

委託業務成果報告書

「平成 26 年度放射線対策委託費
(国際放射線防護委員会 (ICRP) 勧告を
踏まえた放射線障害防止に関する
技術的基準等の整備) 事業」

平成 27 年 3 月 31 日

独立行政法人

日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁の放射線対策委託費事業による委託業務として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した「平成 26 年度放射線対策委託費（国際放射線防護委員会（ICRP）勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備）事業」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. はじめに	1
2. 体内放射能計算機能のパラメータの最適化	3
2.1 概要	3
2.2 体内放射能計算に関するモデル及びデータの調査	3
2.2.1 呼吸気道領域における移行	4
2.2.2 消化管における移行	5
2.2.3 膀胱内容物から尿への移行	6
2.2.4 組織系動態モデル	6
2.2.5 放射性核種データ	11
2.3 許容度の最適化	11
2.3.1 体内放射能計算の要件	11
2.3.2 許容度の検討のための計算条件の決定	11
2.3.3 検討する許容度の範囲	22
2.3.4 使用した計算機	22
2.3.5 計算結果の参照値	22
2.3.6 体内放射能計算結果	22
2.3.6 最適化の結果	38
3. あとがき	39
参考文献	40
付録 ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備運営 委員会の審議記録	

1. はじめに

原子力規制委員会は、これまで国際放射線防護委員会（ICRP: International Commission on Radiological Protection）の勧告を踏まえ、放射性同位元素等の取扱いにおける線量限度等の放射線障害の防止に関する技術的基準等（以下、「放射線障害の防止に関する技術的基準等」という）を整備している。一方、ICRPは現在の放射線障害の防止に関する技術的基準等の基本となっている1990年勧告^[1]（ICRP Publication 60。以下、「ICRP60」と記す。他のICRP刊行物も同様に記す。）に代わり、平成19年に2007年勧告^[2]（ICRP103）を公開しており、内部被ばく線量の評価方法について、その詳細を記載したICRP刊行物等を順次公開している。そこで、これらのICRP刊行物等の記載内容を調査し、2007年勧告に対応した内部被ばく線量計算コードの開発を行い、法令・告示^[3]における放射線障害の防止に関する技術的基準等の整備に資することを目的として、平成26年度放射線対策委託費（国際放射線防護委員会（ICRP）勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備）事業を行うこととした。

本事業では、平成 21 年度から平成 25 年度までに、内部被ばく線量計算コードの開発に必要な技術基盤として、コードの主要部となる臓器線量計算プログラム等の開発、刊行物として公開されている 2007 年勧告に対応した線量計算に用いるデータ等の整備を進めており、本年度は、これまでの事業の成果^[4-8]を踏まえ、以下の事業項目を実施することとした。

・体内放射能計算機能のパラメータの最適化

2007 年勧告を踏まえて改訂された ICRP の内部被ばく線量評価モデルのうち、体内放射能計算に関係するモデルについて、放射性核種の消化管での移行をまとめた ICRP100^[9]、職業人の放射性核種の摂取に対する呼吸器道領域や元素毎（28 元素）の体内組織における移行をまとめた ICRP のドラフト文書である OIR（Occupational Intakes of Radionuclides Part 1^[10]、Part 2^[11]及び Part 3^[12]（以下、それぞれ OIR1、OIR2、OIR3 と記す。）、関連文献等を調査し、従来のモデルからの改訂点を調査する。

この結果に基づき、線量係数を十分な信頼性及び現実的な計算時間で評価できるよう、体内放射能計算機能（常微分方程式ソルバー）の許容度（常微分方程式、ODE: Ordinary Differential Equation を数値的に解く際に、ある計算ステップにおいて生じる打ち切り誤差に対し、次の計算ステップに進でよいとする基準）を最適化する。

上記の事業を実施するにあたっては、表 1-1 に示す国内の専門家からなる「国際放射線防護委員会の勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備運営委員会」を設置し、業務を円滑に進めるための基本方針等について審議を行い、意見を反映した。

本報告書は、上記事業の成果をとりまとめたもので、全 3 章からなっている。第 2 章では、今年度の事業の実施内容として、2007 年勧告を踏まえた体内放射能計算に

関する改訂点の調査、その結果に基づく体内放射能の計算の許容度の最適化及びその検証結果を述べる。第3章は、本年度事業の成果をまとめるとともに、今後の事業の進め方を提言する。

表 1-1 国際放射線防護委員会の勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備運営委員会委員名簿（平成 26 年度、平成 27 年 3 月 12 日現在）

	氏 名	所 属 / 役 職
委員長	下 道 國	藤田保健衛生大学大学院／ 客員教授
委 員	石 樽 信 人	国立大学法人名古屋大学大学院医学系研究科医療技術学専攻 ／教授
〃	遠 藤 章	独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究 センター／環境・放射線科学ユニット長
〃	甲 斐 倫 明	公立大学法人大分県立看護科学大学／ 理事、看護学部人間科学講座環境保健学研究室 教授
〃	高 田 千 恵	独立行政法人日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学 研究所 放射線管理部 線量計測課／技術副主幹
〃	仲 野 高 志	独立行政法人 放射線医学総合研究所 緊急被ばく医療研究 センター 被ばく線量評価研究プログラム／主任研究員
〃	仁 井 田 浩 二	一般財団法人高度情報科学技術研究機構 コード開発部
〃	松 本 雅 紀	独立行政法人 放射線医学総合研究所 緊急被ばく医療研究 センター 被ばく線量評価研究プログラム／主任研究員
委員・ 幹事	高 橋 史 明	独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究 センター 放射線防護研究グループ／グループリーダー
幹 事	金 山 基 博	独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究 センター 研究推進室
事務局	真 辺 健 太 郎	独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究 センター 環境・放射線科学ユニット 放射線防護研究グループ
〃	黒 澤 志 保	独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究 センター 環境・放射線工学ユニット 放射線防護研究グループ

2. 体内放射能計算機能のパラメータの最適化

2.1 概要

本委託事業では、ICRP 2007年勧告に対応したモデルやデータに基づく内部被ばく線量を計算できるコードの整備を進めている。その中で、計算コードの主要機能として、放射性核種の摂取に対する体内放射能及び比実効エネルギー（SEE: Specific Effective Energy）の計算に基づき、臓器線量を導出するプログラム（臓器線量計算プログラム）の開発、内部被ばく線量計算に用いるデータ（線量計算データ）の格納方式の設計やこれに基づくデータ整備等を行ってきた^[4-7]。昨年度は、ICRP が示す内部被ばく線量評価モデルについて、公開済みの刊行物、ICRP がウェブサイトで開催している報告書ドラフト「職業人の放射性核種の摂取（OIR: Occupational Intakes of Radionuclides）Part 1」^[10]等の記載内容を調査し、2007年勧告を踏まえた変更点を整理した。この整理した結果に基づき、線量計算プログラムの内容を確認し、修正が必要な点を抽出しその方法を検討した^[8]。

体内放射能は、体内に取り込まれた放射性核種の動態を表現するモデルの移行係数に基づき ODE を組み、ODE ソルバーを用いて数値的に解くことで得られる。OIR2^[11]及び OIR3^[12]で示された、見直された組織系動態モデルを概観すると、従来のモデルに比べ、移行経路が複雑化し、移行係数の幅も拡大していることが分かる。つまり、2007年勧告に対応した体内放射能計算に係る ODE は、従来に比べてより硬いものであるといえる。計算コードでは、2007年勧告を踏まえて改訂された移行係数に対応して、体内放射能を現実的な時間で正確に算出することが要求される。硬い ODE を数値的に解く場合の精度や計算時間は、設定する許容度に依存する。したがって、体内放射能を計算するためのソルバーのパラメータである許容度を適切に設定することが重要となる。

本章では、ICRP がこれまでに公開してきた刊行物の他、広く意見募集をする目的で ICRP がウェブサイトで開催した OIR1、OIR2、OIR3 等を調査し、その結果に基づき 2007年勧告を踏まえて改訂された体内放射能を計算するモデルにより、現実的な時間で必要な精度の計算結果が得られるよう、許容度の最適化をするための検討やその検証結果について述べる。

2.2 体内放射能計算に関するモデル及びデータの調査

体内放射能計算に必要となるモデル及びデータについて、収録されている刊行物等の一覧を、表 2-1 に示す。これらの刊行物等について、2007年勧告及び 1990年勧告に対応したモデル及びデータを比較し、改訂内容を調査した。なお、モデル及びデータの調査は、体内放射能を計算するための ODE の硬さに影響を与える、移行係数のオーダーの範囲について、重点的に行った。また、放射性核種データについては、許容度の最適化を行う際に使用する ICRP107^[13]についてのみ調査した。

表 2-1 体内放射能計算に関する刊行物等一覧

モデル及びデータの種類	刊行物等	
	2007 年勧告対応	1990 年勧告対応
呼吸気道領域における移行	OIR1 ^[10]	ICRP66 ^[14]
消化管における移行	ICRP100 ^[9]	ICRP30 Part 1 ^[15]
膀胱内容物から尿への移行	ICRP67 ^[16]	ICRP67
組織系動態モデル	OIR2 ^[11] , OIR3 ^[12]	ICRP30 Part 1-4 ^[15, 17-19] , ICRP56 ^[20] , ICRP67, ICRP69 ^[21] , ICRP71 ^[22]
放射性核種データ	ICRP107 ^[13]	ICRP38 ^[23]

2.2.1 呼吸気道領域における移行

2007 年勧告に対応した内部被ばく線量評価では、吸入摂取により呼吸気道領域に沈着した放射性核種の移行（クリアランス）に関するモデルは、ICRP66 のヒト呼吸気道モデル^[14]（HRTM : Human Respiratory Tract Model）（以下、オリジナル HRTM と記す。）に替わり、OIR1 で示された改訂 HRTM^[10]を用いて評価するよう変更された。呼吸気道領域からのクリアランスは、粘膜による呼吸気道領域上流への粒子輸送及び血液への吸収の 2 種類の経路が競合している。改訂 HRTM では、粒子輸送に係るコンパートメントモデルの見直し、及び血液への吸収に対し標準的に適用するモデルが変更された。ここで、改訂 HRTM における血液への吸収に関するパラメータは、元素の種類に関係ない規定値は存在するものの、元素や化学形毎に固有のデータが存在する場合はそれを用いることとなっている。OIR2 及び OIR3 に収録されたラドンを除く 27 元素のうち、規定値を用いるものは 9 元素に限られる^[11, 12]。したがって、血液への吸収に関するパラメータは、元素毎のデータといえる。

表 2-2 に、改訂 HRTM 及びオリジナル HRTM の粒子輸送に係る移行経路のうち、移行係数が最大のもの λ_{\max} (d^{-1})及び最小のもの λ_{\min} (d^{-1})、並びにその経路を示す。表に示すように、改訂 HRTM、オリジナル HRTM、いずれも移行係数のオーダーは 10^{-5} から 10^2 までであった。したがって、モデルの改訂により移行経路の変更はあったものの、ODE の硬さには影響がないと考えられる。

表 2-2 粒子輸送による呼吸気道からのクリアランスに対する移行係数

項目	改訂 HRTM	オリジナル HRTM
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	100 前鼻道及び咽頭 → 食道 (遅い成分)	100 前鼻道、咽頭及び口腔 → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.00003 間質 → 胸郭内リンパ節	0.00002 肺胞・間質 3 → 胸郭内リンパ節

2.2.2 消化管における移行

2007 年勧告に対応した内部被ばく線量評価では、消化管内における放射性核種の移行は、ICRP30 Part 1 の胃腸管モデル^[15]に替わり、ICRP100 のヒト消化管モデル^[9] (HATM: Human Alimentary Tract Model) を用いて評価するよう変更された。なお、ICRP100 は、年齢群、性別、食事の形態に依存した複数の移行係数データセットを示しているが、OIR 刊行物シリーズでは成人男性の全食事 (Total diet) に対する移行係数を用いることとなっている^[10]。

表 2-3 に、HATM 及び胃腸管モデルにおける λ_{max} 、 λ_{min} とその経路を示す。呼吸気道領域における粒子輸送クリアランスモデルから消化管における移行へ接続するコンパートメントが、HATM の導入により胃内容物から食道 (遅い成分) に変更された。そのため、HATM の λ_{max} は、経口摂取と吸入摂取で異なる。胃腸管モデルは胃以降の消化管のみを評価の対象としていたのに対し、HATM では胃の上流である口腔及び食道についても評価の対象となった。この影響により、口腔や食道における非常に速い移行を考慮することとなった。その結果、胃腸管モデルでは 10^0 から 10^1 までの範囲だった移行係数のオーダーは、HATM の導入により、吸入摂取では 10^0 から 10^3 まで、経口摂取では 10^0 から 10^4 まで大幅に拡大した。したがって、経口摂取に対する体内放射能の計算に係る ODE は、より硬いものになると考えられる。

表 2-3 消化管における移行係数

項目	HATM		胃腸管モデル
	経口摂取の場合	吸入摂取の場合	
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物	2160 食道 (遅い成分) → 胃内容物	24 胃内容物 → 小腸内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	2 右結腸内容物 → 左結腸内容物 など	2 右結腸内容物 → 左結腸内容物 など	1 大腸下部内容物 → 糞

2.2.3 膀胱内容物から尿への移行

ICRP67 の膀胱モデル^[16]を引続き採用するため、成人男性の膀胱内容物から尿への移行係数は、 12 d^{-1} 変更はない。

2.2.4 組織系動態モデル

1990 年勧告対応の内部被ばく線量評価で使用された組織系動態モデル^[15-22]（以下、従来モデルと記す。）が全面的に見直され、新しい組織系動態モデル（以下、改訂モデルと記す。）が OIR 刊行物シリーズに収録される予定である^[10]。ここでは、OIR2^[11] 及び OIR3^[12] に掲載された 28 元素について、モデルのコンパートメント構造（以下、構造と記す。）及び移行係数データのオーダーの範囲に着目して改訂内容を整理する。なお、OIR2 及び OIR3 のデータは成人に対するものであるため、比較対象も成人のデータとした。

1) 水素

従来モデル^[16, 20, 22]は、血液に吸収後、全身に均一に分布し、2 種類の速さで体外に排出されるのみの、非常にシンプルな構造であった。これに対し、改訂モデル^[11]では、血液、又は血液及び血液以外の水分として分布した後、有機結合トリチウムとして 2 種類の半減期で体内に保持される構造となった。移行係数についても、従来モデルでは 10^{-2} から 10^0 オーダーの範囲であったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^2 オーダーに拡大した。

2) 炭素

従来モデル^[16, 20, 22]は、血液に吸収後、素早く全身に均一に分布し、最大 3 種類の速さで体外に排出されるのみの、非常にシンプルな構造であった。これに対し、改訂モデル^[11]では、骨組織での保持や、軟組織への 4 種類の代謝速度を考慮するなど、コンパートメント数が大幅に増加し、構造が複雑化した。これに伴い、移行係数のオーダーの範囲は、従来モデルでは 10^{-2} から 10^2 のオーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^2 のオーダーに拡大した。

3) リン

従来モデル^[15]は、皮質骨及び梁骨の 2 種類の骨組織と、2 種類の代謝速度の軟組織から成り、骨組織に沈着後は代謝しない構造であった。これに対し、改訂モデル^[11]では、骨組織からの代謝も考慮するとともに、軟組織の代謝速度が 3 種類に増加した。移行係数についても、従来モデルでは 10^{-3} から 10^{-1} オーダーの範囲であったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 オーダーに拡大した。

4) 硫黄

従来モデル^[16, 22]は、血液に吸収後、全身に分布し、有機硫黄は1種類、無機硫黄は2種類の速さで代謝される単純な構造であった。有機硫黄に対する改訂モデル^[11]では、軟組織における保持や、毛髪による排出などが考慮されるようになった。また、無機硫黄に対する改訂モデル^[10]は、赤色骨髄及び軟骨における代謝速度を考慮するようになった。有機硫黄に対する移行係数データの範囲は、従来モデル、改訂モデルともに 10^{-4} から 10^0 オーダーでほぼ同じであった。一方、無機硫黄は、従来モデルは 10^{-5} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-2} から 10^0 オーダーとなり範囲が縮小した。

5) カルシウム

改訂モデル^[11]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[22]から変更がなかった。

6) 鉄

従来モデル^[21, 22]と改訂モデル^[11]の構造はほぼ同じであるが、赤色骨髄に移行する前段階として鉄がトランスフェリンと結合するステップが加えられた。移行係数データのオーダーの範囲は、従来モデルでは 10^{-4} ~ 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 オーダーに拡大した。

7) コバルト

従来モデル^[16, 22]では、肝臓とその他の組織について、それぞれ3種類の代謝速度を考慮した構造となっていた。これに対し、改訂モデル^[11]では、その他の組織を骨組織と軟組織に分別するとともに、尿による排泄経路において腎臓における保持を考慮する構造となった。移行係数データのオーダーの範囲は、従来モデルでは 10^{-4} から 10^{-1} であったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 に拡大した。

8) 亜鉛

従来モデル^[16, 22]では、骨組織とその他の軟組織について、それぞれ2種類の代謝速度を考慮した構造となっていた。これに対し、改訂モデル^[11]では、肝臓、膵臓、筋肉及び腎臓における保持を考慮する構造となった。移行係数データのオーダーの範囲は、従来モデルでは 10^{-5} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 オーダーにわずかに拡大した。

9) ストロネチウム

改訂モデル^[11]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[16, 22]から変更がなかった。

10) イットリウム

従来モデル^[17]では、血液に吸収された後、一部は尿及び糞として排泄され、残りは皮質骨表面及び梁骨表面、肝臓、並びにその他軟組織に沈着して代謝しないモデルと

なっていた。改訂モデル^[11]は、骨組織、肝臓、腎臓及びその他の軟組織を区別し、各組織に移行後も血液に再循環する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-1} オーダーのデータのみであったが、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^0 までのオーダー範囲に拡大した。

11) ジルコニウム

従来モデル^[16, 20, 22]では、骨組織と軟組織を区別した代謝経路を考慮した構造となっていた。これに対し、改訂モデル^[11]では、軟組織のうち肝臓と腎臓について、個別の保持を考慮する構造となった。移行係数データの範囲は、従来モデル、改訂モデル、ともに 10^{-5} から 10^0 オーダーの範囲であり、ほぼ同じであった。

12) ニオブ

従来モデル^[16, 20, 22]では、骨組織、肝臓、腎臓とその他の組織に区分し、個別の代謝速度を考慮した構造である。これに対し、改訂モデル^[11]では、保持を考慮する区分は同じであるが、各組織から血液に再循環する構造となった。移行係数データの範囲は、従来モデルでは 10^{-4} から 10^{-1} オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^0 までのオーダーに拡大した。

13) モリブデン

従来モデル^[16, 22]、改訂モデル^[11]ともに骨組織、肝臓、腎臓及びその他の組織で個別の代謝速度を与える点は同じであるが、改訂モデルは再度血液に循環する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-6} から 10^0 までのオーダー範囲であったのに対し、改訂モデルでは 10^{-2} から 10^1 までのオーダー範囲に縮小した。

14) テクネチウム

従来モデル^[16, 22]では、甲状腺、肝臓、胃壁、及びその他の組織に区分し、個別の代謝速度を与える構造となっていた。改訂モデル^[11]では、骨組織、唾液腺への移行について個別の代謝速度を与えると同時に、胃壁及び結腸壁から消化管への再循環、並びに各組織から血液への再循環も考慮する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-2} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 までのオーダーに拡大した。

15) ルテニウム

従来モデル^[16, 20, 22]では、血液から吸収された後、全身に均一に分布し、3 種類の速度で排泄される構造であった。改訂モデル^[12]では、骨組織、肝臓及びその他の軟組織に区分して保持を考慮するとともに、尿への排泄において腎臓への保持も考慮する構造となった。移行係数データについては、従来モデルでは 10^{-4} から 10^{-1} オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 までのオーダーに拡大した。

16) アンチモン

従来モデル^[21, 22]では、骨組織、肝臓及びその他の軟組織に区分し、個別の代謝速度を与える構造となっていた。改訂モデル^[12]では、腎臓についても個別の代謝速度を考慮するとともに、血液に再循環する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-5} から 10^{-1} オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 までのオーダーに拡大した。

17) テルル

従来モデル^[16, 22]では、骨組織、甲状腺、腎臓及びその他の軟組織に区分し、個別の代謝速度を与える構造となっていた。改訂モデル^[12]では、腎臓について個別の代謝速度を考慮するとともに、肝臓から消化管へ、肝臓以外の各組織からは血液へ、それぞれ再循環する構造となった。移行係数は、従来モデル、改訂モデル、ともに 10^{-5} から 10^{-1} までのオーダー範囲であり、ほぼ同じであった。

18) ヨウ素

従来モデル^[16, 20, 22]では、甲状腺、無機ヨウ素（血液）、有機ヨウ素（全身組織）の3個のコンパートメントを循環する構造であった。改訂モデル^[12]では、甲状腺に加え、肝臓、腎臓や、他の組織に分布するヨウ素についても血液への再循環速度を細かく設定するとともに、唾液腺及び胃壁から消化管に再循環する、非常に複雑な構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-3} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-3} から 10^2 までのオーダーに拡大した。

19) セシウム

従来モデル^[16, 20, 22]では、全身に均一に分布し、速い代謝と遅い代謝を考慮するのみの単純な構造であった。改訂モデル^[12]では、筋肉、皮膚、肺組織、脂肪組織、赤色骨髄、梁骨表面、皮質骨表面、軟骨、腎臓、脳、心臓壁、膵臓、脾臓、肝臓及びその他の軟組織について個別に移行速度を与え、消化管壁から消化管内容物に再循環するなど、非常に細分化・複雑化した構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-3} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-3} から 10^1 までのオーダーに拡大した。

20) バリウム

改訂モデル^[12]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[16, 22]から変更がなかった。

21) イリジウム

従来モデル^[17]では、肝臓、腎臓、脾臓及びその他の組織に区分し、それぞれ2種類の速度で代謝される構造となっていた。改訂モデル^[12]では、肝臓、骨組織、腎臓とその他の軟組織という区分となり、各組織から血液への再循環、及び血液や肝臓から消化管への再循環を考慮する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-3}

から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-5} から 10^1 までのオーダー範囲に拡大した。

22) 鉛

改訂モデル^[12]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[16, 22]から変更がなかった。

23) ビスマス

従来モデル^[17]では、腎臓とその他の組織に区分し、それぞれ 2 種類の代謝速度を与える構造となっていた。改訂モデル^[12]では、腎臓に加えて肝臓、骨表面への代謝速度を個別に与えるとともに、各組織から血液への再循環、肝臓から消化管への再循環を考慮する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-2} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-3} から 10^2 までのオーダー範囲に拡大した。

24) ポロニウム

従来モデル^[16, 22]では、肝臓、腎臓、脾臓、赤色骨髄及びその他の組織に区分し、個別の代謝速度を与える構造となっていた。改訂モデル^[12]では、皮膚、骨表面、生殖腺についても個別の代謝速度を与えるとともに、毛髪、汗、皮膚からの排出経路を考慮する構造となった。移行係数データは、従来モデルでは 10^{-3} から 10^0 オーダーであったのに対し、改訂モデルでは 10^{-3} から 10^2 までのオーダー範囲に拡大した。

25) ラドン

ラドンは、他の元素と異なり、その壊変系列核種がある平衡ファクタで存在し、そのエアロゾル粒子が吸入により沈着した部位で安定核種まで壊変し、エネルギーを付与するという仮定で線量を評価していた。OIR では、その壊変系列核種も含めて線量を評価する点は従来と同様であるが、ラドン及びその壊変系列について移行を考慮することとなった^[12]。ラドンの改訂モデル^[12]は、肺中の空気と血液間での相互移行、並びに脂肪、赤色骨髄、骨表面、腎臓、肝臓、及びその他の組織について個別の移行係数を与えている。そのオーダー範囲は、 10^0 から 10^3 までであり、他の元素に比べて移行の速度は非常に速い。

26) ラジウム

従来モデル^[16, 22]では、骨組織については沈着と血液への再循環を考慮し、肝臓及びその他の軟組織については、個別の代謝を考慮するが血液へは再循環しない構造となっていた。改訂モデル^[12]では、腎臓についても個別の代謝速度を考慮するとともに、肝臓、腎臓、及びその他の軟組織からも血液へ再循環する構造となった。移行係数については、従来モデル、改訂モデルともに 10^{-5} から 10^1 のオーダー範囲であり、ほぼ同じ範囲であった。

27) トリウム

改訂モデル^[12]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[21, 22]から変更がなかった。

28) ウラン

改訂モデル^[12]の構造及び移行係数データは、従来モデル^[21, 22]から変更がなかった。

2.2.5 放射性核種データ

摂取した放射性核種の系列核種の数、ODE の従属変数の数に反映される。また、半減期は、移行係数と同様に、ODE の硬さに影響を及ぼす。そこで、OIR2 及び OIR3 に収録される元素で、放射線を放出する同位元素の数量等を定める件^[3]における別表第 2（以下、告示別表と記す。）に掲載されている核種について、壊変系列の数及び半減期を ICRP107^[13]に基づき調査した。その結果、壊変系列の数が最大のものは 23 個の U-242、半減期が最も長いものは 6.0×10^{14} y の Te-123、半減期が最も短いものは 2.99×10^{-7} s の Po-212 であった。

2.3 許容度の最適化

2.3.1 体内放射能計算の要件

線量係数は、体内放射能と SEE とを組み合わせることにより評価される。十分な信頼性を持つ線量係数を得るためには、体内放射能を精度よく評価する必要がある。

平成 25 年度の事業における調査^[8]から、OIR 刊行物シリーズで提供される個人モニタリングデータ、すなわち 1 Bq 摂取時の体内放射能の経時変化データは、 10^{-10} Bq まで提供される見込みであることが確認されている。体内放射能を 10^{-10} Bq 程度まで精度よく評価できれば、線量係数についても十分な信頼性が担保できると考えられる。そこで、許容度を最適化するにあたり、体内放射能の経時変化を 10^{-10} Bq まで正確に評価できることを要件とした。

現在、ICRP68^[24]及び ICRP72^[25]や、告示別表^[3]等で公開されている線量係数等の有効数字は、最大で 2 桁（値を指数表記した場合に小数点以下第 1 位まで）である。今後公開される線量係数の有効数字桁数は不明であるが、2 桁の裕度を考え、値を指数表記した場合に小数点以下第 3 位までとなる有効数字 4 桁で正確に評価できることを要件とした。

また、計算時間については、平成 23 年度事業^[6]において、5 分以内程度であれば実用上問題はないと確認されているため、計算時間はこの時間（1 件当たり 5 分以内）を要件とした。

2.3.2 許容度の検討のための計算条件の決定

一般的に、ODE において、従属変数の変化の程度の差が大きいほど”硬い”ODE と

なる。また、従属変数の数が多くなるほど、ODE が複雑化し、計算に要する時間が増加する。そこで、次の 3 項目を指標とし、2.2 項に示した調査結果を基に、許容度を検討するための体内放射能計算条件を決定した。

- ① OIR2 及び OIR3 に掲載されている元素の吸入摂取又は経口摂取において、呼吸気道、消化管、組織系動態モデル等、すべての移行係数を考慮した場合に、最も緩やかな移行係数に対する最も速い移行係数の比の値が大きいもの。
- ② OIR2 及び OIR3 に掲載されている放射性核種のうち、壊変系列核種の数が多く、ODE の従属変数が非常に多くなるもの。
- ③ OIR2 及び OIR3 に掲載されている放射性核種のうち、半減期が短いもの、長いもの。

①最も緩やかな移行係数に対する最も速い移行係数の比

体内放射能計算では、元素に固有の組織系動態モデルのみではなく、改訂 HRTM^[10]、HATM^[9]等の共通の動態モデル、及び血液への移行割合も考慮する必要がある。吸入摂取における呼吸気道領域から血液への移行に係る移行係数 s (d^{-1})、並びに吸入摂取及び経口摂取における消化管から血液への吸収割合 f_A 値又は f_I 値も考慮して、計算条件を検討した。なお、 f_A 値又は f_I 値は、次の式(2-1)により消化管から血液への移行係数 $\lambda_{SI, B}$ (d^{-1})に変換した。

$$\lambda_{SI, B} = \begin{cases} \frac{f_{SI} \lambda_{SI, RC}}{1 - f_{SI}}, & \text{if } f_{SI} \neq 1 \\ \frac{0.99 \lambda_{SI, RC}}{1 - 0.99}, & \text{if } f_{SI} = 1 \end{cases} \quad (2-1)$$

ここで、 f_{SI} は f_A 値又は f_I 値、 $\lambda_{SI, RC}$ (d^{-1}) は HATM 又は胃腸管モデルにおける小腸内容物から右結腸内容物又は大腸上部内容物への移行係数である。

ある摂取条件に対応するコンパートメントモデルのすべての移行係数における λ_{max} 、 λ_{min} を用いて、次の式(2-2)により、移行係数のオーダーの範囲を示す指標 R を定義した。

$$R = \log_{10}(\lambda_{max} / \lambda_{min}) \quad (2-2)$$

ここでは、元素毎の組織系動態モデルを調査するとともに R を評価し、 R が最大となる計算条件を抽出した。なお、水素については、 R が最大となる計算条件の抽出プロセスを示すが、その他の元素については、抽出結果のみを示す。

表 2-4 に、水素の組織系動態モデルにおいて、移行係数データの最大値及び最小値、並びに対応する経路を示す。消化管から血液への吸収に係る移行係数及び呼吸気道領域から血液への吸収に係る移行係数は、個別に最大値及び最小値、並びに対応する血液への吸収タイプ又は化学形の分類を示す。表 2-2、表 2-3 及び表 2-4 のデータから、水素の体内放射能計算において R が最も大きくなる計算条件を抽出した結果を、表 2-5 に示す。調査の結果、水素の摂取に係る体内放射能計算において、移行係数

データの範囲が最も広がる条件は、改訂モデルにおいては経口摂取（化学形を問わない*）、従来モデルでは吸入摂取タイプ S であることが明らかになった。

OIR2 及び OIR3 に収録されたその他 27 元素について、水素と同様にモデルを調査し、 R が最大となる計算条件を特定した。結果を、表 2-6 から表 2-33 までに示す。28 元素について調査したところ、2007 年勧告に対応した体内放射能計算では、鉄の経口摂取（化学形を問わない）の時に R が最大となることが明らかになった。

②壊変系列核種の数

ICRP107 を調査した結果、OIR2 及び OIR3 に収録された 28 元素の放射性核種のうち、壊変系列核種の数最大であったのは U-242(主要生成反応:Pu-244(n,2pn)U-242)であり、その個数は 23 であった。なお、ウランも移行係数の範囲は広く、経口摂取では、最大の移行係数は最小の移行係数の $10^{8.81}$ 倍であった。

③半減期

ICRP107 を調査した結果、OIR2 及び OIR3 に収録された 28 元素の放射性核種のうち、Te-123 が最も長く 6.0×10^{14} y、Po-212 が最も短く 2.99×10^{-7} s であった。

以上の調査結果から、次の 5 パターンで体内放射能を計算することにより、許容度を検討することとした。

- 1) Fe-60 の経口摂取（移行係数の範囲が最も大きく、半減期が長いもの）
- 2) Fe-53 の経口摂取（移行係数の範囲が最も大きく、半減期が短いもの）
- 3) U-242 の経口摂取（壊変系列の数が最大のもの）
- 4) Te-123 の経口摂取（半減期が最も長いもの）
- 5) Po-212 の経口摂取（半減期が最も短いもの）

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

表 2-4 水素の組織系動態モデルの移行係数データ

項目	改訂モデル		従来モデル	
	吸入摂取	経口摂取	吸入摂取	経口摂取
消化管→血液 最大値(d^{-1})	594 タイプ F	594 可溶性化合物	594 タイプ F	594 すべての化合物
消化管→血液 最小値(d^{-1})	0.0606 タイプ S	0.667 不溶性化合物	0.0606 タイプ S	594 すべての化合物
呼吸気道→血液 最大値(d^{-1})	100 タイプ F の s_r	—	100 タイプ F の s_p	—
呼吸気道→血液 最小値(d^{-1})	0.0001 タイプ S の s_s	—	0.0001 タイプ S の s_t	—
移行係数の 最大値(d^{-1})及び その経路	400 血液 → 血管外の組織		2.6894 血液 → 全身組織 A	
移行係数の 最小値(d^{-1})及び その経路	0.00008 血管外の組織 → 有機結合トリチウム 2		0.017329 全身組織 B → 排出	

表 2-5 水素の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル	従来モデル
摂取経路	経口摂取	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	化学形を問わない*	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物	100 初期沈着状態 → 変形状態
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.00008 血管外の組織 → 有機結合トリチウム 2	0.0001 変形状態 → 血液
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.19	6

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

表 2-6 炭素の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-7 リンの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-8 無機硫黄の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道（遅い成分） → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液（遅い吸収）
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-9 有機硫黄の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての有機化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0002 血液 2 → 小腸内容物
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	7.79

表 2-10 カルシウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 不可換性皮質骨体積 → 血液 1
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-11 鉄の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.000015 赤血球 → 膀胱内容物
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.92 (28 元素中最大)

表 2-12 コバルトの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	化学形を問わない*
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-13 亜鉛の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

表 2-14 ストロンチウムの摂取において
移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収 タイプ 又は化学形	化学形を問わない*
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 不可換性皮質骨体積 → 血漿
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-15 イットリウムの摂取において
移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収 タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000411 皮質骨表面 → 皮質骨体積
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.48

表 2-16 ジルコニウムの摂取において
移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収 タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000411 皮質骨表面 → 皮質骨体積
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.48

表 2-17 ニオブの摂取において移行係数
データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収 タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の 最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の 最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000411 皮質骨表面 → 皮質骨体積
移行係数の オーダーの 範囲の指標 R	8.48

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

表 2-18 モリブデンの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道 (遅い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液 (遅い吸収)
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-19 テクネチウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-20 ルテニウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-21 アンチモンの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-22 テルルの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-23 ヨウ素の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道（遅い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液（遅い吸収）
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-24 セシウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道（遅い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液（遅い吸収）
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-25 バリウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	化学形を問わない*
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 不可換性皮質骨体積 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

表 2-26 イリジウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 皮質骨体積 → 血液 1
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-27 鉛の摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道（速い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 不可換性皮質骨体積 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-28 ビスマスの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道（遅い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液（遅い吸収）
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-29 ポロニウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	吸入摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	タイプ S
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	2160 食道（遅い成分） → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0001 呼吸気道領域 → 血液（遅い吸収）
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	7.33

表 2-30 ラドンの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	水に溶けた状態
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	43200 口腔 (液体) → 食道
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	1.12 脂肪 2 → 静脈血
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	4.59

表 2-31 ラジウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.0000821 不可換性皮質骨体積 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.18

表 2-32 トリウムの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	すべての化合物
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.000019 軟組織 2 → 血液
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.81

表 2-33 ウランの摂取において移行係数データの範囲が最大となる条件

項目	改訂モデル
摂取経路	経口摂取
血液への吸収タイプ 又は化学形	化学形を問わない*
移行係数の最大値(d^{-1}) 及びその経路	12343 食道 (速い成分) → 胃内容物
移行係数の最小値(d^{-1}) 及びその経路	0.000019 軟組織 2 → 血漿
移行係数のオーダーの 範囲の指標 R	8.81

*化学形により異なる f_A 値が示されているが、移行係数のオーダーの範囲には影響がないことを意味する。

2.3.3 検討する許容度の範囲

許容度は、絶対許容度及び相対許容度の2種類がある。計算コードに実装されている ODE ソルバーは、これらのパラメータを従属変数毎に設定することが可能である。しかしながら、許容度を個別に設定するためには、適切な設定値を自動で判断するアルゴリズムを追加する必要があることから、本計算コードでは一括して指定している。検討する範囲は、絶対許容度については、組織・臓器の残留放射能を 10^{-10} Bq (排泄率は 10^{-10} Bq d⁻¹) まで評価することを想定し、 10^{-12} ~ 10^{-9} とした。また、相対許容度は、有効数字を 4 桁とすることを想定し、 10^{-5} ~ 10^{-3} とした。

2.3.4 使用した計算機

本検討に使用した計算機のスペックを表 2-34 に示す。、本計算機に搭載されている Intel® Core™ i7 は、現在、相応の計算力を要するハイエンド向け PC に多く採用されている CPU である。今後、Intel Core i7 と同程度の処理能力を有する CPU がより広く普及すると予想されるため、種々の計算条件における計算時間は、本計算機を使用して計測した。

表 2-34 計算時間の検討に採用した計算機のスペック

OS	Windows 8 Pro (64 bit)
CPU	Core i7 3770K (3.5–3.9 GHz)
メモリ	16 GB

2.3.5 計算結果の参照値

平成 22 年度の本事業において、開発する計算コードで体内放射能の導出に必要な ODE を解く数値計算用ライブラリの調査を行った。その結果、コードの動作環境、ライセンス、信頼性などの総合的な検討により、FORTRAN77 で記述された LSODE を Java に移植して作成した Jlsode (Java 版 LSODE) を使用する方針とした。ここでは、ODE の解法として、FORTRAN77 の LSODE と同様に、解くべき ODE が硬くない場合はアダムス法を、硬い場合は後退差分法を使用する。また、同年度の事業において、NAG ライブラリ^[26]の ODE ソルバーが、硬い初期値問題、帯ヤコビアンに対応し、内部被ばく線量評価において ODE を解く用途で問題なく使用できることを確認した^[5]。NAG ライブラリは広く科学・工学分野で利用されており、このソルバーを用いて計算した結果を参照値とし、コードによる計算値との差を評価した。

2.3.6 体内放射能計算結果

1) Fe-60 の経口摂取

Fe-60 は、図 2-1 のように壊変系列を形成し、安定核種 Ni-60 に至る。系列核種の Co-60m

及び Co-60 の動態は、OIR2 の記述に基づいた Independent kinetics を採用した。Fe-60 の体内放射能計算に使用した移行係数データセットを、表 2-35 に示す。

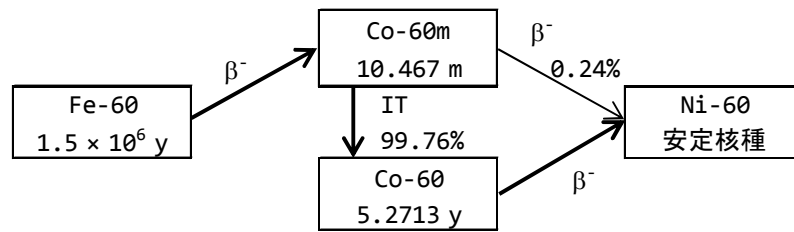


図 2-1 Fe-60 の壊変系列図

表 2-35 Fe-60 の経口摂取における移行係数データ (d⁻¹)

移行元	移行先	Fe	Co	移行元	移行先	Fe	Co
O-cavity	Oesophag-f	6.4800E+03	6.4800E+03	C-bone-S	C-bone-V	0.0000E+00	1.4900E-02
O-cavity	Oesophag-s	7.2000E+02	7.2000E+02	C-bone-V	Blood_1	0.0000E+00	8.2100E-05
Oesophag-f	St-cont	1.2343E+04	1.2343E+04	Kidneys_1	UB-cont	0.0000E+00	4.6200E-01
Oesophag-s	St-cont	2.1600E+03	2.1600E+03	Kidneys_2	Blood_1	0.0000E+00	1.9000E-03
St-cont	SI-cont	2.0570E+01	2.0570E+01	Liver_1	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
SI-cont	RC-cont	6.0000E+00	6.0000E+00	Liver_1	Blood_2	3.6400E-03	0.0000E+00
SI-cont	Blood_1	6.6667E-01	6.6667E-01	Liver_1	SI-cont	3.7000E-04	0.0000E+00
RC-cont	LC-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	Liver_2	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
LC-cont	RSig-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	Liver_2	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
RSig-cont	Feces	2.0000E+00	2.0000E+00	Liver_3	Blood_1	0.0000E+00	3.4700E-01
UB-cont	Urine	1.2000E+01	1.2000E+01	Liver_3	Liver_4	0.0000E+00	2.3100E-02
Blood_1	Blood_2	7.0000E+01	0.0000E+00	Liver_3	SI-cont	0.0000E+00	9.2400E-02
Blood_1	Blood_4	0.0000E+00	1.2000E+01	Liver_4	Blood_1	0.0000E+00	1.9000E-03
Blood_1	C-bone-S	0.0000E+00	6.0000E+00	Other_1	Blood_2	8.8800E-01	0.0000E+00
Blood_1	Kidneys_1	0.0000E+00	9.0000E+00	Other_1	Other_2	2.2200E-01	0.0000E+00
Blood_1	Kidneys_2	0.0000E+00	1.0000E+00	Other_2	Excreta	5.7000E-04	0.0000E+00
Blood_1	Liver_3	0.0000E+00	7.0000E+01	Other_2	Other_1	1.2700E-03	0.0000E+00
Blood_1	Other_4	0.0000E+00	1.6000E+01	Other_2	UB-cont	3.0000E-05	0.0000E+00
Blood_1	Other_5	0.0000E+00	9.0000E+00	Other_3	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_1	Other_6	0.0000E+00	4.0000E+00	Other_4	Blood_1	0.0000E+00	9.9000E-02
Blood_1	RC-cont	1.0000E-01	4.0000E+00	Other_5	Blood_1	0.0000E+00	1.3900E-02
Blood_1	R-marrow_1	0.0000E+00	6.6667E-01	Other_6	Blood_1	0.0000E+00	9.5000E-04
Blood_1	R-marrow_2	0.0000E+00	6.6667E-01	R-marrow_1	Blood_1	0.0000E+00	2.3105E-02
Blood_1	R-marrow_3	0.0000E+00	6.6667E-01	R-marrow_1	Blood_3	2.4300E-01	0.0000E+00
Blood_1	Spleen	0.0000E+00	1.0000E+00	R-marrow_1	R-marrow_2	1.0400E-01	0.0000E+00
Blood_1	T-bone-S	0.0000E+00	6.0000E+00	R-marrow_2	Blood_1	1.3900E+00	2.3105E-02
Blood_1	UB-cont	1.0000E-02	6.0000E+01	R-marrow_2	Liver_2	1.0600E-02	0.0000E+00
Blood_2	Blood_1	0.0000E+00	9.9813E+02	R-marrow_2	Other_3	6.3500E-02	0.0000E+00
Blood_2	Liver_1	5.5500E-01	0.0000E+00	R-marrow_2	R-marrow_3	6.3500E-02	0.0000E+00
Blood_2	Other_1	1.1100E+00	0.0000E+00	R-marrow_2	Spleen	1.7000E-02	0.0000E+00
Blood_2	R-marrow_1	9.4300E+00	0.0000E+00	R-marrow_3	Blood_1	0.0000E+00	2.3105E-02
Blood_3	Blood_1	8.3300E-04	9.9813E+02	R-marrow_3	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_3	RC-cont	2.0000E-04	0.0000E+00	Spleen	Blood_1	0.0000E+00	2.3105E-02
Blood_3	R-marrow_2	7.2900E-03	0.0000E+00	Spleen	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_3	UB-cont	1.5000E-05	0.0000E+00	T-bone-S	Blood_1	0.0000E+00	8.4200E-02
Blood_4	Blood_1	0.0000E+00	6.9300E-01	T-bone-S	T-bone-V	0.0000E+00	1.4900E-02
C-bone-S	Blood_1	0.0000E+00	8.4200E-02	T-bone-V	Blood_1	0.0000E+00	4.9300E-04

・排泄率の経時変化について

各コンパートメントの体内放射能、並びに尿及び糞の排泄率のうち、摂取から 50 年経過しても 0 Bq 又は 0 Bq d⁻¹ ではないもののうち、値が最も小さかった尿中排泄率について参照値との比較を行った。相対許容度を 10⁻⁴ とし、絶対許容度を 10⁻⁹ から 10⁻¹² まで変化させて計算した結果及び参照値との違いを表 2-36 に示す。なお、絶対許容度が 10^{-x}、相対許容度が 10^{-y} の時の参照値との違い $d_{x,y}$ (%) は、次式により求めた。

$$d_{x,y} = (a_{x,y} / r - 1) \times 100 \quad (2-1)$$

ここで、 $a_{x,y}$ (Bq 又は Bq d⁻¹) は、絶対許容度が 10^{-x}、相対許容度が 10^{-y} の時の体内放射能又は排泄率、 r は NAG による計算結果である。絶対許容度に関わらず、摂取後 1 日経過時の計算結果は、2 日経過以降の結果と比べて参照値との違いが確認されたが、その違いは 0.2% 以下であり極めて小さかった。

次に、絶対許容度を 10⁻¹¹ とし、相対許容度を 10⁻³ から 10⁻⁵ まで変化させて計算した結果及び参照値との違いを、表 2-37 に示す。相対許容度が 10⁻⁵ の場合は、参照値と 4 桁で一致した。相対許容度が 10⁻⁴ の場合は、参照値との違いが確認されたが、最大でも 0.1% 程度であった。相対許容度が 10⁻³ の場合は、他の相対許容度と比較して参照値との違いが他の場合より大きく、最大で 2% 程度となった。

表 2-36 Fe-60 の経口摂取に対する尿中排泄率 (相対許容度が 10⁻⁴ の場合)

摂取後経過 日数(d)	尿中排泄率(Bq d ⁻¹)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²		10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
1	1.391E-06	1.391E-06	1.390E-06	1.390E-06	1.389E-06	0.14	0.14	0.07	0.07
2	1.157E-06	1.157E-06	1.157E-06	1.157E-06	1.157E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.400E-06	1.400E-06	1.400E-06	1.400E-06	1.400E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.421E-06	1.421E-06	1.421E-06	1.421E-06	1.421E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1.429E-06	1.429E-06	1.429E-06	1.429E-06	1.429E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.434E-06	1.434E-06	1.434E-06	1.434E-06	1.434E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.436E-06	1.436E-06	1.436E-06	1.436E-06	1.436E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.438E-06	1.438E-06	1.438E-06	1.438E-06	1.438E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.439E-06	1.439E-06	1.439E-06	1.439E-06	1.439E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
100	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	0.00	0.00	0.00	0.00
1000	1.008E-06	1.008E-06	1.008E-06	1.008E-06	1.009E-06	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
10000	1.390E-07	1.390E-07	1.390E-07	1.390E-07	1.390E-07	0.00	0.00	0.00	0.00
18250	2.270E-08	2.270E-08	2.270E-08	2.270E-08	2.268E-08	0.09	0.09	0.09	0.09

表 2-37 Fe-60 の経口摂取に対する尿中排泄率（絶対許容度が 10^{-11} の場合）

摂取後経過 日数(d)	尿中排泄率(Bq d ⁻¹)				参照値との違い(%)		
	絶対許容度			参照値	絶対許容度		
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵		10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
1	1.395E-06	1.390E-06	1.389E-06	1.389E-06	0.43	0.07	0.00
2	1.158E-06	1.157E-06	1.157E-06	1.157E-06	0.09	0.00	0.00
3	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	0.00	0.00	0.00
4	1.400E-06	1.400E-06	1.400E-06	1.400E-06	0.00	0.00	0.00
5	1.421E-06	1.421E-06	1.421E-06	1.421E-06	0.00	0.00	0.00
6	1.429E-06	1.429E-06	1.429E-06	1.429E-06	0.00	0.00	0.00
7	1.434E-06	1.434E-06	1.434E-06	1.434E-06	0.00	0.00	0.00
8	1.436E-06	1.436E-06	1.436E-06	1.436E-06	0.00	0.00	0.00
9	1.438E-06	1.438E-06	1.438E-06	1.438E-06	0.00	0.00	0.00
10	1.439E-06	1.439E-06	1.439E-06	1.439E-06	0.00	0.00	0.00
100	1.335E-06	1.336E-06	1.336E-06	1.336E-06	-0.07	0.00	0.00
1000	1.007E-06	1.008E-06	1.009E-06	1.009E-06	-0.20	-0.10	0.00
10000	1.388E-07	1.390E-07	1.390E-07	1.390E-07	-0.14	0.00	0.00
18250	2.316E-08	2.270E-08	2.268E-08	2.268E-08	2.12	0.09	0.00

・ 計算時間について

Fe-60 の経口摂取に対する本計算コードの計算時間を、表 2-38 に示す。計算を 5 回実施し、その平均値を示している。いずれも 10 秒以内で終了した。絶対許容度に比べ、相対許容度の方が計算時間に及ぼす影響が大きい傾向が見られた。なお、ここでの計算時間とは、未公開データの SAF 等についてはダミーデータを格納し、臓器線量の評価が終了するまでの時間を計測した結果である。

表 2-38 Fe-60 の経口摂取に対する計算時間（秒）

相対 許容度	絶対許容度			
	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
10 ⁻³	4.9	5.1	5.2	5.5
10 ⁻⁴	5.6	5.9	5.9	6.0
10 ⁻⁵	6.8	7.3	7.7	7.7

2) Fe-53 の経口摂取

Fe-53 は図 2-2 のように壊変系列を形成し、安定核種 Cr-53 に至る。系列核種の Mn-53 の動態は、OIR2 の記述に基づいた Independent kinetics を採用した。Fe-53 の体内放射能計算に使用した移行係数データセットを、表 2-39 に示す。

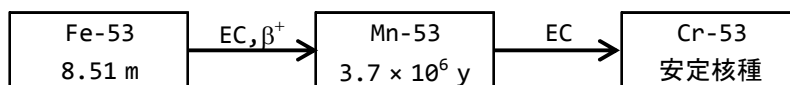


図 2-2 Fe-53 の壊変系列図

表 2-39 Fe-53 の経口摂取における移行係数データ (d⁻¹)

移行元	移行先	Fe	Mn	移行元	移行先	Fe	Mn
O-cavity	Oesophag-f	6.4800E+03	6.4800E+03	C-Bone-S	C-Bone-V	0.0000E+00	1.7329E-04
O-cavity	Oesophag-s	7.2000E+02	7.2000E+02	C-Bone-V	Blood_1	0.0000E+00	8.2192E-03
Oesophag-f	St-cont	1.2343E+04	1.2343E+04	Kidneys	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Oesophag-s	St-cont	2.1600E+03	2.1600E+03	Liver_1	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
St-cont	SI-cont	2.0570E+01	2.0570E+01	Liver_1	Blood_2	3.6400E-03	0.0000E+00
SI-cont	RC-cont	6.0000E+00	6.0000E+00	Liver_1	Liver_2	0.0000E+00	5.5452E-01
SI-cont	Blood_1	6.6667E-01	6.6667E-01	Liver_1	SI-cont	3.7000E-04	1.3863E-01
RC-cont	LC-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	Liver_2	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
LC-cont	RSig-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	Liver_2	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
RSig-cont	Feces	2.0000E+00	2.0000E+00	Other_1	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
UB-cont	Urine	1.2000E+01	1.2000E+01	Other_1	Blood_2	8.8800E-01	0.0000E+00
Blood_1	Blood_2	7.0000E+01	0.0000E+00	Other_1	Other_2	2.2200E-01	0.0000E+00
Blood_1	Blood_3	0.0000E+00	2.0000E-01	Other_2	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_1	Brain	0.0000E+00	1.0000E+00	Other_2	Excreta	5.7000E-04	0.0000E+00
Blood_1	C-Bone-S	0.0000E+00	2.5000E+00	Other_2	Other_1	1.2700E-03	0.0000E+00
Blood_1	Kidneys	0.0000E+00	5.0000E+01	Other_2	UB-cont	3.0000E-05	0.0000E+00
Blood_1	Liver_1	0.0000E+00	3.0000E+02	Other_3	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_1	Other_1	0.0000E+00	3.9180E+02	Other_3	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_1	Other_2	0.0000E+00	1.4600E+02	Pancreas	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_1	Other_3	0.0000E+00	4.0000E+01	Pancreas	SI-cont	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_1	Pancreas	0.0000E+00	5.0000E+01	R-marrow_1	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_1	RC-cont	1.0000E-01	1.0000E+01	R-marrow_1	Blood_3	2.4300E-01	0.0000E+00
Blood_1	R-marrow_1	0.0000E+00	1.0000E+00	R-marrow_1	R-marrow_2	1.0400E-01	0.0000E+00
Blood_1	Spleen	0.0000E+00	3.0000E+00	R-marrow_2	Blood_1	1.3900E+00	3.4657E-01
Blood_1	T-Bone-S	0.0000E+00	2.5000E+00	R-marrow_2	Liver_2	1.0600E-02	0.0000E+00
Blood_1	UB-cont	1.0000E-02	2.0000E+00	R-marrow_2	Other_3	6.3500E-02	0.0000E+00
Blood_2	Blood_1	0.0000E+00	1.0000E+03	R-marrow_2	R-marrow_3	6.3500E-02	0.0000E+00
Blood_2	Liver_1	5.5500E-01	0.0000E+00	R-marrow_2	Spleen	1.7000E-02	0.0000E+00
Blood_2	Other_1	1.1100E+00	0.0000E+00	R-marrow_3	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_2	R-marrow_1	9.4300E+00	0.0000E+00	R-marrow_3	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_3	Blood_1	8.3300E-04	8.3311E-03	Spleen	Blood_1	0.0000E+00	3.4657E-01
Blood_3	RC-cont	2.0000E-04	0.0000E+00	Spleen	R-marrow_2	3.8000E-03	0.0000E+00
Blood_3	R-marrow_2	7.2900E-03	0.0000E+00	T-Bone-S	Blood_1	0.0000E+00	1.7155E-02
Blood_3	UB-cont	1.5000E-05	0.0000E+00	T-Bone-S	T-Bone-V	0.0000E+00	1.7329E-04
Brain	Blood_1	0.0000E+00	4.6210E-03	T-Bone-V	Blood_1	0.0000E+00	4.9315E-02
C-Bone-S	Blood_1	0.0000E+00	1.7155E-02				

・体内放射能について

ここでは、摂取からの時間経過により放射能が 10^{-10} Bq を超え、その後減少していく血液吸収後のコンパートメントのひとつである赤色骨髄について、放射能の計算結果を参照値と比較した。相対許容度が 10^{-4} 及び 10^{-5} の場合の計算結果及び参照値との比較を、それぞれ表 2-40 及び表 2-41 に示す。摂取直後に放射能が上昇し、摂取から 0.1 日 (2 時間半) 後までは、許容度に関わらず、参照値との違いは 0.2% 以内であった。しかし、摂取から 0.2 日 (約 5 時間) が経過すると、絶対許容度が 10^{-12} の場合を除き、相対許容度に関わらず、参照値との違いが数十%以上になることが確認された。

次に、絶対許容度を 10^{-11} とし、相対許容度を 10^{-3} から 10^{-5} まで変化させた場合の計算結果及び参照値との違いを、表 2-42 に示す。相対許容度が 10^{-4} 及び 10^{-5} の場合、放射能が 10^{-10} Bq を下回るまでの参照値との違いは、ほぼ同様であった。相対許容度が 10^{-3} の場合は、0.1 日経過時の参照値との違いが他に比べて大きいことが確認されたが、その違いは 2% 程度で

あった。なお、表 2-40 及び表 2-41 の比較から、絶対許容度が 10^{-12} の場合、相対許容度を 10^{-4} から 10^{-5} により厳しくしたにも関わらず、参照値との違いが増加した様子が見られる。JLSODE においては、次式により計算の打ち切り基準 (c) を評価し、判定している^[5]。

$$c = \text{TOL}_A + a(i) \times \text{TOL}_R \quad (2-2)$$

ここで、 TOL_A は絶対許容度、 $a(i)$ はコンパートメント i の放射能、 TOL_R は相対許容度である。式(2-2)に示すとおり、 c は、当該コンパートメントの放射能にも依存することから、設定した許容度により伝播する打ち切り誤差に違いが生じ、この影響により許容度の厳しさと参照値との違いの大きさが逆転したと考えられる。

表 2-40 Fe-53 の経口摂取に対する赤色骨髄放射能 (相対許容度が 10^{-4} の場合)

摂取後経過 日数(d)	赤色骨髄放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
0.0001	7.775E-16	7.774E-16	7.775E-16	7.773E-16	7.786E-16	-0.14	-0.15	-0.14	-0.17
0.0003	3.492E-13	3.486E-13	3.487E-13	3.486E-13	3.485E-13	0.20	0.03	0.06	0.03
0.001	1.392E-10	1.392E-10	1.391E-10	1.391E-10	1.391E-10	0.07	0.07	0.00	0.00
0.003	1.467E-08	1.467E-08	1.467E-08	1.467E-08	1.467E-08	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	8.575E-07	8.575E-07	8.575E-07	8.575E-07	8.577E-07	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
0.03	4.781E-06	4.781E-06	4.781E-06	4.781E-06	4.782E-06	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
0.1	5.100E-08	5.103E-08	5.102E-08	5.097E-08	5.110E-08	-0.20	-0.14	-0.16	-0.25
0.2	8.025E-12	2.924E-15	2.382E-12	1.910E-12	1.779E-12	351.10	-99.84	33.90	7.36
0.3	8.948E-15	1.735E-18	1.271E-15	4.029E-16	2.299E-17	38821.27	-92.45	5428.49	1652.50
1	0.000E+00	2.257E-25	2.146E-23	2.401E-27	0.000E+00	-	-	-	-

表 2-41 Fe-53 の経口摂取に対する赤色骨髄放射能 (相対許容度が 10^{-5} の場合)

摂取後経過 日数(d)	赤色骨髄放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
0.0001	7.770E-16	7.780E-16	7.770E-16	7.770E-16	7.786E-16	-0.21	-0.08	-0.21	-0.21
0.0003	3.480E-13	3.480E-13	3.480E-13	3.480E-13	3.485E-13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14
0.001	1.390E-10	1.390E-10	1.390E-10	1.390E-10	1.391E-10	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
0.003	1.470E-08	1.470E-08	1.470E-08	1.470E-08	1.467E-08	0.20	0.20	0.20	0.20
0.01	8.570E-07	8.570E-07	8.570E-07	8.570E-07	8.577E-07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
0.03	4.780E-06	4.780E-06	4.780E-06	4.780E-06	4.782E-06	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
0.1	5.100E-08	5.100E-08	5.100E-08	5.100E-08	5.110E-08	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20
0.2	7.520E-18	5.060E-14	2.120E-12	1.850E-12	1.779E-12	-100.00	-97.16	19.17	3.99
0.3	4.370E-23	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.299E-17	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00
1	3.510E-29	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-	-	-	-

表 2-42 Fe-53 の経口摂取に対する赤色骨髓放射能（絶対許容度が 10^{-11} の場合）

摂取後経過 日数(d)	赤色骨髓放射能(Bq)				参照値との違い(%)		
	相對許容度			参照値	相對許容度		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
0.0001	7.774E-16	7.775E-16	7.772E-16	7.786E-16	-0.15	-0.14	-0.18
0.0003	3.531E-13	3.487E-13	3.484E-13	3.485E-13	1.32	0.06	-0.03
0.001	1.394E-10	1.391E-10	1.391E-10	1.391E-10	0.22	0.00	0.00
0.003	1.468E-08	1.467E-08	1.467E-08	1.467E-08	0.07	0.00	0.00
0.01	8.575E-07	8.575E-07	8.575E-07	8.577E-07	-0.02	-0.02	-0.02
0.03	4.782E-06	4.781E-06	4.782E-06	4.782E-06	0.00	-0.02	0.00
0.1	5.216E-08	5.102E-08	5.100E-08	5.110E-08	2.07	-0.16	-0.20
0.2	1.417E-12	2.382E-12	2.123E-12	1.779E-12	-20.35	33.90	19.34
0.3	0.000E+00	1.271E-15	0.000E+00	2.299E-17	-100.00	5428.49	-100.00
1	0.000E+00	2.146E-23	0.000E+00	0.000E+00	-	-	-

・ 計算時間について

すべての許容度の組合せにおいて、計算時間は3秒程度でほぼ同じであった。ダミーの SAF データを使用しているが、SEE の評価の時間が支配的であると考えられる。

3) U-242 の経口摂取

U-242 は、図 2-3 のように多くの核種からなる壊変系列を形成し、安定核種に至る。系列核種の動態は、OIR3 に記述に基づいた Independent kinetics を採用した。ただし、Np-242 及び Pu-242 については、十分な情報が記載されていないため、U-242 と同じ動態 (Shared kinetics) とした。U-242 の体内放射能計算に使用した移行係数データセットを、表 2-43 に示す。

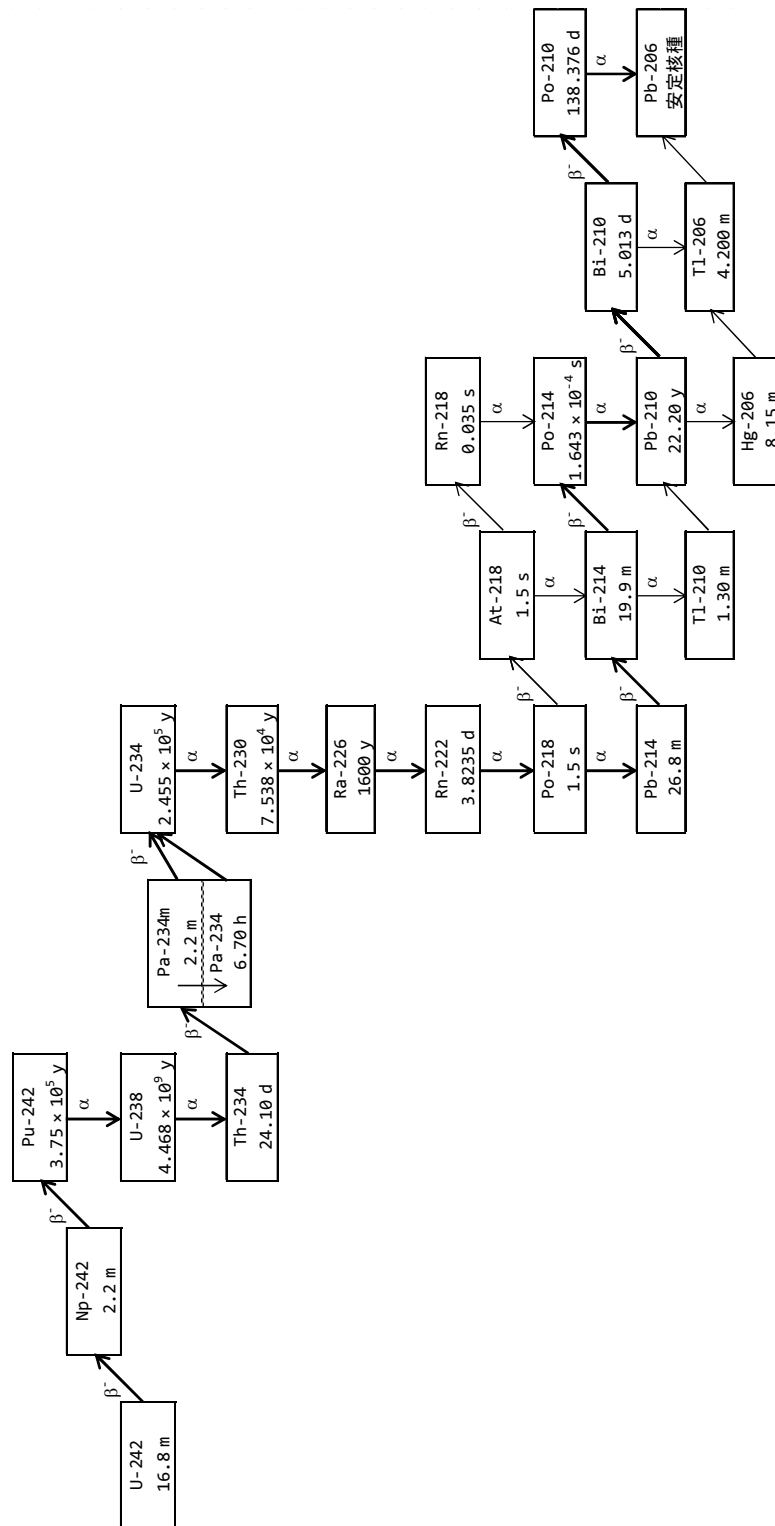


図 2-3 U-242 の壊変系列図

表 2-43 U-242 の経口摂取における移行係数データ (d⁻¹) その 1

移行元	移行先	U	Np	Pu	Th	Pa	Ra	Rn	Po	Pb	At	Bi	Tl	Hg
O-cavity	Oesophag-f	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03	6.4800E+03
O-cavity	Oesophag-s	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02	7.2000E+02
Oesophag-f	St-cont	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04	1.2343E+04
Oesophag-s	St-cont	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03	2.1600E+03
St-cont	SI-cont	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01	2.0570E+01
SI-cont	RC-cont	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00
RC-cont	LC-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
LC-cont	RSig-cont	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
RSig-cont	Feces	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
SI-cont_2	RC-cont_2	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00	6.0000E+00
RC-cont_2	LC-cont_2	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
LC-cont_2	RS-cont_2	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
RS-cont_2	Feces	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E+00
Adipose_1	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.4800E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Adipose_2	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1200E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	Blood_2	2.4500E-01	2.4500E-01	2.4500E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.0000E+00	2.8000E+01	0.0000E+00	5.0000E-01	5.0000E+00	1.5971E+01
Blood_1	Blood_3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.7912E+01
Blood_1	Blood_4	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	C-bone-S	1.6300E+00	1.6300E+00	1.6300E+00	6.7930E-01	6.7930E-01	7.7800E+00	0.0000E+00	1.5000E+00	3.8900E+00	0.0000E+00	2.5000E+00	0.0000E+00	3.9926E+00
Blood_1	C-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E-03	0.0000E+00	1.0000E-01	1.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	Excreta	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.2000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9963E+01
Blood_1	Kidneys_1	2.9400E+00	2.9400E+00	2.9400E+00	6.7900E-02	6.7900E-02	1.4000E+00	0.0000E+00	5.0000E+00	2.4500E+00	0.0000E+00	3.0000E+01	1.0000E+01	1.3974E+02
Blood_1	Kidneys_2	1.2200E-02	1.2200E-02	1.2200E-02	1.9400E-02	1.9400E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E+00	2.4500E-02	0.0000E+00	5.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	Liver_1	3.6700E-01	3.6700E-01	3.6700E-01	9.7000E-02	9.7000E-02	4.2000E+00	0.0000E+00	1.7500E+01	4.9000E+00	0.0000E+00	3.0000E+01	1.0000E+01	7.9853E+01
Blood_1	Liver_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7500E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	Other_1	1.0500E+01	1.0500E+01	1.0500E+01	8.3200E-01	8.3200E-01	2.0930E+01	0.0000E+00	3.2350E+01	2.2160E+01	0.0000E+00	3.0000E+02	1.3548E+02	0.0000E+00
Blood_1	Other_2	1.6300E+00	1.6300E+00	1.6300E+00	2.4300E-01	2.4300E-01	3.5000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.8100E-01	0.0000E+00	3.8760E+00	0.0000E+00	1.9372E+01
Blood_1	Other_3	7.3500E-02	7.3500E-02	7.3500E-02	3.8800E-02	3.8800E-02	7.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3600E-01	0.0000E+00	1.2000E+00	0.0000E+00	1.3974E+01
Blood_1	Ovaries	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.1000E-04	2.1000E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E-02	1.5000E-04	0.0000E+00	1.0000E-03	3.0000E-02	4.7912E-02
Blood_1	R-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	RC-cont_2	1.2200E-01	1.2200E-01	1.2200E-01	9.7000E-03	9.7000E-03	2.1790E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	7.0000E-01	0.0000E+00	4.0000E+00	3.5000E+00	0.0000E+00
Blood_1	R-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.0000E+00	1.5000E-02	0.0000E+00	3.0000E-01	0.0000E+00	1.1978E+01
Blood_1	SI-cont_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.9926E+01
Blood_1	Skin	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_1	Spleen	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0000E+00	2.0000E-03	0.0000E+00	2.0000E-02	4.0000E-01	2.3956E+00
Blood_1	T-bone-S	2.0400E+00	2.0400E+00	2.0400E+00	6.7930E-01	6.7930E-01	9.7200E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.8600E+00	0.0000E+00	2.5000E+00	0.0000E+00	3.9926E+00
Blood_1	Testes	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.8000E-04	6.8000E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E-01	4.5000E-04	0.0000E+00	3.0000E-03	9.0000E-02	1.4374E-01
Blood_1	UB-cont	1.5430E+01	1.5430E+01	1.5430E+01	1.0670E-01	1.0670E-01	6.0600E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7500E+00	0.0000E+00	2.0000E+01	1.5000E+00	0.0000E+00
Blood_2	Blood_1	3.4700E-01	3.4700E-01	3.4700E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	9.9000E-02	1.3900E-01	0.0000E+00	1.7300E-01	3.7000E+00	2.3105E-01
Blood_3	Blood_1	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	6.9315E-01
Blood_3	Kidneys_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0000E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_4	Blood_1	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	9.9000E-02	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03
Blood_A	Adipose_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.6160E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	Adipose_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.5410E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	Blood_1	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03
Blood_A	C-bone-S	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.9300E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	Kidneys_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.2430E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	Liver_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.2520E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	Other	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.2520E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	R-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9620E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Blood_A	T-bone-S	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.8900E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

表 2-43 U-242 の経口摂取における移行係数データ (d⁻¹) その 2

移行元	移行先	U	Np	Pu	Th	Pa	Ra	Rn	Po	Pb	At	Bi	Tl	Hg
Blood_V	Blood_1	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03	1.0000E+03
Blood_V	Excreta	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.4190E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
C-bone-S	Blood_1	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	5.7800E-01	0.0000E+00	2.3100E-02	5.0000E-01	0.0000E+00	3.4700E-02	0.0000E+00	3.4657E-02
C-bone-S	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
C-bone-S	C-bone-V_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.1100E-05	4.1100E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
C-bone-S	C-bone-V_2	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1600E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
C-bone-S	C-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.2100E-05	8.2100E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
C-bone-V_1	Blood_1	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05
C-bone-V_1	C-marrow	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05	8.2100E-05
C-bone-V_2	Blood_1	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03
C-bone-V_2	C-bone-S	1.7300E-02	1.7300E-02	1.7300E-02	1.7300E-02	1.7300E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02	1.8500E-02
C-bone-V_2	C-bone-V_1	5.7800E-03	5.7800E-03	5.7800E-03	5.7800E-03	5.7800E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03	4.6000E-03
C-marrow	Blood_1	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	2.0000E-03	2.0000E-03	7.0000E-03	2.5000E+00	2.0000E-03
Kidneys_1	Blood_1	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.0730E+00	2.5000E+00	2.5000E+00
Kidneys_1	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.5250E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Kidneys_1	Kidneys_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.2400E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Kidneys_1	UB-cont	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	4.6200E-02	4.6200E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7300E-01	1.3900E-01	0.0000E+00	6.9300E-01	0.0000E+00	1.9800E-02
Kidneys_2	Blood_1	3.8000E-04	3.8000E-04	3.8000E-04	3.8000E-04	3.8000E-04	1.9000E-03	0.0000E+00	9.9000E-02	1.9000E-03	0.0000E+00	1.3900E-01	0.0000E+00	0.0000E+00
Liver_1	Blood_1	9.2000E-02	9.2000E-02	9.2000E-02	4.7500E-04	4.7500E-04	6.9100E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	3.1200E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.5000E+00	3.4657E-02
Liver_1	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9700E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Liver_1	Liver_2	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	9.5000E-04	9.5000E-04	2.0800E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	6.9300E-03	0.0000E+00	1.3900E-01	0.0000E+00	0.0000E+00
Liver_1	SI-cont_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.7500E-04	4.7500E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3900E-01	3.1200E-02	0.0000E+00	2.0800E-01	0.0000E+00	3.4657E-02
Liver_2	Blood_1	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	2.1100E-04	2.1100E-04	1.9000E-03	0.0000E+00	9.9000E-02	1.9000E-03	0.0000E+00	6.9300E-02	0.0000E+00	0.0000E+00
Other_1	Blood_1	8.3200E+00	8.3200E+00	8.3200E+00	4.6200E-01	4.6200E-01	6.9800E+00	8.3200E+00	9.9000E-02	7.3900E+00	8.3200E+00	6.6540E+01	2.5000E+00	3.4657E-02
Other_2	Blood_1	3.4700E-02	3.4700E-02	3.4700E-02	9.5000E-04	9.5000E-04	6.9300E-01	3.4700E-02	3.4700E-02	4.1600E-03	3.4700E-02	3.4700E-02	2.5000E+00	3.4657E-02
Other_2	Excreta	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.7700E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Other_3	Blood_1	1.9000E-05	1.9000E-05	1.9000E-05	1.9000E-05	1.9000E-05	3.8000E-04	1.9000E-05	1.9000E-05	3.8000E-04	1.9000E-05	1.1600E-03	2.5000E+00	6.9315E-03
Other_4	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Other_4	Liver_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Ovaries	Blood_1	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.3900E-02	2.0000E-03	1.9000E-04	7.0000E-03	2.5000E+00	3.4657E-02
R-marrow	Blood_1	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	9.9000E-02	2.0000E-03	7.6000E-03	7.0000E-03	2.5000E+00	3.4657E-02
R-marrow	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
SI-cont	Blood_1	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	0.0000E+00	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02
SI-cont_2	Blood_1	1.2024E-02	1.2024E-02	1.2024E-02	3.0015E-03	3.0015E-03	1.5000E+00	0.0000E+00	6.6667E-01	1.5000E+00	1.2024E-02	3.1579E-01	1.2024E-02	3.0015E-03
SI-cont_2	Liver_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9940E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Skin	Blood_1	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03	6.9300E-03
Skin	Excreta	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Spleen	Blood_1	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	9.9000E-02	2.0000E-03	9.9000E-02	7.0000E-03	2.5000E+00	3.4657E-02
St-cont_2	SI-cont_2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0570E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-S	Blood_1	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-01	6.9300E-02	6.9300E-02	5.0000E-01	6.9300E-02	3.4700E-02	6.9300E-02	3.4657E-02
T-bone-S	Blood_V	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-S	R-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.9300E-04	4.9300E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-S	T-bone-V_1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.4700E-04	2.4700E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-S	T-bone-V_2	6.9300E-02	6.9300E-02	6.9300E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1600E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-V_1	Blood_1	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04	4.9300E-04
T-bone-V_1	R-marrow	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.9300E-04	4.9300E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.9300E-04
T-bone-V_2	Blood_1	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03	7.6000E-03
T-bone-V_2	T-bone-S	1.7300E-02	1.7300E-02	1.7300E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.8500E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.8500E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
T-bone-V_2	T-bone-V_1	5.7800E-03	5.7800E-03	5.7800E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	4.6000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	4.6000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Testes	Blood_1	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.9000E-04	1.3900E-02	2.0000E-03	1.9000E-04	7.0000E-03	2.5000E+00	3.4657E-02
UB-cont	Urine	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01	1.2000E+01

・体内放射能について

U-242 の半減期は 16.8 m であり、その体内放射能は半日以内で摂取量の 10^{-10} 倍未満まで減衰する。そこで、各コンパートメントの体内放射能、並びに尿及び糞の排泄率のうち、積算放射能が最大となる胃内容物の体内放射能について、参照値との比較を行った。相対許容度を 10^{-4} 及び 10^{-5} とし、絶対許容度を 10^{-9} から 10^{-12} まで変化させて計算した結果及び参照値との違いを、表 2-44 及び表 2-45 に示す。相対許容度が 10^{-4} の場合、 10^{-5} の場合、ともに摂取から 0.03 日経過までは、参照値との違いは 0.1%以内であり、よく一致していたが、放射能の減少に伴い、参照値との違いが大きくなった。絶対許容度が 10^{-9} 又は 10^{-10} の場合は、0.3 日経過時における参照値との違いが 30%を超えた。本計算条件において、 10^{-10} Bq まで一定の精度を保つためには、絶対許容度は 10^{-11} 程度に設定する必要があると考えられる。

絶対許容度を 10^{-11} とし、相対許容度を変化させて計算した結果及び参照値との違いを、表 2-46 に示す。相対許容度が 10^{-3} の場合は、0.2 日経過時の放射能が 10^{-7} オーダーであるにもかかわらず、参照値との違いが 22%と大きかった。相対許容度が 10^{-4} の場合と 10^{-5} の場合を比較すると、 10^{-4} の方が参照値との違いが小さいこともあることが確認された。

表 2-44 U-242 の経口摂取に対する胃内容物放射能（相対許容度が 10^{-4} の場合）

摂取後経過 日数(d)	胃内容物放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
0.0001	2.195E-01	2.195E-01	2.195E-01	2.195E-01	2.196E-01	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
0.0003	6.975E-01	6.975E-01	6.974E-01	6.974E-01	6.974E-01	0.01	0.01	0.00	0.00
0.001	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.003	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	4.519E-01	4.519E-01	4.519E-01	4.519E-01	4.519E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.03	9.133E-02	9.135E-02	9.135E-02	9.134E-02	9.127E-02	0.07	0.09	0.09	0.08
0.1	3.383E-04	3.390E-04	3.396E-04	3.398E-04	3.400E-04	-0.50	-0.29	-0.12	-0.06
0.2	1.095E-07	1.123E-07	1.131E-07	1.133E-07	1.144E-07	-4.28	-1.84	-1.14	-0.96
0.3	1.052E-10	6.749E-11	3.476E-11	3.688E-11	3.865E-11	172.19	74.62	-10.06	-4.58
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—

表 2-45 U-242 の経口摂取に対する胃内容物放射能（相対許容度が 10^{-5} の場合）

摂取後経過 日数(d)	胃内容物放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
0.0001	2.195E-01	2.196E-01	2.196E-01	2.196E-01	2.196E-01	-0.05	0.00	0.00	0.00
0.0003	6.974E-01	6.974E-01	6.974E-01	6.974E-01	6.974E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.001	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.003	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	4.518E-01	4.518E-01	4.518E-01	4.518E-01	4.519E-01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
0.03	9.127E-02	9.127E-02	9.127E-02	9.127E-02	9.127E-02	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	3.388E-04	3.388E-04	3.387E-04	3.387E-04	3.400E-04	-0.35	-0.35	-0.38	-0.38
0.2	1.244E-07	1.154E-07	1.143E-07	1.141E-07	1.144E-07	8.74	0.87	-0.09	-0.26
0.3	5.202E-11	2.457E-11	4.310E-11	4.076E-11	3.865E-11	34.59	-36.43	11.51	5.46
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—

表 2-46 U-242 の経口摂取に対する胃内容物放射能（絶対許容度が 10^{-11} の場合）

摂取後経過 日数(d)	胃内容物放射能(Bq)				参照値との違い(%)		
	相対許容度			参照値	相対許容度		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
0.0001	2.195E-01	2.195E-01	2.196E-01	2.196E-01	-0.05	-0.05	0.00
0.0003	6.967E-01	6.974E-01	6.974E-01	6.974E-01	-0.10	0.00	0.00
0.001	9.105E-01	9.109E-01	9.109E-01	9.109E-01	-0.04	0.00	0.00
0.003	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	7.907E-01	0.00	0.00	0.00
0.01	4.524E-01	4.519E-01	4.518E-01	4.519E-01	0.11	0.00	-0.02
0.03	9.170E-02	9.135E-02	9.127E-02	9.127E-02	0.47	0.09	0.00
0.1	3.729E-04	3.396E-04	3.387E-04	3.400E-04	9.68	-0.12	-0.38
0.2	1.397E-07	1.131E-07	1.143E-07	1.144E-07	22.12	-1.14	-0.09
0.3	3.154E-11	3.476E-11	4.310E-11	3.865E-11	-18.40	-10.06	11.51
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—

・ 計算時間について

U-242 の経口摂取に対する本計算コードの計算時間を、表 2-47 に示す。計算を 5 回実施し、その平均値を示している。絶対許容度に比べ、相対許容度の方が計算時間に及ぼす影響が大きい傾向は、Fe-60 の経口摂取の場合と同様であった。検討した許容度においては、計算は 2 分以内には終了した。

表 2-47 U-242 の経口摂取に対する計算時間（秒）

相対 許容度	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
10^{-3}	66.0	67.6	70.3	82.6
10^{-4}	94.8	99.4	83.1	93.6
10^{-5}	110.7	104.3	96.6	106.6

4) Te-123 の経口摂取

Te-123 は、図 2-4 に示すように、壊変系列を形成しない。Te-123 の体内放射能計算に使用した移行係数データセットを、表 2-48 に示す。



図 2-4 Te-123 の壊変図

表 2-48 Te-123 の経口摂取における移行係数データ

移行元	移行先	移行係数(d ⁻¹)	移行元	移行先	移行係数(d ⁻¹)
O-cavity	Oesophag-f	6.4800E+03	Blood_1	Other	7.6800E-02
O-cavity	Oesophag-s	7.2000E+02	Blood_1	C-bone-S	2.0200E-02
Oesophag-f	St-cont	1.2343E+04	Blood_1	T-bone-S	4.0400E-02
Oesophag-s	St-cont	2.1600E+03	Blood_1	Thyroid	4.0000E-03
St-cont	SI-cont	2.0570E+01	Blood_2	Blood_1	6.9300E-02
SI-cont	RC-cont	6.0000E+00	Liver	SI-cont	6.9300E-02
SI-cont	Blood_1	2.5714E+00	Thyroid	Blood_1	6.9300E-02
RC-cont	LC-cont	2.0000E+00	Kidneys	Blood_1	6.9300E-02
LC-cont	RSig-cont	2.0000E+00	Other	Blood_1	6.9300E-02
RSig-cont	Feces	2.0000E+00	C-bone-S	Blood_1	1.1600E-02
UB-cont	Urine	1.2000E+01	T-bone-S	Blood_1	1.1600E-02
Blood_1	UB-cont	7.5100E-01	C-bone-S	C-bone-V	6.9310E-04
Blood_1	Kidneys	4.0400E-02	T-bone-S	T-bone-V	6.9310E-04
Blood_1	Liver	1.2130E-01	C-bone-V	Blood_1	8.2100E-05
Blood_1	Blood_2	1.0110E-01	T-bone-V	Blood_1	4.9300E-04

・体内放射能について

各コンパートメントの体内放射能、並びに尿及び糞の排泄率において、摂取から 50 年経過しても 0 Bq 又は 0 Bq d⁻¹ ではないもののうち、値が最も小さかった小腸内容物放射能について、参照値との比較を行った。相対許容度を 10⁻⁴ とし、絶対許容度を 10⁻⁹ から 10⁻¹² まで変化させて計算した結果と、参照値との違いを表 2-49 に示す。絶対許容度に関わらず、摂取後 1 日経過時の計算結果は、2 日経過以降の結果と比べて参照値との違いが確認されたが、その違いは 0.4% 以下であり極めて小さかった。

表 2-50 に、絶対許容度を 10⁻¹¹ とし、相対許容度を 10⁻³ から 10⁻⁵ とした場合の計算結果と参照値との違いを示す。相対許容度が小さい程、参照値との違いも小さくなることが確認できるが、10⁻³ であっても違いは最大で 1.3% であった。

表 2-49 Te-123 の経口摂取における小腸内容物放射能（相対許容量が 10^{-4} の場合）

摂取後経過 日数(d)	小腸内容物放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容量				参照値	絶対許容量			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
1	4.653E-04	4.646E-04	4.640E-04	4.634E-04	4.637E-04	0.35	0.19	0.06	-0.06
2	2.043E-04	2.043E-04	2.043E-04	2.043E-04	2.042E-04	0.05	0.05	0.05	0.05
3	2.167E-04	2.167E-04	2.167E-04	2.167E-04	2.167E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
4	2.128E-04	2.128E-04	2.128E-04	2.128E-04	2.128E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.041E-04	2.041E-04	2.041E-04	2.041E-04	2.041E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1.944E-04	1.944E-04	1.944E-04	1.944E-04	1.944E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.847E-04	1.847E-04	1.847E-04	1.847E-04	1.848E-04	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
8	1.754E-04	1.754E-04	1.754E-04	1.754E-04	1.754E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.665E-04	1.665E-04	1.665E-04	1.665E-04	1.665E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.581E-04	1.581E-04	1.581E-04	1.581E-04	1.581E-04	0.00	0.00	0.00	0.00
100	2.911E-06	2.910E-06	2.910E-06	2.910E-06	2.920E-06	-0.31	-0.34	-0.34	-0.34
1000	4.972E-09	4.972E-09	4.972E-09	4.972E-09	4.974E-09	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
10000	3.051E-10	3.052E-10	3.052E-10	3.052E-10	3.050E-10	0.03	0.07	0.07	0.07
18250	1.293E-10	1.293E-10	1.293E-10	1.293E-10	1.292E-10	0.08	0.08	0.08	0.08

表 2-50 Te-123 の経口摂取における小腸内容物放射能（絶対許容量が 10^{-11} の場合）

摂取後経過 日数(d)	小腸内容物放射能(Bq)				参照値との違い(%)		
	相対許容量			参照値	相対許容量		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
1	4.680E-04	4.640E-04	4.630E-04	4.637E-04	0.93	0.07	-0.16
2	2.044E-04	2.043E-04	2.043E-04	2.042E-04	0.10	0.04	0.05
3	2.167E-04	2.167E-04	2.167E-04	2.167E-04	-0.01	0.02	0.02
4	2.128E-04	2.128E-04	2.128E-04	2.128E-04	-0.02	-0.01	-0.01
5	2.041E-04	2.041E-04	2.041E-04	2.041E-04	0.02	0.02	0.02
6	1.944E-04	1.944E-04	1.944E-04	1.944E-04	0.02	0.01	0.01
7	1.848E-04	1.847E-04	1.847E-04	1.848E-04	-0.02	-0.03	-0.03
8	1.755E-04	1.754E-04	1.754E-04	1.754E-04	0.03	0.01	0.01
9	1.666E-04	1.665E-04	1.665E-04	1.665E-04	0.05	0.02	0.02
10	1.582E-04	1.581E-04	1.581E-04	1.581E-04	0.05	0.00	-0.01
100	2.938E-06	2.910E-06	2.907E-06	2.920E-06	0.61	-0.33	-0.45
1000	4.975E-09	4.972E-09	4.972E-09	4.974E-09	0.02	-0.04	-0.05
10000	3.088E-10	3.052E-10	3.049E-10	3.050E-10	1.26	0.06	-0.03
18250	1.298E-10	1.293E-10	1.292E-10	1.292E-10	0.49	0.05	0.00

・計算時間について

すべての許容量の組合せにおいて、計算時間は1秒以内であった。

5) Po-212 の経口摂取

Po-212 は、図 2-5 に示すように、壊変系列を形成しない。Po-212 の体内放射能計算に使用した移行係数データセットを、表 2-51 に示す。

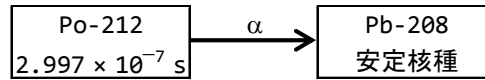


図 2-5 Po-212 の壊変図

表 2-51 Po-212 の経口摂取における移行係数データ

移行元	移行先	移行係数(d ⁻¹)	移行元	移行先	移行係数(d ⁻¹)
O-cavity	Oesophag-f	6.4800E+03	Blood_1	R-marrow	4.0000E+00
O-cavity	Oesophag-s	7.2000E+02	Blood_1	Bone-S	1.5000E+00
Oesophag-f	St-cont	1.2343E+04	Blood_1	Spleen	2.0000E+00
Oesophag-s	St-cont	2.1600E+03	Blood_1	Testes	1.0000E-01
St-cont	SI-cont	2.0570E+01	Blood_1	Ovaries	5.0000E-02
SI-cont	RC-cont	6.0000E+00	Blood_1	Other	3.2350E+01
SI-cont	Blood_1	6.6667E-01	Blood_4	Blood_1	9.9000E-02
RC-cont	LC-cont	2.0000E+00	Blood_2	Blood_1	9.9000E-02
LC-cont	RSig-cont	2.0000E+00	Liver_1	SI-cont	1.3900E-01
RSig-cont	Feces	2.0000E+00	Liver_2	Blood_1	9.9000E-02
UB-cont	Urine	1.2000E+01	Kidneys_1	UB-cont	1.7300E-01
Blood_3	Blood_1	8.0000E+02	Kidneys_2	Blood_1	9.9000E-02
Blood_3	Kidneys_1	2.0000E+02	Skin	Blood_1	6.9300E-03
Blood_1	Blood_4	4.0000E+00	Skin	Excreta	6.9300E-03
Blood_1	Blood_2	6.0000E+00	R-marrow	Blood_1	9.9000E-02
Blood_1	Liver_1	1.7500E+01	Bone-S	Blood_1	2.3100E-02
Blood_1	Liver_2	1.7500E+01	Spleen	Blood_1	9.9000E-02
Blood_1	Kidneys_1	5.0000E+00	Testes	Blood_1	1.3900E-02
Blood_1	Kidneys_2	5.0000E+00	Ovaries	Blood_1	1.3900E-02
Blood_1	Skin	5.0000E+00	Other	Blood_1	9.9000E-02

・体内放射能について

Po-212 は半減期が非常に短いため、放射能初期値が 1 となる口腔内放射能の時間推移について、参照値との比較を行った。相対許容度が 10^{-4} 及び 10^{-5} である場合の計算結果及び参照値との違いを、それぞれ表 2-52 及び表 2-53 に示す。絶対許容度が 10^{-9} の場合は、相対許容度が 10^{-4} 、 10^{-5} いずれの場合も、放射能が 10^{-10} Bq を下回る前に参照値との違いが非常に大きくなった。絶対許容度を 10^{-12} 、相対許容度を 10^{-5} とそれぞれ最も小さくした場合、参照値との違いは非常に小さく、0.1%以内となることが確認された。

絶対許容度を 10^{-11} とし、相対許容度を 10^{-3} から 10^{-5} に変化させた場合の計算結果及び参照値との違いを、表 2-54 に示す。相対許容度が 10^{-3} の場合は、放射能が 10^{-5} オーダーから参照値との違いが数十%以上となった。他の計算条件に比べ、相対許容度を 10^{-4} から 10^{-5} に小さくした時に参照値との違いが減少する傾向が強かった。

表 2-52 Po-212 の経口摂取における口腔内放射能（相対許容度が 10^{-4} の場合）

摂取後経過 日数(d)	口腔内放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
1.0E-12	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0E-12	6.704E-01	6.704E-01	6.704E-01	6.705E-01	6.705E-01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
3.0E-12	5.488E-01	5.489E-01	5.489E-01	5.490E-01	5.491E-01	-0.05	-0.04	-0.04	-0.02
4.0E-12	4.494E-01	4.494E-01	4.494E-01	4.495E-01	4.496E-01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.02
5.0E-12	3.679E-01	3.679E-01	3.679E-01	3.680E-01	3.682E-01	-0.08	-0.08	-0.08	-0.05
6.0E-12	3.011E-01	3.011E-01	3.011E-01	3.013E-01	3.015E-01	-0.13	-0.13	-0.13	-0.07
7.0E-12	2.465E-01	2.465E-01	2.465E-01	2.467E-01	2.469E-01	-0.16	-0.16	-0.16	-0.08
8.0E-12	2.018E-01	2.018E-01	2.018E-01	2.020E-01	2.022E-01	-0.20	-0.20	-0.20	-0.10
9.0E-12	1.653E-01	1.653E-01	1.653E-01	1.654E-01	1.656E-01	-0.18	-0.18	-0.18	-0.12
1.0E-11	1.353E-01	1.353E-01	1.353E-01	1.354E-01	1.356E-01	-0.22	-0.22	-0.22	-0.15
2.0E-11	1.841E-02	1.841E-02	1.841E-02	1.842E-02	1.838E-02	0.16	0.16	0.16	0.22
3.0E-11	2.499E-03	2.499E-03	2.499E-03	2.500E-03	2.491E-03	0.32	0.32	0.32	0.36
4.0E-11	3.391E-04	3.391E-04	3.391E-04	3.393E-04	3.378E-04	0.38	0.38	0.38	0.44
5.0E-11	4.602E-05	4.603E-05	4.603E-05	4.605E-05	4.579E-05	0.50	0.52	0.52	0.57
6.0E-11	6.246E-06	6.247E-06	6.247E-06	6.250E-06	6.207E-06	0.63	0.64	0.64	0.69
7.0E-11	8.558E-07	8.478E-07	8.478E-07	8.483E-07	8.415E-07	1.70	0.75	0.75	0.81
8.0E-11	1.233E-07	1.156E-07	1.151E-07	1.151E-07	1.141E-07	8.06	1.31	0.88	0.88
9.0E-11	1.491E-08	1.663E-08	1.565E-08	1.563E-08	1.546E-08	-3.56	7.57	1.23	1.10
1.0E-10	3.840E-09	2.111E-09	2.246E-09	2.123E-09	2.097E-09	83.12	0.67	7.11	1.24
2.0E-10	8.569E-12	1.318E-12	0.000E+00	0.000E+00	2.667E-16	—	—	—	—
3.0E-10	2.406E-12	3.363E-13	0.000E+00	0.000E+00	1.826E-17	—	—	—	—
4.0E-10	6.458E-13	8.808E-14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—
5.0E-10	1.519E-13	2.057E-14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—

表 2-53 Po-212 の経口摂取における口腔内放射能（相対許容度が 10^{-5} の場合）

摂取後経過 日数(d)	口腔内放射能(Bq)					参照値との違い(%)			
	絶対許容度				参照値	絶対許容度			
	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
1.0E-12	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0E-12	6.705E-01	6.705E-01	6.705E-01	6.705E-01	6.705E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
3.0E-12	5.491E-01	5.491E-01	5.491E-01	5.491E-01	5.491E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
4.0E-12	4.496E-01	4.496E-01	4.496E-01	4.496E-01	4.496E-01	0.00	0.00	0.00	0.00
5.0E-12	3.681E-01	3.681E-01	3.681E-01	3.681E-01	3.682E-01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
6.0E-12	3.014E-01	3.014E-01	3.014E-01	3.014E-01	3.015E-01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
7.0E-12	2.468E-01	2.468E-01	2.468E-01	2.468E-01	2.469E-01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
8.0E-12	2.021E-01	2.021E-01	2.021E-01	2.021E-01	2.022E-01	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
9.0E-12	1.655E-01	1.655E-01	1.655E-01	1.655E-01	1.656E-01	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06
1.0E-11	1.355E-01	1.355E-01	1.355E-01	1.355E-01	1.356E-01	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
2.0E-11	1.837E-02	1.837E-02	1.837E-02	1.837E-02	1.838E-02	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
3.0E-11	2.490E-03	2.490E-03	2.490E-03	2.490E-03	2.491E-03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
4.0E-11	3.375E-04	3.376E-04	3.376E-04	3.376E-04	3.378E-04	-0.09	-0.06	-0.06	-0.06
5.0E-11	4.575E-05	4.576E-05	4.576E-05	4.576E-05	4.579E-05	-0.09	-0.07	-0.07	-0.07
6.0E-11	6.202E-06	6.203E-06	6.203E-06	6.203E-06	6.207E-06	-0.08	-0.06	-0.06	-0.06
7.0E-11	8.442E-07	8.407E-07	8.409E-07	8.409E-07	8.415E-07	0.32	-0.10	-0.07	-0.07
8.0E-11	1.243E-07	1.142E-07	1.140E-07	1.140E-07	1.141E-07	8.94	0.09	-0.09	-0.09
9.0E-11	1.591E-08	1.606E-08	1.545E-08	1.545E-08	1.546E-08	2.91	3.88	-0.06	-0.06
1.0E-10	4.008E-09	2.136E-09	2.218E-09	2.095E-09	2.097E-09	91.13	1.86	5.77	-0.10
2.0E-10	5.195E-12	1.412E-12	0.000E+00	0.000E+00	2.667E-16	—	—	—	—
3.0E-10	2.541E-12	4.966E-13	0.000E+00	0.000E+00	1.826E-17	—	—	—	—
4.0E-10	1.288E-12	2.265E-13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—
5.0E-10	6.413E-13	1.069E-13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—	—

表 2-54 Po-212 の経口摂取における口腔内放射能（絶対許容度が 10^{-11} の場合）

摂取後経過 日数(d)	口腔内放射能(Bq)				参照値との違い(%)		
	相対許容度			参照値	相対許容度		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
1.0E-12	8.188E-01	8.189E-01	8.189E-01	8.189E-01	-0.01	0.00	0.00
2.0E-12	6.703E-01	6.704E-01	6.705E-01	6.705E-01	-0.03	-0.01	0.00
3.0E-12	5.487E-01	5.489E-01	5.491E-01	5.491E-01	-0.07	-0.04	0.00
4.0E-12	4.494E-01	4.494E-01	4.496E-01	4.496E-01	-0.04	-0.04	0.00
5.0E-12	3.680E-01	3.679E-01	3.681E-01	3.682E-01	-0.05	-0.08	-0.03
6.0E-12	3.015E-01	3.011E-01	3.014E-01	3.015E-01	0.00	-0.13	-0.03
7.0E-12	2.471E-01	2.465E-01	2.468E-01	2.469E-01	0.08	-0.16	-0.04
8.0E-12	2.026E-01	2.018E-01	2.021E-01	2.022E-01	0.20	-0.20	-0.05
9.0E-12	1.663E-01	1.653E-01	1.655E-01	1.656E-01	0.42	-0.18	-0.06
1.0E-11	1.366E-01	1.353E-01	1.355E-01	1.356E-01	0.74	-0.22	-0.07
2.0E-11	1.900E-02	1.841E-02	1.837E-02	1.838E-02	3.37	0.16	-0.05
3.0E-11	2.621E-03	2.499E-03	2.490E-03	2.491E-03	5.22	0.32	-0.04
4.0E-11	3.639E-04	3.391E-04	3.376E-04	3.378E-04	7.73	0.38	-0.06
5.0E-11	5.038E-05	4.603E-05	4.576E-05	4.579E-05	10.02	0.52	-0.07
6.0E-11	6.964E-06	6.247E-06	6.203E-06	6.207E-06	12.20	0.64	-0.06
7.0E-11	9.619E-07	8.478E-07	8.409E-07	8.415E-07	14.31	0.75	-0.07
8.0E-11	1.357E-07	1.151E-07	1.140E-07	1.141E-07	18.93	0.88	-0.09
9.0E-11	2.001E-08	1.565E-08	1.545E-08	1.546E-08	29.43	1.23	-0.06
1.0E-10	2.859E-09	2.246E-09	2.218E-09	2.097E-09	36.34	7.11	5.77
2.0E-10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.667E-16	—	—	—
3.0E-10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.826E-17	—	—	—
4.0E-10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—
5.0E-10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	—	—	—

・計算時間について

すべての許容度の組合せにおいて、計算時間は1秒以内であった。

2.3.6 最適化の結果

2.3.5 項に示した計算結果から、絶対許容度を 10^{-11} 以下、相対許容度を 10^{-4} 以下に設定すると、 10^{-10} Bq (Bq d^{-1}) 程度までの体内放射能及び排泄率について、参照値の 0.4% 以内で評価できることが明らかになった。ただし、Po-212 のように極端に半減期が短い場合は、参照値に対し 7% 程度の違いが生じた。絶対許容度については、 10^{-11} より 10^{-12} に設定した方が、参照値との違いが小さくなるケースが多かったのに対し、相対許容度については、 10^{-4} と 10^{-5} でほぼ同じ結果となるケースが多かった。

計算時間については、絶対許容度より相対許容度の影響が大きいことが確認された。今回検討した計算条件のうち、U-242 は系列核種数が最大で、コンパートメント数も多いことから、最も長い計算時間を要したが、2分以内に計算は終了した。

以上のことから、本計算コードにおいては、計算時間への影響が比較的小さい絶対許容度については 10^{-12} とし、計算時間への影響が大きい相対許容度については 10^{-4} に設定することを推奨する。ただし、他の元素の組織系動態モデルや年齢群別モデルが今後公開された場合は、その移行経路や移行係数データをよく検討し、さらなる最適化が必要となる可能性はある。

3. あとがき

本報告書は、平成 26 年度原子力規制庁原子力利用安全対策等委託業務「平成 26 年度国際放射線防護委員会 (ICRP) 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備」事業の事業成果を取りまとめた。平成 21 年度から 25 年度までの事業成果に基づき、平成 26 年度は、体内放射能計算機能のパラメータの最適化に関する調査を行い、以下の成果を得た。

最初に、公開されている刊行物やドラフト文書が公表された OIR1、OIR2、OIR3 等に基づき、2007 年勧告に基づく体内放射能計算に関するモデル等を調査した。全核種に共通する事項として、呼吸気道領域における移行に関する HRTM モデルについては、移行経路の変更はあったが、ICRP66 と OIR1 で移行係数のオーダーに差はなく、ODE の硬さに影響はないと考える。一方で、消化管における移行については、ICRP100 の HATM モデルの導入により、移行係数のオーダー範囲は吸入摂取で 2 桁、経口摂取では 3 桁の拡大があり、ODE の硬さに影響を与える可能性が確認された。OIR2 及び OIR3 に収録されている 28 元素の組織系動態モデルについて、1990 年勧告に基づくモデルと比較した。モデルの構造は、カルシウム、ストロンチウム、バリウム、鉛、トリウム及びウラン以外の 22 元素については変更されることが分かった。また、許容度の最適化に影響を与える移行係数のオーダーの範囲は、硫黄、カルシウム、ストロンチウム、ジルコニウム、モリブデン、テルル、バリウム、ラジウム、鉛、トリウム及びウラン以外の 16 元素 (ラドンは除く) で拡大する傾向も確認した。また、体内放射能計算における移行係数データのオーダー範囲が最大となる摂取条件は、鉄の経口摂取であった。放射性核種に関するデータでは、系列核種の数が ODE の従属変数の数に反映されるが、ICRP107 の調査により、U-242 の壊変系列数が 23 と最大になることを確認した。

許容度の最適化については、前年度までの調査結果から 10^{-10} Bq の範囲まで体内放射能の経時変化を評価でき、告示別表等で公開されている線量係数等の有効数字 (2 桁) から 4 桁の値を正確に計算すること等を要件とした。また、許容度に関する検討においては、これらの要件に基づき絶対許容度及び相対許容度を設定し、刊行物や OIR の調査結果に基づき、厳しい許容度が要求されると推定した条件について計算を行った。絶対許容度を 10^{-12} に設定した場合、NAG ライブラリで算出した参照値との違いが 10^{-11} と設定した場合と比較して小さくなったが、相対許容度については、 10^{-4} と 10^{-5} でほぼ同じ結果となるケースが多くなった。そこで、本事業の結果としては、絶対許容度を 10^{-12} 、計算時間への影響が比較的大きい相対許容度を 10^{-4} と設定することを推奨する。

今後、改訂 HRTM が収録された OIR1 や、組織系動態モデルが収録される OIR2 及び OIR3 が ICRP より正式な刊行物として公開された場合、昨年度までの事業の成果として得た基本的な方針に基づき、計算コードの開発を進めていく。この計算コードの開発において、今年度の成果を反映させて、体内放射能計算機能のパラメータを設定する。一方で、組織系動態モデルについて、今回の検討範囲は職業人に関する 28 元素に関するものに限られている。そのため、中長期的な観点からは、他の元素、他の年齢群のモデルが公開された場合、移行経路や移行係数を調査し、より許容度が厳しくなる計算条件が確認された場合、今年度の事業で手法に基づき、パラメータの最適化を進めていく予定である。

参考文献

- [1] International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP **21** (1–3) (1991).
- [2] International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP **37** (2–4) (2007).
- [3] 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件, 平成十二年科学技術庁告示第五号, 最終改正 平成二五年三月二九日 文部科学省告示第五八号.
- [4] 日本原子力研究開発機構, ICRP (国際放射線防護委員会) 技術的基準等の整備 (計算コードの開発), 平成 21 年度原子力利用安全対策等委託事業委託業務成果報告書 (2010).
- [5] 日本原子力研究開発機構, ICRP (国際放射線防護委員会) 技術的基準等の整備 (計算コードの開発), 平成 22 年度原子力利用安全対策等委託事業委託業務成果報告書 (2011).
- [6] 日本原子力研究開発機構, ICRP (国際放射線防護委員会) 技術的基準等の整備 (計算コードの整備), 平成 23 年度原子力利用安全対策等委託事業委託業務成果報告書 (2012).
- [7] 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度 ICRP (国際放射線防護委員会) 技術的基準等の整備 (計算コードの整備), 平成 24 年度原子力利用安全対策等委託事業委託業務成果報告書 (2013).
- [8] 日本原子力研究開発機構, 平成 25 年度原子力利用安全対策等委託事業委託業務成果報告書 (2014).
- [9] International Commission on Radiological Protection, Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 100, Ann. ICRP **36** (1–2) (2006).
- [10] International Commission on Radiological Protection, Occupational Intakes of Radionuclides Part 1, Draft Report for Consultation (2012), available from: http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P1_for_consultation.pdf (最終アクセス日: 2015 年 1 月 22 日).
- [11] International Commission on Radiological Protection, Occupational Intakes of Radionuclides Part 2, Draft Report for Consultation (2012), available from: http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P2_for_consultation.pdf (最終アクセス日: 2015 年 1 月 22 日).
- [12] International Commission on Radiological Protection, Occupational Intakes of Radionuclides Part 3, Draft Report for Consultation (2012), available from: http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P3_for_consultation.pdf (最終アクセス日: 2015 年 1 月 22 日).
- [13] International Commission on Radiological Protection, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP **38** (3) (2008).
- [14] International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP **24** (1–3) (1994).
- [15] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30 part 1, Ann. ICRP **2** (3–4) (1979).

- [16] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients, ICRP Publication 67, Ann. ICRP **23** (3–4) (1993).
- [17] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30 part 2, Ann. ICRP **4** (3–4) (1980).
- [18] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30 part 3, Ann. ICRP **6** (2–3) (1981).
- [19] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: An Addendum, ICRP Publication 30 part 4, Ann. ICRP **19** (4) (1988).
- [20] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1, ICRP Publication 56, Ann. ICRP **20** (2) (1990).
- [21] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 3 Ingestion Dose Coefficients, ICRP Publication 69, Ann. ICRP **25** (1) (1995).
- [22] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 71, Ann. ICRP **25** (3–4) (1995).
- [23] International Commission on Radiological Protection, Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Ann. ICRP **11–13** (1983).
- [24] International Commission on Radiological Protection, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68, Ann. ICRP **24** (4) (1994).
- [25] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, Ann. ICRP **26** (1) (1995).
- [26] The Numerical Algorithms Group Ltd., NAG Numerical Components. Available from: http://www.nag.com/numeric/numerical_libraries.asp (最終アクセス日: 2015年2月9日).

付録

ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する 技術的基準等の整備運営委員会の審議記録

平成 27 年 1 月 28 日より平成 27 年 2 月 10 日までに実施したメール審議の記録、及び平成 27 年 3 月 12 日に開催した委員会会合の議事録を、付録として収録した。

ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備運営委員会
平成 26 年度委員会メール審議の記録

日本原子力研究開発機構

1. 審議期間

平成 27 年 1 月 28 日（水）より平成 27 年 2 月 10 日（火）まで

2. 議題

- 1) 原子力規制庁平成 26 年度委託事業の計画について
- 2) 体内放射能計算に係るモデルの調査結果と許容度の最適化について

3. 配信資料

平成 27 年 1 月 28 日（水）に、高橋幹事より、審議に係る資料として以下の電子ファイルが各委員に配信された。

- ・メール審議資料 26-1-1_H26 年度事業の概要について（PDF 及び WORD）
- ・メール審議資料 26-1-1 添付資料_H26 年度事業の仕様書（PDF）
- ・メール審議資料 26-1-2_体内放射能計算に係るモデルの調査配信版（PDF 及び WORD）
- ・参考資料 H26 年度 ICRP 技術的基準の整備事業に係る委員（PDF）

4. 審議の内容

3.の資料を基に、以下の点について、委員会に審議を諮った。（メール審議資料 26-1-2_体内放射能計算に係るモデルの調査配信版 5. 審議内容のまとめ より）

- ・体内放射能計算にかかるモデルの調査は、本資料にまとめた内容で十分か。
- ・体内放射能は、 10^{-10} Bq まで、有効数字 4 桁で計算できるよう、許容度を設定することでよいか。
- ・計算時間は、1 件 5 分以内であれば十分か。
- ・許容度の最適化を行う計算条件は、Fe-60 の経口摂取、Fe-53 の経口摂取、U-242 の経口摂取、Te-123 の経口摂取、Y-95 の経口摂取でよいか。他に必要な計算条件の提案はないか。

5. 委員からのコメント

配信した資料に対し、遠藤委員、仁井田委員、石樽委員及び高田委員から、以下のコメントがあった。

① 遠藤委員

本年度事業の調査項目として、放射性核種の壊変系列や半減期を対象としており、その調査に対して、半減期が最も短い核種として、Y-95 10.3 m をあげている（メール審議資料 26-1-2、p.13）。

この核種は半減期 10 分以上の親核種という観点で選定されたものとするが、親核種の半減期が 10 分以上でも、その壊変系列の中に半減期がより短い核種があるものが多数ある。例えば、ICRP107 で最も半減期の短い核種は、Po-212 $2.99E-7$ s で、これは Th-232 の壊変系列に含まれていて、多くの核種に関係する。

従って調査対象とする最も短い半減期の核種は、このような状況も踏まえて選定される必要があると考えるので、検討することを提案する。

② 仁井田委員

本年度の作業のひとつに、ソルバの許容度の最適化があるが、計算条件についてではなく、数値計算を専門とする立場から、計算手法、即ち、ソルバの最適化、それ自体に対してコメントする。

1)最適化する場合、ソルバの選択も範囲に入るのか。

2)最適化するソルバのパラメタの種類と、範囲。

3)ソルバそのものが持っている精度限界の指標。

少し、専門的になるが、最適化であるので、上記の内容についても、多少、言及された方がよいと考える。

③ 石樽委員

1)「有効数字 4 桁で正確に・・・」の「正確に」の意味と、判定に用いるレファレンスは何になるのか。

2)計算時間 5 分以内とされるとき、CPU 等ハードウェアの要件をどのように想定しているのか。

3)本計算コードはバイオアッセイデータの解釈にも用いられると考えるが、最適化に当たり、便・尿・汗等の排泄率についての最小値(Bq/d)、有効桁数、計算時間はどのように考えているのか。

④ 高田委員

審議資料 26-1-2 の P13 3.5 放射性核種データで OIR2・OIR3 と告示別表の両者に掲載された核種について壊変系列の数や半減期等を確認されているが、告示別表に掲載のある核種で、OIR には収録されていない核種があるということなのか。

このような核種がある場合は、それらについて検討はされているのか。

6. コメントへの回答

平成 27 年 2 月 9 日 (月) に、高橋幹事より、委員からのコメントへの回答ファイルの中で、各委員に対する質問、コメントに対する回答が、以下のとおりに配信された。

① 遠藤委員のコメントへの回答

壊変系列に含まれる短半減期核種は、その親核種と放射平衡が成立し、親核種と同じ速さで減少していくことから、常微分方程式の硬さへの影響が小さいのではないかと考え、核種選定時に壊変系列核種の半減期は考慮に入れていなかった。

Po-212 は、OIR3 の Table 11-1 には掲載されていない核種であるが、告示別表には収録され

ていることから、Po-212 が親核種である場合について、最適化を行う際の計算条件に追加する。

② 仁井田委員のコメントへの回答

1) 本事業で開発する線量係数計算コードで使用する常微分方程式ソルバは、平成 22 年度事業で開発した Jlsode (Java 版 LSODE)) を使用する方針とした。

Jlsode は、FORTRAN77 で記述された連立常微分方程式初期値問題ソルバ LSODE を Java に移植したもので、常微分方程式の解法として、FORTRAN77 の LSODE と同様に、解くべき連立常微分方程式が堅くない場合はアダムス法を、堅い場合は後退差分法を使用することができる。ここで、内部被ばく線量評価で解くべき連立常微分方程式は非常に堅く、そのヤコビ行列は疎な帯行列となる性質があることから、後退差分法を使用し、疎なヤコビ行列に対応するオプションを指定している。

2) 最適化するパラメタは、絶対許容度 (絶対許容誤差) と相対許容度 (相対許容誤差) の 2 個である。なお、これらのパラメタは従属変数毎に設定可能だが、適切な設定値を自動で判断するアルゴリズムを追加する必要があることから、本計算コードでは一括して指定している。検討する範囲は、絶対許容誤差については、組織・臓器の残留放射能を 10^{-10} Bq (排泄率は 10^{-10} Bq/d) まで評価することを想定し、 10^{-12} ~ 10^{-9} 程度を考えている。また、相対許容誤差は、有効数字を 4 桁とすることを想定し、 10^{-5} ~ 10^{-3} 程度を考えている。

3) こちらでの調査の限りでは、Jlsode の基となった DLSODE のドキュメントには、ソルバそのものが持つ精度限界については明記がなかった。

平成 22 年度に実施した、1990 年勧告に対応したモデル・データを用いた試算では、科学技術計算で十分な実績と信頼性を有する IMSL、NAG といったライブラリと Jlsode の結果がほぼ同じであり、内部被ばく線量評価で要求される精度は、十分有していると判断している。

③ 石樽委員のコメントへの回答

1) 平成 22 年度の事業と同様に、IMSL、NAG といった科学技術計算で十分な実績と信頼性を有するライブラリによる計算結果をレファレンスとする。これらレファレンスの値と計算コードでの結果の間で、有効数字 4 桁まで結果が一致すれば「正確」であると判断する。

2) 近年、相応の計算力を要する業務用 PC に多く採用されている Intel Core i7 搭載の計算機で時間を計測する予定である。本計算コードが完成する頃 (数年後) には CPU 能力がより向上し、Intel Core i7 程度の処理能力を有する CPU がより広く普及しているのではないかと想定している。

3) 排泄率の最小値は、OIR1 で示されたように、 10^{-10} Bq/d を考えている。(参考として、ICRP78 では 10^{-8} Bq/d が最小値であった。) 有効桁数については、OIR に何桁で収録されるかについては、確定した情報はないが、現行の 2 桁から 3 又は 4 桁に増えるのではないかと想定している。

計算時間については、排泄率の算出も含めて 5 分以内であればよいのではないかと考えている。

④ 高田委員のコメントへの回答

OIR1 のパラグラフ(407)において、各元素のすべての放射性核種について、線量係数等の

データが収録される旨の記述がある。ただし、現在の告示別表にある Nb-97m、Re-177 等のいくつかの核種は ICRP107 に収録されていないことを確認しており、一方で現在の告示別表に掲載されていないが、ICRP107 で新たに収録された核種も存在する。以上のことから、現在の告示別表に掲載されている核種と OIR に収録される核種は、完全に一致しないことが予想される。

ICRP2007 年勧告の取入れに伴う告示別表の見直しについては、現在のところは不明であるが、本事業では告示別表で掲載される核種を取り扱える計算コードを開発する必要がある。

7. 審議の結果

頂いたコメントを受け、本事業を以下のように進めることとした。

- ・体内放射能計算に係るモデルの調査は、完了した。
- ・体内放射能及び排泄率は、 10^{-10} Bq (Bq/d)まで、有効数字 4 桁で計算できるように、許容度を設定する。
- ・計算時間は、1 件 5 分以内とする。
- ・許容度の最適化を行う計算条件は、Fe-60 の経口摂取、Fe-53 の経口摂取、U-242 の経口摂取、Te-123 の経口摂取、Y-95 の経口摂取及び Po-212 の吸入摂取（タイプ S）とする。

以上

ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備運営委員会
平成 26 年度第 1 回委員会 議事録

日本原子力研究開発機構

1. 日時

平成 27 年 3 月 12 日（木）10 時 00 分～11 時 20 分

2. 場所

日本原子力研究開発機構 東京事務所 第 5 会議室（東京都千代田区内幸町 2-2-2）

3. 出席者及び欠席者

・出席

（委員）下委員長、石樽委員、遠藤委員、高田委員、仲野委員、仁井田委員、松本委員、
高橋委員（兼幹事）

（幹事）金山幹事

（事務局）真辺局員、黒澤局員

・欠席

（委員）甲斐委員

4. 議題

- 1) 体内放射能計算機能のパラメータの最適化について
- 2) 平成 26 年度業務成果報告書について
- 3) 本事業の今後の展開について
- 4) その他

5. 資料

配付資料 26-1-1 ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の
整備運営委員会 平成 26 年度委員会メール審議の記録

配付資料 26-1-2 平成 26 年度委託業務成果報告書（案）

配布資料 26-1-3 ICRP 勧告を踏まえた放射線障害防止に関する技術的基準等の整備に
関するこれまでの経緯と今後の展開

参考資料 26-1-1 平成 26 年度国際放射線防護委員会の勧告を踏まえた放射線障害防止に
関する技術的基準等の整備運営委員会委員名簿

6. 議事録

6.1 メール審議の記録について

平成 26 年度委員会メール審議の記録については、配付資料 26-1-1 の内容で平成 27 年 2 月 19 日に規制庁へ提出したことが、高橋委員より報告された。

6.2 委員会の運営について

原子力機構の百瀬委員、角田委員より退任の申し出があった。両委員の専門分野に鑑みて、新たに高田委員を迎え、参考資料 26-1-1 の委員構成で運営する旨、下委員長から説明があった。

6.3 体内放射能計算機能のパラメータの最適化及び成果報告書について

配布資料 26-1-2 の要点をまとめたスライドを用いて、今年度実施した体内放射能計算機能の許容度の最適化作業の結果について、高橋委員より説明があった。説明の後、以下の質疑応答がなされた。

- ・ メール審議における委員からのコメントに対する事務局からの回答に対し、更なるコメント等はあったか。(下委員長)
- ・ 更なるコメント等はなかった。(高橋委員)
- ・ メール審議において石樽委員から、計算機のスペック及びリファンレンス値に対するコメントがあったが、報告書案における記述が不足しているのではないか。具体的には、使用した計算機のスペックを示すだけでなく、それがどの程度のものであるか、また、NAG ライブラリに基づく計算値がリファンレンス値となり得る理由を、それぞれ記載すべきではないか。後者については、平成 22 年度事業においてすでに検討しているが、報告書を引用する等、何らかの説明をするべき。(遠藤委員)
- ・ 過年度に実施した内容であっても、当該年度の報告書を読めば分かるようにすべきであろう。(下委員長)
- ・ OIR2、OIR3 の 28 元素のうち、最も壊変系列核種が多い核種は、23 個の系列核種を持つ U-242 である。一方、ICRP107 に収録された全核種においては、30 個の系列核種を持つ Es-254m が最多である点について留意されたい。(遠藤委員)
- ・ 絶対許容度を厳しくすると計算時間が長くなると予想されるが、U-242 の計算時間について、相対許容度が 10^{-4} 及び 10^{-5} の場合は、必ずしもそうならない。その理由は何か。(遠藤委員)
- ・ 使用した計算機の CPU は、CPU の利用状況に応じてクロック数を上昇させる機能を有しており、その機能が作動したためではないかと考えている。厳密に計算時間を検討するためには、このような機能がない CPU を利用すべきであったかもしれない。(真辺局員)
- ・ 相対許容度及び絶対許容度は、計算を打ち切る時の許容度か。両方を満たした場合に、計算を打ち切るのか。(石樽委員)
- ・ 相対許容度と絶対許容度が計算を打ち切る時の基準であることはそのとおりである。両方を満たした場合に打ち切るか否かについては、利用している ODE ソルバーのソースを調べないと明確にならないが、そうであると考えて値を設定している。(真辺局員)
- ・ Fe-53 の計算結果と参照値の比較において、相対許容度をより厳しくした方が、参照値との違いが大きくなっているケースがある。絶対許容度と相対許容度を双方満たす場合に計算を打ち切るのであれば、このようなことは起こらないのではないか。(石樽委員)
- ・ 指摘の件については把握しているが、その原因は特定できていない。計算を打ち切った

時の誤差の伝播の具合の違いかもしれない。あるいは、許容度を厳しくしすぎたことにより、桁落ちる誤差が大きくなった可能性も考えられる。(真辺局員)

- ・ U-242 や Po-212 に対する計算結果と参照値との比較においては、参照値との違いの符号の振れ方に一貫性がない。その原因は何か。(下委員長)
- ・ 今回の調査において、半減期が非常に短い場合は、計算結果の違いが大きくなってしまふことが明らかになった。これは、半減期が非常に短い場合は数値的な解が振動しやすいため、その振動によって参照値との違いの符号が振れる原因ではないかと考えられるが、定量的な説明まではできていない。(真辺局員)
- ・ 消化管移行に係る表で、大腸上部から糞への移行とあるが、大腸下部からの誤りではないか。(石樽委員)
- ・ そのとおりで、修正する。(高橋委員)
- ・ U-242 は、どのように生成するか。(下委員長)
- ・ 人工核種と考えられる。生成過程について調査し、明らかになった場合は注意書きを行う。(高橋委員)
- ・ Po-212 は、非常に半減期が短い、このような計算も必要ということか。(下委員長)
- ・ メール審議におけるコメントは、Po-212 そのものの摂取について計算するのではなく、Po-212 を系列核種に含むような核種の計算をしてはどうかという意図ではあった。(遠藤委員)
- ・ 今年度実施した計算では、壊変系列核種も含めて、すべて放射能計算をしている。しかし、計算する核種の選定について当初設定した条件で選ばれた核種は、系列核種の壊変数が多くないものばかりになってしまった。ひとつくらいは、系列核種の壊変数が多くなるようなケースを意図的に選び、系列核種について同様の比較を実施してもよかったかもしれないと感じた。(真辺局員)
- ・ 壊変系列核種の動態は、どのように扱ったか。(石樽委員)
- ・ OIR2、OIR3 に書かれている範囲では、Independent kinetics を採用して計算した。今年度の作業を行ったところ、元素毎に構造が異なる組織系動態モデルがある中で、様々な系列核種について Independent kinetics で接続していくことは容易ではないことを再確認した。主要な核種については、元素間のモデルの接続について記述があるが、マイナーな核種については必ずしもうまく接続できるとは限らないのではないか。(真辺局員)
- ・ 今後、様々な核種について、系列核種の多様なモデルを順次接続して計算していくことになるが、そのような場合であっても、絶対許容度は 10^{-12} 、相対許容度は 10^{-4} で対応できると考えているか。(石樽委員)
- ・ そのように予測している。(高橋委員)
- ・ これだけタイムスケールの違う変数が混じっている方程式を解くのは、原理的に難しい。参照値との違いの傾向についても、ステップ幅を変えると結果に効いてくる変数が代わることもあって、予測は難しい。先に参照値との違いの符号の振れ方に一貫性がない旨のコメントがあったが、発散する直前は、特に予測が困難となる。(仁井田委員)
- ・ 半減期が非常に長いものと短いものがある場合に対する計算はどうか。(仁井田委員)
- ・ 1990 年勧告対応のモデルによる計算では、計算は正しくできていた。親核種の半減期が

長い場合は、系列核種の半減期が非常に短くても、放射平衡により親核種の半減期と同じ速さで減少するため、ODE としては変化が緩やかとなり、計算もうまくできると考えられる。親核種の半減期が非常に短い場合は、計算が難しいものとなる。(真辺局員)

6.4 本事業の今後の展開について

配付資料 26-1-3 を用いて、本事業の今後の展開について高橋委員より説明があった。説明を受け、委員より以下のコメント、質問等があった。

- ・ OIR1 については、今年の 10 月から 12 月の間に、ICRP130 として出版される見込みである。OIR2、OIR3 の発刊時期については、最も早い場合は平成 27 年度内となるが、今のところ明確になっていない。(遠藤委員)
- ・ 放射線防護で対象となる核種は、ICRP が勧告するもののみではなく、時代の変化に応じて増えたり変わったりするであろう。1990 年勧告対応の告示別表を作るためのコード開発においては、当時の加速器利用拡大の動向を踏まえて、ICRP が勧告していない二百数十の核種を追加したが、一昨年の J-PARC における放射性物質漏洩事故において、内部被ばくや環境放出をもたらした主要な核種のうちのいくつかは、この追加した核種であった。これらの評価値を独自に整備していたために、環境への影響評価等が迅速にできた。本事業におけるコードについて、将来の核種の拡張について対応できるようにしておくのであれば、ある程度主要な核種の計算が可能となった段階で公開し、その後、随時、核種を追加していくようにすることも考えられる。(遠藤委員)
- ・ ある区切りの段階でのコードの公開や、日本独自の核種の告示別表への追加等は、最終的には関係省庁が判断するものであるが、このような委員会の場で議論して、関係省庁に意見を伝えていく必要がある。(下委員長)
- ・ 委員会での審議も本事業の成果となるが、このような提案を含めて、委員会の議論の内容について、報告書の付録として規制庁に示すこととなる。(高橋委員)
- ・ 成果はある程度のところで公開し、広く意見を募集することでよりよくなるものであるので、規制庁には前向きに検討して頂きたい。(下委員長)
- ・ IAEA の BSS に掲載される核種との整合性についても、今後の課題となるのではないかと。(高田委員)
- ・ これまで ICRP の核種についてのみ検討していた。今後の課題としたい。(高橋委員)

6.5 その他について

- ・ 議事録案を速やかに作成し、委員の皆様にお送りする。議事録案に対するコメントは、19 日までをお願いしたい。また、配付資料 26-1-2 の報告書案について更なるコメント等がある場合は、20 日までをお願いしたい。(高橋委員)

以 上