
1. ICRP の内部被ばく線量評価モデル

仲野高志

The Models of Internal Dose Calculation in ICRP

NAKANO, Takashi

Division of Radiotoxicology

National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263 Japan

abstract

There are a lot discussions about internal dose calculation in ICRP. Many efforts are devoted to improvement in models and parameters. In this report, we discuss what kind of models and parameters are used in ICRP. Models are divided into two parts, the dosimetric model and biokinetic model. The former is a mathematical phantom model, and it is mainly developed in ORNL. The results are used in many researchers. The latter is a compartment model and it has a difficulty to decide the parameter values. They are not easy to estimate because of their age dependency. ICRP officially sets values at ages of 3 month, 1 year, 5 year, 10 year, 15 year and adult, and recommends to get values among ages by linear age interpolate. But it is very difficult to solve the basic equation with these values, so we calculate by use of computers. However, it has complex shape and needs long CPU time. We should make approximated equations. The parameter values include much uncertainty because of less experimental data, especially for a child. And these models and parameter values are for Caucasian. We should inquire whether they could correctly describe other than Caucasian. The body size affects the values of calculated SAF, and the differences of metabolism change the biokinetic pattern.

1. ICRP のタスク・グループ

ICRP において内部被ばく線量計算に関する議論は専門委員会 2 (線量評価) の下に作られている線量

計算タスク・グループで行われている。このタスク・グループは、もともと ICRP Pub.30の計算をするためにアメリカ合州国オークリッジ国立研究所の研究者達によって作られた。その後、恒常的なタスク・グループとなり、現在 ICRP の線量評価で使用されている数値を計算している。メンバーは連合王国の NRPB、ドイツの ISH、ウクライナの放射線医療科学センターからも集められるようになった。しかし、計算の中心的な役割を担っているのは、依然としてオークリッジ国立研究所の研究者たちである。

2. 線量計算の基本方程式

t_0 才で放射性核種を体内に取り込んだ時、 t_1 才までに標的臓器 T が受けとる等価線量 $H_T(t_0)$ は、Specific Effective Energies と線源臓器 S での放射性核種の量 $q_{Sj}(t)$ の積を標的臓器 T と可能な組合わせについて足し合わせたものを t_0 から t_1 まで時間積分したもので表される。

$$H_T(t_0) = c \int_{t_0}^{t_1} \sum_S \sum_j q_{Sj}(t) SEE(T \leftarrow S; t) dt$$

ここで、c は単位を合わせるための定数、s は線源となる臓器、j は線源の種類、 $q_{Sj}(t)$ は j の線源となる放射性核種の分布、SEE は線源臓器から標的臓器への Specific Effective Energies である。 q_{Sj} と SEE の関数型が決まれば、すぐに値は求まるが、複雑な過程や年齢による変化などが含まれているために一般的には非常に難しい。そこで、これらの関数値を求めるためにモデルを決めて計算される。

ICRP では、 t_1 として70才が用いられる。ここで求められた H_T に組織荷重係数¹⁾ をかけ標的臓器 T についてたし合わせると実効線量となる。

$$E(t_0) = \sum_T W_T H_T(t_0) + W_{rem} H_{rem}(t_0)$$

ここで W_T : T に対する組織荷重係数 W_{rem} : 残りの組織に対する組織荷重係数 (残りの組織とは組織荷重係数が個々に与えられていない組織のことである。¹⁾ この取り扱いについても種々の議論があるが、ここでは省略する)

3. モデル

基本方程式を実際に計算するためには以下の2つのモデルが必要である。

i) SEE を求めるための Dosimetric model

ある時刻 t において、ある線源臓器 S に単位量の放射性核種がある時に考える放射線が標的臓器 T にどれくらい線量を与えるかを計算するためのモデル (次の二つの部分がある)

- ・幾何学的位置関係による SAF (specific absorbed fraction) を求める (標準的な数学ファントムと計算機によるモンテカルロ計算で求められている)
- ・分布している線源の性質 (放出する放射線の種類、エネルギー、性質、崩壊形式)

SEE は、放出されるエネルギーと SAF の積で表される。具体的な式は下記のようなになる。

$$SEE(T \leftarrow S; t) = \frac{\sum_i Q_i Y_i E_i AF_i(T \leftarrow S; t)}{M_T(t)} = \sum_i Phy_i SAF_i(T \leftarrow S; t)$$

ここで、 Q_i は放射線 i の放射線荷重係数¹⁾、 Y_i は一崩壊あたりに生じる放射線の数、 E_i はエネルギー、 AF_i は S を出て T に到達する割合で M_T は標的臓器の質量である。SAF は複雑な過程で計算されるため、ICRP では α や β 粒子など飛程の比較的短い放射線に対しては線源臓器内のみが影響されると考える。また光子に対しては、オークリッジ国立研究所の Cristy と Eckerman によるファントム計算の結果が用いられる。²⁾ この計算は、3 カ月、1 才、5 才、10 才、15 才、成人の両性数学ファントムを用いた計算である。

核種のデータについては、各研究機関でまとめられたデータ集が存在し、ICRP には ICRP Pub. 38³⁾ がある。

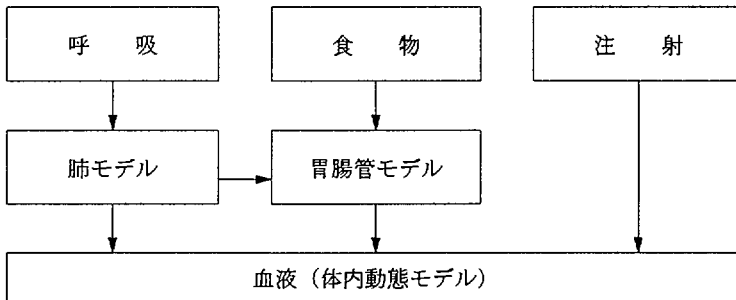
ii) q_{sj} を求めるための Biokinetic model

ある時刻 t における体内の線源分布を計算するためのモデル

このモデルは、線源の取り込み方によって次の様な物に分かれる。

- ・胃腸管吸収（食物からの摂取）
 - ・呼吸器吸収（呼吸による摂取）
 - ・体内動態（血中と臓器のやりとり）
- } ⇒ 血中への移行

これらのモデルの間を関係を図示すると以下の様になる。



体内の線源の動きはコンパートメントのバランス方程式で表される。核種の分布を各コンパートメントの放射性核種量を成分とするベクトル $\vec{q}(t)$ で表すと次のように式に書かれる。

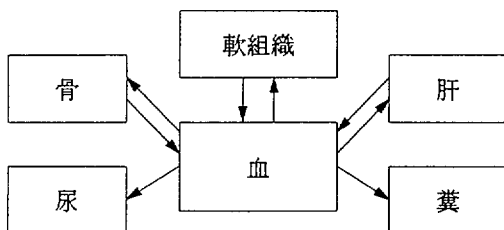
$$\frac{d}{dt}\vec{q}(t) = \Lambda\vec{q}(t) \quad (\text{一次過程のみを考える})$$

Λ : 流量率行列 (T^{-1} の次元を持つ)、 $\vec{q}(t_0) = \vec{q}_0$ の初期条件で解く。

以下で体内動態 $\vec{q}(t)$ を求めるモデルについて議論する。

4. 体内動態モデル

体内動態の基本的な流れは以下のようなコンパートメント図を考える。



矢印の方向に物質のやりとりがある。個々の移行の割合を λ_{ij} であらわす。(i: 流出源 j: 流れ着く先) Λ は λ_{ij} を成分に持つ流量率行列、 $\vec{q}(t)$ はそれぞれのコンパートメントの放射性核種量を成分に持つベクトルである。以上を使って物質のバランス方程式を表すと、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{21} & \cdots & \lambda_{n1} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{n2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{1n} & \lambda_{2n} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix}$$

ここで、

$$\lambda_{ii} = -\lambda_r - \sum_{j \neq i} \lambda_{ij}$$

(λ_r : 物理学的壊変定数)

λ_{ii} はiコンパートメントからの総流量率にマイナスをつけたものを表している。個々の成分に注目すると

$$\frac{d}{dt} q_i(t) = \sum_{i \neq j} \lambda_{ij} q_j(t) - \sum_{k \neq i} \lambda_{ik} q_i(t) - \lambda_r q_i(t)$$

コンパートメントでの生物学的半減期を $T_{1/2}$ 、流量率を λ と考えると両者には次の関係がある。

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (\lambda \text{ は、} t^{-1} \text{ の次元を持つ)}$$

物理学的半減期と壊変定数の間にも同様の関係がある。ここに現れるパラメータは、考える核種についての動物実験、事故等における人間のデータや、同じような振舞いをする核種についての生物学的半減期のデータを元に考えられている。

しかし、パラメータ値が全て確定したとしても、この方程式は一般的に解析的な解を求めることはできない。従って、電子計算機を使って数値解を求めることとなる。

5. Am の場合の例⁴⁾

血中からの消失の生物学的半減期は多くの動物実験より約30分と見積もられており、その30%がfast-turnoverの軟組織(ST0)へ行き、残りの7%が尿管の方へ行くと考えられる。血中から糞への移行は2つの経路がある。一つは肝臓から流失する量の2.6%が胃腸管にまわるもので、それと血中流失量の1.3%がまわるものがある。以上より、血中からの消失の流量率は33.3/d、血中→ST0は10/d、血中→尿管は1.63/dとなる。同様にして血中と軟組織間の半減期の見積もると下の様になる。

血中からST0への半減期	100分
血中からST1への半減期	10時間
血中からST2への半減期	1.5日
ST0から血中への半減期	0.5日
ST1から血中への半減期	50日
ST2から血中への半減期	100年

これらについては年齢による変化はないと考える。

骨と肝臓へ行く量は血中から ST0 へ行く量を除いた量の約80%となる (18.64/d)。この量は年齢にかかわらずほぼ一定だと考えられている。骨への付着は骨の成長の仕方によるので年齢依存が考えられる。従って肝臓への移行にも年齢依存があることになる。動物実験などから年齢別の骨と肝臓への移行率の比率が決められており人間では30才で3:5と考えられている。以下年齢別に1才で7:1、5~15才で5:3、18才で1:1と考えられる。また、Cortical bone と Trabecular bone には、全ての年齢で同等量が分配されると仮定する。骨内での物質の動きはここ20年間の研究成果により推定されているが、未確定な物や議論の決着のついてない物が多くデータも不足気味であるため確定的に決めることはできない。

以下、更に細かくコンパートメントをわけて、得られているデータと整合するように流量率を決める。これらの値を決めるために使われた実験データは、beagle, rat, baboon, monkey, sheep, cow, goat, human についての物である。

この様にして各コンパートメント間のパラメータが3カ月、1才、5才、10才、15才、成人に対してそれぞれ与えられている。年齢依存している部分は骨内と血中から骨・肝臓・生殖腺への移行、尿の排泄である。パラメータが決まると一応バランス方程式が解ける。但し、流量率行列は一般的には複雑なので解析的には解けず電子計算機による数値解を求める。これにより、放射性核種摂取後の任意の時間における臓器等の残留放射性核種の量が分かる。それに放射性核種の物理的な性格や dosimetric model を組み合わせる事により体内の各部位における線量を計算することができる。

6. 近似について

このモデルにおける最大の難点は如何に実験データと矛盾しないパラメータ値を得るかである。実験データの数や条件などが違うためさまざまな仮定が入って来るし、体内動態や放射線影響の研究が進み重要な臓器が認識されコンパートメントが増えてモデルが複雑になってくる。複雑な系になるほど全体の整合性を保つことが難しくなる。また結果を得るための計算も長時間かかることになる。そのため、基本方程式をそのまま解くよりも近似したものを解く方が良い。計算の近似としては、行列の非対角成分を簡略化することで、考えるコンパートメント以外からの寄与を平均化して、 f_j と置くと以下のようなになる。

$$\frac{d}{dt} q_j(t) = f_j - \lambda_j(t) q_j(t)$$

係数 λ や関数 f_j が時間によらないような短い間隔 (Δt) を考えると、この式は解析的に解け、その解は次のようになる。

$$q_j(t) = \frac{f_j}{\lambda_j} (1 - e^{-\lambda_j t}) + q_j(0) e^{-\lambda_j t}$$

また f_j は以下のように表される。

$$f_j = \frac{1}{\Delta t} \sum_i \lambda_{ij} \int_T^{T+\Delta t} q_i(t) dt$$

f_j の式に現われる $q_i(t)$ は、既知のものである。即ち求める $q_j(t)$ と時間が一致していない。放射性核種を

摂取して時間がたち、体内での移行が平衡に近付いてくると Δt をかなり大きめにとっても良い近似となる。

7. 問題点

ここで議論したモデルやパラメータ値は欧米人に対して求められた物である。従って他の民族、例えば日本人に当てはめるには注意が必要である。SAF の計算においては体格や臓器の位置関係の違いは計算のやり直し、ファントムの作り替えを意味する(簡易的に解決するにはスケーリングファクタを導入する)。体内動態については、それぞれの人種にあったパラメータの調節が必要である。しかし、どの人種に対しても総合的なデータの不足と仮定の弱さのために確実に全年齢をカバーできるパラメータを核種全てについて決めることは難しく、特に幼児に対するデータは極端に少なく厄介である。また、年齢依存も6種類の年齢のみ与えられておりその間の年齢に対してパラメータ値をどう近似するかも議論されている。

文 献

- 1) International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60.(1991) "1990 Recommendation of the ICRP" .
- 2) M. Cristy and K. F. Eckerman: ORNL/TM-8381/V1-V7 Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. I~VII (1987).
- 3) International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 38. (1983) "Radionuclide Transformations" .
- 4) R. W. Leggett: Health Physics 62 (1992)288. "A Retention-Excretion Model for Americium in Humans".