解説

放射線防護・医学分野で用いられる 放射性核種の崩壊・放射線データ

(日本原子力研究所) 遠 藤 章

放射性核種によって人体が受ける被ばく線量を精度よく計算するためには、その核種の半減期などの崩壊に関する情報はもちろんのこと、放出される放射線のエネルギーや放出率のデータが必要である。これらのデータとして、国際放射線防護委員会(ICRP)が1983年に公刊したICRP Publication 38(ICRP 38)のデータが利用されている。ICRP 38は、人体の被ばく線量計算や施設の安全評価に幅広く使われており、原子力や放射線の利用を安全に進める上で重要な役割を果たしている。本稿では、このICRP 38に焦点をあて、これが編集された背景やこれまでの利用、そして、現在計画されているICRP 38の改訂の動向などについて解説する。

I. はじめに

2001年10月、「科学と技術のための核データ国際会議 ND2001」が、つくば市の国際会議場において開催された。1966年のワシントン会議以来、およそ3年ごとに開催されるこの会議において、今回は6日間にわたり375件もの発表が行われた。様々な分野からの多くの参加者により会議が成功裡に終了したことは、核データが科学技術の多くの分野と密接に関連する重要なものであることをあらためて示しているといえよう。

放射線防護においても、それは例外ではない。人体内部の放射線の挙動を追跡するための放射線輸送断面積、人体に与えるエネルギーを評価するカーマ係数、放射性核種が放出する放射線のエネルギー、放出率などの放射性核種崩壊・放射線データ(以下、崩壊データと呼ぶ)は、人体の被ばく線量計算に欠かせないものである。

その中で崩壊データには、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)が1983年に公刊した崩壊データ集ICRP Publication 38¹⁾(ICRP 38)“Radionuclide Transformations”が利用されている。ICRP 38は、被ばく線量計算や施設の安全評価に幅広く使われており、原子力、医学分野などにおける放射線の安全な利用に不可欠なものになっている。

本稿では、ICRP 38に焦点をあて、これが編集された背景やこれまでの利用、そして、ICRP 38に対して最近指摘されている問題点とそれらを解決するための今後の展開について紹介する。

II. 被ばく線量計算における崩壊データの役割

放射性核種による人体の被ばくは、核燃料や放射性同位元素の取り扱い、さまざまな病理診断などに対する放射性医薬品の利用においてのみならず、環境中に分布する天然の放射性核種に由来して日常生活においても生じている。これらの被ばくの形態は、第1図に示すように、体外にある核種からの被ばく(外部被ばく)と、体内に摂取した核種による被ばく(内部被ばく)の2つに分けられる。

放射線の被ばくによる人体影響の度合いを表す量として、実効線量²⁾(Sv)が用いられている。実効線量は、発がんや遺伝的影響などの発生確率の指標として使われており、放射線により与えられる各臓器・組織の吸収線量に、放射線の種類や臓器による影響の違いを補正する係数を掛け、全身の臓器について加算して評価される。

しかし、人体の各臓器の吸収線量を直接測定したり、ま

第1図 人体の外部被ばくおよび内部被ばく

人体の被ばく線量を表す実効線量は、放射線によってもたらされる各臓器・組織の吸収線量に基づいて評価される。

Nuclear Decay Data used in Radiation Protection and Medical Application: Akira ENDO.
(2001年 10月22日 受理)

た、個々の被ばく状況に対して計算するのは容易ではない。そこで、計測可能な量、例えば、放射能と実効線量との関係を与える“換算係数”をあらかじめ求めておき、これを用いて線量の評価が行われる。この換算係数を計算するために、人体を数値演算が可能のようにモデル化した数学人体模型、モンテカルロ法などによる放射線輸送計算技術、体内に取り込まれた核種の臓器間の動きを表す体内動態モデル、そして本稿で取り上げる崩壊データが用いられる。

外部被ばくに対する換算係数は、人体の各臓器を幾何形状に近似し数式で表現した数学人体模型³⁾を、MCNP⁴⁾、EGS⁵⁾などの放射線輸送計算を行うシミュレーションコードに組み込み計算される。放射線源となる核種の分布と、崩壊データに基づき放出される放射線のエネルギーや放出率を指定することにより、放射線の発生、人体への入射、そしてさまざまな相互作用により人体にエネルギーを与える過程を詳細に計算することができる。外部被ばくに対しては、放射性核種の単位濃度あたりの実効線量率 $((\text{Sv/s})/(\text{Bq/cm}^3))$ など、核種の分布条件に応じて、いくつかの種類の換算係数が計算され、用いられている。

一方、内部被ばくの場合は、放射性核種が一たん体内に取り込まれると、その核種が体外に排泄されるまでの間、被ばくは継続する。そのため、摂取してから将来のある期間^{a)}に受けるであろう積算線量、すなわち“預託線量”によって線量が評価される。口や鼻を通して体内に取り込まれた核種に対して、体内での移動を表す体内動態モデル⁶⁾を用いて、各臓器における核種の蓄積が計算される。これに、核種の半減期、放射線のエネルギー・放出率データをあてはめ、積算期間中の放射線の総放出数を求め、先に述べた放射線輸送シミュレーション技術を用いて各臓器の吸収線量が計算される。内部被ばくの換算係数は、1 Bqを体内に取り込んだ場合の預託実効線量(Sv/Bq)で与えられている。

以上のように、線量評価の基礎となる換算係数の計算には、核種の半減期、放射線のエネルギー・放出率に関わるデータが不可欠であり、それらの信頼性は換算係数、すなわち、評価される線量の信頼性に直接結び付いている。

III. 線量計算用崩壊データ ICRP 38

1. ICRP 38の編集

放射線防護や核医学において、線量計算に現在最も広く利用されているICRP 38の崩壊データは、1970年代中頃、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)において、放射線防護と核データの専門家との協力によって編集された。当時のICRPは、1959年に刊行した内部被ばく評価の換算係数に関する報告書⁷⁾を改訂するために、線量評価モデルの改良を進めていた。そして1974年、新たなモデルを取り入れた線量計算コードを開発するとともに、包括的な崩壊データを整備するために、ORNLの線量評価研究グループを

母体とするタスクグループが編成された。

一方、その頃のORNLでは、核構造・崩壊データの編集、評価および普及のための“核データプロジェクト”が進められていた⁸⁾。線量評価研究グループは、この活動により集積された核構造・崩壊情報の集大成である評価済み核構造データファイル(Evaluated Nuclear Structure Data File: ENSDF)に着目し、これを利用して線量計算に用いる崩壊データを編集することにした。核データプロジェクトで活動していたL. T. Dillman氏は、線量評価研究グループからの要請を受け、ENSDFから放射線データを算出するための計算コードEDISTR⁹⁾を開発し、これを用いて崩壊データファイルを完成させた。このデータファイルは、1979年以降、4部にわたり刊行されたICRP 30¹⁰⁾の内部被ばく換算係数の計算に利用され、その後データブックにまとめられ、ICRPの承認を経て1983年にICRP 38として出版された。

ICRP 38には、半減期10 min以上の核種を中心に820核種のデータが収録され、これらは、原子力施設、核医学、理工学研究などで利用される核種をカバーしている。整備されている情報は、核種ごとに、半減期、崩壊形式と分岐比、崩壊系列、各放射線のエネルギーおよび放出率、そして崩壊形式とエネルギー準位を図示した崩壊図である。さらに、これらのデータは、線量計算コードにおいて容易に利用できるように、データベースソフトウェアNUCDECAY^{b)}として整備されている。

2. ICRP 38の利用

ICRP 38は当初、その編集のきっかけとなったICRP 30の内部被ばく換算係数の計算に用いられた。その後もICRP 38は、ICRPが提供する一連の内部被ばく換算係数^{10, 11)}、環境中に分布する核種に対する外部被ばく換算係数の計算¹²⁾などに利用されている。

また、原子炉、放射線施設において、排気・排水設備に対する安全性評価の指標には、放射線障害防止法関連法令で定められる濃度限度^{c)}が使われているが、これらの濃度限度は、上記の換算係数を基に計算されている。すなわち、ICRP 38は、個人の被ばく線量の評価のみならず、施設を安全に利用する上で不可欠なさまざまな数値の算出にも幅広く使われている。

IV. ICRP 38の問題点

以上述べたように、ICRP 38は、人体の被ばく評価に關して、これまでに重要な役割を果たしてきた。しかし、そ

^{a)} 積算期間は、放射線作業員および一般公衆の成人は50年、子どもは摂取した年齢から70歳までの期間。

^{b)} NUCDECAYは、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)データバンク、ORNL放射線安全情報計算センター(RSICC)から配布されている。

^{c)} 1年間連続して体内に取り込んだ場合、線量限度に相当する被ばくをもたらす放射性核種の濃度。

の一方で、このデータが編集されてすでに18年が経過し、以下に挙げる問題点が指摘されるようになった。

第1に、ICRP38は、1983年以降、更新が行われておらず、新しい核データの知見を反映してない古いデータとなってしまった。ICRP38の編集に用いられたENSDFは、国際原子力機関(IAEA)がとりまとめる国際ネットワーク^aの下で、新しい実験データを追加しながら5年ほどの周期で更新が行われている。そのため、ICRP38と比べて、半減期や崩壊図が大幅に変更された核種が出てきた¹³⁾。例えば、第2図に示す⁸⁰Srでは、崩壊図の変更により、内部被ばくによる実効線量が約7倍も増加した。実験技術の進歩に伴い良質のデータが得られるようになり、多くの核種において、新しいENSDFに基づく崩壊図はICRP38に比べて詳細になっている。

第2に、放射線の利用分野が広がるにつれて、新しい核種に対する線量評価の必要性が生じてきた。例えば、今後、利用が一層広がる大型加速器施設において、核破碎反応などにより生成される核種の中には、ICRP38にない核種が多数存在する¹⁴⁾。安全を確保しながら過剰な防護対策を避け、設備に要するコストを最適化するためには、これらの核種に対して、適切な線量評価を行う必要がある¹⁵⁾。

これらの問題は、原子力および放射線の安全な利用を進める上で重要であり、これを解決するために、ICRP38に対する改訂の必要性が高まっていた。

第2図 ⁸⁰Srの崩壊図の変更；(a) ICRP38の崩壊図、(b) 1997年のENSDFに基づく崩壊図

^a 日本も、シグマ委員会(日本原子力学会「シグマ」特別専門委員会と日本原子力研究所(原研)シグマ研究委員会の総称)ENSDFグループが、質量数118~129のファイルの編集を担当し、貢献している。

V. ICRP 38再評価の取組み

以上の背景に基づき、日本原子力研究所において、1997年の新しいENSDFを用い、ICRP38の全核種のデータを更新するとともに、加速器施設などで今後必要とされる核種を追加した崩壊データの整備が行われた。

ENSDFは、実験データの評価に基づき編集が行われている。そのため、核種によっては、評価の基となる実験データが乏しく、ENSDFに十分な情報が収録されていない。そこで、崩壊データの編集に用いたENSDFに対し、最新データ¹⁶⁾に基づく崩壊の全エネルギー(Q値)、崩壊形式、分岐比および基底状態のスピン・パリティの更新、また、各エネルギー準位の γ 線強度バランス $\cdot\beta$ 崩壊分岐比などに対する補完や修正を行った。さらに、ICRP38の編集に用いられたEDISTRコードに対して、内部転換係数データの更新などの改良を行い、これを用いてICRP38と同一形式の崩壊データを編集した。これらのデータは、DECDC(Nuclear DECay Data Files for Dosimetry Calculation)と呼ばれるデータファイルとして整備された¹⁷⁻¹⁹⁾。

DECDCは、1,037核種のデータを収録している。その中の半減期10 min以上の核種の内訳を第3図に示す。DECDCは、ICRP38を更新するとともに大幅に補強し、この半減期に属する核種の91%(925核種)をカバーするようになった。収録されていない90核種余りについては、今後、それらのENSDFの整備を待ち、適宜追加していく。

DECDCは、すでに種々の被ばく線量計算に活用されている。例えば、ICRPが内部被ばく換算係数を算出していない核種に対する濃度限度が計算され²⁰⁾、これらは、2001年4月に施行された放射線障害防止法の告示別表に収録された。さらに、DECDCは、さまざまな分野における利用に供するため、OECD/NEAデータバンク、ORNL RSICCおよび(独)高度情報科学技術研究機構(RIST)を通じ

第3図 DECDCに収録された半減期10min以上の核種数

て公開された。

VI. 今後の展開

ICRPでは、線量計算に現在用いられている数学人体模型、体内動態モデルなどの一連の改訂を、10年ほどの計画で進めている最中である²¹⁾。その作業の中には、ICRP 38の改訂も含まれており、これは、ICRP 38の編集に携わったORNLのK.F. Eckerman氏を中心に、これから2005年頃を目標に行われる予定である。先に公開されたDECDCは、ICRP 38と同形式の総合的に編集されたデータファイルであり、ICRPにおける改訂作業においても有用なデータとして利用されると期待される。

ICRPでは、DECDCを含め、利用可能な資源を幅広く調査・検討し、新しい崩壊データベースを構築していくと考えられる。そのためには、その基になるENSDFの評価活動は引き続き重要であり、また、核データ専門家との直接の協力も必要であろう。それはまさに、20年前にORNLで行われた協力関係の再現である。ICRP 38に替わり、放射線防護、核医学などのさまざまな分野において、共通の資源として長く利用されるデータが整備されることを期待したい。

— 参 考 文 献 —

- 1) ICRP, *Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions*, ICRP Publication 38, (1983).
- 2) ICRP, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, (1991).
- 3) 山口恭弘, “数学ファントムと放射線防護への適用”, *Radioisotopes*, **47**, 844~854 (1998).
- 4) J.F. Briesmeister, Ed., *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, LA-13709-M, (2000).
- 5) W.R. Nelson, H. Hirayama, D.W.O. Rogers, *The EGS4 Code System*, SLAC-265, (1985).
- 6) ICRP, *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*, ICRP Publication 30, Part 1, (1979); Part 2, (1980); Part 3, (1981); Part 4, (1988).
- 7) ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation*, ICRP Publication 2, (1959).
- 8) W.B. Ewbank, M.R. Schmorak, *Evaluated Nuclear Structure Data File: A Manual for Preparation of Data Sets*, ORNL-5054/R1, (1978).
- 9) L.T. Dillman, *EDISTR: A Computer Program to Obtain a Nuclear Decay Data Base for Radiation Dosimetry*, ORNL/TM-6689, (1980).
- 10) ICRP, *Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers*, ICRP Publication 68, (1994).
- 11) ICRP, *Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5*, ICRP Publication 72, (1996).
- 12) K.F. Eckerman, J.C. Ryman, *External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil*, EPA 402-R-93-081, (1993).
- 13) A. Endo, Y. Yamaguchi, “Comparison of nuclear decay data derived from recent nuclear structure data files with those of ICRP Publication 38,” *Radiat. Prot. Dosim.*, **82**, 59~64 (1999).
- 14) T. Takada, K. Kosako, *Development of the DCHAIN-SP Code for Analyzing Decay and Build-up Characteristics of Spallation Products*, JAERI-Data/Code 99-008 (1999).
- 15) 柴田徳思, 岩井 敏, 大久保 徹, 他, “加速器施設で生成される核種の濃度限度”, *Radioisotopes*, **41**, 93~105 (1992).
- 16) G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, et al., “The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties”, *Nucl. Phys.*, **A624**, 1~124 (1997).
- 17) A. Endo, T. Tamura, Y. Yamaguchi, *Compilation of Nuclear Decay Data Used for Dose Calculations: Data for Radionuclides not Listed in ICRP Publication 38*, JAERI-Data/Code 99-035, (1999).
- 18) A. Endo, Y. Yamaguchi, *Compilation of Nuclear Decay Data Used for Dose Calculation: Revised Data for Radionuclides Listed in ICRP Publication 38*, JAERI-Data/Code 2001-004, (2001).
- 19) A. Endo, Y. Yamaguchi, “Compilation of new nuclear decay data files used for dose calculation”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **38**, 689~696 (2001).
- 20) 河合勝雄, 遠藤 章, 現行法令及びICRP Publ. 68, 72に掲載されていない核種の空気中濃度限度等の試算: JAERI-Data/Code 2000-001補遺, JAERI-Data/Code 2000-033, (2000).
- 21) 稲葉次郎, “国際放射線防護委員会第2専門委員会2000年合報告”, *放射線科学*, **44**, 142~148 (2001).

著者紹介

えんどう・あきら

日本原子力研究所保健物理部外部被ばく防護研究室副主任研究員。理学博士。1988年東京都立大学理学研究科博士課程修了。同年、日本原子力研究所入所。以来、保健物理部において、放射線管理技術、被ばく線量測定・評価に関する研究に従事。この間、1995~96年英国Harwell研究所へ留学。