

ラジオアイソトープによる人体内部被ばくの計算

吉 村 厚 ・ 川 口 俊 郎

(1996年1月24日受理)

1. ま え が き

今度の法令改正により、放射線障害防止法の告示への内容が大幅に増加した。第24条には放射線による内部被曝の線量当量の測定のための多数の数式が掲載されている。また、告示別表第1も多数の項目が追加され、とりわけ吸入の区分(D, W, Y)及び放射性同位元素を経口した後、体液に達する割合 f_1 値もこれらの計算式を使用するときに必要な。ここでは、これらの数式がどのようにして導入されたかを明らかにし、これを理解することにより法令の理解を深め、正しい内部被曝の計算ができるようになることを目的としている。また、英字の略語も原文の英単語を示し、より記号の意味が記憶に残るよう心掛けた。

2. ICRP-30 モデル

今回の法令は、国際放射線防護委員会 ICRP (International Commission Radiological Protection) を基に作られている。ICRP は放射線防護の目的で、任意の人体組織について、放射性物質を体内摂取した後の50年にわたって、その組織全体で平均した預託線量当量 H_{50} を評価するモデルを示した。これは放射性核種 j からの種類 i の放射線それぞれに関し

$$\begin{aligned} H_{50}(T \leftarrow S)_i &= Q_i \overline{D}_{50}(T \leftarrow S)_i \\ &= U_S \times 1.6 \times 10^{-13} \text{SEE}(T \leftarrow S)_i \times 10^3 \quad S_v \dots\dots\dots (2-1) \end{aligned}$$

である。ここで、

- U_S : 放射線核種 j を摂取した後の50年間にわたる線源期間 S 中のその核種の数,
- 1.6×10^{-13} : 1MeV (10^6eV) のジュール数である,
- $\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ (MeVg⁻¹/変換) : 線源器官 S 中の個々の変換により標的器官 T に吸収され、線質係数によって適切に修正された、種類 i の放射線に関する比実効エネルギー (Specific Effective Energy),
- 10^3 : g⁻¹ から kg⁻¹ への換算係数, である。したがって,

$$H_{50}(T \leftarrow S)_i = 1.6 \times 10^{-10} U_S \text{SEE}(T \leftarrow S)_i \quad S_v \dots\dots\dots (2-2)$$

また、放射性核種 j から放出されるすべての種類の放射線に関しては、

$$H_{50}(T \leftarrow S)_j = 1.6 \times 10^{-10} [U_s \sum_i SEE(T \leftarrow S)_i]_j \quad S_v \quad \dots \quad (2-3)$$

となる。ここで、SEE は次の式により与えられる。

$$SEE(T \leftarrow S)_j = \sum_i \frac{Y_i E_i AF(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{MeVg}^{-1} / \text{変換} \quad \dots \quad (2-4)$$

ここで、加算は線源器官 S 中の放射性核種 j の変換あたりに生成する全ての放射線について行う。また、

Y_i ：放射性核種 j の変換あたり、種類 i の放射線の放出割合、

$E_i(\text{MeV})$ ：放射線 i の平均エネルギーあるいは単一のエネルギーのうち、いずれかあてはまるもの、

$AF(T \leftarrow S)_i$ ：線源器官 S における放射線 i の放出当り、標的器官 T に吸収されるエネルギーの割合、

Q_i ：種類 i の放射線に当てはまる線質係数、

$M_T(\text{g})$ ：標的器官の質量、

である。このモデルでも、SEE は数値データとして与えられているので、問題は式 2-3 の U_s を求めることになる。

U_s の計算は身体をいくつかの独立したコンパートメントからなると仮定したモデルを用いて行っている。身体のいろいろな器官および組織を表すコンパートメントへのその後の移行を図 1 に示す。放射性核種が体液中に入った後、沈着する器官および組織に移行す

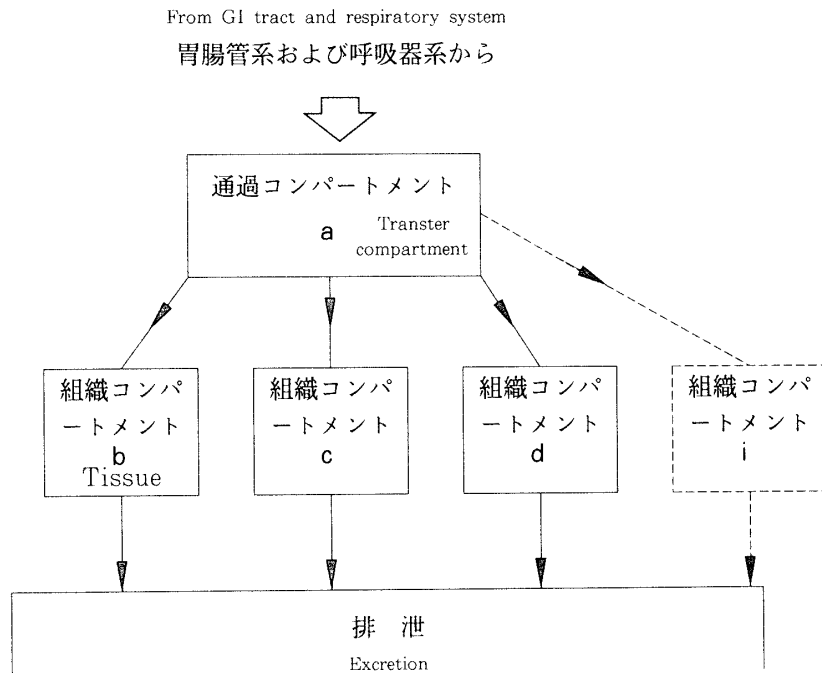


図 1 放射性核種の体内における挙動を記述するのに通常使用される数学的モデル：このモデルに対する例外は個々の元素に関する代謝データの中に記されている。

Mathematical model usually used to describe the kinetics of radionuclides in the body: exceptions to this model are noted in the metabolic data for individual elements

るのに要する時間は、モデルでは通過コンパートメント a で表され、個々の元素に関する代謝データ中に特別の記載がないかぎり、半減期0.25日でそこから除去されるものと仮定する。通過コンパートメント中で起こる変換は、質量 70kg の全身に均等に分布するものと仮定する。各沈着器官あるいは沈着組織は、1つあるいは2つ以上のコンパートメントの各々からそれぞれの固有の速度で排泄経路に移行する。実際には体液への移動が起こることが認められているが、排泄経路からも器官コンパートメントからも通過コンパートメントへのフィードバックはないものと仮定する。それで、排泄経路にそった線量の推定は通常行わない。このように仮定するため、吸入あるいは経口摂取後の任意の時刻に通過コンパートメント a 中に存在する放射性核種の量をその時刻に体液中に存在する放射性核種の量を推定するために使うことはできない。以下呼吸器系および胃腸管系に用いたコンパートメントモデルについて述べる。

ICRP Publ. 30 によれば、呼吸器系は3つの領域、鼻咽腔 (Nasal Passage, N-P, 鼻からのどの奥まで)、気管—気管支 (Trachea Bronchial Tree, T-B)、肺胞 (Pulmonary, P) に分けられ、図2に吸入した粒子径に対する各部位の沈着率の関係を示している。図3で、縦軸の空気力学放射能中央径 AMAD (Activity Median Aerodynamic Diameter) とは、粒子の空気中における動力的運動速度のときに用いられるもので、比重1の球型粒子に換算したときの直径である。

このように粒子の径がわかれば、各部位の沈着率が推定できる。この場合、一般粒子の粒度分布と粒子状放射性物質の粒度分布は等しくない。もし、粒子の径がわからないとき

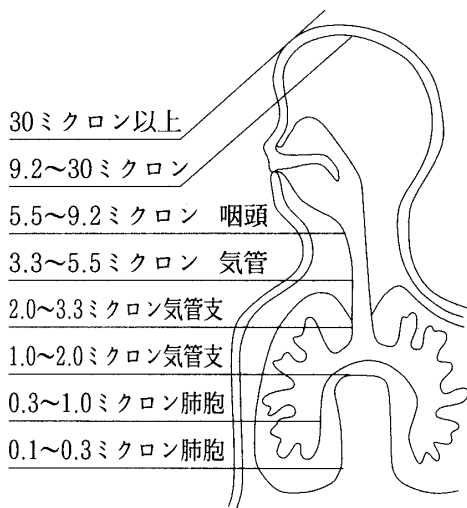


図2 粒子状物質の人体呼吸器系部位の沈着

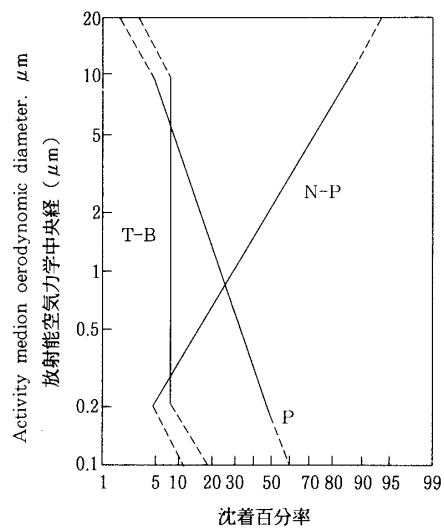


図3 粒子状放射性物質の粒径と呼吸器系部位の沈着 Percent deposition

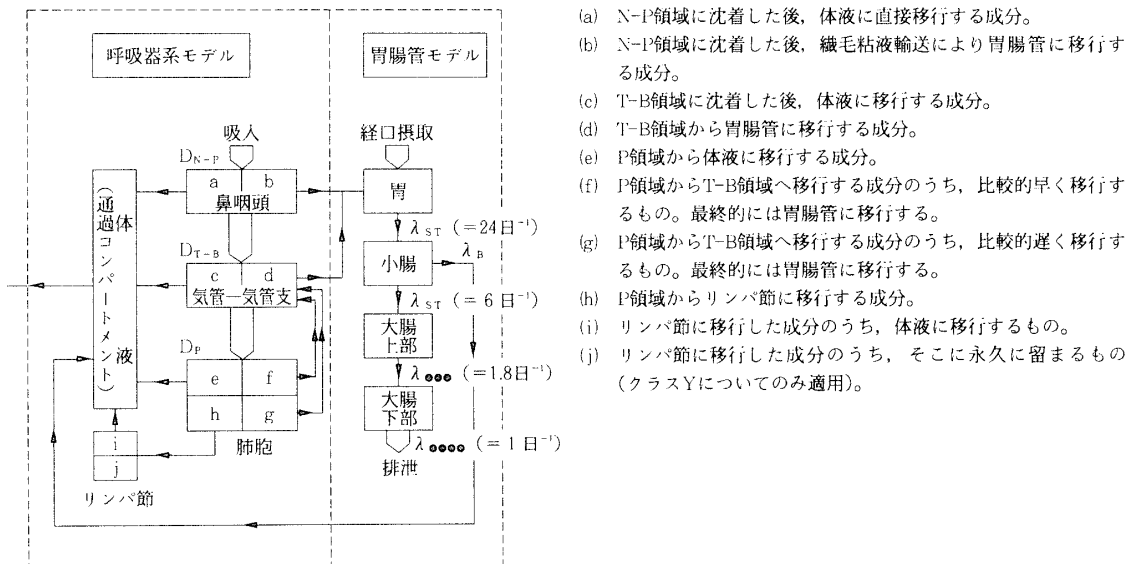
Deposition of dust in the respiratory system. The percentage of activity or mass of an aerosol which is deposited in the N-P, T-B and P regions is given in relation to the Activity Median Aerodynamic Diameter (AMAD) of the aerosol distribution. The model is intended for use with aerosol distributions with AMADs between 0.2 and 10 μm and with geometric standard deviations of less than 4.5. Provisional estimates of deposition further extending the size range are given by the dashed lines. For an unusual distribution with an AMAD of greater than 20 μm, complete deposition in N-P can be assumed. The model does not apply to aerosols with AMADs of less than 0.1 μm.

は沈着率の計算ができないので、粒子径を $1\mu\text{m}$ と仮定する。当然のことであるが、粒子径の小さいものほど肺の奥まで達することがわかる。

図4は呼吸器系からの除去 (Clearance) を記述するコンパートメントモデル (Compartment Model) である。吸入された放射性物質の肺からの除去を表すために、肺胞領域における残留時間 (日) に関連して物質をD, WまたはYに分類する。この分類は次の半減期の範囲に当てはまる。上に述べた3つの領域, N-P, T-B, Pは、それぞれ図に示すように2

LIMITS FOR INTAKES OF RADIONUCLIDES BY WORKERS

| 領域 Region | コンパートメント | クラス | | | | | |
|---------------------------|----------|-------|------|-------|------|----------|------|
| | | D | | W | | Y | |
| | | T (d) | F | T (d) | F | T (d) | F |
| N-P ($D_{N-P}=0.30$) | a | 0.01 | 0.5 | 0.01 | 0.1 | 0.01 | 0.01 |
| | b | 0.01 | 0.5 | 0.40 | 0.9 | 0.40 | 0.99 |
| T-B ($D_{T-B}=0.08$) | c | 0.01 | 0.95 | 0.01 | 0.5 | 0.01 | 0.01 |
| | d | 0.2 | 0.05 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.99 |
| P ($D_P=0.25$) | e | 0.5 | 0.8 | 50 | 0.15 | 500 | 0.05 |
| | f | n.a. | n.a. | 1.0 | 0.4 | 1.0 | 0.4 |
| | g | n.a. | n.a. | 50 | 0.4 | 500 | 0.4 |
| L | h | 0.5 | 0.2 | 50 | 0.05 | 500 | 0.15 |
| | i | 0.5 | 1.0 | 50 | 1.0 | 1,000 | 0.9 |
| | j | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | ∞ | 0.1 |



Mathematical model used to describe clearance from the respiratory system. The values for the removal half-times, T_{a-i} and compartmental fractions, F_{a-i} are given in the tabular portion of the figure for each of the three classes of retained materials. The values given for D_{N-P} , D_{T-B} and D_P (left column) are the regional depositions for an aerosol with an AMAD of $1\mu\text{m}$. The schematic drawing identifies the various clearance pathways from compartments a-i in the four respiratory regions, N-P, T-B, P and L.
 n.a.=not applicable.

図4 放射性核種の挙動

つまたは4つのコンパートメントに分割される。これらのコンパートメントは、おのこの除去の半減期がT日であって、その速度でこの領域から出ていく割合がFであるような特定の除去経路に対応している。

このようにして、各部位の沈着率、除去により減少する半減期、体液に吸収される割合、胃腸管へえん下される割合などがわかったので、各部位の預託線量当量が計算できる。このように系を均一な動態に従ういくつかの箱とみなして、物質の移動を数学的記述するモデルをコンパートメント・モデルという。後にもうすこし詳細に述べることにする。

胃腸管系は経口摂取により、放射性物質が水分および食物により口から体内に入り、胃、腸を通り各気管に摂取される。もし、体内に入った放射性物質が非可搬性であるならば、大部分の放射性物質は胃腸管を通して糞の中に排出される。もし、体内に入った放射性物質が可搬性であるならば、小腸を通過中にほとんどのものが細胞外液に移行する。

図4には胃腸管の中の放射性核種の挙動を記述するために使用する数学的モデルを示す。この図における λ_B の値は、安定元素を経口摂取した後体液に移行する割合 f_1 から次式により推定できる。

$$\frac{\lambda_B}{\lambda_{SI} + \lambda_B} = f_1 \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

f_1 の値は、個々の元素の化合物をいくつかのクラスに分け、それぞれについて与えられている。

3. 評価式の導出

まず、告示第24条の体外計測法評価式を以下に示す。

3-1 体外計測法

告示 第24条の評価式を示す。

吸入摂取の場合

吸入の区分がD $I = \frac{q_w(0)}{0.48 + 0.15f_1} \quad \dots (3-1)$

W $I = \frac{q_w(0)}{0.22 + 0.41f_1} \quad \dots (3-2)$

$I = \frac{q_1(0)}{0.15} \quad \dots\dots\dots (3-3)$

Y $I = \frac{q_1(0)}{0.15} \quad \dots\dots\dots (3-4)$

経口摂取の場合

$I = \frac{q_1(0)}{f_1} \quad \dots\dots\dots (3-5)$

これらの式において、 I 、 $q_w(0)$ 、 f_1 及び $q_1(0)$ は、それぞれ次の値を表すものとする。

I 摂取した放射性同位元素の摂取量
(単位 ベクレル)

$q_w(0)$ 摂取時における全身の長期残留成分
(単位 ベクレル)

f_1 別紙第1の2欄に掲げる値

$q_1(0)$ 摂取時における肺の長期残留成分
(単位 ベクレル)

これらの式の導入は、ICRP, Publ. 30 の呼吸器系モデルによっている。再度図4について取り上げるが、この図は呼吸器系からのクリアランスを記述するために用いられている数学的モデルを示している。この図は、評価式の導出について重要であるので、もう一度詳細に説明を行うことにする。

この図に示す領域は、呼吸器系を3つの領域、すなわち鼻道(N-P)、気管及び気管支(T-B)ならびに肺実質(P)に区分されている。吸入した放射性核種がこれらの領域に沈着する割合を沈着率 D_{N-P} , D_{T-B} , D_P で表す。沈着率は吸入した粒子の空気力学的放射能中央径(AMAD)によって決まる。一般に $AMAD=1\mu m$ として計算するが、この場合各領域への沈着率として $D_{N-P}=0.30$, $D_{T-B}=0.08$, $D_P=0.25$ が採用される。残りの $(1-D_{N-P}-D_{T-B}-D_P)$ は沈着しない割合となる。

吸入した放射性物質は、肺からのクリアランス(除去)を表すために、肺泡領域における残留に関連して物質をクラスD, クラスW, クラスYに分類する。クラスDは肺泡領域における残留の半減期が10日未満, クラスWは10日から100日, クラスYは100日を越えるものであり、各元素の化合物ごとにクラス区分が示されている。この区分は告示別表第1にも使用されている。3つの領域 N-P, T-B 及び P は、それぞれ2つまたは4つのコンパートメントに分割される。これらのコンパートメントのおおのほは、クリアランスの半減期が T 日であって、その速度でこの領域から出ていく割合が F であるような特定のクリアランス経路に対応する。すなわち、コンパートメント a, c 及び e は吸収過程に対応し、一方 b, d, f 及び g は、物質を胃腸管へ移行させる繊毛粘液輸送を含む粒子輸送過程と対応している。肺リンパ系(L)も肺から塵埃を除去するのに役立つ。これは肺のP領域内のコンパートメント h と関連しており、この h から物質は肺リンパ節中のコンパートメント i と j に移行する。コンパートメント i 中の物質は体液に移行するが、コンパートメント j はクラスYのエロゾルについてのみ適用されるものとする。コンパートメント j 中の物質は永久にそこに留まる。そして、クラスDとクラスWのエロゾルについては、コンパートメント h からコンパートメント j に入る割合 F_j はゼロに等しいとする。

(1) 吸収区分Dの化合物

まず、吸入の区分がDの化合物の場合について、式3-1の導出を説明する。図4のクラスDの欄をみると、鼻道(N-P)領域へ沈着した $D_{N-P}=0.30$ については、体液へ0.5、胃腸管へ0.5の割合で(つまり均等に)移行する。気管-気管支(T-B)領域への沈着分 $D_{T-B}=0.08$ については、その0.95の割合分が体液へ、0.05の割合分が胃腸管へ移行する。肺実質(P)への沈着分 $D_P=0.25$ については、その0.8の割合分が体液へ、残りの0.2の割合はリンパ節を経由してやはり体液へ移行する。この場合、除去の半減期 T 日は小さく、無視する。

つまり、呼吸器系から直接体液へ移行する分としては、

$$\begin{aligned} & 0.30 \times 0.5 + 0.08 \times 0.95 + 0.25 \times (0.8 + 0.2) \\ & \approx 0.15 + 0.08 + 0.25 = 0.48 \end{aligned}$$

胃腸管へ移行した分は、

$$0.30 \times 0.5 + 0.08 \times 0.05 \\ \approx 0.15 + 0 = 0.15$$

であり、これが f_1 の割合で体液へ移行する。ここで f_1 は胃腸管から体液へ移行する割合で、告示別表第1の第2欄に示されている。

摂取量のうちで体液に移行し残留する割合は $(0.48 + 0.15f_1)$ である。つまり摂取量が $I(\text{Bq})$ の場合、 $t=0$ での全身の残留量 $q_w(0)$ は、

$$q_w(0) = I \times (0.48 + 0.15f_1)$$

と表される。これより、

$$I = \frac{q_w(0)}{0.48 + 0.15f_1} \dots\dots\dots (3-6)$$

法令における式3-1は、このようにして導出される。

法令で与えられている式3-1~3-5は全て、全身の長期残留量 q_w または肺の長期残留量 q_l の摂取時 ($t=0$) における値、つまり (0) または $q_l(0)$ から摂取量 $I(\text{Bq})$ を算出する式である。

しかし、実際に測定される量は、むしろ摂取した日からある時間 (t 日) を経過した後の残留量すなわち $q_w(t)$ または $q_l(t)$ から摂取量 $I(\text{Bq})$ を算出することとなる。

$q_w(t)$ から摂取量 $I(\text{Bq})$ を算出するには全身残留関数 $R(t)$ を用いるとよい。これは単位量を摂取してから t 日後に、全身に残留する割合を示す式である。 $R(t)$ には物理的減衰は含まれていないので、放射性壊変定数 λ_R を用いて $R(t)\exp(-\lambda_R t)$ として計算する。それで、吸入の区分がクラスDの場合は、摂取後 t 日における全身残留量 $q_w(t)$ は、

$$q_w(t) = I \times (0.48 + 0.15f_1) \times R(t)\exp(-\lambda_R t) \dots\dots\dots (3-7)$$

として表せる。これより、

$$I = q_w(t)\exp(\lambda_R t) / \{(0.48 + 0.15f_1)R(t)\} \dots\dots\dots (3-8)$$

となる。

(2) 吸入区分Wの化合物の全身及び肺の長期残留量

吸入区分の場合は、吸入区分Dの場合と異なって、半減期50日のコンパートメントがあり、微分方程式を溶く必要があり簡単ではない。以下のこれらの計算を示すことにする。吸入区分Dの場合と同じように図3-1のクラスWの欄の値を使用する。呼吸器から直接体液に吸収され、組織系に残留する成分は、コンパートメント a 及び c より短い間に体液に吸収される割合は、

$$D_{N-P} \times F_a = 0.30 \times 0.1 = 0.03$$

となり、また、

$$D_{T-P} \times F_c = 0.08 \times 0.5 = 0.04$$

となり、これらの値の合計は0.07となる。これによる組織系残留分は $0.07 \cdot R(t) \cdot \exp(-\lambda_{RT})$ となる。コンパートメント e より、または h より i を経由して、半減期50日でゆっくりと体液に入り、組織系に残留する分は、摂取から計測までの時間 (t 日) が比較的短い期間の間はその寄与が小さいので考慮しない。長時間後測定する場合は、この寄与分を考慮したほうが精度があがる。また、呼吸器系から胃腸管へえん下され、小腸から体液に吸収されて組織系に残留する成分は、

$$\text{コンパートメント b より } D_{N-P} \times F_b = 0.03 \times 0.9 = 0.27$$

$$\text{コンパートメント d より } D_{T-B} \times F_d = 0.08 \times 0.5 = 0.04$$

$$\text{コンパートメント f より } D_P \times F_f = 0.25 \times 0.4 = 0.10$$

となり、これらの値の合計は0.41となる。この値に f_1 を乗じた値 $0.41f_1 \cdot R(t) \cdot \exp(-\lambda_{RT})$ が胃腸管へ移行する。f から d を経由するが、d における半減期0.2日と短いので f からそのまま胃腸管へ移行するとしてよい。コンパートメント g からは、半減期50日でゆっくりと胃腸管へ移行するが、t が比較的小さい初期の期間については、この寄与分は小さいので考慮しない。呼吸器系に長期に残留する成分については、コンパートメント e, g, h における残留はこれらのコンパートメントにおいては、生物学的半減期が50日でその残留量の合計は、

$$D_P \cdot (F_e + F_g + F_h) \exp(-0.693t/50) \exp(-\lambda_{RT})$$

となり、それぞれの値を代入すると、

$$\begin{aligned} & 0.25 \times (0.15 + 0.4 + 0.05) \exp(-0.693t/50) \exp(-\lambda_{RT}) \\ & = 0.15 \cdot \exp(-0.0139t) \exp(-\lambda_{RT}) \end{aligned}$$

となる。

また、コンパートメント i における残留はコンパートメント h より50日の半減期で移入し、i からは50日の半減期で体液へ移行する。この場合 i における t 日後の残留は以下に示すように微分方程式を解いて求めなければならない。図5はコンパートメント f, i, j からの流入、流出の関係を示している。この図に示すように、コンパートメント h の $q_h(t)$ は $t=0$ で D_P, F_h で、以後 $q_h(t)$ は一日当たり λ_h の割合で減少するので、

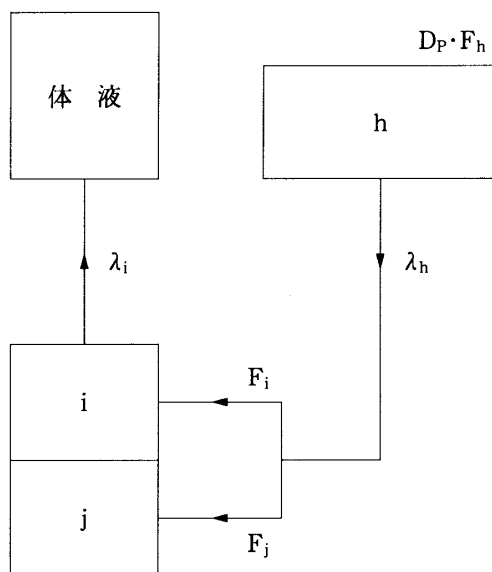


図5 h, i, j コンパートメントからの流入, 流出の関係

$$\frac{dq_h(t)}{dt} = -\lambda_h \cdot q_h(t) \dots\dots\dots (3-9)$$

となる。この式は放射能の減衰の式と同じである。これを解くと、

$$q_h = D_p \cdot F_h \cdot \exp(-\lambda_h t) \dots\dots\dots (3-10)$$

となる。

次に $q_i(t)$ についてはコンパートメント h から毎日 $F_i \cdot \lambda_h \cdot q_h(t)$ ずつ流入し、 $\lambda_i \cdot q_i(t)$ が流出する。それで、

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot \exp(-\lambda_h t) - \lambda_i \cdot q_i(t) \dots\dots\dots (3-11)$$

となる。この微分方程式は、

$$\frac{dy}{dt} + P(t)y = Q(t) \dots\dots\dots (3-12)$$

の型の 1 階線形微分方程式で、解は以下の公式で表される。

$$y = e^{-\int p(t)dt} \left\{ \int e^{\int p(t)dt} \cdot Q(t) dt + c \right\} \dots\dots\dots (3-13)$$

ここで、

$$P(t) = \lambda_i$$

$$Q(t) = F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot \exp(-\lambda_h t)$$

であるから式 3—13 に代入すれば,

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \left\{ \int e^{\lambda_i t} \cdot F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot e^{-\lambda_h t} dt \right\} \dots\dots\dots (3-14)$$

となる。ここで λ_i と λ_h は T が 50 日と同じであるため $\lambda_i = \lambda_h$ となる。
式 3—14 にこの関係を代入すると,

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \left\{ \int F_i \cdot D_p \cdot \lambda_h \cdot F_h \cdot dt \right\}$$

となり,

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \cdot F_i \cdot D_p \cdot \lambda_h \cdot F_h \cdot t + c \dots\dots\dots (3-15)$$

が得られる。はじめはコンパートメント内の残量はないので積分定数は $c=0$ となる。この式に物理的減衰 $\exp(-\lambda_R t)$ を乗じて,

$$q_i(t) = F_i \cdot D_p \cdot \lambda_h \cdot F_h \cdot t \cdot \exp(-\lambda_i t) \cdot \exp(-\lambda_R t) \dots\dots\dots (3-16)$$

となる。式 3—16 に、それぞれ図 4 のクラス W の値を代入すれば、 $\lambda_i = 0.693/50$ とし,

$$q_i(t) = (1.0 \times 0.25 \times 0.05) \cdot 0.693/50 \cdot \exp(-0.693/50) \cdot \exp(-\lambda_R t)$$

$$= 0.125 \cdot (-0.0139)t \cdot \exp(-0.0139t) \cdot \exp(-\lambda_R t)$$

$$= 0.000173t \cdot \exp(-0.0139t) \cdot \exp(-\lambda_R t)$$

が得られる。これらの計算結果を合計して,

$$q_w(t) = I \{ (0.15 + 0.000173t) \cdot \exp(-0.0139t) + (0.07 + 0.41f_1) \cdot R(t) \} \exp(-\lambda_R t) \dots\dots (3-17)$$

となる。時刻 $t=0$ では,

$$q_w(0) = I(0.22 + 0.41f_1) \dots\dots\dots (3-18)$$

$$I = q_w(0) / (0.22 + 0.41f_1) \quad (\text{告示別表第24条第1項第1号口の式}) \dots\dots (3-19)$$

呼吸器系(肺)の長期残留分を $q_1(t)$ とするとコンパートメント e, f, h, i の和として,

$$q_1(t) = I \{ (0.15 + 0.000173t) \cdot \exp(-0.0139t) \} \exp(-\lambda_R t) \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

t=0 では,

$$q_1(0) = I \times 0.15 \quad \text{または} \quad I = q_1(0) / 0.15$$

(告示別表第24条第1項第1号ロの式) \dots\dots (3-21)

$q_w(0)$, $q_1(0)$ は一般に測定できないので, $q_w(t)$, $q_1(t)$ を計測して求める。
式 3-17, 3-19 から,

$$q_w(0) = q_w(t) (0.22 + 0.41f_i) / \{ (0.15 + 0.000173t) \cdot \exp(-0.0139t) + (0.07 + 0.41f_i) \cdot R(t) \cdot \exp(-\lambda_R t) \}$$

の関係にある。しかし, 時刻における $q_w(t)$ を用いて, 式 3-17 より直接 I を求めるほうが簡単である。肺の長期残留量を用いる場合は, 式 3-20 より,

$$q_1(0) = q_1(t) \cdot 0.15 / \{ (0.15 + 0.000173t) \cdot \exp(-0.0139t) \cdot \exp(-\lambda_R t) \}$$

であるから, $q_1(t)$ を測定して $q_1(0)$ を求め, 式 3-21 から I を算出される。この場合も式 3-20 を使って $q_1(0)$ より I を算出したほうが直接的である。

(3) 吸入の区分が Y の化合物の肺の長期残留量

呼吸器系(肺)に長期に残留する成分はコンパートメント e, g, h における残留は, 初期沈着割合が,

$$D_p \times (F_e + F_g + F_h) = 0.25(0.05 + 0.4 + 0.15) = 0.15$$

であるから,

$$0.15 \cdot \exp(-0.693t/500) \cdot \exp(-\lambda_R t)$$

となる。コンパートメント i における残留 $q_i(t)$ も該当するコンパートメントの微分方程式を解くことにより求める。この場合式 3-11 で示す微分方程式と同じであるので, やはり前述の 1 階線形微分方程式の解の公式(式 3-13)を利用して解は,

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \left\{ \int e^{\lambda_i t} \cdot F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot e^{-\lambda_h t} dt \right\}$$

と式 3-14 と同じとなる。しかし, この場合 λ_i と λ_h は等しくないので,

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \left\{ \int e^{(\lambda_i - \lambda_h)t} \cdot F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot dt \right\} \quad \dots\dots\dots (3-22)$$

となる。よって、

$$q_i(t) = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_h} (F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot t \cdot e^{-\lambda_h t}) + C e^{-\lambda_h t} \dots\dots\dots (3-23)$$

となる。これより $t=0$ で $q_i(0)=0$ の場合の積分定数 C を求める。

$$0 = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_h} (F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot t) + C \dots\dots\dots (3-24)$$

$$C = -\frac{1}{\lambda_i - \lambda_h} (F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot t) \dots\dots\dots (3-25)$$

この式を式 3-23 に代入すると、

$$q_i(t) = \frac{e^{-\lambda_h t}}{\lambda_i - \lambda_h} (F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot t) + \frac{e^{-\lambda_i t}}{\lambda_h - \lambda_i} (F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot t) \dots\dots\dots (3-26)$$

となる。それで、

$$q_i(t) = \frac{F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h}{\lambda_h - \lambda_i} (e^{-\lambda_i t} - e^{-\lambda_h t}) \dots\dots\dots (3-27)$$

図 4 に与えられたクラス Y の定数を代入すると、

$$\lambda_h = 0.693/500, \quad \lambda_i = 0.693/1000$$

となるから、

$$q_i(t) = \frac{0.9 \times (0.693/500) \times 0.25 \times 0.15}{(0.693/500) - (0.693/1000)} \{ \exp(-0.693t/100) - \exp(-0.693t/500) \}$$

となる。物理的減衰 $\exp(-\lambda_R t)$ を掛けて、

$$= 0.0675 \{ \exp(-0.693t/1000) - \exp(-\exp - 0.693t/500) \} \exp(-\lambda_R t) \dots\dots\dots (3-28)$$

となる。また、コンパートメント j における残留量 $q_j(t)$ に対して、

$$\frac{dq_j(t)}{dt} = F_j \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h \cdot \exp(-\lambda_h t) \dots\dots\dots (3-29)$$

の関係からこれらを積分して,

$$q_j(t) = \frac{F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h}{-\lambda_h} \exp(-\lambda_h t) + C$$

積分定数 C は, $t=0$ で $q_j(t)=0$ の条件から,

$$C = \frac{F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h}{\lambda_h}$$

となる。これから,

$$q_j(t) = \frac{F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h}{\lambda_h} \{1 - \exp(-\lambda_h t)\} \dots\dots\dots (3-30)$$

となる。これに物理的減衰 $\exp(-\lambda_{Rt})$ を掛けて,

$$q_j(t) = \frac{F_i \cdot \lambda_h \cdot D_p \cdot F_h}{\lambda_h} \{1 - \exp(-\lambda_h t)\} \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots\dots (3-31)$$

となる。 $\lambda_h=0.693/500$ と図3に示すクラスYの数とを代入すると,

$$\begin{aligned} q_j(t) &= 0.9 \times 0.25 \times 0.15 \times \{1 - \exp(-0.693t/500)\} \exp(-\lambda_{Rt}) \\ q_j(t) &= 0.00375 \{1 - \exp(-0.693t/500)\} \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots\dots (3-32) \end{aligned}$$

コンパートメント e, g, h, i, j の合計が肺の長期残留分 $q_1(t)$ となるので,

$$\begin{aligned} q_1(t) &= [0.15 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) \\ &\quad - 0.0675 \exp(-0.00139t) \\ &\quad \quad + 0.00375 \{1 - \exp(-0.00139t)\}] \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots (3-33) \\ &= \{(0.15 - 0.0675 - 0.00375) \exp(-0.00139t) \\ &\quad \quad + 0.0675 \exp(-0.000693t) + 0.00375\} \exp(-\lambda_{Rt}) \\ &= \{0.0788 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) \\ &\quad \quad \quad + 0.00375\} \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots (3-34) \end{aligned}$$

となる。また摂取量を I とじて,

$$\begin{aligned} q_1(t) &= I \{0.0788 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) \\ &\quad \quad \quad + 0.00375\} \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots (3-35) \end{aligned}$$

式 3-35において, $t=0$ とおいて,

$$q_1(0) = I \times 0.15 \dots\dots\dots (3-36)$$

$$I = q_1(0) / 0.15 \quad (\text{告示別表第24号第1項第1号ハの式}) \dots\dots\dots (3-37)$$

が導かれた。

また, 吸入区分が Y の $q_w(t)$ は図 4 の呼吸器モデルクラス Y の値から, コンパートメント a, c より, それぞれ

$$D_{N-P} \cdot F_a = 0.30 \times 0.01 = 0.003$$

$$D_{T-B} \cdot F_c = 0.08 \times 0.01 = 0.0008$$

これらの合計は 0.0038 で約 0.004 となる。また, 胃腸管に移行して吸収される分は, コンパートメント b, d より,

$$D_{N-P} \cdot F_b = 0.30 \times 0.99 = 0.30$$

$$D_{T-B} \cdot F_d = 0.30 \times 0.99 = 0.08$$

$$D_P \cdot F_f = 0.25 \times 0.4 = 0.1$$

これらの合計は 0.48 となる。これに f_1 を掛けて, $0.48f_1$ となる。

$$q_w(t) = \{0.0788 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) + 0.00375 + (0.004 + 0.48f_1)R(t)\} \exp(-\lambda_{Rt}) \dots\dots (3-38)$$

となる。

これまで導出した $q_w(t)$ または $q_1(t)$ から直接, 摂取量 $I(Bq)$ を求める式をまとめて示す。R(t) の式は, 主な核種について最後の表 1 に示している。

吸入摂取の場合

吸入の区分が D

$$I = q_w(t) \exp(\lambda_{Rt}) / \{(0.48 + 0.15f_1)R(t)\} \dots\dots\dots (3-39)$$

吸入の区分が W

$$I = q_w(t) \exp(\lambda_{Rt}) / \{(0.15 + 0.000173t) \exp(-0.0139t) + (0.07 + 0.41f_1)R(t)\} \dots\dots\dots (3-40)$$

$$I = q_1(t) \exp(\lambda_{Rt}) / \{(0.15 + 0.000173t) \exp(-0.0139t)\} \dots\dots\dots (3-41)$$

吸入の区分が Y

$$I = q_w(t) \exp(\lambda_R t) / \{ (0.0788 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) + 0.00375) + (0.004 + 0.48f_1) R(t) \}$$

…… (対応する式は法令に無い)

$$I = q_1(t) \exp(\lambda_R t) / \{ 0.0788 \exp(-0.00139t) + 0.0675 \exp(-0.000693t) + 0.000375 \} \quad \dots \quad (3-42)$$

経口摂取の場合

$$I = q_w(t) \exp(\lambda_R t) / \{ f_1 R(t) \} \quad \dots \quad (3-43)$$

3-2 バイオアッセイ法

吸入摂取の場合

吸入の区分がD $I = \frac{E(t)}{(0.48 + 0.15f_1)y(t)} \quad \dots \quad (3-44)$

W $I = \frac{E(t)}{(0.07 + 0.41f_1)y(t)} \quad \dots \quad (3-45)$

$I = \frac{E_f}{0.41} \quad \dots \quad (3-46)$

Y $I = \frac{E(t)}{(0.004 + 0.48f_1)y(t)} \quad \dots \quad (3-47)$

$I = \frac{E_f}{0.48} \quad \dots \quad (3-48)$

経口摂取の場合

$I = \frac{E(t)}{f_1 y(t)} \quad \dots \quad (3-49)$

ただし、トリチウムの場合は、

$I = \frac{4.2 \times 10^4 U(t)}{R(t)} \quad \dots \quad (3-50)$

I 摂取した放射性同位元素の摂取量 (単位 ベクレル)
 E(t) 摂取した日以後 t 日目の 1 日当たりの放射性同位元素の全排せつ量 (単位 ベクレル)
 f₁ 別表第 1 の第 2 欄に掲げる値
 y(t) 細胞外液に単位取り込み後 t 日目に全排せつ経路を通じて排せつされる放射性同位元素の割合
 E_f 吸入摂取した日以後 3 日間ないし 5 日間のふん中の放射性同位元素の排せつ量 (単位 ベクレル)
 U(t) 経口摂取した日以後 t 日目に排せつされた尿中のトリチウム濃度 (単位 ベクレル毎立方センチメートル)
 R(t) 経口摂取した日以後 t 日目において人体に残留しているトリチウムの割合

(1) 吸入の区分がDの化合物の排せつ量

呼吸器系から直接または胃腸管 (小腸) を経由して体液に吸収される割合は前述の吸入の区分がDの化合物の全身残留量のところで算出したとおり、(0.48 + 0.15f₁) である。この割合が、それぞれの核種ごとに y(t) という関数に従って排せつされることになる。摂取量を I とすると、全排せつ量 E(t) は次式のように表される。

$$E(t) = I \times (0.48 + 0.15f_1) y(t)$$

したがって、

$$I = E(t) / (0.48 + 0.15f_1) y(t)$$

つまり、式 3—44 が得られる。 $y(t)$ は生物学的な代謝のみによる排せつ率であり、排せつ率式は物理的減衰はない。それで、物理的減衰 $\exp(-\lambda_R t)$ を掛ける必要がある。

一派に尿中排せつ量 $E_u(t)$ を測定することが多い。この場合、全排泄量に対する尿中排せつ量の割合 F_u を用いて、全排せつ量 $E(t)$ は $E(t) = E_u(t)/F_u$ として計算できる。 F_u は一般に時間によらず一定とすることになっている。 $R(t)$ と $Y(t)$ および F_u の値をこの章の最後にも載せておく。 $Y(t) = -dR(t)/dt$ なる関係があり、 $Y(t)$ は記載のない場合でも $R(t)$ の時間微分から求められる。

(2) 吸入の区分が W の化合物の排せつ量

吸入の区分が W の化合物の全身残留量の箇所でも算出したように、体液に短期間に吸収される割合は 0.07、胃腸管に移行して吸収される分は $0.41f_1$ である。3 日ないし 5 日間の直接のふん中排せつ分を除いて、

$$I = E(t) / \{(0.07 + 0.41f_1)y(t)\}$$

式 3—45 が得られる。

また、 f_1 の値は W の区分の化合物の場合、ほとんど 0 に近いので胃腸管に移行する分 0.41 は 3 日ないし 5 日間の間にほとんどすべてふんとなって排せつされる。それで、3 日ないし 5 日のふん中排せつの全量を E_f とすると、

$$I = E_f / 0.41$$

式 3—46 が得られる。

(3) 吸入の区分が Y の化合物の排せつ量

体液に短期間に吸収される割合は、呼吸器系モデルですでに計算したので、その値を使って以下の式で表される。

$$I = E(t) / \{(0.004 + 0.48f_1)y(t)\}$$

式 3—47 が得られる。

また、Y 化合物の場合、 f_1 が非常に小さいので胃腸管に移行する割合 0.48 が、ふん中に 3 日ないし 5 日間の間に排せつされるので、

$$I = E_f / 0.48$$

式 3—48 が得られる。

以上、内部被曝による線量当量を算出するさいに必要な摂取量 I を求める体外計測法に関連した式（全身または肺中の残留量と摂取量との関係式）及びバイオアッセイ法に関連した式（排せつ量と摂取量との関係式）を呼吸器系モデルに従って導出したが、それらの関係式を模式図で示すと図 6 及び図 7 のようになる。

図 6 の A 点の値は、吸入の区分が D の化合物の場合の時間 0（摂取時）の全身残留量

0.48+0.15f₁ を示します。また、B点は吸入の区分がWの化合物の場合の時間の値 0.22 + 0.41f₁ を示す。C点は吸入の区分がWとYの化合物の肺の長期残留量の時間0の値で0.15 である。図7のD、E及びFは、それぞれ吸入の区分がD、W及びYの化合物の時間0の排 せつ量を示し、(0.48+0.15f₁)、(0.07+0.41f₁) 及び (0.004+0.48f₁) に相当する。なお、 経口摂取の場合、A、B、D、E及びF点はすべて f₁ に等しくなる。また、図6に示した ふん中排せつ量は吸入の区分がYの化合物のふん中排せつの時間的経過を示したもので、 4~5日までに吸入摂取量の0.48が排せつされる。

(4) トリチウム水

トリチウム水の場合は、摂取後3時間もすれば尿中と体液中の放射能濃度は平衡状態と なる。このため、尿中の放射能濃度 U(t) (単位 Bq/ml) の測定でもって、全身残留量が 推定できる。ICRP 標準人 (Reference Man) の体内の水分量は 4.2×10⁴ml であるので、 4.2×10⁴U(t) が全身残留量となり、摂取量 I は R(t) を用いて、

$$I = \frac{4.2 \times 10^4 U(t)}{R(t)} \dots\dots\dots (3-51)$$

となる。トリチウム水の残留関数は R(t) = exp(-0.693t/10日) である。

法令には、「経口摂取の場合」のみのごとく書かれているが、実際には上記の式は吸入の 場合でも当てはめることができる。

吸入摂取、経口摂取あるいは皮膚を通しての吸収によって体内に入ったトリチウム水 は、完全にまた瞬時に吸収され、全身の水と急速に混合するものと仮定する。体内の水分 の代謝速度は個人間で異なり、流動物の摂取時及び周囲の温度による発汗作用のような因 子によって異なる。多くの実験によれば、残留は三つの指数関数の和によって表すことが できることがわかった。それで、

$$\sum_{i=1}^3 a_i \exp\left(-0.693 \frac{t}{T_i}\right) \dots\dots\dots (3-52)$$

と表される。ここで、T₁ は6~18日の範囲にあり、T₂ は21~34日の範囲に、そして T₃ は 250~550日の範囲にある。後にほうの二つのコンパートメントは、それぞれ動きやすい有 機プールと結合した有機プールを表すが、それらをあわせた大きさ (a₂+a₃) は、a₁ と比較 して小さく、合計で全線量の約10%である。したがって、トリチウム水の残留は、10日の半 減期をもつ一つの指数関数によって十分記述することができる。それで、

$$\exp\left(-0.693 \frac{t}{10}\right) \dots\dots\dots (3-53)$$

となる。

3—3 計算法（空气中放射性物質の独活からの計算法）

$$I = 1.2 \times 10^6 CtF \quad \dots\dots\dots (3-54)$$

ただし、トリチウム

$$I = 1.8 \times 10^6 CtF \quad \dots\dots\dots (3-55)$$

これらの式において、I、C、t及びFは、それぞれ次の値を表すものとする。

I 摂取した放射性同位元素の摂取量（単位 ベクレル）

C 規則第20条第1項第2号によって測定された空气中の放射性同位元素の濃度（単位 ベクレル毎立方センチメートル）

t 測定対象者が作業室その他放射性同位元素を吸入摂取する恐れのある場所に立入った時間（単位 時間）

F 測定対象者が呼吸する空气中の放射性同位元素の濃度のCに対する割合

空气中濃度C（単位 Bq/cm³）を測定モニターが設置されている場所は、一般には実際の作業場所と離れていることから、作業者の呼吸息の空气中放射性同位元素の濃度は、そのF倍つまりCF（Bq/cm³）と考える。Fは実測されている場合はその値を使用し、わからない場合はF=10を採用する。

ICRP 標準人が軽作業の条件のもとで、作業中に吸入する空気量は1.2×10⁶（cm³/時間）とされている。時間tの作業では、摂取量Iは、

$$I = 1.2 \times 10^6 CtF \quad \dots\dots\dots (3-56)$$

と計算される。

トリチウム水の場合には、皮膚からの呼吸も考慮する必要がある。吸入と皮膚呼吸は2：1の割合とされ、上式3—56の係数を1.5倍すれば、全摂取量となる。そこで、

$$I = 1.8 \times 10^6 CtF \quad \dots\dots\dots (3-57)$$

となっている。

4. あとがき

ICRP の刊行書54「作業者による放射性核種の摂取に関する個人モニタリング——立案と解釈——（1987）には、呼吸器系モデルと実際の残留関数、排せつ関数を用いて求められた残留量と排せつ量の時間的变化が、22元素、37核種について与えられている。図7は一例として、¹³¹Iの甲状腺中残留量をPubl. 54から再録したものである。摂取した日から測定した日までの経過日数t（日）がわかれば、これらの図から容易に吸入摂取量を推定することができる。

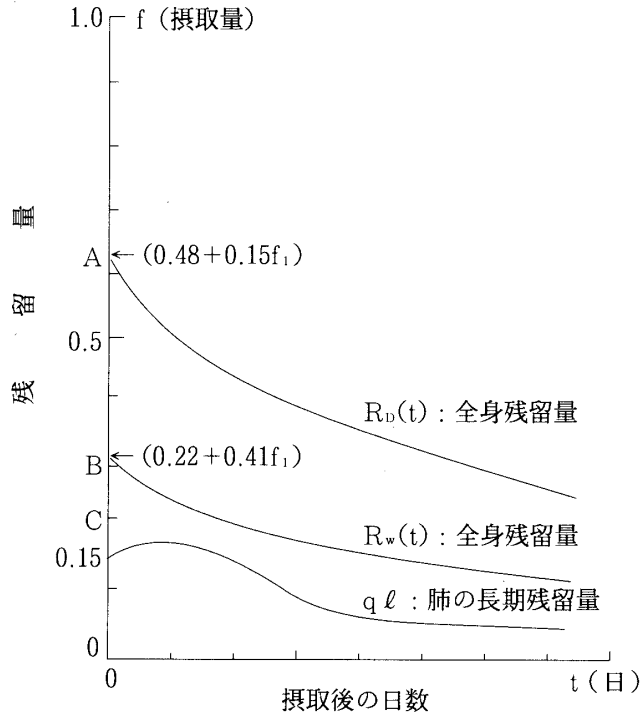
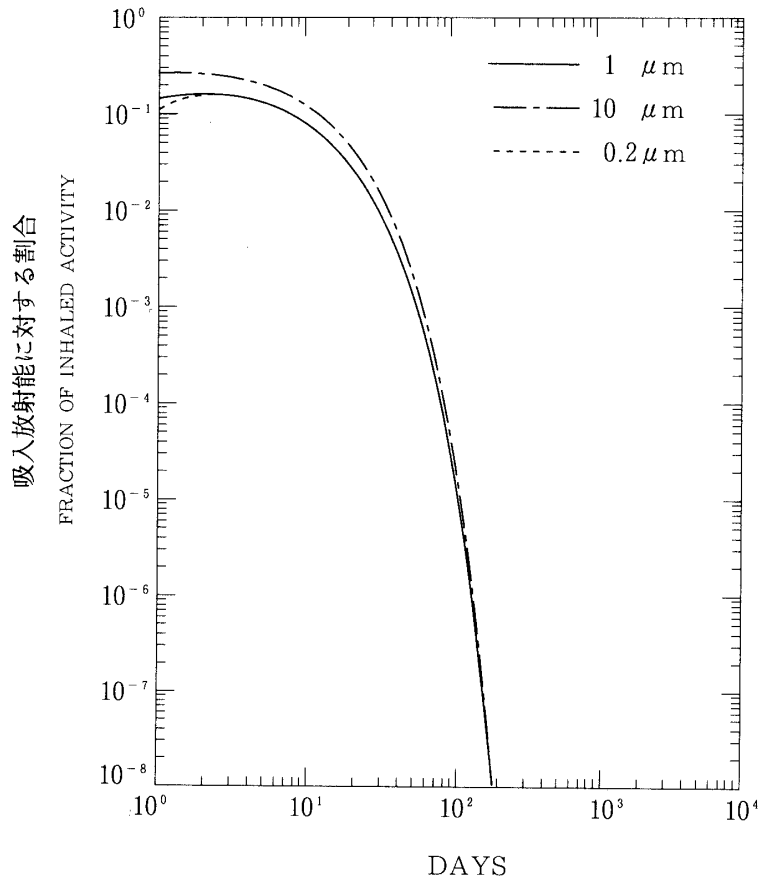


図6 摂取量と残留量との関係



^{131}I class D: Retention in thyroid after inhalation, acute intake.

図7 ^{131}I クラスD: 吸入後の甲状腺中残留, 急性摂取

参 考 文 献

- (1) 赤石 準編：内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル，原子力安全技術センター，1988.
- (2) 藤田 稔：フィルムバッジニュース，No. 10(3) 1989.
- (3) 藤田 稔：フィルムバッジニュース，No. 12(15) 1989.
- (4) 作業者による放射性核種の摂取に関する個人モニタリング：立案と解釈 [ICRP54]，日本アイソトープ協会，1992.
- (5) 井尻憲一：体内汚染による内部被曝の評価（法令における取扱を中心として），平成3年度放射性同位元素等取扱施設教職員研修（講義資料），23—44 1991.
- (6) 中村尚司：体内におけるアイソトープ分布と挙動，平成3年度放射性同位元素等取扱施設教職員研修（講義資料），3—22 1991.