用される2種類の加重係数は、がんや遺伝性疾患などの確率的影響に関連した係数であり、白内障、皮膚・骨髄障害など発生するしきい値 (しきい線量) を持つ確定的影響 (組織反応) を反映した係数ではない。しかし、組織反応のRBEは一般的に、確率的影響を反映した放射線加重係数よりも小さい値であるため、放射線防護の対象となる被ばくでは、組織反応 (確定的影響) に対する眼と皮膚の線量限度は、放射線加重係数を使用した等価線量で表されている。

第2表 組織加重係数の値

組織加重係数 w_T	ICRP の1990年勧告で該当する組織又は器官	ICRP の2007年勧告で該当する組織又は器官
0.20	生殖腺	—
0.12	赤色骨髄、結腸、肺、胃	乳房、赤色骨髄、結腸、肺、胃
0.08	—	生殖腺
0.05	乳房、甲状腺、食道、肝臓、膀胱	—
0.04	—	甲状腺、食道、肝臓、膀胱
0.01	骨表面、皮膚	骨表面、皮膚、脳、唾液腺
	残りの10組織・器官: 0.05 副腎、脳、大腸上部、小腸、腎臓、筋肉、脾臓、脾臓、胸腺、子宮	残りの14組織・器官: 0.12 副腎、胸腔外 (ET) 領域、胆嚢、心臓腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、脾臓、前立腺、小腸、脾臓、胸腺、子宮頸部

Ⅲ. 防護量と放射線健康リスク

防護量は、確率的影響による致死率などの放射線健康リスクと関連を持つ指標であると考えられる。ICRP は 2007 年勧告で、約 100 mSv を下回る低線領域において、確率的影響であるがん又は遺伝的影響の発生確率は、臓器または組織が受ける等価線量の増加に正比例して増加するという見解を支持すると表明している。そこで ICRP は、通常の放射線管理の対象となる 100 mSv 以下の被ばく線量域では、受けた線量と確率的影響の発生率に比例関係があるという線形しきい値なしモデル (Linear Non Threshold model: LNT モデル) の仮説に基づいて実用的な放射線防護を行うことを勧告している。原子力安全委員会は ICRP と UNSCEAR に基づいて、低線量影響について以下のようにまとめている¹⁰⁾。すなわち、広島や長崎での追跡調査に基づく疫学データの結果からは、100 mSv を超える被ばく線量では被ばく量とその影響の発生率との間に比例性があると認められているが、100 mSv 以下の被ばく線量では、発がんリスクが見込まれるものの、統計的な不確かさが大きく疫学的手法によって発がん等の確率的影響のリスクを直接明らかに示すことはできない。防護量は、まさにこのような低線量域での人体の防護を検討する際に使用する線量概念である。

— 参 考 資 料 —

- 1) International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74, Pergamon Press, Oxford, (1997).
- 2) International Commission on Radiological Protection, "Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (w_R)", ICRP Publication 92, Annals of the ICRP, 33(4), Elsevier Science Ltd, Oxford, (2003).
- 3) G. Failla, P. Henshaw, The relative biological effectiveness of X rays and gamma rays, *Radiology*, 17, 1-43 (1931).
- 4) S. T. Cantril, H. M. Parker, The Tolerance Dose, U.S. Atomic Energy Commission MDDC 1100, Technical Information Division, Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tenn., (1945).
- 5) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Brit. J. Radiol.*, 24, London, 1950, and 1951, *Am. J. Roentgenol.*, 65, 99 (1951).
- 6) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Brit. J. Radiol.*, Supp., No. 6, London, (1955).
- 7) International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21(1-3), Pergamon Press, Oxford, (1991).
- 8) The 2007 Recommendations of International Commission on Radiological Protection ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, 37(2-4), Pergamon Press, Oxford, (2007).
- 9) United Nations Science Committee on the Effect of Atomic Radiation, Source and Effects of Ionization Radiation, Vol. II Effects, 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes United Nation, New York, (2000).
- 10) 原子力安全委員会事務局, 低線量放射線の健康影響について, 平成23年10月24日改定.
(<http://www.nsc.go.jp/info/20110526.html>)