

線量概念の問題点

神戸大学大学院海事科学研究科

小田 啓二

1. はじめに

「放射線に関する量と単位はややこしい」と一般の方々や保健物理・放射線計測等の科目を受講する学生からの文句だけでなく、関連分野の専門家からお叱りや厳しい意見を頂戴する。放射線防護に用いられている量を含めて、現在の線量体系には多くの問題が残されていることは確かであり、できるだけ矛盾がないシンプルなシステムに改善する必要があることは言うまでもない。しかしながら、一方で、疫学研究や放射線治療などの分野において、放射線防護に用いられる量（防護量）が本来持っている意味や防護量が適用される範囲を超えて使用されることがしばしば見受けられる。つまり、ユーザーの方にも問題がない訳ではなく、それは線量概念が正しく理解されていないことに起因しているのではないかと推察する。

本稿は、放射線防護に用いられる線量の定義・概念とその問題点を整理することを目的としている。

このセミナーが出版される頃には、ICRP は新しい勧告を出しているはずである。その中の線量に関する記述の全文は執筆時現在では確認できないが、これまでの作業状況に関する情報から、2007 年 1 月のドラフトと大きな変更がないと思われる。こうした ICRP の動きも睨んで、日本保健物理学会では、2005 年から 2007 年まで、「放射線防護に用いる線量概念の専門研究会」を設置し、これまでの変遷から問題点を抽出し、線量のあるべき姿について議論してきた。本稿ではそれらの一部も紹介しながら解説する。

2. 放射線防護に用いる線量

2.1. 線量の歴史

これまでの放射線防護のための線量体系の歴史を振り返ると、線量概念に関して 3 つの大きな変化があったと考えている。線量体系の歴史は「レントゲン」単位の設立（ICRU, 1928）に始まるが、「線量当量」の定義まで（ICRU, 1962）の間に、原型がほぼ確立されたと言えよう。放射線防護上最も重要なことは、線質による放射線影響の違いを補正するために導入された「RBE 線量」が「放射線生物学」と「放射線防護」の両方に使われて混同されてしまったことから、後者専用の量として「線量当量」が定義されたことである。その後、1970 代後半まで新たな線量の定義はないが、ICRU や ICRP のレポートでは、「照射線量」、

「吸収線量」および「線量当量」定義の改訂・明確化に加え、「カーマ」概念の確立、さらに、線量当量の持つ意味、評価手法や不確定性（誤差）に関する熱心な議論が行われるとともに、線質係数の見直し等の整備がなされている。

そして、ICRP26（1977 年）における「実効線量当量」の提案と、実測不可能なこの量の評価のために導入された Operational Quantities（実用量）の定義（ICRU39, 1985）に至る一連の顛末が2つ目の大きな転機であった。我が国でも法令取り込みに関して、「従来の安全管理体制の何処がまずいのか」、「どこまでの精度で評価するのか」など議論が湧出した。新しい概念の導入に異論があったものの、放射線防護の上では、外部被ばくと内部被ばくを統一的に扱える（合算できる）と言う意味で、概念上の大きな進展であったと考えられる。

最後の変化は ICRP60（1990 年）における新たな「組織当たりの量」（等価線量と実効線量）の定義である。「放射線防護に用いる量は、着目する或る一点でなく、組織や臓器について考えるべきだ」とし、着目点で定義されているこれまでの量と組織当たりの量とを区別し、放射線防護の目的には後者を用いることとし、さらにこれを強調するために新たな名称を提案したのである。十分な議論がなされないまま導入された感の強いこれらの防護量と係数（特に、放射線荷重係数）は、従来のいくつかの問題や矛盾が解決され、より良い防護体系の構築に向かっていった状況を、「実用量である〇〇線量当量」と「防護量である〇〇線量」のダブルスタンダードを不必要に顕在化させ、再び混乱に陥れたようである。これらの導入の必要性およびその後の波紋の大きさを考えると、この妥当性に対して今でも疑問を抱いているのは筆者だけではない。

2.2. 現在の線量体系

以上のような経緯で構築されてきた現在の放射線防護線量体系においては、用いられる諸量の関係を図1のようにまとめることができる（ICRP74, 1996 を一部加筆）。諸量は、1）「フルエンス」や「カーマ」、「吸収線量」などの物理量、2）放射線防護の目的のために用いられる「等価線量」と「実効線量」、および、3）防護量の測定・評価のために必要な計測実用量（「周辺線量当量」、「個人線量当量」、法令上の「1センチメートル線量当量」など）の3つに分類することができる。

例えば、管理区域の設定や遮へい設計の場合のように、ある場所での物理量と照射条件（方向など）が定

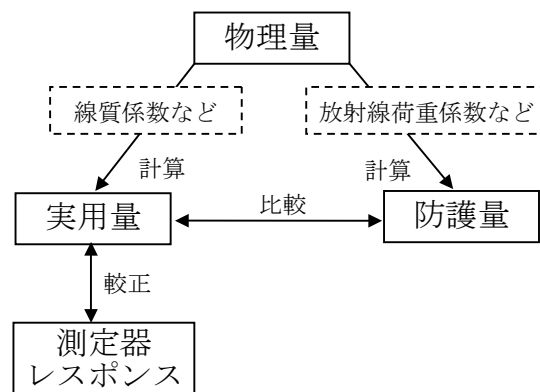


図1. 物理量、防護量および実用量の関係。

まれば、放射線荷重係数や組織荷重係数を用いて防護量を計算することができる。また、同様にして、線質係数等を用いることによって実用量も計算できるので、実用量>防護量の関係が保持されるかどうかのチェックが可能である。

一方、実際の線量測定はサーベイメータや個人線量計等を用いて行われるが、これら測定器のレスポンスは、実用量に合わせるよう較正することとされている。従って、実際の放射線安全管理においては、測定器のレスポンスから実用量を求め、それから防護量を評価するという手順となっている。国内法令では、例えば管理区域に関する条項において、「外部被ばくにかかわる実効線量の測定は、1センチメートル線量当量とする」という記述は、「実効線量は実測できないので、代わりに（適切な測定器を用いて）1センチメートル線量当量を測定し、その値を実効線量の値として記録しておく（ $\because$ 多くの場合、1センチメートル線量当量>実効線量なので）」ということを意味している。

2.3. 物理量

ICRP が定義している物理量は線量体系の最も基本的な量であり、その中でも、放射線場そのものを表す Radiometric quantity である「フルエンス」、及びその場に置かれた物質内のエネルギー移動に関する Dosimetric quantities である「カーマ」と「吸収線量」は、その他の防護量と実用量を導くのに不可欠である。

これらは物理的に明解に定義されているので、大抵の参考書・テキストで正しく記述されている。従って、本稿では詳細は省略するが、学生諸君からしばしば質問される以下の2点について補足しておきたい。

α 線や β 線のような荷電粒子は直接物質中の原子と衝突して電離を引き起こすのに対して、 $X \cdot \gamma$ 線や中性子のような非荷電粒子は、例えば光電効果や (n, p) 反応等の相互作用を通して二次荷電粒子を放出させ、この二次粒子が電離を行う。このように、間接電離放射線場に曝された物質内では、一般に、入射一次粒子から二次粒子へのエネルギー転換 (transfer)，及びそのエネルギーの物質への沈着 (deposition) という2段階を経ることになる。これが、単位質量当たりのエネルギーで定義する線量（前者のエネルギーに関連する量が「カーマ」、後者が「吸収線量」）が2つ必要な理由である。

また、カーマについては、次式で表されるように、放射線場に関する「エネルギーフルエンス」と、物質内のエネルギー移動に関する「質量エネルギー転移係数」の積で表すことができる。

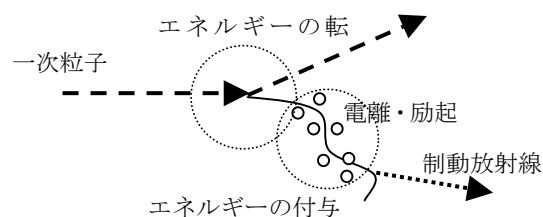


図2. カーマと吸収線量

$$K = \psi(\mu_{en}/\rho) \quad (1)$$

このことは、ある媒質中に異なる物質を仮想的に置くことが、概念上許されることを意味する。「自由空気中の空気カーマ」という一見奇妙な表現では、初めの空気は放射線場を、後の空気はエネルギー移動が起こる物質を表していることになる。

2.4. 防護量

ICRP60 で定義された防護量は、近々発表される新勧告にも引き継がれることになる。着目点あたりに定義されている前節の物理量および次節の実用量との大きな相違点は、「組織・臓器当たりの平均吸収線量」を基本としていることである。細部の問題点を除くと、「等価線量」と「実効線量」の定義式自体には疑問はないであろう。

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

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T \sum_R w_T w_R D_{T,R} \quad (3)$$

なお、放射線荷重係数は、対象とする臓器・組織に入射した放射線の種類によって決められている。

また、これら2つの線量に加えて、補助的な防護量として、「預託実効線量」および「集団実効線量」がある。前者は、内部被ばく時に、摂取した放射性核種による長期間にわたる被ばくを考慮するためのもので、成人については50年の積分値として算出される。後者は、ある集団の中で被ばく線量に関して分布がある場合の荷重和として導入された量であるが、新勧告では、被ばく期間、積算する被ばく線量の下限值と上限値を規定することになっている。

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \frac{dN}{dE} dE \quad (4)$$

2.5. 実用量

防護量に関する議論は、3.1, 3.4, 3.5節で詳述するが、放射線防護の実践上、最大の難点は、これらが人体（標準人）の組織・臓器当たりの平均吸収線量を基本としているので、実測不可能な量あることである。このために、ICRU は外部被ばくにおける計測量として、着目点当たりの吸収線量に基づく実用量を定義している。これらは、組織等価物質（ファントム）中のある深さの点における吸収線量を、荷電粒子の水中における LET の関数として値づけられた線質係数で荷重した線量当量である。

$$H = QD \quad (5)$$

現在使われている実用量（ICRU51, 1993）には、エリアモニタリングに用いる「周辺線量当量」と「方向性線量当量」、個人モニタリングに用いる「個人線量当量」がある。

なお、わが国の法令だけに現れる「1センチメートル線量当量」と「70 マイクロメートル線量当量」も（明確な定義はないが）実用量と位置づけられる。

2.6. 測定量から防護量へ

放射線防護の実践や放射線安全管理の目的のためには、放射線測定器で求めた測定値から被ばく量を評価する必要がある。図1を計測という立場からみると、あらかじめ実用量に合わせるように校正されているエリアモニタやサーベイメータのレスポンスから「周辺線量当量」や「方向性線量当量」を、あるいは個人線量計のレスポンスから「個人線量当量」が求められる。実用量が防護量を合理的かつ安全側に評価するとして、最終的に、これら実用量の値を「等価線量」および「実効線量」の値とみなして記録することになる。

以上が外部被ばくに関わる手順であるが、内部被ばくについては、実際には、ホールボディカウンタによって体内に残存する放射性核種の放射能を、あるいはバイオアッセイ法によって排泄物の放射能を測定し、代謝モデルを用いて被ばく者が摂取したであろう放射能を推定する。これに、放射性核種毎に、さらに化学的性状も考慮して与えられている「実効線量換算係数（Sv/Bq）」（ICRP68, 1994; ICRP71, 1995）を用いて「預託実効線量」を算出する。この手順においては、体内摂取量（放射能）が実用量の役割を果たすことになる。

3. 線量に関する論点、問題点および課題

線量については、これまでも多くの問題点が指摘されてきた。これらをできるだけ統一的に議論する目的で、日本保健物理学会「放射線防護に用いる線量概念の専門研究会」を設置した。2年間の議論では、残念ながら、現体系に置き換わるような新しい線量体系の構築には至らなかったが、問題点の整理といくつかの提言がまとめられた（報告書は日本保健物理学会ホームページより、<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jhps/j/issn-report/report2007-1.pdf>）。本稿では、それらの内、議論に費やされた時間が多かった論点を中心に、重要と思われる順番に紹介する。

3.1. 防護量の意味

これまで用いられてきた放射線防護量は、いずれも「吸収線量という明解に定義された物理量（単位は $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）」に、生物学的知見を基に定められた係数（無

次元) を乗じたもの」として定義されている。これら防護量は、確かに人体への影響の度合いを表すという意図で導入されているものの、個人の「人体影響」や「放射線障害のリスク」そのものを直接表している訳ではない。

「防護量はリスクを表すべきで、単位は無次元ではないか」という意見についても、既に 1970 年代に議論が行われている (ICRU19, 1973)。この時にも、放射線による損害を表す共通の物差しは未だ開発されていないため、 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ という単位を持つ荷重線量であるというのが結論であった。その後いくつかのチャレンジがあったようであるが、リスクを表す指標の確立は依然として成功していない。放射線の種類やエネルギーなどによる違い、内部被ばくと外部被ばく、線量率、部分被ばくと均等被ばくなどによる違い、生態影響の種類・性別・年齢・個体差などに違いなど、多くの因子を考慮した上で、放射線影響をひとつの単純な量や単位で表現することは非常に困難だからである。

不確かさに関する過去の ICRP 及び ICRU の記述を拾うと、「±30%の正確さが達成される」(ICRU20, 1971)、「不確定さ (uncertainties) は信頼度 95%でファクター1.5 を超えないようにすべきである」(ICRP35, 1982) などとなっている。おおよそ±30~50%以内であれば良いということであろうか。

以上のことから分かるように、少なくとも「放射線防護」上は、放射線影響を厳密に表現することを諦め、微妙な差異をある程度認めるような一種の割り切りを行っているのである。防護量はあくまで「人為的に決定した無次元荷重係数で重み付けした吸収線量」にほかならず、できるだけ少ない数の線量で合理的に放射線防護を行うためのツールであると理解すべきであろう。

なお、防護量は、あくまで放射線防護のための量であるので、明らかに障害が発生するか、或いは発生する恐れがあるような高線量域には適用しない。このような線量限度を超える場合には、被ばく者個人が受けた吸収線量（場合によっては、適当な RBE 値を用いて荷重した線量）を基本とした線量評価を行うべきである。

3.2. 実用量の必要性

実用量の必要性については、多くの疑問や問題点が指摘された項目である。典型的な意見は以下の通りである。

- 1) 防護量とのダブルスタンダードとなっており、線量体系を複雑にしている
- 2) 物理量を測定できるので、測定値から実効線量（防護量）への直接経路がないのはおかしいではないか
- 3) 測定器のレスポンスを実効線量（例えば AP ジオメトリ）への換算係数に合わせれば良いのではないか（実用量は要らないのではないか）

「実用量」という表現は、確かに ICRP39 (1985) に現れているが、「測定のための量」という考え方は、既に ICRU20 (1971) 当時から存在していた。線量限度が人体内の組織・臓器（当時は決定臓器）の線量、即ち「直接測定できない量」で決められた場合、サーベイメータや個人線量計による測定からどのように人体内の線量を評価するかという問題である。この解決のために導入された測定するという立場からの量が、実用量という考え方であり、過去の照射線量、円柱ファントム中の最大線量当量 (MADE, ICRU20)、線量当量指標 (ICRU 球中の最大線量当量, ICRU25, 1976) など、広義の実用量であると考えることができる（詳細は吉澤氏の講演に譲る）。

放射線安全管理上、実測（モニタリング）による確認が不要となることはない。従って、測定値と防護量を結びつける「実用量」の概念は不可欠であるという結論が導かれる。ちなみに、上記 3) のアイデアは、AP ジオメトリの実効線量への換算係数と全く同じ係数を持つ新たな実用量を提案していることになる。

しかしながら、現在の実用量に問題がない訳ではない。本稿では説明を省略するが、少なくとも以下のような課題を指摘することができる。

- 4) 測定のための量であるが、実際には定義通りに測定することはほぼ不可能である
- 5) 周辺線量当量と個人線量当量の区別は必要か
- 6) エリアモニタリングと個人モニタリングで異なったファントムが使われている
- 7) 中性子の一部や高エネルギー粒子について、実効線量を安全側に評価していない場合がある

3.3. 荷重係数の問題点

第 2 節で復習したように、吸収線量から防護量および実用量を求めるに当たり、いくつかの荷重係数が用いられる。これらについては、以下のような疑問点および問題点が指摘される。

- 1) 各々の係数の根拠となっている生物データが明確ではない
- 2) 放射線荷重係数の biolocality (両地点性)
- 3) 線質係数 $Q(L)$ と放射線荷重係数 w_R の二本立てのシステムとなっており、整合性が薄い

ICRU40 (1986) では、線エネルギーに関係づけられた線質係数 $Q(y)$ については、リンパ球の二動原体染色体異常の発現率との関連性が記載されているのに対し、 $Q(L)$ と w_R の根拠となる生物学的が明確でない点 (ICRP60 では、確率的影響の低線量域での RBE 値を代表しているとは書かれている) および係数値の決

定プロセスの説明が不足している点は、今後も禍根を残すであろう。

放射線荷重係数は、実際にエネルギーが吸収される点ではなく、人体への入射時の放射線の種類・エネルギーで一義的に定義されている。このため、一次放射線が人体組織との相互作用の結果生じる二次放射線の影響を適切に表していないことになる。例えば、熱中性子による外部被ばくの場合には、組織・臓器内のほとんどの吸収エネルギーは二次 γ 線によって与えられるにもかかわらず、ICRP60 の定義では、放射線荷重係数は5となっていた。bilocality は $Q(L)$ と w_R の不整合性にも関係しており、特に中性子に対する放射線荷重係数の見直しの動機となった。

図3は、ICRP 新勧告において変更される中性子に対する放射線荷重係数である。反跳プロトンと捕獲 γ 線の寄与への配慮がなされたものの、これまでの継続性が重視されているため、2つの係数は依然として一致しないままとなっている。

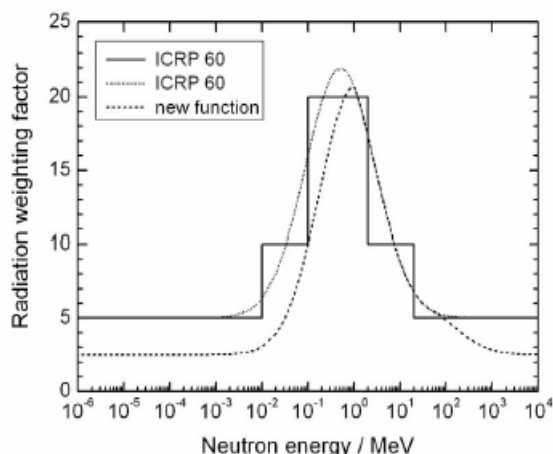


図3. 中性子に対する放射線荷重係数の見

3.4. 等価線量に関する議論

論点が防護量に戻るが、ここでは各々の線量に関する個別の議論として紹介しておく。等価線量に関する問題点は、およそ以下の2つに集約できよう。

- 1) 実効線量の算定のための中間量でしかない（他の用途では用いない）
- 2) 確定的影響のための防護量として適切か

これらはいずれも、放射線荷重係数が、「低線量における確率的影響の誘発に関する RBE 値を代表している（ICRP60）」ことに関連している。もし実効線量を求める場合には、(3)式の途中を省き、右辺（二重和）とすれば良いのでは、というのが1)の趣旨である。性差の平均化の場合や内部被ばくにおける線量計算の際に必要なであるとの意見もあるが、それだけで必要性を説明することは難しいと思われる。

2)は、放射線荷重係数が確率的影響に関するデータに基づいているにもかかわらず、等価線量が確定的影響のための防護量として用いられていることへの疑問である。これは、確率的影響に対する放射線荷重係数が確定的影響に対する RBE より大きいということから、放射線荷重係数を使うことが安全側（保守的）な評価となっていることに基づいている（ドラフト段階での意見が取り入れられ、ICRP 新勧告ではこの注釈が加えられる）。確かに矛盾している点是否

めないが、確定的影響のための防護量として、新しい名称の線量を導入したとしても、それが決定打とはならないし、逆に防護量が複雑になってしまう。よりシンプルな体系のためには、少しの矛盾に目をつむり、確定的影響のための防護量の代用であると割り切る方がベターであるとの判断である。

なお、実効線量（単位 Sv）との区別を強調するために、新たな名称の単位を導入してはという意見もあるが、やはり上と同様な理由により、現状のままで構わないという結論である。

3.5. 実効線量および集団線量に関する議論

本項目に関する最大の論点は、「誰の実効線量か」という点である。換言すれば、放射線作業従事者が装着した個人線量計による測定値から評価した実効線量はどのような意味を持っているかということである。この疑問に対して、ICRP 新勧告ドラフトではある程度の解答を示しており、「実効線量は特定の個人の線量ではなく、標準人（reference person）の線量である」としている。即ち、特定の個人と一緒に行動した標準人が被ばくにより背負い込んだ（将来にわたる）放射線影響の目安の期待値（nominal な値）であるということになる。なお、すべての係数が平均値（nominal 値）となっているため、実効線量に関する不確定さ（誤差や精度）は議論してもしかたない。

新勧告ドラフトでは、実効線量の適用範囲を明確に言及している。利用目的については、

- ・防護の計画や最適化のための prospective な線量評価
- ・線量限度遵守確認のための retrospective な線量評価

の2つを挙げている。後者は、低線量域での放射線防護の道具（instrument）、つまり、線量限度と比較するための量であるということを意味している。一方、不適切な使用に関しては、

- ・放射線リスクの疫学研究には用いない
- ・被ばくした特定の個人の発ガンや死亡確率の評価には用いない

と具体的な注意点を与えている。

また、医療被ばくにおいては、異なる治療手順の比較、異なる施設における同様な技術の比較、同じ検査に対する異なる技術の比較においては実効線量は意味があるものの、患者の被ばく計画や損益評価においては、等価線量や吸収線量を用いるべきである、としている。

最後に、集団線量の使用について、あくまで放射線技術や防護手順の比較など防護の最適化のための道具であり、疫学のリスク評価には用いないことを繰り返し述べている。大人口の trivial exposure を含む集団線量に基づくガン死亡計算は意味がないことを強調するために、(4)式で定義したように、積分範囲

を限定することにした。

4. おわりに（解決に向けて）

名著と言われる本や参考書の中にも、放射線防護に関する諸量について、曖昧な点や不適切な表現が見られるものがある。非難を覚悟で言わせて頂ければ、少なくとも防護量の定義と解釈に関する記述の多くは間違っていると思っている。例えば、ICRP は、「〇〇量は人体影響のリスクを表す」とは定義していない。あくまで、「吸収線量に〇〇係数を乗じたもの」としか定義していないのである。筆者もそうであるが、最初に使った教科書や参考書、講義ノート、講習会資料、受験テキスト等は、その後疑問に思った時や確認したい時に読み返すなど、後々まで使うような、個人にとっては一種のバイブルのような存在になるものである。もし、そのバイブルにミスがあったとしたら、それは本人のみならず次世代に継がれることになってしまう。

本稿は、放射線防護に用いられる線量の定義・概念とその問題点を整理することを目的とした。本来の定義はどうであるのか、それをどのように解釈すればよいか、さらに、その概念をどのように分かり易く伝えればよいか、改めて自分で考えて頂きたい。本稿がその手助けのひとつとなれば幸いである。

本稿で繰り返し述べたように、現在の防護量に放射線影響やリスクを表現する役目を期待することには無理があるし、多くの問題点や課題が残っていることも確かである。実用量を使わない体系や等価線量を除くなど、いくつか大胆な改革案も考えては見たが、すべての点で矛盾のない体系の構築には至らなかった。放射線防護という目的に限って言えば、色々な被ばくに対する加算性や比較可能であること等の意味で、現在の体系は、なかなか良くできているのではないかという結論に達した次第である。

一方、現在の防護量が放射線リスクを表現できないとしても、現実には、放射線診断（X線 CT、核医学など）の際に被るリスクを評価しなければならないというニーズがある。被検者に対する説明責任という意味でも、誰もが納得できる評価手法を確立しておかなければならない。例えば、臓器・組織の吸収線量が測定・算定できたとして、それに放射線荷重係数と組織荷重係数を乗じて実効線量を算出し、nominal リスク係数を掛けた値を「個人のリスク」だと表現することは適切ではない。できるだけ条件に近いデータやその臓器の確率係数を用いるとか、あくまで平均化された期待値であることを納得して他のリスクと比較しながら説明する、等と言った手法を開発すべきである。このためにも、関連諸学会が共同して、より適切な手法の確立に向けた活動に着手する必要がある。