

解	説
---	---

体内被ばく線量評価コード開発の現状

体内被ばく線量評価コード専門研究会 (主査: 岩井 敏*1)

(1992年8月28日受理)

Present Status in Development of Computer Codes for Internal Dose Assessment

Committee for Internal Dose Evaluation Code
(Chairman: Satoshi IWAI)

The codes developed or being developed for internal dose assessment were reviewed. Firstly, the current research and development in ORNL were introduced based on the lecture of M. CRISTY in the meeting on April 4 in 1991 at NIRS. Secondly, the typical codes developed in Japan were described mainly on the characteristic aspects. Lastly, three codes in other countries were selected for notable codes having different features. Particularly, the code of LUDEP being developed by ICRP is noteworthy for the use of a new respiratory model and a user-friendly software.

KEY WORDS: computer code, internal dose, dose assessment

1. はじめに

1.1 専門研究会の目的

本専門研究会は以下のような現状を背景にして 1991 年に成立されたものである。すなわち、放射線防護および核医学診断において、体内被曝線量評価は重要な作業の一つである。そして、これが体外被曝線量評価と異なり、評価を難しくしている最も大きな要因は、測定というよりも、むしろ複雑なモデルを用いる計算に基づいているという点である。このモデルに基づく計算は、核データから線量当量を求めるまでの一連のプロセスが複雑であるため、計算コードを用いて行われる。しかし、基本となる計算コードの大部分が、米国を中心として作成されており、日本ではそれらの情報を早急かつ十分に入手しえないのが現状である。わが国で今後信頼できる体内被曝線量評価を推進していくためには、現在用いられ

ている国内外の体内被曝評価の基礎となる計算コードを保健物理学会(および学会員)がいつでも利用できる体制をつくるのが望まれている。本専門研究会の主目的は、国内外の体内被曝線量評価コードの現状を把握し、利用できる形に整備して学会員に提供するための体制づくりを検討することである。なお本専門研究会を通じて我国における今後の体内被曝線量評価のための情報交換も行っている。

1.2 専門研究会の活動

専門研究会は現在(1992年5月31日)までに6回開催された。開催日時および議題は以下に述べるとおりである。

第1回研究会は1991年5月16日に大阪府立大学で開催された。内容は専門研究会の目的と方針の確認ならびに各委員の自己紹介であった。第2回研究会は同年6月27日に放医研で行われた。内容は IDES コードシステム(放医研開発)と DOSDAC コードシステム(原研作成)、すなわちわが国で開発または整備された体内被曝線量評価コードシステムの説明であった。第3回研究会の同年

*1 三菱原子力工業大宮研究所; 埼玉県大宮市北袋 1-297 (〒330)

Omiya Technical Institute, Mitsubishi Atomic Power Ind., Inc.; 1-297, Kitabukuro, Omiya, Saitama 330, Japan.

9月3日に原研で開かれた。内容はICRPが改訂中である呼吸器系モデルの紹介とドイツにおける人体ファントムに関するコード開発現状が説明された。第4回研究会は同年11月27日に放医研で行われた。内容は外国で公表されている内部被曝線量評価のためのパソコンプログラムのレビューと放射性ヨウ素を対象にした各種の計算コードを用いた変換の総数（積分放射エネルギー）の比較であった。第5回研究会は1992年2月24日に東大で開催された。内容はNRPBで開発された内部被曝線量評価コードRAPIDの紹介、電中研の委託により東芝で開発されたTOSDEC-Iコードの紹介、およびORNL開発のINREM-IIコードの紹介が行われた。第6回研究会は1992年4月6日に放医研で行われた。内容はICRPが作成した新呼吸器系モデルを含む内部被曝線量評価用パソコンプログラムLUDEP（NRPBとBattellのPNL研究所が共同開発）のデモが行われ、本専門研究会のワークショップのためのテーマが討議された。なお、公式の研究会ではないが、1991年4月4日にORNLのM. CHRISTYを交えてmeetingを行った。この研究会ではM. CHRISTYからORNLで現在開発中の体内被曝線量評価コードシステムの内容とそれらの公開に関する情報の紹介を受けた。なお、日本側からは国内で開発したコードであるPIEDECとIDES、ならびに日本人の数学ファントム開発の現状を説明した。

本専門委員会は前年度（1991年度）は国内外の体内被曝線量評価コードの原理と公開状況に関するレビューを行った。本年度（1992年度）はワークショップを開催し、学会員に体内被曝線量評価用の計算コードとデータベースに関する情報を提供するとともに、パソコン版のプログラムの開発およびプログラム使用ネットワークシステムについても検討する予定である。

1.3 体内被曝線量評価コードの現状

ICRP Publication 30¹⁾に示されているALI, DACのデータはICRPコード²⁾を用いて計算された値である。ICRPコードはORNLで開発され、次の三つのモジュール(1)比実効エネルギーを計算する部分(SEE), (2)時間放射能積分を計算する部分(TIMED), (3)10%規則, 1%規則およびRemainder規則を考慮に入れて結果を出力する部分から成立している。10%規則, Remainder規則導入の問題についてはKENDALLら³⁾が解説している。このICRPコードの原型は、ORNLで1978年にKILLOUGHら^{4,5)}によって開発されたINREM-IIコードであると考えられる。INREM-IIコードとICRPコードの大きな違いは、ICRPコードでは体内で発生した子孫核種の代謝挙動が、いくつかの例外を除けば親核種

と同等の挙動をとるという仮定に基づいているのに対しINREM-IIコードでは子孫核種はそれぞれ独自の挙動をとるという点と、ICRPコードでは通過コンパートメントに相当する血液コンパートメントに胃、大腸上・下部からの移行も考慮されているという点である。時間放射能積分を求めるにはどちらも連立一階微分方程式をTIMEDコード⁶⁾の中でADAMS-BASHFORTH-MOULTON法を用いて数値解法で解いている点ではまったく同じである。

CRNL (Chalk River Nuclear Laboratory) においてJOHNSONら^{7,8)}はICRPの呼吸器系モデル、胃腸管モデル等を組み合わせて作成したコンパートメントモデルに基づいたGENMODコードを開発した。このコードは摂取後の器官中の残留量、排せつ量、預託線量当量が計算できる多目的コードである。NRPBにおいては、ADAMSら⁹⁾が1978年にICRP 30のモデルに従って1 Bq 摂取したときの全身の実効線量当量を算定するコードを開発している。このコードはRAPIDと名付けられ、文献10, 11)に詳細が示されている。わが国においては、ICRP Publication 30のモデルに従って放医研では本郷らによりIDESコード¹²⁾が開発され、三菱ではIwaiら^{13,14)}によりPIEDECコードが開発された。なお、電中研で石井ら¹⁵⁾と東芝の共同でTOSDAC-Iコードが開発された。原研では山口らにより¹⁶⁾、ORNL開発の内部被曝線量評価コードをベースとして機能の拡張を行ったDOSDACコードシステムが開発された。

以下の報告は、体内被曝線量評価コードの開発の現状と今後の課題について、本専門研究会の各委員と協力者が分担してまとめたものである。（岩井 敏）

2. 米国 ORNL における内部被曝線量計算システムの開発の現状

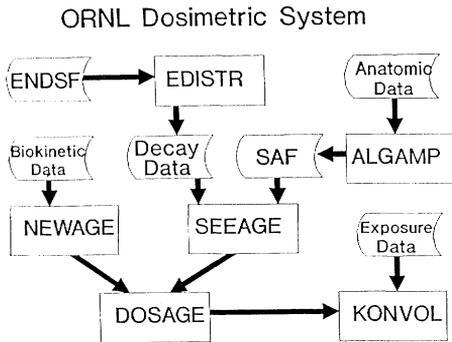
2.1 大型用計算コード

1991年4月6日の当委員会（放医研）においてM. CRISTYよりORNLのシステムの説明があった。以下はその概要である。

開発元：Metabolism & Dosimetry Research Group
Health and Safety Research Division
K.F. ECKERMAN (Group Leader), M. CRISTY,
G.D. KERR, D.C. KOCHER, R.W. LEGGETT
and J.C. RYMAN

目的ないし目標：可能な限り現実に即したリスク評価に耐えうる線量評価システムの構築と、(将来)リスク評価の実施。

システムの現状：第1図に示すプログラム（言語：



第1図 ORNL の線量評価コードシステム

FORTRAN) およびデータベースは基本的な部分は開発済み。各プログラムはモジュールとしてプロトタイプが存在する。年齢ごとの計算、最新の代謝モデルの取り込み、など改善の途上である。

リリースの予定：プログラム・モジュールごとデータベースごとにリリースされるのか、完成のシステムが一括してリリースされるのか不明。ただし、PC として 80486 のレベル、最終的には最低限 100 MByte のハードディスクが必要とされている。またリリース時期も未定（「2年以内」と CRISRY は述べた）。

リリース元：RSIC (Radiation Shielding Information Center)

Oak Ridge National Laboratory, PoBox 2008,
Oak Ridge, TN 37831-6362

Fax 615-574-6176

BitNet PDC@ORNLSTC

Internet PDC@EPIC. EPM. ORNL. GOV

(1) 第1図の概説

ENDSF：核データのファイルで DOE Nuclear Data Project から入手可能

EDISTR：ENDSF を読み Decay Data の出力 (RSIC で入手可能)

Decay Data：ICRP-38 や MIRD-10 データ形式 (PC 版は制動放射線の計算を含まず、崩壊図を出力しない)

Anatomic Data：欧米公衆の数学ファントムのデータ (年齢区分：Newborn, 1, 5, 10, 15, Adult)

ALGAMP：数学ファントムを読み SAF を計算出力

SAF：欧米公衆年齢ごとの SAF データ

SEEAGE：年齢ごとの SEE を出力、骨への線量計算が改善された (RSIC で入手可能)

Biokinetic Data：ICRP-30, 核医学データ

NEWAGE：最新の代謝モデルを使い年齢ごとの蓄積放射能を出力 (ICRP 56 で使用済み)

DOSAGE：年齢ごとの臓器線量の計算、年齢と年齢の間は体重で補間計算 (ユーザフレンドリーインターフェイスを検討中)

Exposure Data：intake の経時パターン等のデータ

KONVOL：被曝パターンに応じた臓器線量の計算 (現在はプロトタイプのみ存在)

(2) ORNL で開発したその他のコード

ICRP-38 Decay Data：今は ICRP が著作権を所有する ICRP-30 Code System：

LSODE：微分方程式を解く

ICRP TIME code：代謝モデルの数学表現を解く

SEE code, SAF file, DOSE code を内蔵 (ORNL では今は使っていない、PC には不向き、RSIC で入手可能)

ALGAMP：Monte Carlo 光子コード (内部被曝用であるが source コードを変えれば外部被曝へも適用可能)

MORSE/PHANTOM：Monte Carlo (光子・中性子コード Forward and adjoint mode の2通り、各年齢について可能)

ALGAMP：改訂版で CT ファントム上でのシミュレーション (主に研究用)

2.2 PC 用計算コード

(1) 1992年4月30日に竹下委員は、ORNL において M. CRISTY から PC 用内部被曝線量計算システムについて聞く機会があった。

以下はその概要である。

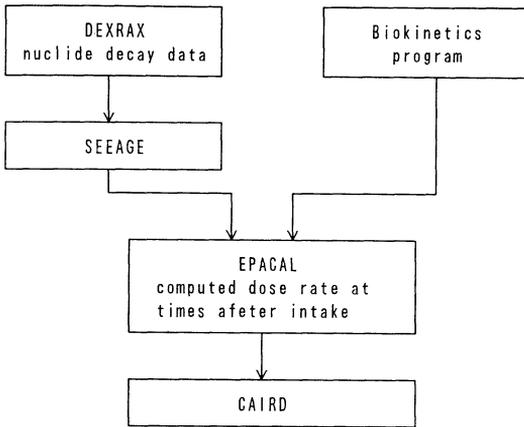
PC 用計算システムはほぼ完成しており、現在は細かい部分のチェックとドキュメントを作成中である。彼が開発に使用していたマシンは、IBM のハードディスク付きの 386 マシンで、開発言語は FORTRAN であった。

PC 用計算コードは第2図に示したように大きく分けて、五つのモジュールから構成されている。これは、第1図のいくつかのモジュールをまとめたものである。

システムのインストールには、ハードディスクが必要不可欠であり、プログラムとデータで約 10~15 M バイトの容量が必要である。

また、このシステムは ICRP Pub. 60 に準じており、新しい組織荷重係数を使用している。

1992年10月ごろに正式にリリースするとのことであった。リリース元は ORNL ではなく、RSIC で、そのポリシーに従うのでプログラム・モジュール、データベースごとにリリースされるのか、システムとしてリリー



第2図 ORNLのPC用線量評価コードシステム

スされるのかは彼には不明とのことであった。

(2) 第2図の概要

DEXRAX：第1図の Decay Data に相当し、核種をいくつか限定

SEEAGE：第1図の SAF を含み、年齢ごとに SEE を出力

Biokinetic program：第1図の Biokinetic Data と NEWAGE のタスクを行う

EPACAL：第1図の DOSAGE と同じ

CAIRD：対話型でユーザーの入力する摂取経時パターンで organ dose, 実効線量などを出力する。

(竹下 洋, 山口 寛)

3. 国内におけるコード開発の現状

3.1 IDES

(1) 開発にあたって

一般公衆、特に若年層の体内被曝を考える場合は、すべてのパラメータが確定されたわけではなく、未だ研究段階にあるといえよう。本計算システムは、「生物実験データにもとづいて、ICRPの仮定を少し変更した場合に、吸収線量がどのくらい変化するであろうか」という、代謝研究のグループから出された疑問に答えるべく作成したものである。したがって、この計算システム (internal dose estimation system 以後 IDES という) では、体格、代謝、荷重係数、等のパラメータを自在に変化させて吸収線量を求められるようにした。また、実験者等、ユーザーが自分の仮定にもとづいて、手軽に試算することができるようにパーソナル・コンピュータを用いて開発した。

このシステムの最大の特徴は体格変換法により体格を

変化させて計算できることにある。

(2) 体格変換法とシステムの概要

体格変換法はある体格について求められた比吸収割合 (specific absorbed fraction: SAF) を異なる体格に対する SAF に変換する方法である。

線源器官と標的器官が一致する場合は質量縮小率の -1 乗に近似的に比例すると考えられるが、この考えを一步進めて臓器を球形と仮定してモンテカルロ法でエネルギーごとに求めた質量縮小率の巾乗を変換係数として ICRP の SAF を変換し、線源器官と標的器官が異なる場合は、PISAF (point isotropic specific absorbed fraction) を用い、まず標準人の実効臓器間距離を求め、これに縮小率を乗じ、再び PISAF を用いて体格の異なる場合の SAF の推定値を求めるものである。IDES では、体格に対するパラメータを日本人の平均的な値として年齢で表し、1, 5, 10, 15, 20 歳の五群と ICRP の標準人の合計6群に分けた。

システムは大別して①プログラム、データ管理系、②計算処理系、③データ系の三つのファイル系から成っている。計算処理系は4種のプログラムで構築されている。第一段階は、日本人の年齢別 SAF の作表プログラム (IDES-SAF) であり、透過性の放射線に対して、年齢別に、エネルギー別に、すべての線源器官と標的器官の組に対して SAF の体格に対する変換を行い、これをデータ・ファイルに収める。次に、IDES-SEE は、指定された核種に対する透過成分、非透過成分の、エネルギー情報 ($Y_i \cdot E_i \cdot Q_i$) を核種別放射線データ・ファイルから読みとり、ICRP 標準人および日本人の年齢別の線源器官に対する標的臓器の比実効エネルギー (SEE) 表を作成する。IDES-US: では吸入摂取、経口摂取の二通りの代謝モデルを解き変換の総数 U_s を求めている。IDES-DOSE は線源器官の変換の総数と標的器官の比実効エネルギーを読みとり、標的器官の預託線量当量および、実効線量当量を算出する。

(3) 試算例について

器官の質量縮小率、臓器間距離の縮小率としては田中らの器官の重さと座高比を用いて日本人の SAF を求め ^{60}Co と ^{54}Mn について、以下の仮定の上で経口摂取の場合について試算を行った。

仮定 1: 年齢が異なっても、変化させなかったパラメータは標準人と等しいものとする。

仮定 2: 体格は成長しないものとする。

体格による線量の変化をその線量の比率で試算結果を見ると、消化管吸収率: f_1 がいかなる値をとった場合もおよそ一定であり、ICRP の標準人を 100% とすると、

^{60}Co の場合日本人成人, 15, 10, 5, 1 歳はそれぞれ 120, 120, 180, 270, 420% となった。 ^{54}Mn についても, この傾向はほとんど同じであるが, 線量の比率は多少異なり, 日本人成人, 15, 10, 5, 1 歳はそれぞれ 115, 120, 170, 240, 380% となった。

試算結果を実効線量当量の推定という点からみると, 体格による実効線量当量の変化は第一次近似として, 体重に逆比例すると考えてもよさそうである。また, 消化管吸収率 f_1 による変化は f_1 が大きいときは, f_1 にほぼ比例して, 実効線量当量に変化を与えるが, f_1 が 0.1 以下になると実効線量当量の変化は微小である。これらの結果は感度解析からも同様の結果が得られ f_1 が大きいときは f_1 の感度が最も高く, f_1 が小さいときは消化管滞留時間の感度が高い。

(4) IDES の特徴

IDES は機能ごとに分割されたプログラムとそれらが入出力するデータ・ファイルからなりたっている。入出力データ・ファイルを使用しているので前もって必要とする, 入力データ・ファイルさえ作っておけば, 特殊な体内被曝の計算に対しても, わずかのプログラミングで必要とする結果が得られる。このような理由から, 原子力開発に伴う日本人公衆の体内被曝線量の試算の他, 医療被曝の線量計算, 線量計算時のパラメータの感度解析やモデルの堅固度解析にも用いられている。

(本郷昭三)

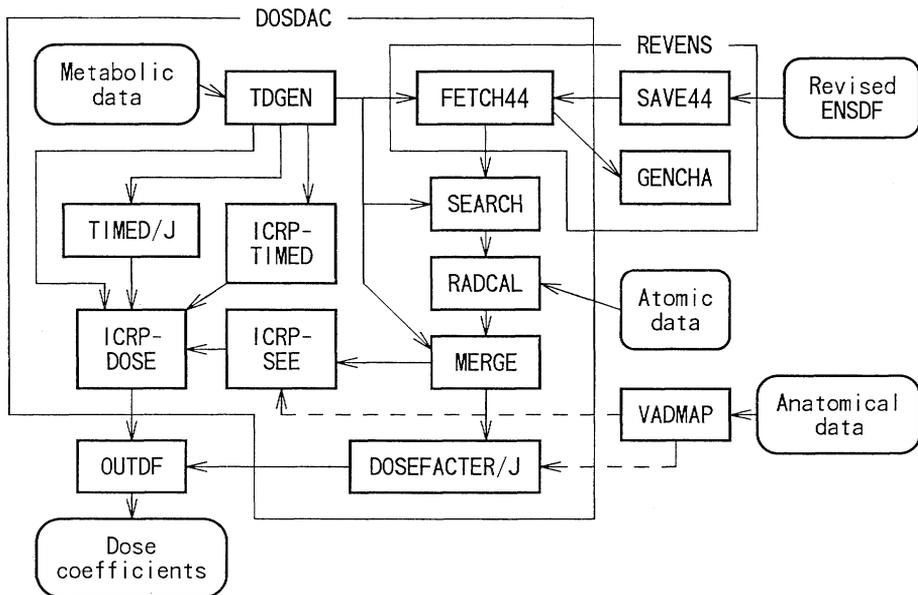
3.2 DOSDAC

計算コードシステム DOSDAC は, 核崩壊データ, 代謝データ, 解剖学的データなどの基礎的なデータから, 内部および外部被曝に関する線量換算係数を系統的に一貫して算出する大型計算機用システムである¹⁶⁻¹⁸⁾。線量換算係数の計算は, 内部被曝については ICRP Publication 30¹⁾ に示された方法, 外部被曝については ORNL の KOCHER が提案した方法¹⁹⁾によって行われる。

DOSDAC システムの構成を第 3 図に示す。本システムは, 二つの制御モジュールとこれらの制御下で作動する 12 個の機能モジュール, および二つの計算コードといくつかのデータファイルから構成されている。第 1 表に各モジュールおよび計算コードの機能を示す。

制御モジュール DOSDAC の制御下で作動する各機能モジュールの入力データは, TDGEN モジュールでまとめて準備されるため, このシステムは単一の計算コードのように扱うことができる。また, 種々の必要なデータには標準値が用意されているので, これらのデータを使用する限りは, 簡単な入力データを用意するだけで計算を実行できる。準備されている標準データは, 核崩壊データと代謝データの一部を除くと, ICRP Publication 30 で使用されたデータ値と同じである。

システムを構成する機能モジュールのうち, ICRP-TIMED, ICRP-SEE および ICRP-DOSE という三つは, ICRP コード²⁾ の各モジュールを導入したものである。このうち第 1 の機能については, ICRP-TIMED の機能



第 3 図 線量換算係数算出システム DOSDAC の構成

第1表 線量換算係数算出システム DOSDAC を構成する各モジュールの機能

モジュール名	機 能
制御モジュール	
DOSDAC	内部および外部被曝に関する線量換算係数を算出する
機能モジュール	
TDGEN	制御モジュール DOSDAC の制御下で作動する各機能モジュールの入力データを準備する
FETCH44	評価済核構造データファイル (ENSDF) 崩壊データから対象核種に関するデータを核種名によって抽出する
SEARCH	FETCH44 で選定された崩壊データから核種の半減期によってさらにデータを抽出する
RADCAL	放射線データ（各放射線の放出率、平均エネルギーおよび最大エネルギー）を算出する
MERGE	RADCAL で計算した放射線データを対象核種に関して編集・統合する
TIMED/J	任意期間における線源器官での核種の累積崩壊数を求める
ICRP—TIMED	TIMED/J では各器官の代謝モデルに関して、ICRP の標準モデルとその拡張モデルが取扱い可能である
ICRP—SEE	内部被曝に関する線量換算係数を算出する際に使用する比実効エネルギー（SEE）を計算する
ICRP—DOSE	核種の経口および呼吸摂取による単位放射能当りの各標的器官の線量当量と荷重線量当量を計算する
DOSE—FACTER/J	環境媒体における単位核種濃度当りの各器官の外部被曝線量を計算する
制御モジュール	
REVENS	ENSDF 崩壊データの改訂を行う
機能モジュール	
SAVE44	変更・修正された ENSDF 崩壊データを DOSDAC システム用のデータファイルに保存する
GENCHA	崩壊系列を作成するためのデータを ENSDF から抽出し、データファイルに出力する
計算コード	
OUTDF	内部および外部被曝に関する線量換算係数を環境中被曝線量評価用のデータファイルとして出力する
VADMAP	モンテカルロ法およびビルドアップ係数法を用いて、任意体型に対する光子の比吸収割合 (SAF) を計算する

を拡張した TIMED/J を開発してシステムに組み込んでいる。このモジュールでは、代謝モデルとして ICRP の標準モデル（各器官における元素の残留式は、アルカリ土類元素を除くと指数関数の線形結合で表現できる）とその拡張モデルを取り扱うことができる。拡張モデルでは、ヨウ素の代謝にみられるように核種が体内をリサイクルする場合、および娘核種の代謝挙動が親核種のそれと異なる場合の取り扱いが可能である。また ICRP Publication 30 では、アルカリ土類元素の骨に関する代謝データとして複合巾関数を用いているが、TIMED/J では取り扱うことができないため、NRPB-R82⁹⁾に記載され

た値を用いている。

放射線データは、EDISTR コード²⁰⁾ と同等のモジュール RADCAL を用いて、評価済核構造データファイル (ENSDF) 崩壊データ²¹⁾ から算出する。この際、崩壊データの妥当性をチェックし、必要な訂正をシステムに含まれる関連データファイルに渡って自動的に行う機能を持っている。

比実効エネルギー (SEE) の算出は、標準値として ORNL-5000²²⁾ に与えられた比吸収割合 (SAF) の値を用いて行われる。さらに、欧米の標準人²³⁾ と異なる体型の SAF についても、VADMAP コード²⁴⁾ により算出可

能であり、被曝線量評価の対象集団に特有な SEE 値を算出することができる。

以上のように、DOSDAC システムでは複数の計算コードを順次結合して、モジュラー・システム化が行われている。これにより、基礎データから線量換算係数までの計算を系統的に一貫して実施することが可能になり、基礎データの改訂を迅速かつ容易に線量換算係数の変更で反映させることができる。(外川織彦)

3.3 PIEDEC

PIEDEC コードシステムは、三つのデータファイル、すなわち比実効エネルギーデータファイル、崩壊系列データファイルおよび代謝データファイルと、体内被曝線量評価を行う PIEDEC-R コードを基本要素として成立している。比実効エネルギーデータファイルおよび崩壊系列データファイルは、評価済核構造データファイル ENSDF²⁵⁾からのデータを既存の処理システムを用いて作られている。PIEDEC コードシステムの体系図を第4図に示し、コードシステム中の各コードの概要を第2表に、PIEDEC-R コードの概要を第3表に示す。

(岩井 敏)

3.4 TOSDEC-I

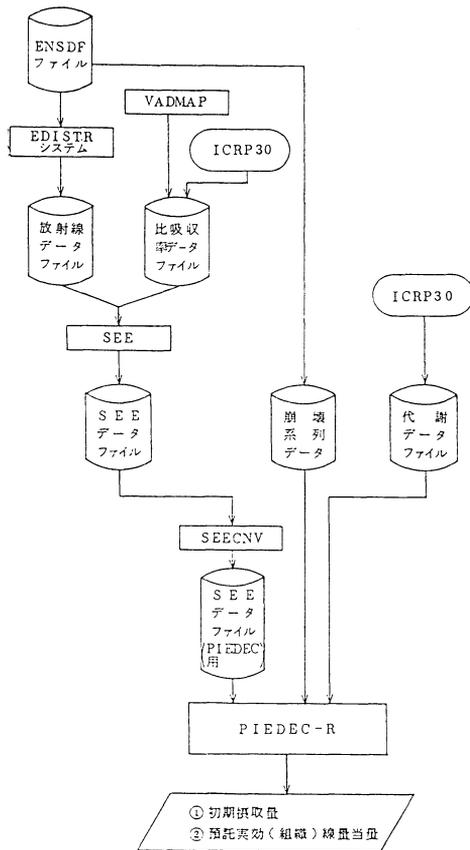
TOSDEC-I (Toshiba Dose Evaluation Code System for Internal Exposure)¹⁵⁾ は当初、大型機 CRAY で開発を開始し、その後 AS シリーズの EWS で開発整備したコードで、使用言語は FORTRAN-77 である。

(1) コードの機能：吸入、経口摂取および静注による内部被ばくを対象とし、希ガスサブマージョンによる外部被ばくも取り扱える。初期摂取量を入力とし、放射性核種の体内挙動および放射線エネルギーの臓器組織間のやりとりを示す比吸収割合を評価した後、預託実効(組織)線量当量を評価する。ホールボディカウンタおよびバイオアッセイによる測定値から初期摂取量を評価した後、預託実効(組織)線量当量を評価する機能も有する。

(2) 計算モデル：放射性核種の体内挙動および線量当量の評価には ICRP Publication 30 の肺モデル、胃腸管モデル、代謝モデルおよび線量評価モデルを使用する。アルカリ土類元素はその代謝モデルとして ICRP Publication 20 のものを使用する。ICRP モデルの他、法令に記載されているデータに基づき線量当量を算出するモデルも内蔵する。

第2表 PIEDEC コードシステム中の各コード(またはファイル)の説明

コードまたはファイル名	分類	機能	開発者(改訂者)と関連文献	取扱その他
ENSDF	ファイル	評価済核構造データ	E.W. EWBANK <i>et al.</i> ORNL-5051/R1 ²⁵⁾ (1978)	公開 (新データ up date)
EDISTR	コード	ENSDF から放射線データ(放射線の種類、エネルギー、放出率)を作成するコード	L.T. DILLMAN ORNL/TM-6689 ²⁰⁾ (1979)	公開
VADMAP	コード	光子の比吸収率(SAF)を作成するコード	Y. YAMAGUCHI <i>et al.</i> JAERI-M 87-186 ²⁴⁾ (1987)	公開
SEE	コード	比吸収率(SAF)データ、放射線データから比実効エネルギー(SEE)データを作成するコード	S.B. WATSON <i>et al.</i> ORNL/TM-10971 ²⁾ p. 63 (1988)	公開
SEECNV	コード	SEE データのフォーマットを変換するコード	S. IWAI <i>et al.</i> ORNL/TM-10971 ¹⁴⁾ p. 63 (1988)	非公開
PIEDEC-R	コード	① 測定値から初期摂取量を評価するコード ② 初期摂取量から預託実効(組織)線量当量を評価するコード	S. IWAI <i>et al.</i> ORNL/TM-10971 ¹⁴⁾ p. 63 (1988)	非公開



第4図 PIEDEC コードシステムの体系図

ホールボディまたはバイオアッセイデータから初期摂取量へは放射性核種の体内挙動ルーチンを用いて求める単位放射能摂取後の上記データ採取日時での当該データ計算値と上記データの比から逆算し、それをもとに線量を評価する。この評価は ICRP および法令に記載されているモデル²⁷⁾の両モデルにより、計算可能である。

(3) 解法：一般核種の体内での放射性核種の移行、代謝挙動およびそれをもとに得られる各臓器組織での積分壊変数の計算は微分方程式の解析解による。アルカリ土類の場合には内蔵する代謝に関する表を内挿および数値積分してそれらを求めることとしている。よう素は他の元素と異なり、代謝モデルがループ状となるが、TOSDEC-I ではそれを展開し、有限の繰返し回数で打ち切って評価している。サブバージョンは Publication 30 記載の部屋の広さ依存線量率データを内蔵し、内挿して評価している。

(4) 対象核種：2 サブバージョン元素 11 核種を含み、32 元素 64 核種を対象とし、現在核種の増加を実施中で

第3表 PIEDEC-R コードの概要

1. コード名：PIEDEC-R
2. コード設計に使用された機種：FACOM-M780
3. コードの入出力仕様
 入力—WBC による測定値 } —出力：初期摂取量
 バイオアッセイによる測定値 } 取量
 入力—初期摂取量—出力：預託実効(組織)線量当量
4. 対象とするモデルまたは式
 (1) ICRP Pub. 30¹⁾ の代謝モデルおよび線量評価モデルを使用
 (2) 排泄モデルは独自に開発(文献 8) 参照
 (3) 子孫核種の取扱は BIRCHALL のモデル²⁶⁾ を用いる。
5. 解法
 (1) 代謝挙動は微積分方程式の解析解を使用
 (2) 変換の総数(transformation)を求める積分としては、ロンベルク積分を使用
6. コードの適用制限
 ICRP Pub. 30 の submersion を除く 91 元素 793 核種に適用可
7. 特徴
 解析解を用いているため計算時間が短い
8. 使用言語
 FORTRAN-77
9. 参考文献
 S. IWAI *et al.* ORNL/TM-10971¹⁴⁾ p.63 (1988)
10. オペレーティングシステム
 FORTRAN-77 Compiler 付 FACOM-780 Computer
11. 著者(又は改訂者)：岩井 敏, 林津雄厚
12. 付属又は関連コード
 SEECNV コード¹⁴⁾
13. その他：元コードは PIEDEC コード
 S. IWAI *et al.* IAEA-SM-276/07 (公開済)¹³⁾

ある。

(5) 特徴：核分裂性核種の腐食生成物核種を主たる対象とする。一般核種では体内挙動や各臓器組織での積分壊変数の計算に微分方程式の解析解を用い、計算時間が短い。ホールボディおよびバイオアッセイデータから初期摂取量が逆算できる。(三橋偉司)

4. 国外におけるコード開発の現状

4.1 PEDAL2/RAPID

(1) はじめに

イギリス National Radiological Protection Board (NRPB) における内部被ばく線量の計算コード、そのコードによって計算された線量を収録している大型データベースおよびそのデータベースの利用方法について、入手した文献を基に紹介する^{10,11,28)}。

(2) 内部被ばく線量計算コード PEDAL2

(2.1) 旧内部被ばく線量計算コード PEDAL とその問題点

NRPB における放射性核種の単位量摂取当りの線量の計算方法は、基本的には ICRP Publication 30¹⁾ の体系に従っている。そして、それに基づき、内部被ばく線量計算用に開発されたコードが PEDAL (Programs Estimating Doses and Annual Limits)²⁸⁾ である。

しかし、公衆の構成員に対する内部被ばく線量計算の必要性²⁹⁾ から、NRPB では内部被ばく線量計算方法の追加・変更を行い、成人の職業被ばくだけに適用される ICRP Publication 30 の体系の範囲を拡張してきた。

その拡張を行っていく過程で、たとえば PEDAL のコーディングに関し以下のような問題を抱えることとなった。

この PEDAL には、とくに初期のころ、ICRP の考え方が厳密に取り入れられていた。その結果、代謝モデルに用いるパラメータをそのコードの中に組み込んでいたため、そのモデルを変更する場合には実質的なコーディングのし直しが必要となっていた。

また、PEDAL が書かれた時代のコンピュータは、その能力にかなり限界があり、また、コンピュータの稼働経費が高くついていた。したがって、PEDAL コードを書くときコンピュータをできるだけ割安に使用できるようなコードにすることが最重要視され、扱いやすさの追求はほとんど成されなかった。その結果、そのコードを使用するとき、またそのコードを変更するとき、そのコードは扱いにくいものとなっていた。

その他にも多くの問題点を PEDAL は抱えていた。

(2.2) 新内部被ばく線量計算コード PEDAL2

旧コード PEDAL の問題点を改善すべく開発されたのが新線量計算コード PEDAL2 である。そのおもな特徴は、旧コードとの比較から以下の点が挙げられる²⁸⁾。

ただし、PEDAL2 により預託実効線量当量を求める際、その計算を容易にするために『10% 規則¹⁾』が用いられていた。しかし、ICRP 1990 年勧告³⁰⁾ による預託実効線量を計算する際にはその規則は用いられていな

い。

《PEDAL2 のおもな特徴》

a) 年齢依存の線量算定が可能 (どの摂取時年齢からでも任意の期間の預託線量が求められること)

b) 複雑な壊変系列にも対応 (どんなに長く、複雑な壊変系列を持った核種でも考慮されていること)

c) 娘核種のバイオカイネティックスを考慮 (必要ならば、壊変系列内の各娘核種に独自の異なった代謝挙動を与えることができること)

d) どのような複雑な被ばく形態でも線量算定が可能 (『1 回の急性摂取』以外も線量算定が可能)

e) 柔軟性のあるコードの構築 (肺モデルや胃腸管モデルに用いるデータを外部データファイルに記述しているため、コードを変更せずにそれらのパラメータを容易に変えることができること。また、構造化プログラミング手法の採用により、コードの保守および変更がたやすくできること)

(3) RAPID システム

(3.1) データベース RAPID とソフトウェア RAPID
PEDAL で計算された詳細な結果を利用できるようにしたのが RAPID (Recall And Print Internal Doses) システムである。このシステムは種々の内部被ばく線量を格納しているデータベース RAPID とそのデータベースから情報を取り出すためのソフトウェア RAPID から成っている。

1986 年当時、そのデータベースには 88 元素 316 核種の吸入摂取と経口摂取によって受ける 23 の臓器の吸収線量と実効線量当量が含まれていた。

それらの線量は、年齢区分 (1 歳の幼児, 10 歳児, 成人) ごと, 吸入摂取の場合の粒子サイズ (0.1, 0.3, 1.0, 3.0, 10 μm) ごと, 核種の摂取後の線量算定期間 (1 日, 7 日, 30 日, 1 年, 5 年, 10 年, 20 年, 30 年, 50 年, 60 年か 69 年か 70 年) ごと, そして, 元素の胃腸管吸収割合 f_1 や化学形, 肺のクリアランス区分等を考慮して得られた総数 606 種類の吸入摂取および 405 種類の経口摂取毎に算定されていたので, そのデータベースには 200 万項目に近い線量情報が含まれていた¹¹⁾。

データベースからの情報の検索は、FORTRAN 言語で書かれたコード RAPID を使って行われる。キーボード上から所定の方法により、データベース中の情報を線量当量 (Sv/Bq) の単位で出力することができる。その際、吸収線量と線質係数をもとにこのコード上で線量当量が計算されて出力されるようになっている。

1991 年現在、内部被ばく線量計算方法について、放射線防護に関する最近の進展³⁰⁻³²⁾ を取り入れた変更が行

われ、そして、RAPID データベースには、PEDAL2 を用いて計算され、線量算定年齢区分も 6 区分（生後 3 カ月の乳児、1 歳の幼児、5 歳児、10 歳児、15 歳児、成人）へと拡張された少なくとも 359 の核種による内部被ばく線量が格納されている。NRPB から出版されているレポート¹⁰⁾内の放射性核種の単位量摂取当りの線量（線量換算係数）はこのデータベースから取り出されたものである。

(3.2) RAPID データベースの利用

NRPB 外の組織からも、データベースを利用することができる。その利用方法は、次のとおり。(a) データベースは、ASCII コードで書かれた VAX テープおよび EBCDIC コードで書かれた IBM テープにより提供されている。その利用については、NRPB の Dr. KENDALL へ問い合わせること。(b) IBM PC 用のパソコンソフトとして、限定されたデータベース^{33,34)}が提供されている。（佐藤裕一）

4.2 INREM-II

(1) はじめに

INREM-II は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) 保健安全研究部の KILLOUGH らが開発し、1978 年に ORNL/CR-0114 として公開された内部被ばく計算コードであり、吸入摂取と経口摂取に伴う内部線量当量が計算できる⁵⁾。

(2) 内部被ばく計算モデル

吸入摂取評価のためのモデルとしては、ICRP タスク・グループ肺モデル (Task Group Lung Model)、厳密には、ICRP Publication 19 に示されたモデルが用いられている³⁵⁾。Publication 30 のモデルとの違いは、P 領域のサブ・コンパートメント f および g に沈着した物質の排泄が、Publication 30 モデルでは、一度 TB 領域に移行した後、胃腸管に排泄するという過程を経るのに対して、Publication 19 のモデルでは、f および g から直接胃腸管に排泄されるという点である。しかしながら、この違いは計算結果に大きな差となって現れるものではなく、無視しうる相違点である。もうひとつの相違点は、Publication 30 が、肺線量の計算において、TB 領域、P 領域および肺リンパ節の複合器官を考慮しているのに対して、INREM-II では P 領域と肺リンパ節との線量当量を個別に計算しているという点である。吸入粒子の呼吸器系各領域への沈着割合は、WASH-1400 で用いられた沈着割合が近似式として与えられており、AMAD > 0.1 μm の条件で使用可能である。また、任意の沈着割合を入力値として与えることも可能となっている。摂取モードについては、急性 1 回摂取、任意時間の連続摂取

および時間ステップごとの摂取率の三つのモードで入力可能である。時間ステップごとの入力では、評価期間を最大限 30 ステップに分割し、それぞれの摂取率を与えることができる。経口摂取評価のためのモデルとしては、Publication 30 に与えられたモデルと同様の胃腸管モデルが用いられているが、小腸以外からの放射性物質の吸収も考慮できる。摂取モードについては、吸入摂取の場合と同様に取り扱うことができる。

吸入あるいは経口摂取により、器官・組織に移行した放射性物質の残留及び排泄は、指数関数により与える。したがって、べき関数で表される核種については、残留・排泄関数を指数関数で近似する必要がある。INREM-II は、生物学的半減期、物理的半減期等についての核種ごとのデフォルト値あるいはデータベースをもっていないため、計算対象核種に応じて入力値として与える必要がある。

線量当量は、source-target 法により計算するが、計算の基本式は次式で与えられる。

$$D_i(X \leftarrow Y) = S_i(X \leftarrow Y) A_i$$

ここで、 $D_i(X \leftarrow Y)$ は、線源器官 (Y) に含まれる放射性核種により標的器官 (X) が受ける線量当量 (rem)、 A_i は線源器官 (Y) に含まれる放射性核種 i の時間放射能積分値 ($\mu\text{Ci}\cdot\text{day}$)、また $S_i(X \leftarrow Y)$ は S-factor と呼ばれる係数で、線源器官 (Y) に含まれる放射エネルギーの単位時間積分値当りの標的器官 (X) の線量当量 (rem/ $\mu\text{Ci}\cdot\text{day}$) として定義される。S-factor は、ORNL-5000 等を参考として入力値として与えられる他、ORNL の計算コード SFACTOR を用いても計算でき、この場合は INREM-II の入力データ形式で S-factors が得られる³⁶⁾。

(3) 入力および出力

INREM-II による計算に必要な入力は、核種名、物理的半減期、摂取経路（吸入または経口）、溶解度クラス (D, W, Y)、AMAD、S-factor、胃腸管からの吸収割合、線源器官の生物学的半減期等であり、出力としては、標的器官毎の線量当量が得られる。なお、線源器官中の放射性物質残留量は出力としては得られない。

（篠原邦彦）

4.3 LUDEP (Lung Dose Evaluation Program)

(1) 概要

英国 NRPB が中心となって開発を進めているプログラムであり、その開発目的は次のとおりである。

① ICRP における呼吸器モデルの改訂作業を支援すること。つまり、作業過程で提案されるモデルによる残留率や排泄率の推定値を検証し、線量評価の意味する

ところを議論すること。このため、改訂作業の進展に応じ、種々パラメータを容易に変更して計算できるよう意図されており、高いフレキシビリティを指向している。

② 呼吸器モデルが公式に改訂されたあと、管理現場において個人の被曝線量評価に実用的に使えるようにすること。このため、user-friendly な使い勝手を指向している。

改訂作業完了後、本プログラムは比較的少額の費用で希望者に頒布されるとのことである。

(2) 必要なハードウェア

内部メモリ 640 kByte 以上の IBM PC/AT/XT かこれとコンパクトなパーソナルコンピュータで動作する。EGA および VGA 搭載機では、複雑な代謝モデルのダイアグラムがグラフィカルに表示されるので使いやすい。カラーモニタは必須ではないが操作性の観点からより望ましい。数値演算コプロセッサは、処理速度を約 20 倍アップするので、経常的に使用する場合はこれを搭載するとよい。プログラム本体および核種データ、光子の比吸収割合等必要なデータベースを含めてディスク容量は 330 kByte である。

(3) 使用言語等

プログラムは TURBO BASIC で書かれており、MS-DOS 2.0 か、これ以降のバージョンの OS で動作する。これ以外のソフトウェアは不要である。

(4) 使用モデル等

体内動態モデルは、プルトニウムに関し、ICRP Publication 48 を、その他の元素には ICRP Publication 30 のモデルを使用している。バイオアッセイの計算には、ICRP Publication 54 の排泄率に関する経験式を使用している。光子の比吸収割合は CRISTY と ECKERMAN の計算結果³⁷⁾をデータベースとして登録している。また、Radiation Shielding Information Center, ORNL から得られる 497 核種の核データ³⁸⁾をデータベースとして登録し使用する。

(5) 入力パラメータ

① 摂取態様：摂取経路（吸入，経口，創傷）の別、一過性被曝か連続被曝かの別それぞれに摂取量 (Bq) あるいは摂取率 (Bq/d) を入力できる。またこれらの組合せも可能である。

② 線量積算時間：任意に設定可能であり、デフォルト値は 18250 日 (50 年) である。

③ 沈着パラメータ：エアロゾルの特性 (AMAD, AMTD (注 1), 幾何標準偏差, 粒子の密度), 呼吸生理パラメータ (一回換気量, 呼吸率, 機能的残気量 (注 2), 死腔容積 (注 3)) を入力できる。また、呼吸生理パラメ

ータに関し、種々身体活動条件 (睡眠, 休憩, 軽作業, 重作業) に応じ標準的な人間のデフォルト値が与えられている。これらのパラメータを入力するとすぐに鼻部前庭, 鼻咽頭・喉頭, 気管支, 細気管支, 肺胞, これら各部位への沈着率が計算される。また、沈着率そのものも入力パラメータとすることができる。

④ 機械的クリアランス：改訂モデルにおけるパラメータがデフォルト値として与えられるが、どのパラメータも個別に任意に変更することができる。

⑤ 血中移行：改訂モデルで提案されている 5 種のパラメータについて、a) 直接入力するか、b) 重要な化合物について ICRP が推奨を予定する値を選択するか、c) 血中移行の速さについて ICRP が推奨を予定する三つのタイプ (fast, moderate, slow) から選択するか、の 3 方法を選ぶことができる。

⑥ 放射性核種：497 核種のうちからひとつを選ぶ。

⑦ 体内動態：最高 5 コンパートメントまで、血中からの移行割合と残留的半減期を入力できる。または、データベースに登録の ICRP Publication 30/48 に基づく体内動態モデルを選択する。

⑧ 線源/標的臓器：それぞれ個別に選ぶことができるが、通常われわれが知りたいのは実効線量なので、全臓器を対象とする場合が多いと思われる。

⑨ 放射線荷重係数：ICRP Publication 60 で推奨されたデフォルト値を任意に変更できる。

⑩ 呼吸器の各部位の質量：呼吸器の七つの標的部位の質量に対し ICRP が推奨予定のデフォルト値を任意に変更できる。

⑪ 呼吸器の各部位の相対的感受性：七つの部位に対し ICRP が推奨予定のデフォルト値を任意に変更できる。

(6) 計算結果として表示される量

① 前の節で述べたように、呼吸器の各部位への沈着率。

② 積算期間の最後において線源臓器に残留する放射能。

③ 線源臓器における積算期間中の全壊変数。

④ 標的臓器における等価線量。

⑤ 前述した呼吸器の七つの標的部位の等価線量および荷重等価線量。

(7) バイオアッセイ

計算する量を (全身残留率, 胸部残留率, 尿中排泄率, 糞中排泄率) の中から選択する。排泄 (残留) 率関数は任意に入力するか、もしくは、ICRP Publication 54 に基づくデータベースから選択する。対象期間を選択する。

これらの条件を入力後計算が実行され結果が表示される。

(8) おわりに

呼吸器モデルの改訂がまだ公式に完了していないため、ここで紹介した LUDEP は使用パラメータを含め暫定的なものであり、また、将来のバージョンでは、壊変生成物の寄与の計算、モニタリング結果から摂取量を推定する計算、年齢依存性の取り扱い等を可能とする予定とのことである。

(注 1): Activity Median Thermodynamic Diameter

(注 2): 正常呼吸後、肺内に残留する空気量

(注 3): 一回換気量から肺胞に入る量を差し引いた量であり、吸った空気のうちガス交換に寄与しない部分
(石博信人)

5. ま と め

一般に、計算コードは、そのプラットフォームである計算機と使用言語の性能向上とともに変化してきている。体内被ばく線量評価コードは、1960年代に ORNL で開発された MIRD ファントムの使用に伴い大型化し、大型計算機を中心にしたコード開発が行われてきた。原研が作成した計算コードシステムは、ORNL で主に開発されたコードからなる大型計算機コードの代表的なものである。近年、パソコンの普及で誰でも簡単に計算ができるようになってきたことから、ICRP においても、ユーザーインターフェイスの優れたパソコン用コードの開発が進められつつある。今後の計算コードの方向を示すものとして捉えられることができよう。

MIRD ファントムを使用した体内被ばく線量評価法を中心とした計算コードは、年齢依存性の線量計算、あるいは核医学で使用される放射性医薬品を対象にした線量計算と計算対象の範囲を拡大しつつある。同時に、呼吸器モデルの改訂にみられるように体内動態モデルがより精密化されることで、計算内容も複雑となって、体内被ばく線量計算は、ますます計算機の使用が不可欠となってきている。

以上のような状況にあって、体内被ばく線量評価コードの開発あるいは利用に、本専門研究会の成果が微力ながらも役立つものとなることを念じて研究会の活動を続けている。本論文は、1991年度の専門研究会の成果報告としてまとめた。なお、詳細な記述を許した報告書は、1992年10月頃出版予定である。(甲斐倫明)

体内被ばく線量評価コード専門研究会の委員は次のとおりである。岩井 敏 (主査、三菱原子力)、甲斐倫明

(幹事、東大)、石博信人 (放医研)、稲葉次郎 (放医研)、小川喜弘 (近畿大)、小泉 彰 (放医研)、佐藤裕一 (千代田保安)、篠原邦彦 (動燃)、城谷 孝 (原研)、竹下洋 (放医研)、外川織彦 (原研)、中村尚司 (東北大)、中村祐二 (放医研)、本郷昭三 (放医研)、伴 信彦 (動燃)、松岡 理 (電中研)、三橋偉司 (東芝)、山口 寛 (放医研)、山口恭弘 (原研)

参 考 文 献

- 1) ICRP; Limits for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30, Parts 1-3, *Ann. ICRP*, 2(3/4); 4(3/4); 6(2/3); 6(2/3) (1979-81) and Supplements to Parts 1-3, *Ann. ICRP*, 3, 5, 7, and 8 (1979-82).
- 2) S.B. WATSON and M.R. FORD; A user's manual to the ICRP Code—A series of computer programs to perform dosimetric calculations for the ICRP Committee 2 Report, ORNL/TM-6980 (1980).
- 3) G.M. KENDALL and B.W. KENNEDY; The 10% rules and remainder organs in internal dosimetry, *Radiat. Prot. Dos.*, 22, 107 (1988).
- 4) G.G. KILLOUGH, D.E. DUNNING, Jr., S.R. BERNARD and J.C. PLEASANT; Estimates of internal dose equivalent to 22 target organs for radionuclides occurring routine releases from nuclear fuel-cycle facilities, NUREG/CR-0150, Vol. 1 ORNL/NUREG/TM-190 (1978); Vol. 2 ORNL/NUREG/TM-190/V2 (1979); Vol. 3 ORNL/NUREG/TM-190/V3 (1981).
- 5) G.G. KILLOUGH, D.E. DUNNING, Jr. and J.C. PLEASANT; INREM-II: A computer implementation of recent model for estimating the dose equivalent to organ of man from an inhaled or ingested radionuclide, NUREG/CR-0114, ORNL/NUREG/TM-84 (1978).
- 6) S.B. WATSON, W.S. SNYDER and M.R. FORD; TIMED: Computer program for calculating cumulated activity of a radionuclide in the organ of the human body at a given time, T , after deposition, ORNL/CSD/TM-17 (1976).
- 7) J.R. JOHNSON and M.R. CARVER; A general model for use in internal dosimetry, *Health Phys.*, 41, 341 (1981).
- 8) J.R. JOHNSON and D.W. DUNFORD; Dose con-

- version factors for Intakes of selected radionuclides by infants and adults, AECL-7919 (1983).
- 9) N. ADAMS, B.W. HUNT and J.A. REISSLAND; Annual limits intake of radionuclides for workers, NRPB-R82 (1978).
 - 10) A.W. PHIPPS, G.M. KENDALL, J.W. STATHER and T.P. FELL; Committed equivalent organ doses and committed effective doses from intakes of radionuclides, NRPB-R245 (1991).
 - 11) J.R. GREENHELGH, G.M. KENDALL, T.P. FELL, B.W. KENNEDY; The PAPID system for information retrieval from the NRPB internal dosimetry database, NRPB-M133 (1986).
 - 12) 本郷昭三, 山口 寛, 竹下 洋; 公衆のための体内被曝計算法について, 放射線科学, 129, 264-277 (1986).
 - 13) S. IWAI, K. TANAKA, A. IKEOKA, T. MIURA and K. MATSUTANI; Practical internal exposure dose evaluation code based on the ICRP 30 Model, IAEA-SM-276/07, p. 459 (1985).
 - 14) S. IWAI and Y. RINTSU; Development of a practical internal dose evaluation code, Second Conference on Radiation Protection and Dosimetry, Program and Abstract, ORNL/TM-10971, p.63 (1988).
 - 15) 石井敬一郎, 服部隆利; 内部被ばく管理のためのバイオアッセイ法の高度化, 電力中央研究所研究報告, T88061 (1989.5).
 - 16) 山口勇吉, 外川織彦, 本間俊充, 片倉純一, 鴻坂厚夫; “線量換算係数算出システム DOSDAC の開発”, 日本原子力学会昭和63年秋の大会予稿集(第1分冊), p.352 (1988).
 - 17) 山口勇吉; 内部被曝線量算出用計算コードの整備とシステム化, 日本保健物理学会第17回研究発表会要旨集, p.48 (1982).
 - 18) 山口勇吉, 外川織彦; 内部被曝線量算定における娘核種の取扱い, 日本原子力学会昭和58年秋の分科会予稿集第II分冊, p.41 (1983).
 - 19) D.C. KOCHER; Dose-rate conversion factors for external exposure to photon and electron radiation from radionuclides occurring in routine releases from nuclear fuel cycle facilities, *Health Phys.*, 38, 543 (1980).
 - 20) L.T. DILLMAN; EDISTR—A computer program to obtain a nuclear decay data base for radiation dosimetry, ORNL/TM-6689 (1980).
 - 21) Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF)—A computer file of evaluated nuclear structure and radioactivity decay data. The file is maintained by the National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory, on behalf of the International Network for Nuclear Structure Data Evaluation.
 - 22) W.S. SNYDER, M.R. FORD, G.G. WARNER and S.B. WASTON; A tabulation of dose equivalent per microcurie-day for source and target organs of an adult for various radionuclides, ORNL-5000 (1974).
 - 23) International Commission on Radiological Protection; Report of the task group on reference man, ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975).
 - 24) Y. YAMAGUCHI, O. TOGAWA and T. HONMA; The VADMAP code to calculate the SAF of photon—Code Description and the Performance —, JAERI-M 87-186 (1987).
 - 25) W.B. EWBANK and M.R. SCHMORAK; Evaluated nuclear structure data file, A manual for preparation of data sets, ORNL-5051/R1 (1978).
 - 26) A. BIRCHALL; *Health Phys.*, 50, 389 (1986).
 - 27) 働原子力安全技術センター; 内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル (1988).
 - 28) B.W. KENNEDY, A.W. PHIPPS, T.P. FELL and G.W. KENDALL; Calculations of doses from internal emitters using a new computer program: Quality control on the RAPID database, Chilton, NRPB-M215 (1990).
 - 29) ICRP Statement from the 1983 Meeting of the International Commission on Radiological Protection, *Ann. ICRP*, 14, No. 1 (1984).
 - 30) ICRP 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, 21 (1-3) (1991).
 - 31) NEA Gastro-intestinal absorption of selected radionuclides: A report by an NEA expert group, Paris, OECD/NEA (1988).

- 32) NRPB Gut transfer factors, Doc. NRPB, 1, No. 2 (1990).
- 33) A.W. PHIPPS, G.M. KENDALL, J.W. STATHR, T.P. FELL, and T.J. SILK; Committed equivalent organ doses and committed effective doses from intakes of radionuclides, Chilton, NRPB-M288 (1991).
- 34) A.W. PHIPPS, G.M. KENDALL, J.W. STATHER, T.P. FELL and T.J. SILK; Committed effective doses at various times after intakes of radionuclides, Chilton, NRPB-M289 (1991).
- 35) ICRP; The metabolism of compounds of polonium and other actinides, ICRP Publication 19, Pergamon Press, Oxford (1972).
- 36) D.E. DUNNING, Jr., J.C. PLEASANT and G.G. KILLOUGH; SFACTOR: A computer code for calculating dose equivalent to a target organ per microcurie-day residence of a radionuclide in a source organ, ORNL/NUREG/TM-102 (1977).
- 37) M. CRISTY and K.F. ECKERMAN; ORNL/TM-8381/V7 (1987).
- 38) Radiation Shielding Information Center (RSIC), ORNL (1989).