

平成 31/令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業
成果報告書

令和 2 年 3 月 31 日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業」の成果を取りまとめたものです。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	平成31/令和元年度の研究計画	2
2.1	全体計画	2
2.2	これまでの進捗	3
2.2.1	平成29年度の進捗	3
2.2.2	平成30年度の進捗	3
2.3	平成31/令和元年度の研究計画	4
2.3.1	核種摂取量推定機能の開発	4
2.3.2	コードの開発	5
2.3.3	関係する情報の収集	5
第3章	核種摂取量推定機能の開発	6
3.1	目的及び実施計画	6
3.2	検証方法	6
3.3	検証結果	7
3.3.1	事例①： ^{137}Cs の経口摂取	7
3.3.2	事例②： ^{125}I の吸入摂取	9
3.3.3	事例③： ^{235}U の吸入摂取	10
3.3.4	事例④： ^{131}I の吸入摂取	11
3.3.5	事例⑤： ^{238}Pu の吸入摂取	12
3.3.6	事例⑥： ^{60}Co の吸入摂取	13
3.4	核種摂取量推定機能の開発のまとめ	14
第4章	コードの開発	15
4.1	目的及び実施計画	15
4.2	コード操作 GUI の開発	15
4.2.1	計算条件入力モード	16
4.2.2	計算実行・結果閲覧モード	22
4.3	線量係数計算モデル及びデータの編集機能の開発	27
4.3.1	体内動態モデルの編集	28
4.3.2	線量評価モデル及びデータの指定	29
4.4	1990年勧告対応モデル及びデータの実装	31
4.4.1	線量係数計算に関する2007年勧告と1990年勧告の相違点	31
4.4.2	1990年勧告対応モデル及びデータを用いた線量係数計算	35
4.4.3	計算条件設定ファイルの作成	36
4.5	コードβ版の開発	37
4.6	コードの開発のまとめ	37

第5章	線量係数計算機能の適用及び開発に関する情報収集	38
5.1	線量係数計算機能の慢性被ばくへの適用	38
5.1.1	背景と目的	38
5.1.2	方法	38
5.1.3	結果と考察	38
5.1.4	慢性被ばくへの適用のまとめ	41
5.2	ICRPによる線量評価モデル等の公開に係る情報収集	41
第6章	あとがき	43
	参考文献	45
付録1	1990年勧告対応モデル及びデータを用いた実効線量係数の計算結果	49
付録2	プログラムオフィサー（PO）会合、専門家との打合せ及び外部発表	70
付録3	学会等発表資料一覧	73

第1章 はじめに

日本国内では、放射線や放射性物質の利用に伴う放射線障害の発生を防止するため、「放射性同位元素等による放射線防止の防止に関する法律」（以下、「放射線障害防止法」とする。）が昭和32年6月に制定、昭和33年4月1日に施行された。原子力規制委員会（以下、「規制委員会」とする。）では、平成28年1月に国際原子力機関（IAEA）の総合規制評価サービス（IRRS）より受けた放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告等を踏まえて、放射性同位元素使用施設等の規制の見直しに関する議論を進めた。その結果、従来の放射線障害防止法については、事故等の報告義務の強化等が追加され、名称も「放射性同位元素等の規制に関する法律」[1]（以下、「RI規制法」とする。）に変更された。RI規制法は、平成29年4月に公布、平成30年4月に施行され、さらに防護措置の義務化や責任の明確化等もなされた（令和元年9月施行）。

RI規制法の前身となる放射線障害防止法の他、同法の施行令、施行規則等は、放射線利用の多様化による実態とのずれの是正、国際放射線防護委員会（ICRP）がその時々を示す勧告の主旨を取り入れるために改正されてきた。現在、国内の放射線利用に係る規制は、ICRPの1990年勧告[2]の主旨を取り入れたものであるが、ICRPはこれに置き換わる2007年勧告[3]を平成19年に公開した。そのため、規制委員会の下に設置されている放射線審議会においては、2007年勧告の国内の規制への取入れに関する検討が継続して進められている。

国内における放射線規制の中では、告示「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」[4]（以下、「告示：RIの数量等を定める件」とする。）において、外部被ばくや内部被ばくによる放射線障害を防止するための防護基準値等が定められている。このうち、内部被ばくに関する防護基準値については、告示：RIの数量等を定める件の別表第2及び別表第3の中で、作業者の防護に係る「空气中濃度限度」、公衆の防護に係る「排気中又は空气中の濃度限度」及び「排液中又は排水中の濃度限度」が定められている。「告示：RIの数量等を定める件」の別表第2では、各放射性同位元素に与えられている基準値の基礎とした1990年勧告に準拠する実効線量係数が示されている。そのため、将来的に国内規制へ2007年勧告を取り入れた場合、同勧告に準拠する新しい実効線量係数に従い、空气中濃度限度等の基準値も見直されることになる。また、各事業所の作業者等の内部被ばく線量も同勧告に従い評価され、被ばく管理が遂行されることとなる。

他の動向として、規制委員会は、IAEAのIRRSの勧告を踏まえ、放射線防護に関する取り組みも強化した。その中で、放射線・規制管理の分野の安全研究を推進する方針が平成28年7月に示され[5]、平成29年度に放射線安全規制研究戦略的推進事業費が創設された[6]。平成29年4月に同事業の公募があり、規制委員会が進める規制活動のニーズ、国内外の動向等の動向を踏まえて、5つの重点テーマが提示された[7]。その一つとして、「内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究」があり、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」とする。）が平成29年度からの4か年で実施する研究計画を提案し、これが採択された[8]。本報告書は、原子力機構が放射線安全規制研究戦略的推進事業費として進めている「内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究」について、平成31/令和元年度における事業の成果等を取りまとめたものである。

第2章 平成 31/令和元年度の研究計画

2.1 全体計画

平成 29 年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業費の公募では、重点テーマ「内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究」の中で、2つの成果活用方針が示されていた[7]。

- ・国内規制への実効線量係数取入れに活用
- ・平常時または事故時の放射線防護における内部被ばく評価手法として活用

そこで、以下に示す機能を有する内部被ばく線量評価コードを開発することとした。

- ① 線量係数を計算する機能（以下、「線量係数計算機能」とする。）
 - ・順次公開される線量評価モデルやデータを逐次実装することを可能とする設計
 - ・ICRP が提示する実効線量係数等が 2007 年勧告に従う線量評価モデルやデータに従い導出されることを検証
- ② 核種摂取量を推定する機能（以下、「核種摂取量推定機能」とする。）
 - ・モニタリング結果から、摂取条件や核種、経過時間等を考慮し、核種摂取量を推定、内部被ばく線量を評価
- ③ ユーザーの操作性や利便性を鑑みた機能
 - ・線量評価用パラメータや核種の摂取条件、モニタリングの測定値等を入力するグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）画面
 - ・線量係数の評価値、核種の摂取量等を取りまとめた数表、体内や排泄物中の放射性核種の時間推移を表すグラフ

コード開発に関する研究については、下記の内部被ばく線量評価に係るコードの開発をはじめとして、原子力機構で蓄積してきた知見や技術等を活用して、進めることとした。

- ・1990 年勧告の国内規制への取入れの際、科学技術庁の委託調査により、当時の日本原子力研究所（以下、「原研」とする。）が開発した INDES/IDEC（INternal Dose Estimation System/Internal Dose Easy Calculation code）[9]
- ・文部科学省及び原子力規制庁の委託事業により開発してきた 2007 年勧告に従うモデル・データに準拠した内部被ばく線量計算コード[10-15]
- ・確率論的事故影響評価コード（レベル 3PRA）への実装を目的としたもので、内部被ばく線量係数を計算する DSYS (Dose SYStem)[16]及びこれを慢性被ばくに対応させた DSYS-Chronic[17]
- ・事故時における線量評価への適用を目的とした REIDAC（REtrospective Internal Dose Assessment Code）[18]

具体的な研究の進め方として、図 2-1 のロードマップに示すとおり、線量係数計算機能、核種摂取量推定機能、ユーザーの操作性や利便性を鑑みた機能を順次開発し、各機能を統合したコードを完成させる計画とした。

実施項目	平成29年度	平成30年度	平成31/令和元年度	令和2年度
1) 線量係数計算機能の開発	ICRP刊行物の調査	ICRPの線量評価モデルの調査		
	計算機能の開発及び検証	機能の設計		
	基本機能の完成 ▲	機能の完成 ▲		
2) 核種摂取量推定機能の開発	機能のニーズ調査	推定機能の開発	機能の検証	
	解析法検討・概念設計	基本機能の完成 ▲	機能の完成 ▲	
3) コードの開発等		パラメータ設定法の検討		試用意見収集・改良
			GUI等の開発 β版の完成 ▲	マニュアル整備等
				コード完成、公開 ▲

▲ マイルストーン(以下、「MS」とする。)

図 2-1 本研究のロードマップ (平成 29 年度～令和 2 年度、▲ : マイルストーン (MS))

2.2 これまでの進捗

2.2.1 平成 29 年度の進捗

平成 29 年度は、線量係数計算機能の開発として、平成 27 年度以降に公開された ICRP Publ. 133 [19]の比吸収割合 (SAF) データ、職業人の放射性核種摂取シリーズ (Occupational Intake of Radionuclide、以下「OIR」とする。) part 2 (ICRP Publ. 134) [20]で示された組織系動態モデル等の実装を進めた。その結果、同刊行物が掲載する主要 14 元素の実効線量係数を正確に導出することを検証して基本機能を完成させ、同年度の MS を達成した[21]。

核種摂取量推定機能については、既存の類似コードの分析、原子力機構でモニタリングに従事する者との意見交換によるニーズ調査等を進めた。これらの調査結果に基づき、計算フローを決定し、その際に入力項目を設定する GUI 画面のイメージを整理することで、完成形のイメージを提示した[21]。

2.2.2 平成 30 年度の進捗

平成 30 年度は、線量係数計算機能を今後も継続される ICRP からのモデルやデータの公開へ対応させるため、新規モデルやデータの取込みによる拡張が可能となるように設計した。他に、OIR part 3 (ICRP Publ. 137) [22]が提示したヨウ素、セシウム等の組織系動態モデルへ対応させる改良を進め、同刊行物が掲載するラドン以外の主要 13 元素の実効線量係数を正確に導出することを検証して同機能を完成させ、同年度における MS の一つを達成した。さらに、パラメータ等を GUI により設定する方法を検討した[23]。

核種摂取量推定機能については、単独摂取、慢性摂取及び複数回摂取の各摂取パターンに対し、摂取量推定で重要となるモニタリングデータのフィッティング方法等の基本機能を完成させることを目標とした。この開発では、平成 29 年度の研究評価委員会での指摘を受けて、原子力機構外の研究機関や大学で内部被ばくモニタリングや線量評価に従事する専門家との意見交換等を進め、ニーズを聴取した。これらの研究開発により、核種摂取量推定機能に関する同年度の MS を達成した[23]。

以上のとおり、平成 30 年度までの 2 か年で、図 2-1 に示すロードマップ中の MS を達成させ、ほぼ当初計画の通りに研究を進捗させてきた。

2.3 平成 31/令和元年度の研究計画

図 2-1 に示すロードマップに基づいて、平成 31/令和元年度の研究計画を立案し、核種摂取量推定機能の開発、コードの開発等を重点的に進めることとした。

2.3.1 核種摂取量推定機能の開発

放射性核種を摂取した場合、全身カウンタやバイオアッセイ法により得た体内あるいは排泄物中の放射性核種残留（排泄）量に基づいて、摂取した放射性核種の量（放射能）を推定し、内部被ばく線量を評価する。平成 30 年度までに、既存コードの調査や専門家との意見交換により聴取したニーズに基づいて、放射性核種の量を推定するための数値解析手法として、最尤推定法の活用を検討した[23]。この検討により、最尤推定法で測定値に対し摂取量を変化させた際の尤度を評価し、これが最大となった摂取量が与えられる測定値を最適と判断して摂取量を推定することとした。また、実際の適用における課題を鑑みて、検出下限値という測定値に対して、下限値の半値として測定結果を取り扱う方法等を決定した。以上により、図 2-2 に示すフローでデータフィッティング等を行う基本機能を開発した[23]。

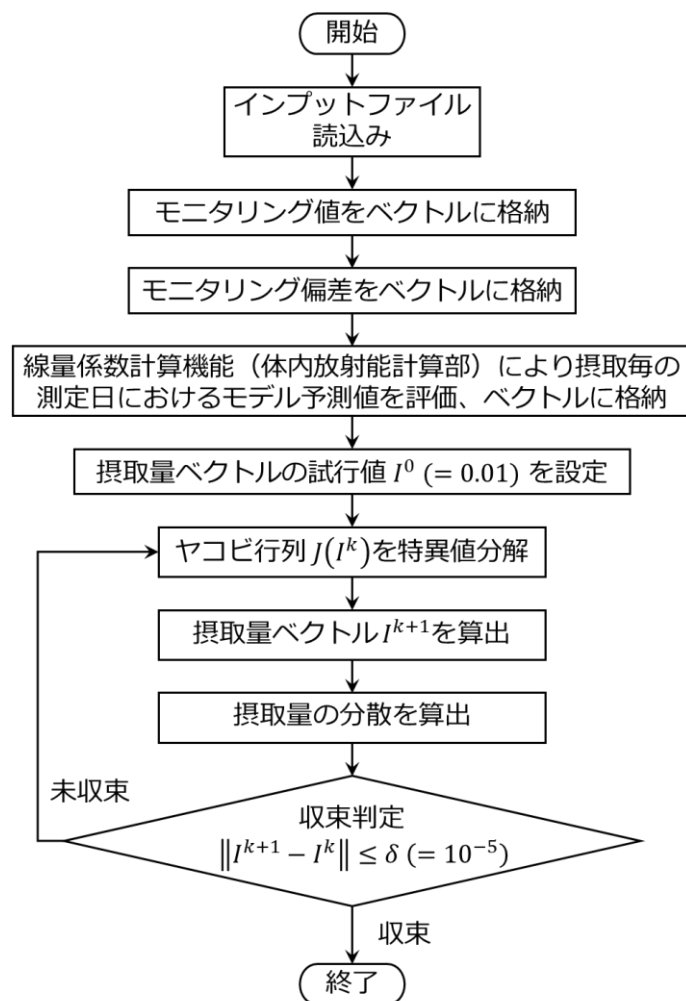


図 2-2 核種摂取量推定機能の基本機能の処理フロー[23]

平成 31/令和元年度は、開発した基本機能について、摂取パターン（摂取回数や経路）、モニタリング値の種類等を変えた条件で、核種摂取量や被ばく線量等を計算し、その信頼性を検証する。この検証では、欧州線量評価委員会（EURADOS）の内部被ばく線量評価ガイドライン（IDEAS ガイドライン）[24]や IAEA が与える例題[25]等を活用し、当該機能の計算結果を他のコードによる計算結果と比較する。これにより、計算結果の妥当性を確認し、当該機能の完成を目標とする。また、国内で内部被ばくモニタリングや線量評価に携わる専門家との意見交換により聴取したニーズ等に基づいて、当該機能の入力設定に用いる GUI の設計を進める。

2.3.2 コードの開発

(1) 利便性や操作性の向上を図る機能の開発

ユーザーが対話形式で計算条件を設定するための機能として、GUI を開発する。具体的には、線量係数計算機能の利用においては、日本人パラメータ、1990 年勧告に準拠した線量評価モデルやデータ等も任意に設定可能とさせ、計算結果を再検証することを想定して、設定条件を保存する機能を持たせる。一方、計算結果の出力として、線量データを取りまとめた数表の他、体内放射能の経時変化を示すグラフ等を表示する機能を開発する。特に、核種摂取量推定機能については、計算の途中経過の出力、時間経過と累積被ばく線量の関係図等、結果の説明に有用な出力を実装することも検討する。

(2) コードβ版の開発

コードの基本となる線量係数計算機能、核種摂取量推定機能及び(1)で開発した機能を統合させてコードβ版を開発し、その完成を今年度の MS とする。ここで、線量係数計算機能について、1990 年勧告に準拠した線量係数の計算に対応したアルゴリズム等の検証も行う。

2.3.3 関係する情報の収集

開発するコードの主要な活用策として、「告示：RI の数量等を定める件」[4]に掲載されている内部被ばく防護基準値の改正に当たり、ICRP の新しい実効線量係数の正確な導出の検証がある。一方、平成 30 年度末（平成 31 年 3 月）の段階では、ICRP からは作業者による主要 28 元素（トリチウム、ヨウ素、セシウム、ウラン等）の摂取に対してのみ、2007 年準拠に準拠する実効線量係数等が公開されていた[20,22]。そこで、ICRP による内部被ばく線量評価に関係する組織系動態モデルや実効線量係数等の検討状況について、今年度も引き続き情報を収集する。

なお、事業の進捗については、規制庁が任命するプログラムオフィサー（PO）及び PO 補佐に対し、PO 会合 及び電子メールで報告するとともに、必要な助言を仰ぐこととした。

第3章 核種摂取量推定機能の開発

3.1 目的及び実施計画

平成 31/令和元年度は、核種摂取量推定機能を完成させることを MS とし、平成 30 年度に開発した核種摂取量推定機能[23]の検証を実施する計画とした。この検証にあたっては、IDEAS ガイドライン[24]や IAEA 安全レポート[25]等に掲載されている放射性核種の取込み事例を調査し、様々な摂取パターンやモニタリング条件に対し、本機能による摂取量推定値の妥当性を検証できる例題をいくつか抽出した。以下、例題の抽出、検証方法や各例題に対する検証結果等を報告する。

3.2 検証方法

放射性核種の取込みに対し、モニタリング値と摂取量推定値が報告されている事例を調査し、基本機能の検証に用いることとした。事例からの例題の抽出にあたっては、本機能が持つ以下の特徴について検証できるように配慮した。

- ・モニタリング値の不確かさ (SF*) を考慮可能
- ・摂取回数よりモニタリング回数が少ない場合も評価可能
- ・複数のモニタリング手法による測定値を同時に考慮可能
- ・検出下限値以下という結果を考慮可能

*Scattering Factor。モニタリング手法に起因する全体的な不確かさが対数正規分布を持つと仮定したときの幾何標準偏差。

抽出した事例の摂取条件や特徴等を表 3-1 に示す。事例①～③は、IDEAS ガイドライン[24]に掲載された例題である。いずれの事例も、モニタリング値に対して手法に起因する SF が与えられている。また、摂取の経路や回数、モニタリングの方法や回数、核種が互いに異なっている。事例④は、IAEA 安全レポート[25]に掲載された例題であり、摂取回数よりモニタリング回数が少ないという特徴を持ち、抽出した事例の中で唯一 SF が与えられていない。事例⑤は、ICRP 1990 年勧告[2]に対応した摂取量推定機能を持つ内部被ばく線量評価コード IMBA [26]の例題であり、検出下限値以下となった測定結果を考慮した事例である。事例⑥は、近年に公開された摂取量推定・線量評価の国際相互比較演習 (ICIDOSE 2017) [27]の例題のひとつで、2007 年勧告に対応した新しい動態モデル[20, 28]を用いた唯一の事例であり、モニタリング値には SF も与えられている。なお、事例①～⑤は、いずれも 1990 年勧告に対応した体内動態モデル[29–32]に基づく解析となっている。

本機能は、内部被ばく線量評価コードが備える線量係数計算機能のうち体内放射能計算に係る部分を利用しており、基本機能の開発段階では 2007 年勧告に準拠する体内動態モデル及びデータのみを実装していた。そこで、1990 年勧告に基づく摂取量推定事例 (事例①～⑤) を用いて本機能の検証を行うため、1990 年勧告に準拠する体内動態モデル及びデータを本機能に実装した。この 1990 年勧告に準拠するモデル及びデータの実装については、4.4 節において詳細に説明する。

表 3-1 検証に用いた取込み事例の摂取・モニタリング条件

No.	核種	経路	化学形等	摂取回数	モニタリング		特徴	出典
					方法	回数		
①	¹³⁷ Cs	経口	CsCl	2	全身	7	・SF を考慮	[24]
②	¹²⁵ I	吸入	I ₂ ガス	3	甲状腺	5	・SF を考慮	[24]
③	²³⁵ U	吸入	U ₃ O ₈	1	肺+尿	10	・複数のモニタリング手法 ・SF を考慮	[24]
④	¹³¹ I	吸入	Type F	3	甲状腺	2	・摂取回数よりモニタリング回数が少ない	[25]
⑤	²³⁸ Pu	吸入	PuO ₂	1	尿	48	・検出下限値以下を考慮 ・SF を考慮	[26]
⑥	⁶⁰ Co	吸入	Type S	1	全身+尿	5	・新動態モデルによる評価 ・SF を考慮	[27]

3.3 検証結果

3.3.1 事例①：¹³⁷Cs の経口摂取

本事例は、作業者が CsCl（液体）を 2 回経口摂取し、全身カウンタによるモニタリングを 7 回実施したものである。また、2 回目の摂取は、1 回目の摂取の 38 日後であった。表 3-2 に、最初の摂取からの経過時間、モニタリング値（測定値）及び SF を示す。これらのデータを入力値とし、本機能により摂取量を推定した。

本機能による摂取量推定値と文献値の比較を表 3-3 に示す。本機能による摂取量推定値は、文献値[24]に対して約 1%の相対差があった。この原因は、IDEAS ガイドラインの評価手順に

表 3-2 事例①の全身モニタリング結果

摂取後経過時間 (d)	測定値 (Bq)	SF
1	8.8E+04	1.2
8	6.0E+04	1.2
17	9.3E+04	1.2
30	8.3E+04	1.2
46	4.8E+05	1.2
50	4.6E+05	1.2
60	4.4E+05	1.2

表 3-3 事例①の摂取量推定値

摂取時期 (d)	本機能 (Bq)	文献値*1 (Bq)	中間評価値*2 (Bq)
1 回目：0	9.496E+04	9.399E+04	9.495E+04
2 回目：38	4.846E+05	4.791E+05	4.844E+05

*1IDEAS ガイドラインにおける最終評価値。

*2IDEAS ガイドラインにおける中間評価値。

よるものと推定された。

IDEAS ガイドラインでは、放射性核種の取込み事例が発生した場合の摂取量推定・被ばく線量評価について、採用すべき線量評価方法を決める判断基準を定めている[24]。図 3-1 に、IDEAS ガイドラインにおける線量評価方法の判断フローを示す。なお、本フローは、同じく IDEAS ガイドラインに掲載されている事例②及び事例③でも適用される。

本フローでは、最初にモニタリング値をあらかじめ定められた基準値と比較し、その値以下である場合は線量評価の必要がないとして処理される。モニタリング値が基準値を超えている場合は、簡易評価による実効線量が 1 mSv 以下であれば、1 mSv 以下の被ばくとして記録される。この簡易評価とは、摂取直後の 1 回のモニタリング値と理想条件における放射能推移データ (ICRP Publ. 78 [33]のデータ等) から単純な比例計算により得られた摂取量推定値に対し、ICRP が定める標準条件 (消化管での吸収割合 (f_A 値)、吸入摂取の場合の放射性エアロゾルの空気力学的放射能中央径 (AMAD) 等) における線量係数を乗じて行う線量評価である。一方、簡易評価による値が 1 mSv を超えている場合は、十分な数のモニタリング値を取得して、これらを同時に考慮した最尤推定を行う。また、必要に応じてモニタリング値をよく再現するように f_A 値や AMAD 等の被ばく条件を調整する。さらに、ここで得られた摂取量推定値に基づく実効線量が 6 mSv を超えた場合は、体内動態モデル・データの調整等、より高度な解析を行うこととなっている。

本事例は、IDEAS ガイドラインの判断基準によると、1 回目、2 回目ともに簡易評価値が 1 mSv を超えており、全てのモニタリング値を考慮した解析を行うため、開発した摂取量推定機能は IDEAS ガイドラインと同様の評価手順であった。その結果、表 3-3 に示すように、本機能による摂取量推定値は、IDEAS ガイドラインにおける中間評価値とほぼ同じ数値となった。本機能は、体内動態モデルを基にした連立常微分方程式を数値的に解くことにより放射能推移を評価しており、IDEAS ガイドラインにおいても同様の方法を採用していると推定される。しかしながら、IDEAS ガイドラインでは、最終的な評価値として、IMBA による推定値を採用していた。IMBA は、あらかじめ用意された指数関数の組合せで体内放射能推移

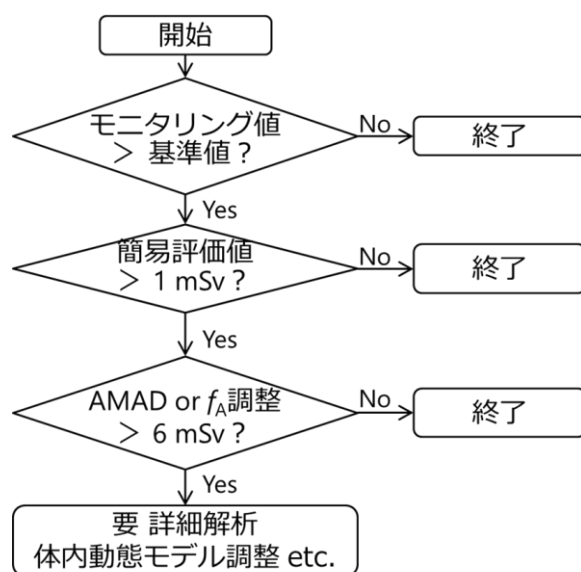


図 3-1 IDEAS ガイドラインにおける線量評価方法の判断フロー

を簡易的に評価している。そのため、本機能による推定値と文献値（最終評価値）に差が生じたと考えられる。ただし、上記のように、本機能による摂取量推定値は IDEAS ガイドラインの中間評価値とほぼ一致しており、開発した機能は複数回の経口摂取、十分なモニタリングデータが得られている事例に対し、信頼性のある評価を実行できることが確認された。

3.3.2 事例②：¹²⁵I の吸入摂取

本事例は、作業者がヨウ素ガスを 3 回吸入摂取し、甲状腺モニタにより 5 回モニタリングしたものである。ここで、2 回目及び 3 回目の摂取は、1 回目の摂取のそれぞれ 188 日後及び 281 日後であった。表 3-4 に、最初の摂取からの経過時間、測定値及び SF を示す。これらのデータを入力値とし、本機能により摂取量を推定した。

本機能による摂取量推定値と文献値の比較を表 3-5 に示す。本機能による摂取量推定値（表 3-5 の本機能 1）の文献値[24]に対する相対差は、1 回目、2 回目及び 3 回目の摂取について、それぞれ 3.5%、0.3%及び 32%であった。この差は、IDEAS ガイドラインに基づく評価手順と本機能の評価手順の違いに起因するものであった。

本事例の 3 回の摂取に対する簡易評価値は、全て 1 mSv 以下であった。したがって、図 3-1 に示す判断フローのとおり、IDEAS ガイドラインでは摂取直後のモニタリング値のみで摂取量が評価されることとなる。これに対し、本機能では、全てのモニタリング値を同時に考慮している。また、2 回目の摂取と 3 回目の摂取の間にはモニタリング値が 1 個しかないため、2 回目の摂取に対する本機能による評価値と文献値はほぼ一致したが、1 回目と 3 回目の摂取については評価値に差が生じた。そこで、IDEAS ガイドラインと同様の手順となるよう、本機能を逐次適用して摂取量を推定すると、表 3-5 の本機能 2 に示す値を得た。その結果、本機能による評価値と文献値の相対差は全て 1%未満となり、よい一致を示した。以上より、複数回のヨウ素の吸入摂取について経時的な甲状腺モニタリングの結果が得られている事例に対し、開発した機能は妥当な評価結果を与えることが確認された。

表 3-4 事例②の甲状腺モニタリング結果

摂取後経過時間 (d)	測定値 (Bq)	SF
44	4.41E+03	1.26
140	8.30E+02	1.27
237	7.51E+03	1.26
326	5.78E+03	1.26
411	1.90E+03	1.27

表 3-5 事例②の摂取量推定値

摂取時期 (d)	本機能 1*1 (Bq)	本機能 2*2 (Bq)	文献値 (Bq)
1 回目 : 0	3.868E+04	3.755E+04	3.737E+04
2 回目 : 188	6.847E+04	6.876E+04	6.824E+04
3 回目 : 281	4.830E+04	3.700E+04	3.664E+04

*1 全てのモニタリング値を考慮して推定した摂取量。

*2 摂取直後のモニタリング値のみ考慮して逐次推定した摂取量。

3.3.3 事例③：²³⁵U の吸入摂取

作業者が U₃O₈ (Type M) を 1 回吸入摂取し、肺モニタと尿バイオアッセイによって、表 3-6 のように 5 回ずつのモニタリング値が得られている事例である。本事例は、複数のモニタリング方法による測定値を同時に考慮するという特徴がある。一方、開発した機能は、複数のモニタリング方法による結果の入力や、SF の個別設定が可能な仕様となっているため、このような事例にも対応可能である。

検証の結果、表 3-7 に示すとおり、本機能による摂取量推定値は文献値[24]とよく一致した。そのため、専門家からのニーズとして提示されていた複数の種類のモニタリング値が得られている条件に対しても、開発した機能は要求に応える評価を行うことが確認できた。

表 3-6 事例③の肺及び尿モニタリング結果

(a) 肺モニタ			(b) 尿バイオアッセイ		
摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq)	SF	摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq/d)	SF
0.125	43	1.24	2	1.20	1.62
7	29	1.24	9	0.26	1.62
18	26	1.24	16	0.37	1.62
30	27	1.24	30	0.17	1.62
60	22	1.24	58	0.13	1.62

表 3-7 事例③の摂取量推定値

本機能 (Bq)	文献値 (Bq)
665	667

3.3.4 事例④：¹³¹Iの吸入摂取

本事例はIAEA安全レポート[25]で示されており、作業者が¹³¹Iエアロゾル（Type F）を3回吸入摂取し、甲状腺モニタによるモニタリング値が2個ある。甲状腺モニタリングの結果は、表3-8のように得られている。ここで、2回目及び3回目の摂取は、1回目の摂取からそれぞれ3日後及び4日後に発生しているが、モニタリング回数（2回）が摂取回数（3回）より少ないという特徴がある。

開発した機能は最尤推定法を採用しているが、この推定法では一般的にモニタリング回数が摂取回数以上であることが必要な条件となる。一方、ニーズ調査で本事例のような状況への適用に関するコメントがあった。そこで、本機能の開発においては、最尤推定を行う際に特異値分解という数学的手法を適用[34]することにより、モニタリング回数と摂取回数の大小関係とは無関係に摂取量を推定することを可能とさせた[23]。

本条件に対する本機能による推定値と文献値の比較を表3-9に示す。レポートでは、3回の摂取量が全て同じであると仮定して各回単位摂取時の摂取後5日目、6日目の甲状腺放射能予測値を算出し、2回のモニタリング値それぞれについて比例計算による評価値を算出（1回目：1455 kBq、2回目：1410 kBq）した。最終的には、これらの値の平均値を推定値としている。一方、本機能では、特異値分解を採用したことにより、文献値の全摂取量を適切に再現した。また、各回の摂取量について仮定を設けることなく、それぞれの摂取についてより適切と考えられる推定値が得られることを確認できた。

表 3-8 事例④の甲状腺モニタリング結果

モニタリング	摂取後経過時間 (d)	測定値 (kBq)
甲状腺	5	480
	6	440

表 3-9 事例④の摂取量推定値

摂取時期 (d)	本機能 (kBq)	文献値 (kBq)
1回目：0	1840	1433
2回目：3	1251	1433
3回目：4	1325	1433
Total	4416	4299

3.3.5 事例⑤：²³⁸Puの吸入摂取

IMBA コードに示されている事例[26]であり、作業者が²³⁸Puエアロゾルを1回吸入摂取し、尿バイオアッセイによるモニタリングを長期間（17年以上）に亘って48回行い、フォローしたものである。全ての尿モニタリング値を表3-10に示すが、最初の4回は検出下限値（0.004 Bq/d）以下であった。本事例は、検出下限値以下という結果を摂取量推定で考慮しているという特徴がある。

開発した機能は、米国環境保護庁のデータ処理に係るガイダンス[35]に基づき、検出下限値以下というモニタリング結果は、検出下限値の半値であったとして摂取量推定に反映する[24]。IMBAも同様の手法を採用しており、表3-11に示すとおり、本機能による摂取量推定値は文献値とよく一致した。プルトニウムを摂取した際の尿バイオアッセイでは、検出下限値以下のモニタリング結果が得られることも想定されるが、このような状況に対しても、開発した機能は摂取量を適切に推定できることが確認された。

表 3-10 事例⑤の尿モニタリング結果

摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq/d)	SF	摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq/d)	SF
2	—*	1.8	1293	0.210	1.8
3	—*	1.8	1481	0.430	1.8
4	—*	1.8	1668	0.410	1.8
76	—*	1.8	1847	0.440	1.8
123	0.160	1.8	2027	0.350	1.8
150	0.070	1.8	2123	0.160	1.8
186	0.070	1.8	2212	0.210	1.8
209	0.100	1.8	2212	0.160	1.8
264	0.160	1.8	2575	0.220	1.8
283	0.180	1.8	2689	0.280	1.8
293	0.200	1.8	2881	0.120	1.8
328	0.310	1.8	3100	0.280	1.8
359	0.230	1.8	3244	0.290	1.8
387	0.260	1.8	3446	0.270	1.8
415	0.200	1.8	3612	0.270	1.8
506	0.370	1.8	3805	0.270	1.8
593	0.230	1.8	3988	0.200	1.8
685	0.240	1.8	4329	0.180	1.8
776	0.240	1.8	4701	0.450	1.8
870	0.330	1.8	4831	0.210	1.8
964	0.310	1.8	5192	0.360	1.8
1048	0.350	1.8	5560	0.270	1.8
1143	0.370	1.8	5924	0.330	1.8
1231	0.580	1.8	6294	0.230	1.8

*検出下限値以下

表 3-11 事例⑤の摂取量推定値

本機能 (Bq)	文献値 (Bq)
1.27E+06	1.27E+06

3.3.6 事例⑥：⁶⁰Co の吸入摂取

本事例は、2017年に実施された ICIDOSE 2017 [27]に含まれるもので、作業者が⁶⁰Coエアロゾルを1回吸入摂取し、全身カウンタにより3回、尿バイオアッセイにより1回モニタリングした事例である。表 3-12 に、全身カウンタ及び尿バイオアッセイによるモニタリング値を示す。この事例は、OIR シリーズにより公開された新しい体内動態モデルを用いて、2007年勧告に準拠した摂取量推定値が報告されているという特徴がある[27]。

表 3-13 に示すとおり、本機能による摂取量推定値は文献値とよく一致した。そのため、適切なモニタリングが実施された事例に対し、開発した機能は十分な信頼性を以て最新の体内動態モデルに基づく核種の摂取量を推定することが可能である。そのため、本研究開発の目標としている2007年勧告に準拠した内部被ばく線量評価に対し、開発した機能を適用できることが確認された。

表 3-12 事例⑥の全身及び尿モニタリング結果

摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq)	SF	摂取後 経過時間 (d)	測定値 (Bq/d)	SF
1	18500	1.15	1	11.2	2.0
10	1875	1.15			
30	1470	1.15			

表 3-13 事例⑥の摂取量推定値

本機能 (Bq)	文献値 (Bq)
3.104E+04	3.103E+04

3.4 核種摂取量推定機能の開発のまとめ

今年度は、前年度までに開発した核種摂取量推定機能の基本機能の検証を実施し、本機能を完成させた。検証では、モニタリング値と摂取量推定値がセットで報告されている放射性核種の取込み事例を調査し、検証に適切な事例を抽出した。事例の抽出にあたっては、様々な摂取、モニタリング条件をカバーし、本機能が持つ特徴について検証ができるよう留意した。また、昨年度までの専門家との意見交換で聴取できたニーズも参照し、これらにも対応可能か否かを検証することも留意した。このような観点で抽出した 6 個の事例に対し、開発した核種摂取量推定機能を用いて摂取量推定を行い、文献値と比較することで本機能の妥当性を確認した。

本機能は、内部被ばく線量評価コードの線量係数計算機能のうち体内放射能計算に関する部分を利用しており、今年度当初は 2007 年勧告に対応した体内動態モデルのみを実装している状態であった。一方で、検証では、ひとつの事例（事例⑥）を除き、1990 年勧告に対応した体内動態モデルに基づく摂取量推定が行われていた。そこで、検証に先立ち、1990 年勧告に対応した体内動態モデルを実装した。検証の結果、1990 年勧告、2007 年勧告双方の体内動態モデルによる摂取量推定についても、本機能による評価値は十分に妥当であると判断した。以上の検証を以て、核種摂取量推定機能の開発は完了した。

第4章 コードの開発

4.1 目的及び実施計画

平成 31/令和元年度は、内部被ばく線量評価コードの β 版を完成させることを目的とし、以下の項目を実施することとした。

- ・利便性や操作性の向上を図る機能の開発
- ・コード β 版の開発

利便性や操作性の向上を図る機能の開発では、ユーザーが計算条件を設定する際に設定項目が分かりやすく表示され、必要に応じて変更等が容易に行える GUI を開発する。具体的には、線量係数計算機能の利用においては、2007 年勧告に対応したモデルやデータを日本人のデータや 1990 年勧告対応のものに変更したり、任意の動態モデルに修正したりすることを可能とする。また、得られた計算結果をテキストデータだけでなく、視覚的に確認できるよう図表で出力する機能を開発することとした。

コード β 版の開発では、内部被ばく線量評価コードの基本となる線量係数計算機能と核種摂取量推定機能を統合するとともに、ユーザーの利便性や操作性を向上させる機能を備えたコード β 版を開発し、その完成を今年度の MS とした。

4.2 コード操作 GUI の開発

開発した GUI による処理の流れを図 4-1 に示す。GUI を起動すると、既定の計算条件設定ファイルを読み込み、計算条件入力モードとなる。計算条件設定ファイルとは、GUI で設定可能な項目に関するデータ（例：使用するモデルやデータファイルのディレクトリ及びファイル名、核種、摂取経路等）を格納したファイルである。計算条件設定ファイルの読み込み後、計算条件設定ファイルに基づいて計算用データファイルが出力フォルダに作成され、GUI で計算条件が確認できるようにした。計算条件の変更は、GUI の各ボタンをクリックすると表示されるダイアログに従って行い、設定が完了すると計算実行・結果閲覧モードに移行する。このモードでは、まず S 係数（線源領域において核種が 1 回崩壊したときに標的臓器に与える等価線量）を計算し、続いて体内放射能と等価線量や実効線量の計算を行う。これらの計算結果は出力フォルダにテキストファイルで出力されるとともに、GUI 上で表やグラフによって閲覧できるようにした。本節では、上記のフローに沿って、開発した GUI の基本機能について記す。

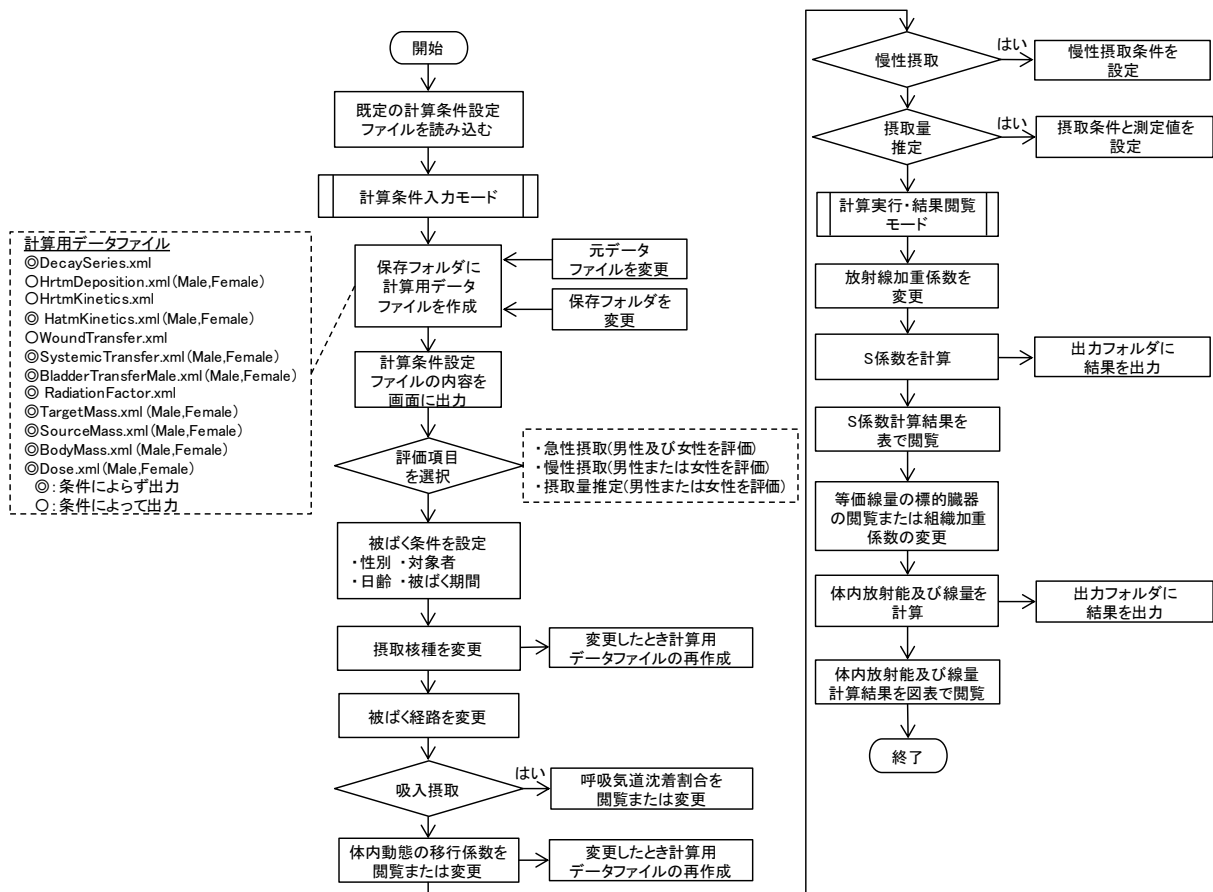


図 4-1 GUI の処理フロー

4.2.1 計算条件入力モード

(1) 計算条件設定ファイルの読み込み及び出力ファイルの設定

計算条件設定ファイルは、計算に用いる線量評価モデル・データのファイル名（ディレクトリを含む）を格納する構造としている[23]。GUI 起動時に読み込まれる既定の計算条件設定ファイル（./inp/input.xml）は、2007 年勧告に準拠した線量計算を行うためのデータを格納している。GUI 起動時の画面を図 4-2 に示す。計算条件設定ファイルは任意に変更可能とし、Input 枠の Change ボタン（図 4-2 ②）をクリックして表示されるダイアログにより実施することとした。このとき、指定している計算条件設定ファイルが確認できるよう、GUI にファイル名を表示することとした（図 4-2 ①）。ここで、1990 年勧告対応の線量評価モデル・データを用いた計算（4.4 節参照）は、対応する線量評価モデル・データファイル名を格納した計算条件設定ファイルをあらかじめ用意し、このファイルを指定することで実行できるようにした。

核種や摂取経路等を変更した際に、同一条件による再検証の利便性を高める機能として、Save ボタン（図 4-2 ③）をクリックすることにより計算条件を保存可能とした。

また、計算条件設定ファイルに基づいて作成される計算用データファイル及び計算結果を

含むテキストファイルについては、既定の保存フォルダに保存（出力）される。ここで、これらのファイルを任意のフォルダに出力可能とするため、Repository 枠に保存フォルダを変更するための Change ボタン（図 4-2 ⑤）を用意し、指定したディレクトリ及びファイル名を表示するようにした（図 4-2 ④）。

The screenshot shows the IDCC GUI with the following settings:

- Input:** File name: .inp\input.xml (1). Buttons: Change (2), Save (3).
- DataFile:** Button: Change.
- Repository:** File name: .work\out07 (4). Button: Change (5).
- Evaluation:** Dropdown: AcuteUnitIntake.
- Exposure:** Gender: male; SelectAge: Enter; Subject: worker; DayOld[d]: 7300.0; Period[d]: 18250.0.
- Intake:** Sr-82; Ingestion type: ingestion; Deposition: Deposition; ChemicalForm: AllOtherChemicalForms(Strontium); AlimentaryMaterial: total-diet; SystemicMaterial: none; Buttons: Biokinetics, ChronicIntake, IntakeEstimation.
- CalculationStage:** Button: CalculationStage.
- S-Coefficient:** Alpha: 20.0; Electron: 1.0; Photon: 1.0; Buttons: Calculate, View.
- InternalExposure:** Dose; Buttons: Calculate, View.

- ① 現在の計算条件設定ファイルが表示される。
- ② 計算条件設定ファイルを変更する。
- ③ 計算条件設定ファイルを保存する。
- ④ 出力ファイルの保存先が表示される。
- ⑤ 出力ファイルの保存先を変更する。

図 4-2 GUI 起動後の計算条件設定ファイルと出力ファイルの設定画面

(2) 評価項目の設定

評価項目の設定画面を図 4-3 に示す。評価項目は、急性摂取 (**AcuteUnitIntake**)、慢性摂取 (**ChronicIntake**) 及び摂取量推定 (**IntakeEstimation**) の 3 つの条件から選択可能とした。選択は、**Evaluation** 枠内のプルダウンメニューにより行う。

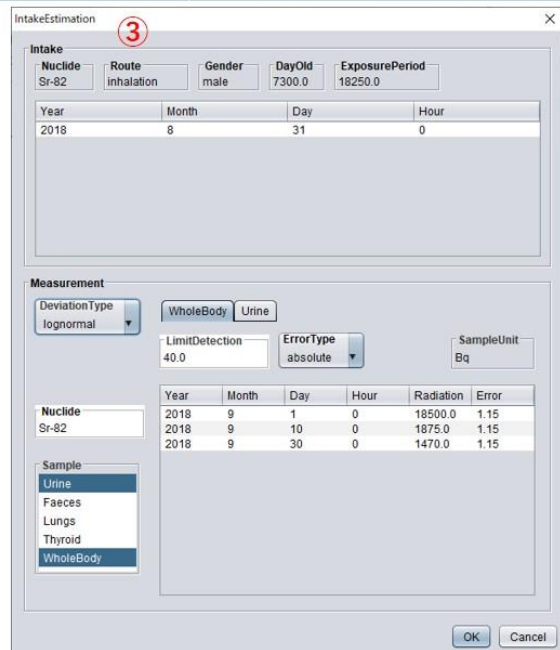
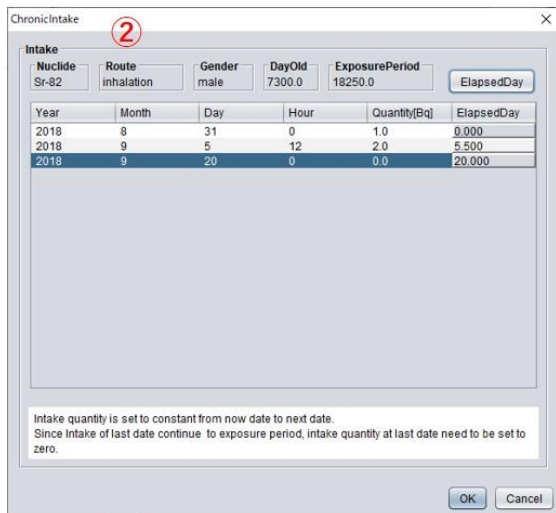
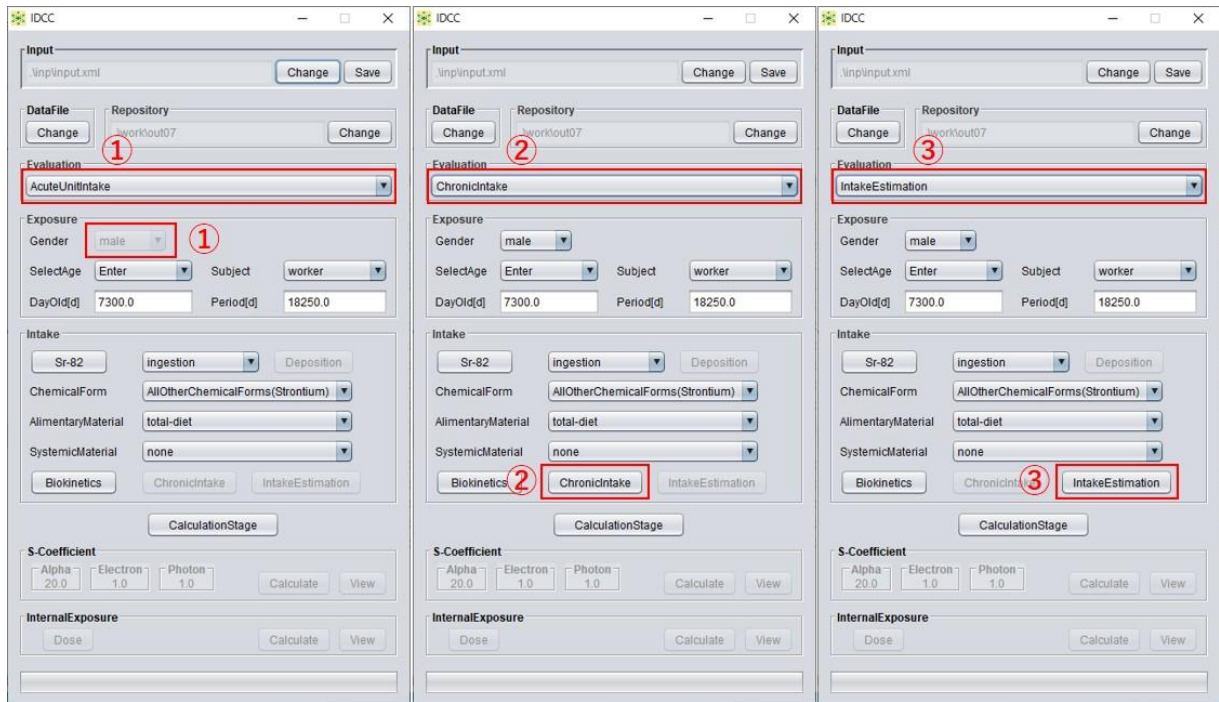
急性摂取は、2007 年勧告に準拠する実効線量係数等の導出で想定されている単独の摂取であり、ICRP の標準ファントムに基づく男女の等価線量係数及び男女平均した等価線量係数に基づく実効線量係数を計算する。

慢性摂取は、複数回の摂取または継続的な摂取が生じている状況を想定している。このような事例での評価には、摂取した時期 (年月日時)、各回の摂取量または摂取率に関する情報が必要となる。そこで、これらの情報を入力し、選択した性別で線量評価を行うこととした。その際、これらの情報の入力、GUI のテーブルへの直接入力、または 5 列構成のテキストデータの貼付けで行えるようにした。

摂取量推定の場合、選択した性別における推定を行うようにした。この評価では、モニタリングデータ (測定方法、測定年月日時及び測定値) と摂取データ (摂取年月日時) の入力が必要になる (図 4-3 ③)。これらのデータは、GUI のテーブルへの直接入力、またはモニタリングデータについては 4 列、摂取データについては 6 列構成のテキストデータの貼付けによって入力できるように設定した。

(3) 被ばく条件の設定

被ばく条件を設定する画面として、図 4-4 に示すとおり、性別、対象者、年齢 (日齢) 及び被ばく期間について設定できる **Exposure** 枠を用意した。年齢については、**SelectAge** プルダウンメニュー (図 4-4 ②) からの選択に加え、日齢で任意に設定 (図 4-4 ④) することも可能とし、この場合は被ばく期間 (図 4-4 ⑤) も入力することとした。今後、公衆に対するデータを追加した場合は、**Subject** プルダウンメニュー (図 4-4 ③) より **worker** または **public** のいずれかを選択可能となる。



- ① AcuteUnitIntake の場合、性別が非表示となり自動的に男女の計算を行う。
- ② ChronicIntake の場合、性別の選択及び ChronicIntake ボタンのクリックが可能となる。
表示される ChronicIntake ダイアログから、摂取データを Intake 枠に入力する。
- ③ IntakeEstimation の場合、性別の選択及び IntakeEstimation ボタンのクリックが可能となる。
表示される IntakeEstimation ダイアログから、摂取データを Intake 枠に、測定データを Measurement 枠に入力する。

図 4-3 評価項目の設定とデータ入力画面

- ① 性別（男性または女性）を選択する。
- ② 対象年齢の項目を選択する。Enter の場合、日齢（④）及び被ばく期間（⑤）に任意の値を入力できる。その他の項目の場合、対応する日齢及び被ばく期間が設定される。
- ③ 被ばく対象者を選択する。
- ④ 日齢を入力する（②の SelectAge が Enter の場合に入力可）。
- ⑤ 被ばく期間を入力する（②の SelectAge が Enter の場合に入力可）。

図 4-4 被ばく条件の設定画面

(4) 摂取条件の設定

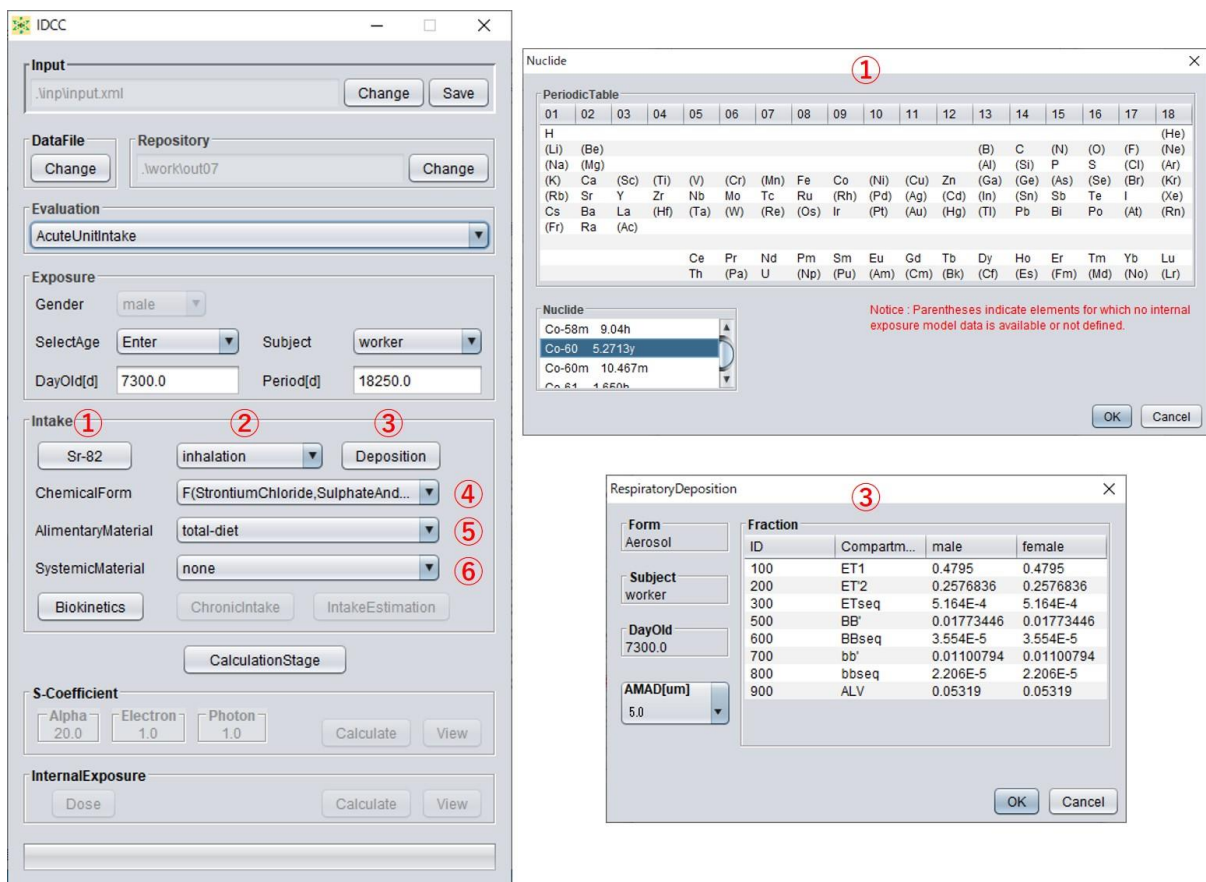
摂取条件を設定する画面として、図 4-5 に示す Intake 枠を用意した。ここでは、摂取核種、摂取経路、呼吸気道の沈着割合、摂取物質の性質、慢性摂取、摂取量推定及び体内動態の条件を設定する。

摂取核種の指定は、核種名表示ボタンをクリックし、表示される Nuclide ダイアログから任意の元素及び核種を選択して行うこととした。なお、周期表内の括弧は、操作時に組織系動態モデルのデータが実装されていない元素を表しており、選択不可としている。今後、これらの元素に対する組織系動態モデルが ICRP より公開された場合、移行係数データ等を実装

することで選択可能となり、図 4-5 ①の表から括弧が外れる。

摂取経路は、プルダウンメニューから吸入摂取 (inhalation)、経口摂取 (ingestion)、注入摂取 (injection) 及び創傷汚染 (wound) を選択可能とした。また、吸入摂取の場合に任意の呼吸気道沈着割合を設定できるよう、Deposition ボタンを用意した。

核種の体内動態を決定する因子となる化学形は ChemicalForm、消化管モデルにおける物質の種類は AlimentaryMaterial、組織系動態モデルは SystemicMaterial のプルダウンメニューから選択する方式とした。このうち、ChemicalForm プルダウンメニューの項目は選択した摂取経路により変化し、SystemicMaterial プルダウンメニューの項目は選択した摂取核種により変化することで、ICRP の示す線量評価モデルに適応した線量評価や摂取量推定が可能となる。



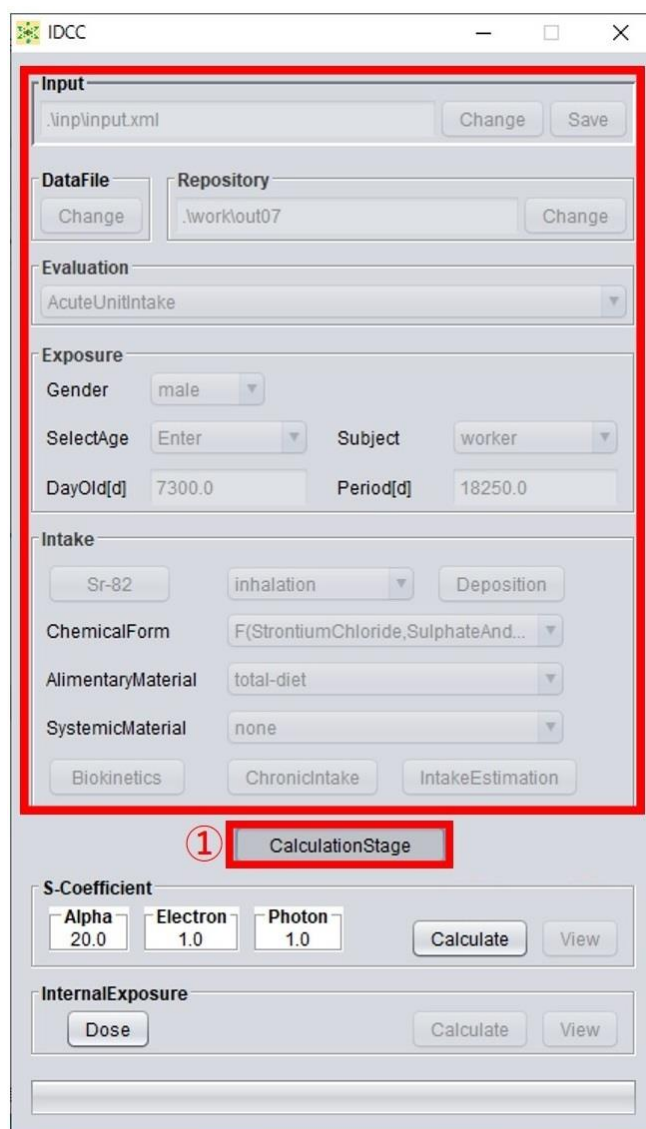
- ① 摂取核種を表示する。クリックすると現れる核種選択ダイアログから摂取核種を選択を行う。
- ② 摂取経路 (inhalation (吸入)、ingestion (経口)、injection (注入)、wound (創傷)) を選択する。
- ③ 摂取経路が inhalation の場合、呼吸気道沈着割合の変更が可能になる。
- ④ 摂取物質の化学形を選択する。
- ⑤ 消化管モデルにおける物質を選択する。
- ⑥ 組織系動態モデルにおける物質を選択する。

図 4-5 摂取条件の設定画面

4.2.2 計算実行・結果閲覧モード

開発した GUI では、入力した計算条件を確認しながらの計算の実行を可能とするため、条件設定及び計算実行に関する表示をひとつのウィンドウに収めている。一方、計算実行時に意図しない条件変更が行われてしまう可能性もある。そこで、計算条件入力モードと計算実行・閲覧モードを切り替えるための **CalculationStage** ボタンを図 4-6 のように用意した。このボタンを操作して計算実行・結果閲覧モードにすることで、条件設定に関する箇所は操作無効となり、S 係数及び線量の計算の実行と結果の閲覧を行える。また、再度ボタンをクリックすることで、計算条件入力モードに戻る。

以降、GUI を通じた計算実行及び計算結果の閲覧機能について記す。



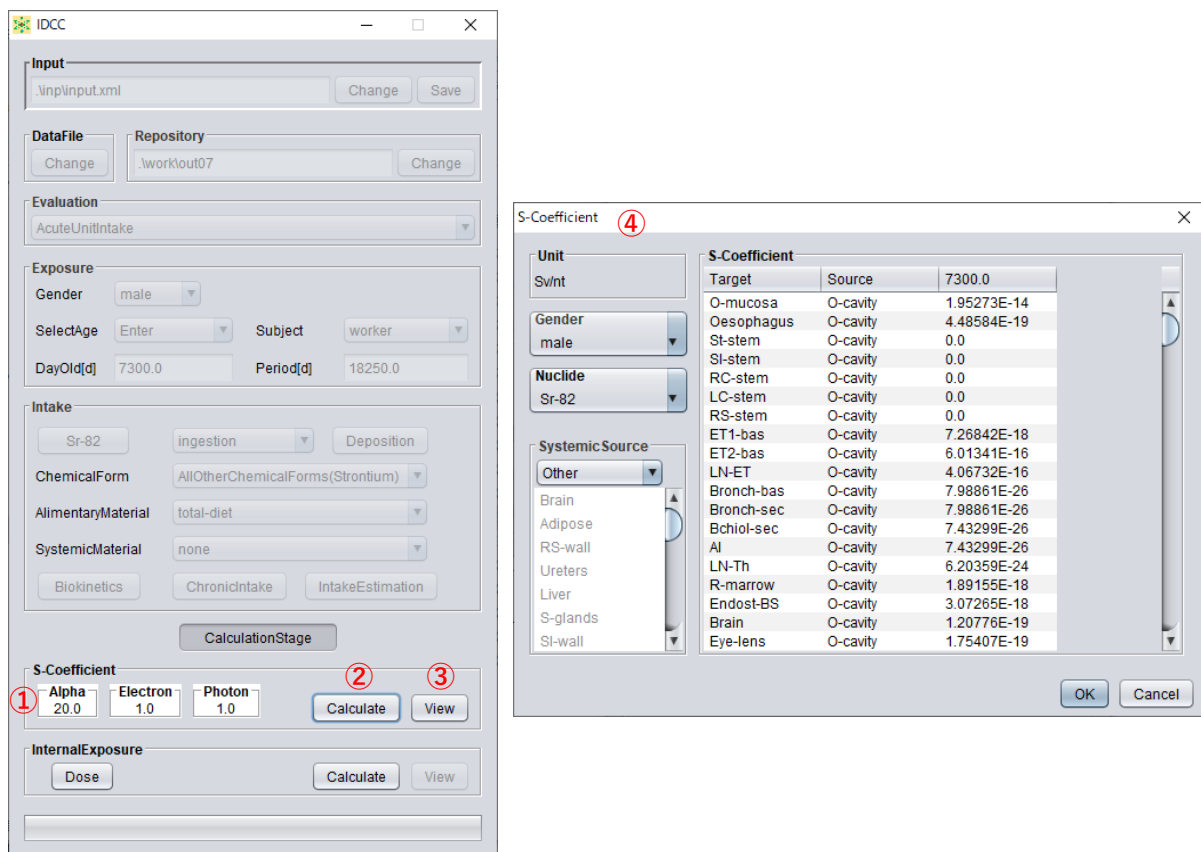
- ① **CalculationStage** ボタンのクリックにより計算条件が確定され、枠内の計算条件設定が操作不可になる。

図 4-6 計算条件入力モードと計算実行・結果閲覧モードの切替え画面

(1) S 係数計算の実行と結果閲覧

S 係数の計算実行及び計算結果閲覧画面を図 4-7 に示す。計算実行・結果閲覧モードの S-Coefficient 枠の Alpha、Electron 及び Photon ボックス (図 4-7 ①) は、それぞれ α 粒子、電子及び光子に対する放射線加重係数である。既定値は 2007 年勧告における値となっており、等価線量が計算される。ここで α 粒子に対する値を 1 にすると、吸収線量を評価することとなる。続いて Calculate ボタン (図 4-7 ②) をクリックすることにより、S 係数の計算を実行する。

S 係数の計算結果は、計算終了後にクリック可能となる View ボタン (図 4-7 ③) により結果閲覧ダイアログが表示され、数値を確認できるようにした。ダイアログには、性別と核種毎に、各日齢に対する S 係数計算結果と、Other 線源領域の構成要素が表示される (図 4-7 ④)。



- ① 放射線加重係数を設定する。
- ② S 係数の計算を実行する。
- ③ S 係数の計算終了後、View ボタンをクリックすると S 係数の結果閲覧ダイアログが表示される。
- ④ 結果閲覧ダイアログ。

図 4-7 S 係数の計算実行及び結果閲覧画面

(2) 線量計算の実行と結果閲覧

計算実行・結果閲覧モードの線量計算の実行について、図 4-8 に示すように、InternalExposure 枠に Dose、Calculate 及び View の 3 つのボタンを用意した。Dose ボタン (図 4-8 ①) は、組織加重係数を適用する組織・臓器とその値を編集するためのものである。さらに、組織加重係数を適用する組織・臓器を構成する標的臓器とその加重割合も編集可能とした。Calculate ボタン (図 4-8 ②) は S 係数の計算終了後にクリック可能となり、計算が実行される。このとき、体内放射能や排泄率も同時に計算される。

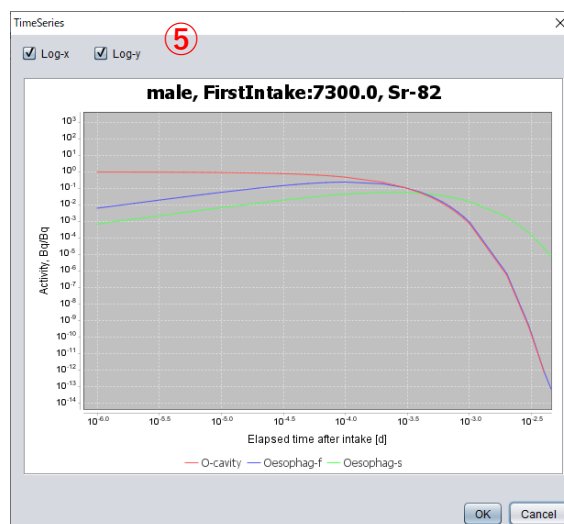
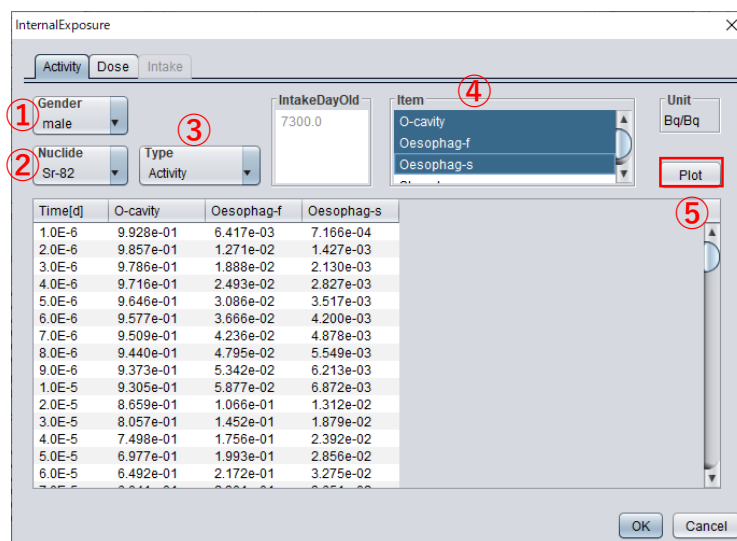
計算終了後にクリック可能となる View ボタン (図 4-8 ③) をクリックすると、計算結果閲覧ダイアログが表示される。ダイアログには Activity、Dose 及び Intake の 3 つのタブを用意し、それぞれのタブで計算結果を表やグラフで確認できるようにした。

The screenshot shows the IDCC software interface. At the top, there's a title bar with 'IDCC' and window controls. Below it, the 'Input' section has a text field with '.inp\input.xml' and 'Change' and 'Save' buttons. The 'DataFile' and 'Repository' sections each have a 'Change' button. The 'Evaluation' section has a dropdown menu showing 'AcuteUnitIntake'. The 'Exposure' section includes 'Gender' (male), 'SelectAge' (Enter), 'Subject' (worker), 'DayOld[d]' (7300.0), and 'Period[d]' (18250.0). The 'Intake' section has 'Sr-82', 'ingestion', 'Deposition', 'ChemicalForm' (AllOtherChemicalForms(Strontium)), 'AlimentaryMaterial' (total-diet), 'SystemicMaterial' (none), and buttons for 'Biokinetics', 'ChronicIntake', and 'IntakeEstimation'. Below this is a 'CalculationStage' button. The 'S-Coefficient' section has 'Alpha' (20.0), 'Electron' (1.0), 'Photon' (1.0), and 'Calculate' and 'View' buttons. The 'InternalExposure' section has 'Dose', 'Calculate', and 'View' buttons. Red circles with numbers 1, 2, and 3 are placed over the 'Dose', 'Calculate', and 'View' buttons respectively.

- ① 組織加重係数を編集する。クリックにより編集ダイアログが表示される。
- ② 体内放射能及び線量の計算を実行する。
- ③ 計算終了後、View ボタンをクリックすると計算結果閲覧ダイアログが表示される。

図 4-8 等価線量及び実効線量の計算実行画面

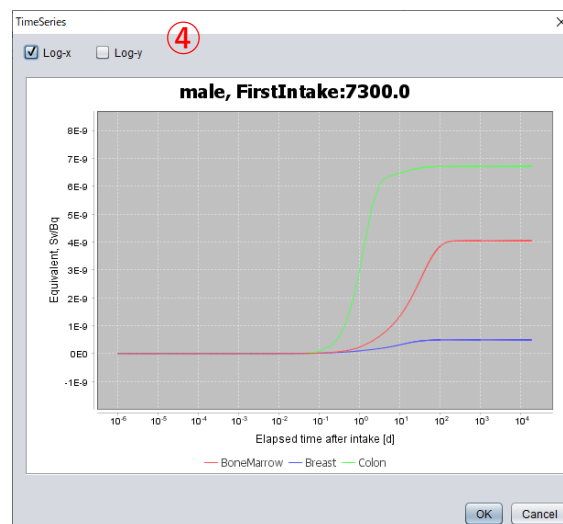
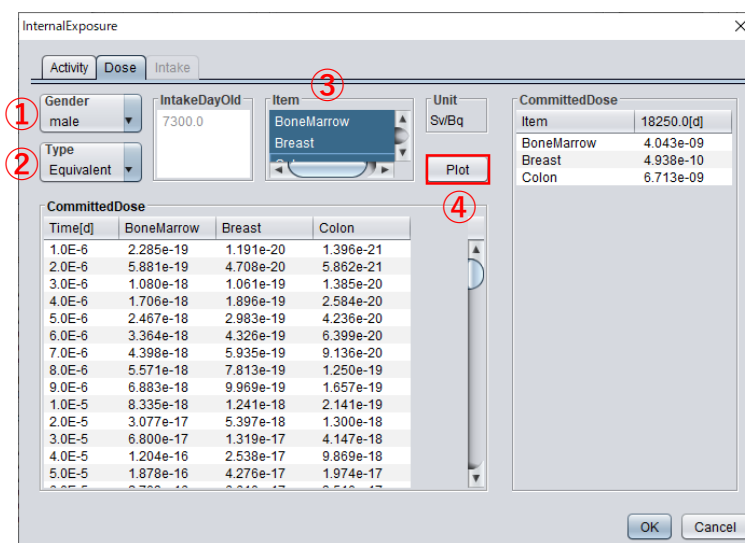
Activity タブでは、図 4-9 に示すように、計算条件入力モードで指定した摂取核種及びその系列核種について、組織系動態モデルで考慮されている組織・臓器毎の体内放射能または排泄率の推移を男女別に表で示す。男女の切替えは、タブ内の Gender プルダウンメニュー（図 4-9 ①）で行う。ただし、2007 年勧告に準拠した線量評価法は体内動態については男女共通としているため、現状では同じ結果が表示される。系列核種がある場合は、Nuclide プルダウンメニュー（図 4-9 ②）で表示する核種を選択できるようにした。また、Type プルダウンメニュー（図 4-9 ③）で Activity または ExcretionRate を指定することにより体内放射能と排泄率の表示切替えを行う。さらに、体内放射能と排泄率の経時変化を示すグラフが、Plot ボタンを押すことで表示されるようにした（図 4-9 ⑤）。



- ① 体内放射能または排泄率を表示する性別を選択する。
- ② 表示する核種を指定する。
- ③ 表示する内容 (Type) を体内放射能とするか排泄率とするかを選択する。
- ④ 選択した Type について、表示する項目を指定する。
- ⑤ 計算結果をプロットする。

図 4-9 計算結果閲覧ダイアログ：Activity タブ

Dose タブを選択すると、図 4-10 に示すように、計算条件入力モードで指定した摂取条件に対する等価線量及び実効線量の計算結果を表で確認できる。等価線量の計算結果は、Gender プルダウンメニュー (図 4-10 ①) で male または female を選択すると表示される。このとき、Type プルダウンメニュー (図 4-10 ②) において Equivalent を選択すると、組織加重係数が適用される組織・臓器毎の等価線量を表示する。ここで Target を選択すると SAF データの標的臓器毎の等価線量を確認することができ、より詳細な解析に利用できるようにした。実効線量の計算結果は、Gender プルダウンメニューで both を選択すると表示される。また、等価線量または実効線量の積算の様子をグラフで表示するための Plot ボタン (図 4-10 ④) を用意した。



- ① 表示する結果について、男性の等価線量、女性の等価線量または実効線量を指定する。
- ② 表示する等価線量について、組織加重係数適用組織または標的臓器単位を指定する。
- ③ 等価線量の経時変化を表示する組織・臓器または標的臓器を指定する。
- ④ 選択した項目について、等価線量または実効線量の経時変化をプロットする。

図 4-10 計算結果閲覧ダイアログ : Dose タブ

Intake タブは、計算条件入力モードの Evaluation 枠で IntakeEstimation を指定したときのみ選択可能である。図 4-11 に示すように、摂取量推定の結果を表示する。入力した測定データ (図 4-11 ①)、摂取量推定値 (図 4-11 ②)、放射能予測値 (図 4-11 ③) 及び線量 (図 4-11 ④) の 4 つを分類して表示するようにした。

InternalExposure

Activity Dose Intake

MeasurementUnit: Bq, Bq/d DeviationType: lognormal

Measurement ①

Item	Mesurem...	Deviation	LowBound
Co-60_W...	18500.0	1.15	40.0
Co-60_W...	1875.0	1.15	40.0
Co-60_W...	1470.0	1.15	40.0
Co-60_Uri...	11.2	2.0	0.0

Estimation ②

DayOld	Intake	Conf95%-L	Conf95%-U
7300.0	3.104e+04	1.336e+01	7.213e+07

ResidualSquare: 3.442e+05

Prediction ③

Item	Measurement	Prediction
Co-60_WholeB...	18500.0	19054.96
Co-60_WholeB...	1875.0	1712.137
Co-60_WholeB...	1470.0	1568.618
Co-60_Urine_...	11.2	10.24504

DoseUnit: Sv

Dose ④

Item	CommittedDose
BoneMarrow	4.472e-04
Breast	6.070e-04
Colon	1.930e-04
Lung	3.573e-03
Stomach	5.461e-04
Gonads	7.936e-06

OK Cancel

- ① 入力したモニタリングデータが表示される。
- ② 評価された摂取量推定値が表示される。
- ③ モニタリング値と、推定された摂取量に基づくモデル予測値の比較が表示される。
- ④ 評価された摂取量推定値に基づく線量評価値が表示される。

図 4-11 計算結果閲覧ダイアログ : Intake タブ

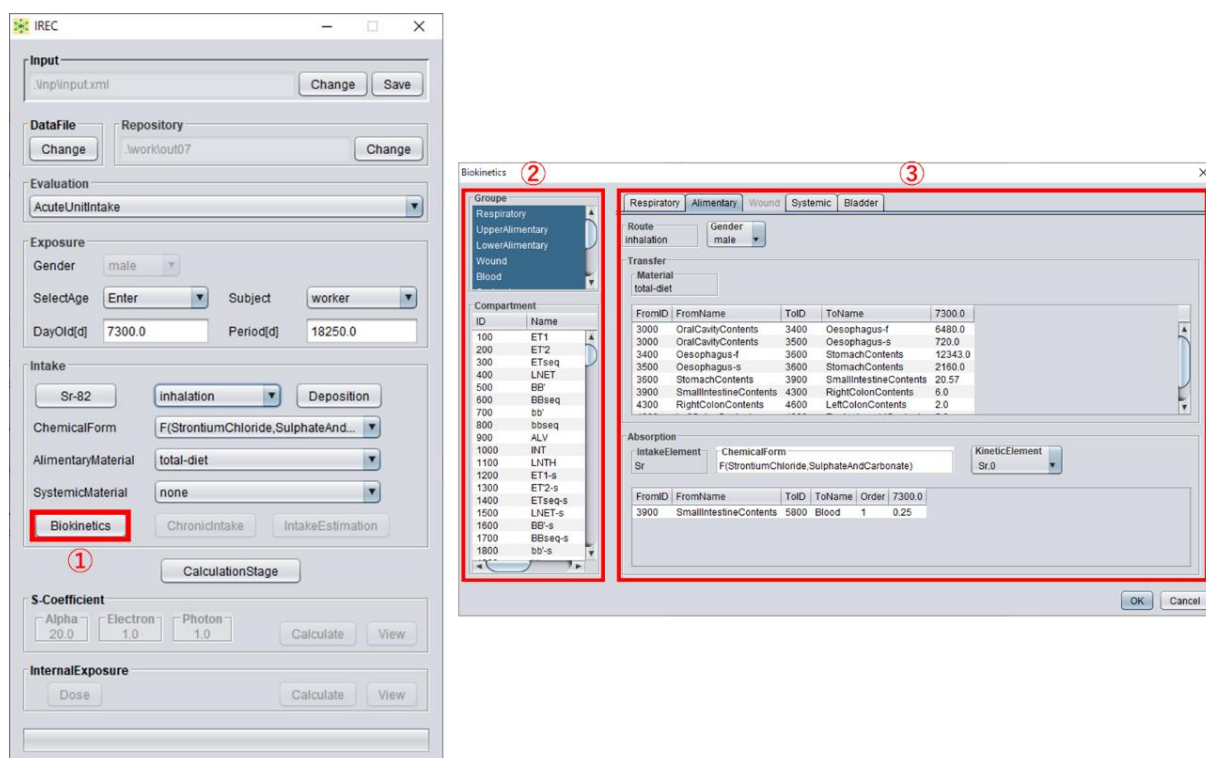
4.3 線量係数計算モデル及びデータの編集機能の開発

本事業では、2007 年勧告に準拠して実効線量係数等の検証及びモニタリング値に基づく摂取量推定の技術基盤を確保することを目的として、内部被ばく線量評価コードの開発を進めている。一方で、2007 年勧告に基づく新しい線量係数と従来の 1990 年勧告に基づく線量係数の差異の原因調査や、日本人に特有のパラメータ等を反映した線量評価は、2007 年勧告の国内における放射線規制への取入れの検討に有益な情報を与えると考えられる。そこで、本コードは、1990 年勧告対応のモデル・データも利用可能とし、日本人パラメータや任意の動態モデル等も設定可能な仕様とした[21, 23]。ここでは、1990 年勧告の動態モデルと 2007 年勧告の SAF データを組み合わせた線量係数の計算も可能とした。

以下、GUI による体内動態モデルの編集と、線量評価に使用するデータファイルの指定に関する機能について記す。

4.3.1 体内動態モデルの編集

図 4-12 に示す画面で、体内動態モデルの編集を可能とした。ここでは、体内動態モデルを閲覧及び編集するダイアログを表示するため、**Biokinetics** ボタンを用意している。この **Biokinetics** ボタンにより表示されるダイアログ (図 4-12 右) は、コンパートメントの一覧表と、**Respiratory** (呼吸気道モデル)、**Alimentary** (消化管モデル)、**Wound** (創傷モデル)、**Systemic** (組織系動態モデル) 及び **Bladder** (膀胱モデル) の 5 つの動態モデルを表示するタブから構成される。ここで、各タブにより、移行経路、移行係数、血液吸収割合等を任意に設定可能とした。



- ① **Biokinetics** ボタンをクリックすると、体内動態データの閲覧及び編集を行うダイアログを表示する (右図)。
- ② コンパートメントの **Group** (表示選択) 及び **Compartment** (ID と名前の一覧) を表示する。
- ③ 体内動態を **Respiratory** (呼吸気道モデル)、**Alimentary** (消化管モデル)、**Wound** (創傷モデル)、**Systemic** (組織系動態モデル) 及び **Bladder** (膀胱モデル) の 5 つのタブで表示する (表示と非表示は摂取経路の選択に依存)。全てのタブに **Transfer** 枠があり、移行経路と移行係数を設定できる。血液吸収が考慮される **Respiratory** と **Alimentary** タブには、それぞれの動態モデルに準拠する形式で **Absorption** 枠があり、血液吸収割合を設定できる。

図 4-12 体内動態モデルの編集画面

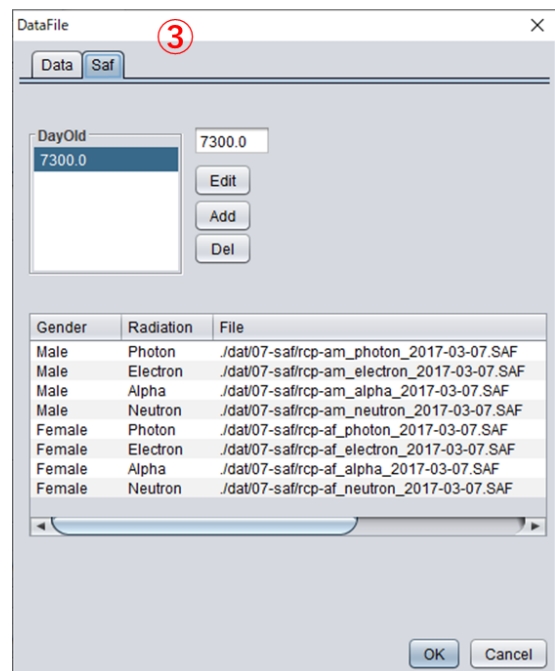
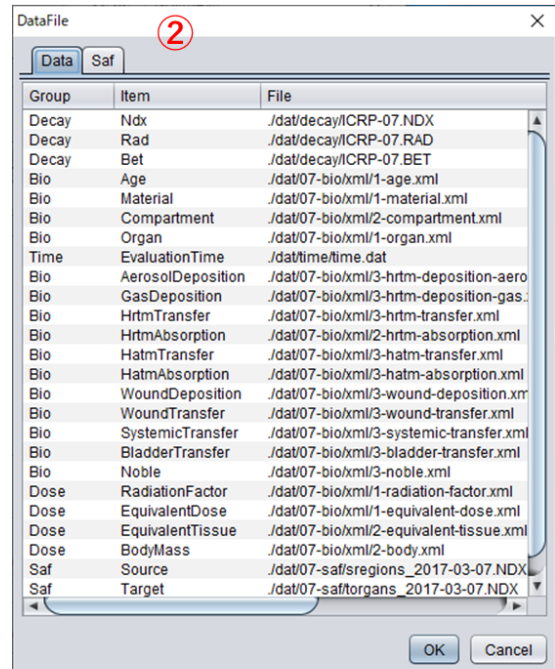
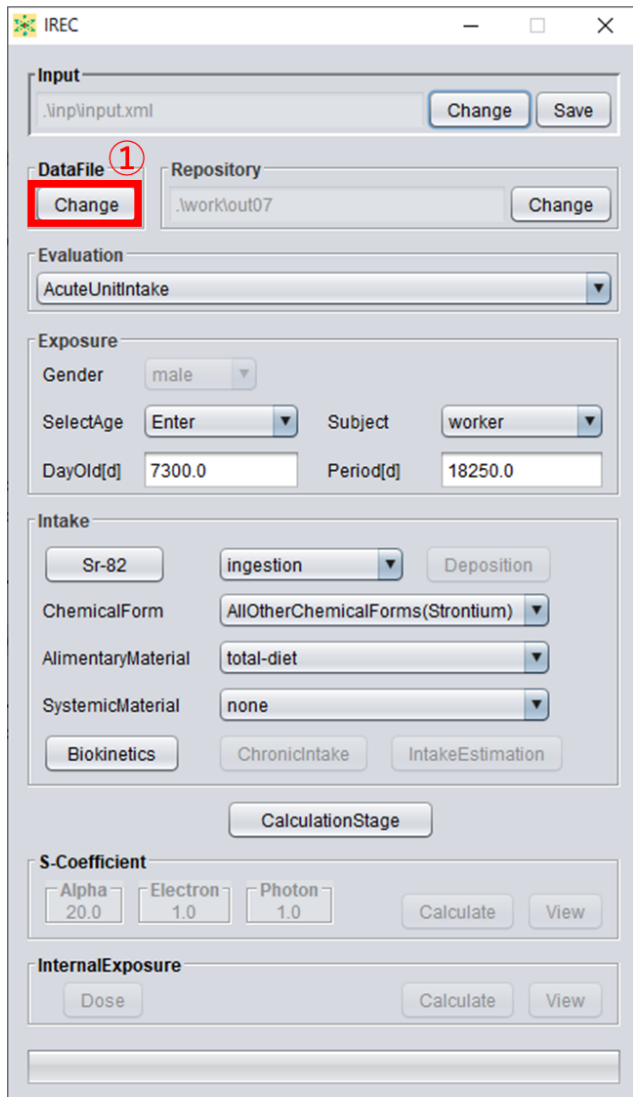
4.3.2 線量評価モデル及びデータの指定

平成 30 年度の事業において、開発するコードでは表 4-1 に示す形式に従ってデータを用意することとした。そこで、同様の形式でデータを設定することにより、任意の SAF や体内動態モデル等を利用可能とするための機能を開発した。

図 4-13 にデータファイルの変更画面を示す。計算に使用するデータファイルの変更は、Change ボタンをクリックすると表示される DataFile ダイアログから行う。このダイアログは Data タブと SAF タブから構成されており、Data タブでは核崩壊データ、体内動態、線量、臓器及び評価時間に関するデータファイル、SAF タブでは日齢、性別及び放射線に対する SAF のデータファイルについてそれぞれ表示し、変更を行うことができる。

表 4-1 データファイル一覧

データファイル	形式	概要
ICRP-07.NDX	定型 TEXT	ICRP Publ.107 の核崩壊データ (半減期、分岐比等)
ICRP-07.RAD	定型 TEXT	ICRP Publ.107 の核崩壊データ (放出率、エネルギー)
ICRP-07.BET	定型 TEXT	ICRP Publ.107 の核崩壊データ (β 線スペクトル)
sregions_2017-03-07.NDX	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (線源領域)
torgans_2017-03-07.NDX	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (標的領域)
rcp-am_photon_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人男の光子の SAF)
rcp-am_electron_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人男の電子の SAF)
rcp-am_alpha_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人男の α 粒子の SAF)
rcp-am_neutron_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人男の中性子の SAF)
rcp-af_photon_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人女の光子の SAF)
rcp-af_electron_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人女の電子の SAF)
rcp-af_alpha_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人女の α 粒子の SAF)
rcp-af_neutron_2017-03-07.SAF	定型 TEXT	ICRP Publ.133 の SAF データ (成人女の中性子の SAF)
1-age.xml	XML	年齢データ
1-equivalent-dose.xml	XML	等価線量データ
1-material.xml	XML	物質データ
1-organ.xml	XML	臓器データ
1-radiation-factor.xml	XML	放射線加重係数データ
2-body.xml	XML	体重データ
2-compartment.xml	XML	コンパートメントデータ
2-equivalent-tissue.xml	XML	等価線量を構成する標的組織・臓器データ
2-hrtm-absorption.xml	XML	呼吸気道の血液吸収データ
3-bladder-transfer.xml	XML	膀胱の移行係数データ
3-hatm-absorption.xml	XML	消化管の血液吸収データ
3-hatm-transfer.xml	XML	消化管の移行係数データ
3-hrtm-deposition-aerosol.xml	XML	呼吸気道のエアロゾルの沈着割合データ
3-hrtm-deposition-gas.xml	XML	呼吸気道のガス・蒸気状の沈着割合データ
3-hrtm-transfer.xml	XML	呼吸気道の移行係数データ
3-noble.xml	XML	呼吸気道と消化管の希ガスの移行係数データ
3-systemic-transfer.xml	XML	組織系動態モデルの移行係数データ
3-wound-deposition.xml	XML	創傷モデルの沈着コンパートメントデータ
3-wound-transfer.xml	XML	創傷モデルの移行係数データ
time.dat	CSV	経時変化計算の時間データ



- ① 計算に使用するデータファイルを変更する。クリックすると2タブ構成のDataFileダイアログが表示される。
- ② Dataタブでは核崩壊、体内動態、線量、標的線源臓器及び評価時間のデータファイルの表示・変更が可能である。
- ③ SAFタブでは日齢、性別及び放射線に対するSAFのデータファイルの表示・変更が可能である。

図 4-13 データファイルの変更画面

4.4 1990年勧告対応モデル及びデータの実装

本事業では、新旧の線量係数の差異の原因を調査すること等を目的として、1990年勧告に準拠した線量評価モデル及びデータを開発するコードに実装する計画としている。また、第3章に記した核種摂取量推定機能の検証において、候補となる例題の多くは1990年勧告に準拠したものであった。一方、開発するコードの計算アルゴリズムは2007年勧告に準拠する手法に基づいて設計されている。そこで、本コードを用いて、1990年勧告のモデルやデータに基づいて実効線量係数等を導出する方法を確立した。

以下に、線量係数計算における1990年勧告と2007年勧告の相違点と対応方法等について説明する。

4.4.1 線量係数計算に関する2007年勧告と1990年勧告の相違点

開発するコードが実装する2007年勧告に準拠した線量計算を行うためのアルゴリズムにより、1990年勧告の準拠するモデルやデータを用いて1990年勧告に従う線量計算を近似的ではあるが適切に実行する方法を検討した。実効線量の導出手順は、2007年勧告と1990年勧告でほぼ同様である一方で、線量評価モデル・データは多くの改訂があった。表4-2に、新旧それぞれの基本勧告で参照される線量評価モデル・データを示す。以下、昨年度抽出した新旧勧告間における線量評価モデル・データの相違点に対し、データの与え方等を検討した結果を記す。

表 4-2 データファイル一覧

データ・モデル	1990年勧告	2007年勧告
体重、組織・臓器質量	ICRP Publ. 23 [36], ORNL/TM-8381/V1 [37]	ICRP Publ. 89 [38]
放射線加重係数 w_R 、 組織加重係数 w_T	ICRP Publ. 60 [2]	ICRP Publ. 103 [3]
核崩壊データ 体内動態モデル	ICRP Publ. 38 [39]	ICRP Publ. 107 [40]
呼吸気道モデル	ICRP Publ. 66 [30]	ICRP Publ. 130 [28]
消化管モデル	ICRP Publ. 30 part 1 [29]	ICRP Publ. 100 [46]
組織系動態モデル	ICRP Publ. 30 parts 1-4, 56, 67, 69, 71 [29, 31, 32, 41-45]	ICRP Publ. 134, 137, 141 [20, 22, 47]
SAF データ	光子：ORNL/TM-12351 [48] 電子、 α 粒子等：ICRP Publ. 30 part 1, 66 [29, 30]	ICRP Publ. 133 [19]

(1) 体重、組織・臓器質量及び組織加重係数

2007年勧告において、個別の組織加重係数が適用される組織・臓器が追加されたため、データ数とその数値について変更があった。ただし、開発中のコードのデータ様式[23]は、1990年勧告に準拠した数値を年齢や組織・臓器名と正確に照合させたいうで、そのまま格納する

ことが可能である。

(2) 放射線加重係数

内部被ばくによる線量評価において考慮される放射線の種類は、光子、電子、 α 粒子（ α 壊変反跳核及び自発核分裂片を含む）及び中性子である。2007年勧告では中性子の放射線加重係数を決めるエネルギー依存の関数が新たに提案され[3]、中性子を放出する核種毎に、放出する中性子のエネルギースペクトルを考慮した平均の放射線加重係数が公開された[19]。2007年勧告に準拠した線量評価では、この平均化された係数を使用する。

1990年勧告における中性子の放射線加重係数[2]を、2007年勧告と同様のデータ形式で実装する場合は、放射線加重係数を計算するためのアルゴリズムが別途必要となるが、さしあたっては実装しないこととした。なお、第3章に記した核種摂取量推定機能の検証、及び4.4.2項で説明する1990年勧告に準拠したモデル・データを用いた線量係数計算では、中性子が線量へ寄与するケースは存在しなかった。

(3) 核崩壊データ

ICRP Publ. 38 [39]とICRP Publ. 107 [40]ではデータ収録様式が異なるため、ICRP Publ. 38のデータを本コードで使用するにはICRP Publ. 107のデータ様式に修正する必要がある。しかしながら、核崩壊データの更新が線量係数に大きな影響を及ぼす核種は限定的であることがすでに確認されている[49, 50]。また、ICRP Publ. 38のデータを改編するための許諾条件も不明確である。そこで、開発中のコードにおける1990年勧告に準拠した線量計算では、ICRP Publ. 107のデータを用いることとした。

(4) 体内動態モデル

呼吸気道モデルについては、粒子輸送クリアランスに関するコンパートメントモデルの見直しと、血液吸収クリアランスに関する標準モデルに変更があった[28]。消化管モデルについては、粒子輸送に関するコンパートメントモデルの見直しと、小腸内容物以外のコンパートメントから血液への吸収も考慮できる構造となった[46]。組織系動態モデルについては、体内動態に関する最新の知見を反映し、全面的な見直しが行われた[20, 22, 47]。

2007年勧告を受けて、上記の見直しや変更は行われたものの、コンパートメント間で移行経路と移行係数を与える方法については1990年勧告と同様である。したがって、1990年勧告に準拠した動態モデルを表すデータファイルを作成し、これをコードに実装することで対応する。なお、第3章における検証においても本手法を採用した。

(5) 子孫核種の取扱い

1990年勧告では子孫核種の組織系動態モデルは放射性核種ごとに異なり、親と同じ動態モデルとする場合（共通動態モデル）と、それぞれの子孫核種について子孫核種の元素に固有の動態モデルとする場合（個別動態モデル）の2種類が存在していた[42]。一方、2007年勧告では、全ての放射性核種について個別動態モデルとされた[28]。

本コードにおける1990年勧告対応モデルでは、共通動態モデルを基本に、個別動態モデルを持つ元素・核種については別途データを作成した。

(6) SAF データ

2007年勧告に準拠した SAF データでは、男女を区別し、全ての放射線及び領域（呼吸気道領域、消化管領域、骨領域及びその他の全身領域）について、決められたエネルギー一点に対する離散的な関数（以下、「エネルギーの関数」とする。）として与えられ、任意のエネルギーに対する SAF は内挿して求める[19]。開発するコードでは、この手順をアルゴリズムとして実装している。一方、1990年勧告に準拠した SAF データは男女の区別がなく、放射線の種類や領域によって異なるデータ様式となっている。光子に対する SAF は、2007年勧告対応のデータと同様に、全ての領域についてエネルギーの関数として与えられている。ただし、10 keV 未満の光子についてはデータが存在せず、10 keV の電子に対する SAF を適用することとなっている[48]。電子及び α 粒子に対する SAF のうち、呼吸気道領域はエネルギーの関数として与えられているが、消化管領域と骨領域については単純な仮定を基に一定値とされている。このうち、骨領域の電子に対する SAF で標的が骨表面の場合は 0.2 MeV を境に 2 個の定数が与えられている。また、その他の全身領域については、電子、 α 粒子ともに自己吸収のみを考慮し、線源領域と標的領域が異なる組合せは全て 0 であるとされた[29, 30, 37, 48]。

1990年勧告に準拠した SAF データを本コードの様式に適用して格納させるため、以下のように対応した。光子や呼吸気道領域に対する電子及び α 粒子の SAF データは、エネルギーの関数として与えられているため、本コードのデータ様式に合わせてそのまま格納した。また、エネルギーによらず一定の値となる電子及び α 粒子に対する SAF データについては、全エネルギー一点に対し同一の値を与えて格納した。一方、10 keV 未満の光子について電子 SAF を適用すること、骨領域における電子 SAF が 0.2 MeV を境に 2 個の定数となっていることについては、エネルギー一点を境に異なる数値となる不連続な関数としてデータを整備する必要がある。そこで、任意のエネルギーに対する SAF は内挿して求めること、核崩壊データファイルにおけるエネルギーデータの有効数字が 6 桁であることを考慮し、エネルギー一点として 0.00999999 MeV (9.99999 keV) 及び 0.199999 MeV を追加して SAF データを与えた。これにより、図 4-14 に示すように、新たに設定したエネルギー一点と SAF が不連続となるエネルギー一点の間のエネルギーを持つ放射線は存在しないため、境界値近傍の不連続関数を再現できた。

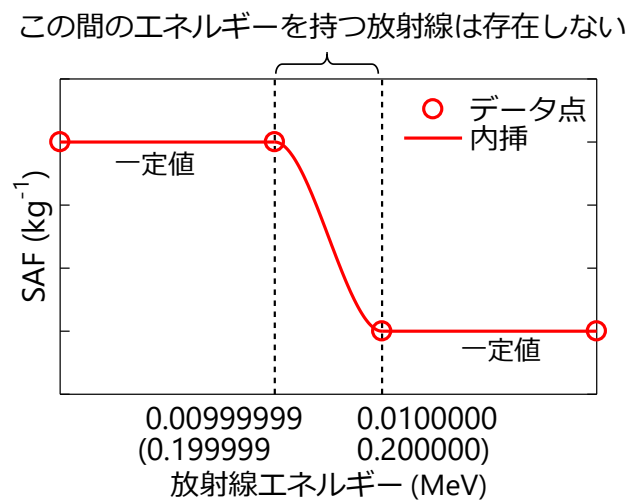


図 4-14 不連続な SAF データの与え方 (模式図)

(7) 線源領域が Other の SAF

2007 年勧告における線源領域が Other の SAF (以下、「Other 線源 SAF」とする。)は、Other に含まれる全ての線源領域 S から標的領域 T への SAF の線源領域質量による加重平均で求められる[19]。

$$\Phi(T \leftarrow \text{Other}) = \frac{1}{M_{\text{Other}}} \sum_S M_S \Phi(T \leftarrow S) \quad (4-1)$$

ここで、 M_{Other} (kg)は Other の質量、 M_S (kg)は線源領域 S の質量である。一方、1990 年勧告における Other 線源 SAF は、全身線源の SAF から Other に含まれない線源領域から T への SAF 及び心臓内容物 HtC から T への SAF を線源領域の質量で加重して差し引くことで計算される[48]。

$$\Phi(T \leftarrow \text{Other}) = \frac{M_{\text{WB}}\Phi(T \leftarrow \text{WB}) - \sum_{S'} M_{S'}\Phi(T \leftarrow S') - M_{\text{HtC}}\Phi(T \leftarrow \text{HtC})}{M_{\text{WB}} - \sum_{S'} M_{S'} - M_{\text{HtC}}} \quad (4-2)$$

ここで、 M_{WB} (kg^{-1})は全身組織質量、 $M_{S'}$ (kg^{-1})は線源領域 S'の質量、 M_{HtC} (kg^{-1})は HtC の質量である。

1990 年勧告に対応した SAF データは、全身組織を除く全ての線源領域を足し合わせても全身をカバーすることができない[37]。また、1990 年勧告に対応した線量係数計算では、多くの核種において共通動態モデルを採用している。そこで、式 (4-2) によりあらかじめ Other 線源 SAF を計算しておき、これを SAF データファイルに追記することで対応することとした。ただし、1990 年勧告に対応した線量係数計算においても、一部の核種に対して個別動態モデルが採用されている。これらの核種には、開発コードのアルゴリズムでそのまま対応させるため、Other に含まれ得る全ての線源領域を全身組織から取り除いた領域を線源とする SAF をあらかじめ計算しておき、この領域を常に Other に含めることで、1990 年勧告の SAF データに基づく Other の SAF を 2007 年勧告の式で計算する方法を考案した。

(8) S 係数の計算 (β 線エネルギーの取扱い)

新旧勧告の間では、β 線に対する S 係数の計算方法に差異がある。2007 年勧告では、全ての線源-標的領域の組合せについて β 線のエネルギースペクトルデータを参照し、計算を行う[19]。一方、1990 年勧告では、呼吸気道領域内の線源-標的領域の組合せについてのみエネルギースペクトルデータを参照し、それ以外の領域では β 線の平均エネルギーを参照して計算を行う[51]。

開発中のコードは、全ての放射線及び線源-標的間において、スペクトルデータを考慮した S 係数計算を実行するよう設計されているため、1990 年勧告に対応したモデルやデータを用いた計算においても、常にエネルギースペクトルを考慮することとした。

(9) 生殖腺の等価線量の計算

2007 年勧告における生殖腺の等価線量は、男性人体モデルに基づく精巣の等価線量と女性人体モデルに基づく卵巣の等価線量の算術平均値である[3]。一方、1990 年勧告における生殖腺の等価線量は、両性具有の人体モデルに基づく精巣及び卵巣の等価線量の大きい方を生殖腺の等価線量とする[2]。

開発コードにおける生殖腺の等価線量は、男女で同じ ID が付された組織・臓器の等価線量については、男女モデルによる計算結果の算術平均値を用いるよう設計されている。1990 年勧告に準じた生殖腺の等価線量を再現するためには、男性の精巣と女性の卵巣の等価線量を比較し、大きい方を生殖腺の等価線量とする処理の追加が必要となる。多くの計算結果で卵巣の等価線量の方が大きい傾向が確認されたことを踏まえ、第 3 章の検証をはじめとする本報告書における 1990 年勧告に準拠した計算では、精巣の組織加重係数をゼロとし、卵巣の等価線量を生殖腺の等価線量として扱うこととした。

(10) 残りの組織の等価線量の計算

2007 年勧告における残りの組織の等価線量は、残りの組織として定義される 13 の組織・臓器の預託等価線量の算術平均値となっている[3]。一方、1990 年勧告における残りの組織の等価線量は、残りの組織として定義される 10 の組織・臓器の等価線量率の質量加重平均値を計算し、預託期間の時間積分値が用いられる[31]。また、残りの組織として定義される組織・臓器の等価線量の最大値 $H_{T'}$ が、個別の組織加重係数が適用される組織・臓器の等価線量の最大値 H_{\max} よりも大きい場合に限り、残りの組織の等価線量の計算方法が変化する「分割ルール」が存在する[31]。

$$\begin{cases} \dot{H}_{\text{rem}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} m_i \dot{H}_i}{\sum_{i=1}^{10} m_i}, & \text{if } H_{T'} \leq H_{\max} \\ \dot{H}_{\text{rem}} = 0.5 \frac{\sum_{i=1(i \neq T')}^{10} m_i \dot{H}_i}{\sum_{i=1(i \neq T')}^{10} m_i} + 0.5 \dot{H}_{T'}, & \text{if } H_{T'} > H_{\max} \end{cases} \quad (4-3)$$

分割ルールが適用される場合、残りの組織の等価線量の計算方法の違いが実効線量係数に及ぼす影響が大きいケースが多い[52]。そのため、開発コードでは、残りの組織の等価線量とそれを含めた実効線量について、新旧両勧告それぞれの計算方法に準拠した 2 通りの値を出力することで対応することとした。

(11) 実効線量の計算

2007 年勧告における実効線量は、男女別の人体モデル[53]に基づく男女別の等価線量の平均値に対して組織加重係数を乗じ、総和をとることで導出される[3]。一方、1990 年勧告における実効線量は、男女の区別のない両性具有の人体モデルに基づく等価線量に組織加重係数を乗じ、総和をとることで導出される[2]。

1990 年勧告に準拠したモデル・データに基づく実効線量の計算手順は、男女別に用意された SAF データファイルに、男女の区別のない人体モデルに基づく SAF データを共通で格納することにより対応することとした。

4.4.2 1990 年勧告対応モデル及びデータを用いた線量係数計算

4.4.1 項に記した対応方針のもと、1990 年勧告に準拠した線量評価モデル・データの作成を行った。ただし、本コードでは、上記のように 1990 年勧告に準拠したモデルやデータを用いた場合においても、完全に 1990 年勧告に従った手法で線量係数を導出するものではないことに留意する必要がある。そこで、OIR part 2 及び part 3 に収録されたラドンを除く 27 元素に

対し、ICRP Publ. 68 [54]に収録された核種・摂取条件について実効線量係数を計算し、1990年勧告に準拠した線量評価コード DCAL [51]の結果と比較検証を行った。ここでは、OIR Data Viewer [20]で実効線量係数を有効数字2桁で扱っていることを参考に、本検証でも有効数字2桁の範囲で比較することとした。

開発コードにより導出される線量係数と DCAL による計算結果の差異に対する影響因子としては、4.4.1 項で説明した本コードでのモデルやデータ、計算手法の取扱いに加え、DCAL と開発コード間で一部の計算アルゴリズムが異なることも考えられる。そこで、今回比較したコード間のアルゴリズムの違いを以下に記す。

(1) 残りの組織の等価線量について

DCAL では、分割ルールの適用可否は比較対象領域の等価線量係数を有効数字2桁に丸めたいえで判断される。そのため、比較対象領域の線量の絶対値に近い一部のケースでは、本来分割ルールが適用されるケースで分割ルールが適用されないことがあり、残りの組織の等価線量が開発コードよりも小さく評価される例があった。

(2) SAF データの内挿法について

前年度の検討から、SAF データの内挿法が PCHIP のとき、OIR Data Viewer の数値を最も良く再現できることが分かった[21]。この検討結果を踏まえ、開発コードの SAF データ内挿法には PCHIP [55]を採用している。一方、DCAL では、SAF データの内挿法として対数変換 PCHIP が採用されている[51]。このため、放射線のエネルギーが内挿法の違いの影響を大きく受ける領域に存在する場合には、該当領域の S 係数に有意な差異が生じた例があった。

計算により得られた数値を DCAL による評価値と比較した結果を表 4-3 に示す（実効線量係数の比較結果をまとめた表は、付録 1 に収録した）。両者の数値は概ね一致し、新旧の線量係数の違いの原因を解析するという目的において十分正確に計算できることを確認した。

表 4-3 開発コードと DCAL による実効線量係数の比較結果

動態モデル	共通動態モデル	個別動態モデル
一致	665	59
不一致*	21	16

*2桁目が2以上異なる場合を不一致とした。

4.4.3 計算条件設定ファイルの作成

1990年勧告に準拠した線量評価モデル・データを用いた線量係数計算または1990年勧告の動態モデルと2007年勧告のSAFデータを組み合わせた線量係数計算(以下、「クロス計算」とする。)を実行する場合は、表4-1に示すデータファイルを全て適切に用意し、使用するファイルとして設定する必要がある。そこで、開発を進めるコードの基本設定とする2007年勧告に準拠した線量評価モデル・データを用いた計算を行うための計算条件設定ファイルに加え、1990年勧告に準拠した線量評価モデル・データを用いた線量係数の計算とクロス計算を

実行するための計算条件設定ファイルを作成した。コードを利用するにあたり、GUI 起動時にこれらの計算条件設定ファイルを指定 (図 4-2 ②参照) することにより、簡便に 1990 年勧告に準拠したモデル・データを用いた計算またはクロス計算の設定を行うことができる。

4.5 コードβ版の開発

コードβ版は、本事業で開発を進めている内部被ばく線量評価コードのプロトタイプである。前年度完成させた線量係数計算機能と今年度上半期に完成させた核種摂取量推定機能を 4.2 節で記した GUI で統合し、4.3 節に記した線量評価モデル・データの編集機能を付加することにより、コードβ版を完成させた。

完成したコードβ版の実用性を確認するため、線量係数計算に要する時間の調査及び Windows 以外の OS をインストールした PC での動作確認を行った。計算時間の調査には、一般的な用途に使用される Windows PC (ツクモ製 RM7J-E91/T3、OS : Windows 10 Pro、CPU : Intel Core i7-7700K、メモリ : 16 GB) を用いた。子孫核種を持たない³H や、子孫核種の数が少ない¹³¹I、¹³⁴Cs 等の核種については、S 係数、線量係数の計算がそれぞれ数秒以内で完了した。トリウムやウラン等、子孫核種の数が多い核種では、S 係数の計算に 10 秒程度、線量係数の計算に 20 秒程度要した。このように、条件によって所要時間は異なるが、概ね数十秒以内で計算が完了することを確認した。Windows 以外の OS での動作確認については、Ubuntu 16.04 LTS (Linux)、Red Hat Enterprise Linux 7.7 及び macOS Mojave 10.14.6 の PC で実施し、動作することを確認した。以上より、コードβ版は十分な実用性を有することを確認した。

4.6 コードの開発のまとめ

今年度は、ユーザーの利便性や操作性の向上を図る機能として、幅広いユーザーに対し、線量係数計算や摂取量推定の条件設定が容易に実施できる GUI を開発した。GUI は、設定すべき項目を視覚的に確認することを可能としつつ、高度な条件設定にも対応できるような構成とした。具体的には、体内動態モデルの編集機能を用意するとともに、所定の様式に従ってユーザーが線量評価モデル・データファイルを編集し、これらを使用可能とした。また、この GUI は、線量係数計算機能と摂取量推定機能を統合する機能も担っており、GUI の開発により両機能を備えた内部被ばく線量評価コードのβ版が完成した。

第5章 線量係数計算機能の適用及び開発に関する情報収集

5.1 線量係数計算機能の慢性被ばくへの適用

5.1.1 背景と目的

内部被ばくの線量管理では、成人の場合は摂取後 50 年間、小児の場合は 70 歳になるまでの間（預託期間）に受ける被ばく線量を導出し、これを摂取したその 1 年間に受けたものとする「預託線量」という概念が用いられる[3,28]。しかしながら、比較的長期間、継続的に放射性核種を摂取するような状況（慢性摂取）では、この概念による被ばく管理は過大評価となるおそれがあり、実際の積算被ばく線量を把握することが重要となる。また、長期間の慢性摂取では、摂取開始から一定時間が経過すると体内放射能が平衡状態となることから、体内放射能が平衡状態に達した状況に置ける年間被ばく線量率を把握することも被ばく管理に有益である。

ICRP は、OIR シリーズにより新しい体内動態モデル（呼吸気道モデル、消化管モデル及び組織系動態モデル）を導入したが、慢性摂取に対するモニタリングデータ（体内放射能や排泄率の推移データ）は提供していない。開発した線量係数計算機能は、長期間の慢性摂取を考慮した被ばく線量評価にも対応し、線量係数の計算過程の情報として体内放射能や積算線量の経時変化を出力することも可能である。そこで、体内動態モデルの更新が慢性摂取時の体内放射能の推移や平衡状態時の年間線量率に及ぼす影響の解析に、本機能を利用した。

なお、本節の内容は、第 2 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会における発表内容[56]を再編集したものである。

5.1.2 方法

線量係数計算機能の慢性摂取評価モードを用いて、体内放射能と積算実効線量の時間推移データを取得した。摂取条件は、軽作業時の成人による ^{137}Cs の吸入摂取、1 Bq/日の摂取率で摂取期間は 50 年とした。エアロゾルの性状は、公衆に対する ICRP の既定値（AMAD：1 μm 、密度：3.0 g/cm^3 、形状係数：1.5）[30]とし、血液への吸収タイプは F と M の 2 種類について検討した（Cs 元素については、OIR シリーズにおいて、タイプ S に特定の化学形を定義していない）。吸入エアロゾルの呼吸気道への沈着割合は ICRP Publ. 130 の Table A.2 [28]を参照し、図 4-5 ③に示す沈着割合編集機能で設定した。従来の動態モデルによる計算は、4.4.3 項で記したクロス計算用の計算条件設定ファイルを用いて実施した。これにより、SAF データについては共通のものを使用するため、動態モデルの更新による影響を解析することができる。

5.1.3 結果と考察

(1) タイプ F

吸入摂取タイプ F について、全身放射能の推移を計算した結果を図 5-1 に示す。全身放射能が 50 年経過時の値の 99.7%に達した状態を平衡状態と定義した場合、新動態モデルでは 920 日経過時、旧動態モデルでは 911 日経過時に全身放射能が平衡状態に達した。平衡状態における全身放射能は、新旧それぞれ 57.1 Bq 及び 50.4 Bq であり、モデルの更新により 13%増

加した。平衡状態における放射能の増加の原因は、呼吸気道における粒子輸送クリアランスモデルの見直しによりエアロゾルが呼吸気道に滞留する時間が長くなり、血液へ移行するセシウムの割合が増加したためであった。

図 5-2 に、年実効線量率の時間推移を示す。図に示すように、新旧いずれのモデルにおいても 3 年目から年実効線量率はほぼ一定となり、その値はそれぞれ $2.25 \mu\text{Sv}/\text{年}$ 及び $1.60 \mu\text{Sv}/\text{年}$ であり、41%の差が見られた。放射能の差に比べて線量率の差が大きい原因は、モデル間でセシウムの体内分布の様子が異なるためと考えられる。旧モデルでは、脂肪組織も含めて全身に均一にセシウムが分布するモデルであるのに対し、新モデルでは、筋肉により集積するモデルとなった。その結果、体幹部に位置する組織加重係数の大きい組織の等価線量が増加し、実効線量率の増加をもたらした。

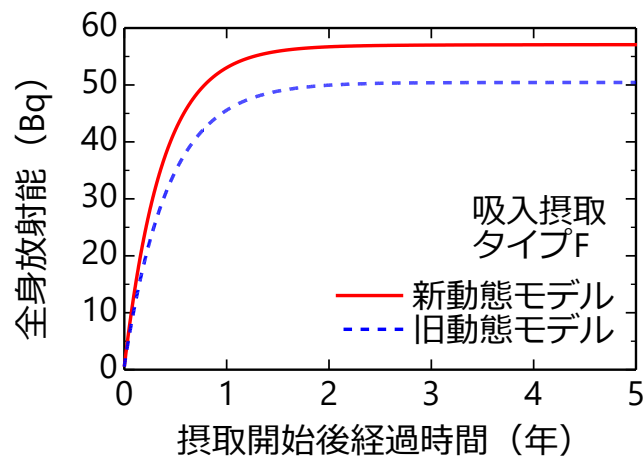


図 5-1 ^{137}Cs の慢性的な吸入摂取 (タイプ F) に対する全身放射能の時間推移

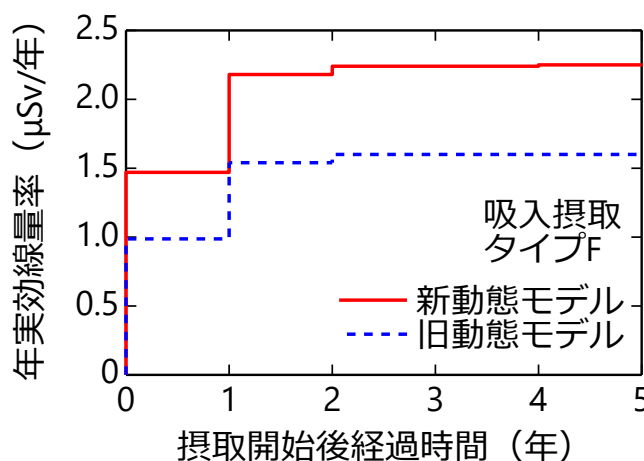


図 5-2 ^{137}Cs の慢性的な吸入摂取 (タイプ F) に対する年実効線量率の時間推移

(2) タイプ M

吸入摂取タイプ M について、全身放射能の推移を計算した結果を図 5-3 に示す。新動態モデルでは 1113 日経過時、旧動態モデルでは 1123 日経過時に全身放射能が平衡状態に達した。平衡状態における全身放射能は、新旧それぞれ 32.9 Bq 及び 28.7 Bq であり、モデルの更新により 14%増加した。平衡状態における放射能が増加した原因は、組織系動態モデルの見直しにより、呼吸気道から消化管にクリアランスされたセシウムの消化管吸収率 (f_A 値) が 0.1 から 0.2 に増加したためであった。

図 5-4 に、年実効線量率の時間推移を示す。図に示すように、新旧いずれのモデルにおいても 3 年目から年実効線量率はほぼ一定となり、その値はそれぞれ 2.75 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ 及び 3.45 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ であり、モデル更新により 20%減少した。モデル更新により平衡状態における放射能は増加したものの年実効線量率は減少した原因は、呼吸気道から血液吸収によりクリアランスされるモデルのパラメータの見直しによるものであった。血液吸収クリアランスモデルのパラメータのうち、タイプ M に対する速い吸収成分の比率が 0.1 から 0.2 に増加したことにより、新モデルではセシウムがより速く呼吸気道から血液へと移行する。そのため、組織加重係数の大きい肺の等価線量が減少し、その結果、年実効線量率も減少することとなった。

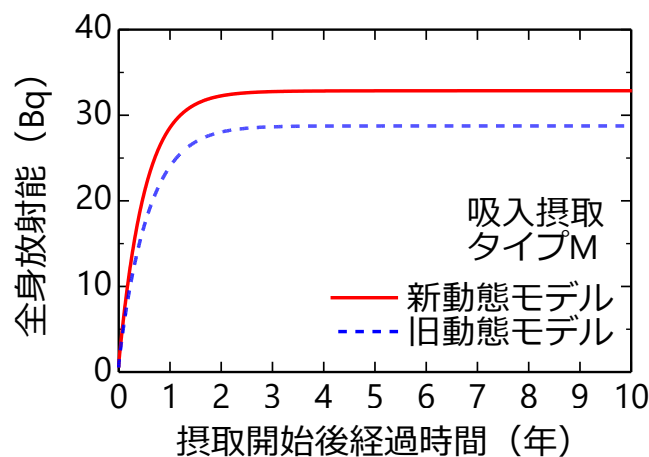


図 5-3 ^{137}Cs の慢性的な吸入摂取 (タイプ M) に対する全身放射能の時間推移

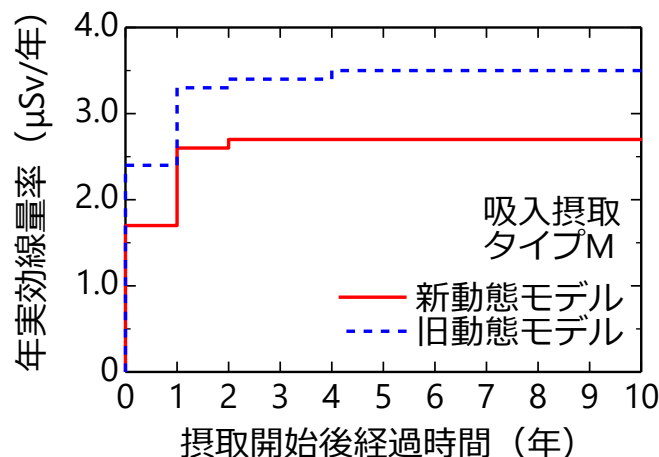


図 5-4 ^{137}Cs の慢性的な吸入摂取 (タイプ M) に対する年実効線量率の時間推移

5.1.4 慢性被ばくへの適用のまとめ

開発した線量係数計算機能を活用し、 ^{137}Cs の慢性摂取について、体内動態モデルの更新が体内放射能や年実効線量率に及ぼす影響を解析した。吸入摂取タイプ F と M では、平衡状態になるまでの時間に大きな変化はなかったものの、平衡状態時の体内放射能や年実効線量率は変化することが明らかになった。

本適用例では、開発した線量係数機能のクロス計算（1990年勧告対応の動態モデルと2007年勧告対応のSAFデータの組合せによる線量計算）設定を用いて解析することにより、動態モデルの更新のみの影響を解析することができた。この他にも、1990年勧告計算とクロス計算との違いを解析することでSAFデータの更新による線量への影響を解析する等、様々な適用方法が期待できる。

5.2 ICRPによる線量評価モデル等の公開に係る情報収集

今年度の事業を開始した平成31年4月の段階において、以下のICRPによる2007年勧告に準拠する線量評価モデルやデータが未公開であった。

- ・ 主要28元素以外の元素を作業者が摂取した場合の組織系動態モデル（線量係数）
- ・ 成人以外の年齢群に対するSAFデータ
- ・ 公衆の組織系動態モデル（線量係数）

このうち、作業者がランタノイド及びアクチノイド元素（全25元素）を摂取した場合の組織系動態モデル、実効線量係数等については、OIR part 4 (ICRP Publication 141) [47]として、令和元年12月に公表された。

他のモデルやデータについては、令和元年11月18日より21日に豪州で開催されたICRPシンポジウムにおいて、内部被ばくの線量係数を検討するTG95 (Internal Dose Coefficients)より、下記のように刊行物の公開予定等の報告があった。

- ・ OIR part 5 は2020年に刊行予定
- ・ 公衆被ばくに関する最初の刊行物は2021年に刊行予定

その後、上記のシンポジウムに合わせて開催されたICRP第2専門委員会の会合について、議事が令和2年1月7日にICRPのホームページで公開された。内部被ばく線量評価のモデルやデータについては、TG95の他、TG96 (Computational Phantoms and Radiation Transport)でも検討が進められている。ホームページで公表された議事の中で、TG95及びTG96が検討している報告書の準備状況やスケジュールは、以下のように説明されている[57]。

- 印刷中または刊行が承認
 - ・ TG96：小児の標準ファントム
- 2020年中に意見募集（ドラフト公開）を開始することが承認
 - ・ TG95：OIR part 5（線量係数と組織系動態モデル）
 - ・ TG95：公衆の線量係数 part 1（線量係数と組織系動態モデル）
 - ・ TG96：小児の標準ファントムを用いた内部被ばく線量評価のためのSAFデータ

- 検討が進捗中（スケジュールが明示されていないもの）
 - ・ TG95：公衆の線量係数 part 2（線量係数と組織系動態モデル）
 - ・ TG96：妊婦及び胎児のファントム

上記のスケジュールについては、従来説明されてきた「OIR parts 1-4 に該当する公衆被ばくの線量係数等を公開後、OIR part 5 を刊行」とは異なっている[23]。また、公衆の実効線量係数は、基礎データとなる年齢群ごとの SAF データの後に公開される他、意見募集を完了してから公開まで1年から数年程度の時間が経過することが想定される。そのため、主要 28 元素、ランタノイド及びアクチノイド元素に対する作業者の摂取条件を除き、本事業の完了する令和 2 年度末（令和 3 年 3 月末）までに、実効線量係数が全て公表されることは難しい状況となっている。

第6章 あとがき

平成 29 年度からの 4 か年計画で、ICRP 2007 年勧告に準拠して、内部被ばく線量評価に用いる実効線量係数の導出、核種の摂取量を推定できるコードの開発に関する研究に取り組んでいる。開発するコードは、国内の放射線規制への 2007 年勧告の取入れにおける実効線量係数の検証、緊急時や平常時のモニタリングに基づく被ばく線量評価における活用を主要なアウトカムに設定している。平成 31/令和元年度は、コードの基本機能のうち核種摂取量推定機能を検証して同機能の開発を完了するとともに、ユーザーの利便性や操作性を向上させる機能を開発し、2 つの基本機能を統合させたコード β 版の完成を MS とした。

核種摂取量推定機能については、平成 30 年度までの事業で、原子力機構、他の大学や研究機関において緊急被ばく医療やモニタリングに携わる専門家との意見交換により、当該機能のニーズ等を聴取して開発を進めた。その結果、本年度の事業を開始する段階においては、最尤推定法により、最適な摂取量を推定する基本機能を完成させていた。そこで、国際的な枠組みの中で検討あるいは提示された内部被ばく線量評価に関する事例の中から、摂取条件やモニタリングの手法等が異なる例題を抽出し、開発した機能による核種摂取量の推定の妥当性を検証した。IDEAS ガイドラインが示す種々の代表的な条件を含むいくつかの事例に対しては、開発した機能は参照値を合理的に再現した。また、摂取回数がモニタリング回数よりも多い条件、検出下限値未満のモニタリング値が存在する条件等、ニーズ調査で指摘のあった事例に対しても、適切に摂取量を推定することを確認した。本コードの目的としている 2007 年勧告に準拠する線量評価を遂行した例題に対しても、妥当な結果が得られることを検証しており、核種摂取量推定機能の完成という MS は達成したと考える。

ユーザーの利便性や操作性を向上させる機能として、ユーザーが計算条件を設定する際に各項目を確認でき、必要に応じて変更等が容易に行える GUI を開発した。この GUI を活用することで、一連の操作により、対話形式で計算条件を選択、あるいは任意の体内動態モデル等を設定可能とする他、計算結果の表示方法を指定することが可能となった。ここで、任意の線量係数計算モデルやデータについては、GUI を通じてコードによる線量計算等で必要な所定のファイル形式で編集することが可能となった。また、計算結果として、評価対象とする線量や体内の放射能推移等を数表、グラフで確認する他、設定条件と合わせて、これらを保存する機能も実装した。さらに、新旧の勧告に準拠する線量係数の差異の影響因子の調査でコードを活用することを目的として、実装したアルゴリズムを活用し、1990 年勧告に準拠するモデルやデータを適切に用いて、線量計算を実行することを可能とさせた。最終的には、線量係数計算機能及び核種摂取量推定機能という二つの基本機能を GUI で統合し、上記の線量評価モデル・データの編集機能を付加させた。さらに、概ね数十秒以内で計算結果が得られること、Windows に加え Linux 及び macOS においても動作することを確認しており、今年度の MS としたコード β 版の完成を達成したと考える。

さらに、開発するコードの特徴の一つとして慢性被ばくへの対応があるが、放射性セシウム (^{137}Cs) の粒子吸入を例題として解析を行い、全身の放射能や線量計算の時間推移、平衡状態に達するまでの時間、その際の数値を導出することに成功した。また、開発するコードの活用策となっている放射線規制における内部被ばく防護基準値の見直しに関して、ICRP に

おける線量評価モデル等の検討状況を調査した。

本事業の最終年度となる令和 2 年度は、コードβ版を国内の専門家に試用提供し、核種摂取量推定機能の操作性等を中心にコメントを聴取し、意見を踏まえて GUI の改良等を行うことで、コードを完成させる予定である。また、操作に必要となるマニュアルを併せて整備し、コードの公開方法や維持管理に係る枠組み等について検討を進める計画としている。

その後のコードの活用策として、内部被ばく防護基準値の見直しで必須となる実効線量係数の検証を想定しているが、今年度の調査を通じて、次年度中に ICRP による新しい実効線量係数が全て公開されない状況であることが判明した。そこで、本事業で進めた実効線量係数の検証結果、OIR シリーズの調査に基づいて分析した新旧の実効線量係数の差異について、その発信方法を検討する。また、今年度までの成果を学会等で周知し、意見交換することにより、モニタリング実施者が核種摂取量推定機能を習得するための講習会等の開催についても検討を進めたい。さらに、以上の検討で必要性が確認された場合、令和 3 年度にコードの活用策に関する研究テーマを本事業で提案する予定である。

参考文献

- [1] 放射性同位元素等の規制に関する法律（昭和三十二年法律第百六十七号）。
- [2] ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, *Ann. ICRP* **21** (1–3) (1991).
- [3] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, *Ann. ICRP* **37** (2–4) (2007).
- [4] 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）。
- [5] 原子力規制委員会, 原子力規制委員会における安全研究の基本方針,
<https://www.nsr.go.jp/data/000158682.pdf>（最終アクセス日：令和2年2月19日）。
- [6] 原子力規制庁, 「平成29年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費」の実施について,
<http://www.nsr.go.jp/data/000185157.pdf>（最終アクセス日：令和2年2月19日）。
- [7] 原子力規制庁, 「平成29年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）」に係る新規研究課題及びネットワーク事業の公募要項,
<http://www.nsr.go.jp/data/000186956.pdf>（最終アクセス日：令和2年2月19日）。
- [8] 原子力規制庁, 平成29年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費の採択結果について,
<http://www.nsr.go.jp/data/000196751.pdf>（最終アクセス日：令和2年2月19日）。
- [9] 日本原子力研究所, 原子力発電施設等内部被ばく評価技術報告書, 2000年3月。
- [10] 日本原子力研究開発機構, 平成21年度原子力利用安全対策等委託事業「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）」委託業務成果報告書, 平成22年3月(2010).
- [11] 日本原子力研究開発機構, 平成22年度原子力利用安全対策等委託事業「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）」委託業務成果報告書, 平成23年3月(2011).
- [12] 日本原子力研究開発機構, 平成23年度原子力利用安全対策等委託事業「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）」委託業務成果報告書, 平成24年3月(2012).
- [13] 日本原子力研究開発機構, 平成24年度原子力利用安全対策等委託事業「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）」委託業務成果報告書, 平成25年3月(2013).
- [14] 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業務委託費（ICRP（国際放射線防護委員会）技術的基準等の整備）事業」委託業務成果報告書, 平成26年3月(2014).
- [15] 日本原子力研究開発機構, 「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」委託業務成果報告書, 平成27年3月(2015).

- [16] 波戸真治, 本間俊充, 原子炉事故時放射線影響解析で用いるための内部被曝線量係数, JAERI-Data/Code 2005-006 (2005).
- [17] 木村仁宣, 木名瀬栄, 波戸真治, 慢性摂取による内部被ばく線量評価コードの開発, JAEA-Data/Code 2012-027 (2013).
- [18] O. Kurihara, S. Hato, K. Kanai, C. Takada, K. Takasaki, K. Ito, Y. Yamada, M. Akashi, and T. Momose, REIDAC-A Software Package for Retrospective Dose Assessment in Internal Contamination with Radionuclides, *J. Nucl. Sci. Technol.* **44** (10), 1337–1346 (2007).
- [19] ICRP, The ICRP Computational Framework for Internal Dose Assessment for Reference Adults: Specific Absorbed Fractions. ICRP Publication 133, *Ann. ICRP* **45** (2) (2016).
- [20] ICRP, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134, *Ann. ICRP* **45** (3/4) (2016).
- [21] 日本原子力研究開発機構, 平成 29 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究) 事業成果報告書, 平成 30 年 3 月 (2018).
- [22] ICRP, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137, *Ann. ICRP* **46** (3/4) (2017).
- [23] 日本原子力研究開発機構, 平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究) 事業成果報告書, 平成 31 年 3 月 (2019).
- [24] C.M. Castellani, J.W. Marsh, C. Hurtgen, E. Blanchardon, P. Berard, A. Giussani, and M.A. Lopez, IDEAS Guidelines (Version 2) for the Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data, European Radiation Dosimetry Group e. V, EURADOS Report 2013-01 (2013).
- [25] IAEA, Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides, IAEA Safety Report Series No. 37 (2004).
- [26] A.C. James, A. Birchall, J.W. Marsh, and M. Puncher, User Manual for IMBA Professional Plus (Version 4.0), ACJ & Associates, Inc., Radiation Protection Division Health Protection Agency (2005).
- [27] C.M. Castellani, A. Andradi, A. Giussani, T. Pazmandi, G. Roberts, and G. Etherington, InterComparison on Internal DOSE Assessment - ICIDOSE 2017 Analysing the intercomparison results, European Radiation Dosimetry Group e. V, EURADOS Report 2019-01 (2019).
- [28] ICRP, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130, *Ann. ICRP* **44** (2) (2015).
- [29] ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 Part 1, *Ann. ICRP* **2** (3–4) (1979).
- [30] ICRP, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66, *Ann. ICRP* **24** (1–3) (1994).
- [31] ICRP, 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).
- [32] ICRP, 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).
- [33] ICRP, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. ICRP Publication 78, *Ann. ICRP* **27** (3–

- 4) (1997).
- [34] 波戸真治, 木名瀬栄, 特異値分解を用いた放射性核種の摂取量推定, *日本原子力学会和文論文誌* **15** (3) 146–150 (2016).
- [35] EPA, Practical Methods for Data Analysis, EPA QA/G-9 QA00 Update, EPA/600/R-96/084 (2000).
- [36] ICRP, Report on the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975).
- [37] M. Cristy and K.F. Eckerman, Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources, ORNL/TM-8381/V1-7 (1987).
- [38] ICRP, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89, *Ann. ICRP* **32** (3–4) (2002).
- [39] ICRP, Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38, *Ann. ICRP* **11–13** (1983).
- [40] ICRP, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107, *Ann. ICRP* **38** (3) (2008).
- [41] ICRP, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1, ICRP Publication 56, *Ann. ICRP* **20** (2) (1990).
- [42] ICRP, 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).
- [43] ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 Part 2, *Ann. ICRP* **4** (3–4) (1980).
- [44] ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 Part 3, *Ann. ICRP* **6** (2–3) (1981).
- [45] ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: An Addendum. ICRP Publication 30 Part 4, *Ann. ICRP* **19** (4) (1988).
- [46] ICRP, Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100, *Ann. ICRP* **36** (1–2) (2006).
- [47] ICRP, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141, *Ann. ICRP* **48** (2/3) (2019).
- [48] M. Cristy and K.F. Eckerman, SEECAL: Program to Calculate Age-Dependent Specific Effective Energies, ORNL/TM-12351 (1993).
- [49] K. Manabe, A. Endo, and K.F. Eckerman, Impact of the New Nuclear Decay Data of ICRP Publication 107 on Inhalation Dose Coefficients for Workers, *Radiat. Prot. Dosim.* **138** (3) 245–250 (2010).
- [50] 真辺健太郎, 遠藤章, 放射性核種データの改訂が作業者に対する内部被ばく線量係数に及ぼす影響, *Radioisotopes* **60** (9) 375–384 (2011).
- [51] K.F. Eckerman, R.W. Leggett, M. Cristy, C.B. Nelson, J.C. Ryman, A.L. Sjoreen, and R.C. Ward, User's Guide to the DCAL System, ORNL/TM-2001/190 (2006).
- [52] 真辺健太郎, 遠藤章, ICRP 2007 年勧告の組織加重係数等に基づく内部被ばく線量係数、濃度限

度等の試算（受託研究）, JAEA-Data/Code 2010-020 (2010).

[53] ICRP, Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110, *Ann. ICRP* **39** (2) (2009).

[54] ICRP, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68, *Ann. ICRP* **24** (4) (1994).

[55] Netlib Repository at UTK and ORNL, slatec/pship,

<http://www.netlib.org/slatec/pchip/>（最終アクセス日：令和2年3月10日）.

[56] 真辺健太郎, 佐藤薫, 高橋史明, 放射性セシウムの慢性摂取による内部被ばく線量評価に対する体内動態モデル更新の影響, 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 1B1-4, 宮城, 2019年12月.

[57] ICRP, ICRP Committee 2 Meeting, November 18–24, 2019, Adelaide, Australia,

<https://www.icrp.org/admin/Summary%20of%20November%202019%20C2%20Meeting%20Adelaide-202017152212.pdf>（最終アクセス日：令和2年3月2日）.

付録 1 1990 年勧告対応モデル及びデータを用いた実効線量係数の計算結果

開発中のコードによる 1990 年勧告に準拠した線量評価モデル・データを用いた実効線量係数と、1990 年勧告対応の内部被ばく線量コード DCAL による評価値との比較について、4.4.2 項で記した。本付録では、実効線量を比較した全ての摂取条件について、両コードの評価値を付表 1-1 に示す。比較においては、2 桁目の数値の差が 2 以上のものを不一致とした。実効線量係数を計算した全 761 種類の摂取条件のうち、不一致は 37 種類であった。その原因は、以下の点に関する両コード間の差違であることを確認した。

- a) 骨領域の電子 SAF の取扱い
- b) 残りの組織の等価線量の計算方法（分割ルール）
- c) 吸気道領域の電子 SAF の取扱い
- d) 個別動態モデルと共通動態モデルの使い分け
- e) 子孫核種としてのラドンの組織系動態モデル
- f) 個別動態モデルを適用するときの Other 線源の S 係数計算方法

付表 1-1 では、実効線量係数の比較で不一致となった摂取条件について、その原因を示す記号（a～f）を実効線量係数の数値の右肩に付した。

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (1/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
³ H	経口摂取	トリチウム水	1.9E-11	1.9E-11
		有機結合トリチウム	4.2E-11	4.2E-11
	吸入摂取	トリチウムガス	1.8E-15	1.8E-15
		トリチウム水	1.8E-11	1.8E-11
		有機結合トリチウム	4.1E-11	4.1E-11
¹¹ C	経口摂取	標識有機化合物	2.4E-11	2.4E-11
	吸入摂取	蒸気	3.2E-12	3.2E-12
		二酸化物	2.2E-12	2.2E-12
		一酸化物	1.2E-12	1.2E-12
¹⁴ C	経口摂取	標識有機化合物	5.8E-10	5.8E-10
	吸入摂取	蒸気	5.8E-10	5.8E-10
		二酸化物	6.2E-12	6.2E-12
		一酸化物	8.0E-13	8.0E-13
³² P	経口摂取	全ての化合物	2.4E-09	2.4E-09
	吸入摂取	F	1.1E-09	1.1E-09
		M	2.9E-09	2.9E-09
³³ P	経口摂取	全ての化合物	2.5E-10	2.4E-10
	吸入摂取	F	1.4E-10	1.4E-10
		M	1.2E-09	1.2E-09
³⁵ S	経口摂取	無機化合物	1.4E-10	1.4E-10
		食品中の硫黄	6.6E-10	6.6E-10
	吸入摂取	F	8.0E-11	8.0E-11
		M	1.1E-09	1.1E-09
		蒸気	6.0E-10	6.0E-10
⁴¹ Ca	経口摂取	全ての化合物	2.3E-10	2.3E-10
	吸入摂取	M	1.5E-10	1.5E-10
⁴⁵ Ca	経口摂取	全ての化合物	7.1E-10	7.1E-10
	吸入摂取	M	2.3E-09	2.3E-09
⁴⁷ Ca	経口摂取	全ての化合物	1.6E-09	1.6E-09
	吸入摂取	M	2.1E-09	2.1E-09
⁵² Fe	経口摂取	全ての化合物	1.4E-09	1.4E-09
	吸入摂取	F	6.9E-10	6.8E-10
		M	9.5E-10	9.5E-10
⁵⁵ Fe	経口摂取	全ての化合物	3.3E-10	3.3E-10
	吸入摂取	F	9.4E-10	9.2E-10 ^a
		M	3.4E-10	3.3E-10
⁵⁹ Fe	経口摂取	全ての化合物	1.8E-09	1.8E-09
	吸入摂取	F	3.0E-09	3.0E-09
		M	3.2E-09	3.2E-09

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (2/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
⁶⁰ Fe	経口摂取	全ての化合物	1.2E-07	1.2E-07
	吸入摂取	F	3.5E-07	3.5E-07
⁵⁵ Co	経口摂取	M	1.2E-07	1.2E-07
		不特定の化合物	1.0E-09	1.0E-09
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	1.1E-09	1.1E-09
		M	7.9E-10	7.9E-10
⁵⁶ Co	経口摂取	S	8.3E-10	8.3E-10
		不特定の化合物	2.5E-09	2.5E-09
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	2.4E-09	2.3E-09
		M	4.0E-09	4.0E-09
⁵⁷ Co	経口摂取	S	4.9E-09	4.9E-09
		不特定の化合物	2.1E-10	2.1E-10
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	1.9E-10	1.9E-10
		M	3.9E-10	3.9E-10
⁵⁸ Co	経口摂取	S	6.0E-10	6.0E-10
		不特定の化合物	7.5E-10	7.5E-10
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	7.0E-10	7.0E-10
		M	1.4E-09	1.4E-09
^{58m} Co	経口摂取	S	1.7E-09	1.7E-09
		不特定の化合物	2.4E-11	2.4E-11
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	2.4E-11	2.4E-11
		M	1.4E-11	1.5E-11
⁶⁰ Co	経口摂取	S	1.6E-11	1.7E-11
		不特定の化合物	3.4E-09	3.4E-09
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	2.5E-09	2.5E-09
		M	7.1E-09	7.2E-09
^{60m} Co	経口摂取	S	1.7E-08	1.7E-08
		不特定の化合物	1.7E-12	1.7E-12
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	1.7E-12	1.7E-12
		M	1.1E-12	1.1E-12
⁶¹ Co	経口摂取	S	1.2E-12	1.2E-12
		不特定の化合物	7.5E-11	7.5E-11
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	7.5E-11	7.5E-11
		M	7.1E-11	7.1E-11
^{62m} Co	経口摂取	S	7.5E-11	7.6E-11
		不特定の化合物	4.9E-11	4.9E-11
	吸入摂取	酸化物、水酸化物及び無機化合物	4.9E-11	4.9E-11
		M	3.6E-11	3.6E-11
⁶² Zn	経口摂取	S	3.7E-11	3.7E-11
	吸入摂取	全ての化合物	9.4E-10	9.3E-10
			6.6E-10	6.6E-10

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (3/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
⁶³ Zn	経口摂取	全ての化合物	8.0E-11	8.0E-11
	吸入摂取	S	6.1E-11	6.1E-11
⁶⁵ Zn	経口摂取	全ての化合物	3.9E-09	3.9E-09
	吸入摂取	S	2.8E-09	2.8E-09
⁶⁹ Zn	経口摂取	全ての化合物	3.1E-11	3.1E-11
	吸入摂取	S	4.3E-11	4.3E-11
^{69m} Zn	経口摂取	全ての化合物	3.3E-10	3.3E-10
	吸入摂取	S	3.4E-10	3.4E-10
^{71m} Zn	経口摂取	全ての化合物	2.4E-10	2.4E-10
	吸入摂取	S	2.4E-10	2.4E-10
⁷² Zn	経口摂取	全ての化合物	1.4E-09	1.4E-09
	吸入摂取	S	1.5E-09	1.5E-09
⁸⁰ Sr	経口摂取	不特定の化合物	3.8E-10	3.8E-10
		チタン酸ストロンチウム	3.9E-10	3.9E-10
	吸入摂取	F	1.5E-10	1.5E-10
		S	2.5E-10	2.5E-10
⁸¹ Sr	経口摂取	不特定の化合物	6.7E-11	6.7E-11
		チタン酸ストロンチウム	6.8E-11	6.8E-11
	吸入摂取	F	3.5E-11	3.5E-11
		S	5.5E-11	5.4E-11
⁸² Sr	経口摂取	不特定の化合物	6.2E-09	6.2E-09
		チタン酸ストロンチウム	6.1E-09	6.0E-09
	吸入摂取	F	3.3E-09	3.3E-09
		S	7.7E-09	7.7E-09
⁸³ Sr	経口摂取	不特定の化合物	5.1E-10	5.1E-10
		チタン酸ストロンチウム	6.1E-10	6.1E-10
	吸入摂取	F	3.2E-10	3.2E-10
		S	5.1E-10	5.2E-10
⁸⁵ Sr	経口摂取	不特定の化合物	5.5E-10	5.5E-10
		チタン酸ストロンチウム	3.2E-10	3.2E-10
	吸入摂取	F	5.5E-10	5.5E-10
		S	6.4E-10	6.4E-10
^{85m} Sr	経口摂取	不特定の化合物	6.0E-12	6.0E-12
		チタン酸ストロンチウム	6.1E-12	6.1E-12
	吸入摂取	F	5.7E-12	5.7E-12
		S	7.5E-12	7.6E-12
^{87m} Sr	経口摂取	不特定の化合物	3.0E-11	3.0E-11
		チタン酸ストロンチウム	3.3E-11	3.3E-11
	吸入摂取	F	2.3E-11	2.3E-11
		S	3.6E-11	3.6E-11

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (4/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
⁸⁹ Sr	経口摂取	不特定の化合物	2.6E-09	2.6E-09
		チタン酸ストロンチウム	2.3E-09	2.3E-09
	吸入摂取	F	1.4E-09	1.4E-09
		S	5.6E-09	5.6E-09
⁹⁰ Sr	経口摂取	不特定の化合物	2.8E-08	2.8E-08
		チタン酸ストロンチウム	2.7E-09	2.7E-09
	吸入摂取	F	3.0E-08	3.0E-08
		S	7.7E-08	7.7E-08
⁹¹ Sr	経口摂取	不特定の化合物	6.6E-10	6.6E-10
		チタン酸ストロンチウム	7.8E-10	7.8E-10
	吸入摂取	F	2.9E-10	2.9E-10
		S	5.8E-10	5.8E-10
⁹² Sr	経口摂取	不特定の化合物	4.2E-10	4.2E-10
		チタン酸ストロンチウム	4.9E-10	4.9E-10
	吸入摂取	F	1.8E-10	1.8E-10
		S	3.4E-10	3.4E-10
⁸⁶ Y	経口摂取	全ての化合物	9.6E-10	9.6E-10
	吸入摂取	M	8.0E-10	8.0E-10
		S	8.2E-10	8.2E-10
^{86m} Y	経口摂取	全ての化合物	5.6E-11	5.6E-11
	吸入摂取	M	4.8E-11	4.8E-11
		S	4.9E-11	4.9E-11
⁸⁷ Y	経口摂取	全ての化合物	5.5E-10	5.5E-10
	吸入摂取	M	5.1E-10	5.1E-10
		S	5.3E-10	5.3E-10
⁸⁸ Y	経口摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.3E-09
	吸入摂取	M	3.3E-09	3.3E-09
		S	3.1E-09	3.1E-09
⁹⁰ Y	経口摂取	全ての化合物	2.7E-09	2.7E-09
	吸入摂取	M	1.6E-09	1.6E-09
		S	1.7E-09	1.7E-09
^{90m} Y	経口摂取	全ての化合物	1.7E-10	1.7E-10
	吸入摂取	M	1.3E-10	1.3E-10
		S	1.4E-10	1.4E-10
⁹¹ Y	経口摂取	全ての化合物	2.4E-09	2.4E-09
	吸入摂取	M	5.2E-09	5.2E-09
		S	6.1E-09	6.1E-09
^{91m} Y	経口摂取	全ての化合物	1.2E-11	1.2E-11
	吸入摂取	M	1.5E-11	1.5E-11
		S	1.5E-11	1.5E-11

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (5/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
⁹² Y	経口摂取	全ての化合物	5.0E-10	5.0E-10
	吸入摂取	M	2.7E-10	2.7E-10
		S	2.8E-10	2.8E-10
⁹³ Y	経口摂取	全ての化合物	1.2E-09	1.2E-09
	吸入摂取	M	5.7E-10	5.7E-10
		S	6.0E-10	6.0E-10
⁹⁴ Y	経口摂取	全ての化合物	8.4E-11	8.5E-11
	吸入摂取	M	4.3E-11	4.3E-11
		S	4.5E-11	4.5E-11
⁹⁵ Y	経口摂取	全ての化合物	4.3E-11	4.3E-11
	吸入摂取	M	2.4E-11	2.4E-11
		S	2.5E-11	2.5E-11
⁸⁶ Zr	経口摂取	全ての化合物	8.6E-10	8.6E-10
	吸入摂取	F	5.2E-10	5.2E-10
		M	6.8E-10	6.8E-10
		S	7.0E-10	7.0E-10
⁸⁸ Zr	経口摂取	全ての化合物	3.3E-10	3.3E-10
	吸入摂取	F	4.1E-09	4.1E-09
		M	1.7E-09	1.7E-09
		S	1.8E-09	1.8E-09
⁸⁹ Zr	経口摂取	全ての化合物	7.9E-10	7.9E-10
	吸入摂取	F	5.3E-10	5.3E-10
		M	7.3E-10	7.3E-10
		S	7.5E-10	7.5E-10
⁹³ Zr	経口摂取	全ての化合物	2.8E-10	2.8E-10
	吸入摂取	F	2.8E-08	2.8E-08
		M	6.4E-09	6.4E-09
		S	1.6E-09	1.6E-09
⁹⁵ Zr	経口摂取	全ての化合物	8.9E-10	8.9E-10
	吸入摂取	F	3.1E-09	2.9E-09 ^a
		M	3.6E-09	3.6E-09
		S	4.2E-09	4.3E-09
⁹⁷ Zr	経口摂取	全ての化合物	2.1E-09	2.1E-09
	吸入摂取	F	7.5E-10	7.5E-10
		M	1.3E-09	1.3E-09
		S	1.4E-09	1.4E-09
⁸⁸ Nb	経口摂取	全ての化合物	7.2E-11	7.2E-11
	吸入摂取	M	5.1E-11	5.1E-11
		S	5.3E-11	5.3E-11

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (6/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
⁸⁹ Nb	経口摂取	全ての化合物	2.7E-10	2.9E-10 ^b
		吸入摂取	M	1.8E-10
		S	1.9E-10	1.9E-10
^{89m} Nb	経口摂取	全ての化合物	1.4E-10	1.4E-10
		吸入摂取	M	1.1E-10
		S	1.2E-10	1.2E-10
⁹⁰ Nb	経口摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.2E-09
		吸入摂取	M	1.0E-09
		S	1.1E-09	1.1E-09
^{93m} Nb	経口摂取	全ての化合物	1.3E-10	1.3E-10
		吸入摂取	M	3.1E-10
		S	9.3E-10	9.3E-10
⁹⁴ Nb	経口摂取	全ての化合物	1.7E-09	1.7E-09
		吸入摂取	M	7.2E-09
		S	2.5E-08	2.5E-08
⁹⁵ Nb	経口摂取	全ての化合物	5.9E-10	5.9E-10
		吸入摂取	M	1.3E-09
		S	1.3E-09	1.3E-09
^{95m} Nb	経口摂取	全ての化合物	6.1E-10	6.1E-10
		吸入摂取	M	7.9E-10
		S	8.6E-10	9.0E-10 ^c
⁹⁶ Nb	経口摂取	全ての化合物	1.1E-09	1.1E-09
		吸入摂取	M	9.8E-10
		S	1.0E-09	1.0E-09
⁹⁷ Nb	経口摂取	全ての化合物	6.9E-11	6.9E-11
		吸入摂取	M	6.9E-11
		S	7.3E-11	7.3E-11
^{98m} Nb	経口摂取	全ての化合物	1.1E-10	1.1E-10
		吸入摂取	M	9.9E-11
		S	1.0E-10	1.0E-10
⁹⁰ Mo	経口摂取	不特定の化合物	3.1E-10	3.1E-10
		硫化モリブデン	6.1E-10	6.1E-10
	吸入摂取	F	2.9E-10	2.9E-10
	M	5.5E-10	5.6E-10	
⁹³ Mo	経口摂取	不特定の化合物	2.3E-09	2.3E-09
		硫化モリブデン	1.8E-10	1.8E-10
	吸入摂取	F	1.3E-09	1.3E-09
	M	1.1E-09	1.1E-09	

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (7/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
^{93m} Mo	経口摂取	不特定の化合物	1.6E-10	1.7E-10
		硫化モリブデン	2.9E-10	2.9E-10
	吸入摂取	F	2.0E-10	2.1E-10
		M	3.1E-10	3.2E-10
⁹⁹ Mo	経口摂取	不特定の化合物	7.4E-10	7.3E-10
		硫化モリブデン	1.2E-09	1.2E-09
	吸入摂取	F	3.6E-10	3.6E-10
		M	1.1E-09	1.1E-09
¹⁰¹ Mo	経口摂取	不特定の化合物	4.1E-11	4.1E-11
		硫化モリブデン	4.2E-11	4.2E-11
	吸入摂取	F	2.7E-11	2.7E-11
		M	4.5E-11	4.5E-11
⁹³ Tc	経口摂取	全ての化合物	6.6E-11	6.6E-11
	吸入摂取	F	7.6E-11	7.6E-11
		M	8.3E-11	8.3E-11
^{93m} Tc	経口摂取	全ての化合物	3.1E-11	3.1E-11
	吸入摂取	F	3.2E-11	3.2E-11
		M	3.7E-11	3.7E-11
⁹⁴ Tc	経口摂取	全ての化合物	1.8E-10	1.8E-10
	吸入摂取	F	2.1E-10	2.1E-10
		M	2.2E-10	2.3E-10
^{94m} Tc	経口摂取	全ての化合物	1.1E-10	1.1E-10
	吸入摂取	F	7.0E-11	7.1E-11
		M	8.2E-11	8.2E-11
⁹⁵ Tc	経口摂取	全ての化合物	1.7E-10	1.7E-10
	吸入摂取	F	1.8E-10	1.8E-10
		M	1.8E-10	1.8E-10
^{95m} Tc	経口摂取	全ての化合物	6.4E-10	6.4E-10
	吸入摂取	F	4.9E-10	4.9E-10
		M	8.8E-10	8.8E-10
⁹⁶ Tc	経口摂取	全ての化合物	1.1E-09	1.1E-09
	吸入摂取	F	9.9E-10	1.0E-09
		M	1.1E-09	1.1E-09
^{96m} Tc	経口摂取	全ての化合物	1.3E-11	1.3E-11
	吸入摂取	F	1.1E-11	1.1E-11
		M	1.1E-11	1.1E-11
⁹⁷ Tc	経口摂取	全ての化合物	8.4E-11	8.4E-11
	吸入摂取	F	7.3E-11	7.2E-11
		M	1.7E-10	1.7E-10

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (8/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
^{97m} Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	6.6E-10	6.6E-10
		F	4.0E-10	4.0E-10
		M	2.7E-09	2.7E-09
⁹⁸ Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.2E-09	2.2E-09
		F	1.4E-09	1.4E-09
		M	5.7E-09	5.7E-09
⁹⁹ Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	7.8E-10	7.8E-10
		F	4.0E-10	4.0E-10
		M	3.2E-09	3.2E-09
^{99m} Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.2E-11	2.2E-11
		F	2.0E-11	2.0E-11
		M	2.9E-11	2.8E-11
¹⁰¹ Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.9E-11	1.9E-11
		F	1.5E-11	1.5E-11
		M	2.1E-11	2.1E-11
¹⁰⁴ Tc	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	8.3E-11	8.3E-11
		F	4.0E-11	4.0E-11
		M	5.0E-11	5.0E-11
⁹⁴ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	9.5E-11	9.5E-11
		F	5.1E-11	5.1E-11
		M	7.3E-11	7.3E-11
⁹⁷ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.5E-10	1.5E-10
		F	1.2E-10	1.2E-10
		M	1.6E-10	1.6E-10
¹⁰³ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.6E-10	1.6E-10
		F	7.1E-10	7.1E-10
		M	6.8E-10	6.8E-10
¹⁰⁵ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.8E-09	1.8E-09
		F	2.1E-09	2.1E-09
		M	2.8E-10	2.8E-10
¹⁰⁶ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.8E-10	2.8E-10
		F	7.0E-09	7.0E-09
		M	9.9E-09	9.9E-09
¹⁰⁶ Ru	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.7E-08	1.7E-08
		F	3.5E-08	3.5E-08
		S	7.0E-09	7.0E-09

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (9/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹¹⁵ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.4E-11	2.4E-11
		F	1.6E-11	1.6E-11
		M	2.3E-11	2.3E-11
¹¹⁶ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	3.0E-11	3.0E-11
		F	1.9E-11	1.9E-11
		M	2.6E-11	2.6E-11
^{116m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	6.5E-11	6.5E-11
		F	6.3E-11	6.3E-11
		M	8.3E-11	8.3E-11
¹¹⁷ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.8E-11	1.8E-11
		F	1.7E-11	1.7E-11
		M	2.7E-11	2.7E-11
^{118m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.1E-10	2.1E-10
		F	1.9E-10	1.9E-10
		M	2.3E-10	2.3E-10
¹¹⁹ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	8.2E-11	8.3E-11
		F	4.4E-11	4.5E-11
		M	5.9E-11	6.0E-11
¹²⁰ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.4E-11	1.4E-11
		F	8.5E-12	8.5E-12
		M	1.2E-11	1.2E-11
^{120m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.3E-09
		F	9.8E-10	9.8E-10
		M	1.3E-09	1.3E-09
¹²² Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.7E-09	1.7E-09
		F	6.4E-10	6.4E-10
		M	1.2E-09	1.2E-09
¹²⁴ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.6E-09	2.5E-09
		F	2.0E-09	1.9E-09
		M	4.7E-09	4.7E-09
^{124m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	8.5E-13	8.5E-13
		F	1.0E-12	1.0E-12
		M	1.1E-12	1.1E-12
¹²⁵ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.1E-09	1.1E-09
		F	1.8E-09	1.7E-09
		M	3.4E-09	3.4E-09
¹²⁶ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.7E-09	2.7E-09
		F	1.8E-09	1.8E-09
		M	3.4E-09	3.4E-09

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (10/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
^{126m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	3.8E-11	3.8E-11
		F	2.3E-11	2.4E-11
		M	3.4E-11	3.4E-11
¹²⁷ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.7E-09	1.7E-09
		F	7.5E-10	7.6E-10
		M	1.7E-09	1.8E-09
¹²⁸ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	8.1E-10	8.2E-10
		F	4.8E-10	4.8E-10
		M	7.0E-10	7.0E-10
^{128m} Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	3.4E-11	3.4E-11
		F	1.9E-11	1.9E-11
		M	2.6E-11	2.6E-11
¹²⁹ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	4.3E-10	4.3E-10
		F	2.0E-10	2.0E-10
		M	3.6E-10	3.6E-10
¹³⁰ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	9.4E-11	9.4E-11
		F	6.4E-11	6.4E-11
		M	9.2E-11	9.2E-11
¹³¹ Sb	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.0E-10	7.3E-11 ^d
		F	7.8E-11	4.3E-11 ^d
		M	1.2E-10	7.1E-11 ^d
¹¹⁶ Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.0E-10	2.0E-10
		F	1.3E-10	1.3E-10
		M	1.9E-10	1.9E-10
¹²¹ Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	4.6E-10	4.6E-10
		F	4.1E-10	4.1E-10
		M	4.6E-10	4.6E-10
^{121m} Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	2.4E-09	2.4E-09
		F	2.4E-09	2.4E-09
		M	3.7E-09	3.7E-09
¹²³ Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.4E-09	1.4E-09
		F	1.5E-09	1.5E-09
		M	8.6E-10	8.6E-10
^{123m} Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	1.4E-09	1.4E-09
		F	1.2E-09	1.2E-09
		M	3.4E-09	3.4E-09
^{125m} Te	経口摂取 吸入摂取	全ての化合物	8.7E-10	8.7E-10
		F	6.7E-10	6.7E-10
		M	2.9E-09	2.9E-09

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (11/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹²⁷ Te	経口摂取	全ての化合物	1.7E-10	1.7E-10
	吸入摂取	F	7.3E-11	7.3E-11
		M	1.8E-10	1.8E-10
^{127m} Te	経口摂取	全ての化合物	2.4E-09	2.5E-09
	吸入摂取	F	2.0E-09	2.2E-09 ^a
		M	6.2E-09	6.2E-09
¹²⁹ Te	経口摂取	全ての化合物	6.3E-11	6.3E-11
	吸入摂取	F	2.9E-11	2.9E-11
		M	5.7E-11	5.7E-11
^{129m} Te	経口摂取	全ての化合物	3.0E-09	3.0E-09
	吸入摂取	F	1.8E-09	1.8E-09
		M	5.4E-09	5.4E-09
¹³¹ Te	経口摂取	全ての化合物	8.7E-11	8.7E-11
	吸入摂取	F	4.6E-11	4.6E-11
		M	6.1E-11	6.0E-11
^{131m} Te	経口摂取	全ての化合物	1.9E-09	1.9E-09
	吸入摂取	F	1.2E-09	1.2E-09
		M	1.6E-09	1.6E-09
¹³² Te	経口摂取	全ての化合物	3.8E-09	3.8E-09
	吸入摂取	F	2.4E-09	2.4E-09
		M	3.1E-09	3.1E-09
¹³³ Te	経口摂取	全ての化合物	1.5E-10	3.0E-11 ^d
	吸入摂取	F	6.7E-11	2.0E-11 ^d
		M	6.3E-11	2.9E-11 ^d
^{133m} Te	経口摂取	全ての化合物	6.2E-10	9.4E-11 ^d
	吸入摂取	F	2.9E-10	7.0E-11 ^d
		M	2.8E-10	1.1E-10 ^d
¹³⁴ Te	経口摂取	全ての化合物	9.8E-11	9.8E-11
	吸入摂取	F	8.0E-11	8.0E-11
		M	1.1E-10	1.1E-10
¹²⁰ I	経口摂取	全ての化合物	2.9E-10	2.9E-10
	吸入摂取	蒸気	2.5E-10	2.5E-10
		F	1.7E-10	1.7E-10
^{120m} I	経口摂取	全ての化合物	1.6E-10	1.6E-10
	吸入摂取	蒸気	1.3E-10	1.3E-10
		F	1.0E-10	1.0E-10
¹²¹ I	経口摂取	全ての化合物	7.5E-11	7.5E-11
	吸入摂取	蒸気	7.9E-11	7.9E-11
		F	3.6E-11	5.0E-11 ^b

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (12/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹²³ I	経口摂取	全ての化合物	2.2E-10	2.2E-10
	吸入摂取	蒸気	2.1E-10	2.1E-10
		F	1.1E-10	1.1E-10
¹²⁴ I	経口摂取	全ての化合物	1.3E-08	1.3E-08
	吸入摂取	蒸気	1.2E-08	1.2E-08
		F	6.3E-09	6.3E-09
¹²⁵ I	経口摂取	全ての化合物	1.5E-08	1.5E-08
	吸入摂取	蒸気	1.4E-08	1.4E-08
		F	7.3E-09	7.3E-09
¹²⁶ I	経口摂取	全ての化合物	2.9E-08	2.9E-08
	吸入摂取	蒸気	2.7E-08	2.7E-08
		F	1.4E-08	1.4E-08
¹²⁸ I	経口摂取	全ての化合物	4.6E-11	4.6E-11
	吸入摂取	蒸気	6.4E-11	6.4E-11
		F	2.2E-11	2.2E-11
¹²⁹ I	経口摂取	全ての化合物	1.1E-07	1.1E-07
	吸入摂取	蒸気	9.8E-08	9.8E-08
		F	5.2E-08	5.2E-08
¹³⁰ I	経口摂取	全ての化合物	1.9E-09	1.9E-09
	吸入摂取	蒸気	1.8E-09	1.8E-09
		F	9.2E-10	9.2E-10
¹³¹ I	経口摂取	全ての化合物	2.2E-08	2.2E-08
	吸入摂取	蒸気	2.0E-08	2.0E-08
		F	1.1E-08	1.1E-08
¹³² I	経口摂取	全ての化合物	2.8E-10	2.8E-10
	吸入摂取	蒸気	3.1E-10	3.1E-10
		F	2.0E-10	2.0E-10
^{132m} I	経口摂取	全ての化合物	7.3E-11	2.2E-10 ^d
	吸入摂取	蒸気	1.3E-10	2.7E-10 ^d
		F	7.6E-11	1.1E-10 ^d
¹³³ I	経口摂取	全ての化合物	4.3E-09	4.3E-09
	吸入摂取	蒸気	4.0E-09	4.0E-09
		F	2.1E-09	2.1E-09
¹³⁴ I	経口摂取	全ての化合物	1.0E-10	1.0E-10
	吸入摂取	蒸気	1.4E-10	1.4E-10
		F	7.7E-11	7.8E-11
¹³⁵ I	経口摂取	全ての化合物	8.9E-10	8.9E-10
	吸入摂取	蒸気	8.8E-10	8.8E-10
		F	4.4E-10	4.4E-10
¹²⁵ Cs	経口摂取	全ての化合物	3.5E-11	3.5E-11
	吸入摂取	F	2.1E-11	2.1E-11

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (13/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹²⁷ Cs	経口摂取	全ての化合物	2.5E-11	2.5E-11
	吸入摂取	F	4.1E-11	4.1E-11
¹²⁹ Cs	経口摂取	全ての化合物	6.1E-11	6.0E-11
	吸入摂取	F	8.0E-11	8.0E-11
¹³⁰ Cs	経口摂取	全ての化合物	2.7E-11	2.7E-11
	吸入摂取	F	1.4E-11	1.4E-11
¹³¹ Cs	経口摂取	全ての化合物	5.8E-11	5.8E-11
	吸入摂取	F	4.5E-11	4.6E-11
¹³² Cs	経口摂取	全ての化合物	5.2E-10	5.2E-10
	吸入摂取	F	3.9E-10	3.9E-10
¹³⁴ Cs	経口摂取	全ての化合物	1.9E-08	1.9E-08
	吸入摂取	F	9.7E-09	9.7E-09
^{134m} Cs	経口摂取	全ての化合物	2.0E-11	2.0E-11
	吸入摂取	F	2.7E-11	2.6E-11
¹³⁵ Cs	経口摂取	全ての化合物	2.7E-09	2.7E-09
	吸入摂取	F	1.3E-09	1.3E-09
^{135m} Cs	経口摂取	全ての化合物	1.9E-11	1.9E-11
	吸入摂取	F	2.4E-11	2.4E-11
¹³⁶ Cs	経口摂取	全ての化合物	3.0E-09	3.1E-09
	吸入摂取	F	1.9E-09	1.9E-09
¹³⁷ Cs	経口摂取	全ての化合物	1.4E-08	1.4E-08
	吸入摂取	F	6.8E-09	6.7E-09
¹³⁸ Cs	経口摂取	全ての化合物	9.7E-11	9.7E-11
	吸入摂取	F	4.8E-11	4.8E-11
¹²⁶ Ba	経口摂取	全ての化合物	2.5E-10	2.6E-10
	吸入摂取	F	1.3E-10	1.3E-10
¹²⁸ Ba	経口摂取	全ての化合物	2.8E-09	2.8E-09
	吸入摂取	F	1.2E-09	1.2E-09
¹³¹ Ba	経口摂取	全ての化合物	4.6E-10	4.6E-10
	吸入摂取	F	3.6E-10	3.6E-10
^{131m} Ba	経口摂取	全ての化合物	5.0E-12	5.0E-12
	吸入摂取	F	6.4E-12	6.4E-12
¹³³ Ba	経口摂取	全ての化合物	1.0E-09	1.0E-09
	吸入摂取	F	1.8E-09	1.8E-09
^{133m} Ba	経口摂取	全ての化合物	5.7E-10	5.7E-10
	吸入摂取	F	2.9E-10	2.9E-10
^{135m} Ba	経口摂取	全ての化合物	4.5E-10	4.5E-10
	吸入摂取	F	2.3E-10	2.4E-10
^{137m} Ba	経口摂取	全ての化合物	1.0E-12	1.0E-12
	吸入摂取	F	1.0E-12	1.0E-12

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (14/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹³⁹ Ba	経口摂取	全ての化合物	1.2E-10	1.2E-10
	吸入摂取	F	5.5E-11	5.5E-11
¹⁴⁰ Ba	経口摂取	全ての化合物	2.5E-09	2.5E-09
	吸入摂取	F	1.6E-09	1.6E-09
¹⁴¹ Ba	経口摂取	全ての化合物	7.4E-11	7.4E-11
	吸入摂取	F	3.7E-11	3.7E-11
¹⁴² Ba	経口摂取	全ての化合物	3.4E-11	3.4E-11
	吸入摂取	F	2.6E-11	2.6E-11
¹⁸² Ir	経口摂取	全ての化合物	5.2E-11	5.2E-11
		F	2.8E-11	2.8E-11
		M	4.1E-11	4.1E-11
		S	4.3E-11	4.2E-11
¹⁸⁴ Ir	経口摂取	全ての化合物	1.9E-10	1.9E-10
		F	1.3E-10	1.3E-10
		M	2.0E-10	2.0E-10
		S	2.0E-10	2.0E-10
¹⁸⁵ Ir	経口摂取	全ての化合物	3.3E-10	3.3E-10
		F	2.0E-10	2.0E-10
		M	3.1E-10	3.1E-10
		S	3.3E-10	3.3E-10
¹⁸⁶ Ir	経口摂取	全ての化合物	5.6E-10	5.6E-10
		F	3.6E-10	3.6E-10
		M	5.3E-10	5.3E-10
		S	5.5E-10	5.5E-10
^{186m} Ir	経口摂取	全ての化合物	7.3E-11	7.3E-11
		F	5.8E-11	5.7E-11
		M	8.1E-11	8.1E-11
		S	8.4E-11	8.4E-11
¹⁸⁷ Ir	経口摂取	全ての化合物	1.1E-10	1.1E-10
		F	6.6E-11	6.7E-11
		M	1.1E-10	1.1E-10
		S	1.1E-10	1.1E-10
¹⁸⁸ Ir	経口摂取	全ての化合物	7.6E-10	7.6E-10
		F	5.6E-10	5.6E-10
		M	7.2E-10	7.2E-10
		S	7.4E-10	7.4E-10
¹⁸⁹ Ir	経口摂取	全ての化合物	2.4E-10	2.4E-10
		F	1.6E-10	1.6E-10
		M	3.9E-10	3.9E-10
		S	4.4E-10	4.4E-10

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (15/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹⁹⁰ Ir	経口摂取	全ての化合物	1.1E-09	1.1E-09
		吸入摂取	1.1E-09	1.1E-09
	吸入摂取	F	1.1E-09	1.1E-09
		M	1.5E-09	1.5E-09
^{190m} Ir	経口摂取	全ての化合物	7.0E-12	7.0E-12
		吸入摂取	4.9E-12	4.9E-12
	吸入摂取	F	4.9E-12	4.9E-12
		M	6.9E-12	6.9E-12
¹⁹² Ir	経口摂取	全ての化合物	1.4E-09	1.4E-09
		吸入摂取	2.2E-09	2.2E-09
	吸入摂取	F	2.2E-09	2.2E-09
		M	4.1E-09	4.1E-09
¹⁹²ⁿ Ir	経口摂取	全ての化合物	9.1E-10	9.1E-10
		吸入摂取	8.1E-09	8.1E-09
	吸入摂取	F	8.1E-09	8.1E-09
		M	8.4E-09	8.4E-09
^{193m} Ir	経口摂取	全ての化合物	2.9E-10	2.9E-10
		吸入摂取	1.5E-10	1.5E-10
	吸入摂取	F	1.5E-10	1.5E-10
		M	8.8E-10	8.9E-10
¹⁹⁴ Ir	経口摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.3E-09
		吸入摂取	3.6E-10	3.6E-10
	吸入摂取	F	3.6E-10	3.6E-10
		M	7.1E-10	7.1E-10
^{194m} Ir	経口摂取	全ての化合物	2.1E-09	2.1E-09
		吸入摂取	6.5E-09	6.5E-09
	吸入摂取	F	6.5E-09	6.5E-09
		M	6.1E-09	6.1E-09
¹⁹⁵ Ir	経口摂取	全ての化合物	1.0E-10	1.0E-10
		吸入摂取	4.5E-11	4.5E-11
	吸入摂取	F	4.5E-11	4.5E-11
		M	9.7E-11	9.7E-11
^{195m} Ir	経口摂取	全ての化合物	1.4E-10	1.4E-10
		吸入摂取	7.7E-11	7.7E-11
	吸入摂取	F	7.7E-11	7.7E-11
		M	1.6E-10	1.6E-10
^{195m} Pb	経口摂取	全ての化合物	2.8E-11	2.8E-11
		吸入摂取	2.8E-11	2.8E-11
	吸入摂取	F	2.8E-11	2.8E-11
		M	2.8E-11	2.8E-11
¹⁹⁸ Pb	経口摂取	全ての化合物	1.1E-10	1.1E-10
	吸入摂取	F	8.8E-11	8.8E-11

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (16/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
¹⁹⁹ Pb	経口摂取	全ての化合物	4.6E-11	4.6E-11
	吸入摂取	F	3.8E-11	3.8E-11
²⁰⁰ Pb	経口摂取	全ての化合物	4.0E-10	4.0E-10
	吸入摂取	F	2.6E-10	2.6E-10
²⁰¹ Pb	経口摂取	全ての化合物	1.6E-10	1.6E-10
	吸入摂取	F	1.2E-10	1.2E-10
²⁰² Pb	経口摂取	全ての化合物	1.5E-08	1.6E-08
	吸入摂取	F	2.5E-08	2.5E-08
^{202m} Pb	経口摂取	全ての化合物	1.5E-10	1.5E-10
	吸入摂取	F	1.3E-10	1.3E-10
²⁰³ Pb	経口摂取	全ての化合物	2.5E-10	2.5E-10
	吸入摂取	F	1.6E-10	1.6E-10
²⁰⁵ Pb	経口摂取	全ての化合物	2.7E-10	2.7E-10
	吸入摂取	F	4.0E-10	4.0E-10
²⁰⁹ Pb	経口摂取	全ての化合物	5.7E-11	5.7E-11
	吸入摂取	F	3.2E-11	3.2E-11
²¹¹ Pb	経口摂取	全ての化合物	1.8E-10	1.8E-10
	吸入摂取	F	5.6E-09	5.5E-09
²¹² Pb	経口摂取	全ての化合物	6.0E-09	6.0E-09
	吸入摂取	F	3.4E-08	3.4E-08
²¹⁴ Pb	経口摂取	全ての化合物	1.5E-10	1.5E-10
	吸入摂取	F	5.0E-09	5.0E-09
²⁰⁰ Bi	経口摂取	全ての化合物	5.6E-11	5.6E-11
	吸入摂取	F	4.5E-11	4.5E-11
		M	6.0E-11	6.1E-11
²⁰¹ Bi	経口摂取	全ての化合物	1.2E-10	1.2E-10
	吸入摂取	F	9.3E-11	9.4E-11
		M	1.2E-10	1.2E-10
²⁰² Bi	経口摂取	全ての化合物	1.0E-10	1.0E-10
	吸入摂取	F	9.2E-11	9.2E-11
		M	1.1E-10	1.1E-10
²⁰³ Bi	経口摂取	全ての化合物	4.9E-10	4.9E-10
	吸入摂取	F	3.7E-10	3.7E-10
		M	4.7E-10	4.7E-10
²⁰⁵ Bi	経口摂取	全ての化合物	9.1E-10	9.1E-10
	吸入摂取	F	6.9E-10	6.9E-10
		M	1.0E-09	1.0E-09
²⁰⁶ Bi	経口摂取	全ての化合物	1.9E-09	1.9E-09
	吸入摂取	F	1.4E-09	1.4E-09
		M	2.1E-09	2.1E-09

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (17/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
²⁰⁷ Bi	経口摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.3E-09
	吸入摂取	F	8.5E-10	8.5E-10
		M	3.2E-09	3.2E-09
²¹⁰ Bi	経口摂取	全ての化合物	1.3E-09	1.3E-09
	吸入摂取	F	1.4E-09	1.4E-09
		M	6.0E-08	6.0E-08
^{210m} Bi	経口摂取	全ての化合物	1.5E-08	1.5E-08
	吸入摂取	F	5.4E-08	5.4E-08
		M	2.1E-06	2.1E-06
²¹² Bi	経口摂取	全ての化合物	2.6E-10	2.6E-10
	吸入摂取	F	1.5E-08	1.5E-08
		M	3.9E-08	3.9E-08
²¹³ Bi	経口摂取	全ての化合物	2.0E-10	2.0E-10
	吸入摂取	F	1.8E-08	1.8E-08
		M	4.1E-08	4.1E-08
²¹⁴ Bi	経口摂取	全ての化合物	1.1E-10	1.1E-10
	吸入摂取	F	1.2E-08	1.2E-08
		M	2.2E-08	2.1E-08
²⁰³ Po	経口摂取	全ての化合物	5.3E-11	5.3E-11
	吸入摂取	F	4.8E-11	4.8E-11
		M	6.9E-11	6.9E-11
²⁰⁵ Po	経口摂取	全ての化合物	5.6E-11	5.6E-11
	吸入摂取	F	5.4E-11	5.4E-11
		M	7.0E-11	7.1E-11
²⁰⁷ Po	経口摂取	全ての化合物	1.4E-10	1.4E-10
	吸入摂取	F	1.1E-10	1.1E-10
		M	1.5E-10	1.5E-10
²¹⁰ Po	経口摂取	全ての化合物	2.5E-07	2.4E-07
	吸入摂取	F	7.3E-07	7.2E-07
		M	2.2E-06	2.2E-06
²²³ Ra	経口摂取	全ての化合物	1.0E-07	1.0E-07
	吸入摂取	M	5.6E-06	5.7E-06
²²⁴ Ra	経口摂取	全ての化合物	6.5E-08	6.4E-08
	吸入摂取	M	2.3E-06	2.4E-06
²²⁵ Ra	経口摂取	全ての化合物	1.0E-07	9.9E-08
	吸入摂取	M	4.8E-06	4.8E-06
²²⁶ Ra	経口摂取	全ての化合物	2.8E-07	1.6E-06 ^e
	吸入摂取	M	2.2E-06	2.6E-05 ^e
²²⁷ Ra	経口摂取	全ての化合物	8.2E-11	8.2E-11
	吸入摂取	M	2.0E-10	2.0E-10

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (18/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
²²⁸ Ra	経口摂取	全ての化合物	7.0E-07	6.8E-07 ^f
	吸入摂取	M	1.7E-06	1.7E-06
²²⁶ Th	経口摂取	不特定の化合物	3.5E-10	3.6E-10
		酸化物及び水酸化物	3.5E-10	3.5E-10
	吸入摂取	M	7.3E-08	7.3E-08
		S	7.8E-08	7.8E-08
²²⁷ Th	経口摂取	不特定の化合物	9.1E-09	9.1E-09
		酸化物及び水酸化物	8.3E-09	8.3E-09
	吸入摂取	M	6.2E-06	6.2E-06
		S	7.6E-06	7.6E-06
²²⁸ Th	経口摂取	不特定の化合物	7.2E-08	7.1E-08
		酸化物及び水酸化物	3.5E-08	3.5E-08
	吸入摂取	M	2.2E-05	2.3E-05
		S	2.5E-05	3.2E-05 ^f
²²⁹ Th	経口摂取	不特定の化合物	5.0E-07	4.8E-07 ^f
		酸化物及び水酸化物	2.0E-07	2.0E-07
	吸入摂取	M	7.1E-05	6.9E-05 ^f
		S	4.8E-05	4.8E-05
²³⁰ Th	経口摂取	不特定の化合物	2.2E-07	2.3E-07
		酸化物及び水酸化物	9.2E-08	9.3E-08
	吸入摂取	M	2.9E-05	2.9E-05
		S	7.4E-06	7.4E-06
²³¹ Th	経口摂取	不特定の化合物	3.3E-10	3.3E-10
		酸化物及び水酸化物	3.3E-10	3.3E-10
	吸入摂取	M	3.7E-10	3.7E-10
		S	3.9E-10	3.9E-10
²³² Th	経口摂取	不特定の化合物	2.3E-07	2.2E-07
		酸化物及び水酸化物	9.4E-08	9.2E-08 ^f
	吸入摂取	M	2.9E-05	2.9E-05
		S	1.2E-05	1.2E-05
²³⁴ Th	経口摂取	不特定の化合物	3.4E-09	3.4E-09
		酸化物及び水酸化物	3.4E-09	3.4E-09
	吸入摂取	M	5.3E-09	5.3E-09
		S	5.9E-09	5.9E-09
²³⁰ U	経口摂取	不特定の化合物	5.6E-08	5.6E-08
		大部分の 4 価の化合物	2.7E-08	2.7E-08
	吸入摂取	F	4.5E-07	4.5E-07
		M	1.0E-05	1.0E-05
		S	1.2E-05	1.2E-05

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (19/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
²³¹ U	経口摂取	不特定の化合物	3.4E-10	3.4E-10
		大部分の4価の化合物	3.4E-10	3.4E-10
	吸入摂取	F	1.8E-10	1.8E-10
		M	4.7E-10	4.7E-10
		S	5.1E-10	5.1E-10
	²³² U	経口摂取	不特定の化合物	3.3E-07
大部分の4価の化合物			3.7E-08	3.5E-08 ^f
吸入摂取		F	4.7E-06	4.4E-06 ^f
		M	4.8E-06	4.8E-06
		S	2.5E-05	2.6E-05
²³³ U		経口摂取	不特定の化合物	5.1E-08
	大部分の4価の化合物		8.6E-09	8.3E-09 ^f
	吸入摂取	F	6.8E-07	6.3E-07 ^f
		M	2.2E-06	2.2E-06
		S	7.0E-06	7.0E-06
	²³⁴ U	経口摂取	不特定の化合物	5.0E-08
大部分の4価の化合物			8.4E-09	8.5E-09
吸入摂取		F	6.5E-07	6.5E-07
		M	2.1E-06	2.1E-06
		S	6.8E-06	6.8E-06
²³⁵ U		経口摂取	不特定の化合物	4.7E-08
	大部分の4価の化合物		8.4E-09	8.2E-09 ^f
	吸入摂取	F	6.1E-07	5.7E-07 ^f
		M	1.8E-06	1.8E-06
		S	6.1E-06	6.1E-06
	²³⁶ U	経口摂取	不特定の化合物	4.7E-08
大部分の4価の化合物			7.9E-09	8.0E-09
吸入摂取		F	6.2E-07	6.2E-07
		M	1.9E-06	1.9E-06
		S	6.3E-06	6.3E-06
²³⁷ U		経口摂取	不特定の化合物	7.8E-10
	大部分の4価の化合物		7.9E-10	7.9E-10
	吸入摂取	F	3.4E-10	3.5E-10
		M	1.5E-09	1.5E-09
		S	1.7E-09	1.7E-09
	²³⁸ U	経口摂取	不特定の化合物	4.4E-08
大部分の4価の化合物			7.6E-09	7.4E-09 ^f
吸入摂取		F	5.9E-07	5.5E-07 ^f
		M	1.7E-06	1.6E-06
		S	5.7E-06	5.7E-06

付表 1-1 DCAL と開発コードの実効線量係数の比較 (20/20)

核種	摂取経路	化学形または血液への吸収タイプ	実効線量係数 (Sv/Bq)	
			DCAL	開発コード
²³⁹ U	経口摂取	不特定の化合物	2.7E-11	2.7E-11
		大部分の 4 価の化合物	2.8E-11	2.8E-11
	吸入摂取	F	1.8E-11	1.8E-11
		M	3.3E-11	3.4E-11
		S	3.5E-11	3.5E-11
²⁴⁰ U	経口摂取	不特定の化合物	1.1E-09	1.1E-09
		大部分の 4 価の化合物	1.1E-09	1.1E-09
	吸入摂取	F	3.6E-10	3.7E-10
		M	7.6E-10	7.6E-10
		S	8.1E-10	8.1E-10

- ^a 骨領域の電子 SAF の取扱いの違い。
- ^b 残りの組織の等価線量の計算方法の違い。
- ^c 呼吸気道領域の電子 SAF の取扱いの違い。
- ^d 個別動態モデルと共通動態モデルの適用の違い。
- ^e 子孫核種としてのラドンの組織系動態モデルの違い。
- ^f Other 線源の取扱いの違い。

付録2 プログラムオフィサー（PO）会合、専門家との打合せ及び外部発表

1. PO との会合

・第1回 PO 会合

日付：令和元年8月28日

場所：日本原子力研究開発機構東京事務所（東京都千代田区）

出席者：

（研究推進委員会）古田定昭 PO、大町康 PO 補佐、小林駿司 PO 補佐

（主任研究員）高橋史明

（研究参加者）真辺健太郎

議題：

- (1) 本年度の実施計画及びこれまでの進捗
- (2) 事業の進捗状況
 - (2-1) 核種摂取量推定機能の検証
 - (2-2) 放射性セシウムの慢性摂取評価
 - (2-3) 新旧の実効線量係数等の分析
- (3) 線量評価コードβ版の概要
- (4) 今後のスケジュール、その他

・第2回 PO 会合

日付：令和元年11月27日

場所：日本原子力研究開発機構東京事務所（東京都千代田区）

出席者：

（研究推進委員会）古田定昭 PO、大町康 PO 補佐

（主任研究員）高橋史明

（研究参加者）真辺健太郎

（派遣労働者）渡嘉敷雄士

議題：

- (1) 事業の進捗状況
 - (1-1) 全体の進捗状況
 - (1-2) 核種摂取量推定機能の検証
 - (1-3) コードβ版の開発状況
- (2) ICRP における刊行物の公開予定及び検討状況
- (3) 今後のスケジュール、その他

2. 専門家との打合せ

- ・研究協力者（モニタリング従事者）との意見交換

日付：令和元年8月2日

場所：日本原子力研究開発機構原子力科学研究所（茨城県那珂郡東海村）

出席者：

（主任研究員）高橋史明

（研究協力者）滝本美咲、高橋聖

（研究参加者）佐藤薫、真辺健太郎

議題：

- (1) 機能面に関するニーズ
- (2) 操作面に関するニーズ
- (3) その他

3. 外部発表

- ・雑誌等掲載論文 1件

K. Manabe, K. Sato and F. Takahashi, Development of a Function Calculating Internal Dose Coefficients Based on ICRP 2007 Recommendations, *Bio Conf.* **14** 03011, 2019.

- ・日本原子力学会 2019年秋の大会 2件

日付：令和元年9月11日～13日

場所：富山大学五福キャンパス（富山県富山市）

1件目

発表者：（研究参加者）真辺健太郎

タイトル：ICRP 2007年勧告に基づく内部被ばく線量評価コードの核種摂取量推定機能の検証

2件目

発表者：（主任研究者）高橋史明

タイトル：ICRPによる新しい線量係数の分析（職業被ばくによる主要28元素の摂取）

- ・第7回日本放射線事故・災害医学会 年次学術集会

日付：令和元年9月21日

場所：良稜会館（宮城県仙台市）

発表者：（研究参加者）真辺健太郎

タイトル：ICRP 2007年勧告に対応した内部被ばく線量コード・核種摂取量推定機能の開発

- 5th Asian Radiation Dosimetry Group meeting (ARADOS5)
 - 日付：令和元年 11 月 6 日～7 日
 - 場所：Garden Hotel（中国、北京）
 - 発表者：（主任研究者）高橋史明
 - タイトル：Development of internal-dosimetry code based on ICRP 2007 Recommendations

- 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP 2019)
 - 日付：令和元年 11 月 18 日～21 日
 - 場所：Adelaide Convention Centre（豪州、アデレード）
 - 発表者：（研究参加者）真辺健太郎
 - タイトル：Development of a function for estimating intakes of radionuclides using the models and data based on ICRP 2007 Recommendations

- 第 2 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会 2 件
 - 日付：令和元年 12 月 4 日～7 日
 - 場所：東北大学青葉山新キャンパス（宮城県仙台市）
 - 1 件目
 - 発表者：（研究参加者）真辺健太郎
 - タイトル：放射性セシウムの慢性摂取による内部被ばく線量評価に対する体内動態モデル更新の影響
 - 2 件目
 - 発表者：（主任研究者）高橋史明
 - タイトル：ICRP 2007 年勧告に準拠する内部被ばく線量評価コードの開発

- 令和元年度研究成果報告会
 - 日付：令和 2 年 2 月 6 日
 - 場所：原子力規制委員会（東京都港区）
 - 発表者：（主任研究者）高橋史明
 - タイトル：内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究

- 日本原子力学会 2020 年春の年会（予稿集の公開のみ）
 - 発表者：（研究参加者）真辺健太郎
 - タイトル：ICRP 2007 年勧告に基づく内部被ばく線量評価コードの開発：コードβ版の開発

付録3 学会等発表資料一覧

1. 日本原子力学会 2019 年秋の大会 発表スライド 2 件 (pp. 74–85)
 - ・ ICRP 2007 年勧告に基づく内部被ばく線量評価コードの核種摂取量推定機能の検証
 - ・ ICRP による新しい線量係数の分析(職業被ばくによる主要 28 元素の摂取)
2. 日本原子力学会 2019 年秋の大会 発表ポスター1 件 (p. 86)
 - ・ ICRP 2007 年勧告に基づく内部被ばく線量評価コード・核種摂取量推定機能の開発
3. 5th Asian Radiation Dosimetry Group meeting (ARADOS-5) 発表スライド 1 件(pp. 87–92)
 - ・ Development of internal-dosimetry code based on ICRP 2007 Recommendations
4. 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP 2019)
発表ポスター1 件 (p. 93)
 - ・ Development of a function for estimating intakes of radionuclides using the models and data based on ICRP 2007 Recommendations
5. 第 2 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会 発表スライド 1 件及び
発表ポスター1 件 (pp. 94–101)
 - ・ 放射性セシウムの慢性摂取による内部被ばく線量評価に対する体内動態モデル後進の影響
 - ・ ICRP 2007 年勧告に基づく内部被ばく線量評価コードの開発

3D13

ICRP2007年勧告に基づく 内部被ばく線量評価コードの 核種摂取量推定機能の検証

JAEA

○真辺 健太郎、佐藤 薫、高橋 史明

本件は、原子力規制委員会「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業」により得られた成果の一部である。

平成31年9月13日（金）



日本原子力学会2019年秋の大会（於：富山大学五福キャンパス）

1

背景・目的

- 放射性核種の体内への取込みに対する内部被ばく評価では、
 - 空气中放射能濃度等の作業環境モニタリング
 - 体外計測やバイオアッセイ等による体内放射能モニタリングに基づき、放射性核種の摂取量を推定
- 国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告の国内法令への取入れ
 - 2007年勧告に対応した線量評価モデル・データに基づいた摂取量・被ばく線量評価が必要

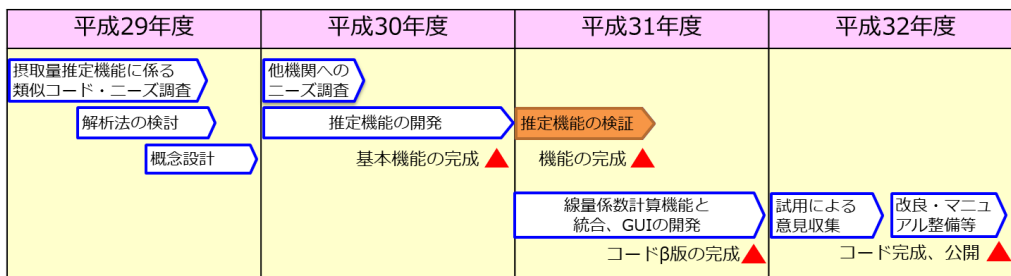


2007年勧告対応の線量係数計算機能（開発済）を活用して
“モニタリング結果から摂取量を推定する機能”を開発



2

平成30年度末までの実施状況と今回の発表内容



【平成30年度までの実施状況】

▲マイルストーン

- ・類似コード調査： INDES/IDEC (JAERI), MONDAL (NIRS), IMBA (英国PHE)
- ・ニーズ調査：原子力機構、高度被ばく医療支援センター等の機関
- ・解析法の検討：モニタリング値の不確かさを考慮可能な**最尤推定法**を採用
- ・概念設計
 - 解析対象シナリオ：摂取時期が既知の1回又は複数回の急性摂取、慢性摂取
 - 条件入力、結果出力のグラフィカルユーザインタフェース(GUI)イメージを提示
- ・基本機能の開発：モデル予測値とモニタリング値をフィッティングする機能を開発

体内放射能計算も含めた核種摂取量推定機能の検証



3

検証方法

➤ 摂取量推定の例題抽出

EURADOS IDEASガイドライン¹⁾、IAEA Safety Report²⁾、IMBAマニュアル³⁾

- 1) EURADOS Report 2013-01 (2013). 2) IAEA Safety Reports Series No. 37 (2004).
3) User Manual for IMBA Professional Plus (Version 4.0) (2005).

- 開発中のコードに1990年勧告対応の体内動態モデルを実装
呼吸気道モデル、胃腸管モデル、元素毎の全身動態モデル
- 開発機能で摂取量推定、例題の評価結果と比較

例題一覧

核種	摂取経路	化学形	摂取回数	モニタリング		出典
				方法	回数	
¹³⁷ Cs	経口摂取	CsCl	2	全身	7	IDEAS
① ¹²⁵ I	吸入摂取	I ₂ ガス	3	甲状腺	5	IDEAS
② ¹³¹ I	吸入摂取	Type F	3	甲状腺	2	IAEA
²³⁵ U	吸入摂取	Type M	1	肺+尿	10	IDEAS
²³⁸ Pu	吸入摂取	PuO ₂	1	肺	48	IMBA



4

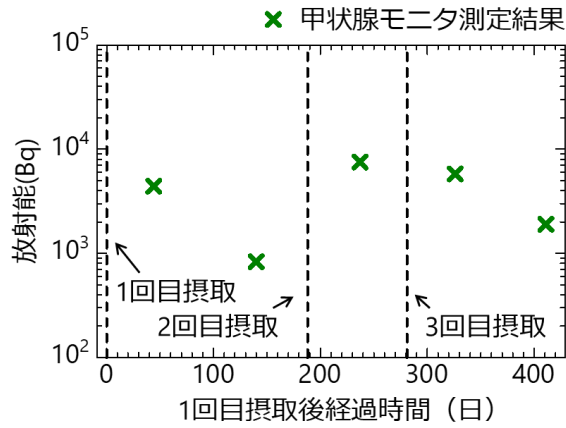
例題① ^{125}I の吸入摂取 (IDEASガイドライン)

評価対象者：作業員 (32歳男性)

摂取条件： ^{125}I (ガス)、3回吸入摂取

モニタリング：甲状腺モニタ、5回測定

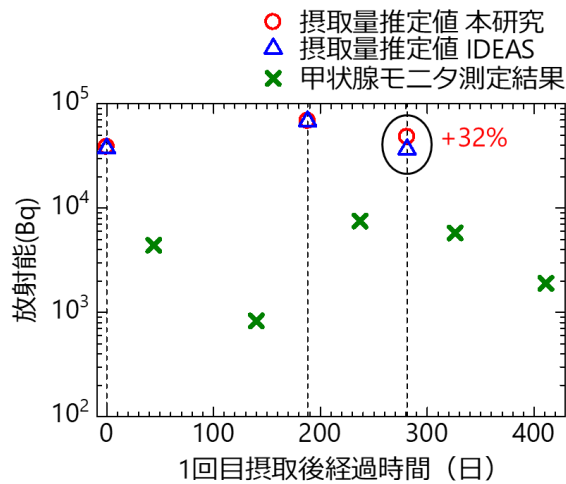
}インプットデータ



摂取タイミングとモニタリング結果

5

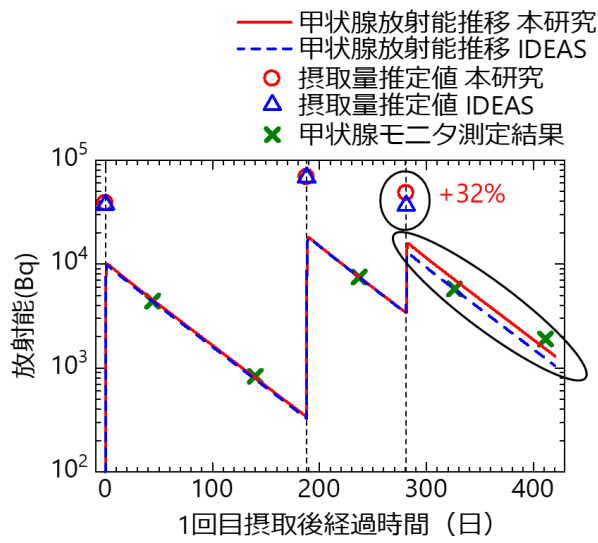
例題① ^{125}I の吸入摂取 推定結果



摂取量推定結果

6

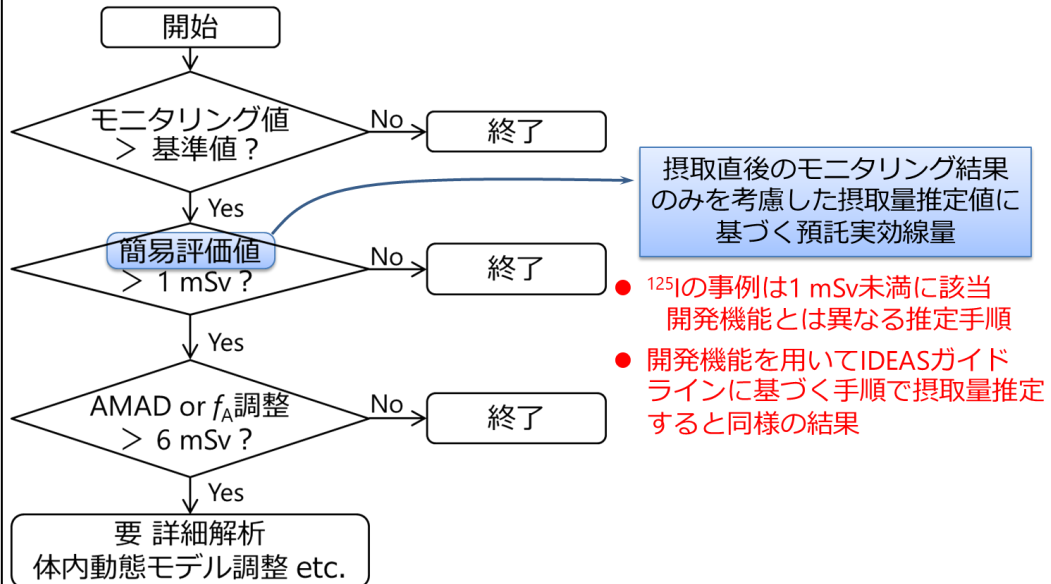
例題① ^{125}I の吸入摂取 推定結果



摂取量推定値に基づく甲状腺放射能推移

7

IDEASガイドラインの摂取量推定フロー



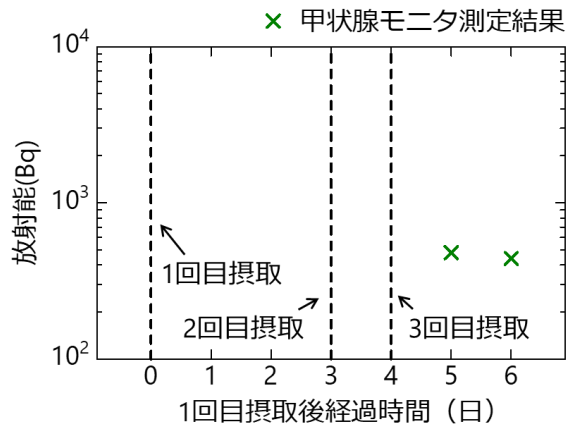
8

例題② ^{131}I の吸入摂取 (IAEA Safety Report)

評価対象者：作業者

摂取条件： ^{131}I (エアロゾルType F)、3回吸入摂取 } インプットデータ
 モニタリング：甲状腺モニタ、2回測定

モニタリング回数 < 摂取回数



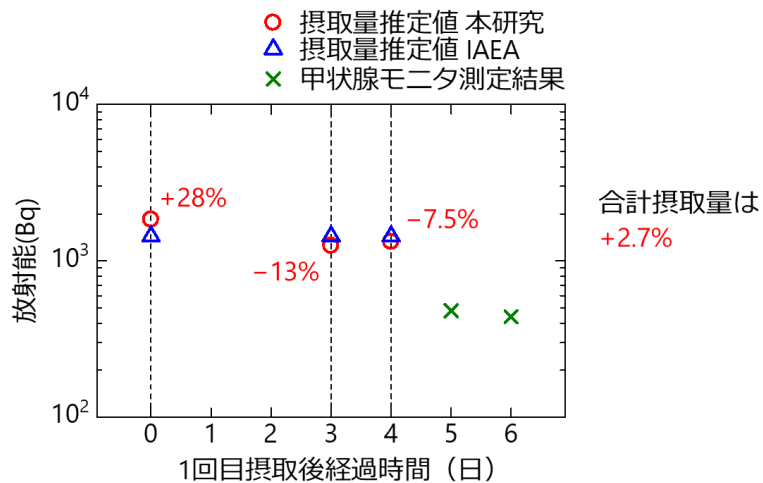
摂取タイミングとモニタリング結果

9

例題② ^{131}I の吸入摂取 推定結果

IAEA：3回とも同量摂取したと仮定

本機能：特異値分解を用いたアルゴリズムにより、仮定なしで解析可能



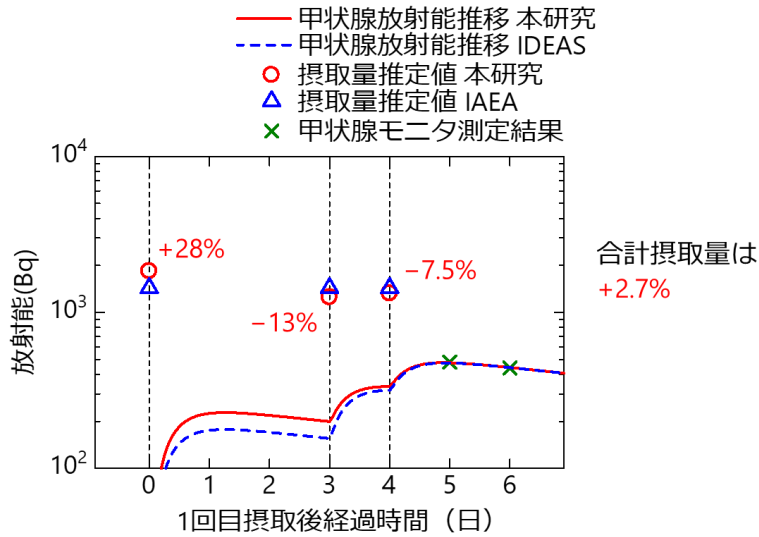
摂取量推定結果

10

例題② ^{131}I の吸入摂取 推定結果

IAEA：3回とも同量摂取したと仮定

本機能：特異値分解を用いたアルゴリズムにより、仮定なしで解析可能



摂取量推定値に基づく甲状腺放射能推移

11

例題② ^{131}I の吸入摂取 検証結果

- 採用した手法：特異値分解を用いた最尤推定法の特徴により、**モニタリング回数 < 摂取回数** という条件でも解析できることを確認
 - 複数回摂取したことは確実だが、モニタリング回数が確保できない状況に有効
- 作業環境等から、複数回摂取時の摂取比率を設定することが妥当な場合も想定される
 - 本機能は現在未対応 ⇒ 改良により機能を追加

12

まとめ

- 摂取量推定機能の検証
 - 1990年勧告対応の体内動態モデルを実装した
 - 抽出した例題を用いて摂取量推定を実施した
 - ・ 例題と同様の手順で推定した場合、例題の結果をよく再現
 - ・ 摂取回数とモニタリング回数の大小関係を問わず 解析可能
 - ・ 複数回摂取における各回の摂取割合を指定する機能が必要

今後の予定

- 2007年勧告対応の体内動態モデルによる摂取量推定
 - モデルの差違の摂取量推定への影響
- 内部被ばく線量評価コードβ版を完成
 - 線量係数計算機能と統合するコード全体のGUIの開発

本件は、原子力規制委員会「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業」により得られた成果の一部である。



ICRPによる新しい線量係数の分析 (職業被ばくによる主要28元素の摂取)

本件は、原子力規制委員会「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業」により得られた成果の一部である。



高橋 史明, 佐藤 薫, 真辺 健太郎 (原子力機構)

日本原子力学会2019年秋の大会（令和元年9月11日-9月13日、富山大学）

背景

- 国際放射線防護委員会(ICRP)の2007年勧告の主旨を放射線規制を取り入れた場合、現在の1990年勧告に準拠した内部被ばく防護の基準値についても、新しい実効線量係数(単位：Sv/Bq)に従って見直されることが想定
- これまで、ICRP Publ.134及びPubl.137の中で、作業者が主要28元素を摂取した条件に対し、ICRP2007年勧告に準拠した実効線量係数等が公開

ICRP Publ.134及びPubl.137に掲載されている元素

Publication	掲載されている元素
ICRP Publ.134 (OIR* part 2)	H, C, P, S, Ca, Fe, Co, Zn, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc
ICRP Publ.137 (OIR part 3)	Ru, Sb, Te, I, Cs, Ba, Ir, Pb, Bi, Po, Rn, Ra, Th, U

* Occupational Intakes of Radionuclides (職業人の放射性核種摂取)



- 刊行物等に基づき、内部被ばく防護基準値の見直しで留意すべき事項を調査
- 1990年勧告及び2007年勧告に準拠する実効線量係数の差異と影響因子を分析



日本原子力学会2019年秋の大会（令和元年9月11日-9月13日、富山大学）

「告示RIの数量などを定める件」別表第2

放射性同位元素の種類が明らかで、かつ、一種類である場合の空气中濃度限度等
(告示「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」別表第2、一部改変)

第1欄		第2欄	第3欄	第4欄	第5欄	第6欄
放射性同位元素の種類	化学形等	吸入摂取した場合の実効線量係数(mSv/Bq)	経口摂取した場合の実効線量係数(mSv/Bq)	空气中濃度限度(Bq/cm ³)	排気中又は空气中の濃度限度(Bq/cm ³)	排液中又は排水中の濃度限度(Bq/cm ³)
...
⁹⁰ Sr	チタン酸Sr以外	3.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}	7×10^{-4}	5×10^{-6}	3×10^{-2}
⁹⁰ Sr	チタン酸Sr	7.7×10^{-5}	2.7×10^{-6}	3×10^{-4}	8×10^{-7}	3×10^{-2}
...
¹³⁷ Cs	全ての化合物	6.7×10^{-6}	1.3×10^{-5}	3×10^{-3}	3×10^{-5}	9×10^{-2}
...

1990年勧告に従う数値

作業者を対象

公衆被ばくを対象

- 主要28元素の作業者の被ばくに対する実効線量係数が公開(公衆被ばくは未公開)
- ただし、上記別表第2の中で、第1欄の放射性同位元素の種類、第2欄及び第3欄の実効線量係数の大部分は、ICRP Publ.68(作業者による放射性核種の摂取)を参照

日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

放射性核種の見直し及び追加

- 放射性核種データが大幅に改訂され、ICRP Publ.38に置き換わる97元素1252核種のデータがICRP Publ.107として公開・提供
- ICRPは、半減期が10分以上の核種等に対する実効線量係数を公開する方針

定義の見直し

- 半減期で区別されていた核種の一部は核異性体として定義
告示別表第2: ⁸⁹Nb(T_{1/2}=1.10h), ¹²⁰Sb(T_{1/2}=0.265h)及び¹²⁸Sb(T_{1/2}=0.173h)
⇒ Publ.134及び137では、それぞれ^{89m}Nb, ^{120m}Sb及び^{128m}Sbとして定義
- 核異性体としての定義に変更
告示別表第2: ⁹⁸Nb ⇒ Publ.134では、^{98m}Nbとして定義

核種の追加

- 告示別表第2に掲載されていない3つの核種が追加
¹¹⁴Te(T_{1/2}=15.2m), ¹⁹⁴Pb(T_{1/2}=12m)及び²⁴²U(T_{1/2}=16.8m)
一方、告示別表第2では、半減期10分未満の核種も掲載

日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

化学形等の見直し、特定されない化学形の粒子吸入

- 近年に蓄積された知見(チェルノブイリ事故等)を反映して化学形等が見直し

Sr(吸入摂取)

告示別表第2
チタン酸Sr以外の化合物
チタン酸Sr

Publ. 134
塩化Sr、硫酸Sr、炭酸Sr 全ての特定されない化学形、 燃料破片 結合アルミノケイ酸塩、 ポリスチレン、チタン酸Sr

Cs(吸入摂取)

告示別表第2
全ての化合物

Publ. 137
塩化Cs、硝酸塩及び硫酸塩 照射された燃料の破片、 全ての特定されない化学形

- 特定されない化学形の吸入に対し、血液への吸収タイプの見直し

各元素の特定されない化学形の吸入に対する血液への吸収タイプ (Rnは除く)

	Publ.68 (告示別表第2)*	Publ.134またはPubl.137
Type F	P, Fe, Sr, Mo, Tc, Ru, Sb, Te, I, Cs, Ba, Pb	I, Pb
Type M	H, Ca, Co, Y, Nb, Ir, Bi, Po, Ra, Th	H, C, P, S, Ca, Fe, Co, Zn, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Sb, Te, Cs, Ba, Ir, Bi, Po, Ra, U (TypeMをdefaultと取り扱い)
Type S	Zn, Zr	Th

*Publ.68と告示別表第2にある線量係数の値を照合して分類 (C、S及びUは該当する物質なし)

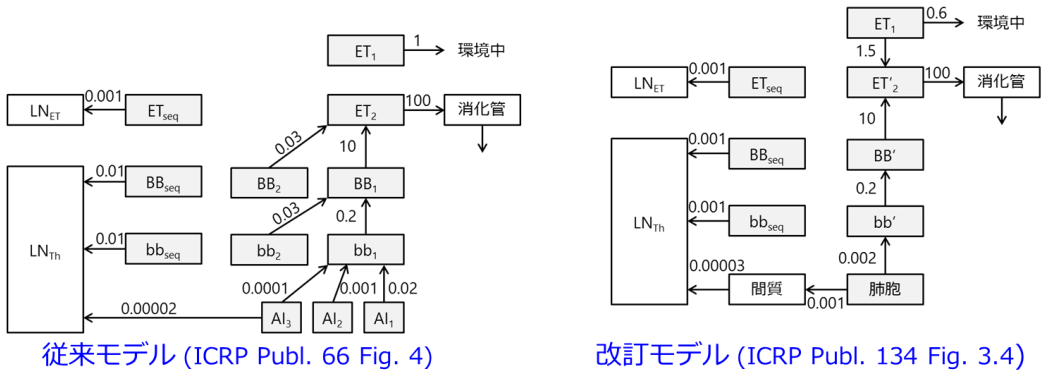
新旧の実効線量係数の比較においては、化学形等を正確に参照することが重要 (例、粒子吸収タイプに着目して実効線量係数を比較した場合、ミスリードする可能性)

実効線量係数の比較(1) ^{90}Sr

チタン酸ストロンチウムの吸入摂取 (ICRP Publ.68及び134でType S)

実効線量係数 $7.7\text{E-}05$ (mSv/Bq) \Rightarrow $2.0\text{E-}04$ (mSv/Bq)

呼吸気道クリアランスモデルの改訂により、肺の等価線量係数が増加
 $6.3\text{E-}07$ (mSv/Bq) \Rightarrow $1.4\text{E-}03$ (mSv/Bq)



肺組織での生物学的半減期が長くなったことが影響と推測

実効線量係数の比較(2) ^{92}Nb -

⑦

酸化物の吸入摂取 (ICRP Publ.68及び134でType S)

実効線量係数 $1.5\text{E-}05$ (mSv/Bq) \Rightarrow $6.5\text{E-}05$ (mSv/Bq)

- 肺組織における生物学的半減期が長くなったことが影響 (^{90}Sr : チタン酸Srと同様)

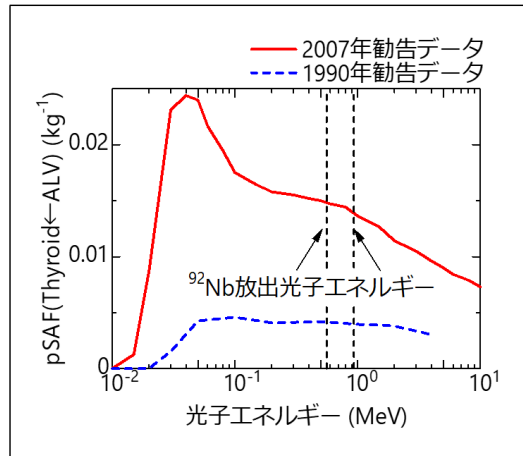
肺の等価線量係数

$6.9\text{E-}05$ (mSv/Bq) \Rightarrow $2.3\text{E-}04$ (mSv/Bq)

- 肺 \Rightarrow 甲状腺の光子SAFの増加も影響

甲状腺の等価線量係数

$5.4\text{E-}06$ (mSv/Bq) \Rightarrow $1.7\text{E-}04$ (mSv/Bq)



肺 \Rightarrow 甲状腺の光子SAF



日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

実効線量係数の比較(3) ^{41}Ca -

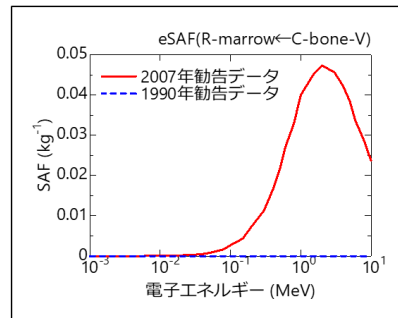
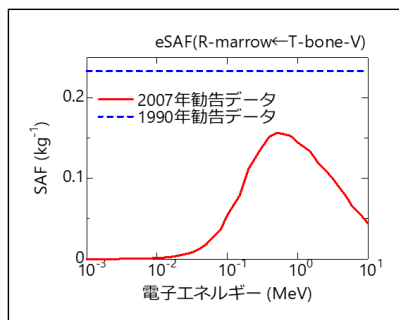
⑧

経口摂取(ICRP Publ.68及び134で、ともに全化合物に共通の実効線量係数が提供)

実効線量係数 $2.9\text{E-}07$ (mSv/Bq) \Rightarrow $5.7\text{E-}09$ (mSv/Bq)

- 骨領域内の電子SAFの見直し (マイクロ骨モデルを用いた輸送計算の導入)

赤色骨髄の等価線量係数 $2.0\text{E-}06$ (mSv/Bq) \Rightarrow $1.4\text{E-}08$ (mSv/Bq)



骨領域の電子SAF(左: 梁骨 \Rightarrow 赤色骨髄、右: 骨皮質 \Rightarrow 赤色骨髄)



日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

ICRPによる実効線量係数の公開状況

ICRPによる実効線量係数の公開及びその準備の状況 (ICRPのHPを参照)

元素等	作業者	公衆
主要28元素-1 (H-Tc、14元素)	ICRP Publ.134として公開	1冊の刊行物で、OIR-part 4に続いて、公開(ドラフト文書は未公開)
主要28元素-2 (Ru-U、14元素)	ICRP Publ.137として公開	
ランタノイド、アクチノイド (25元素)	ドラフト文書 (OIR-part 4)が公開、パブコメ終了	
53元素以外*	ドラフト文書は未公開	ドラフト文書は未公開

*53元素以外で、現在の告示別表第2に含まれている元素(45元素)

Be, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, Cl, Ar, K, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Xe, Hf, Ta, W, Re, Os, Pt, Au, Hg, Tl, At, Fr, Md

上記のうち、告示別表第2でサブマージョンのみ考慮されている元素：N, O, Ar, Kr, Xe

サブマージョンのみが考慮されている元素について、現行の告示別表第2の第2欄または第3欄でICRP1990年勧告に従う線量係数を提示していない。



日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

まとめ

- 内部被ばく防護に関する規制値の見直し、その対応等においては、放射性同位元素の種類 (核種や化学形等) の改定にも留意が必要
- 粒子吸入に対し、Type Sと分類された核種については、体内で保持される時間が長くなる理由により、実効線量係数が増加する傾向

今後の予定

- 開発中の内部被ばく線量評価コードにおいて、新旧の実効線量係数の差異を効率的に分析できる機能の実装

謝辞

本件は、原子力規制委員会「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究) 事業」により得られた成果の一部である。



日本原子力学会2019年秋の大会 (令和元年9月11日-9月13日、富山大学)

ICRP2007年勧告に対応した内部被ばく線量評価コード・核種摂取量推定機能の開発



○真辺 健太郎、佐藤 薫、高橋 史明

日本原子力研究開発機構 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン 放射線安全・防災研究グループ

背景・目的

- 放射性核種の体内への取込みに対する内部被ばく評価
 - ✓ 空気中放射能濃度測定等による作業環境モニタリング
 - ✓ 体外計測、バイオアッセイ等による体内放射能モニタリング
 - ⇒ 放射性核種の摂取量推定が必要
- 国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告の国内法令への取入れ
 - ✓ 2007年勧告に対応した線量評価モデル・データに基づく摂取量推定・被ばく線量評価が必要

ICRP 2007年勧告に対応した内部被ばく線量評価コードのひとつの機能として摂取量推定機能を開発

内部被ばく線量評価コードの概要

- ICRP 2007年勧告に従う線量係数 (Sv/Bq) 計算機能
 - ✓ 基礎的な線量評価モデル・データ (体内動態モデル、核崩壊データ、比吸収割合データ) から線量係数を評価
 - ✓ 線量評価モデル・データを編集可能；コード完成後に公開・更新されるモデル・データ、1990年勧告対応データ、日本人データ等に対応
- モニタリング結果に基づく核種摂取量 (Bq) 推定機能
 - ✓ 特異値分解を用いた最尤推定法を採用
 - ✓ 摂取時期が既知の急性摂取、複数回摂取、慢性摂取に対応
- 両機能を統合するグラフィカルユーザインタフェース (GUI)

コード全体の開発スケジュール

実施項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
線量係数計算機能	基本機能の開発、検証	モデル・データ編集機能の設計、開発		
摂取量推定機能	ニーズ調査、概念設計	基本機能の開発	機能の検証	
GUI整備、β版作成、マニュアル整備			入力設定、結果表示機能 (GUI) の開発	β版意見聴取とコードの改良 マニュアル整備

コードの完成・公開

摂取量推定機能の検証方法

例題の抽出

入力データ (摂取時期とモニタリング結果) と推定結果の組合せ

- ✓ EURADOS IDEASガイドライン
- ✓ IAEA Safety Report
- ✓ IMBAマニュアル

ICRP 1990年勧告対応の線量評価モデルを用いた摂取量推定事例

1990年勧告対応の体内動態モデルの実装

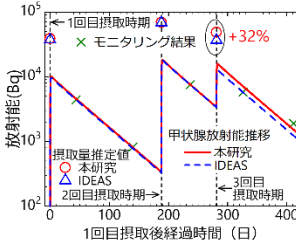
- ✓ 呼吸気道モデル、胃腸管モデル
- ✓ ヨウ素、セシウム、ウラン、プルトニウムの全身動態モデル

開発中の機能で摂取量を推定、例題の推定値と比較・検討

検証例②：¹²⁵Iの吸入摂取 (IDEASガイドラインより)

計算条件

- ✓ 摂取形態：作業者による¹²⁵I (ヨウ素ガス) の吸入摂取 3回
- ✓ 摂取時期：0日目、188日目、281日目
- ✓ モニタリング：甲状腺モニタ 5回



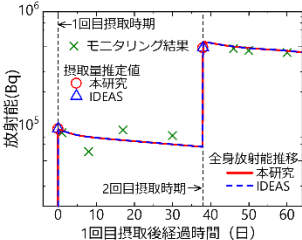
3回目摂取推定値に差異
IDEASガイドライン；
4回目のモニタリング結果のみ考慮
本研究：
すべてのモニタリング結果を同時に考慮

同じ手順であれば文献値と同様の推定値が得られることを確認

検証例①：¹³⁷Csの経口摂取 (IDEASガイドラインより)

計算条件

- ✓ 摂取形態：作業者による¹³⁷Cs (CsCl溶液) の経口摂取 2回
- ✓ 摂取時期：0日目、38日目
- ✓ モニタリング：全身カウンタ 7回

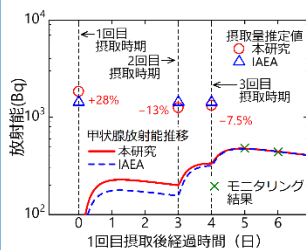


開発中機能による推定値
↓
例題の推定値とよく一致
摂取量推定機能が正しく動作していることを確認

検証例③：¹³¹Iの吸入摂取 (IAEA Safety Reportより)

計算条件

- ✓ 摂取形態：作業者による¹³¹I (Type Fエアロゾル) の吸入摂取 3回
- ✓ 摂取時期：0日目、3日目、4日目
- ✓ モニタリング：甲状腺モニタ 2回



摂取回数 > モニタリング回数
IAEA：
3回とも同量摂取したと仮定
本研究：
特異値分解を用いた最尤推定法を採用しているため、各回の摂取量比に関する仮定が不要

モニタリング回数を確保できない状況においても摂取量推定が可能であることを確認

まとめ・今後の計画


- ✓ 摂取量推定機能が正常に動作することを確認した。
- ✓ 令和元年度：内部被ばく線量評価コードのβ版を完成させる。
- ✓ 令和2年度：専門家にβ版を試用してもらい意見募集し、改良を加えてコードを完成させる。

謝辞

本研究は、原子力規制委員会 放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究) 事業によるものです。

Development of internal-dosimetry code based on ICRP 2007 Recommendations

F. Takahashi, K. Sato and K. Manabe

 Japan Atomic Energy Agency

The 5th ARADOS (Asian Radiation Dosimetry Group) meeting
@ Beijing, 6th – 8th Nov. in 2019

1

Introduction

Japanese regulatory standards against internal exposures

- Three kinds of concentration limits (Bq/m³) for:
 - ✓ Ambient air in facilities } Occupational
 - ✓ Exhaust from facilities } Public
 - ✓ Drainage from facilities }
- Current standards are determined by using committed effective dose per unit intake, $e(\tau)$ (Sv/Bq), based upon ICRP 1990 Recommendations (mainly referred to ICRP Publ.68 and ICRP Publ.72).

ICRP started to release new $e(\tau)$ based upon
2007 Recommendations



- The Nuclear Regulation Authority of Japan (NRA) considers to introduce ICRP 2007 Recommendations into the regulatory system.

Revision of the Japanese Regulatory Standards

- It should be checked whether **new $e(\tau)$ are correctly derived on the basis of ICRP dosimetry model or not by ourselves.**
 - ✓ ICRP dosimetry model consists of various functions:
biokinetic model, nuclear decay data, SAF data and so on.
- It is important to recognize which function makes the coefficient change.
 - ✓ Change in Tissue weighting factors (w_T)? Biokinetic models?
Human models? Specific absorbed fractions (SAF)?
- It is necessary to comprehend the influence of Japanese specific conditions or parameters on doses.
 - ✓ Japanese specific biokinetics (e.g. uptake ratio of iodine to the thyroid).
 - ✓ Difference in physique between Japanese and Caucasian (i.e. SAFs).

JAEA has proposed a project to develop an internal dosimetry code to NRA, and the 4-year project (2017-2020 FY) is ongoing now.



Development of Internal Dosimetry Code

Purposes of the code

- (a) Confirmation of new $e(\tau)$ for revision of the existing regulatory standards
- (b) Estimation of internal doses considering various conditions for managing internal doses of workers, for evaluating retrospective doses in case of an accident
based upon ICRP 2007 Recommendations.

Main functions of the code

- (1) **To calculate $e(\tau)$** using basic dosimetric models/data
 - Main function of this code for the purpose (a). **Main part of this talk**
- (2) **To estimate intakes of radionuclides and resulted doses** from monitoring data
 - Application of the function (1) for the purpose (b).



Development of Internal Dosimetry Code

Language NRA considers to distribute the code for free in Japan.
 → Ease of use is also important.

- **Java** for making source code
 - ✓ Java application runs on multi-platforms: Windows, macOS, Linux.
 - **XML** (eXtensible Markup Language) for some data files
 - ✓ Easy to edit data and understand the meanings
- New $e(\tau)$ including biokinetic models are being discussed in ICRP now.

Example	XML	Plain text
Biokinetic model <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 5px;">Comp.1</div> ↓ $\lambda^* = 15 \text{ d}^{-1}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Comp.2</div> *transfer coefficient	<pre> <transfer> <from-comp>comp1</from-comp> <to-comp>comp2</to-comp> <value> <rate>15</rate> <unit>perd</unit> </value> </transfer> </pre>	Comp1 Comp2 1.50E+01
	Tags and tree structure give meanings to the values. → Meaning is explicit. → Easy to search & edit values.	Places or order of values give meanings to the values. → Meaning is implicit. → Less flexibility for editing.

Methodology for $e(\tau)$ Calculation (ICRP Publ. 130)

Radiation weighted S value, $S_w(r_T \leftarrow r_S)$:

$$S_w(T \leftarrow r_S) = \sum_R w_R \sum_j E_{R,j} Y_{R,j} \phi(T \leftarrow r_S, E_{R,j})$$

ϕ for specific energy is obtained by interpolating discrete SAF data.

$S_w(T \leftarrow r_S)_i$ (Sv): Radiation weighted S value of chain member i from source region r_S to T.

$$\left[\begin{array}{l} w_R: \text{Radiation weighting factor.} \\ E_{R,j} \text{ (MeV), } Y_{R,j}: \text{Energy and yield of } j\text{-th radiation of type R radiation.} \\ \phi(T \leftarrow r_S, E_{R,j}) \text{ (kg}^{-1}\text{): SAF from } r_S \text{ to T at energy } E_{R,j}. \end{array} \right]$$

Equivalent dose coefficient, $h_T(\tau)$ (Sv/Bq):

$$h_T(\tau) = \sum_i \sum_{r_S} \tilde{a}_i(r_S, \tau) S_w(T \leftarrow r_S)_i$$

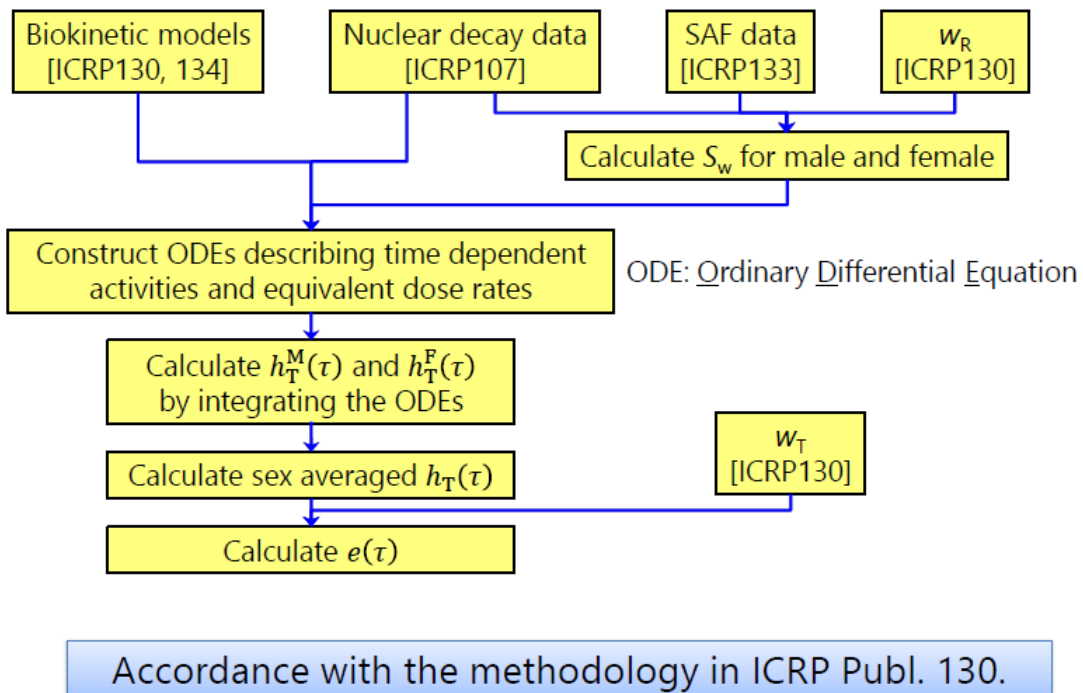
$$\left[\tilde{a}_i(r_S, \tau) : \text{Number of disintegrations of chain member } i \text{ in source region } (r_S) \text{ during } \tau, \right.$$

Evaluated by integrating simultaneous ordinary differential equations (ODEs) describing time dependent activities based on biokinetic models.

Effective dose coefficients, $e(\tau)$ (Sv/Bq):

$$e(\tau) = \sum_T w_T \left[\frac{h_T^M(\tau) + h_T^F(\tau)}{2} \right] \left[\begin{array}{l} w_T: \text{Tissue weighting factor.} \\ h_T^{\text{MorF}}(\tau) \text{ (Sv/Bq): Committed equivalent dose per} \\ \text{unit intake of tissue T for male or female.} \end{array} \right]$$

Flowchart of the Function to Calculate Dose Coefficients



Used Calculation Techniques

Integration of ODEs

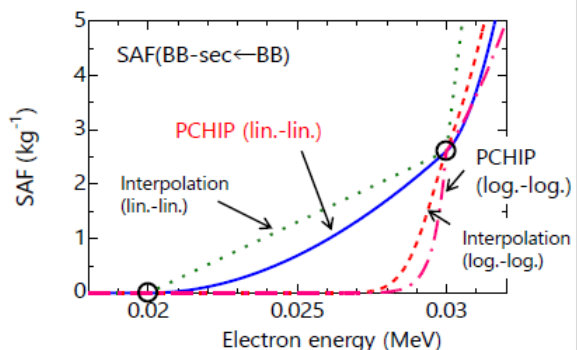
J-LSODE: Package of ODE solver written in Java

- ✓ Based on LSODE (Livermore Solver for Ordinary Differential Equations) written in FORTRAN77.
- ✓ Made from scratch to harmonize the language of the solver with that of the main code.

Interpolation of SAF data

J-PCHIP: Piecewise Cubic Hermite Interpolation Package written in Java

- ✓ We confirmed that PCHIP (lin.-lin.) is used in ICRP task group.
- ✓ Based on SLATEC*/PCHIP written in FORTRAN77.



*SLATEC: Sandia, Los Alamos, Air Force Weapons Laboratory Technical Exchange Committee

Quality Assurance of the Function to Calculate $e(\tau)$

Reference data

$e(\tau)$ in OIR Data Viewer ver. 2.17 and ver 3.01 (except Rn)

- ✓ for 454 cases of 101 radionuclides of 14 elements (ver. 2.17, Publ. 134)
- ✓ for 885 cases of 183 radionuclides of 13 elements (ver. 3.01, Publ. 137)
- ✓ with 2 digits of significant figures

Comparison of $e(\tau)$ between results by our function and OIR Data Viewer

- ✓ The values of $e(\tau)$ **agreed with 2 digits for 426 cases** in ver. 2.17 and **835 cases** in ver. 3.01.
- ✓ For **28 cases in ver 2.17 and 50 cases in ver 3.01**, the differences were **only ± 1 in the 2nd digit** (due to round off).

Quality of the function has been assured for 27 elements in ICRP Publ.134 and Publ. 137



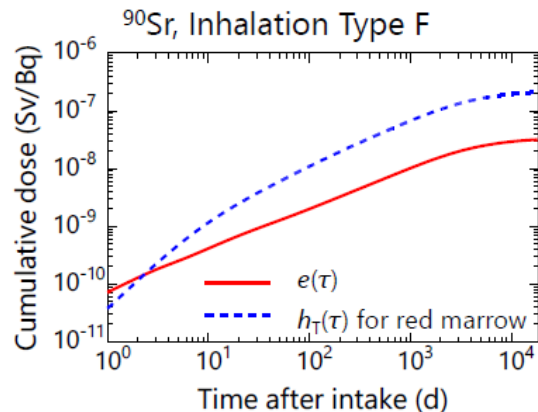
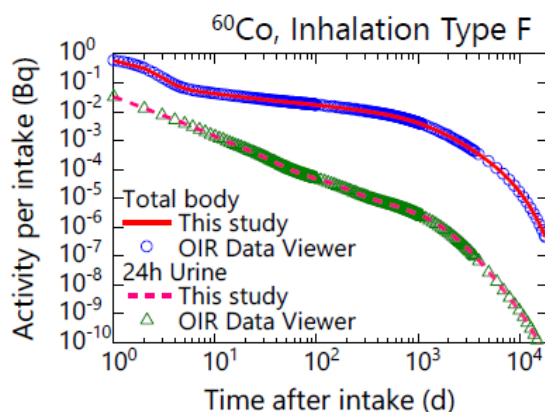
The 5th ARADOS meeting, Beijing, 6th- 8th Nov. in 2019

9

Various Output of Calculation Results

In addition to $e(\tau)$ and $h_T(\tau)$

- Changes over time in activity and excretion rate
- Cumulative doses



- ✓ Necessary for estimation of intakes
- ✓ Good reproduction of OIR Data Viewer
- ✓ Useful for detail analysis, public understanding,...

We have progressed development of the function to estimate intakes of radionuclides and doses.



The 5th ARADOS meeting, Beijing, 6th- 8th Nov. in 2019

10

Summary

- A project is ongoing to develop an internal dosimetry code based upon the ICRP 2007 Recommendations in Japan.
- The function to calculate $e(\tau)$ has been constructed. Quality of the function has been assured for 27 elements in ICRP Publ.134 and Publ. 137
- We have also developed a function to estimate intakes of radionuclides and resulted doses.

Foundation

This study is funded by the Nuclear Regulation Authority (NRA) of Japan.
(Radiation Safety Research Promotion Fund, Development of internal dose calculation code)



4. 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP 2019)

発表ポスター 1 件

Development of a function for estimating intakes of radionuclides using the models and data based on ICRP 2007 Recommendations



Kentaro MANABE, Kaoru SATO, Fumiaki TAKAHASHI

Radiation Risk Analysis Research Group, Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency

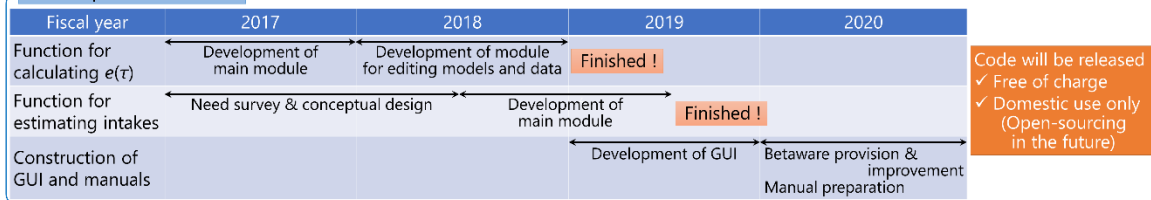
Background

- We are developing an internal dosimetry code in accordance with the ICRP 2007 Recommendations to revise the RP system in Japan.
 - ✓ Main function: calculating dose coefficients, $e(\tau)$
- After the Recommendations are incorporated into the RP system, intakes and exposure doses should be estimated by using the revised models and data in accordance with the 2007 Recommendations.
 - ✓ Function for estimating intakes: an application of the function for calculating $e(\tau)$

Features of the internal dosimetry code

- Function for calculating $e(\tau)$ * *K. Manabe, et al., Bio Conf. 14 03011 (2019).
 - ✓ Based on the ICRP's dosimetric models and data: nuclear decay data, biokinetic models, specific absorbed fractions...
 - ✓ Enable to edit the models and data: Japanese specific data...
- Function for estimating intakes from monitoring results
 - ✓ Maximum likelihood method with singular value decomposition (SVD) is employed.
 - ✓ Single/multiple acute intakes, and chronic intakes are supported.
- Graphical User Interface (GUI) for integrating the two functions

Development schedule



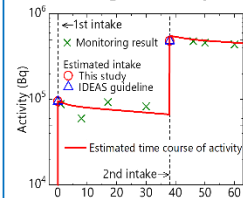
Verification of the function for estimating intakes

- Exercise cases were selected from
 - ✓ IDEAS Guideline (EURADOS Report 2013-01)
 - ✓ IAEA Safety Report Series No. 37
 - ✓ IMBA manual (IMBA Pro ver. 5.0.0)
- Intakes are estimated by using the former biokinetic models: 1990 Recommendations
- The former models were implemented to the code
 - ✓ Original respiratory tract clearance models (ICRP Publ. 66)
 - ✓ Gastrointestinal tract model (ICRP publ. 30)
 - ✓ Systemic models for I, Cs, U, Pu (ICRP Publ. 56, 67, 69)

Estimated intakes by the function ← Comparison → Literature values

Case 1: Simple case

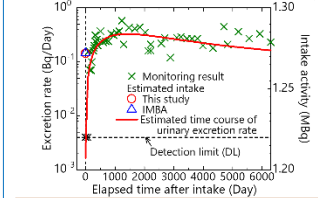
- Ingestion of ^{137}Cs (IDEAS)
- ✓ Intake: 2 times
- ✓ Monitoring: 7 times by WBC



Good agreement

Case 2: Results lower than DL

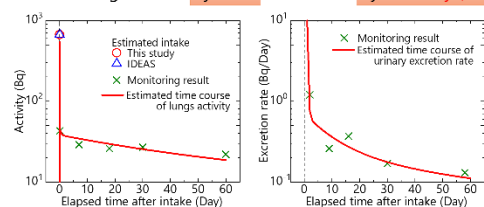
- Inhalation of ^{238}Pu special type (IMBA)
- ✓ Intake: 1 time
- ✓ Monitoring: 48 times by urine assay



This function treats monitoring results lower than DL as half of DL.

Case 3: Multiple measuring methods

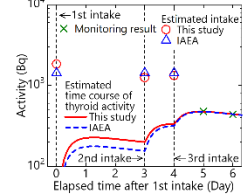
- Inhalation of ^{235}U type M (IDEAS)
- ✓ Intake: 1 time
- ✓ Monitoring: 5 times by WBC and 5 times by bioassay (urine)



This function can consider monitoring results by multiple measuring methods simultaneously.

Case 4: Shortage of the number of measurements

- Inhalation of ^{131}I type F (IAEA)
- ✓ Intake: 3 times
- ✓ Monitoring: 2 times by thyroid monitor



IAEA: It is assumed the intakes on each day are equal.
 This study: Assumption about each intake is NOT necessary for estimating intakes because of SVD.

This function can estimate intakes without assumptions even if $n_M < n_I$.

Note that assumption is effective in some cases.
 Eg., information on working time, concentration of activity in work place is available.

Summary & future plans

- We confirmed the function for estimating intakes of the internal dosimetry code works correctly.
- This FY: We will construct the betaware of the internal dosimetry code in accordance with the ICRP 2007 Recommendations.
- The next FY: We will complete the code based on comments and suggestions from betaware users and prepare manuals.

Foundation: This study is funded by the Nuclear Regulation Authority of Japan (Radiation Safety Research Promotion Fund).

5. 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会
発表スライド1件、発表ポスター1件

1B1-4

放射性セシウムの慢性摂取による 内部被ばく線量評価に対する 体内動態モデル更新の影響

JAEA

○真辺 健太郎、佐藤 薫、高橋 史明

令和元年12月5日（木）
第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会
於：東北大学青葉山新キャンパス

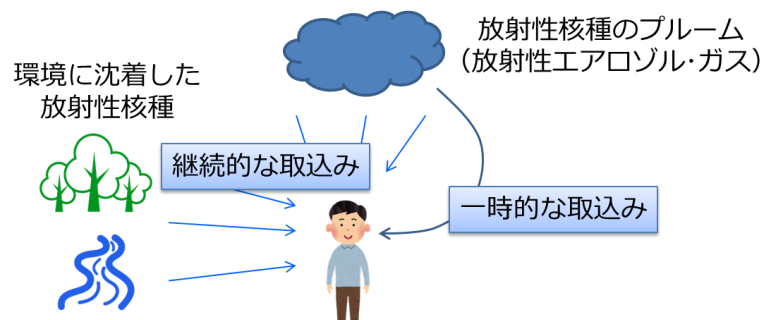


1

背景

環境中への放射性核種の流出

- ✓ プルーム通過時の一時的な取込み：急性摂取
- ✓ 環境に沈着した放射性核種の再浮遊等による継続的な取込み：慢性摂取



国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告に基づく内部被ばく線量

- ✓ 急性摂取：主要28元素について新しい線量係数*が公開
- ✓ 慢性摂取：？？？？

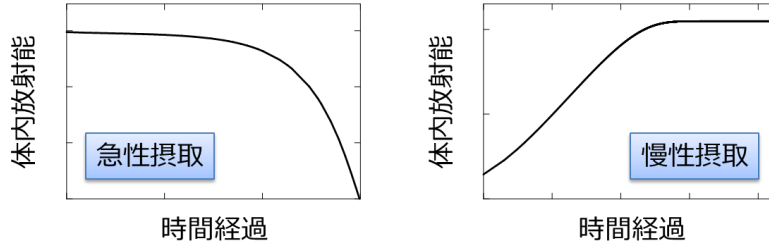
*核種1Bq摂取当たりの預託実効線量

2

目的

慢性摂取の特徴

- ✓ 一定期間経過すると体内放射能が平衡状態になる



ICRPによる放射性核種の体内動態モデルの見直し

- ✓ 呼吸気道に沈着したエアロゾルの移行モデル
- ✓ 消化管における移行モデル
- ✓ 血液吸収後の全身循環モデル（元素の種類に依存）

体内動態モデルの更新 ⇒ **Cs**の慢性摂取による内部被ばく線量への影響



3

体内動態モデルの違い 呼吸気道モデル

	旧モデル	新モデル
粒子輸送除去モデル		
血液吸収除去モデル		

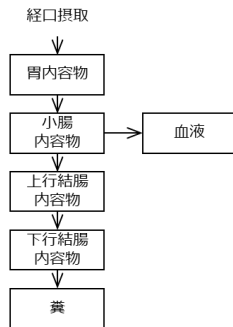
単純化



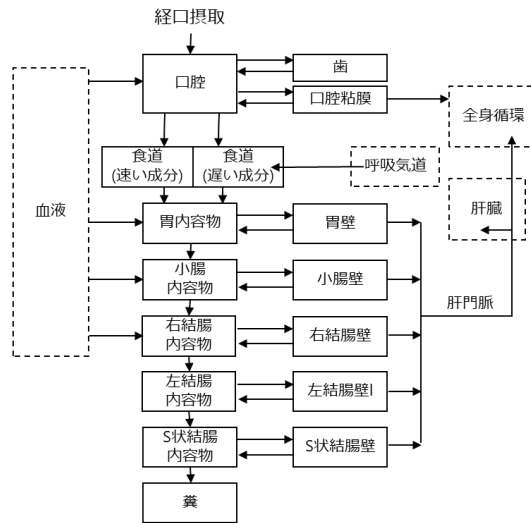
4

体内動態モデルの違い 消化管モデル

旧モデル



新モデル



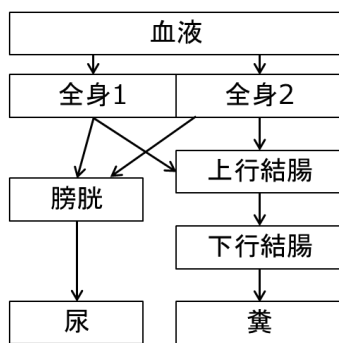
詳細化



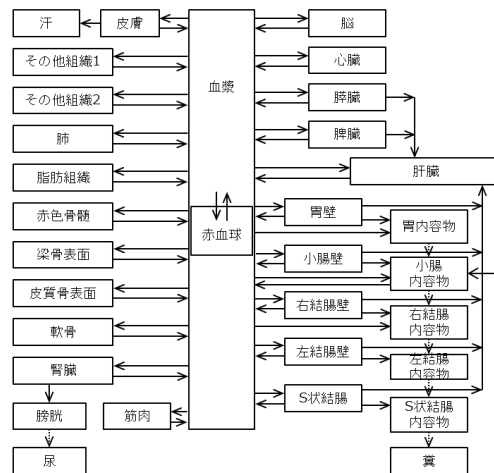
5

体内動態モデルの違い Cs血液全身循環モデル

旧モデル



新モデル



詳細化



6

体内動態モデルのみ変更した被ばく線量計算

ICRP2007年勧告対応内部被ばく線量評価コード

- ✓ H29-R2年度 原子力規制庁 放射線安全規制研究戦略的推進事業で開発中
 - 線量係数計算機能
 - 核種摂取量推定機能

詳細はポスターP-40をご覧ください

線量係数計算機能

- ✓ 計算に用いるモデルやデータを編集可能

動態モデルの種類	従来モデル (組み込んだモデル)	新モデル (コードの既定モデル)
呼吸気道モデル	ICRP Publ. 66	ICRP Publ. 130
消化管モデル	ICRP Publ. 30	ICRP Publ. 100
Cs全身循環モデル	ICRP Publ. 30, 71	ICRP Publ. 137

- ✓ 体内放射能・積算線量の経時変化を出力可能：解析に利用



7

摂取条件と評価した量

¹³⁷Csの慢性摂取

- ✓ 評価対象：軽作業時の成人
- ✓ 摂取条件：毎日 1 Bq 摂取
- ✓ 摂取経路と化学形：経口摂取（可溶性物質： $f_A = 1$ ）
吸入摂取（タイプF, M, S）
- ✓ エアロゾル：AMAD*¹ 1 μm , 密度 3.0 g/cm³, 形状係数 1.5
- ✓ 評価した量：全身放射能, 年実効線量率 ^{*1}空気力学的放射能中央径

年実効線量率

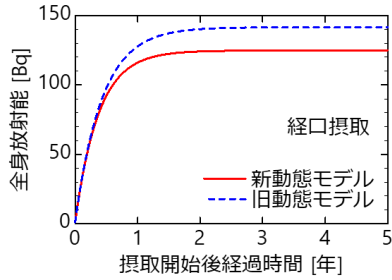
- ✓ 摂取期間を1年毎に区切った時の1年当たりの実際の被ばく線量
- ✓ 預託実効線量*²とは異なる
^{*2}摂取から50年間又は70歳になるまでの積算線量



8

結果：経口摂取

全身放射能の時間推移

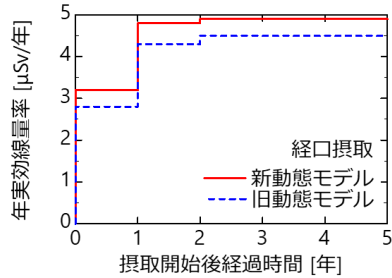


	新モデル	旧モデル	差
平衡状態*になるまでの時間	920日	911日	+1.0%
平衡状態の全身放射能	125 Bq	141 Bq	-12%

*放射能が50年経過時の放射能の99.7%に達した状態

Csの血液全身循環モデルの見直し
⇒ 血液→腎臓→膀胱の移行速度が増加

年実効線量率の時間推移



✓ 平衡状態における年実効線量率

新モデル：4.93 μSv/年
旧モデル：4.51 μSv/年

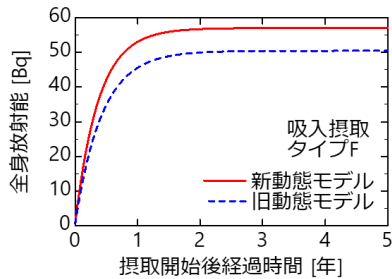
+9.3%

旧モデル：脂肪も含めて全身に均一に分布
新モデル：筋肉により集中して分布
⇒ 組織加重係数 (w_T) の大きい体幹部の組織の等価線量 (H_T) が増加

9

結果：吸入摂取タイプF

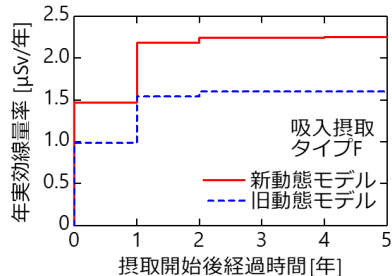
全身放射能の時間推移



	新モデル	旧モデル	差
平衡状態になるまでの時間	919日	911日	+0.9%
平衡状態の全身放射能	57.1 Bq	50.4 Bq	+13%

呼吸気道における移行モデルの見直し
⇒ 血液へ移行する放射性核種の割合が増加

年実効線量率の時間推移



✓ 平衡状態における年実効線量率

新モデル：2.25 μSv/年
旧モデル：1.60 μSv/年

+41%

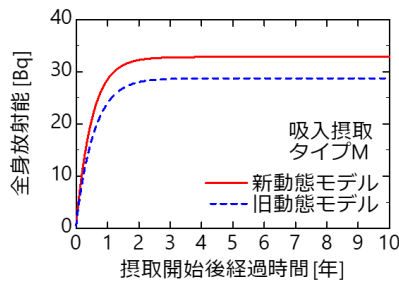
旧モデル：脂肪も含めて全身に均一に分布
新モデル：筋肉により集中して分布
⇒ w_T の大きい体幹部の組織の H_T が増加

経口摂取と同じ

10

結果：吸入摂取タイプM

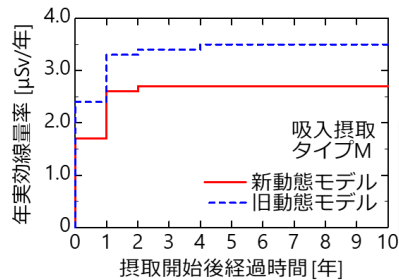
全身放射能の時間推移



	新モデル	旧モデル	差
平衡状態になるまでの時間	1113日	1123日	-0.9%
平衡状態の全身放射能	32.9 Bq	28.7 Bq	+14%

呼吸気道から消化管へ移行したCsの血液吸収率 (f_A 値) が0.1から0.2に増加

年実効線量率の時間推移



✓ 平衡状態における年実効線量率

新モデル：2.75 $\mu\text{Sv}/\text{年}$
旧モデル：3.45 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ \rightarrow -20%

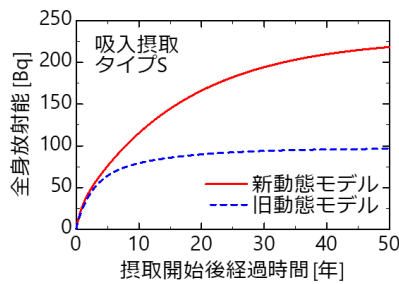
呼吸気道から血液への移行パラメータの見直し
(速い成分の比率の増加、遅い成分の移行速度の増加)

$\Rightarrow w_T$ の大きい肺の H_T が減少

11

結果：吸入摂取タイプS

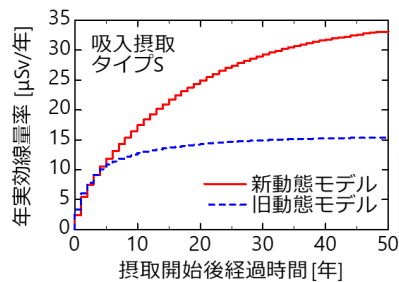
全身放射能の時間推移



	新モデル	旧モデル	差
平衡状態になるまでの時間	—	45.5年	—
50年経過時の全身放射能	218 Bq	96.5 Bq	+126%

呼吸気道における移行モデルの見直し
 \Rightarrow 肺胞領域の生物学的半減期が長い (20年)
成分の割合がほぼ倍増

年実効線量率の時間推移



✓ 50年目の年実効線量率

新モデル：33.1 $\mu\text{Sv}/\text{年}$
旧モデル：15.4 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ \rightarrow +115%

呼吸気道における移行モデルの見直し

$\Rightarrow w_T$ の大きい肺の H_T が増加

12

まとめ

- ✓ 体内動態モデルの更新が¹³⁷Csの慢性摂取の内部被ばく線量に及ぼす影響を調べた。
 - 平衡状態になるまでの時間に大きな変化はなかった。
ただし、タイプSは50年では平衡状態に到達しなかった。
 - 平衡状態における全身放射能・年実効線量率の増減傾向は、
摂取条件により異なっていた。

本研究は、原子力規制庁 放射線安全規制研究戦略的推進事業費（内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究）事業による成果を含みます。

P-40 ICRP2007年勧告に基づく内部被ばく線量評価コードの開発



○高橋史明¹⁾, 真辺健太郎¹⁾, 佐藤薫¹⁾, 渡嘉敷雄士²⁾ 1) 日本原子力研究開発機構, 2) ヴィジブルインフォメーションセンター

背景

- 国際放射線防護委員会(ICRP)2007年勧告の国内法令への取入れ
- (規制) 内部被ばくに対する放射線防護に係る基準値の見直し
 - ✓ 空気中濃度限度 (Bq/cm³) ----- 職業被ばく
 - ✓ 排気中又は空気中の濃度限度 (Bq/cm³) } 公衆被ばく
 - ✓ 排液中又は排水中の濃度限度 (Bq/cm³) }
 - (履行) 事業所での被ばく管理、事故時の線量評価法の見直し
 - ✓ 体外計測、バイオアッセイ等による摂取量評価
 - ✓ 摂取量に基づく内部被ばく線量評価

コードの概要

- 2つの基本機能
 - ICRP2007年勧告に従う線量係数 (Sv/Bq) を計算する機能
 - モニタリング結果に基づいて核種摂取量 (Bq)を推定し、被ばく線量を評価する機能
- ユーザーの利便性や操作性を向上させる機能
 - 計算条件を適切かつ容易に設定可能とする機能 (GUI)
 - 結果を効果的に表示する機能 (数表やグラフ)

我が国の技術的基盤となる内部被ばく線量評価コード

開発スケジュール

実施項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度	令和2年度
線量係数計算機能	基本機能の開発、検証	データ編集機能の設計、開発		
摂取量推定機能	二重調査、概念設計	基本機能の開発	機能の検証	
GUI整備、β版作成、マニュアル整備			入力設定、結果表示機能の開発(β版の開発)	β版意見聴取とコードの改良 マニュアル整備

令和元年12月

コード完成・公開

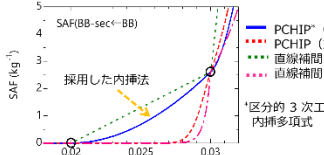
開発した基本機能の主な特徴

○体内動態モデルの記述 (XML形式の採用)



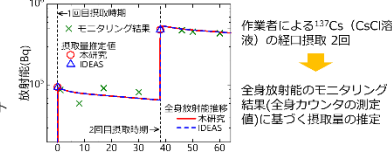
ICRPが今後公開する新規の体内動態モデルを効率的に追加するため、体内移行に関する情報を認識可能なXMLファイル形式を採用した。(MS-Excel等で編集可能)

○SAFデータの内挿法 (PCHIPの採用)



刊行物に明記されていない内挿法に関する情報 (PCHIPを適用)を入手、採用した。

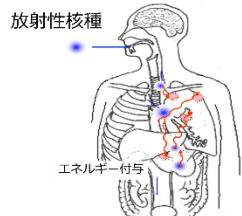
○ 種々の摂取条件に対する核種摂取量の推定



様々な摂取条件やモニタリングの実施状況に応じた計算を可能とし、EURADOS IDEASガイドライン等の例題により、当該機能の妥当性を検証した。

ICRP2007年勧告に準拠する線量評価モデルやデータに基づき、線量係数を導出し、モニタリング値から核種の摂取量を推定する機能を開発 (検証完了)

コードβ版の開発 (各基本機能に対して、ユーザーの利便性、操作性を考慮)



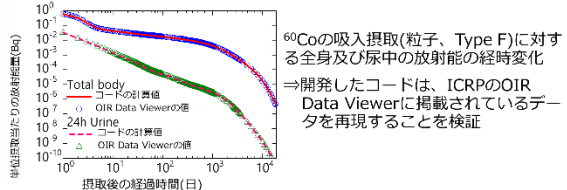
○ 何れの基本機能の操作においても入力条件として設定する主な項目

- 内部被ばく線量評価で必要不可欠な情報
 - ✓ 評価対象者は? ⇒ 作業者? 公衆 (年齢群)?
 - ✓ 摂取した核種名は?
 - ✓ 核種の種類 (化学形等) は?
 - ✓ 摂取経路は? ⇒ 経口? 吸入? ...
- より精緻な線量評価を可能とする情報
 - ✓ 摂取形態 ⇒ 急性? 複数回? 慢性?
 - ✓ 体内移行の追加、移行係数データの変更

グラフィカルユーザーインターフェイス (GUI)により、容易な計算条件を設定する。

○ 摂取した放射性核種の量を推定する機能の出力

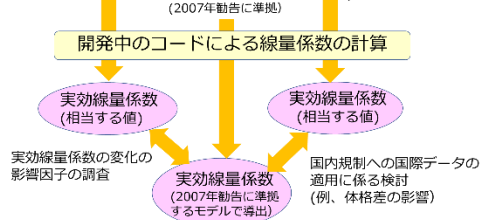
- 摂取量の推定で必要不可欠な情報を設定 (GUI)
- ✓ モニタリングの対象(方法)及び結果
- ✓ 摂取からモニタリングまでの経過時間
- 核種の摂取量や被ばく線量の評価結果等を表示
 - ✓ 摂取した核種量や実効線量など
 - ✓ 排泄物や体内放射能の時間的推移 (グラフ)



⇒開発したコードは、ICRPのOIR Data Viewerに掲載されているデータを再現することを検証

○ 線量係数を計算する機能に固有な設定

- ✓ 1990年勧告に準拠するモデルの設定 (GUI)
- ✓ ユーザーによる個別データの設定 (GUI) (例、日本人SAFデータ)



新旧の係数で生じた差への影響因子、日本人の体格や代謝の特性を考慮した線量係数の導出を可能とさせる。

今後の予定

- ✓ 今年度中にコードβ版を整備 ⇒ 聴取した意見を反映させ、コード完成 (マニュアル整備含む)を進める予定
- ✓ 令和2年度中に、線量係数計算機能と摂取量推定機能を統合したコードを完成、公開させる予定

本研究は、原子力規制委員会 放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究) 事業によるものです。