連載講座「放射線防護に用いる線量概念について」 第3回 放射線防護に用いる線量の変遷

高橋 史明^{*1}

(2008年5月9日受理)

(2008年7月30日再受理)

Series Lecture “Concept of Dosimetric Quantities Used in Radiation Protection” Third Lecture “Transition of Dose Quantities in Radiological Protection”

Fumiaki TAKAHASHI^{*1}

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) has recommended ‘protection quantities’, such as equivalent dose and effective dose. These quantities have been amended to give the dose limits for exposures of workers and the public. Many discussions have been continuously made on protection quantities and their meanings at the time when ICRP defined new protection quantities (e.g., effective dose replaced effective equivalent dose in ICRP 1990 Recommendations). In addition, ICRP just published new recommendations for radiological protection (ICRP 2007 Recommendations). This paper reviews historical transition of protection quantities, including the ICRP 2007 Recommendations.

KEY WORDS: ICRP, protection quantities, dose equivalent, critical organs, effective dose equivalent, equivalent dose, tissue weighting factor, effective dose, collective dose, ICRP 2007 Recommendations.

I はじめに

放射線の利用にあたっては、過度の被ばくを防止する施策が必要となる。国際放射線防護委員会 (International Council on Radiological Protection, ICRP) は、放射線防護に関する種々の問題を継続的に検討しており、その結果を勧告としてまとめてきた。特に、放射線防護の基本となる勧告は、数年から十数年に一度の頻度で提示されてきた。これらの基本勧告の中では、放射線防護に用いる線量が定義され、これを用いて作業員、公衆の線量限度が与えられている。国内の法令などでも、線量限度は

ICRP の Publication 60 (1990 年勧告)¹⁾で定義された「実効線量」及び「等価線量」で定められている。これらの実効線量などは、「防護量 (Protection Quantities)」と呼ばれている。

一方で、例えば、1990 年勧告で実効線量が定義された当時は、その決定が唐突という印象もあり、保健物理の関係者の間でも防護量に対する多くの意見、批判があった²⁾。そこで、保健物理学会においては、平成 17 年度より 2 年間にわたって、「放射線防護に用いる線量概念の専門研究会」を設置した。同研究会の一定の結論は報告書としてまとめられ、学会のホームページより閲覧できる³⁾。しかし、この報告書においては、研究会で検討した防護量の歴史的な経緯、その時点では公開されていなかった ICRP の新しい基本勧告 (2007 年勧告 Publication 103)⁴⁾に係る記載はない。

そこで、本稿で、防護量 (被ばく制限に用いられてい

^{*1} (独) 日本原子力研究開発機構; 茨城県那珂郡東海村白方 2-4 (〒319-1195)
Japan Atomic Energy Agency (JAEA); 2-4 Shirakata, Tokaimura, Ibaraki 319-1195, Japan.
E-mail: takahashi.fumiaki@jaea.go.jp

た量)の歴史的変遷に関連する勧告などを明示して記す。また、ICRPの新しい2007年勧告について、1990年勧告からの主な変更点を記す。

II 過去における防護量の変遷

ICRPは2007年勧告を公開したが、線量の定義について、1990年勧告から大きな変更はなかった。そこで、本章では、1977年勧告(Publication 26⁵⁾)までに放射線防護に用いられてきた線量の変遷を簡単にまとめる。

2.1 初期における被ばく制限

現在のような被ばくを制限するための指標は、1925年の第1回国際放射線医学会議(ロンドン)でMUTCHLERにより初めて提唱された。ここでは、「皮膚の紅斑が発生するしきい線量の1/100」を1か月当たりの制限、当時の用語で耐容線量とした⁶⁾。第2回国際放射線医学会議(1928年ストックホルム)では、放射線防護について検討、勧告をするため、国際X線ラジウム防護委員会(International X-ray and Radium Protection Commission, IXRP)が組織された。この名称からも分かるように、当時は光子(X線, γ 線)が主な防護対象であった。TAYLORによる1925年から1940年の放射線防護に係る歴史的経緯の講演記録がある⁷⁾。この記録によると、当初はX線に対する防護の勧告は、線源と被ばく者の間に置かれる鉛の厚さで与えられていた。その後、米国ではX線ラジウム防護諮問委員会が、1934年に0.2R/日という被ばく制限の勧告値を定めた。

2.2 1950年代から1960年代まで(線量当量)

1950年には、光子以外の電離放射線も防護の対象となり、IXRPはICRPに改組された。ICRPは、活動初期の段階で、1950年、1954年、1958年(Publication 1⁸⁾)、1962年(Publication 6⁹⁾)及び1965年(Publication 9¹⁰⁾)の基本勧告を提示した。以下に、Publication 1以降の勧告において提示された放射線防護に用いる線量を簡単に紹介する。

1958年勧告では、臓器や組織の受ける線量だけでなく、それぞれの機能に関連させて感受性を考察することの必要性が明示された。そこで、大きな重要性を持つ決定臓器(Critical organs)が決められた。この決定臓器は、全身が均一に照射される場合に、放射線感受性の高い臓器、組織であり、造血組織、生殖腺及び水晶体が選択された。当時は、被ばくを制限する量は最大許容線量と呼ばれるが、①決定臓器の線量、②皮膚、手及び前腕、足及びくるぶし、③その他の内部臓器について、3か月あたりの最大許容線量が定められた。また、最大許容線量の

考え方として、18歳以上の全ての年齢のヒトの決定臓器に蓄積される集積線量 D について、以下の式で年齢 N と関係付けていた。

$$D = 5(N - 18) \quad (1)$$

1965年勧告まで、この公式に導かれる線量が放射線防護に取り入れられていた。

1962年勧告の第3章には、生物効果比(RBE)と線質係数に関する記載があり、放射線防護の目的では線量当量(DE, Dose Equivalent)という1つの量を定義するのが有用とされた。この線量当量は、吸収線量 D 、線質係数 QF 、線量分布係数 DF 及び他の必要な修正係数の積で定義された。

$$DE = D(QF)(DF) \quad (2)$$

線量当量の単位はレム(rem)であり、これは吸収線量の単位であるラド(rad)であらわした線量に適切な係数(線質係数など)を乗じたものと数値的に等しいとされた。各放射線の線質係数の数値は、岩井が取りまとめたとおりである¹¹⁾。この他、同勧告では、生殖可能な女性について腹部の線量、妊娠と診断された場合に残りの期間における胎児の受ける線量にも限度が提示された。

1965年勧告では、核種の取り込みによる内部被ばくで、臓器、組織が必然的に一定の期間で受ける線量当量預託(職業人で50年間)が導入された。また、最大許容線量は制御できる線源についてのみ適用し、公衆などの被ばくについて線量限度という用語が初めて勧告された。

この他に当時の特徴的な点として、水晶体などに特別な取り扱いが具体的に与えられていた。例えば、1958年勧告では、水晶体は高LET放射線に対する被ばくの重要性が示され、線質係数として通常の10ではなく特別な30という値が用いられた。1962年勧告では、線質係数10に係数3を乗じるとされたが、結果として1958年と同様の取り決めであった。

以上のように、1950年代から1960年代の基本勧告においては、照射線量に置き換わり、感受性の高い臓器・組織の線量が、主として被ばく線量の制限に用いられていた。また、放射線の線質による生物学的な影響の違いを補正する係数を吸収線量に乗じる概念は、既に導入されていたことも分かる。

2.3 1977年勧告(実効線量当量の導入)⁵⁾

1977年勧告において、被ばくによる影響は、重篤度

が線量の大小により変化する“非確率的影響”と、その発生率がしきい値のない線量との関数で表現される“確率的影響”に分類された。その後、非確率的影響の名称などの変更はあったが、この分類の考え方は現在まで踏襲されている。

この勧告の第 17 項では、「放射線防護において、被ばくの重要な影響、特に晩発性の確率的影響とよりよく結び付く量を導入することが便利であることが見出されている。(比較対象は吸収線量)」とある。この量は、(3) 式のように吸収線量 D 、線質係数 Q 及び他の修正係数 N の積である量であり、引き続き線量当量 H とされた。ただし、単位はレムではなく、シーベルト (Sv) を採用し、両者の関係は $1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$ とされた。

$$H=DQN$$

(3)

また、被ばく集団における損害を算定するための有用な量として、集団線量当量 S が定義された。

内部被ばくが長期間にわたる状況については、2 つの量が与えられた。このうち、ある特定の集団に対する器官または臓器における 1 人あたりの線量当量率について、無限時間で積分した値を線量当量預託 H_c とした。これに加えて、特殊な線量当量預託として、預託線量当量 H_{50} を定義した。この量は、1 回の放射性核種によって、その後 50 年間にわたって、ある組織、臓器に与えられる蓄積線量である。

$$H_c=\int_0^{\infty}\overline{\dot{H}}(t)dt$$

(4)

$\overline{\dot{H}}(t)$ は 1 人当たりの線量当量率

$$H_{50}=\int_0^{t_0+50y}\overline{\dot{H}}(t)dt$$

(5)

$H(t)$ は線量当量率、 t_0 は摂取の時刻

同勧告の第 32 項では、放射線防護のための線量当量の概念についても詳細な説明があった。ここでは、「線量－効果関係の比例性に関する仮定から、発ガンなどの確率的影響は、特定の組織、臓器の中の感受性が一様な全ての細胞にわたっての平均線量を考えることが正当である。」と記述されている。そこで、組織、臓器の平均線量当量 H_T を線量限度の勧告値の基本とし、この項以降では、線量当量は特に明記がない場合、組織、臓器の平均線量当量 H_T を指した。

1977 年勧告での最大のトピックスとして、第 1 表の荷重係数 w_T ⁵⁾ を線量当量に荷重して、全身について総和を取った線量当量 H_E を初めて定義したことがある。

第 1 表 1977 年勧告の各組織の荷重係数 w_T ⁵⁾

組織	荷重係数 w_T
生殖腺	0.25
乳房	0.15
赤色骨髄	0.12
肺	0.12
甲状腺	0.03
骨表面	0.03
残りの臓器	0.30

$$H_E=\sum_Tw_TH_T$$

(6)

この量の単位は線量当量と同じシーベルトとされ、1980 年に実効線量当量 (Effective dose equivalent) H_E という名称が与えられた。1977 年勧告の第 104 項では、「表 (本稿の第 1 表) に示した荷重係数 w_T は全身が均等に照射されたときに、組織 T の確率的影響のリスクのリスク全体に対する割合を示す係数」とある。また、「性差、年齢によって、被ばくに伴うリスクは変動するが、係数の値はどの作業者の防護にも適切なものとして勧告される。」とした。

このように、1977 年勧告において、放射線の線質に加えて、各臓器・組織のリスクの差を考慮した係数で線量当量を荷重して、全身について総和を取る量 (実効線量当量) が初めて導入された。職業人、公衆の年線量当量限度が皮膚、水晶体などの線量当量とともに、実効線量当量で与えられた。また、線量の制限は年線量当量限度を設けることで十分とされた (第 35 項)。

III 1990 年勧告での防護量¹⁾

ICRP は、2007 年 3 月に新しい基本勧告を採択したが、1990 年勧告から、防護量の定義について、大きな変更は確認されない。そのため、当分の間は、放射線防護においては、本章に記載される線量が引き続き使用されると予想される。

3.1 臓器・組織で平均した吸収線量 (臓器線量)

1990 年勧告では、臓器・組織にわたって平均化した吸収線量を基本としている。平均化について、第 22 項に「影響を誘発する確率と線量の関係の比例性に基づいている。」と説明され、平均化した線量は臓器線量 (Organ dose) とも呼ばれている。臓器線量は、以下に記す等価線量、実効線量の算出の基本となり、臓器 T の臓器線量は、被ばくに寄与した放射線 R を明記して $D_{T,R}$ と表現される。臓器線量の単位は、物理量の吸収線

量と同じグレイ(Gy)で与えられるが、例えば、ICRP Publication 74¹²⁾では、防護量と明確に分類されている。

3.2 等価線量

1990 年勧告では、放射線の線質の違いを考慮して荷重する係数は、放射線荷重係数 w_R と定義された。そして、各放射線による臓器・組織の線量に放射線荷重係数を乗じて、被ばくに関係した全線質について総和した量は、等価線量 (Equivalent dose) H_T と定義された。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \tag{7}$$

この等価線量は、被ばくの経路によらず。内部及び外部被ばくについて合算できる量である。皮膚、水晶体などの線量限度は、この等価線量で与えられた。

等価線量は、臓器の吸収線量に放射線の生物学的効果を考慮した係数を荷重するという点においては、(3) 式にある 1977 年勧告の線量当量と同様であり、単位も線量当量と同じシーベルト (Sv) が与えられた。

しかし、線量当量と等価線量は、その算出過程が大きく異なる。上記の (3) 式で線量当量は、エネルギー付与に直接寄与した放射線の線質係数を吸収線量に荷重する。一方、(7) 式の放射線荷重係数は、①外部被ばくについては入射放射線、②内部被ばくは摂取した核種から放出された放射線 R で一義的に決定される。ここで、臓器線量 $D_{T,R}$ も、放射線荷重係数の定義に従い決定される必要がある。特に、外部被ばくにおいては、ICRP Publ. 92 に記された両地点性 (bilocality) の問題がある^{11, 13)}。人体に入射した放射線が体内組織で荷電粒子を発生した場合、線質係数を用いた線量当量の算出では、その発生した荷電粒子の Q(L) を吸収線量に荷重する。一方、等価線量の算出では、放射線荷重係数 w_R は人体に入射した放射線の線質のみ考慮するため、特に陽子及び中性子で不整合の問題が発生した。また、例えば、中性子被ばくの多くの状況では光子が混在するが、臓器が光子による被ばくを受けた場合、①体外から入射した光子、②体内に含まれる水素などの捕獲反応で発生した光子の何れかの可能性がある。等価線量の算出では、①、②についての臓器線量を別に算定して、それぞれの荷重係数を乗じる。このように、等価線量の基本となる臓器線量は、最終的に同じ線質の放射線が寄与した場合でも、放射線荷重係数の定義に従い区別する必要がある。なお、国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiological Units and Measurement, ICRU) の Report 51 では、臓器線量及びこれに基づく等価線量は測定できないとされている¹⁴⁾。

第2表 1990 年勧告の組織荷重係数 w_T ¹⁾

組織・臓器名	組織荷重係数, w_T
生殖腺 (女性：卵巣, 男性：精巣)	0.20
赤色骨髄	0.12
結腸 *1	0.12*1
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳房	0.05
肝臓	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮膚	0.01
骨表面	0.01
残りの組織・臓器 *2	0.05

*1：1990 年勧告では、大腸下部だったが、その後、大腸上部を含めた (ICRP Publication 69¹⁵⁾)。

*2：副腎、脳、小腸、腎臓、筋肉、脾臓、脾臓、胸腺及び子宮

3.3 実効線量

放射線荷重係数が新しく導入されたため、1977 年勧告の荷重係数は組織荷重係数 w_T と名称を変更した。名称の変更に加えて、第2表のように、臓器、組織についての数値が見直された他に、新しく係数が割り当てられた臓器、組織もある。この係数の定義については、1990 年勧告の第 27 項で、「全身の均等被ばくを受けた場合に受ける全損害に占める各臓器、組織の損害の相対的寄与」と記されている。組織荷重係数は、一部の臓器、組織を除いて、両性、全年齢を含む全集団の損害に基づき定義され、一つのセットで与えられた。

等価線量を係数 w_T で荷重して、(8) 式のように全身について総和を取った量は、実効線量 (Effective dose) E と定義された。この量は、実効線量当量に置き換わるものであり、単位は同じシーベルト (Sv) とされた。実効線量も、内部被ばく及び外部被ばくで加算できる。また、結果的に臓器線量を 2 つの係数で二重荷重したこの量は、原理的に測定できない量とされる。

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \tag{8}$$

3.4 内部被ばくに用いる線量、集団線量

内部被ばくについては、放射性核種を取り込んだ場合、それが体内より核種の減衰、代謝によって取り除かれるまで被ばくを受ける。そこで、時間的な分布を考慮した預託等価線量 $H_T(\tau)$ 及び預託実効線量 $E(\tau)$ が補助的に導入された。前者は、ICRP 1977 年勧告の預託線量当量と

同じ考え方にに基づき、算出される。

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \overline{H}(t) dt \tag{9}$$

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau) \tag{10}$$

t_0 は放射性核種を摂取した時間，
 τ は被ばくを受ける期間，
 $\overline{H}$ は時間 t における等価線量率である。

積分期間 τ として、成人については 50 年が推奨されており、公衆被ばくについて、子供については 70 歳までの期間が提示された。

この他、ある集団の各個人の等価線量及び実効線量を合算した集団等価線量及び集団実効線量が定義された。この集団線量の単位は Sv・人である。

IV 2007 年勧告 (Publication 103)⁴⁾

本稿では、1990 年勧告からの変更点を中心に、2007 年勧告の 4 章にある線量の定義を簡単に紹介する。なお、同章の構成は、第 3 表のとおりであり、別稿でも 2007 年勧告の線量の解説がされている¹⁶⁾。

4.1 組織荷重係数について

ICRP は、実効線量の導出に用いる 2 つの荷重係数は、随時見直されるものであるとしていた。2007 年勧告でも、被ばく集団におけるガンの発生率の疫学研究などの最近の知見に基づき、第 4 表の新しい組織荷重係数のセ

ットが選択された (2007 年勧告の表 3)。

この組織荷重係数を決める構築ステップは、2007 年勧告の付録 A の Box.A.2 にまとめられている。簡単にまとめると、①最初に男女で平均した放射線に関連するガンの生涯発生リスクを評価し、② DDREF の適用、いくつかの集団間の転換 (transfer) を通じて名目リスク係数を算出し、③致死の補正、非致死ガンについての生命の質への補正、余命損失の補正を行い、「各臓器の放射線による損害」を算出した。ここで、ICRP は、放射線損害の評価に関連する不確かさに起因して、算出された放射線損害も不確かであることを認識している。そのため、最後の段階で各臓器、組織について、全損害に対する相対的な損害の大きさに基づき、4 つのカテゴリーに分類して同じ数値を与えた。この段階で与えられた数値が、第 4 表の組織荷重係数となる。そのため、同じ組織荷重係数を持つ臓器、組織でも、基本とした相対的な損害の値は差がある。例えば、組織荷重係数が 0.12 の結腸及び肺の相対的な損害は、それぞれ 0.083 及び 0.157 である (2007 年勧告付録 A の表 A.4.1)。

放射線荷重係数までのステップは、1990 年勧告とほぼ同様で、DDREF の数値 2 は保持された。一方、ガンの名目リスク係数の算出にあたっては、罹患データは死亡データよりも誤診断が少ないという傾向にあるという理由から死亡データではなく、罹患データを基本とした。また、遺伝的影響の名目リスク係数の算出に当たっては、2 世代のみを考慮した。

第 3 表 2007 年勧告 第 4 章の構成⁴⁾

節	内 容
4.1.	緒言
4.2.	健康影響の考慮
4.3.	線量
4.3.1.	吸収線量
4.3.2.	線量の平均化
4.3.3.	等価線量及び放射線荷重係数
4.3.4.	実効線量及び組織荷重係数
4.3.5.	実効線量の決定
4.3.6.	実用量
4.4.	被ばく線量の評価
4.4.1.	外部被ばく
4.4.2.	内部被ばく
4.4.3.	職業被ばく
4.4.4.	公衆被ばく
4.4.5.	患者の医療被ばく
4.4.6.	実効線量の適用
4.4.7.	集団実効線量
4.5.	不確かさ及び判断

第 4 表 2007 年勧告の組織荷重係数 w_T ⁴⁾

組織・臓器名	組織荷重係数, w_T
赤色骨髄	0.12
乳房	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.12
生殖腺	0.08
膀胱	0.04
肝臓	0.04
食道	0.04
甲状腺	0.04
骨表面	0.01
脳	0.01
唾液腺	0.01
皮膚	0.01
残りの組織・臓器*	0.12

*：副腎、胸郭外部位、胆嚢、心臓、腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、脾臓、前立腺 (男)、小腸、脾臓、胸腺及び子宮/子宮頸部 (女)

各臓器の損害には性差、年齢差のあることは明らかであるが、ICRP は従来と同様に、放射線防護の目的で、1つの組織荷重係数のセットを勧告した。2007年勧告では、組織荷重係数は放射線防護を実践するために用いる実効線量の評価に約束事として決められたものであり、不確かさ（uncertainty）を持たない点が明確にされた。

4.2 実効線量の算出方法

1) 標準人体モデル

内部被ばくについては、線源組織で放射線として放出されたエネルギーのうち、ある標的組織の質量あたりに吸収される割合として定義される比吸収割合（SAF）が放射線輸送計算コードにより解析される。また、外部被ばくについても、放射線場のフルエンスなどから各臓器の臓器線量への換算係数が、放射線輸送計算で解析される。放射線防護においては、これらの解析された値に基づき、等価線量、実効線量を算定する。

これまでの解析では、人体を模擬するモデルとして、米国の MIRD 委員会による数式で人体を定義する数学モデルが使用されてきた。この数学モデルは、ICRP Publication 23¹⁷⁾にある標準人を参考に、体格、臓器などのデータが決定されていた。しかし、各研究機関では、MIRD 委員会の定義したモデルに概ね類するが、一部の臓器、組織などの形状、位置を変更したモデルを使用していた。例えば、Publication 74 の線量換算係数は、これらの異なる人体モデルによる解析値に基づき決定された¹²⁾。

2007年勧告では、放射線輸送計算コードで線量計算を行う場合、使用する成人男女の標準モデルが規定された。このモデルは、ドイツの環境放射線防護研究所（GSF、現在：ドイツ環境健康研究センター）が開発した voxel モデルを基本とした。この voxel モデルは、人体の医用画像（CT 画像）を用いて作成されたため、解剖学的に数学モデルよりも人体に近く、体格、各臓器の質量などは ICRP Publication 89¹⁸⁾で提示された標準人に従わせた。ICRP は、今後、防護量の算定ではこの標準モデルの使用が必須となる点、モデルの使用において不確かさが伴わない点を明示した。

本稿の執筆時には、標準モデル（男女の voxel モデル）は公開されていない。しかし、この標準モデルの基本となった男女の voxel モデルを用いて、GSF が光子外部被ばくに対する臓器線量（空気カーマあたりの値）を解析した結果が報告されている¹⁹⁾。GSF が報告した臓器線量の値には、数学モデルと voxel モデルの臓器の存在位置の違いに起因して、Publication 74 にある値と差が生じ

たものも確認される。

2) 組織荷重及び両性の平均

人体モデルを用いて解析した臓器線量に基づく等価線量から実効線量を算出するステップは、Publication 68²⁰⁾では(10)式と同様の数式が示されているが、Publication 74 では、下式のように乳房について性差が提示されている。

$$E = w_{\text{breast}} H_{\text{breast, female}} + \sum_{T \neq \text{breast}} w_T \left[\frac{H_{T, \text{male}} + H_{T, \text{female}}}{2} \right] \quad (11)$$

この他、複数の臓器、組織を含む‘残りの臓器’については、ここに含まれる臓器（組織）の線量が人体で最大となる場合、その臓器（組織）に 0.025 という荷重係数を与える‘splitting rule’があった。また、Publication 74 では、残りの臓器の線量について、①質量荷重平均もしくは②算術平均の線量に組織荷重係数を乗じるという2つの取り扱いが紹介されている。この差異は、残りの臓器の組織荷重係数が 0.05 と低いので、実効線量への影響は小さいとされていた。

2007年勧告では、各性について等価線量を計算し、その平均に放射線荷重係数を乗じる点が明確にされている⁴⁾。成人男性にも、Publication 89 では質量 20 g という乳房が与えられており、上記の GSF からの報告でも男性の乳房線量のデータがある。性差は、残りの臓器（前立腺、子宮）の等価線量について存在する。また、残りの臓器の線量は、含まれる臓器・組織の算術平均値とし、‘splitting rule’の廃止が明確にされた。このように、新しい勧告では、実効線量の算出において、一つの組織荷重係数のセットを用いて等価線量を加算する際の一貫性を持つことになった。

4.3 防護量の適用について

1) 等価線量

放射線荷重係数は、数 10 mGy 程度までの線量域で適用されるものである¹¹⁾。ここでは確率の影響が問題となるが、皮膚などの確定的影響（2007年勧告では tissue reaction）の発生を防止する目的で、1990年勧告に引き続き、等価線量が線量限度として規定された。この点について、多くの者が疑問を持つと考えられる。ここで、2007年勧告の第 250 項で説明されているとおり、高線量被ばくにおいて、放射線種の違いによる生物効果の差は、低線量よりも小さくなる⁴⁾。そのため、皮膚の線量限度に等価線量を使用することは安全裕度を持つことになる。

この他、2007年勧告では、放射線モニタリングに用いる実用量（Operational Quantity）と防護量の関連付け

が示された。ここでは、放射線防護で皮膚の線量は、方向性線量当量 H_p ($0.07, \Omega$) と関係付けられると明記されている。この方向性線量当量は、主として放射線荷重係数の数値が1の電子線、低エネルギーの光子による被ばく、すなわち、臓器線量と等価線量の数値が等しくなる状況で用いられる

2) 実効線量と集団線量の適用

2007年勧告では、集団線量については、集団実効線量のみが勧告されている。実効線量、集団線量は、防護策の計画立案、線量限度または線量拘束値の遵守の確認など、放射線防護の目的でのみ適用可能な量であることが明確にされた。一方、特定の被ばく状況について、各個人の線量を回顧的に詳細に評価する際には、臓器線量の使用が推奨されている。また、疫学的な研究、高線量被ばくでも、臓器の吸収線量を評価することが適当とされている。

無論、実効線量は臓器線量が与えられた場合、2つの荷重係数で容易に導出できる。そのため、ICRPの意図しない用途で、実効線量を適用する可能性もある。しかし、1つの組織荷重係数のセットを使用、規定された標準モデルの使用が必須である点などを鑑みた場合、実効線量を各個人のリスク評価などに使用することは限界がある点を認識する必要があるだろう³⁾。

V お わ り に

放射線防護に用いる線量は、世界で初めて被ばくを制限することが提唱されて以降、変遷してきた。新しい2007年勧告においても、最新の知見を反映して、放射線荷重係数、組織荷重係数の変更、標準モデルの設定などがされた。しかし、防護量の定義については、1990年勧告からも大きな変更はなく、現時点では一定のコンセンサスを得られたものと考えられる。また、2007年勧告の策定の段階においてドラフト文書を公開し意見募集をしたこともあり、例えば、実効線量、集団線量の適用は放射線防護の目的に限る点が一層明確にされた。今後は、新しいモデルを用いた防護量を様々な条件で解析していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) ICRP, International Commission on Radiological Protection, 1990 recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. Ann. of the ICRP, 21(1-3), (Pergamon Press, Oxford, UK) (1991).
- 2) 小田啓二；連載講座「放射線防護に用いる線量概念について」第1回物理量、保健物理, 43(1), 36-40. (2008).
- 3) 日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ, 放射線防護に用いる線量概念の専門研究会, 5(1), Available at <http://www.soc.nii.ac.jp/jhps/j/issn-report/report2007-1.pdf>, 5(1), (2007). 閲覧 2007年8月.
- 4) ICRP, International Commission on Radiological Protection, 2007 recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. Ann. of the ICRP, 37(1-3), (Elsevier Science, Oxford) (2007).
- 5) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the ICRP, Publication 26, Ann. of the ICRP 1(3), (Pergamon Press, Oxford, UK) (1977).
- 6) 辻本忠, 草間朋子；“放射線防護の基礎 第2版”, (1989) 日刊工業新聞社, 東京.
- 7) TAYLOR, Invited Paper Delivered at the 25th Annual Meeting of the Health Physics Society, The Development of Radiation Protection Standards (1925-1940), *Health Phys.* 41, 227-232 (1981).
- 8) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1 (Pergamon Press, Oxford, UK) (1959).
- 9) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 6 (Pergamon Press, Oxford, UK) (1964).
- 10) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9 (Pergamon Press, Oxford, UK) (1966).
- 11) 岩井敏；連載講座「放射線防護に用いる線量概念について」第2回線質係数 $Q(L)$ および放射線荷重係数 w_R の概念の成立と変遷, 保健物理, (in press)
- 12) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. of the ICRP, 26(3-4), (Elsevier Science, Oxford) (1997).
- 13) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (w_R). ICRP Publication 92. Ann. of the ICRP, 33(4). (Elsevier Science, Oxford) (2003)

- 14) ICRU, International Commission on Radiological Units and Measurements, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, (ICRU, Bethesda, USA) (1993).
- 15) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Age-Dependent Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3: Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69, Ann. of the ICRP, 25(1), (Elsevier Science, Oxford) (1995).
- 16) 佐々木康人, ICRP 新勧告作成の経緯と主要な論点-5. 実効線量と集団線量の使い方-, *Isotope news*, **647**, p. 18-20 (2008).
- 17) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Reference man, Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics. ICRP Publication 23, (Pergamon Press, Oxford, UK) (1975).
- 18) ICRP, International Commission on Radiological Protection, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection, ICRP Publication 89, Ann. of the ICRP, 32(3-4), (Elsevier Science, Oxford) (2002).
- 19) H. SCHATT, M. ZANKL and N. PETOUSSI-HENSS, Organ Doses Conversion Coefficients for Voxel Models of the Reference Male and Female from Idealized Photon Exposures, *Phys. Med. Biol.*, **52**, 2123-2145 (2007).
- 20) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose Coefficients for Intake of Radionuclides by Workers, Replacement of ICRP Publication 61. ICRP Publication 68, Ann. of the ICRP 24 (4), (Elsevier Science, Oxford) (1994).

高橋 史明 (たかはし ふみあき)

1969 年東京生まれ。1993 年日本原子力研究所入所。

現職：日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門放射線防護研究グループ研究副主幹。博士（工学）。

E-mail: takahashi.fumiaki@jaea.go.jp