

2012 年原子力学会春の年会 企画セッション

「評価済核構造データファイル ENSDF とその応用」

(2) 線量評価における ENSDF の利用

日本原子力研究開発機構
環境・放射線科学ユニット
遠藤 章
endo.akira3@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力学会 2012 年春の年会の核データ部会セッションにおいて「放射線防護・核医学の線量評価における ENSDF の利用」と題する発表をする機会を頂いた。この発表では、ENSDF を提供する核データコミュニティと、ENSDF の利用者との情報・意見交換の機会となる事を期待し、線量評価に不可欠な放射性核種データを取り上げ、核データの利用者の立場から、ENSDF の有用性、利用の実態、今後への期待等を述べた。

本稿では、新たな情報も加えながらその発表の要点をまとめ、改めて ENSDF と線量評価との関係を述べたい。

2. 線量計算における ENSDF の役割

被ばく線量の評価は、放射線の照射によりもたらされる人体影響を推定するために行われる。体外にある放射性核種からの被ばく（外部被ばく）、体内に摂取した核種による被ばく（内部被ばく）のいずれにおいても、基本となるのは組織、臓器の平均吸収線量 (J kg^{-1}) である。この吸収線量に、放射線の種類やエネルギーに依存した生物学的効果、発がんや遺伝的影響に対する臓器の相対的感受性を考慮した加重をして評価されるのが、実効線量 (Sv) である。

しかし、人体の臓器の吸収線量を直接測定するのは現実には不可能であり、また、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、放射能と各臓器の吸収線量、加重した等価線量、実効線量との関係を与える“線量換算係数（あるいは線量係数）”を求めておき、これを用いて線量が評価される。この線量換算係数は、ファントムと呼ばれる人体を忠実に再現したモデル、体内に取り込まれた放射性核種の分布を表す体内動態モデル、放射線と人体との相互作用を評価するシミュレーションコード、そして放射性核種から放出される放射線の種類、エネルギー、放出率等

の放射性核種データを用いて計算される。図 1 に Cs-137 に対する線量係数を示す。

線量評価の基盤となる換算係数の計算には、放射性核種データが不可欠であり、その信頼性は評価される線量の信頼性に直接結びついている。従って、評価済み核構造データファイル ENSDF は、被ばく線量計算の基盤データとしてはもちろんのこと、線量計算から誘導される様々な基準値を通して、様々なところで役立っている。

Time after intake	7 days	30 days	1 year	10 years	50 years
Bladder Wall	3.6E-10	1.3E-09	6.3E-09	7.0E-09	7.0E-09
Bone Surface	3.1E-10	1.2E-09	6.0E-09	6.6E-09	6.6E-09
Breast	2.5E-10	9.6E-10	4.9E-09	5.4E-09	5.4E-09
GI-Tract					
Oesophagus	3.1E-10	1.1E-09	5.7E-09	6.3E-09	6.3E-09
St Wall	3.5E-10	1.2E-09	5.7E-09	6.4E-09	6.4E-09
Colon	4.1E-10	1.4E-09	6.7E-09	7.4E-09	7.4E-09
Liver	3.0E-10	1.2E-09	5.9E-09	6.5E-09	6.5E-09
Ovaries	3.2E-10	1.2E-09	6.2E-09	6.9E-09	6.9E-09
Red Marrow	3.0E-10	1.1E-09	5.7E-09	6.3E-09	6.3E-09
Respiratory Tract					
Lungs	3.2E-10	1.1E-09	5.6E-09	6.2E-09	6.2E-09
Skin	2.4E-10	9.2E-10	4.7E-09	5.2E-09	5.2E-09
Testes	2.8E-10	1.1E-09	5.5E-09	6.1E-09	6.1E-09
Thyroid	3.0E-10	1.1E-09	5.7E-09	6.3E-09	6.3E-09
Remainder	3.4E-09	4.3E-09	8.7E-09	9.4E-09	9.4E-09
Effective dose	4.8E-10	1.3E-09	6.1E-09	6.7E-09	6.7E-09

図 1 : Cs-137 の内部被ばく線量係数。1 (Bq) の Cs-137 を吸入摂取してからの経過時間毎の各臓器の等価線量、実効線量が、このようなデータベースとして提供されている。

3. 線量評価における ENSDF の利用の歴史的な発展

放射線防護、核医学における線量計算では、国際放射線防護委員会 (ICRP: International Commission on Radiological Protection)、米国核医学会内部放射線量委員会 (MIRD 委員会: Committee on Medical Internal Radiation Dose) によって編集された放射性核種データベースが利用されている。その歴史的な流れを簡単に遡りたい。

ICRP は、1928 年に第 2 回国際放射線医学総会において、国際 X 線ラジウム防護委員会 (ICXRP) として設立された。当初、放射線の医学利用における防護を対象としたが、その後、原子力を含む様々な分野における放射線の利用の拡大に伴い防護の対象を広げ、名称も 1950 年に現在の ICRP に改められた。ICRP が 1959 年出版した Publication 2 [1] (ICRP2) では、内部被ばくに関する核種毎の身体負荷量、空気や水に対する最大許容濃度をはじめ勧告した。これらの算出には、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) 内部被ばく評価研究グループが、当時入手できた放射性核種に係わるデータが使われた。

一方、核医学分野をリードする米国核医学会に 1965 年に設立された MIRD 委員会は、1969 年、核医学で利用される 24 種類の放射性核種について、線量計算に用いる放射線データをまとめた MIRD Pamphlet No.4 [2]を出版した。この僅か 28 ページの小冊子は、当時入手できた崩壊図を入力に、ORNL において開発された計算プログラムを用いて編集された。整備されたデータベースは小規模だが、ここで開発された手法が、その後の 2 回の MIRD Pamphlet の改訂、さらに後述する MIRD データブック[3]の開発の基礎になった。

1974 年、ICRP は 1959 年に出版した ICRP2 を改訂するために、ORNL の内部被ばく評価研究グループのメンバーを中核とするタスクグループ DOCAL (Dose Calculations) を編成した。DOCAL は、新たな線量評価モデルの開発のみならず、包括的な放射性核種データベースの整備も手がけ、その開発は、当時 ORNL で進められていた核データプロジェクトの支援を得て強力に推進された。この時、核データプロジェクトから提供された ENSDF が、線量計算用データベースの編集にはじめて利用され、MIRD Pamphlet の編集に用いたプログラムを基に、種々の放射線のデータを ENSDF から直接算出するプログラム EDISTR [4]が開発された。この手法を用いて 820 核種を収録した ICRP Publication 38 [5] (ICRP38) が編集され、1983 年に出版された。ICRP は ICRP38 を用いて一連の線量換算係数を提供し、これらは IAEA の国際基本安全基準(BSS)をはじめ広く利用されてきた。

さらにこの手法を核医学利用核種にも適用し、従来 MIRD Pamphlet に代わり 242 核種を収録した MIRD データブック[3]を 1989 年に完成させた。これは米国核医学会の推奨データとして、核医学分野で使用されてきた。米国 Brookhaven 国立研究所 National Nuclear Data Center の web の “MIRD” のページ (<http://www.nndc.bnl.gov/mird/>) は、この MIRD データブックのフォーマットで最新のデータを提供しているサイトである。

1970 年代に行われた ORNL における核データの専門家と、線量評価研究で世界の中核であった内部被ばく評価研究グループとの協力は、現在も使われ続ける技術基盤を創出した歴史に残る重要なものであった。

4. ICRP、MIRD 委員会におけるデータベースの改訂

ICRP38 と MIRD データブックは、線量評価に幅広く活用され重要な役割を果たしてきたが、その一方で、以下に述べるいくつかの課題も出てきた。

まず、ENSDF の更新に伴い、データベースが整備された 1983 年当時から、崩壊図が大幅に見直された核種が出てきた。次に、核医学における Auger 電子に対する線量評価への要求である。核医学で非常に多い I-125、Tc-99m 等は、Auger 電子を多数放出する。これらの Auger 電子は、生体中で nm オーダーの飛程しかなく、局所的なエネルギー付与を生じ、直接、あるいは周辺に生成されるラジカルにより間接的に DNA 損傷を引き起こす確率がガンマ線等に比べて高い。この評価には、臓器の平均吸収線量の計算を目的とし

た従来のデータでは、エネルギー分布情報が不十分である。さらに、加速器施設の利用増加等により、原子力施設とは異なる新たな核種に対する線量評価の必要性も生じてきた。以上の課題やニーズに対応するために、ICRP38 及び MIRD データブックの改訂の必要性が高まりつつあった。

上記の課題を解決するために、1996 年から筆者らは、当時の最新の ENSDF を利用して、放射性核種データベース DECDC の整備に着手した。DECDC は、ICRP38 の全核種のデータを更新し、かつ今後利用が見込まれる核種を追加したデータベースである。その第 1 版は 2001 年に完成[6]し、OECD/NEA データバンク等を通して一般に提供した。この活動が ICRP、MIRD 委員会へと伝わり、2001 年頃、筆者と、ORNL で ICRP38 及び MIRD データブックの編集を行った内部被ばく評価研究グループが協力し、ふたつのデータベースを全面的に改定する計画が立ち上がった。

その後この計画は進展し、MIRD 委員会、ICRP の新しいデータベースが、2008 年にあいついで公開された (図 2)。そのデータベースの編集過程の詳細は、別の解説に譲る[7]として、ここでは編集された新しいデータベースについて紹介したい。



図 2 : MIRD 2nd Edition (左) と ICRP Publication 107 (右)

(1) MIRD: Radionuclide Data and Decay Schemes, 2nd Edition [8]

このデータ集は、A4 版 671 ページのデータブックに、Windows PC で動作するデータベースソフト RADTABS を収録した CD-ROM が添付されている。収録核種は第 1 版の 242 核種に 91 核種追加し、333 核種になった。追加核種は、MIRD 委員会が 1998 年に行ったアンケート等に基づき選定された。

データブックは、放射性崩壊に関する基本情報、収録核種リストに続き、個々の核種

の崩壊図と代表的な放射線のエネルギー、放出率等を掲載した表で構成されている。当初、崩壊図は画像データ、表はテキストデータで CD-ROM に収録し、データ集そのものは遙かに薄くなるはずであった。しかし、放射性核種の特徴を、崩壊図を見ながら理解することは、学生にとって大事なプロセスであるとの教育効果の観点から、これらを印刷して収録したため、分厚いデータ集になった経緯がある。

RADTABS は、GUI を介して収録核種の選択、放射線データの表示、検索、ファイルへの書き出し等が行える (図 3)。ファイルへ書き出したデータは、線量計算コードの入力に利用できる。

今回の改訂で大きく進化した点は、前述した核医学で必要とされている Auger 電子に対して詳細なスペクトルを提供した点である。この詳細スペクトルを計算するために、内部転換や軌道電子捕獲による電子軌道の空孔の生成、生成された空孔間の電子の遷移のプロセスをより外殻まで拡張した。この計算は、Dirac-Hartree-Salte の方法により評価された輻射遷移確率、非輻射遷移確率等の副殻・緩和パラメータをまとめた評価済み原子データライブラリ EADL [9,10]を用いて行った。この方法を EDISTR に組み込み、ENSDF を入力とし、放射性核種の崩壊に伴う Auger 電子の詳細スペクトルを計算可能にした。

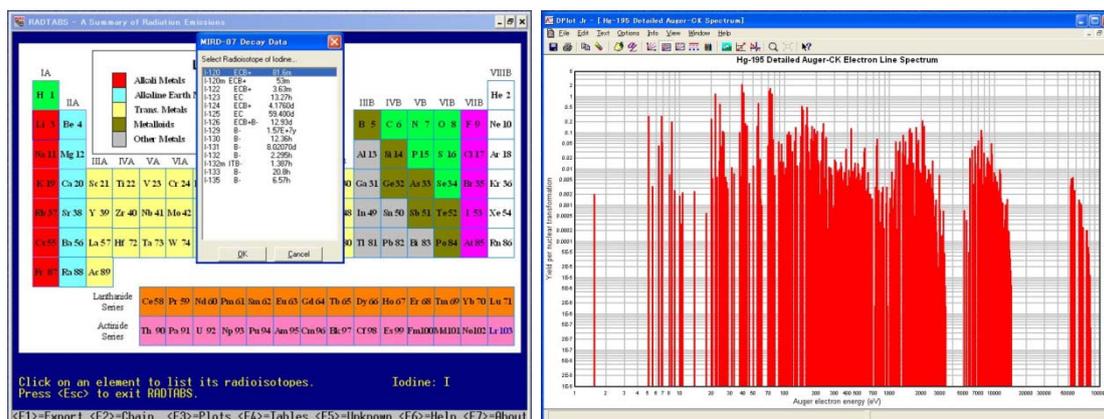


図 3 : RADTABS の核種選択画面 (左)、Auger 電子スペクトル (右)

(2) ICRP Publication 107 (ICRP107) : Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations [11]

ICRP107 は加速器施設等で生成する短半減期核種の評価にも対応するために、収録核種数が ICRP38 の 820 から 1252 に増加した。ICRP38 と大きく異なるもうひとつの点は、データの説明のみが冊子となり、データベースソフト DECDATA、崩壊図、放射線データを掲載した表等は CD-ROM に収められ、冊子に添付されている。これは、MIRD データブックと大きく異なる形態であるが、これには以下の余談がある。

ICRP 刊行物は B5 版に近いサイズで統一されているが、崩壊図を掲載する都合上、唯一の例外で ICRP38 はその倍のサイズになってしまい、一連の刊行物と同じ高さに収まら

ず極めて不評であった。崩壊図やデータを CD-ROM に収録した ICRP107 は、一連の刊行物と同じサイズになったため、巻頭言ではこの点に触れ「特大の ICRP38 とは異なり、この刊行物は他の刊行物と同じ本棚に収めることができる」とユーモラスに書かれている。ICRP38 のスタイルを踏襲すると約 2000 ページにも及ぶため、実用面からこの判断がなされた。DECDATA は、MIRD データブックの RADTABS と機能面で同じである。

5. おわりに

MIRD 委員会は、新しいデータブックの完成を受け、核医学検査・治療で利用される線量評価用データの改訂を進めている。これらは順次、MIRD Pamphlet 等の刊行物として提供される。また、ICRP も作業者及び公衆に対する線量換算係数の全面改定を進めており、ICRP107 はその評価をはじめ、今後提供する様々なデータの計算に利用される。

1974 年、ICRP2 [1]を改訂するために ORNL の内部被ばく評価研究グループのメンバーで構成されたタスクグループ DOCAL は、その一連の作業を終えた 1980 年頃、解散するはずだった。しかし、ICRP は放射線防護の指針策定において、基盤となる線量評価法の開発に関する活動は必須であると考えると同時に、そのような重要な活動をひとつの研究機関に依存することに懸念を持っていた。そこで ICRP は、この役割をより多くの国々が参加する形態に発展させ、米国に加え、英国、ドイツ、ウクライナ、ブラジル、日本等の専門家をメンバーに加え活動の強化を図った。その活動は、設立後約 40 年経過した現在も継続され、ICRP 第 2 専門委員会の下、数多くの出版物を作成し世の中へと提供してきた。筆者も 2002 年に DOCAL のメンバーとなり、その活動に参加している (図 4)。



図 4：平成 24 年 5 月、米国ジョージア工科大学で開催された ICRP タスクグループ DOCAL (線量計算開発担当) と INDOS (内部被ばく評価モデル開発担当) の合同会議

本稿の主題である ENSDF は、線量計算の基盤となるデータとして不可欠なものである。その評価は、ICRP の活動と同様に、世界中の専門家によるボランティアベースの活動により支えられていると伺っている。核データコミュニティの継続した努力により、臓器の平均吸収線量の計算に対して、ENSDF は成熟した段階に到達したかもしれない。しかし、新規の放射性同位元素の利用、生物学的効果の理解に欠かせない細胞、DNA のミクロスケールでのエネルギー付与分布の評価等には、ENSDF を含む核データの充実、信頼性の改善は引き続き望まれる。

我が国の ENSDF 評価グループは、国際的な評価の分担を担い多大な貢献をする一方で、高い専門性を必要とする ENSDF 評価者の確保及び育成には、様々な苦勞をされていると聞く。これまで長く積み重ねてきたこの貴重な財産が、今後も引き続き維持され活用されるよう、その恩恵を受けている我々利用者も何らかの支援ができればと考えている。

参考文献

- [1] ICRP, ICRP Publication 2 (1959).
- [2] L.T. Dillman, J. Nucl. Med., Suppl. 2, 5-32 (1969).
- [3] D. Weber, et al., MIRD-Radionuclide data and decay schemes, Society of Nuclear Medicine (1989).
- [4] L.T. Dillman, ORNL/TM-6689 (1980).
- [5] ICRP, ICRP Publication 38 (1983).
- [6] A. Endo, et al., J. Nucl. Sci. Tech., 38, 689-696 (2001).
- [7] 遠藤 章, Isotope News, No.654, 2-6 (2008).
- [8] K.F. Eckerman and A. Endo, MIRD: Radionuclide Data and Decay Schemes, 2nd Edition. The Society of Nuclear Medicine (2008).
- [9] S.T. Perkins, et al., UCRL-50400, Vol.30 (1991).
- [10] D.E. Cullen, UCRL-ID-110438 (1992).
- [11] ICRP, ICRP Publication 107 (2008).