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

小 田 啓 二^{*1}

(2007 年 11 月 1 日受理)

(2007 年 12 月 21 日再受理)

Series Lecture “Concept of Dosimetric Quantities Used in Radiation Protection” First Lecture “Physical Quantities”

Keiji ODA^{*1}

I は じ め に

国際放射線防護委員会 (ICRP) は、作業者や公衆を過度の被ばくから防護する際の指標として、実効線量などの「防護量 (Protection Quantities)」を導入している。一方、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) は、放射線測定に用いる量と単位について、放射線場そのものを記述するための量や、その場に置かれた物質内でのエネルギー転換や付与といった物理過程を加味した量 (物理量) を定義するとともに、防護量を合理的に評価するための「実用量 (Operational Quantities)」を定めている。防護量と実用量は、いずれも物理量に、あらかじめ決められた係数を荷重することによって、被ばくによる影響や放射線場の特性を定量化して表現するものである。我が国の放射線防護に関する法令や指針類は、ICRP と ICRU が定義している線量に従って策定されている。

しかしながら、放射線防護に関する線量の定義や使い方については、保健物理関係者の間でも「複雑すぎる」という意見が多く、「曖昧である」、「矛盾点が多い」等の批判もある。現在使われている線量の種類の多さ、定義の難解さ、度重なる係数の変更などがその一因であろう。現在の線量体系に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、放射線治療などの分野や原子力知識普及活動において、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。そこで、現在の線量体系を概説するとともに、線量概念に関する問題点を整理して解説するというのが、この連載講座の目的である。

本稿が出版される頃には、ICRP は新しい基本勧告を出しているはずである。周知の通り、新勧告のとりまとめの段階では、ウェブ上でのドラフトの公表、コメント募集、改訂という作業が繰り返された。線量の定義については、途中段階で新名称の提案や新しい単位の示唆があったが、最終的には係数値の更新以外には変更されなかった。この判断は、無用な混乱を引き起こさなかったという意味で、賢明ではなかっただろうか。なお、ドラフトでは、防護量に関するいくつかの問題、特に、実効線量や集団線量の概念や使い方について注釈を与えている点も注目される。

今回の新勧告ドラフトと同様に、過去にも線量に関して多くの議論があった。中でも、ICRP26¹⁾で導入された実効線量当量の解釈や ICRU39²⁾で定義された実用量 (周辺線量当量など) の有効性について、日本保健物理学会はじめ関連学会でシンポジウムが開催された。また、ICRP60³⁾で導入された「組織当たりの量」の必要性に対して多くの異論が出された。

^{*1} 神戸大学大学院海事科学研究科；神戸市東灘区深江南町 5-1-1 (〒658-0022)

Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University; 5-1-1 Fukaeminamimachi, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-0022, Japan.

こうした背景のもと、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。この期間中にICRPからドラフトおよび基本文書(Foundation Document)が公開され、コメント集約について国際対応委員会へ協力するとともに、専門研究会名での意見を提出した。こうした研究会活動の成果は報告書としてまとめられている(学会ホームページより: <http://www.soc.nii.ac.jp/jhps/j/issn-report/report2007-1.pdf>)。

上記報告書では、全体構成の都合から、2年間に議論したすべての項目、意見、アイデアを記載できていない。また、専門研究会の報告書という性格上、論点の背景や基本的な知識の記載も省かれている。そこで、本誌編集委員長の推薦もあり、上記専門研究会の委員の方々の協力を得て、解説に重点を置いた連載講座を企画することになった。

まず第1回では、3つに分類される線量のうち「物理量」を、第2回では物理量から防護量・実用量導くために必要な「係数」を、第3回では「防護量」を、そして第4回以降に「実用量」や現在の線量体系の問題点を紹介していく予定である。

本シリーズが「放射線防護に用いられる線量の定義・概念」の正しい理解の一助となれば幸いである。

II 放射線防護に用いる線量

1. 線量の歴史

線量の歴史は「レントゲン」単位の設定(1928年)に始まるが⁴⁾、防護量を中心に考えれば、これまでに3つの重要な変化があったと思われる。エックス線を主な対象としていた時代から他の放射線まで広がるにつれ、色々な量や単位が提案された。その中で、線質による放射線影響の違いを補正した「RBE線量」が定義されたが、「放射線生物学」と「放射線防護」の両方に使われて混同された時代があった。そこで、後者専用の量として「線量当量」が定義された(ICRU⁵⁾)⁶⁾が、この頃に線量体系の原型がほぼ確立されたと言えよう。その後、定義の明確化等に加え、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た。

その後、ICRP26⁶⁾において放射線影響を確率的影響と非確率的影響とに分類し、前者のための防護量として「実効線量当量」が導入された。続いて、実測不可能な

この量の評価のために実用量が提案され(ICRU39²⁾)、これらが2つ目の大きな転機であった。新しい概念の導入に異論があったものの、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。

最後はICRP60³⁾における「組織当たりの量」への変更である。「放射線防護に用いる量は、着目するある一点でなく、組織や臓器について考えるべきだ」という考えから、着目点で定義されているこれまでの量(線量当量など)と組織当たりの量とを区別し、さらに違いを強調するために新たな名称(等価線量と実効線量)を提案した。この結果、「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、線量体系をより一層複雑化させた感が強い。

2. 現在の線量体系

現在の放射線防護線量体系では、諸量の関係を第1図のようにまとめることができる(ICRP74⁶⁾を一部加筆)。これらは、1)「フルエンス」、「カーマ」、「吸収線量」、「放射能」などの物理量、2)放射線防護の目的のために用いられる防護量(「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では、ある場所での物理量と照射条件(方向など)が定めれば、放射線荷重係数と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、線質係数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

第1図 物理量、防護量および実用量の関係

が保持されるかどうかのチェックが可能である。

一方、実際の外部被ばく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をとる。国内法令では、例えば個人被ばく線量に関する条項において、「外部被ばくによる実効線量は、1センチメートル線量当量とすること」という、一見意味不明な記述は、「実効線量は直接定義通りに測定することができないので、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（多くの場合、1センチメートル線量当量>実効線量なので、この措置で安全側に見積もることになる）」ということを意味している。

III 物 理 量

ICRU が定義している物理量（ICRU60⁷⁾）は線量体系の最も基本的な量であり、その中でも、放射線場の特性を表す放射計測量（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線量計測量（Dosimetric Quantities）である「カーマ」と「吸収線量」、及び放射性壊変率を表す「放射能（Activity）」は、その他の防護量と実用量を導くのに不可欠である。

1. フルエンス

放射線が存在する空間（放射線場）の特徴を記述するための最も基本的な表し方は、粒子数である。空間上のある点における放射線場の強さは、その点近傍の小さな面を通過する粒子数で表すことができる。但し、この面を固定してしまうと、面に平行に入ってくる粒子を勘定できない。従って、どの方向から飛んできてでもカウントできるように、微小面はある点を中心に任意に回転できると考えれば良い（第2図）。このようにして「フルエンス（または、粒子フルエンス）」が、「ある球に入射する粒子数をその球の最大断面積で割った量」（即ち、単位面積の大円を持つ球に入射する粒子数）として定義される。単位は $[\text{cm}^{-2}]$ や $[\text{m}^{-2}]$ である。

放射線場をより詳しく記述するためには、フルエンスだけでなく、そのエネルギー分布（エネルギースペクトル）や時間変化（フルエンス率）なども必要な場合がある。なお、同じような粒子数を表す量に「粒子束密度

第2図 フルエンス

（フラックス）」が定義されているが、フルエンス率と同じ意味を持つ。また、派生した量として、エネルギーフルエンス（粒子エネルギーとフルエンスとの積）が用いられることもある。

2. カーマと吸収線量

前節のフルエンスが放射線場そのものの特徴を記述する量（放射計測量）であるのに対し、その放射線場に置かれた物質へのエネルギー付与に関連した線量（線量計測量）に「カーマ」と「吸収線量」がある。

定義は後者の方が単純明瞭であり、「放射線が相互作用により、ある物質中に付与された平均エネルギー $d\bar{\epsilon}$ をその物質の質量 dm で割った量」（単位質量当たりの吸収エネルギー）として「吸収線量」が定義され、すべての放射線種に対して適用される。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1)$$

物質へのエネルギー付与過程を考えると、 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や励起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、第3図のように、例えば光電効果や弾性散乱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や励起を行う。このように、非荷電粒子からなる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（conversion）、とそれに続くエネルギーの物質への沈着（deposition）という二段階を経ることになる。

第二段階は吸収線量で記述されている。非荷電粒子に対する第一段階については、「物質との相互作用子で発生したすべての二次荷電粒子の初期運動エネルギーの総和 dE_{tr} を質量 dm で割った量」として「カーマ」が定義されている。

第3図 エネルギーの転換と沈着

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2)$$

なお、カーマは、放射線場に関する「エネルギーフルエンス、 Ψ 」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、 μ_{en}/ρ 」の積で表すことができる。

$$K = \Psi(\mu_{en}/\rho) \quad (3)$$

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。

吸収線量とカーマは、いずれも $[J/kg]$ の次元を持っており、特別な名称 $[Gy(グレイ)]$ が使われる。通常、例えば空気カーマとか組織吸収線量のように、物質の種類を付記する。なお、カーマと吸収線量は厳密には概念上は異なるが、異種物質の境界近傍や高エネルギー X・ γ 線の場合を除き、数値的には両者はほぼ同じ値になると考えても構わない。

3. 放射能

任意の時間幅 dt の間に、あるエネルギー単位から自発的に核転移を起こす数 dN (即ち、単位時間当たりの壊変数) を、Activity (放射能) A と定義する。

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (4)$$

なお、「放射能」には、放射性壊変をする性質を表す Radioactivity もあるので、留意して用いるべきである。

内部被ばくでは放射性核種の摂取量が基本的な量となる。Activity (放射能) 例えば、作業者の内部被ばくに

よる線量は、全身カウンタを用いた体外計測法や排泄物のバイオアッセイ法によって摂取量を推定し、これに線量換算係数 (実効線量係数 $[Sv/Bq]$ 、ICRP によって放射性核種及びその化学形毎に評価されている) を乗じて実効線量を評価する。

IV おわりに

放射線防護のための線量体系を概説することを目的として、連載講座を始めることにした。まず、第一回目では、線量の歴史を簡単に概観した後、現在用いられている線量を、物理量、防護量および実用量の3種類に分類し、それらの関係を説明した。

本稿の後半では、ICRU が定義している物理量のうち、放射線防護に関連するフルエンス、吸収線量、カーマおよび放射能の定義を紹介するとともに、いくつかの注意点を解説した。これらは物理的に明解に定義されているので、ほとんど問題はないと思われるが、これらに比べると、次回以降連載される係数や防護量などについては、それらを正確に解釈することは難しくなることを覚悟しておいて頂きたい。

筆者が調べた範囲では、いわゆる名著と言われている参考書の中にも、線量の定義や解釈について間違いが一部ある。これらを鵜呑みにして覚えるのではなく、例えば原文を自分の目で見て自分で理解し、さらに分からない点は自分で調べてみるという姿勢が重要であろう。特に、若手研究者や学生諸君には、自分で考えることを勧めたい。この連載がその手助けとなればと願っている。

参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, (1977).
- 2) International Commission on Radiation Units and Measurements: Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Report 39, (1985).
- 3) International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, (1991).
- 4) W. C. ROESCH and F. H. ATTIX: "Radiation Dosimetry Vol. I", eds. W. C. ROESCH, F. H. ATTIX and E. TOCHILIN, Chap.1, (1968).
- 5) International Commission on Radiation Units and Measurements: Radiation Quantities and Units, ICRU

Report 10a, (1962).

- 6) International Commission on Radiological Protection: Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, (1996).
- 7) International Commission on Radiation Units and Measurements: Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, ICRU Report 60, (1998).

小田 啓二 (おだ けいじ)

1956 年山口県生まれ。1983 年大阪大学大学院博士課程修了（工学博士）。阪大産研助手，神船大助手，助教授，教授（その後，統合・組織変更）を経て，現在，神戸大学大学院海事科学研究科教授。専門は，放射線防護計測，線量評価。日本保健物理学会会長，神戸大学評議員など。

E-mail: oda@maritime.kobe-u.ac.jp