資 料

放射線管理に用いる実用線量†

加藤和明

高エネルギー物理学研究所放射線安全管理センター

305 茨城県つくば市大穂 1-1

Key Words : radiation protection dosimetry, operational dose quantities, International Commission on Radiological Protection, International Commission on Radiation Units and Measurements, radiation protection regulations

1. 緒 言

ラジオアイソトープ〔学術用語としては放射性同位体(大学入試ではこう書かないと点がもらえない)、法律用語としては放射性同位元素(放射線取扱主任者等の国家試験ではこう書かないと点がもらえない)〕等の使用にさいして、国民を“放射線障害”から“防護”するための方策、すなわち「放射線障害防止法」と通常略称されているところの内容がこのたび大幅に改正となった^{1),2)}。

この改正は、国際放射線防護委員会(ICRP)が1977年に発表した(基本)勧告(の改訂)(およびその後に行われたいくつかの修正と声明の形でなされた小規模の勧告)の関係法令への取入れと、関係法令間のより一層の斉一化を図ることを主眼に、1986年7月になされた放射線審議会の内閣総理大臣を初めとする関係大臣への意見具申に基づいて行われたものである。

その結果、国策としての放射線安全管理システムは、「1センチメートル線量当量」、「3ミリメートル線量当量」それに「70マイクロメートル線量当量」という3種類の量でもって組み立てられることになり、それぞれの量について設定された限度値を超えないよう監視することが放射線管理の目標となった。

ICRPの1977年勧告³⁾(以下、「ICRP-77」と略記する)では、いわゆる確率的影響(stochastic effect)を受容可能なレベルにまで抑制することと、非確率的影響については関連臓器・組織への線量当量がそのしき

い値を充分下まわるように設定することをもって、放射線への被曝制限の具体的方策とし、確率的影響の測定として実効線量当量なる新量を導入したのであった。非確率的影響としては人体のすべての組織が考慮の対象となるが、眼の水晶体(白内障)と皮膚(皮膚の損傷)については放射線に対する感受性が比較的高いので、各臓器・組織に対する非確率的影響(障害)の発生防止策はこれら3ケースについて個別に与えられることとされている。

このようにICRP-77では、実効線量当量、身体任意の部位における線量当量、眼の水晶体の受ける(平均)線量当量、それに皮膚の受ける線量当量が線量として採用され、それぞれに年間の限度値が設定されたのであるが、残念ながらいずれの量も直接測定の対象としては適当でない。そこで、導入の意図においてこれらの量を良く代表するものであって、かつ放射線管理の現場で直接測定の対象となし得るような量を作り出す必要がでてきたのである。このようにして創出、導入された線量を実用線量とか実用線量当量と呼ぶ。

2. 基本線量と実用線量の間の関係

線量概念発展の歴史と実用線量導入の必要性

実用線量と呼ばれるものがあるということは、基本的(的な)線量と呼ばれてしかるべきものが存在するということである。

そもそも線量とは何か? また、基本線量と考えられるものは何か? さらに、基本線量があるのに何故また実用線量なるものの導入を必要とするのか? この章では、こういった問題を取り上げる。

放射線が種々の物体に作用してさまざまな影響・効果をもたらす現象を科学の対象とするには、その因果

† Practical Doses for Radiation Control. Kazuaki KATOH: KEK-National Laboratory for High Energy Physics, 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-Pref. 305, Japan.

関係を定量的に記述できることが必須であり、そのための原因の量として用いられるべき物理量を線量と呼んでいる。日本で線量と呼んでいるものは、英語で dose と言い、中国語では剂量と訳している。(dose を語源に忠実に訳せば投与とか投与量ということになり、薬学の分野では用量としている。)

最初に線量として導入された物理量は、空気のエ離能(電離密度)で、 1 cm^3 の空気に作用して生成される二次電子が空气中を飛行して作るイオン対の量を片方の電荷に着目して定量することにした。この線量が照射線量(英語では単に exposure)と呼ばれるものであり、電気量が1 esu(静電単位)あったときの照射線量を単位にとりレントゲン(R)と呼ぶことにした(今日の定義では $1\text{ R}=2.58\times 10^{-4}\text{ C/kg}$)。

照射線量は、光子線(X線、 γ 線)を対象に定義されたものである。人類の取り扱う放射線の種類が、 α 線、 β 線、中性子線と増えてきたとき、空気のエ離密度という形を残して照射線量の概念を改訂し、いかなる放射線に対しても適用できるようにすることは可能であった(実際、ドイツではこれを実行しイオン線量(Ionendosis)と呼んだ⁴⁾)⁵⁾が、歴史(といえるか、われわれの先人)は、放射線が物体にもたらす効果の原因量としてよりふさわしいと考えられ、適用性が放射線の種類や着目している物体を形成する物質の種類にかかわらず定義できる物理量であるところの、エネルギー吸収密度をもって新しい線量を作り出し、これに吸収線量という名を与えた。

エネルギー(という物理量)は電気(量という物理量)に比較してはるかに測定が難しく(というよりも、今日の測定技術ではエネルギーより電荷の方が感度・精度・難易度のいずれにおいても優っている)、エネルギーの吸収という概念に不透明さがつきまとう⁶⁾にもかかわらず、吸収エネルギーが種々の効果のもととして考え易いことと、適用性の広さから広く受け入れられるところとなった。ICRU が主導して作り上げてきた dosimetry の体系はこの後エネルギー(を基本に据えた)一元論を目指すことになる。

しかしながら、着目する効果の種類、放射線の種類や質の違いにより、同一の線量、すなわちエネルギー吸収密度、が与えられても効果(の大きさ、量)が必ずしも同一とならないことを知る。そこで吸収線量になんらかの荷重係数をかけることにより線量の規格化を行い、同一量の原因が同一量の効果を生む(same dose - same effect の原則といわれることがある)ようにしなければならない。

放射線防護のために作られた荷重線量が線量当量と呼ばれるものである。荷重係数は線質係数と呼ばれる。ICRU では線質係数以外の荷重係数(たとえば線量率に依存するもの)も導入できるよう可能性の枠をとってあるが実際に導入し、使用してきたのは線質係数と呼ばれるもののみである。線質係数は、吸収線量の元となっている“エネルギー吸収”が、(放射線が物質との相互作用を持った結果作り出した)荷電粒子(放射線自身が荷電粒子からできてくる場合は自身をも含む)によってもたらされるということを前提として、それらの物理的性質である線エネルギー付与(LET)の関数として定義された。LET というのは、荷電粒子が媒質中を通過するさい、その経路の単位長さ当たりに媒質に与えるエネルギーのことであり、線質係数の定義に用いるさいには媒質に水が採られている。視座を媒質から荷電粒子の側に移し、飛行行路の単位長さ当たりに荷電粒子が失うエネルギーを考えるとこれは阻止能に他ならない(厳密には、衝突阻止能が LET_w に等しい)。LET よりは阻止能の方が知名度が高いと見たのか、ICRU の最近の報告書⁹⁾では LET でなく衝突阻止能の方を採用している。

さて、このようにして導入された線量当量であるが、吸収線量も、その荷重係数である線質係数も、人体の各部位ごとに値が決められることから、線量当量自身も人体の各部位に値が対応していることになる。つまり、線量当量という物理量は人体の部位を変数とする一つの関数なのである。

線量当量は放射線防護のために導入した“原因の量”ではあるが、無数の数値の集合として与えられたのでは放射線管理はお手上げである。なんとか1個の数値に引き直さないことには放射線防護の現業には使えない。

実効線量当量というのは、放射線の人体全身にわたる作用の結果であるところの、確率的影響に対応させるための原因の量として導入されたわけであるが、その背景にはこのような事情があるのである。ただし、このような視点で実効線量当量を眺めると、その出来映えは芳しいものではない。空間内にかなりの容積を占める人体について、線量当量としての一つの数値を導出するとすれば道は二つだけである。すなわち、一つは全身についてのなんらかの平均値、二つは身体の中の特定の一点における値、を用いることである。ICRP が案出した実効線量当量は、体内の特定臓器いくつかについての平均線量当量の加重和として定義されており上のいずれでもない。強引にこじつけば、

重要でない部位にゼロという荷重係数を割り当てた全身加重平均値であるとの声も出るかも知れない。しかし、このような場合、感受性の一番鈍い部位の荷重係数を1とし、他の部位については感受性に見合う形で係数を定めるのが道理に適った方法であり、伝統的に確立されている手法である。大体ICRPの手法では、臓器の放射線に対する感受性について何か新しい知見が得られるたびに、荷重係数の割付けを全体にわたって仕直さなければならなくなる。相対リスクは総和が1になるものとして導入されているからである。

さて、ICRPが1977年勧告（およびそれ以降の発表になる修正や声明）で作り上げた放射線防護のシステム、すなわち人類を放射線の障害から護るためのシステムは、①全身についての線量である実効線量当量、②身体各部位における線量当量、③目の水晶体とか皮膚といった特定の臓器・組織についての線量当量、についてそれぞれ被曝の限度値を設け、これを逸脱することのないよう管理・監視を行わせるというものである。ここで、これら各種線量の測定についての技術的な実行の可能性(feasibility)が問題となる。

意図してか、意図せずかは分からないが、結果として、ICRPが導入したdosimetryの体系は、測定の立場をほとんど考慮せずに作られたものである。すなわち、それぞれの量の定義に忠実な測定は実際上不可能であるから、相対測定が可能であったとしても較正ができないのである。

こういう訳で、ICRPの意図するところ(spirit)は保存しつつ、現場が実際に対応できる、第二のdosimetry systemが必要となったのである。この第二のシステムに導入される線量を実用線量と呼ぶ。実用というものは、現場が曲がりなりにも測定評価できるということを願望込めて表現している。

そもそも、ICRPは被曝制限の体系作り、ICRUは線量計測(dosimetry)の体系作り、と役割分担が決まっていたはずなのが、近年それが乱れ、ICRPがdoseの概念に口を挟み、ICRUがその後始末をさせられているという印象を持つ。実用線量の体系としてICRUが勧告したのがICRU Reprt 39⁷⁾である。

3. ICRP-77 で使用を勧告されている実用線量

ICRP-77を記載している、ICRP Publication 26³⁾では、実用線量として、ICRUが1971年に発表した線量当量指標⁹⁾の使用を勧告・推奨している。

線量当量指標(dose equivalent index)というのは、

ICRUの球と呼ばれる、人体軟組織等価物質(ICRUの指定する重量比を持ち、密度が $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 (= 1.0 \text{ g/cm}^3)$ であるところの、水素・炭素・窒素・酸素より成る物質。ICRUは具体的な処方箋を示しておらず、いざこの物質を実際に入手しようすると当惑を覚えるのであるが、最近原研の城谷孝氏がこれについての素晴らしい研究成果を発表しており⁹⁾、この困難は著しく軽減されたと言える。)から成る直径30 cmの球状人体模型の中に受ける線量当量の最大値として定義されている⁹⁾。この概念はその後、ICRP-77で採用した放射線防護の新しい方策に合わせて、深部線量当量指標、表層部線量当量指標という、よりsophisticatedなものに発展させられた。すなわち、直径30 cmの球体を表面から1 cmの厚さの表層部と中心から半径14 cmの内球部に分離し、それぞれについての線量当量の最大値を採るという考えである。

表層部線量当量指標については、人体の皮膚にいわゆる不感部が存在することを考慮して、その後さらに表面から70 μm の深さまでの部分については最大値の探索対象から外すことになった。

このように、線量当量指標導入の歴史も、“精密化”を重ねるにつれ“複雑さ”の度合いを深めていったと言える。

4. 線量当量指標(という実用線量)の欠点

拡がりを持つ物体の中で線量当量の最大値を探し求めるというのは、頭の中では容易にできても実際に行うのは難しく、実用線量としてという導入の意図を考えるとまったく妥当性を欠く思いつきであった。

また、一般に放射線の場合は非定常、すなわち場の強度や性質が時間とともに変化し得るものであるし、場の成分、すなわち放射線の種類も1種類に限られるというわけではない。そうすると、ここに「量の加算性」が保証されないという、線量に用いる物理量としては致命的と思われる欠陥が露呈する。それはこういうことである。ある放射線場にたとえば1時間球を置いたときの線量を測定するのに、前半30分と後半30分に分けて測定した場合、それぞれの測定値の和が必ずしも正しい答えとならないし、中性子線と光子線から成る混合場ではそれぞれの成分について測定し合算するという通常の手法も、得られるものが必ずしも（というよりもほとんどすべての場合）真の値とならない。球の中で線量当量の最大値を与える点がそれぞれの場合に異なり得るからである。

5. ICRU が Report 39 で勧告した実用線量

指標量が加算性の条件を満足しないという欠陥を持つことが判明したので、ICRU ではより優れた実用線量の探索を始めた。

新しい実用線量を導入するにさいし、つぎのような条件をつけた¹⁰⁾。

- (1) ICRP の導入した放射線防護の方策を実現できるものであること
- (2) 理論（計算）でも実験でも値が求められること
- (3) 放射線場の一点に線量の値が一つ確定すること
- (4) 加算性が保証される量であること
- (5) 既存のほとんどの実用測定器が、重大な変更なく引き続き使用できるようなものであること

すでに知られている dosimetric quantities (ICRP Publication 51 では「線量計測量」と訳した) や考えつくものを片端しからチェックして行っただが、これらの条件のすべてにすんなり合致するものはなかなか見付からない。そこで、ICRP の方策を一部修正し、また、場所のモニタリングとヒトのモニタリングに用いる実用線量が異なってもよい、ということにした。すなわち、実際問題として、実効線量当量が ICRP の設定した限度を超えず、皮膚の線量当量がこれも ICRP の設定した限度を超えなければ、眼の水晶体の線量当量が ICRP の設定した限度を超えることはほとんどの場合ないとした上で、放射線場と線量の対応関係に解釈の上でのある種の割り切りを導入することにしたのである。

表 1 ICRU が実用線量導入にさいして考慮した条件

Desirable properties: (appr. order priority)
- Unified (apply to all radiations)
- Relatable to primary dose limits (no underestimate, little overestimate)
- Durable (not changing rapidly with time)
- Additive (e.g. possible to integrate simply)
- Measurable (with practical instruments)
- Compatible with existing instruments
- Calculable with little cost
- Punctiform (related to the radiation field at a point)
- Based on the ICRU sphere
- Physically realizable at standardizing laboratories (existing at a point in the phantom)
- Single valued (one value for each point in space)

このようにして、ICRU は Report 39 で、周辺線量当量 (ambient dose equivalent), $H^*(d)$, 方向性線量当量 (directional dose equivalent), $H'(d)$, 個人線量当量 (透過性) (individual dose equivalent, penetrating), $H_p(d)$ それに個人線量当量 (表層性) (individual dose equivalent, superficial), $H_s(d)$ という 4 種類の実用線量を導入した。 H^* と H' は ICRU の球と呼ばれる直径 30 cm の球形ファントム, H_p と H_s は人体そのものについてのものであり, d は入射放射線に向う主軸上の表面からの深さを表わす。 $H^*(d)$ と $H'(d)$ は場所のモニタリング用, $H_p(d)$ と $H_s(d)$ が個人モニタリング用であり, $H^*(d=10\text{ mm})$ は実効線量当量 H_E に対する実用線量, $H'(d=70\text{ }\mu\text{m})$ は皮膚の線量当量に対する実用線量である。また, H^* の使用に当たっては, 線量評価している空間の一点にある放射線場がその場に持ち込まれた人体なり, 人体を模擬するファントムなりの全体にあまねく及んでいる (放射線場の拡張とか拡張場と呼ばれる) とし, また, 空間中の着目している一点 (を中心を持つ微小球) に流れ込む放射線はすべて一方向から揃ってやって来ると見なす (放射線場の整列化と呼ぶ) という割り切りが導入されている。 H' については場の拡張 (という割り切り) だけが導入され, 場の整列化の方は取り込まれない。

ICRU はまた Report 39 で, 放射線に感受性を持つ皮膚 (の小面積) の受ける線量当量が, 均一で単一方向の放射線場におかれたある身体の向きに対する実効線量当量の 10 倍以上であるとき, この放射線を弱透過性と呼び, 10 倍未満であるとき強透過性と呼ぶことにした。

このようにして, 個人モニタリングに用いる実用線量としては, 強透過性放射線に対して $H_p(10\text{ mm})$, 弱透過性放射線に対して $H_s(0.07\text{ mm})$ が勧告された。

ICRU では, これらの新線量導入について, 導入の背景にある考え方の補足説明や関連するデータなどを, Report 39 を含めて 3 部作として発表する予定と聞いている¹⁰⁾が, 後の 2 冊について 1988 年 8 月現在まだ公表されていない。

6. 今回改正された放射線障害防止法等で 使用している実用線量

最初に述べたように, 今回の改正法令では 1 センチメートル線量当量 (以下 $H(10)$ と略記), 3 ミリメートル線量当量 (以下 $H(3)$ と略記), 70 マイクロメートル線量当量 (以下 $H(0.07)$ と略記) という 3 種類

表2 公表されている資料に見る、1センチメートル線量当量などの定義

外部被曝における線量当量の測定・評価マニュアル	
「1 cm 線量当量は身体を模擬した ICRU 球の深さ 1 cm における線量当量である。」(p. 13)	
「…ICRU 球を均一強度分布の平行ビームで全体照射したときの照射側 1 cm の深さの吸収線量に線質係数を乗じることにより得られる線量当量を 1 cm 線量当量と定義…」(p. 15)	
「…1 cm 線量当量は、数値的には $H^*(10)$ と同一であり、面平行ビームで主軸方向に照射された場合は、 $70\mu\text{m}$ 及び 3 mm 線量当量は $H'(0.07)$ 及び H' の値と同一である。」(p. 124)	

の新線量が、実用線量として採用されている。

1989年4月1日以降、わが国ではこれらの量をベースに現場での放射線管理測定が行われることになる。誤解や混乱を避けるには、これらの量の定義が厳密に与えられることが望ましいと考えるが、法令でそれを示すというのは技術的に（あるいは慣例的に）困難なようで、法令で見ることができるのは、このような名称の量をこれから使用するという点だけである。行政当局としては、手引書のようなもので一般への周知徹底を図る方針のようで、実際、科学技術庁原子力安全局放射線安全課の指導の下に、財団法人原子力安全技術センターから、今回の法改正に伴って必要となる各種測定についての解説が3冊のマニュアルとして発行された¹¹⁾。

そこで、そのうちの1冊、「外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」から導入された実用線量についての記述を探してみるとしよう。まず13頁に「1 cm 線量当量は身体を模擬した ICRU 球の深さ 1 cm における線量当量である」という記述が出てくる。なるほど、日本語としては完璧な文章なので分かったように思えてくる。しかし一息おいて考えてみると、1 cm の深さの点の一つではない。無数にあるどの点を採用ののだろうか？ それとも 1 cm の深さにおける線量当量の平均値を使えということなのだろうか？ そこでさらに先に読み進めて行くと15頁につぎのような記述を見る：「…ICRU 球を均一強度分布の平行ビームで全体照射したときの照射側 1 cm の深さの吸収線量に（その間のその点における）線質係数を乗じることにより得られる線量当量を 1 cm 線量当量と定義…」（括弧内筆者補足）。これで 1 cm の深さの点は放射

線の入射方向に主軸をとって定めるのだなと知るのだが、待てよ、放射線場は何も均一平行ビームとは限らないではないか、多方向からやって来る場合はどう考えれば良いのか、とやはりすっきりしない。仕方がないのでさらに読み進めて行くと124頁にこう書いてある：「…1 cm 線量当量は、数値的には $H^*(10)$ と同一であり、面平行ビームで主軸方向に照射された場合は、 $70\mu\text{m}$ および 3 mm 線量当量は $H'(0.07)$ および $H'(3)$ の値と同一である」。マニュアル（外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル）にある、1 cm 線量当量の定義にかかわる記述は以上ですべてである。

数値がある物理量のそれに常に等しく、単位も同じであるなら、二つの量は同一のものであるといて良い。したがって、新法令で使用されている3種の実用線量、 $H(10)$ 、 $H(3)$ 、 $H(0.07)$ は、ICRU が場所のモニタリング用に導入した実用線量、 $H^*(10)$ 、 $H'(3)$ 、 $H'(0.07)$ であることが判明した。

これより、法令にある3実用線量を場所のモニタリングに使用しようとするときには、放射線場の拡張とか整列化といった、ICRU によって導入された新しい概念も当然適用されるものと考えられる。

注意を要するのは、 $H(10)$ の方は、空間中の関心の一点にやって来る放射線をすべて集めて一方向からやって来るものと見なして ICRU 球中の特定点での線量当量を評価することを要求し、一方、 $H(3)$ と $H(0.07)$ の方は、放射線の寄せ集めは必要としない代りに、空間中の同じ一点についても方向によって値が変わるということである。

放射線場（の関心ある1点）に（球の中心を合わせて）ファントム ICRU 球を置いたとき、球の中心点における放射線粒子束密度は、球の持ち込まれないときと持ち込まれたときで一般に値が異なるし、球表面における粒子束密度の全表面にわたる積分値とも一致しない。球内の任意の点におかれた微小線量当量計は、特定の表面位置から入射した放射線に対してのみ感度を持つということがないから、放射線場に ICRU 球を実際に持ち込んで 1 cm の深さにあるどこかの点に微小線量計を埋設するという手法では $H(10)$ は実測できないのである。

ICRP Publication 51 等で説明されているように、単位量のフルエンスを前方照射、後方照射、回転照射、方向分布がランダムになるよう照射した場合、前方照射の場合に一番高い値を与えるが、だからと言って、測定値が最大となる方向に主軸をとり、そ

図1 ICRU 球の深さ1cmにおける周辺線量当量と方向性線量当量の比とその算定に用いられたモデル

れで $H(10)$ を測定したからといって、 $H(3)$ および $H(0.07)$ の場合と違い、安全側に答が得られることにはならない。

したがって、場所のモニタリングのために $H(10)$ を測定するには、相対感度のエネルギー依存性が $H^*(10)$ のそれと等しく、方向依存性がないと見なせる微小の検出器を、ファントムなしに自由空間に持ち込んで応答を得るとするのが正しい方策と言える。

つぎに、ICRU が場所のモニタリング用に導入した実用線量を人（個人）のモニタリング用にも流用するとしたらどうすることが問題となるのであろうか？ もしなら問題がないとしたら、ICRU はおかしいとか、無駄なとか、そういうことをしていることになるのだから、これは重大な間違い掛けである。先の議論から答は明白である。すなわちそれは、ファントム中（の1cmの深さ）に埋め込んだ線量当量計では $H(10)$ が実測できないという事情である。個人の身体上に着用する（ことを前提に設計された）線量計では、上で述べた場所のモニタリングのための $H(10)$ 測定法は原理的に適用できないからである。

人体はICRU球と違って前後の区別がつき、1cmの深さにある点は前面から採るという約束が、実効線量当量の実際的な評価法として有効であるとするならば、個人のモニタリング用に使う実用線量当量はやはり、ICRUのいう $H_p(10)$ 、 $H_s(3)$ 、 $H_s(0.07)$ と解すべきであろう。（くだいようだが、ICRUは $H_s(3)$ ）

は通常不要としている）。

ICRU が H_p の導入にさいして、人体の形状および照射方向分布について何の規定もせずに定義を与えたことは、個人線量計の設計に携わる者に当惑をもたらした。そこで、英国のNRPBは、（個人）線量計の（持つべき）望ましい特性として、図1に示す $H^*(10)/H(10, \alpha^\circ)$ のデータに合わせることを提案しており¹⁵⁾、最近のIECの警報線量計に関する規格案においてもこれが採用されていると聞く。

7. 実用線量使用上の注意

7.1 実用線量による場所の放射線レベル監視

ともあれ、改正法令では、 $H(10)$ 、 $H(3)$ 、 $H(0.07)$ という3種類の実用線量が導入され、それぞれに対し個別に管理基準が与えられている。これでは、ある場所が（3量がいずれも基準値を逸脱しておらず、放射線管理上）合格か否かの判断をするのにいささか不便である。そこで、空間の放射線レベル監視の目的には、監視の対象量として1種類の物理量に変換し、同じく変換された3種類の管理基準（限度値）のうち最も厳しいものを抽出して、これを新しい管理基準とする必要がある。

図2、図3は、実用上重要性の高い光子線と中性子線について、3実用線量を粒子フルエンスという物理量に変換し、男子の放射線業務従事者に対する年限度（ALF: annual limit of fluence）をそれぞれエネルギーの関数として表わしたものである。これらから、場所の放射線レベルの監視には、通常 $H(10)$ のみに着目し、これが管理基準を超えることのないよう監視すれば良いことが分かる。

7.2 放射線検出器の応答のエネルギー依存性

放射線管理の現場にある者にとって、今度の法改正に伴って気にかかることの一つは、サーベイメータ等現在使用中の実用測定器が、新たに導入された実用線量に対してどのような応答を示すかということである。

図4、図6に示すのは光子線および中性子線に対する、単位フルエンス当たりの実効線量当量（specific effective dose equivalent）をエネルギーの関数として表わしたもので、図7に示すのは、同じく光子線および中性子線に対する単位フルエンス当たりの $H(10)$ をエ

図2 光子線の場合の、男子放射線業務従事者に対する3種の年線量限度を粒子フルエンスで表現(ALF)し、エネルギーの関数として示したもの

図3 中性子線の場合の、男子放射線業務従事者に対する3種の年線量限度を粒子フルエンスで表現(ALF)し、エネルギーの関数として示したもの

エネルギーの関数として表わしたものである。

放射線の検出器が、これらのカーブと許容できる幅の中で一致すれば、実用測定器として使用できることになる。

注意を要するのは、X線とγ線といった光子線を対象に作られ、実用測定器として現在使用されているものの多く(ほとんどすべてと言っても良い)は、応答のエネルギー依存性を単位量の照射線量当たり採っていることである。

単位照射線量当たりの感度 $r'(E)$ を単位フルエンス当たりの感度 $r(E)$ に引き直すには、 $r'(E)$ に、対応

図4 光子線の粒子フルエンス-実効線量当量換算関係(身体前面よりの平面平行状全身照射の場合)

図5 単位フルエンスの光子線が与える照射線量, $x(E)$ 、のエネルギー依存性

するエネルギーの単位フルエンス当たりの照射線量(specific exposure) $x(E)$ を掛ければ良い。

$$r(E) = r'(E) \cdot x(E)$$

図5に $x(E)$ 、図8にGM管を用いたサーベイメータの $r'(E) \rightarrow r(E)$ 変換例を示す。

7.3 法令に採用されている実用線量換算用数値

改正された法令では、告示別表に、光子線の場合には自由空間中の空気吸収線量との換算関係、中性子線の場合には自由空間中の粒子フルエンスとの換算関係として、 $H(10)$ 、 $H(3)$ 、 $H(0.07)$ の数値をエネルギー

一の関数として与えている。

細かい議論を省略して結論的に言えば、自由空間中の空気吸収線量というのは、照射線量のエネルギー表現である。したがって、光子の場が二次電子平衡の条

図6 中性子線の粒子フルエンス-実効線量当量換算関係 (身体前面より平面平行状に全身照射の場合)

図7 光子線と中性子線の粒子フルエンス-1センチメートル線量当量換算関係

図8 GM管式ガンマ線用サーベイメータの応答特性変換の例

件を満たしている場合のみ、照射線量計が示す値から W 値 (空気のイオン対生成に要する平均エネルギー) を介してこの空気吸収線量が求められるということになる。実際には、物体の表面付近とか媒質中の空隙といった二次電子平衡の条件を満足しない光子場も多いわけで、このような場合にどうしたら良いかという問題がある。これについては、放射線管理を目的とする現場の測定としては、測定精度をそれほど追求する必要もないので、照射線量計の指示値を、光子場が二次電子平衡にあると仮定して処理する、という割り切りが許されるとして良いだろう。

告示別表に与えられている数値は、ICRP Publication 51 から採ったものである。ICRP Publication 51 というのは、言ってみれば単なるデータブックで、現在入手可能なデータを収集・整理したものである¹²⁾。

光子のデータで注意を要するのは、エネルギー吸収密度の計算がカーマ近似、すなわち光子が相互作用によって荷電粒子にエネルギーを引き渡したその時点で、荷電粒子がその運動エネルギーをすべて媒質に付与すると仮定していることである。このため、たとえば、10 MeV の光子線に対して、自由空間中の空気吸収線量 1 Gy 当たりの実用線量値が、 $H(10)=1.06$ Sv, $H(3)=H(0.07)=1.11$ Sv というように、媒質中の線量ビルドアップが無視される結果となっている。

遮蔽設計などのさい、媒質中の実用線量の深度分布を見るには、従来の照射線量に対するビルドアップ係数に代わる新しいビルドアップ係数のデータが必要になるが、筆者の知る限り、まだ一般的に利用できるものはない。自由空間中の空気吸収線量を上で述べたように割切て扱うのであれば、特別の場合を除き、従来の照射線量についてのビルドアップ係数で所要の目的を達成できる場合も多いと思われる。

R 単位でメータが表示されている実用測定器の校正には、放射線量が既知の (近似的に点状と見なせる) RI 線源と、俗に Γ 値と呼ばれる照射線量率定数を用いる手法が広く用いられてきた。実用線量についても Γ 値に相当するデータ、すなわち、点状の単位放射エネルギーの放射性核種から単位距離の地点に作られる実用線量率の値、が欲しくなる。これについては試算例が報告されている¹³⁾。

直径 30cm の球にとって面平行で

図9 1センチメートル線量当量と照射線量の比のエネルギー依存性

出来の良い照射線量計で測定し、その指示値はそのままとして単位のみをRからcSvに変えたとすると40 keV - 300 keVの領域で20%以上の過大評価となり、25 keV以下で80%以上の過小評価となる

図10 照射線量および九掛け照射線量と実効線量当量の比のエネルギー依存性

出来の良い照射線量計なら、その指示値の0.9倍を数値とし、単位をRからcSvへ変える方が、(前方照射の場合)実効線量当量のより良い近似を与えるといえる

一様な放射線場を、点状線源で作ろうとすると、場(粒子束密度)の均一性を10%以内におさめようと思えば線源から球(の表面)までの距離を実に6 m以上とらなければならない。

放射線管理の現場では、測定器の較正にこれだけのスペースを確保することは容易でないだろうし、またそれに見合う強力な線源を用意するのも容易でない。したがって、実際的な方法としては、線源から球なり

測定器(の有感部)なりの中心までの距離は従来通りそれほど大きく取らずに済ます便法も考えねばならない。それには、たとえば中心までの距離が200 cmのとき、値づけに用いる線量の値を源から185 cm、すなわちICRU球の表面における値を採用すれば良い。較正は放射線防護の目的に安全側でなされなければならないからである。

8. 結 言

以上、線量概念の変遷、実用線量導入の必要性、提案された各種実用線量の紹介、改正法令に採用された実用線量の詳細と付随する問題点、等を述べてきた。

実用線量は基本線量の代用品であり、代用品は所詮代用品である。使い始め、使いこなして行くうちに、ここで取り上げなかったところでもいろいろ問題が出てくるかも知れない。

法令改正は大変に時間のかかるものであり、出来上がった法令は修正ということに対し大変に大きな慣性を有する。今後いろいろ見付かるかも知れない不都合の検討結果をつぎの改正に役立てる努力ももちろん大切であるが、運用の面でできるだけ合理化を図ることが必要であり、より重要なことであろう。

文 献

- 1) 昭和63年5月18日付官報
- 2) 「アイソトープ法令集 I (1988年版)放射線障害防止法関係法令」, 日本アイソトープ協会(1988)
- 3) ICRP Publication 26 (1977)
- 4) たとえば, Schuricht, V.: "Strahlenschutzphysik", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin (1985)
- 5) 加藤和明: 放射線の量と単位に関するICRU勧告—その過去, 現在および未来—, *Radioisotopes*, **32**, 127-134 (1983)
- 6) ICRU Report 33 (1980)
- 7) ICRU Report 39 (1985)
- 8) ICRU Report 19 (1971)
- 9) 城谷 孝: 1988年7月4日 - 6日東京(国立教育会館)において開催された第25回理工学における同位元素研究発表会での発表講演
- 10) Bengtsson, G. からの私信

- 11) 原子力安全技術センター：「外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」（1988）
 - 12) ICRP Publication 51 (1987)
 - 13) 多田順一郎，加藤和明：代表的放射性核種の単位放射能量の点線源が作る放射線場の1 cm 線量当量率に関する線源からの距離の逆二乗に対する比例係数，*Radioisotopes*, **37**, 282-284 (1988)
 - 14) 多田順一郎，加藤和明：1 cm 線量当量による実効線量当量評価の限界，*Radioisotopes*, **37**, 293-294 (1988)
 - 15) NRPB-GS 5 (1986)
-