

内部被曝線量評価システムの開発 Development of Internal Dose Coefficients System

日本原子力研究開発機構 安全研究センター
リスク評価・防災研究グループ

波戸 真治、本間 俊充

放射性核種を吸入や経口摂取したことによる内部被曝線量は、ICRPが刊行物等に示している線量係数により評価が行われる。これらICRPの示している線量係数は、預託期間が一般公衆で70歳まで、作業員で50年間である。生涯の評価の場合にはこれらの預託期間で十分であるが、原子力施設の事故評価では健康影響を推定する際のようにより詳細な評価が必要となる場合がある。このため、預託期間やその他の様々なパラメータを変えた線量係数を算出できる内部被曝線量評価システムを開発した。本報告では、内部被曝線量評価モデルの概要及び開発したシステムについて述べる。

1. はじめに

放射性核種を体内に摂取したことにより生じる体内被曝の定量的な評価は、国際放射線防護委員会（ICRP: International Commission on Radiological Protection）が与えている線量係数により行われる。この線量係数は、急性な放射性核種の単位摂取による線量で表され（単位[Sv/Bq]）、体内動態モデルと線量算定モデルから計算されたものである。ICRPの体内被曝に関する線量算定の方法論は、最初にICRP Publ.30[1]において公表され、作業員に対する年摂取限度（ALI）及び誘導空気中濃度（DAC）が与えられた。その後、公衆の構成員に対する単位摂取当りの線量を評価するため年齢依存等を考慮した線量係数が公表された[2], [3], [4], [5], [6], [7]。現時点における最新の線量係数は、ICRP CD-ROM[8]として公表されている。

ICRPの刊行物で与えている線量係数は、70歳まで（一般公衆）又は50年間（作業員）の預託等価線量係数及び預託実効線量係数で

ある。一方、ICRP CD-ROMでは、上記預託期間の他に1日、7日、30日、1年、5年、10年、20年、30年、45年の線量係数が与えられている。ICRPでは人の一生を70歳までと仮定しており、摂取後の体内被曝は、一生の預託線量を使用して評価が行われる。しかしながら、原子力施設の事故による環境影響評価では、より詳細な線量評価が必要となる。旧日本原子力研究所で開発された確率論的事故影響評価（レベル3PSA）コードOSCAARでは、放射線被曝に起因する健康影響を推定するため1日、7日、14日、21日、30日、200日等の預託期間の線量係数が必要であり、ICRPが与えていない預託期間がある。従来、OSCAARではICRP Publ.30に基づく線量換算係数算出システムDOSDACにより線量換算係数が算出されていた。ICRP Publ.56以降、年齢依存性、一部核種でフィードバックを考慮した体内動態モデル、呼吸気道モデルが新たに開発され、ICRP Publ.30のモデルとはかなり異なったものとなった。このため、

これら新しいモデルに基づく内部被曝線量評価システムの開発を行った。

本報告では、呼吸気道モデル、核種の体内における動態モデル、線量算定モデルから構成される内部被曝線量評価モデルの概要を説明し、開発した内部被曝線量評価システムについて説明を行う。

2. 内部被曝線量評価モデルの概要

内部被曝線量評価モデルは、吸入摂取による呼吸器気道内の沈着と移行を評価する呼吸気道モデル、体内における核種の動態を評価する動態モデル、及び線量を評価する線量算定モデルの3つに分類することができる。

ICRP Publ.30のこれらモデルと現行(ICRP Publ.56以降)のこれらモデルで主に異なるのは、呼吸気道モデルが複雑になったこと、核種の体内動態及び線量評価に年齢依存が考慮されるようになったこと、プルトニウム等の体内動態モデルにフィードバックが考慮されたこと等である。

なお、内部被曝線量評価では、摂取核種の体内における壊変に伴う娘核種等の放射性壊変生成物の動態及び線量も考慮して線量係数を求めている。例えば、Pu-239の摂取の場合、親核種のPu-239を含めて、14核種を考慮して評価することとなる。

2.1 呼吸気道モデル

ICRP Publ.30の肺モデルに代わる呼吸気道モデルは、ICRP Publ.66 [9] に与えられている。その呼吸気道モデルは、呼吸器内の沈着モデルとクリアランスモデルに分けられている。

沈着モデルは、吸入摂取された核種の呼吸器内の各領域(図1の赤部分)における沈着割合を解剖学的データ及び生理学的データを用いて評価する。これらデータは年齢に依存したものであり、各年齢の沈着割合が求められる。また、空気中に浮遊している核種の粒

子径は、単一の粒子径の場合だけでなく、通常は様々な粒子径で浮遊していると考えられる。このような系は多分散粒子系と呼ばれており、その粒子径分布は対数正規分布に従い、空気力学的放射能中央径(AMAD)や熱力学的放射能中央径(AMTD)で表される。沈着モデルでは、このような多分散粒子系の沈着割合の評価も行われる。

クリアランスモデルは、呼吸気道の各領域をコンパートメントで表して、物質の移動をモデル化している(図1)。

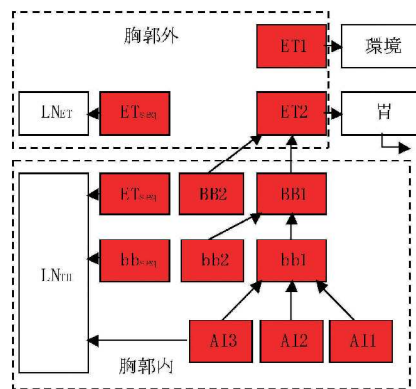


図1 呼吸気道のクリアランスモデル

また、呼吸気道から血液への吸収は、粒子の溶解過程を図2のようにモデル化し、血液への吸収を経路や移行率によって、タイプF(Fast)、M(Moderate)、S(Slow)に分類している。これら3タイプは、核種の化学形に依存している。

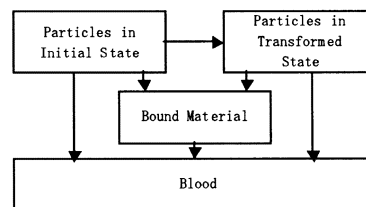


図2 呼吸気道から血液への吸収

2.2 動態モデル

呼吸気道以外の体内における核種の動態は、胃腸管モデル、体内動態モデル、及び膀胱モデルの3つで構成されている。各モデルともに臓器をコンパートメントで表現して、物質移動を表している。胃腸管モデルと膀胱モデルは核種に依存しないモデルであるが、体内動態モデルは元素毎にモデルが与えられている。核種の体内における動態は、これら3モデルから1階の連立微分方程式を組み立てて表される。

(1) 胃腸管モデル

胃腸管モデルは、ICRP Publ.30のモデルが現行のモデルにも適用されており、胃、小腸、大腸上部、大腸下部の4つのコンパートメントで表されている(図3)。

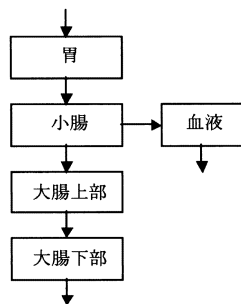


図3 胃腸管モデル

各コンパートメント間の移行は、移行率で表されるが、小腸から血液へは胃腸管からの元素の取り込み割合(f_1 値)を用いて表される(次式)。

$$\lambda_B = \lambda_{SI} / (1 - f_1) \quad (1)$$

λ_B : 小腸から血液への移行率

λ_{SI} : 小腸からの移行率

この f_1 値は、ICRP Publ.30では年齢依存がなかったが、現行モデルでは年齢依存があり、この点がICRP Publ.30と異なっている。

(2) 体内動態モデル

体内動態モデルは、元素毎にモデルが与えられており、元素によってはICRP Publ.30のモデルがそのまま使用されている場合と、ICRP Publ.56以降に提案されたモデルが使用される場合がある。ICRP Publ.30のモデルは、コンパートメントの上流から下流へと一方向に流れる構造をしており、移行率に年齢依存はない。一方、ICRP Publ.56以降のモデルは、血液へのフィードバックが考慮される場合があり、移行率に年齢依存がある。この年齢依存の移行率は3ヶ月、1歳、5歳、10歳、15歳、及び成人の6年齢がデータとして与えられている。

例えば、ICRP Publ.67のプルトニウムの体内動態モデルを図4に示す。プルトニウムは特に肝臓と骨に蓄積されることが知られている。また精巣(Testes)と卵巣(Ovaries)の両方が考慮されているが、モデルでは両性を仮定している。

(3) 膀胱モデル

膀胱モデルは、1つのコンパートメント(膀胱)で表され、移行率に年齢依存があり、3ヶ月、1歳、5歳、10歳、15歳、及び成人の6年齢の移行率が与えられている。

ICRP Publ.30のモデルでは、膀胱がモデル化されていなかった。しかし、ICRP Publ.60において、膀胱への組織荷重係数が明示されたことにより、その動態を考慮する必要性が生じたためモデル化された。

現行の体内動態モデルの中でICRP Publ.30モデルが用いられている場合、この膀胱モデルを結合する必要がある。そのとき、尿と糞への排泄過程(膀胱と大腸上部への移行)は尿と糞の排泄比で表される。一方、プルトニウム等の体内動態モデルでは、図4に示すように膀胱がすでに考慮されたモデルとなっている。

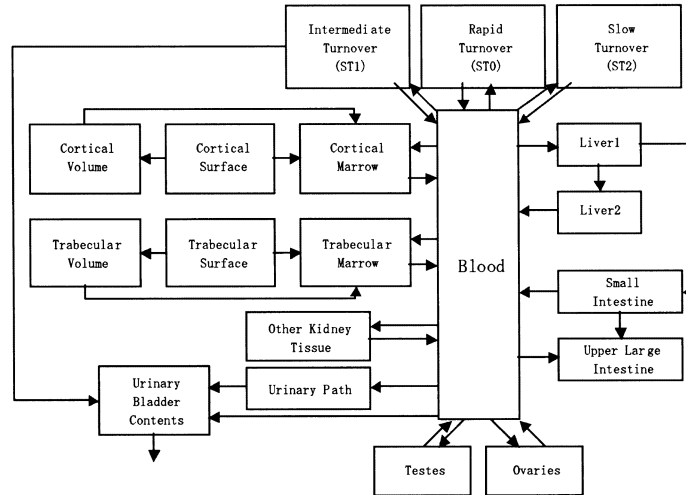


図4 プルトニウムの体内動態モデル

2.3 線量算定モデル

摂取核種の臓器における残留放射能から放射線が放出され、各臓器はそのエネルギーを吸収し影響を受ける。この臓器に吸収されるエネルギーは、比実効エネルギー (Specific Effective Energy : SEE) で表される (次式)。

$$SEE(T \leftarrow S; t) = \sum_R \frac{Y_R E_R w_R AF(T \leftarrow S; t)_R}{m_T(t)} \quad (2)$$

ここで、 $SEE(T \leftarrow S; t)$ は年齢 t における線源臓器 S から標的臓器 T への比実効エネルギー $[Sv/(Bq \cdot s)]$ である。 Y_R 、 E_R 、 w_R 、 $AF(T \leftarrow S; t)_R$ は放射線 R の放出率 $[(Bq \cdot s)^{-1}]$ 、エネルギー $[J]$ 、放射線荷重係数 $[-]$ 、年齢 t における線源臓器 S から標的臓器 T への吸収割合 $[-]$ である。 $m_T(t)$ は標的臓器 T の年齢 t における質量 $[kg]$ である。

放射線 R は α 線、 β 線、 γ 線が評価される。これら放射線の吸収割合は、貫通放射線でない α 線と β 線では線源臓器ですべて吸収されると仮定され¹、貫通放射線の γ 線では

Cristy et. al.[10][11]が数学的ファントムから計算した新生児 (0歳)、1歳、5歳、10歳、15歳、成人の比吸収割合 ($AF(T \leftarrow S; t)/m_T(t)$) がエネルギー毎に示されており、これを使用してSEEが求められる。

したがって、核種を年齢 t_0 で急性摂取したことによる年齢 t における標的臓器 T の等価線量率 $[Sv/s]$ は、次のようになる。

$$\dot{H}_T(t, t_0) = \sum_S q_S(t, t_0) \cdot SEE(T \leftarrow S; t) \quad (3)$$

ここで、 $q_S(t, t_0)$ は線源臓器 S の残留放射能 $[Bq]$ である。

以上から、摂取から70歳までの標的臓器 T に累積される線量、すなわち預託等価線量 $[Sv]$ は、次のように表される。

¹ 呼吸気道では線源臓器と標的臓器が近接しているため例外であり (ICRP Publ.66)、また骨及び空洞を持つ臓器 (胃等) についても例外である (ICRP Publ.30)。

$$\begin{aligned}
 H_T(70-t_0) &= \int_{t_0}^{70} \dot{H}_T(t, t_0) dt \\
 &= \int_{t_0}^{70} \sum_S q_S(t, t_0) \cdot SEE(T \leftarrow S; t) dt \quad (4)
 \end{aligned}$$

ここで、比実効エネルギーは新生児、1歳、5歳、10歳、15歳、成人の値が式(2)から求められ、積分するときに必要な各年齢間の値は、体重（注：臓器質量でない）の逆数による線形補間で求める。なお、対応年齢の体重は年齢による線形補間で求める。

また、摂取から70歳までの預託実効線量[Sv]は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 E(70-t_0) &= \sum_{T=1}^{12} w_T \cdot H_T(70-t_0) \\
 &\quad + w_{Remainder} \cdot H_{Remainder}(70-t_0) \quad (5)
 \end{aligned}$$

ここで、 w_T と $w_{Remainder}$ は組織荷重係数である。式(5)の中の12臓器及び組織荷重係数を表1に示す。

ICRPの刊行物では、核種を1Bq摂取したときの預託等価線量及び預託実効線量が与えられており、これらは線量係数[Sv/Bq]と呼ばれている。また、一般公衆に対しては、次の6年齢区分の線量係数が対応年齢に適用される。

3ヶ月	： 0歳から1歳まで
1歳	： 1歳より大きく2歳まで
5歳	： 2歳より大きく7歳まで
10歳	： 7歳より大きく12歳まで
15歳	： 12歳より大きく17歳まで
成人	： 17歳より大きい

表1 組織荷重係数

臓器	組織荷重係数
生殖腺	0.20
赤色骨髄	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳房	0.05
肝臓	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮膚	0.01
骨表面	0.01
残りの臓器・組織	0.05
合計	1.00

3. 内部被曝線量評価システムの開発

内部被曝線量評価コードとしてNational Radiological Protection Board (NRPB) が開発した LUDEP や Oak Ridge National Laboratory (ORNL) が開発した DCAL [12] がある。LUDEPは販売されており、ICRP Publ.66の呼吸気道モデルの評価が行えるが、体内動態モデル及び線量算定モデルが旧来のICRP Publ.30のモデルがベースとなっている。一方、DCALは現行のモデルに従った線量評価が行えるが、計算コード自体は公開されておらずデータベースとして公開されている[13]。その他国内外でいくつかの内部被曝線量評価コードが開発されている。ここでは、我々が開発した計算コードについて概要を説明する。

3.1 システム構成と概要

開発した内部被曝線量評価システム (Dose SYStem: DSYSと呼ぶ) は、①沈着割合計算コード、②データ編集コード、③比実効エネルギー計算コード、④線量計算コードの4つの計算コードから成り立っている。システム構成を図5に示す。各計算コードはFortran言語で開発を行い、現在、入力ファイルを作

成しWindows上のコマンドプロンプトから実行するようになっている。

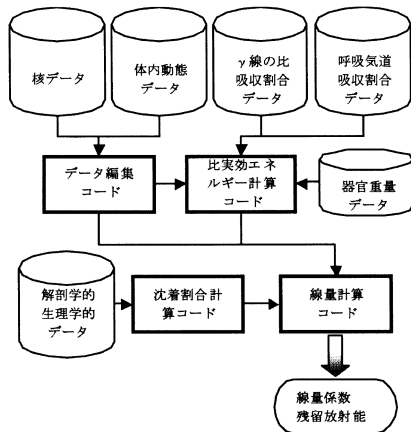


図5 DSYSのシステム構成

(1) データ編集コード

データ編集コードは、入力核種の核データと体内動態データを元となるデータベースから編集を行う。

親核種及び娘核種の半減期、分岐比、放射線の放出率とエネルギーの核データの作成には、K.F. Eckerman et. al. が開発したNUCDECAYコード [14] を利用した。NUCDECAYには、ICRP Publ.38 [15] に準拠した838核種のデータが収録されている。

体内動態データはICRP刊行物やICRP CD-ROMに収録されている。ICRP刊行物の体内動態データはいくつかの刊行物に分散して載せられており、また一部データに誤りがある [16]。一方、ICRP CD-ROMに収録されている体内動態データは、誤りも訂正されており、すべての体内動態データが参照できるので、こちらを利用する方が便利である。しかし、親核種と異なる動態の娘核種については、ICRP Publ.71 Annexe Cだけに示されているので注意しなければならない。

(2) 比実効エネルギー計算コード

比実効エネルギーの算出には、M. Cristy et. al. が開発したSEECAL [11] があるが、放射線荷重係数の変更やDSYS全体の利便性を考慮して、SEECALを参考に、新たに比実効エネルギー計算コードを開発した。

主要なデータは、放射線の放出率とエネルギー、 γ 線の比吸収割合、呼吸気道の吸収割合、臓器質量である。このうち、放射線の放出率とエネルギーは、前出のデータ編集コードから作成されたデータが使用される。また、 γ 線の比吸収割合や呼吸気道の吸収割合は、いくつかのエネルギー点で与えられており、対応する放射線エネルギーのそれらの値は、内外挿により求められる。

比実効エネルギー計算コードでは、式 (2) から新生児、1歳、5歳、10歳、15歳、成人の比実効エネルギーデータを作成する。

(3) 沈着割合計算コード

沈着割合計算コードでは、ICRP Publ.66の呼吸気道モデルにより呼吸器道内各領域の沈着割合を求める。多分散粒子系の計算においては、AMAD又はAMTDのどちらの粒子径でも評価可能である。また、ICRP Publ.71に示されている平均呼吸率に対する3ヶ月、1歳、5歳、10歳、15歳、成人の沈着割合が評価可能で、これら以外の平均呼吸率の評価も可能である。

(4) 線量計算コード

線量計算コードは、コンパートメントモデルから構成される連立微分方程式を解き、残留放射能を求め、預託等価線量係数及び預託実効線量係数を求める。

解くべき連立微分方程式は、代謝過程における年齢依存を考慮しているために、移行率に時間依存性がある。すなわち、連立微分方程式をベクトル形式で書くと、次のようになる。

$$\frac{dq(t)}{dt} = A(t) \cdot q(t) \quad (6)$$

ここで、 $q(t)$ は残留放射能、 $A(t)$ は年齢依存移行率や崩壊定数から構成される係数行列である。年齢依存移行率は、関数形で与えられているのではなく、3ヶ月、1歳、5歳、10歳、15歳、成人の各年齢の値で与えられており、微分方程式を積分するとき、間の年齢の値は線形補間しながら計算することとなる。また、係数行列には速い成分と遅い成分が混在し、硬い(Stiff)微分方程式となっている。硬い微分方程式を数値計算で解く場合には、陰的解法が良いとされている。さらに、係数行列は対角線沿いに値が集中した疎行列となっている(図6)。

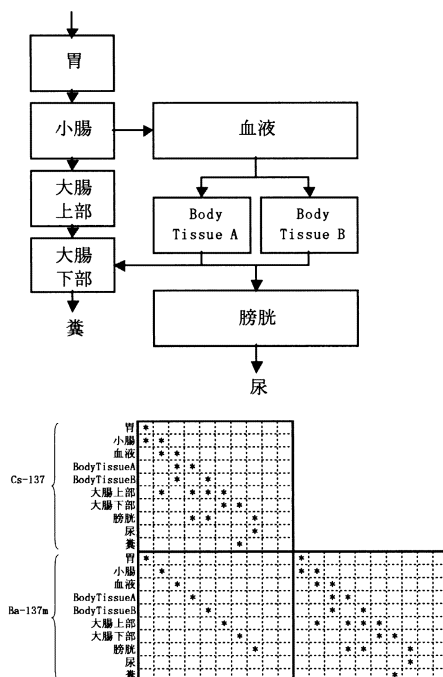


図6 Cs-137の経口摂取に対するコンパートメント図(上図)と係数行列の非ゼロ要素(下図)(*:非ゼロ要素、空白:ゼロ要素)

線量計算コードでは、帯行列用のGEAR法を使用し、微分方程式を解いている。

例えば、Pu-239の吸入摂取に対する連立微分方程式の個数は、親核種と娘核種の14核種を含めて736個であり、Intel Pentium4 3.4 GHzのマシンを使用した場合の計算時間は約1分である。

3.2 妥当性

原子力発電所事故において環境への放出が想定される54核種について、ICRP CD-ROMの線量係数と比較検討を行った[17]。その結果、一致又は数%の差異であった。ただし、残りの臓器・組織(Remainder)については、50%未満の差異となる場合があった。残りの臓器・組織の等価線量は、その他の等価線量と異なり、臓器質量による平均であり、条件により2つの評価式のどちらかで計算される(詳細はICRP Publ.71参照)。残りの臓器・組織の等価線量の計算は、その他の等価線量よりも複雑なため、何らかの誤差が生じているのではないかと考えられ、今後検討していかなければならない。

3.3 GUI開発

内部被曝線量評価システムDSYSは、テキストベースの入力ファイルを用意し、コマンドプロンプトから実行するようになっており、だれでもが簡単に使用できる状況にはなっていない。また、計算結果をグラフにする場合も、その都度グラフソフトウェアに結果を入力せねばならない。

このため現在、容易に計算条件の設定や結果を表やグラフに作成できるようなグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)を開発中である(図7)。

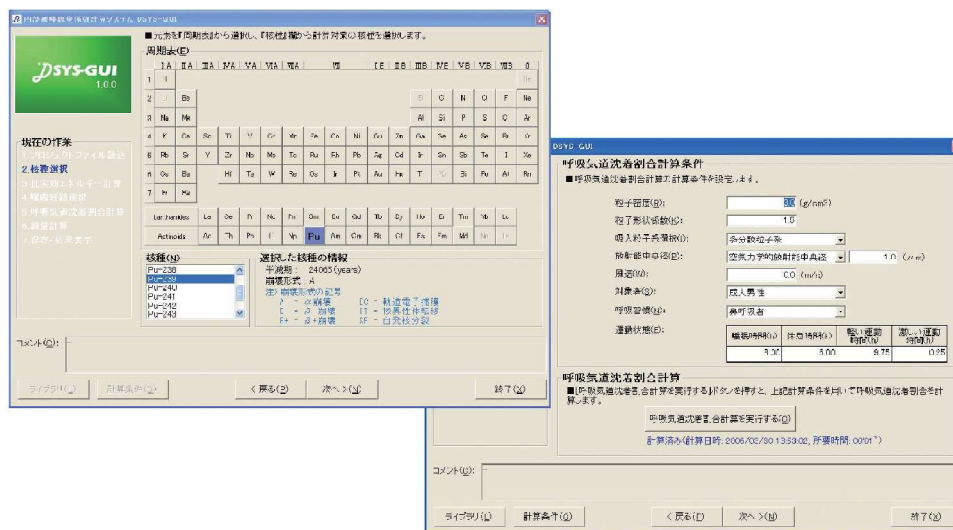


図7 DSYS-GUIの開発中画面

4. まとめ

内部被曝線量評価システムDSYSの開発により、ICRP刊行物やICRP CD-ROMにある代表的なパラメータ以外の線量係数の算出が可能になった。このDSYSを使用し、旧日本原子力研究所で開発された確率論的事故影響評価コードOSCAARに使用する内部被曝線量係数の更新を行った。また、欧州共同委員会(CEC)と米国原子力規制委員会(USNRC)の協同で実施された専門家判断情報を用いた不確実さ解析における内部被曝線量の不確実さ解析にも応用した[18]。

現在、ICRPではICRP Publ.30の胃腸管モデルに代わるヒト消化管モデルが2006年刊行のICRP Publ.99で示される予定である。また、ICRP Publ.38に基づいていた核データは、最新の実験データ等に基づいたDECDC2に置き換えられる予定になっている[19]。今後、これらのことを考慮した新しい線量係数がICRP刊行物に示される予定であり、DSYSもそれに伴い改良を検討する予定である。

参考文献

- [1] ICRP : Limits for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30 - Part 1 (1979), Part 2 (1980), Part 3 (1981), Part 4 (1988).
- [2] ICRP : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 1, ICRP Publication 56 (1989).
- [3] ICRP : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 2, ICRP Publication 67 (1993).
- [4] ICRP : Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 68 (1994).
- [5] ICRP : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 3, ICRP Publication 69 (1995).
- [6] ICRP : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 4, ICRP Publication

- 71 (1996).
- [7] ICRP : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 5, ICRP Publication 72 (1996).
 - [8] ICRP : ICRP Database of dose coefficients : Workers and members of the public version 2.0.1 (2002).
 - [9] ICRP : Human respiratory tract model for radiological protection, ICRP Publication 66 (1993).
 - [10] M. Cristy and K.F. Eckerman : Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources, ORNL/TM-8381/V1-V7 (1987).
 - [11] M. Cristy and K.F. Eckerman : SEECAL:Program to calculate age-dependent specific effective energies, ORNL/TM-12351 (1993).
 - [12] K.F. Eckerman, R.W. Leggett, M. Cristy, C.B. Nelson, J.C. Ryman, A.L. Sjoeren and R.C. Ward : DCAL -User's guide to the DCAL system, ORNL/TM-2001/190 (2001)
 - [13] K.F. Eckerman and A.L. Sjoeren : Radiological Toolbox user's manual, ORNL/TM-2004/27 (2004).
 - [14] K.F. Eckerman, R.J. Westfall, J.C. Ryman and M. Cristy : Nuclear decay data files of the dosimetry research group, ORNL/TM-12350 (1993).
 - [15] ICRP : Radionuclide transformation - Energy and intensity of emissions, ICRP Publication 38 (1983).
 - [16] ICRP : Guide for the practical application of the ICRP human respiratory tract model, ICRP Supporting Guidance 3 (2003)
 - [17] 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).
 - [18] 本間俊充、波戸真治、黒澤直弘 : 専門家判断情報を用いた内部被曝線量係数の不確かさ解析、日本原子力学会 2003年秋の大会.
 - [19] 遠藤章 : 放射線防護・医学分野で用いられる放射性核種崩壊データベースの開発、RIST NEWS No.40.