

ICRP Publication 130 「放射性核種の職業上の摂取 (OIR) Part 1」の概要と主な変更点

高橋 聖 吉澤 道夫
Takahashi Masa Yoshizawa Michio

1. はじめに

国際放射線防護委員会 (ICRP) は “Occupational Intakes of Radionuclides (OIR)” (放射性核種の職業上の摂取) と呼ばれる一連の刊行物 (以下, OIR シリーズ) の策定を進めている。OIR シリーズは, ICRP Publ. 103 (国際放射線防護委員会の 2007 年勧告) の防護量の考え方に基づく内部被ばく線量評価方法を提示する専門的な報告書であり, ICRP Publ. 68 (作業者による放射性核種の摂取についての線量係数) 及び ICRP Publ. 78 (作業者の内部被ばくの個人モニタリング) に置き換わるものである。OIR シリーズは, Part 1 から Part 5 までの 5 つの刊行物で構成され, 現在 (2021 年 8 月 30 日時点), ICRP Publ. 141 (OIR Part 4) まで刊行されている。ICRP Publ. 130 (OIR Part 1) は OIR シリーズの第 1 部としてシリーズ策定の基本的考え方や改訂された体内動態モデルを示す重要な刊行物である。このため, 原子力規制委員会によってその邦訳版¹⁾が作成, 公開されている。本稿では ICRP Publ. 130 の概要と体内動態モデル等の変更点を, 内部被ばく線量評価への影響を含めて解説する。

2. ICRP Publ. 130 の概要

内部被ばく線量は, 通常, 体外計測やバイオアッセイ分析といったモニタリング結果から放射性物質の体内摂取量を求め, それに実効線量係数 (単位は Sv/Bq 又は mSv/Bq) を乗じて計算される。内部被ばくは, 放射性物質が体内に存在する間継続するた

め, 摂取からの一定期間 (職業被ばくでは 50 年間にわたる線量, いわゆる預託線量を評価する。実効線量係数は, 単位放射能を摂取した場合の預託実効線量であり, ICRP が構築する体内動態モデル等を用いて核種や化学形等の条件ごとに計算され, OIR シリーズで示される。ICRP Publ. 130 では, 実効線量係数の計算に用いられる体内動態モデルの共通部分や計算方法等が示されている。以下に ICRP Publ. 130 の章項目を示す。

- 第 1 章 緒言
- 第 2 章 放射性核種の内部職業被ばくモニタリングと評価
- 第 3 章 体内動態モデルと線量評価モデル
- 第 4 章 個人モニタリングと作業場モニタリングの方法
- 第 5 章 モニタリングプログラム
- 第 6 章 遡及的線量評価と遡及的線量検証の一般的な側面
- 第 7 章 元素と放射性核種について提示されるデータ

付属書 A ヒト呼吸気道モデルの改訂

付属書 B ICRP の全身体内動態モデルの発展

第 2, 4, 5 章では内部被ばくモニタリングの目的, 手法, 計画等に関するガイダンスが, 第 3 章及び付属書 A, B では体内動態モデル等の預託線量の具体的計算方法が記述されている。第 6 章では, モニタリング結果 (体外計測又はバイオアッセイの放射能測定値) から内部被ばく実効線量を導出する方法の一般的手順と線量評価に伴う不確かさの考え方が示されている。第 7 章では OIR シリーズで与えられる

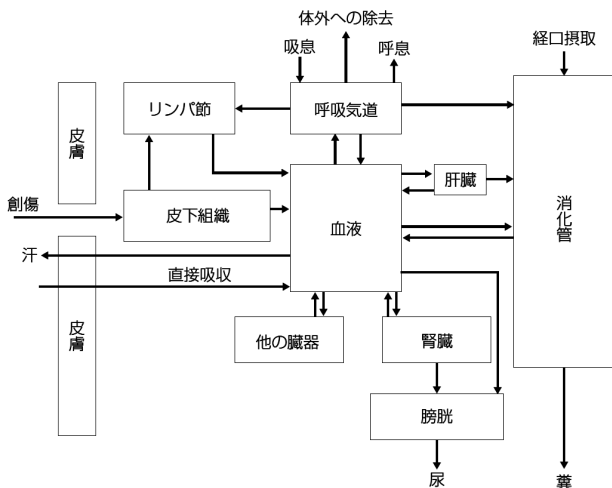


図1 体内動態モデルの全体概要図
(ICRP Publ. 130 邦訳版 図3.1)

データが説明されている。本稿では ICRP Publ. 130 の中核的内容となる第3章について主に解説する。

図1に体内動態モデルの概要図を示す。このモデルでは、放射性物質の摂取、移行、排泄等の挙動をコンパートメントモデルとして表現する。これは、各臓器・組織（リンパ液や血液を含む）をコンパートメント（放射性物質の入れ物）として扱い、コンパートメント間の放射性物質の移行速度を設定することにより、各コンパートメントの放射性物質の時間変化を数式化するものである。体内動態モデルは、ヒト呼吸気道モデル（Human Respiratory Tract Model：HRTM）、ヒト消化管モデル（Human Alimentary Tract Model：HATM）及び全身体内動態モデルに分割して構築される。

2.1 ヒト呼吸気道モデル（HRTM）

HRTMは図1の呼吸気道にあたる部分を表し、放射性物質の領域内への沈着、輸送、血液（リンパ含む）への吸収という3つの過程に分けて、吸入摂取された物質の挙動を表現する。沈着は吸入された物質が領域内へ留まる割合を、輸送は沈着した物質の鼻腔から肺胞等の領域内移動及び領域外への除去を表す。血液への吸収は呼吸気道領域から全身循環系への移動を表し、その吸収速度が物質の化学形に依存する。HRTMでは、粒子状物質の化学形を血液への吸収の速度に応じて吸収タイプF（Fast）、M（Moderate）、S（Slow）の3段階に分類する。吸収タイプごとに実効線量係数が計算され、対応する化

学形と共にその数値が示される。HRTMはICRP Publ. 130でモデル構造等の多少の改訂が行われた。

2.2 ヒト消化管モデル（HATM）

HATMは図1の消化管部分を表すモデルであり、経口によって体内に入った放射性物質の口腔、食道、胃、小腸、結腸、直腸の間の移行、便への排泄、全身循環系への吸収を記述する。消化管に入った放射性物質は主に小腸で血液中へ吸収され、その吸収割合が物質の元素や化学形に応じて設定される。食道領域でHRTMと連結されており、吸入摂取の場合もHATMが使用される。HATMはICRP Publ. 100で公開されたものが使用される。

2.3 全身体内動態モデル

HRTM及びHATMから血中へ吸収された後の放射性物質の挙動は全身体内動態モデルにより表される。全身体内動態モデルはHRTMとHATMと異なり、元素固有のモデルが構築されOIR Part 2以降で与えられる（表1参照）。全身体内動態モデルは、図1に示すとおり血液等の全身循環を表すコンパートメントを軸としてその他の臓器を配置し、各元素の生理学的プロセスを表現する。これによって、例えばヨウ素における甲状腺等、各元素の親和臓器等も表現される。図1に明示されていない臓器、例えば骨等も元素に応じて設定される。これらのモデル、パラメータは利用可能な実験データ、化学的に似た他の元素からの類推等を基に構築される。

表1 OIRシリーズに全身体内動態モデル、実効線量係数等が示される元素

Part 2 (ICRP 134)	H, C, P, S, Ca, Fe, Co, Zn, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc
Part 3 (ICRP 137)	Ru, Sb, Te, I, Cs, Ba, Ir, Pb, Bi, Po, Rn, Ra, Th, U
Part 4 (ICRP 141)	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ac, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm
Part 5*	Be, F, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Hf, Ta, W, Re, Os, Pt, Au, Hg, Tl, At, Fr

* Part 5は未刊行のため予定される元素

2.4 実効線量係数の評価

ここまでは体内における放射性物質の挙動を表現する体内動態モデルを紹介した。これらを用いて預託実効線量を求めるには、放射性物質から放出される放射線の情報、放射線と人体の相互作用等の取扱いが必要となる。以下に預託実効線量の計算プロセスの概要を示す。

- ① 体内動態モデルにより表される各臓器の放射性物質の時間変化を積分することにより一定期間の放射性核変換数を求める
- ② 人体ファントム及びモンテカルロ放射線輸送計算を使用し線源臓器から標的臓器への放射線エネルギー付与割合を求める
- ③ ①及び②の結果に核壊変データ及び放射線加重係数を組み合わせ標的臓器の預託等価線量を求める
- ④ ③の預託等価線量を男女別に求め、その平均値に組織加重係数を乗じた総計が預託実効線量となる

この計算を摂取量 1 Bq として実施したものが実効線量係数となる。実効線量係数の計算は複雑かつ膨大となるため専用の計算コードが用いられる。これらの計算は従来評価法でも基本的には同じであるが、OIR シリーズでは後述するとおり多くの体内動態モデルやデータが変更されている。

2.5 OIR シリーズで与えられるデータ

OIR Part 2 以降には、表 1 に示す元素について実効線量係数、バイオアッセイ関数（単位放射能摂取後の体内又は排泄中放射能の時系列）、単位内容量当たりの線量の関数（体内放射能又は排泄中放射能当たりの預託実効線量。単位は Sv/Bq）が示される。バイオアッセイ関数を用いて摂取量を評価した後に

実効線量係数を乗じて実効線量を求める従来の方法に加え、体外計測等の個人モニタリングの測定値から「単位内容量当たりの線量の関数」により直接実効線量を求めることが可能となる。両者の結果は同じ値になるが、後者はより単純な計算過程のためパラメータの選択ミス等の誤りを減らす利点がある。

3. OIR シリーズの変更点

表 2 に OIR シリーズの線量評価体系の変更点を示す。体内動態モデルについては新たな実験データの反映のため、モデルの再構築、パラメータ変更等が行われた。HRTM では主に、コンパートメントモデルの変更、化学形に対する吸収タイプの割当ての見直しが行われた。例えば、H, Co, Sr に新たな化学形が追加され、従前の吸収タイプ F 又は M から線量が大きくなりやすい吸収タイプ S への変更等があった。また、各吸収タイプの吸収速度のデフォルト設定値も変更された。更に、信頼性の高いデータのそろった一部の元素については固有の吸収速度が設定される。HATM では従前の胃腸管モデルに口腔、食道、各臓器壁等のコンパートメントが加えられた。これによって臓器壁等への一部放射性物質の残留や臓器壁内の放射性感受性の高い領域が表現される。全身体内動態モデルでは全体的なモデルの精密化が図られ、旧モデルではいくつかの元素だけに適用された汎用の生理学的モデルが他の元素へも拡張された。

ICRP 標準ファントムは CT 等の医療断層画像を元に作成された男性用と女性用の数値表現による人体モデルで、従前の人体モデルより解剖学的精度が向上している。また、一部の管状の臓器や骨については特別な数値モデルが用いられる。これらを用い

表 2 OIR シリーズの変更点

線量評価用モデル及びデータ		従前モデル	OIR シリーズ
体内動態モデル	呼吸気道モデル	HRTM (ICRP 66)	改訂 HRTM (ICRP 130)
	消化管モデル	胃腸管モデル (ICRP 30)	HATM (ICRP 100)
	全身体内動態モデル	全身体内動態モデル (ICRP 56, 67, 69, 71)	全身体内動態モデル (ICRP 134, 137, 141)
人体数値ファントム		MIRD ファントム等	ICRP 標準ファントム (ICRP 110)
核壊変データ		放射性核変換 - エネルギーと放出率 - (ICRP 38)	線量評価用核壊変データ (ICRP 107)
放射線加重係数, 組織加重係数		ICRP1990 年勧告 (ICRP 60)	ICRP2007 年勧告 (ICRP 103)

て線源臓器と標的臓器の組み合わせに対する放射線エネルギーの吸収割合（比吸収割合）が計算され、ICRP Publ. 133 として公開されている。線量計算に必要な核種の半減期、線種、エネルギー、放出率の情報は ICRP Publ. 107 の新しい核壊変データから参照される。

これまで部分的に更新されてきたこれらモデルとパラメータが、OIR シリーズによって改めて最新版を使用した計算が行われ、また外部被ばく線量換算係数で用いられる標準ファントムと共通化され、線量評価体系の整合性が強化された。

4. 実効線量係数への影響

実効線量係数は放射性物質の空气中濃度限度にも関係するため、OIR シリーズによる実効線量係数の変化は、内部被ばくの個人モニタリングに加え作業場モニタリングにとっても重要である。日本原子力研究開発機構では公開済 OIR（Part 2, 3, 4）と現行国内法令（放射性同位元素等の規制に関する法律告示「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」）で取り扱われる核種とその化学形を整理し、同条件（核種及び化学形）における実効線量係数について比較分析を行った²⁾。その結果、OIR と国内法令の両方に吸入摂取に対する実効線量係数が示されている 2,081 条件（522 核種）のうち OIR が大きくなるものは約 10 % の 201 条件（129 核種）であり、このうち 2 倍以上大きくなるものは約 2 % の 51 条件（34 核種）であることが示された。表 3 に OIR の線量係数が 2 倍以上大きくなる 34 核種を示す。OIR の方が大きくなるのは新しく追加された化学形が吸収タイプ S に設定される場合に多い。この比較分析によって約 90 % の条件では現行法令の実効線量係数が OIR の数値を上回り、保守的に評価されることがわかった。ただし、OIR Part 5 が未刊行のためすべての比較が行われたわけではないことに注意が必要である。

表 3 OIR の実効線量係数が 2 倍以上となる核種

（文献²⁾ 表 11～表 14 から作成）

核種	線量係数の比 (OIR / 国内法令)
¹⁴ C, ³³ P, ⁸⁹ Sr, ⁹³ Zr, ⁹⁸ Tc, ⁹⁹ Tc, ¹⁰⁵ Ru, ²⁰⁵ Pb, ²⁰⁹ Pb, ²²⁵ Ac, ²²⁶ Ac, ²³⁰ Th, ²³¹ Pa, ²³⁰ U	2～3
²²⁴ Ac, ²⁰⁸ Bi	3～4
⁶⁰ Co, ²⁰⁷ Bi, ²¹¹ Pb, ²¹⁴ Pb, ²³² Th	4～5
²⁰² Pb	5～6
⁹⁰ Sr, ^{93m} Nb	6～7
¹¹ C, ²¹⁰ Pb	8～9
³ H, ³⁵ S, ²¹² Pb	9～10
⁹¹ Nb, ⁹² Nb, ⁹⁴ Nb	10～20
^{192m} Ir, ²¹⁰ Bi	20～30

5. おわりに

OIR シリーズは ICRP 2007 年勧告の線量体系に従った職業上の内部被ばく線量評価に関する刊行物群であり、現行の国内法令に従った内部被ばく線量評価に影響を与える重要な刊行物である。今後、ICRP 2007 年勧告の国内法令取入れに伴い、OIR シリーズの実効線量係数への見直しが行われると予想される。その際に、各事業所等で実施されている内部被ばく線量管理や作業場の放射線管理に大きな混乱なく円滑に移行できるよう、本稿で紹介した内容や参考文献が少しでも役立つことを期待する。

参考文献

- 1) ICRP Publication 130, “放射性核種の職業上の摂取—第 1 部—”, 原子力規制委員会 (2021)
https://www.nsr.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html
- 2) JAEA-Review 2020-068, “ICRP2007 年勧告に準拠する内部被ばく線量評価に用いる実効線量係数”, 高橋史明他 (2021)

((国研)日本原子力研究開発機構)