

放射線防護・医学分野で用いられる 放射性核種崩壊データベースの開発

Development of Nuclear Decay Database used in Radiation Protection and Medical Application

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
環境・放射線工学ユニット 放射線防護研究グループ
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良く計算するためには、その核種の半減期、放出される放射線のエネルギーや放出率に関する崩壊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)、米国核医学会内部放射線量委員会 (MIRD) が1980年代に編集した崩壊データが利用されてきた。現在、ICRP、MIRDは、それぞれの崩壊データを改訂する計画を進めており、これに日本原子力研究開発機構において編集された線量計算用崩壊データ DECDC2が採用されることになった。本稿では、ICRP、MIRDのデータが編集された経緯、これまでの利用及びデータの改訂に至った背景、また、DECDC2の開発と今後の展開について述べる。

1. はじめに

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におけ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よって日常の生活でも生じている。これらに由来する被ばく線量を計算するためには、その核種の半減期、放出される放射線の種類、エネルギー、放出率等の崩壊データが必要である。放射線防護、放射線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 (Medical Internal Radiation Dose) によって編集された崩壊データが利用されている^{1, 2)}。

しかし、いずれのデータにおいても、編集以降、核種によっては崩壊に関する基本情報が大幅に見直され^{3, 4)}、また、線量計算の立場からは、崩壊データに対する新たなニーズが

生じてきた⁵⁾。これらの問題点や要求に対応するために、ICRP、MIRDでは、最新の知見を反映させた新しい崩壊データの整備計画を進めている。この新しいデータの整備にあたり、日本原子力研究所 (原研。10月1日より日本原子力研究開発機構 (原子力機構)) において編集された線量計算用崩壊データ DECDC2⁶⁾が全面的に採用されることになった。

本稿では、この線量計算用の崩壊データに焦点をあて、これまで幅広く利用されてきた ICRP、MIRDのデータが編集された経緯やその利用について紹介するとともに、データの改訂に至った背景、DECDC2の開発と今後の展開について述べる。

2. 線量計算における崩壊データの役割

人体に対する被ばく線量評価は、放射線の照射によりもたらされる人体影響を定量的に推定することを目的に行われる。被ばくに伴

う発がんや遺伝的影響等の発生確率に関わる指標として、実効線量(単位 Sv)が用いられている。実効線量は、放射線により付与される各臓器・組織の吸収線量(Gy)に、放射線の種類や臓器による影響の違いを補正するための荷重係数を掛け、全身の臓器・組織について加算して評価される。図1に示す体外にある核種からの被ばく(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、実効線量の評価の基本となるのは各臓器・組織における平均の吸収線量であり、これらは放射線源となる核種の分布、放出される放射線のエネルギーや放出率に基づいて算定される。

放射性同位元素(RI)の医学利用においては、特定の臓器に集積する医薬品をRIで標識し、RIから放出されるガンマ線を体外で検出することにより、臓器機能を映像化し診断がなされる。また、同様の集積機能を利用し、RIを治療対象とする臓器に選択的に取り込ませる、または密封された小線源を直接腫瘍に刺入・密着させることにより、腫瘍細胞を

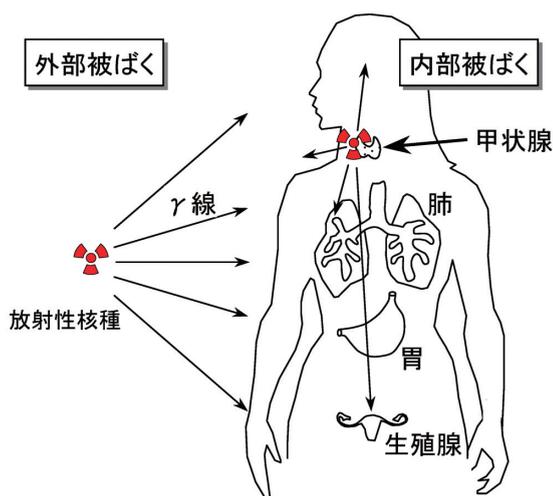


図1 放射性核種による人体の外部被ばく及び内部被ばく。被ばく線量は、放射性核種から放出される放射線にもたらされる各臓器・組織の吸収線量に基づいて評価される。

破壊する放射線治療が行われる。これらの診断や治療では、RIの崩壊データに基づく線量評価から、照射部位を必要な範囲に局限しながら、最適な診断及び治療効果を得るための条件が設定される。

これらの線量計算を精度良く行うためには、その核種の半減期、崩壊形式、生成される崩壊生成物、各放射線のエネルギー及び放出率について、信頼性の高いデータが不可欠である。対象とする放射線は、原子核から直接放出されるアルファ線、ベータ線、ガンマ線のみならず、内部転換電子、また、崩壊後の原子過程で放出されるエクソ線、オージェ電子までが必要となる。特にエクソ線、オージェ電子の低エネルギー放射線は、細胞レベルでの局所的な線量分布を評価する場合に重要になる。さらに、主に超ウラン元素の自発核分裂を引き起こす核種(自発核分裂核種)に対しては、核分裂に伴い放出される核分裂片、即発中性子及びガンマ線に加えて、核分裂の結果生成される放射性核種の崩壊によるベータ線、ガンマ線に関するデータまでが求められる。これらのデータの信頼性は、線量の評価精度に直接結びつくため、崩壊データは、線量評価において極めて重要な役割を担っている。

3. 線量計算用崩壊データ：ICRP38、MIRDデータ

現在、放射線防護、放射線医学の線量計算には、ICRPが1983年に刊行したICRP Publication 38 (ICRP38) “Radionuclide Transformations”¹⁾、また、MIRDが1989年に出版した“MIRD: Radionuclide Data and Decay Schemes”²⁾の崩壊データが利用されている。これらのデータは、いずれも米国オークリッジ国立研究所(ORNL)が中心となり整備されたものである。

ICRP38は、半減期10分以上の核種を中心に825核種のデータを収録し、原子力エネルギー

ギーや放射線の利用における作業員及び公衆の防護に必要とされる核種を広くカバーしている。このデータは、1970年代中頃、ICRPが内部被ばく評価に用いるデータ⁷⁾を全面改訂するために、線量評価モデルの開発と一体になって整備された。データの整備は、当時ORNLにおいて進められていた“核データプロジェクト”の協力を得て、Nuclear Data Sheets⁸⁾の編集を計算機化するために開発された評価済み核構造データファイルENSDF⁹⁾(Evaluated Nuclear Structure Data File)を利用して行われた。ENSDFは、核種の崩壊によって娘核種に至る流れ図を、実験データの評価から決められた形式で数値化し、計算機カードイメージに配列したものである。ICRPはこのENSDFに着目し、これから崩壊に伴い放出される各種放射線のデータを算定する計算コードEDISTR¹⁰⁾を開発し、825核種に対する崩壊データの編集を行った。

一方、MIRDのデータは、1969年にORNLにおいて、核医学で代表的な24核種に対する線量計算用のデータが編集され、“Radionuclide Decay Schemes and Nuclear Parameters for Use in Radiation-dose Estimation”と題するMIRD Pamphlet No. 4¹¹⁾として刊行されたのが出発点となる。MIRD Pamphlet No. 4は、その後Pamphlet No. 6¹²⁾、Pamphlet No. 10¹³⁾として改訂を重ね、現在は242核種を収録し1989年に刊行された“MIRD: Radionuclide Data and Decay Schemes”²⁾が利用されている。

ICRP38、MIRDのデータのいずれも、収録されている情報は共通している。図2に示すように、各核種について、半減期、崩壊形式と分岐比、生成される娘核種、各放射線のエネルギー及び放出率、そして経由するエネルギー準位を示す崩壊図である。

ICRP38は、当初、その編集のきっかけとなった内部被ばく線量評価に用いる換算係

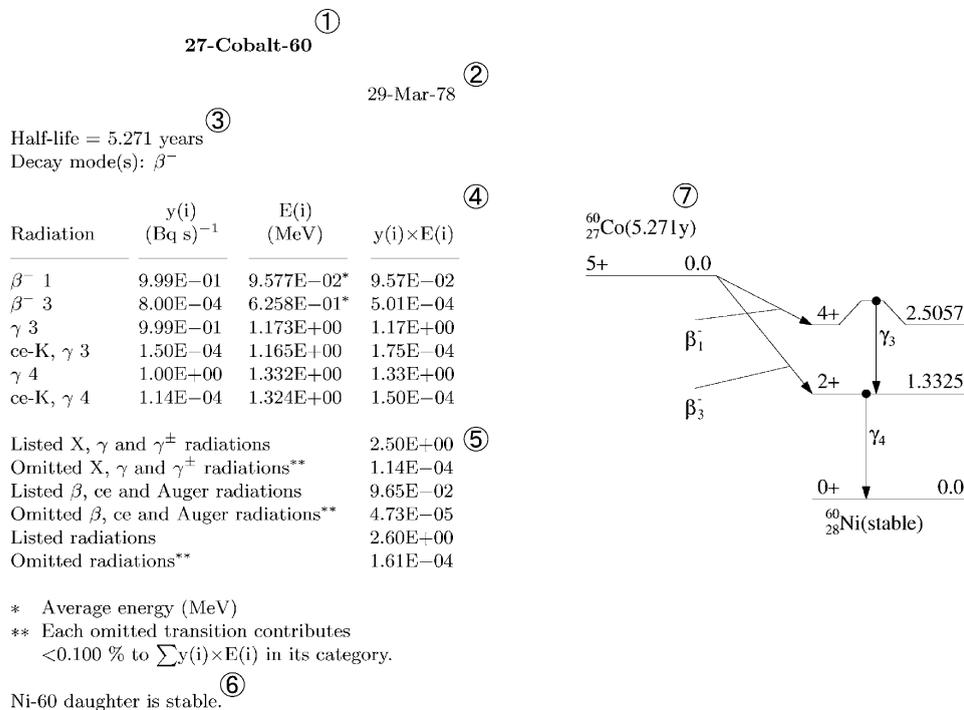


図2 ICRP38のCo-60の崩壊データ。①核種名、②崩壊データの編集に用いられたENSDFの評価日、③半減期及び崩壊形式、④放出される放射線ごとの放出率、エネルギー及びそれらを掛け合わせた放出エネルギー、⑤放射線の種類ごとの放出エネルギー、⑥生成される娘核種、⑦崩壊図。

数^aの計算¹⁴⁾に用いられた。その後もICRP38は、ICRPが提供する一連の内部被ばく換算係数¹⁵⁻²¹⁾、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²²⁾等に利用されている。これらの換算係数は、個人の線量評価はもとより、わが国の放射線防護関連法令で定められる放射線施設の排気・排水濃度限度等、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使われている。一方、MIRDのデータは、米国核医学会の推奨データとして、米国内外において、核医学の研究、医療現場における診断・治療における線量評価に利用されてきた。

これらのデータを整備したORNLは、さらにデータを収録したソフトウェアNUCDECAY²³⁾を開発し、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)を通して提供した。これにより、これらのデータは、利便性の向上により利用が一層拡大し、線量計算用の標準的データとしての地位を確立することになる。

4. ICRP38、MIRDデータの再評価

4.1 データの問題点

ICRP38、MIRDのデータは、ともに放射線防護、医学分野における被ばく線量計算に関して、これまで重要な役割を果たしてきた。しかしその一方で、これらのデータに対して、以下に挙げる問題点が指摘されるようになった。

まず、それぞれのデータは、公開後更新が行われておらず、現在までに数多く報告された新しい核データの知見を反映してない古いデータになってしまった^{3, 4)}。一例として、図3にBa-126の崩壊図を示す。ICRP38の単純な崩壊図(図3(a))に比べて、より新しい崩壊図(図3(b))は非常に複雑である。

この結果、例えばBa-126を体内に摂取した場合の実効線量は2.3倍も増加した⁴⁾。核データの取得に関連する実験技術の進歩に伴い良質のデータが得られることを反映し、多くの核種において、現在の崩壊図はICRP38、MIRDのデータに比べてより詳細になっている。

また、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、核破砕反応等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²⁴⁾。安全を確保しつつも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²⁵⁾。

さらに医学分野では、細胞レベルにおける線量分布を精密に評価するために、エックス線及びオージェ電子に関する詳細データの必要性が高まってきた⁵⁾。核医学で用いられる核種には、軌道電子捕獲、内部転換により生じる軌道電子の再配置に伴い、20~500eVの低エネルギーのオージェ電子を放出する核種がある。これらのオージェ電子は、生体物質中で1~10nmの飛程しかないため、図4に示すようにDNA近傍で局所的に大きなエネルギー付与をもたらし、反応性に富む様々な化学種を生成する²⁶⁾。これに基づくDNAの損傷を評価する場合、従来の臓器の平均吸収線量の算定を目的としたデータでは、電子のエネルギー分布情報が不十分である。

これらの問題は、原子力及び放射線利用を一層進める上で重要であり、これを解決するために、ICRP、MIRDの崩壊データについて、改訂の必要性が高まってきた。

4.2 DECDCの開発

以上の背景に基づき、原研では新しい

a: 放射性核種の単位摂取量や濃度あたりの実効線量を与える係数

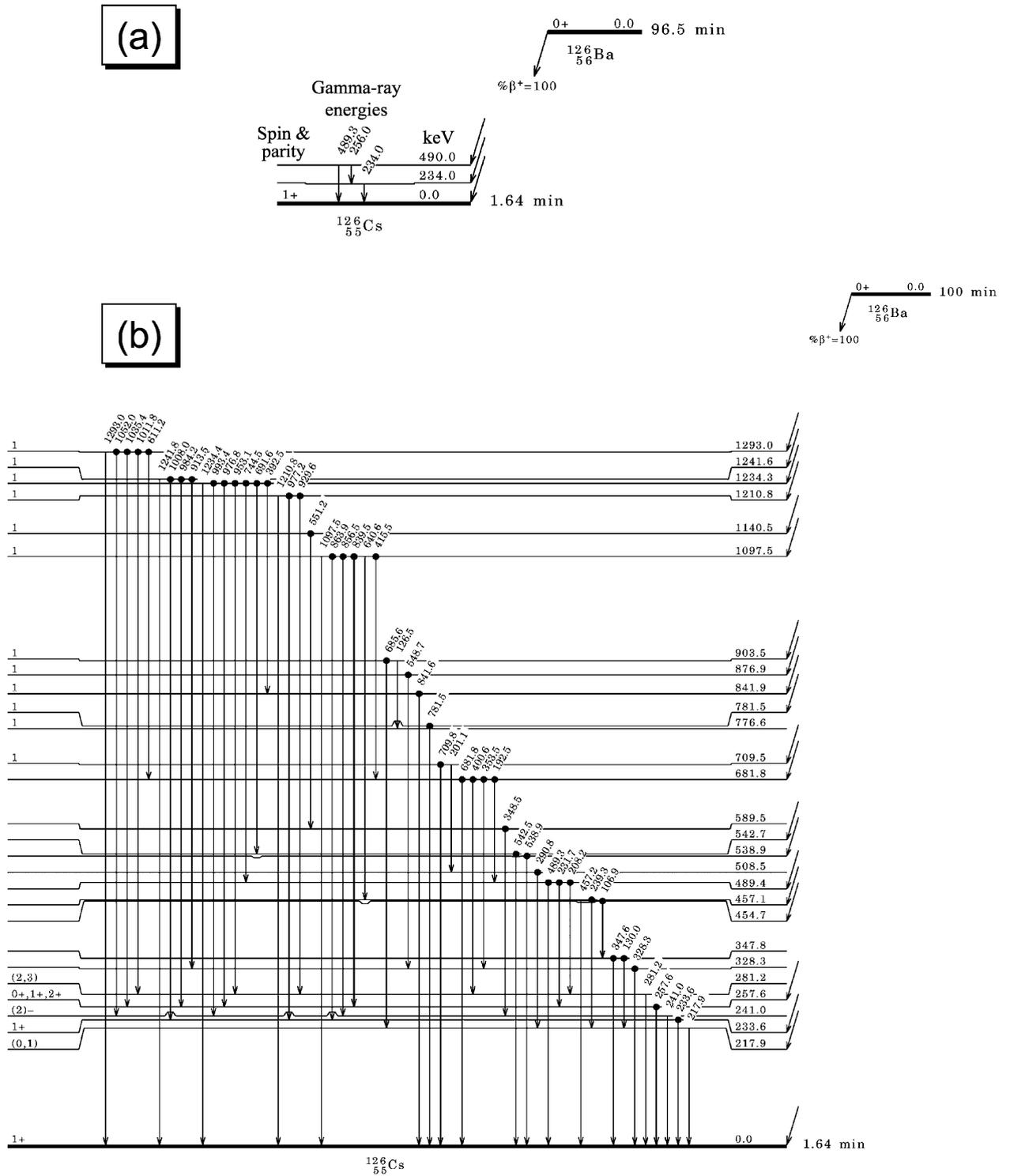


図3 Ba-126の崩壊図の比較。(a) ICRP38の崩壊図, (b) 1997年のENSDFに基づく崩壊図。

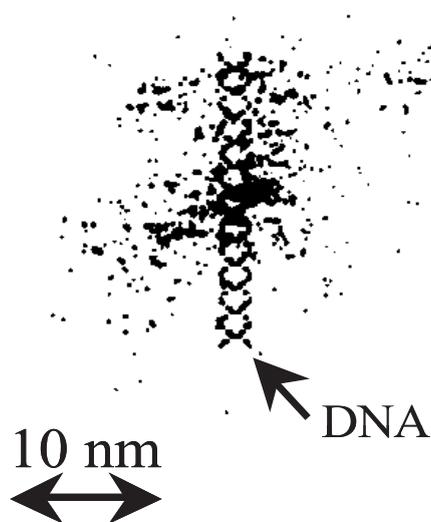


図4 I-125が結合したDNAの周辺に生成される放射線分解生成物の分布。水中に置かれたDNAの周辺には、I-125から放出されたオージェ電子による放射線分解により、点状で示したOH、H₃O⁺、H等が生成される。

ENSDFを用い、ICRP38の全核種のデータを更新するとともに、加速器施設等で今後必要とされる核種を追加した崩壊データベースDECDC (Nuclear Decay Data Files for Dosimetry Calculation) を開発した²⁷⁻²⁹⁾。

図5にDECDCの編集の手順を示す。ENSDFは実測されたデータの評価に基づき作成されるため、核種によっては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場合がある。このようなENSDFを利用すると、正確な放射線データは算定できない。そこで、崩壊データの編集に用いるENSDFに対して、その妥当性を評価し、必要に応じてデータの補完及び修正を行った。

崩壊の全エネルギー(Q値)、半減期、分岐比及び基底状態のスピン・パリティについて、仏国原子質量データセンターの最新データベースNUBASE³⁰⁾に基づき更新した後、ICRP38の編集に用いられたEDISTRコード¹⁰⁾を用いて、放出放射線のエネルギー及び放出率を計算した。計算された放射線エネルギー及び放出率に問題が見られた場合は、各エネルギー準位のガンマ線強度の入出力バランス、ベータ崩壊分岐比、規格化定数等を詳細に分析した。そして見いだされた問題に対しては、核構造理論や崩壊の選択規則を適用し、修正を行った。

以上の手順により、1037核種の崩壊データを収録したDECDCを完成させた。DECDCは、ICRPが内部被ばく換算係数を算出していない新しい核種に対する換算係数の評価に利用され³¹⁾、これらは現在の放射線障害防止法の告示別表にも取り入れられた。また、DECDCは様々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及び(財)高度情報科学技術研究機構を通じて一般にも公開された。これによりDECDCは、ORNLの線量計算コードシステムDCAL³²⁾、米国原子力規制委員会(NRC)の放射線データベースソフトウェアRadToolBox³³⁾等に取り入れられ利用されている。

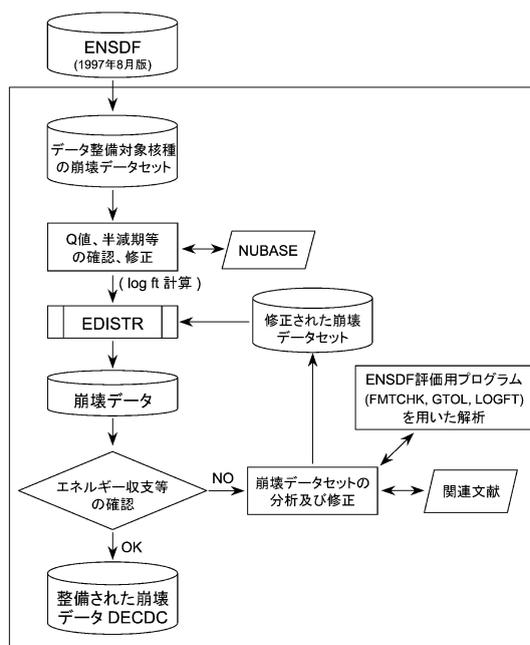


図5 DECDCの編集手順

4.3 DECDCの高度化：DECDC 2の開発

DECDCは、ICRP38との互換性を保ちデータを更新することを目的としたため、ICRP38と同一の計算手法によって整備された。一方、4.1節に述べたように、細胞レベルでの線量計算には、更に詳細なデータの要求がある。そこで原研はORNLと協力し、この要求に応えるためにDECDCの改良を行った³⁴⁾。解決すべき課題は、原子過程で放出されるエックス線及びオージェ電子並びに自発核分裂放射線に対し、従来よりも詳細な情報を取り込んだデータの開発である。この詳細データを計算するために、ICRP38の編集に用いられたEDISTRコードを改良し、新たにEDISTR04コードを開発した。

(1) 詳細エックス線・オージェ電子スペクトルの計算

軌道電子捕獲または内部転換により、主として原子核に近い電子軌道に空席が生じ、ここへ外殻の電子が遷移する際、エックス線や電子の放出が起こる。ICRP38では、K殻及びL殻に生成された空孔に起因する比較的エネルギーの高いエックス線及びオージェ電子しか扱っていない。しかし実際には、空孔の生成と外殻からの電子の遷移は連続して起こるため、空孔が最終的に最外殻にまで到達する過程で、エックス線及びオージェ電子の放出が連続して起こる。

そこでこれら一連の過程で放出されるエックス線、オージェ電子を計算する手法を開発した³⁴⁾。この計算を行うために、軌道電子捕獲及び内部転換により電子軌道に空孔が生成されるプロセスを最外殻まで拡張する^{35、36)}とともに、最新の原子データライブラリEADL³⁷⁾を用いて、エックス線、オージェ電子のエネルギー及び放出率の計算を可能にした。EADLは、原子番号 $Z = 1 \sim 100$ の元素に対して、軌道電子の結合エネルギー、Dirac-Hartree-Salteの方法³⁸⁾を用いて計算された

輻射遷移確率、非輻射遷移確率等の副殻・緩和パラメータを収録している。このデータを用い、エックス線、オージェ電子に対しエネルギー及び放出率を計算する機能をRELAXコード³⁹⁾を基に開発し、これをEDISTR04に組み込んだ。これにより、ENSDFを入力データとし、軌道電子捕獲等により生成される電子軌道の空孔分布から、エックス線、オージェ電子の詳細スペクトルまでを一貫して計算可能にした。

図6にI-125の軌道電子捕獲に伴い放出されるオージェ電子のスペクトルを示す。ICRP38では、主要なオージェ電子13本のみが与えられていた。これに対しEDISTR04では、ICRP38では考慮されていないコスター・クロニツヒ電子を合わせて、726本からなる詳細スペクトルの計算が可能になった。従来、詳細なオージェ電子スペクトルは、モンテカルロ法を用いて計算されていた⁴⁰⁾。しかし、その適用範囲は単純な崩壊図の核種に限られ、また、多くの計算時間を要する問題があった。これに対しEDISTR04は、複雑な崩壊形式に対しても短時間で詳細スペクトルを算出可能であり、これにより多くの核種を収録するデータベースの整備に適用できる手法が確立された。

(2) 自発核分裂放射線

自発核分裂核種に対する線量計算では、核分裂片、即発中性子及びガンマ線に加えて、核分裂片が安定核種に至る崩壊過程で放出されるベータ線やガンマ線のデータまでが必要となる。これに対し、ICRP38で用いられた古い経験式、核種依存性を考慮していない計算手法を見直し、より新しい知見に基づく計算方法を取り入れた。

核分裂片のエネルギーの計算には、Violaら⁴¹⁾が評価した実験データをより正確に再現する式を適用した。即発中性子に対しては、ワット型分布⁴²⁾に基づき、ICRP38で与えられ

ていた平均エネルギーと放出率に加えて、エネルギースペクトルを算定する機能を加えた。即発ガンマ線に対しては、Valentine⁴³⁾が提案した原子番号Zと質量数Aの関数として、平均エネルギー及び放出率を算定する方法を利用した。ICRP38では、U-235の熱中性子による核分裂に対して算定された平均エネルギー及び放出率を全ての自発核分裂核種に適用していたが、EDISTR04の利用により、核種依存のデータを算定することが可能になった。

(3) DECDC2の編集

以上述べたEDISTR04を用いて、DECDCを改訂するDECDC2を編集した。その編集には、基本的にDECDCに用いた手順(図5)を適用し、より新しいデータを提供するために、入力には2003年のENSDF、Q値等の崩壊に関する基本情報にはNUBASE³⁰⁾の改訂版であるNUBASE2003⁴⁴⁾ / AME2003⁴⁵⁾からのデータを利用した。これにより、1037核種を収録したDECDC2を完成させた⁶⁾。

5. ICRP、MIRDにおけるDECDC 2の利用

ICRP、MIRDでは、それぞれの持つ崩壊

データの改訂について、1990年代後半から検討を進めてきた⁴⁶⁾。この間、原研が2001年にDECDCを公開したことから、両委員会は、これを新しいデータの骨格としたい意向を示した。それを受けて著者らは、2002年からICRP、MIRDにおけるデータのレビューに協力し、そこで出された意見を反映させ、両委員会の求める要件を満たすDECDC2を完成させた。

現在、MIRDは、データ及びそれに関わる出版物を準備しており、2006年前半には、それらを米国核医学会から刊行する予定である⁴⁷⁾。また、ICRPにおいても、現在進めている新しい基本勧告と併せて、2006~2007年には新しいデータをICRP刊行物として完成させる計画である⁴⁸⁾。ICRPは新勧告の後、内部被ばく及び外部被ばく評価に係る換算係数等を改定するが、これらの計算はDECDC2を用いて行われる。

線量計算で国際的に広く利用されてきたICRP、MIRDのふたつの崩壊データは、原子力機構が提供するDECDC2により全面的に更新される。今後、これらのデータは、放射線防護や放射線医学に加え、より広い分野に

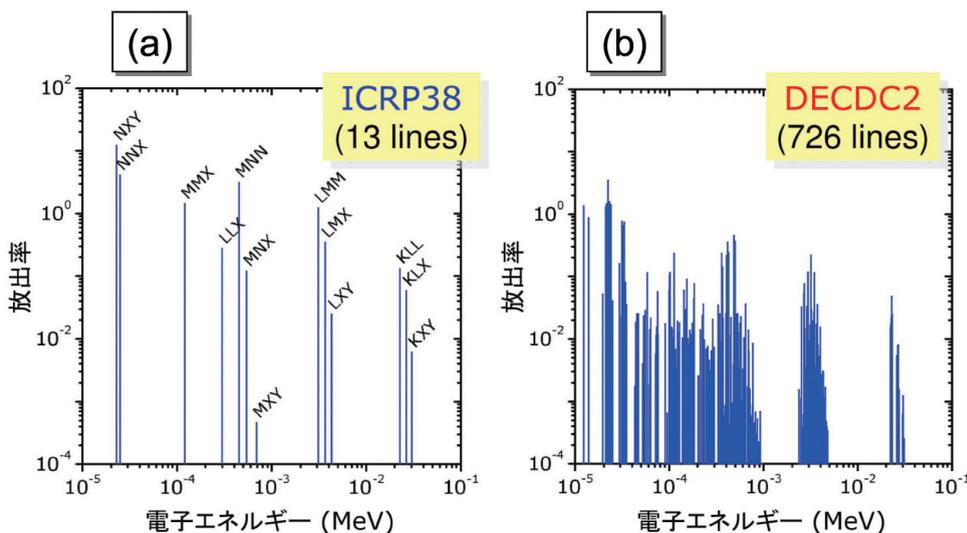


図6 I-125の軌道電子捕獲に伴い放出されるオージェ電子スペクトルの比較。(a) ICRP38, (b) DECDC2。

おける利用が期待されている。

参考文献

- 1) ICRP: Radionuclide transformations - Energy and intensity of emissions, ICRP Publication 38 (1983).
- 2) D. Weber, K.F. Eckerman, L.T. Dillman and J. C. Ryman: MIRD - Radionuclide data and decay schemes, Society of Nuclear Medicine, New York (1989).
- 3) A. Endo and 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).
- 4) A. Endo and Y. Yamaguchi: Reassessment of nuclear decay database used for dose calculation. J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2, 1433-1436 (2002).
- 5) American Association of Physicists in Medicine: Auger electron dosimetry, AAPM Report No.37 (1992).
- 6) A. Endo, Y. Yamaguchi and K.F. Eckerman: Nuclear decay data for dosimetry calculation - Revised data of ICRP Publication 38, JAERI 1347 (2005).
- 7) ICRP: Recommendations of the International Commission Radiological Protection - Report of Committee II on permissible dose for internal radiation, ICRP Publication 2 (1959).
- 8) Nuclear Data Sheets, published monthly by Elsevier Physics.
- 9) J.K. Tuli: Evaluated nuclear structure data file - A manual for preparation of data sets, BNL-NCS-51655-01/02-Rev (2001).
- 10) L.T. Dillman: EDISTR - A computer program to obtain a nuclear decay data base for radiation dosimetry, ORNL/TM-6689 (1980).
- 11) L.T. Dillman: Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation, J. Nucl. Med., 10, Suppl.2, 5-32 (1969).
- 12) L. T. Dillman: Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation, Part 2, J. Nucl. Med., 11, Suppl.4, 5-32 (1970).
- 13) L.T. Dillman and F.C. Von der Lage: Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation, The Society of Nuclear Medicine (1975).
- 14) ICRP: Limits for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30 - Part 1 (1979); Part 2 (1980); Part 3 (1981); Part 4 (1988).
- 15) ICRP: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 1, ICRP Publication 56 (1989).
- 16) ICRP: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 2, ICRP Publication 67 (1993).
- 17) ICRP: Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 68 (1994).
- 18) ICRP: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 3, ICRP Publication 69 (1995).
- 19) ICRP: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 4, ICRP Publication 71 (1996).
- 20) ICRP: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 5, ICRP Publication 72

- (1996).
- 21) ICRP: Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother, ICRP Publication 88 (2001).
 - 22) K.F. Eckerman and J.C. Ryman: External exposure to radionuclides in air, water, and soil, EPA 402-R-93-081 (1993).
 - 23) K.F. Eckerman, R.J. Westfall, J.C. Ryman and M. Cristy: Availability of nuclear decay data in electronic form, including beta spectra not previously published, Health Phys., 67, 338-345 (1994).
 - 24) 遠藤 章、高田 弘、山口 恭弘:高エネルギー陽子による核破碎反応で生成される放射性核種の内部被ばく線量係数、JAERI-Data/Code 97-039 (1997).
 - 25) 柴田 徳思、岩井 敏、大久保 徹、佐藤 理、上叢 義朋、林津 雄厚、福元 敏治:加速器施設で生成される核種の濃度限度 - ICRP Publ.30に記載のない核種、Radioisotopes, 41, 93-105 (1992).
 - 26) H.A. Wright, R.N. Hamm, J.E. Turner, R.W. Howell, D.V. Rao and K.S.R. Sastry: Calculations of physical and chemical reactions with DNA in aqueous solution from Auger cascades、Radiat. Prot. Dosim., 31, 59-62 (1990).
 - 27) A. Endo and Y. Yamaguchi: Compilation of new nuclear decay data files used for dose calculation, J. Nucl. Sci. Tech., 38, 689-696 (2001).
 - 28) A. Endo, T. Tamura and 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).
 - 29) A. Endo and 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).
 - 30) G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra: The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, Nucl. Phys., A624, 1-124 (1997).
 - 31) 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气中濃度限度等の試算 - JAERI-Data/Code 2000-001補遺、JAERI-Data/Code 2000-033 (2000).
 - 32) K.F. Eckerman, R.W. Leggett, M. Cristy, C.B. Nelson, J.C. Ryman, A.L. Sjoreen and R.C. Ward: DCAL - User's guide to the DCAL system, ORNL/TM-2001/190 (2001).
 - 33) K.F. Eckerman and A.L. Sjoreen: Radiological Toolbox user's manual, ORNL/TM-2004/27 (2004).
 - 34) A. Endo, Y. Yamaguchi and K.F. Eckerman: Development and assessment of a new radioactive decay database used for dosimetry calculation, Radiat. Prot. Dosim., 105, 565-569 (2003).
 - 35) F. Rosel, H.M. Fries, K. Alder and H.C. Pauli: Internal conversion coefficients for all atomic shells, At. Data and Nucl. Data Tables, 21, 91-289 (1978); 21, 291-514 (1978).
 - 36) W. Bambynek, H. Behrens, M.H. Chen, B. Crasemann, M.L. Fitzpatrick, K.W.D. Ledingham, H. Genz, M. Mutterer and R.L. Intemann: Orbital electron capture by the nucleus, Rev. Mod. Phys., 49, 77-221 (1977).
 - 37) S.T. Perkins, D.E. Cullen, M.H. Chen, J.H. Hubbell, J. Rathkopf and J. Scofield: Tables and graphs of atomic

- subshell and relaxation data derived from the LLNL evaluated atomic data library (EADL) Z = 1-100, UCRL-50400, Vol.30 (1991).
- 38) M.H. Chen, B. Crasemann and H. Mark: Widths and fluorescence yields of atomic L-shell vacancy states, *Phys. Rev.*, A24, 177-182 (1981).
- 39) D.E. Cullen: Program RELAX - A code designed to calculate atomic relaxation spectra of X-rays and electrons, UCRL-ID-110438 (1992).
- 40) R.W. Howell: Radiation spectra for Auger-electron emitting radionuclides - Report No.2 of AAPM Nuclear Medicine Task Group No.6, *Med. Phys.*, 19, 1371-1383 (1992).
- 41) V.E. Viola, K.K. Kwiatkowski and M. Walker: Systematics of fission fragment total kinetic energy release, *Phys. Rev.*, C31, 1550-1552 (1985).
- 42) W.B. Wilson, R.T. Perry, E.F. Shores, W.S. Charlton, T.A. Parish, G.P. Estes, T.H. Brown, E.D. Arthur, M. Bozoian, T.R. England, D.G. Madland and J.E. Stewart: SOURCES 4C - A code for calculating (α , n), spontaneous fission, and delayed neutron sources and spectra, LA-UR-02-1839 (2002).
- 43) T.E. Valentine: Evaluation of prompt fission gamma rays for use in simulating nuclear safeguard measurements, *Ann. Nucl. Energy*, 28, 191-201 (2001).
- 44) G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra: The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, *Nucl. Phys.*, A729, 3-128 (2003).
- 45) A.H. Wapstra, G. Audi and C. Thibault: The AME2003 atomic mass evaluation - (I) Evaluation of input data, adjustment procedures, *Nucl. Phys.*, A729, 129-336 (2003).
- 46) 稲葉 次郎: 国際放射線防護委員会第2専門委員会2000年会合報告、*放射線科学*, 44, 142-148 (2001).
- 47) <http://interactive.snm.org/>
- 48) The Task Group of ICRP Committee 2: Basis for dosimetric quantities used in radiological protection, to be published.