

平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業
-内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究-

研究成果報告会 令和2年2月6日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 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



(研究代表者) 高橋 史明

【背景・目的】

- 国際放射線防護委員会(ICRP)の2007年勧告の国内の放射線規制への取入れに伴い、新しい実効線量係数に基づき、内部被ばくの防護基準値も改正
- 各事業所等でも2007年勧告に従い、核種の摂取量を推定して内部被ばく線量を評価



我が国の放射線規制への2007年勧告の取入れ、事業所等における内部被ばく防護に対し、有益な技術基盤となる線量評価コードを開発

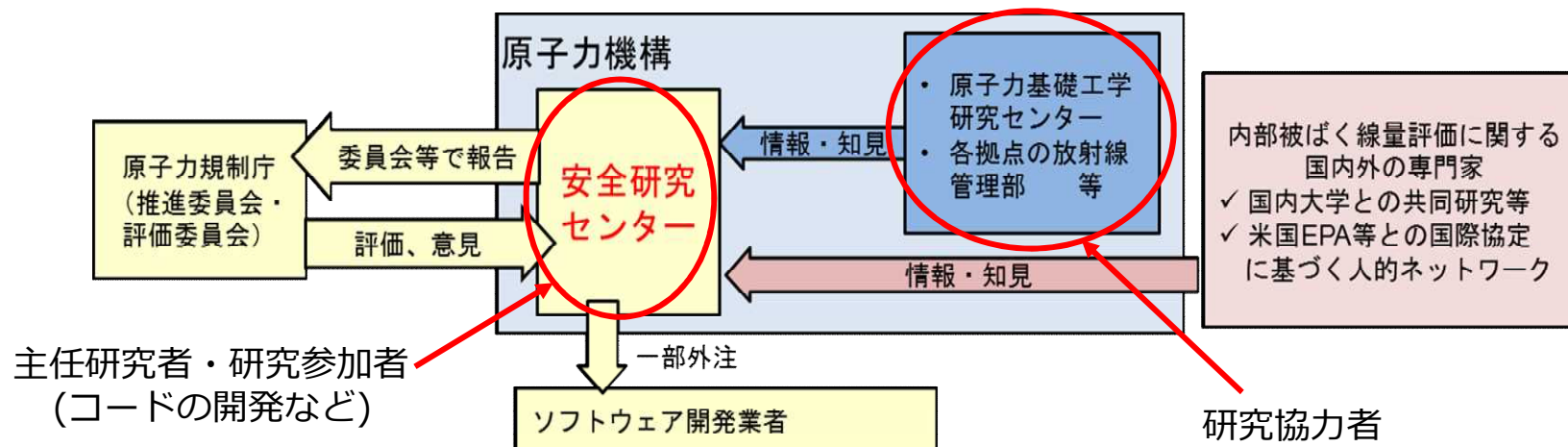
【実施状況】 ロードマップに従い、当初の計画通りに進捗

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 ▲
各年度の達成状況	平成29年度：線量係数計算機能の基本機能の完成 平成30年度：線量係数計算機能の完成、核種摂取量推定機能の基本機能の完成 平成31/令和元年度：核種摂取量推定の完成、コードβ版の完成（見込み）			

【期待される成果】

- 空气中濃度限度等の内部被ばくの防護基準値の改正におけるICRPの新しい線量係数の検証
- 各事業所等における平常時や事故時のモニタリングに基づく線量評価に活用

【研究体制】 本研究の体制



主任研究者：高橋史明、研究参加者：真辺健太郎、佐藤薫(原子力機構 安全研究センター)

研究協力者：原子力機構 原子力基礎工学研究センター(1名)、
核燃料サイクル工学研究所及び原子力科学研究所の職員(3名)

内部被ばく線量評価コードの関する研究の体制図

- 主任研究者及び研究参加者：線量評価コードの開発を担当(原子力機構、安全研究センター)
- 研究協力者：原子力機構内で、最新の内部被ばく線量評価に関する研究の動向等の情報を入手(原子力基礎工学研究センター)、コードのユーザーとして想定される放射線モニタリングにおけるニーズ調査(主要拠点の放射線管理部に所属)
- 他に、専門知識を有する国内外の専門家に聞き取り調査や情報交換を適宜行い、線量評価コードの開発やその方針の妥当性を確認
- コードのプログラミング、GUIやグラフ表示機能の開発の一部については、ソフトウェア開発を専門とする業者へ外注し、業務を効率化
- 研究開発の状況や関連する情報については、定期的な会合の開催により、PO及びPO補佐と共有

【今年度の研究概要】 全体の実施内容、目標及び達成状況



平成31/令和元年度の研究ロードマップ及びマイルストーン (MS)

実施項目	平成31/令和元年度 (上半期)	平成31/令和元年度 (下半期)
1) 線量係数計算機能の開発	ICRPの線量評価モデルの調査	
2) 核種摂取量推定機能の開発	機能の検証	
	機能の完成 ▲	
3) コードの開発等	パラメータ設定法の検討	
		GUI等の開発 β版の完成 ▲

▲ マイルストーン (MS)

- 1) 線量係数計算機能の開発
 - ICRPによる新しい線量評価モデルや線量係数の検討状況、公開予定などの調査
- 2) 核種摂取量推定機能の開発 **MS : 機能の完成** ⇒ **上半期に完了(達成)**
 - 摂取パターン (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
- 3) コードの開発等 **MS : β版の完成** ⇒ **今年度末に完了の見込み(達成の見込み)**
 - 計算条件の設定に用いるGUI、計算の途中経過の出力、線量データを取りまとめた数表、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
 - 線量係数計算機能、核種摂取量推定機能及び利便性や操作性を向上させる機能を統合させたコードβ版を開発

当初計画 (ロードマップ) の通りに研究を進捗

【今年度の研究概要】 核種摂取量推定機能の開発



EURADOSやIAEAの例題等を活用した核種摂取量推定機能の検証

検証に用いた取込み事例の摂取・モニタリング条件

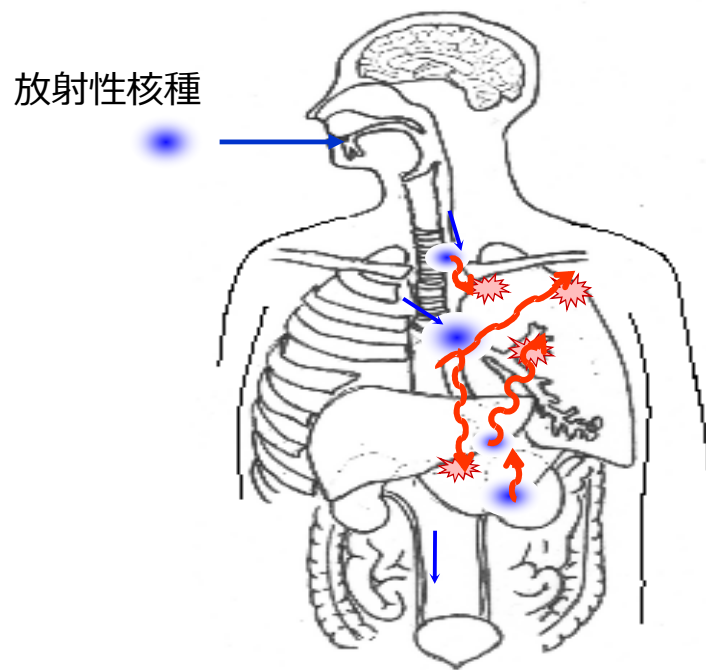
核種 (化学形等)	摂取経路 (回数)	モニタリング		特徴(出典)
		方法(対象)	回数	
Cs-137 (CsCl)	経口(2回)	全身	7	モニタリング値の不確かさを考慮(a)
I-125 (ガス)	吸入(3回)	甲状腺	5	モニタリング値の不確かさを考慮(a)
I-131 (Type F)	吸入(3回)	甲状腺	2	摂取回数よりモニタリング回数が少ない(b)
U-235 (Type M)	吸入(1回)	肺+尿	10	複数のモニタリング手法による測定値を同時に考慮(a)
Pu-238 (PuO ₂)	吸入(1回)	尿	48	検出下限値以下の結果を考慮(c)
Co-60 (Type S)	吸入(1回)	全身+尿	5	新動態モデルによる評価(d)

- a. C.M. Castellani et al., IDEAS Guidelines (Version 2), EURADOS Report 2013-01 (2013).
- b. IAEA, Safety Reports Series No. 37 (2004).
- c. A.C. James et al., User Manual for IMBA Professional Plus (Version 4.0) (2005).
- d. C.M. Castellani et al., ICIDOSE2017, EURADOS Report 2019-01 (2019).

- 出典(a)~(c)では、1990年勧告に従う線量評価モデル・データに基づいて摂取量が評価されているので、従来の体内動態モデルを実装して検証
- 各事例の出典における報告値及びIMBAコードによる評価値と比較

【今年度の研究概要】 コードの開発

- これまでに開発した線量係数計算機能及び核種摂取量推定機能を実装させる。
- GUIは両機能を統合したGUIを持たせる。計算結果としては、機能に応じて、図もしくは表で出力可能とさせる。



- 内部被ばく線量評価で必要不可欠な情報
 - 評価対象者は？⇒作業員？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
- 摂取量の推定で必要不可欠な情報
 - 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

体内摂取した核種による組織・臓器へのエネルギー付与と線量評価や摂取量推定に必要な情報

【今年度の進捗】核種摂取量推定機能の開発 (1)

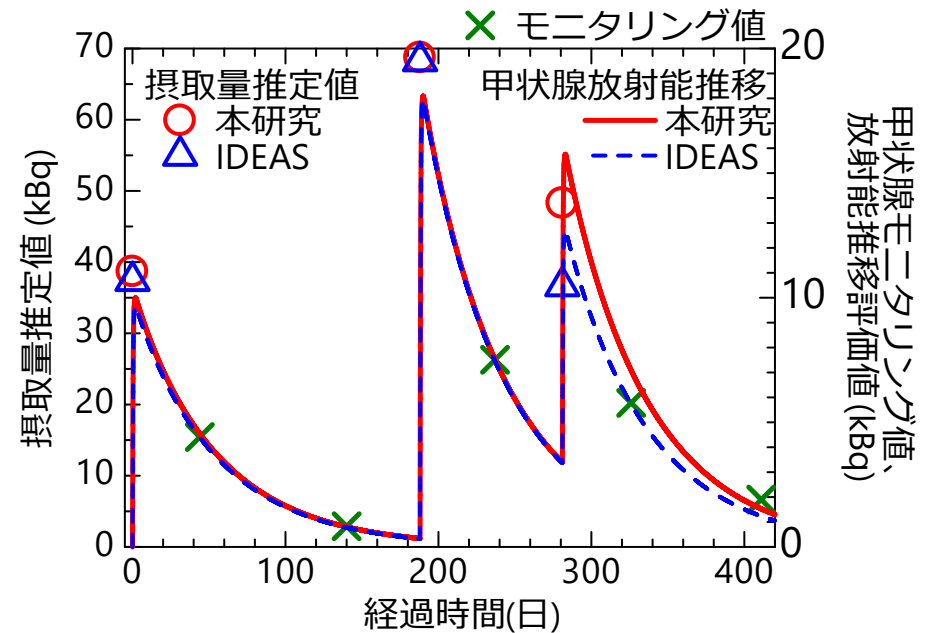
I-125の吸入摂取に関する検証

作業者がヨウ素ガスを3回吸入摂取
 ⇒2回目、3回目の摂取は、1回目の摂取から188日、281日経過

甲状腺モニタリング値

経過時間 (日)	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

*Scattering factor. モニタリング値の全体的な不確かさとして対数正規分布を仮定した時の幾何標準偏差



1回目の摂取後のモニタリング値、甲状腺放射能及び摂取量の推定値

- IDEASのクライテリアでは、簡易評価で6 mSv以下の場合には詳細な評価を必要としない。例題はこれに該当し、直後のモニタリング値のみを用いて比例計算で評価されているため、甲状腺放射能推移は5回目のモニタリング値とは差がある。
- 本機能を用いてすべてのモニタリング結果を考慮して摂取量を推定した場合、IMBAを用いて同様の手法で推定した結果とよく一致した。IDEASと同様の手順で推定した場合は文献値とよく一致した。

Pu-238の吸入摂取に関する検証

- 摂取条件：作業者がPuを1回吸入摂取
- 尿モニタリング：17年以上（6,294日）にわたり48回を実施、最初の4回（～76日）は検出下限値（0.004 Bq/d）以下、5回目(123日～)以降のモニタリング値は0.076 Bq/d～0.580Bq/dで推移（SFは何れも1.8）

摂取量推定値

評価方法	測定値 (Bq)
本機能	1.27E+06
IMBA	1.27E+06

検出下限値以下という結果を検出下限値の半値と仮定して評価した場合、何れの結果もよく一致した。

開発した摂取量推定機能は問題なく機能していることを確認

例、本機能の特徴でもある複数モニタリング手法による結果の同時考慮についてもU吸入に対する肺及び尿モニタリングの事例により検証

本機能により、種々の摂取、モニタリング条件に対して、各種の摂取量を正確に再現することを検証（**機能の完成**）

【今年度の進捗】 コードの開発 (1)

GUIデザイン：条件設定

The screenshot shows the 'Internal Radiation Exposure Calculation' application window. It features several sections with input fields and buttons, numbered 1 through 10:

- 1: Input field for the data file path (".inp\input.xml").
- 2: Repository field with the value "/repository/test".
- 3: Evaluation dropdown menu set to "AcuteUnitIntake".
- 4: Exposure section with fields for Gender (male), SelectAge (Enter), Subject (worker), DayOld[d] (9125.0), and Period[d] (18250.0).
- 5: Intake section with fields for Isotope (Sr-82), IntakeType (ingestion), ChemicalForm (AllOtherChemicalForms(Strontium)), AlimentaryMaterial (total-diet), and SystemicMaterial (none).
- 6: Biokinetics section with buttons for "Biokinetics", "ChronicIntake", and "IntakeEstimate".
- 7: CalculationStage button.
- 8: S-Coefficient section with input fields for Alpha (20.0), Electron (1.0), and Photon (1.0), and buttons for "Calculate" and "View".
- 9: InternalExposure section with a "Dose" field and buttons for "Calculate" and "View".
- 10: Output area for results.

計算条件設定画面
(線量係数計算機能選択時)

- ①使用する線量評価用モデル・データの指定
2007年勧告準拠；1990年勧告準拠；その他
- ②吸入摂取時の呼吸気道沈着割合の指定
- ③機能選択
線量係数計算機能 or 核種摂取量推定機能
- ④評価対象条件設定
作業者 or 公衆；摂取時日齢；評価期間
- ⑤摂取条件設定
放射性核種；化学形；
摂取経路（経口摂取, 吸入摂取, or 創傷取込）；
使用動態モデル指定（動態モデルが化学形依存の場合）
- ⑥体内動態モデル編集
移行経路の追加・削除；移行係数の変更
- ⑦慢性摂取時の摂取条件指定
- ⑧核種摂取量推定機能時のモニタリングデータ入力
- ⑨放射線加重S係数 計算結果の表示
- ⑩線量係数 計算結果の表示

GUIデザイン：結果出力

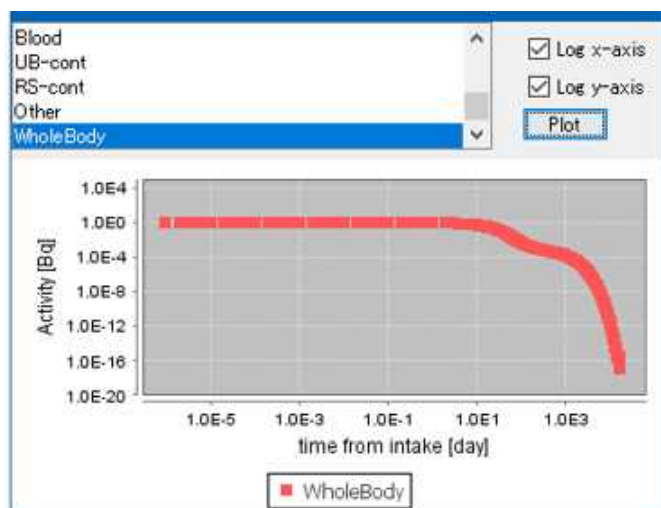
Time[d]	BoneMarrow	Breast	Color
1.000000	1.099e-12	9.841e-13	1.049
2.000000	2.179e-12	1.954e-12	2.076
3.000000	3.186e-12	2.859e-12	3.034
4.000000	4.125e-12	3.703e-12	3.928
5.000000	5.002e-12	4.491e-12	4.762
6.000000	5.820e-12	5.226e-12	5.540
7.000000	6.584e-12	5.912e-12	6.266
8.000000	7.296e-12	6.553e-12	6.944
9.000000	7.961e-12	7.150e-12	7.576
10.000000	8.581e-12	7.708e-12	8.166
11.000000	9.160e-12	8.229e-12	8.716
12.000000	9.701e-12	8.715e-12	9.230
13.000000	1.021e-11	9.169e-12	9.709
14.000000	1.068e-11	9.593e-12	1.016
15.000000	1.112e-11	9.989e-12	1.057
16.000000	1.153e-11	1.036e-11	1.096
17.000000	1.191e-11	1.070e-11	1.133

線量係数計算結果表示画面

DayOld[d]	Intake[Bq]	Lower95%	Upper95%
9125.000000	1.237e+05	1.237e+05	1.237e+05

Item	Dose[Sv]
BoneMarrow	1.822e-11
Breast	1.651e-11
Colon	1.720e-11
Lung	1.962e-11
Stomach	1.752e-11
Gonads	1.655e-11
UrinaryBladd...	1.641e-11
Oesophagus	1.707e-11
Liver	1.716e-11
Thyroid	1.685e-11
BoneSurface	1.511e-11
Brain	1.649e-11
SalivaryGlan...	1.650e-11
Skin	1.650e-11
Adrenals	1.701e-11
Extrathoraci...	1.734e-11

摂取量推定結果表示画面



体内放射能推移表示画面

- 線量係数計算機能と核種摂取量推定機能を統合するGUIをデザイン
- GUIで使用する機能の選択、計算条件を設定可能
- 計算結果を表や図で出力可能

**GUIを備えたコードβ版は
本年3月末までに完成見込み**

○ 成果発表

論文発表

- K. Manabe et. al.: “Development of a function calculating internal dose coefficients based on ICRP 2007 Recommendations”, Bio Conf. **14**, 03011 (2019)

学会発表

- 日本原子力学会2019年秋の大会にて口頭発表（2件）（令和元年9月）
- 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP 2019) にてポスター発表（1件）
- 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てポスター及び口頭発表（令和元年12月）
- 日本原子力学会2020年春の年会にて口頭発表（1件）（令和2年3月予定）

○ ソフトウェア開発

- ICRP2007年勧告に準拠する内部被ばく線量評価コードβ版（令和2年3月整備予定）

【今年度の自己評価】



1. 核種摂取量推定機能の開発の達成度

核種摂取量推定機能に関し、EURADOS IDEASガイドラインの例題等により妥当性を検証し、**同機能を完成**させた。

2. 利便性や操作性の向上を図る機能、コードの開発の達成度

ユーザーによる入力設定や結果を表示する機能を整備し、線量係数計算及び核種摂取量推定が可能な**コードβ版の開発を完了する見込み**である。

他、ICRPによる新しい線量評価モデルや線量係数の公開予定など、本テーマの進捗に関連する情報の調査

⇒ 作業者によるランタノイド・アクチノイドの摂取に係る組織系動態モデル、線量係数等(OIR part 4)がPubl.141として公開準備中等の情報を収集

自己評価：概ね当初の計画通りに進捗

今後の課題（次年度の計画：当初計画から変更なし）

- β版の改良、マニュアルの整備（ユーザーによる意見聴取等）によるコードの完成
- ICRPにおける検討の動向を調査し、適宜、コード開発に反映
- 事業終了後のコードの拡張や活用策の検討(最終年度となる次年度中にICRP2007年勧告に準拠するモデル・データ、線量係数等は全て出揃わないと想定)

放射線安全規制研究戦略的推進事業
-内部被ばく線量評価コードの開発に関する研究-

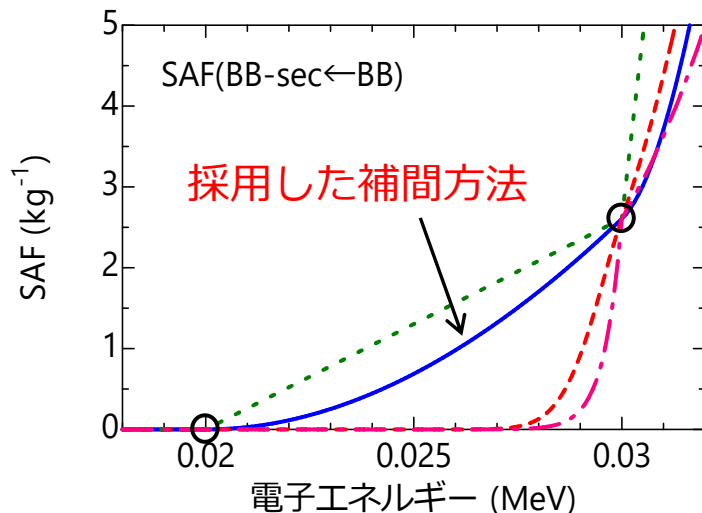
平成29年度から平成31年度の3年間における進捗、自己評価等
【中間評価】

【3年間の進捗①】 実効線量係数の検証など(1)

ICRP2007年勧告の放射線規制への取入れに伴う内部被ばく防護基準値の改正
 ⇒ 基本とするモデルやデータ等に従う実効線量係数の導出を検証する必要

ICRPのモデルやデータの対応の例 (SAFの補間方法)

SAF(比吸収割合) : 線源組織・臓器からの放出放射線が、標的組織・臓器へ付与するエネルギーを示す。



SAFデータの補間方法

○	データ点	---	PCHIP (対数変換)
—	PCHIP* (線形)	-·-	直線補間 (対数変換)
····	直線補間 (線形)		

*PCHIP:区分的 3 次エルミート内挿多項式

関連する刊行物 (Publ.133) では、具体的な方法を提示していない。



ICRP 第2委員会委員との情報交換により、採用されている “PCHIP (線形)” を実装

新しい実効線量係数の正確な導出の検証(公開済の刊行物、OIR Data Viewer)

公開済の刊行物(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

ICRP Publ.115等を参照するRnを除く27元素(284核種、1339ケース)の実効線量係数
 ⇒ 約94%が一致、約6%が四捨五入による2桁目の1の差(実効線量係数の再現に成功)

【3年間の進捗②】 実効線量係数の検証など(2)

- 今後、ICRPより順次公開されるモデル・データへの対応
- 国内の放射線安全規制へのICRP2007年勧告の取入れに係る検討に活用するため、日本人に適したパラメータ等による評価

新規に公開されるモデルやデータへの対応可能なデータ記述



組織系動態モデルと開発中のコードにおけるデータ記述

組織系動態モデルで考慮されるコンパートメント(組織等)名等をID番号を用いて正確に認識し、汎用的なソフトウェアによるデータの拡張を可能に

日本人に適したパラメータ等の設定

- 日本人SAFデータの実装、任意のパラメータを設定可能なコードを開発
- 現在の防護基準値の基本とする1990年勧告に従うモデルやデータの実装、選択可能

国内の内部被ばく防護基準値の改正における検討に有益な機能を開発

ICRP2007年勧告を国内の放射線規制に取り入れた場合、各事業所等でも新しい線量評価モデルやデータに従い、核種の摂取量を推定して内部被ばく線量を評価

国内の研究機関、大学との意見交換により聴取したニーズ(主なもの)

- 様々な摂取シナリオへの対応
慢性摂取、複数回摂取の評価、複数の摂取経路の同時考慮等
- モニタリングデータの設定や取扱
不確かさの取り扱い、摂取時期の不確かさの考慮、複数のモニタリングに対する処理
- 体内放射能・排泄率の計算条件
粒径分布や運動状態等の沈着率に影響を及ぼすパラメータの考慮
- 結果の出力
計算の途中経過の出力、不確かさの取扱、時間経過と累積被ばく線量の関係図等

核種摂取量推定機能の開発

- 様々な摂取シナリオに対する計算機能の開発及び検証(P.7-8)
- ユーザーによる条件を設定する機能、効果的に結果を表示する機能の開発(P.10)

ニーズ調査に基づいて、事業所等における内部被ばく線量評価に
有益な機能を開発

【3年間の進捗④】 研究の到達点、経費の支出状況



ロードマップ概略及び研究フロー(当初計画)

実施項目	平成29年度	平成30年度	平成31/令和元年度
1) 線量係数計算機能の開発	計算機能の開発及び検証 基本機能の完成 ▲	機能の設計 完成 ▲	
2) 核種摂取量推定機能の開発	機能のニーズ調査 概念設計等	推定機能の開発 基本機能の完成 ▲	機能検証 完成 ▲
3) コード開発等		パラメータ設定法の検討	GUI等の開発 β版の完成 ▲

(1) 線量係数計算機能の開発

- 2007年勧告に従い線量係数を計算する機能
- 日本人に適したパラメータ等の適用
- 新規モデル・データの取込みを可能とする設計

機能の活用(体内放射エネルギーの計算)

(2) 核種摂取量推定機能の開発

- モニタリング値に基づく摂取量の推定法の開発

(3) 操作性や利便性の向上を図るための開発

- パラメータ設定や結果表示機能の開発

当初計画の通り、今年度末のマイルストーンコードとしたβ版完成の見込み

研究経費の支出状況

(単位：円)

年度		平成29年度	平成30年度	平成31/令和元年度(見込み)
経費合計		14,053,770	19,533,159	19,385,228
直接経費	設備備品費	714,776	0	561,060
	消耗品費	1,533,588	1,945,836	244,620
	人件費	2,234,478	5,242,422	6,458,793
	謝金	0	50,000	0
	旅費	895,351	674,136	888,441
	外注費	5,400,000	7,020,000	6,930,000
	その他(学会参加費等)	32,400	93,113	151,241
間接経費		3,243,177	4,507,652	4,151,073

再委託費等、他の項目の支出なし

○ 成果発表

論文発表(1報)

K. Manabe et. al.: “Development of a function calculating internal dose coefficients based on ICRP 2007 Recommendations”, Bio Conf. **14**, 03011 (2019)

学会発表

・ 国際学会(3件)

International conference of the health effect of incorporated radionuclides (HEIR2018), 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP2019)等

・ 国内学会(12件)

平成29年度以降に開催の日本原子力学会、日本保健物理学会 等

○ ソフトウェア開発

ICRP2007年勧告に準拠する内部被ばく線量評価コードβ版(令和2年3月整備予定)

【3年間の自己評価①】 自己評価



- ① ICRP2007年勧告に準拠する新しい実効線量係数等が正確に導出されている機能を開発
 - ② 新しい線量評価モデル・データに従い、モニタリング結果に基づいて核種の摂取量を推定する機能を開発
 - ③ 日本人に適したパラメータ等の設定、計算結果等を効果的に提示する機能を開発
 - ④ ①から③を統合したコードβ版を完成（今年度末、見込み）
 - ⑤ さらに、コードの開発、内部被ばく防護基準値の改正に関連する情報を収集し、POやPO補佐等と共有
- ⇒ 第146回放射線審議会総会(本年9月27日開催)において、本研究テーマの進捗や関連する情報を報告

“概ね計画通り進捗”しており、“**計画変更の必要はない**”。
(現状の到達点：**当初計画のほぼ100%**)

【3年間の自己評価②】 研究成果の活用



「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）」の公募要領において記載された本テーマに係る成果の活用策

- ・ 継続的に改良が検討される内部被ばく実効線量係数取り入れへの対応
- ・ 平常時・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



来年度、β版の試用に基づく意見聴取によるコードの改良、マニュアル整備等により、**コード完成の見込み**

- ・ 順次公開される実効線量係数の検証、線量評価モデル・データに対応可能な線量係数計算機能の確立
- ・ 日本人パラメータや1990年勧告に準拠するモデル・データの設定も可能
⇒ 内部被ばく防護基準値（空气中濃度限度等）の見直しにおいて、実効線量係数の正確な導出、国際的なデータの適用に関する検証、新旧係数の差異への影響因子の調査を可能とする技術基盤
- ・ 様々な放射性核種の摂取条件、モニタリングの遂行状況に対応して、放射性核種の摂取量、内部被ばく線量評価を可能とする機能の確立
⇒ 事業所等における被ばく管理、事故時対応に有効な技術基盤