

国際放射線防護委員会勧告

反覆取り込みまたは長期の取り込み  
に由来する体内汚染の算定

社団法人 日本アイソトープ協会

財団法人 仁科記念財団

国際放射線防護委員会勧告

反覆取り込みまたは長期の取り込み  
に由来する体内汚染の算定

**ICRP Publication 10A**

国際放射線防護委員会  
専門委員会4の報告

1969年4月に主委員会により採択されたもの

社団法人 日本アイソトープ協会

財団法人 仁科記念財団

本書は “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, The Assessment of Internal Contamination Resulting from Recurrent or Prolonged Uptakes — A Report by Committee 4 of the ICRP — ICRP Publication 10A” を、ICRP の諒解のもとに仁科記念財団と日本アイソトープ協会において翻訳、出版したものである。

序にもあるように、本書は別に翻訳、刊行される ICRP Publication 10, Report of Committee IV on Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure の姉妹編なので、両者をあわせて読まれることを希望する。

Nishina | Japan  
Memorial | Radioisotope  
Foundation | Association

Japanese Translation Series of ICRP Publications  
*Publication 10A*

Translated by

The Committee for Japanese Translation of ICRP Publications,  
Japan Radioisotope Association

.....  
Fumio YAMAZAKI (Chair)    Hidehiko TAMAKI (Vice-chair)  
Masami IZAWA \*            Tatsuji HAMADA            Eizo TAJIMA

.....  
Presumed the founding committee members.

\* Former ICRP member.

## 目 次

序 .....	( 1 )
1. 緒 論 .....	( 2 )
2. 一般式の作成 .....	( 5 )
3. 1回の被曝に引きつづく無期限の期間にわたって次第に 減少する取り込み .....	( 7 )
A. 緒 論 .....	( 7 )
B. 肺における非可搬性放射性核種の残留 .....	( 7 )
C. 汚染された肺から肺リンパ節への沈着 .....	( 8 )
D. 汚染された肺から尿への排泄 .....	( 10 )
E. 汚染された肺から骨格への沈着 .....	( 12 )
F. 傷の汚染につづく骨格への沈着と排泄 .....	( 15 )
4. 限定された期間内の数回の取り込み .....	( 16 )
A. 緒 論 .....	( 16 )
B. 骨親和性核種と他の核種との代謝の相違 .....	( 22 )
C. 図5～10に対する一般的説明 .....	( 23 )
5. 引用文献 .....	( 31 )
6. 付 録 .....	( 33 )
A. 基本式の誘導 .....	( 33 )

( ii )

B. ICRP Publication 10に記載の10核種に対する

残留関数と排泄関数.....( 36 )

C. 細胞外液中に取り込まれた元素の総排泄のうち,尿による

割合 ( $F_u$ ) と糞による割合 ( $F_f$ ).....( 37 )

D. 取り込み率一定の期間につづく排泄に対する誘導調査レベル.....( 38 )

## 序

この報告書は、ICRP 専門委員会4の要請により、G. C. Butler が、D. Coldrick, R. S. McCullough および A. Veld の助力と J. W. Hopkins および J. B. Campbell の助言を受けて作成した。彼らはすべてカナダ国立研究協議会のメンバーである。報告書の基本目的は、ICRP Publication 10 に示された放射性核種の1回取り込みに関する算定を、実用上重要な他の被曝のパターンに拡張することにある。

著者らは、S. R. Bernard, F. Breuer, C. W. Mays, D. Méchali, T. T. Mercer, P. E. Morrow および S. D. Simpson の諸氏の口頭ならびに書面での有益な討論に対して感謝する。1968年11月にウィーンで開催された“全身および決定器官の中のウランおよびプルトニウムの検出と算定に関する各国の研究の調整”と題する IAEA パネルの会合からは、情報と激励をうけた。

Mrs. G. Barker は参考資料を準備し、また Miss E. Monson はこの報告書を読みやすい形にととのえてくれた。

## 1. 緒 論

(1) 人の体内汚染の数式化を試みる場合、まず、現実の相反する両極端における2つの取り込みのパターンを考える。すなわち：

(2) 連続被曝 これは年間の大部分の日に比較的一定の量の摂取があり、その結果、放射性核種の沈着と消失との間に平衡が成り立つときにおこる。連続被曝は決定器官の定常的な照射をもたらす、体内被曝による線量率の限度を勧告した ICRP Publication 2 および 6 (文献 1 および 2) に採用された、放射線防護のための1つのアプローチの根底をなしている。この型の取り込みは汚染した食物または水を経口摂取する集団の構成員におこりうるが、放射線作業員にとっては酸化トリチウムのような少数の放射性物質の場合を除いて反復取り込みはまれである。

(3) 1回被曝 これは数時間以下のあいだ継続する孤立した摂取から生じる。これによる体内量は時間とともに変化するものであり、問題となる量は線量率ではなくて総線量 (または残りの就労期間に対する線量預託) である。この型の摂取は、公衆の構成員にとっては、原子力施設から事故で放出された放射性雲の通過により、きわめてわずかな確率でおこりうるにすぎないが、作業員が1回の孤立した被曝をうける可能性はもっと大きい。

(4) ICRP の専門委員会 4 は1963年に、“職業被曝による体内汚染から体内組織のうける線量の評価”という主題を研究し報告する課題グループを作った。この課題グループの仕事は ICRP Publication 10 (文献 3) として報告されている。線量計算のために課題グループが用いたモデルは上述の2番目すなわち1回被曝であった。

(5) 上の報告書は1年間に数回の取り込みの算定に役立つが、ICRP 専門



委員会4はそれをさらに広範囲の状況に適用できるよう拡張することを求め、本報告書の目次に示されている実際の状況についてさらに考慮すること、およびこれらすべての場合について、つぎの諸量の値の計算を試みることを決めた。

すなわち

決定器官に対する線量

摂取後のいろいろな時刻における排泄

誘導調査レベル (文献3を参照)

(6) つぎの節に見られるように、ある放射性核種の体内量または器官内量は、取り込み関数または沈着関数と残留関数とのたたみこみ積分 (convolution integral) から成る式で一般に記述することができる。

$$q(t) = \int_0^t I(\zeta) \cdot r_s(t-\zeta) d\zeta$$

ここで  $q(t)$  = 体内量または器官内量

$I(\zeta)$  = 時間の関数としての取り込みまたは沈着

$r_s(t-\zeta)$  = 時間の関数としての残留

$t$ : 存在量を計算すべきあるきまった時刻

$\zeta$ : 0 から  $t$  まで積分される時間変数。これは取り込みのそれぞれの増分のおこる時刻と考えてよい

この報告書は主として上式の適用を扱ったものである。取り込みのいろいろなパターンと、それに由来する体内量の時間変化を図に画くことは、ある読者にとって役立つと思われるので、それを図1~4に示す。



( 4 )

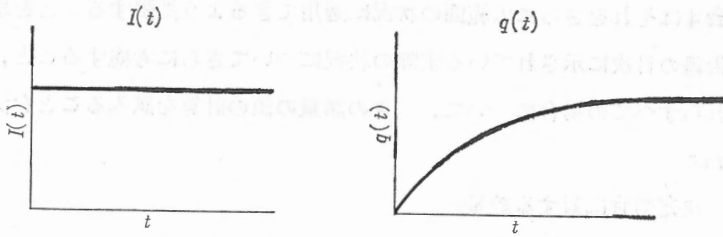


図1 連続取り込み (ICRP Publication 2 のモデル)

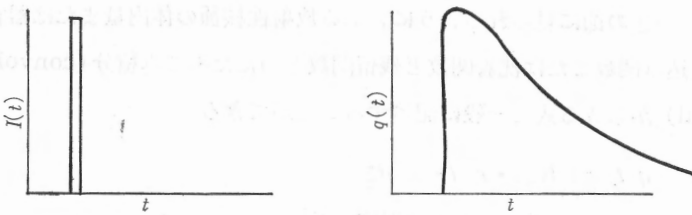


図2 1回取り込み (ICRP Publication 10 のモデル)

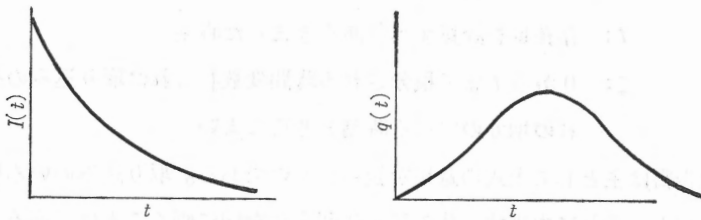


図3 最初、肺または傷が汚染したことにもとづく、次第に減少する取り込み

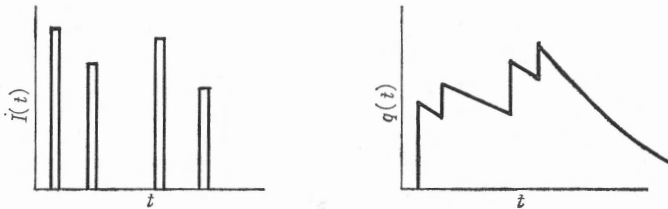


図4 限定された期間内の数回の取り込み

## 2. 一般式の作成

(7) 体内における放射性物質の蓄積を記述する数式は、Tapper および Tapper (文献4) ならびに Defares および Sneddon (文献5) により帰納的方法で導びかれており、また Norris ら (文献6)、Simpson ら (文献7)、Sanders (文献8)、ICRP Publication 2 (文献1)、Bernard ら (文献9)、Marshall (文献10)、ならびに Rundo および Lillegraven (文献11) によって解析的に求められている。これらの数式はたがいに大きなちがいを示していて、そのうちのいくつかは、ここで考えている問題に適用することが困難である。それで、ICRP Publication 10 (文献3) でなされたように、根元にさかのぼって基本式を導くことが必要と思われた。

(8) 1つの区画(決定器官)におけるある放射性核種の添加、残留および減少の解析に用いられている記号はつぎのとおりである。

$R_s(t)$  = 放射性核種の1回の沈着に対する残留関数(放射性崩壊を無視する)

$r_s(t) = R_s(t) \cdot e^{-\lambda t}$       ここで  $\lambda$  = 放射性崩壊定数

$Y(t) = -e^{-\lambda t} \cdot R'_s(t) = -e^{-\lambda t} \cdot \frac{d}{dt} R_s(t)$

= 1回の沈着から排泄により1日あたりに失われる割合

$I(t)$  = 時刻  $t$  における区画内の放射性核種の沈着速度

$r'_s(t) = \frac{d}{dt} \cdot r_s(t) = -R_s(t) e^{-\lambda t} \lambda + R'_s(t) e^{-\lambda t}$

$q(t)$  = 時刻  $t$  における区画内の放射性核種の量

$q'(t) = \frac{d}{dt} q(t)$

$Q(t) = \int_0^t q(\zeta) d\zeta = q_0 \mu \text{Ci}$  の最初の沈着からうける、 $\mu \text{Ci}$ -日で表わした

被曝量

( 6 )

(9) 時刻  $t$  において区画すなわち決定器官に残留する放射性核種の量は

$$q(t) = \int_0^t I(\zeta) r_s(t - \zeta) d\zeta \quad (1)*$$

である (付録Aの (A1) 式から)。

(10) この存在量に由来する被曝量は

$$Q(v) = \int_0^v I(\zeta) \left[ \int_0^{v-\zeta} r_s(u) du \right] d\zeta \quad (2)**$$

である (付録Aの (A9) 式から)。

(11) 決定器官に  $q(t)$  が存在するときの排泄は

$$E(t) = - \int_0^t I(\zeta) R'(t - \zeta) e^{-\lambda(t-\zeta)} d\zeta \quad (3)$$

である (付録Aの (A5) 式から)。

われわれが出合ったすべての残留関数に対して, (3)式の積分を実行することができた。 $R(t)$  が単一の指数関数かいくつかの指数関数の和であるならば,  $R'(t)$  もそうであって, この積分は存在する (もちろん  $I(\zeta)$  は積分可能であると仮定して)。

(12) しかし, もし  $R(t)$  がたとえば  $At^{-B}$  ( $0 < B < 1$ ) のようなべき関数で記述されるならば,  $At^{-B}$  は0日に近いところの残留を表わすことができず, また  $R'(t)$  は積分不能である。この困難を克服するにはつぎの2つの方法がある。

(i)  $P(0) = 1$ ,  $P(1) = R(1)$ ,  $P'(1) = R'(1)$  となるように2次式

$P(x) = ax^2 + bx + c$  を作る。そうすれば

$$\begin{aligned} R(t) &= P(t) & 0 \leq t \leq 1 \text{ のとき} \\ &= At^{-B} & t > 1 \text{ のとき} \end{aligned}$$

(ii)  $R(t) = Z^B(t+Z)^{-B}$  とする。これは  $t$  のすべての値に対して連続関数である。ここで  $Z$  は時間のディメンションをもつ正の定数である。

\* (1)式は付録Aのほか16項および40項に用いられている。

\*\* (2)式は29項および44項に用いられている。

### 3. 1回の被曝に引きつづく無期限の期間にわたって次第に減少する取り込み

#### A. 緒 論

(13) 1つの器官における放射性物質の1回の沈着が原因となって、その器官または他の器官が沈着放射性核種あるいはその壊変生成物により長期にわたって被曝することがしばしばおこる。實際上重要であるという理由でここに考察される例はつぎの2つである。

(i) ウラン，トリウムまたはプルトニウムの不溶性酸化物の肺への沈着と、それに引きつづく肺リンパ節，骨格または排泄物への転移。

(ii) 非可搬性で骨親和性の放射性核種の傷への沈着と、それに引きつづく骨格および排泄物への転移。

#### B. 肺における非可搬性放射性核種の残留

(14) 以下に述べる例のうち最初の3つについて、放射性汚染の直接の源は肺であるから、肺における非可搬性放射性核種の長期の残留と消失に関する式を求める必要がある。肺残留についてまとめた文献(文献1, 12, 13)には、

表 1

肺の汚染物質	$T_0$	文 献
$U_3O_8$	150	13, 14, 15
$UO_2$	360	13, 17
$PuO_2$	550	13, 16, 18, 19
$ThO_2$	550	13

肺中の不溶性物質について1つの半減期が与えられているが、個々の論文には2つ以上の項から成る残留式を与えているものもある(文献14—17)。表1は、表中に示した文献からとったもので、5日から100日にわたる肺残留についてえられた単一の半減期の値である。

(15) 肺深部における長期残留を時間の単一指数関数で表現することは、いまの目的にとって知識の現状を反映するのにおそらく十分に精密である。そうすれば、肺からの消失速度はこの関数の微分(符号を変えた)となり、またほかの区画(リンパ節、骨または血液)への移行速度は、肺からのこの消失速度に1より小さい値の係数を乗じたもので表わすことができる。

### C. 汚染された肺から肺リンパ節への沈着

(16) (1)式は、つぎのように変えると、この移行の計算に用いることができる。

$N(t)$  = 時刻  $t$  におけるリンパ節中の放射性核種の存在量

$I(\zeta)$  = リンパ節に入る1日あたりの  $\mu\text{Ci}$  数

$= -f_{LL} L(t)$  ここで  $-L(t)$  は肺から出る  $\mu\text{Ci}/\text{日}$ 、また  $f_{LL}$  はそのうちでリンパ節へ行くものの割合

$r_s(t-\zeta) = 1$  (ウラン,  $^{232}\text{Th}$  および  $^{239}\text{Pu}$  に対して)。これらの放射性核種については放射性崩壊は無視でき、また、文献13に述べられているように“Y群の化合物〔アクチニドの酸化物〕のリンパからの除去の示すところによると、そこにある全量のうち10%は360日の生物学的半減期に従い、残りの90%はリンパ節中に永久に残留して放射性崩壊のみで減少するように思われる”との理由から  $R_s(t) \simeq 1$  である。

したがって\*

\* (訳注) (7)式の下に記された  $L(t)$  の定義を参照。

$$N(t) = -f_{LL} \int_0^t L(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

$$= -f_{LL} [L(t) - L(0)]$$

$$= f_{LL} [L(0) - L(t)]$$

$$= f_{LL} [1 - L(t)] \quad (5)^*$$

(17) 文献13の表4の示すところによると、Y群の化合物については、全沈着に対して  $f_{LL} = 0.15$ 、また長期沈着に対して  $f_{LL} = 0.15/0.6 = 0.25$  である。文献17および20のデータからも、 $f_{LL}$  についておなじような値が計算により求められる。Bair (文献21) は犬における酸化プルトニウムに対する代表値として  $f_{LL} = 0.4$  を報告している。これらすべての値を平均すると約0.3となる。文献20には変数  $\frac{\mu\text{Ci/g リンパ節}}{\mu\text{Ci/g 肺}}$  の値が時間に対してプロットされ、この比の分子は  $N(t)/15$ 、分母は  $L(t)/400$  である。ここに用いられた肺リンパ節および肺実質の重量は文献22から採用した。

(18) 文献20では、長期の肺残留に対し次式に示すように第2の項を含めることが必要であった、

$$L(t) = 0.9 e^{-\frac{0.693}{T_b} t} + 0.1 e^{-\frac{0.693}{10,000} t} \quad (6)$$

この第2項がないと、(リンパ濃度)/(肺濃度)は長時間ののちに無限大となり、計算された比の値は文献20の図1に示したデータと合わなくなる。

(19) リンパ節の生涯(50年)の被曝を計算するためには、 $L(t)$  に対する(6)式を(5)式に代入し、7ページの表1にある  $T_b$  の値を使用する。(5)式を積分すると、 $\text{U}_3\text{O}_8$ 、 $\text{UO}_2$  または  $\text{PuO}_2$  の  $1 \mu\text{Ci}$  が最初に肺に沈着した場合、肺リンパ節におよそ  $5000 \mu\text{Ci}$ -日 ( $T_b$  の値によりいくらか異なる)の被曝があることになる。(5)式とその積分から、 $T_b$  にくらべて長い期間については、肺に最初沈着した  $1 \mu\text{Ci}$  からうけるリンパ節の被曝は、日数に移行係数  $f_{LL} = 0.3$  を乗ずることによりもっと簡単に求められることがわかる。この単純化された計算によれば、上述の  $5000 \mu\text{Ci}$ -日に比較される値として  $5400 \mu\text{Ci}$ -日

\* (5)式は19項および30項に用いられている。

(10)

が得られる。

(20) これまで述べたことは、肺リンパ節のうける線量よりもむしろ胸部の放射性物質量を計算するのに実用的な重要性をもっている。この線量については、ICRPの主委員会が、吸入に由来する照射の決定器官はリンパ組織でなくむしろ肺組織であると決めているので、ここでは計算しなかった。

#### D. 汚染された肺から尿への排泄

(21) この問題は Healy (文献23), Beach および Dolphin (文献24), Nelson (文献25), Wood (文献18) ならびに Breuer (文献26) によって解析され、数式化されている。通常のアプローチでは  $Y_u(t)$  を付録Aの(A5)式に代入し、次式を得る。

$$E_u(t) = q_0 \int_0^t I(\zeta) Y_u(t - \zeta) d\zeta \quad (7)^*$$

ここで  $E_u(t)$  = 1日あたり尿中に排泄される放射性核種の  $\mu\text{Ci}$  数

$q_0 = \mu\text{Ci}$  で表わした肺中の長期残留の初期量

$I(\zeta)$  = 取り込み関数

$= -f_{LE} L(t)$ ,  $f_{LE}$  は肺から細胞外液への移行係数,

$L(t)$  は  $1 \mu\text{Ci}$  の摂取後の時刻  $t$  における肺中の  $\mu\text{Ci}$  数

$Y_u(t)$  = 問題とする放射性核種の1回取り込み後の尿中排泄を記述する関数

$E_u(t)$  を  $E(t)$  に、また  $Y_u(t)$  を  $Y(t)$  に代えると、この式は、総排泄の記述にも用いることができる。

(22) 1回吸入の場合については、 $L(t)$  は表1に与えられた該当する値にひとしい  $T_0$  をもつ1個の指数項によって記述することができる。しかし連続

\* (7)式は表2のほか23項および27項に用いられている。



被曝の場合には、 $L(t)$  と  $L'(t)$  は 1 回摂取のそれとは異なるであろう。これらはこの報告書の第 4 節の (11) および (13) 式に示されている。

(23) 文献からの値を(7)式に代入することにより  $f_{LE}$  を計算するいくつかの試みがなされた。文献 3 に記されたところによると、血流中に入ったウランのうち  $3/4$  もの量が第 1 日に尿中に排泄され、 $1/5$  がずっと長期間残留する。これらの事実から、 $Y(t)$  に対する排泄式の第 1 項を指数関数とすることができる。第 2 項は、選んだモデルにより、べき関数か指数関数のいずれかになりうる。文献には、作業による酸化ウランの不慮の吸入に関する研究の報告がある (文献 14, 15, 27, 28)。これら 4 つの文献には  $E_u(t)$  と  $L(t)$  の両方に対する式が与えられており、後者から  $L(t)$  を誘導することができる。 $E_u(t)$ ,  $L(t)$  および  $Y_u(t-\tau)$  に対するこれらの値を(7)式に代入して  $f_{LE}$  を計算したところ、結果はひどくまちまちではっきりしたパターンはなく、このアプローチは捨てられた。

(24) 汚染の直後で、ウランのかかなりの量が組織に沈着する以前においては、尿排泄のほとんどすべては肺から血液に移行するウランに由来するものであって、

$$E_u(t) = \lambda_L \cdot L(t) \times f_{LE} \times 0.75 \quad (8)$$

である。ここで  $\lambda_L$  は単位時間に肺を出ていく割合である。上の 4 つの文献のデータを(8)式に代入すると、 $f_{LE}$  についてつぎの値が得られた。

文献 14: 0.7, 0.6, 0.2

文献 15: 0.6

文献 27: 0.3, 0.4

文献 28: 0.8, 0.3

これらの値は肺汚染の直後だけに適用されると考えられるかもしれないが、その平均値 0.5 は Neuman (文献 29) の推定した 0.5 と一致している。

(25) ここで引用したような研究において、体外計数による胸部存在量の測

(12)

定は肺，リンパ節および胸壁中の放射性核種を含んでいることに留意すべきである。その結果，体外計数で得られた  $L(t)$  の値は“真の値”より高く，一方このような  $L(t)$  の測定から計算された  $\lambda_L$  の値は低すぎる。これら2つの誤差の正味の効果として， $\lambda_L \times L(t)$  は低すぎ，また(8)式から算出された  $f_{LE}$  の値はいくらか高すぎるであろう。

(26) Beach および Dolphin (文献24) はプルトニウムに対し  $Y_u(t) = 0.004e^{-0.67t} + 0.0016t^{-0.68}$  を与えた。酸化プルトニウムの  $f_{LE}$  は文献13の表1に示されているように  $0.05/0.6 = 0.08$  ととることができるかもしれない。その理由は，犬を酸化プルトニウムにさらして得られた Morrow, *et al.* (文献16) のデータによってこの値が支持されているからである。この値は文献32の0.15と比較されよう。

(27) (7)式と， $L(t)$ ， $f_{LE}$  および  $Y_u(t)$  に関する上述の情報は，ウラン酸化物およびプルトニウムの酸化物を吸入した後のいろいろな時刻における尿中排泄を計算するのに用いられてきた。表2に示した結果は，調査レベルと試料採取間隔を考える上でのおおよその指針にすぎない。くわしい数字は，毎日の排泄に実際上かなりの個人的および時間的変動がおこるので，すぐ役立つことは少ない。しかしながら，排泄率は最初の100日間にわたって比較的一定であること，およびそれは主として肺の  $f_{LE}$  および  $T_b$  に依存することは，注目してよい。

### E. 汚染された肺から骨格への沈着

(28) 前節においては，非可搬性のウランおよびプルトニウムの肺から細胞外液への移動に対する諸値がみちびかれた。骨の被曝を推定するためには，血液中から出ていく放射性核種のうち骨格へいく割合  $f_{ES}$  を知る必要がある。ICRP Publication 6 (文献2) によればウランに対し  $f_{ES} \approx 0.11$  であるが，

表2 1  $\mu\text{Ci}$  の非可搬性ウランおよびプルトニウムの肺中沈着に由来する尿中排泄率

日	$E_{uc}(t) = -\int_0^t f_{LE} \cdot L(x) Y_{us}(t-x) dx$		
	$\text{U}_3\text{O}_8$ $T_b=150; f_{LE}=0.5$	$\text{UO}_2$ $T_b=360; f_{LE}=0.5$	$\text{PuO}_2$ $T_b=550; f_{LE}=0.1$
	( $\mu\text{Ci}/\text{日}$ )	( $\mu\text{Ci}/\text{日}$ )	( $\mu\text{Ci}/\text{日}$ )
7	$2.1 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-6}$
14	$2.1 \times 10^{-3}$	$8.9 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-6}$
30	$2.0 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-6}$
90	$1.5 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-6}$
180	$1.0 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-6}$
360	$0.44 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-6}$

一方 Bernard (文献30) は 0.33 を与えており、それによって肺から骨への総合移行係数の最大値は 0.15 になる。プルトニウムについては、Snyder (文献31) は  $f_{ES}$  に対して 0.5 という値を与え、一方文献 32 は 0.25 を与えている。これらは、プルトニウムに対する  $f_{LE}$  の値 0.06 ~ 0.08 と組み合わせると、 $f_{LS}$  の値の範囲 0.02 ~ 0.04 を与える。以下の計算には、プルトニウムに対し  $f_{LS} = 0.03$  と仮定する。

(29) 静脈内に注射されたウランに対しては、 $r_s(t) = 0.2 t^{0.5}$  (文献30による。放射性崩壊は無視できる) であり、1  $\mu\text{Ci}$  のウランの肺中沈着はつぎの値を与える、

$$q(t) = -\int_0^t f_{LS} L(\zeta)(t-\zeta)^{-0.5} d\zeta$$

(骨格)

$$q(t) = -\int_0^t 0.15 L(\zeta)(t-\zeta)^{-0.5} d\zeta$$

(骨格)

(2)式から

$$Q(t) = -\int_0^t u^{-0.5} \left[ \int_0^{t-u} 0.15 L(v) dv \right] du$$

(骨格)

$$= 0.15 \int_0^t u^{-0.5} [1 - L(t-u)] du$$

$$= 0.15 \int_0^t u^{-0.5} du - 0.15 \int_0^t u^{-0.5} L(t-u) du$$

(14)

$$\begin{aligned} &= 0.15 \times \left[ \frac{u^{0.5}}{0.5} \right]_0^{18,000} - 0.15 \int_0^{18,000} u^{-0.5} L(t-u) du \\ &= 40 - 0.15 \int_0^{18,000} u^{-0.5} L(t-u) du \quad (9) \end{aligned}$$

この式の第2項は、計算機により、 $T_b = 150$ 日に対しては0.2、 $T_b = 360$ 日に対しては0.4と評価された。こうして  $Q(t) = 40 \mu\text{Ci-日}$  となり、これは骨に  $40 \times 51.2 \times \frac{245}{7000} = 72 \text{ rem}$  の線量\* を与えるから、肺中の  $0.02 \mu\text{Ci}$  の非可搬性  $^{239}\text{U}$  または  $^{234}\text{U}$  により、線量  $D^{**}(1.5 \text{ rem})$  が骨に与えられることになる。

(30)  $^{239}\text{Pu}$  に対しては  $r_b(t) = 1$  であり、(5)式からの類推で

$$q(t) = 0.03 [1 - L(t)]$$

(骨格)

また

$$Q(t) = 0.03 \left[ t - \int_0^t L(\zeta) d\zeta \right]$$

(骨格)

$$= 520 \mu\text{Ci-日}, [\text{PuO}_2 \text{ の肺における } L(t)]$$

$$= e^{-\frac{0.693}{550}t} \quad \text{として、50年間に(上述、B節より)}$$

これは骨に  $520 \times 51.2 \times \frac{270}{7000} = 1020 \text{ rem}$  の線量を与え、また骨への線量  $D(1.5 \text{ rem})$  は肺中の  $1.5 \text{ nCi}$  の  $^{239}\text{Pu}$  によって与えられることになる。

(31) 肺および骨のそれぞれに年間線量限度の1/20 (線量  $D$ ) (文献3より) を与えることになる肺沈着の制限値を、ウラン酸化物およびプルトニウム酸化物について比較することは意義がある。

(32) 表3を調べると、ウランおよびプルトニウムのこれらの非可搬性化合物の吸入は、骨よりも肺により大きい線量をもたらすことがわかる。このことは、 $^{239}\text{PuO}_2$  吸入後のビーグル犬の最も多い死因は肺不全と肺腫瘍であったという Bair とその同僚達の観察 (文献34) と合っている。もっと可搬性の化合物では肺にとどまる時間ももっと短くなる。そして、滞留時間が十分短か

\* (訳注) ICRP Publication 10, (1)式参照。

\*\*  $D$  は調査レベルをきめるために ICRP Publication 10 で選ばれた線量であって、年間線量限度の1/20である。

表 3

汚 染 物 質	下記の器官に線量 $D$ を与える肺中の量	
	肺	骨
	$D=0.75$	$D=1.5$
ウランの酸化物	0.6 nCi	20 nCi
$^{239}\text{PuO}_2$	0.4 nCi	1.5 nCi

れば、骨がより大きい線量をうけ、決定器官と考えられるかもしれない。肺のうける線量

$$\left[ = \frac{\int_0^t L(\zeta) d\zeta \times 51.2 \times 50}{400 \text{ または } 1000} \right]$$

と、上に計算された骨の線量をひとしいとおくことにより、骨により大きい線量をもたらすような肺残留の  $T_0$  を推定することができる(表4)。

表 4 骨に対する線量が肺線量をこえる、肺における半減期の上限值

放 射 性 核 種	肺の重量=400g	肺の重量=1000g
ウラン	2.5日	6日
プルトニウム	104 日	260日

これは、非可搬性のウランまたはプルトニウム化合物の肺沈着に対して、骨は決して決定器官とはならないことを意味する。可搬性のウランを吸入したのちには、腎臓がおそらく決定器官となることに留意すべきであり、またプルトニウムの吸入後には肝臓が決定器官となろう(文献32, 33)。

## F. 傷の汚染につづく骨格への沈着と排泄

(33) 傷におけるプルトニウムの残留関数  $W_s(t)$  が知られていれば、沈着場所を離れる物質はすべてまず血液にいくという前提のもとに、その場所から血液への移動速度  $W_s'(t)$  を計算することができる。前節に示した知識か

( 16 )

ら、骨に対する  $q(t)$  は  $0.5[1 - W(t)]$  となる。ここで  $W(t)$  はある傷に対する残留関数である。

(34) ネズミの筋肉注射箇所におけるプルトニウムの残留に関する Hamilton らの研究 (文献35) によれば、プルトニウムはその個所から  $W_s(t) = t^{-b}$  というべき関数にしたがって出ていく。ここで  $b$  は、 $\text{Pu}^{+3}$  に対しては0.07,  $\text{Pu}^{+4}$  に対しては0.21,  $\text{Pu}^{+6}$  に対しては0.34であった。

(35) 人の皮下、皮内および皮膚表面におこった汚染につづくプルトニウムの局所的残留および排泄を測定した結果は非常にまちまちであった (文献35—43)。この場合、 $W_s(t) = t^{-b}$  —— ただし  $b$  は0から0.4までの値をとる —— であると結論しあるいは計算できるかもしれない。このような変動は、プルトニウムの化学的および物理的性質と、その沈着箇所によるものである。変動が極端であるため、単一の式で表わすことは不可能である。

## 4. 限定された期間内の数回の取り込み

### A. 緒 論

(36) 実際には、1人の作業者が1管理期間すなわち1/4年のあいだに、おなじ核種にくりかえし被曝することはまれではない。これらの摂取が3ないし4実効半減期の期間をへだてておこれば、そのおのおのは1回取り込みとして取り扱うことができ、文献3の方法に従って評価され、個々の被曝を加え合わせて全体の効果が推定される。以下に、引き続いて起こった体内汚染が実質的に重なり合っている場合について述べる。

(37) 産業上の経験の示すところによると、酸化トリチウム、ヨウ素、ラジ

ウム，トリウム，ウランおよびプルトニウムを扱う仕事は，他の作業にくらべて反覆体内汚染をひきおこすことが多いようである。それは，ある場合には放射性化合物の物理的性質のためであり（酸化トリチウムとヨウ素は揮発性である），あるいはそれらを扱う作業の型（ラジウム文字盤塗装，トリア製造，ウランの採掘および粉碎）のためである。

(38)  $T$ 日という限定された期間内の連続取り込みに由来する放射性核種の残留と排泄に対する最も包括的な数式化の1つが，Müllerら（文献44）によってなされた。彼らの採用したモデルは， $T$ 日間に一様に分布した  $A \mu\text{Ci}$  の総取り込み，すなわち1日あたり  $A/T \mu\text{Ci}$  の平均した取り込みである。これは，不規則的にくり返されるいろいろな大きさの取り込みに対しても同様に良いモデルである。取り込みの大きさと時刻とが極端に不均等に分布していない限り，時刻  $T$  およびそれ以後における結果はほとんどおなじであろう。体内量，排泄および総被曝を計算するためには， $A$ ， $T$  および放射性汚染物質の残留関数を知る必要がある。

(39) 文献3に，最もありふれた30核種の残留関数が記されており，そのうち10核種をとり出して，付録Bに載せてある。

(40) いまの事例に(1)式を適用すると，

$$q(t) = \frac{A}{T} \int_0^t r_s(t-\zeta) d\zeta = \frac{A}{T} \int_0^t r_s(u) du \quad 0 \leq t < T \quad (10)^*$$

$$q(t) = \frac{A}{T} \int_0^T r_s(t-\zeta) d\zeta = \frac{A}{T} \int_{t-T}^t r_s(u) du \quad t > T \quad (11)^{**}$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \int_0^T r_s(u) du \quad t = T \quad (12)$$

(12)式から知られるように，総取り込み量  $A$  のおこった日数  $T$  が増加する

\* (10)式は表5および図5～10の曲線  $OP$  の数値の計算に使用されている。

\*\* (11)式は図5～10の曲線  $PQ$  の数値の計算に使用されている。

と、 $T$  日目における最終的な最大存在量は減少する。この点に関する例示の計算結果が表 5 に示されている。

表 5  $T$  日間にわたって分布した  $1 \mu\text{Ci}$  の総取り込み量 (または総沈着量) に由来する最終的な体内 (または器官内) 量

取り込みの 期間 $T$ (日)	放 射 性 核 種					
	$^3\text{H}$ 酸化物	$^{131}\text{I}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	ウラン
2	0.93	0.27	0.54	0.93	0.78	0.20
5	0.84	0.24	0.44	0.88	0.49	0.13
12	0.68	0.18	0.38	0.84	0.31	0.081
30	0.42	0.10	0.27	0.78	0.19	0.051
90	0.16	0.04	0.26	0.66	0.11	0.030
180	0.08	0.02	0.22	0.52	0.08	0.021
360	0.04	0.009	0.19	0.35	0.05	0.015
1000	0.01	0.003	0.15	0.14	0.03	0.009
18,000	0.0007	0.0002	0.05	0.008	0.007	0.002

(41) ある取り込みに由来する排泄を計算するためには、(11) 式に従い、その式の微分を求める必要がある。

$$q'(t) = \frac{A}{T} [r_s(t) - r_s(t-T)] \quad (13)$$

これを付録 A の (A 3) および (A 4) 式に代入して

$$E(t) = \frac{A}{T} \left[ r_s(t-T) - r_s(t) - \lambda \int_{t-T}^t r_s(u) du \right] \quad (14)^*$$

(42)  $q(t)$  および  $E(t)$  に関するこれらの式は、付録 B に掲げた残留関数とともに、10 日または 100 日間にわたって分布した  $1 \mu\text{Ci}$  の総摂取量に由来する残留と排泄の計算に用いられた。HTO,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  およびウランについての計算結果をグラフの形で図 5~10 に示す (25~30 ページ)。それぞれの場合、プロットされた値の計算式がグラフの傍に掲げられている。

(43) (14) 式で記述される排泄量は総排泄量である。尿による排泄を計算

\* (14) 式は、図 5~10 の曲線 YZ の数値および付録 D と表 6 の誘導調査レベルの計算に用いられている。



するには  $E(t)$  に  $F_u$  を乗ずる。 $F_u$  の値はたいていの場合文献3から得ることができよう。この情報は付録Cにまとめられている。

(44) この型の汚染に由来する  $v$  日間の  $\mu\text{Ci}$ -日 で表わされた総被曝量は、(2)式を適用して計算することができる。

$$\begin{aligned} Q(v) &= \frac{A}{T} \int_0^T \left[ \int_0^{v-\zeta} r_s(u) du \right] d\zeta \quad \text{ただし } T < v \\ &= \frac{A}{T} \left[ v \int_0^v r_s(u) du - (v-T) \int_0^{v-T} r_s(u) du \right. \\ &\quad \left. - \int_{v-T}^v u r_s(u) du \right] \quad (15) \end{aligned}$$

(45) 実際には幸なことにこの計算について2通りの簡単化が可能である。

(i)  $K \cdot e^{-at}$  という式で表わされる残留を示す放射性核種 (たとえば  $^3\text{H}$  および  $^{131}\text{I}$ ) では、摂取が  $T$  日間つづき、 $a \cdot T \geq 10$  であるとする、総取り込み量に由来する全線量預託を實際上  $T$  日のあいだにうける。一方、残留がべき関数で記述されるような放射性核種では、全線量預託に近い値の線量を  $T$  日間にうけることは決してない。

(ii) 放射線防護への適用でたいい問題となるのは、ある作業者が就労期間内にうける総線量であって、このような目的のためには(15)式は不必要に複雑である。もし  $t-T$  が十分大きくて、期間  $T$  内のすべての個々の取り込みに由来する線量預託の大部分を包含するならば、一連の取り込みによる50年積算線量は、残留量  $A \cdot r_s(t)$  を50年にわたって積分することにより簡単に推定することができよう。このような次第で、文献3に述べられている計算法を、任意に選ばれた線量預託を与えるような連続取り込みの総量の推定にも利用することができる。ICRP Publication 10の“調査レベル (Investigation Level, IL) とおなじように、年間線量限度の1/20の線量預託を反覆摂取に対する IL として選んでよいであろう。ただし、摂取は年間の試料採取周期のうちせいぜい2ないし3周期のあいだにおこり、それ以上はおこりそうにないものとする。年間の摂取回数が増加するにつれて、そ

(20)

の年の全取り込みの結果、年間線量限度  $D_A$  の 0.3 倍を確実にこえることがないように IL を選ぶ必要が生じる。 $T$  日の試料採取周期に毎回 1 IL の取り込みがあるという悲観的仮定のもとでは、年間にうける総線量は  $\frac{365}{T} \times \frac{1}{20} \times D_A$  となり、ICRP Publication 10 の IL (または DIL) は  $T/365$  を乗じて減らすべきである。一方、年間にわたる取り込み量がモニターされているので、線量  $D$  ( $=\frac{1}{20} D_A$ ) を  $\frac{3}{10} D_A$  に増すことができ、したがって IL (または DIL) を  $\frac{3/10}{1/20}$  すなわち 6 倍に増すことができる。こうして、Publication 10 の IL (または DIL) に対する全体としての調整は  $6 \times T/365$  となるであろう。

(46) 付録Dに、7種類の核種および6種類のことなった試料採取周期について、このような計算の結果を載せてある。そこには、それぞれの場合につき、つぎの値が示されている。

(i) 線量  $D$  を与える量である  $A \mu\text{Ci}$  の取り込みののち  $T$  日目における体内量

(ii) この取り込みに由来する、 $T+1$  日目における尿中排泄量である DIL

(iii) 年間の試料採取周期に毎回  $A \mu\text{Ci}$  の取り込みがあったとする悲観的仮定で修正された DIL の値

これらの計算の結果を表6に示す。

(47) Mays (文献44に引用されている) はつぎに述べる有用な簡単化を示唆した。すなわち、 $T/2$  日目に大きさ  $A$  の1回取り込みがあったと仮定すると、これは、 $T$  から  $t$  までの期間の  $q(t)$  および  $q'(t)$ 、ならびに全線量預託に対する  $Q(t)$  のかなり良い近似を与えるというものである。この示唆は論文になっていないし、追試もされていないようである。残留が指数関数的であって、べき関数でないときには、上の2つのモデルについて計算された  $q(t)$  と  $q'(t)$  のそれぞれの値の間にはかなり良い一致のあることが代数学的に示される。計算値を図5~10(曲線CD)にプロットし、この結論を図示する。

表 6 一定の取り込みの期間に引きつづく排泄に対する誘導調査レベル

放射性核種	試料採取 周 期 (日)	最終的な 体内量	誘 導 調 査 レ ベ ル			
			$E_u(T+1)$		$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot E_u(T+1)$	
HTO	7	1190 $\mu\text{Ci}$	46 $\mu\text{Ci/d}$		5.3 $\mu\text{Ci/d}$	
	14	960	37		8.6	
	30	630	25		12.1	
	90	240	9.3		13.8	
	180	120	4.7		13.8	
	360	60	2.3		13.8	
$^{90}\text{Sr}$	7	25 nCi	2.3 nCi/d		0.26 nCi/d	
	14	20	1.3		0.30	
	30	15	0.66		0.33	
	90	10.9	0.24		0.35	
	180	9.2	0.12		0.37	
	360	7.9	0.06		0.38	
$^{131}\text{I}$	7	200 nCi	11.6 nCi/d		1.34 nCi/d	
	14	150	6.2		1.42	
	30	90	3.0		1.48	
	90	32	1.0		1.50	
	180	16	0.5		1.50	
	360	8	0.25		1.50	
$^{137}\text{Cs}$	7	3.5 $\mu\text{Ci}$	0.064 $\mu\text{Ci/d}$		0.0073 $\mu\text{Ci/d}$	
	14	3.4	0.042		0.0096	
	30	3.2	0.029		0.0144	
	90	2.7	0.019		0.0288	
	180	2.1	0.014		0.0426	
	360	1.4	0.009		0.0554	
$^{233}\text{U}$	7	2300 pCi	550 pCi/d		64 pCi/d	
$^{234}\text{U}$	14	1600	300		69	
	30	1100	150		73	
	90	630	50		76	
	180	450	25		78	
	360	320	14		78	
$^{239}\text{Pu}$	7		0.046 pCi/d		0.0054 pCi/d	
	14		0.030		0.0069	
	30		0.018		0.0090	
	90		0.009		0.0133	
	180		0.0057		0.0169	
	360		0.0036		0.0214	
$^{226}\text{Ra}$			$E_T(T+1)$	$\frac{T \cdot 6}{365} E_T(T+1)$	$E_u(T+1)$	$\frac{T \cdot 6}{365} E_u(T+1)$
			nCi/d	nCi/d	pCi/d	pCi/d
	7	5.9 nCi	0.56	0.06	28.0	3.2
	14	4.7	0.35	0.08	17.6	4.1
	30	3.5	0.19	0.09	9.4	4.7
	90	2.3	0.07	0.10	3.5	5.2
	180	1.7	0.04	0.11	1.9	5.5
360	1.3	0.02	0.12	0.97	5.8	

この簡単化されたモデルのおそらく最も大きな 実用的価値は、時間  $T$  内における被曝のパターンがまったくわからない場合に、このモデルによって総取り込み量  $A$  の推定がはるかに容易になることである。このモデルは、前回の試料採取のすぐあとに取り込みがおこったとする、過度にひかえ目な仮定にくらべて、もっと現実に合ったものであろう。

(48) 6種類の核種に関する残留および排泄の計算値を、つぎの型の取り込みについてプロットし、図5~10に示す。

- (i) 0日目に  $1\mu\text{Ci}$  の取り込み (曲線  $AB$ )
- (ii)  $T/2$ 日目に  $1\mu\text{Ci}$  の取り込み (曲線  $CD$ )
- (iii)  $T-1$ 日目に  $1\mu\text{Ci}$  の取り込み (曲線  $EF$ )
- (iv)  $T$ 日間にわたり一様に  $1\mu\text{Ci}$  の取り込み、すなわち  $1/T\mu\text{Ci}/\text{日}$  (曲線  $OPQ$ )

これらの図をみると、指数関数的な残留式および排泄式をもつ放射性核種 ( $^3\text{H}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) に関しては、取り込みの4つの型について残留および排泄のそれぞれのあいだに實際上差異がなく、 $T$ から先の曲線は一致しないまでもつねに平行であることがわかる。他方、べき関数的な残留式および排泄式をもつ放射性核種 ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , ウラン) では、 $T$ 日目の1回摂取に引きつづく残留と排泄を表わす曲線は、 $T$ 日間の多数回摂取に対する曲線と、 $T$ 日目以後の早い時期にはまったく異なっているが、おそい時期には似てくる。この問題は文献45に  $^{226}\text{Ra}$  の場合について検討され解析されている。

## B. 骨親和性核種と他の核種との代謝の相違

(49) 放射性核種を、長寿命の骨親和性核種と他の核種の2群に区分する必要がある。後者の群が細胞外液中に入ったあとの残留と排泄とは、1ないし3個の指数項を含む単純な式によって表わすことができる (文献3) し、またこ

これらの代謝は、おそらく2つの区画をもち、その内部では急速で完全な混合が行なわれるような区画モデルによって視覚化することができる（文献46を参照）。長寿命の骨親和性核種の代謝はもう少し複雑なモデル（文献47, 48）によって視覚化されなければならない、その残留と排泄は、ある時間の範囲内で、時間のべき関数により近似的に表わすことができる（たとえば、文献8および10を参照）。

(50) 図5, 6および7を調べるとつぎの結論に達する。すなわち、ある放射性核種の体内量または器官内量の指数的残留関数による時間的減少は、その量が蓄積されていった期間に實際上無関係である。

(51) 長寿命の骨親和性核種については事情はまったく異なる（図8, 9および10）。添加の期間  $T$  が長くなるにつれて、その後の減少はゆるやかになる。こう述べてみると、この結論は論理的に明白なように見える。すなわち、 $T$  が増加すればするほど、放射性核種の体内量のうちのより大きい部分が“ますますより深い区画”に存在するようになるからである（文献49）。このように、この群の放射性核種については、体内汚染もしくは尿中排泄のあるレベルがもつ意味は、その放射性核種が1回の事象で取り込まれたか、それとも一連の事象で取り込まれたかに依存している。

### C. 図5～10に対する一般的説明

#### (i) 残留に関する数式

曲線 AB: 0日目における  $1\mu\text{Ci}$  の1回取り込み

$$R_{s1}(t) = r_s(t)$$

曲線 CD:  $T/2$  日目における  $1\mu\text{Ci}$  の1回取り込み

$$R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$$

曲線 EF:  $(T-1)$  日目における  $1\mu\text{Ci}$  の1回取り込み

( 24 )

$$R_{s3}(t) = R_{s1} [ t - (T - 1) ]$$

曲線 OPQ: T 日間にわたり一様に分布した  $1 \mu\text{Ci}$  の総取り込み, すなわち,  
平均  $1/T \mu\text{Ci}/\text{日}$

$$OP: R_c(t) = \frac{1}{T} \int_0^t r_s(u) du \quad t \leq T$$

$$PQ: \quad = \frac{1}{T} \int_0^T r_s(t-x) dx = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t r_s(u) du \quad t > T$$

(ii) 総排泄に関する数式

曲線 RS: 0 日目における  $1 \mu\text{Ci}$  の 1 回取り込み

$$Y_{s1}(t) = -\frac{d}{dt} r_s(t) - \lambda_r r_s(t)$$

曲線 TU:  $T/2$  日目における  $1 \mu\text{Ci}$  の 1 回取り込み

$$Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$$

曲線 VW:  $(T-1)$  日目における  $1 \mu\text{Ci}$  の 1 回取り込み

$$Y_{s3}(t) = Y_{s1} [ t - (T - 1) ]$$

曲線 XYZ: T 日間にわたり一様に分布した  $1 \mu\text{Ci}$  の総取り込み, すなわち,  
平均  $1/T \mu\text{Ci}/\text{日}$

$$Y(t) = I(t) - q'(t) - \lambda_r q(t)$$

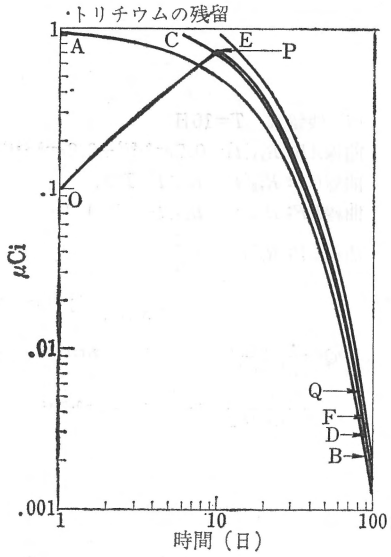
(付録Aの(A4)式を参照)

$$XY: Y_c(t) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T} r_s(t) - \frac{\lambda_r}{T} \int_0^t r_s(u) du$$

$$= \frac{1}{T} \left[ 1 - r_s(t) - \lambda_r \int_0^t r_s(u) du \right] \quad t \leq T$$

$$YZ: \quad = \frac{1}{T} \left[ r_s(t-T) - r_s(t) - \lambda_r \int_{t-T}^t r_s(u) du \right] \quad t > T$$

[注意:  $^{131}\text{I}$  を除いて,  $\lambda_r \approx 0$ ]



(i) 残留式  $T=10$ 日

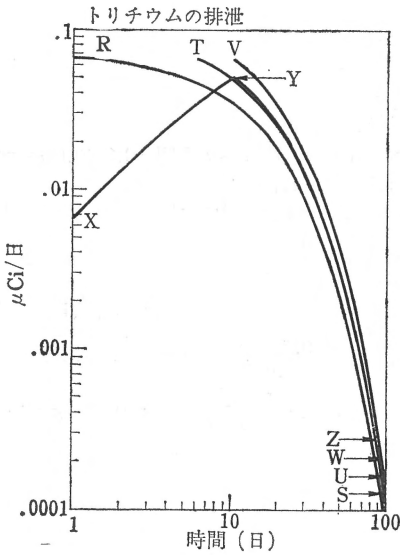
曲線AB:  $R_{s1}(t) = e^{-0.07t}$

曲線CD:  $R_{s2}(t) = e^{-0.07(t-T/2)}$

曲線EF:  $R_{s3}(t) = e^{-0.07(t-(T-1))}$

曲線OP:  $R_c(t) = \frac{1}{0.07T}(1 - e^{-0.07t})$

PQ:  $= \frac{1}{0.07T}(e^{-0.07(t-T)} - e^{-0.07t})$



(ii) 排泄式  $T=10$ 日

曲線RS:  $Y_{s1}(t) = 0.07e^{-0.07t}$

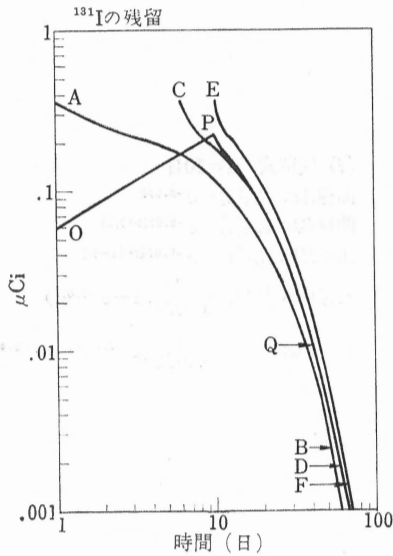
曲線TU:  $Y_{s2}(t) = 0.07e^{-0.07(t-T/2)}$

曲線VW:  $Y_{s3}(t) = 0.07e^{-0.07(t-(T-1))}$

曲線XY:  $Y_c(t) = \frac{1}{T}(1 - e^{-0.07t})$

YZ:  $= \frac{1}{T}(e^{-0.07(t-T)} - e^{-0.07t})$

図5 1  $\mu\text{Ci}$  の総取り込みに対する HTO の残留と排泄の曲線

(i) 残留式  $T=10$ 日

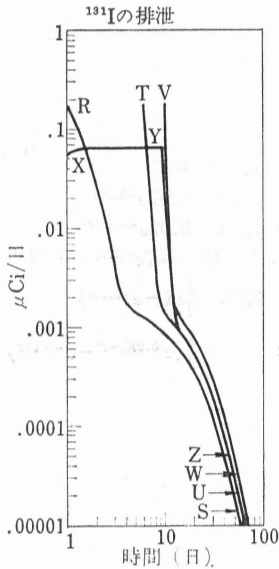
$$\text{曲線AB: } R_{s1}(t) = 0.7e^{-2.07t} + 0.3e^{-0.094t}$$

$$\text{曲線CD: } R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$$

$$\text{曲線EF: } R_{s3}(t) = R_{s1}(t - (T-1))$$

$$\begin{aligned} \text{曲線OP: } R_c(t) = & \frac{0.7}{2.07T}(1 - e^{-2.07t}) \\ & + \frac{0.3}{0.094T}(1 - e^{-0.094t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PQ: = & \frac{0.7}{2.07T}(e^{-2.07(t-T)} - e^{-2.07t}) \\ & + \frac{0.3}{0.094T}(e^{-0.094(t-T)} - e^{-0.094t}) \end{aligned}$$

(ii) 排泄式  $T=10$ 日

$$\text{曲線RS: } Y_{s1}(t) = 0.7 \times 1.98e^{-2.07t} + 0.3 \times 0.0069e^{-0.094t}$$

$$\text{曲線TU: } Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$$

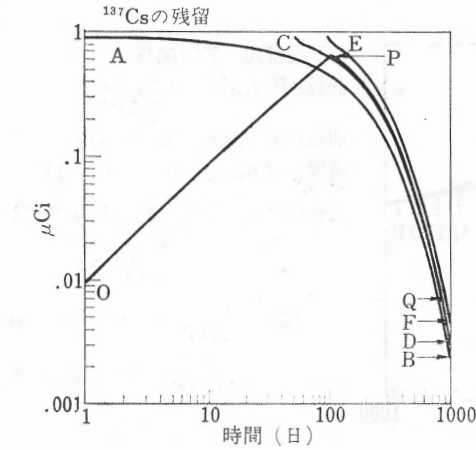
$$\text{曲線VW: } Y_{s3}(t) = Y_{s1}(t - (T-1))$$

$$\begin{aligned} \text{曲線XY: } Y_c(t) = & \frac{0.7 \times 1.98}{2.07T}(1 - e^{-2.07t}) \\ & + \frac{0.3 \times 0.0069}{0.094T}(1 - e^{-0.094t}) \end{aligned}$$

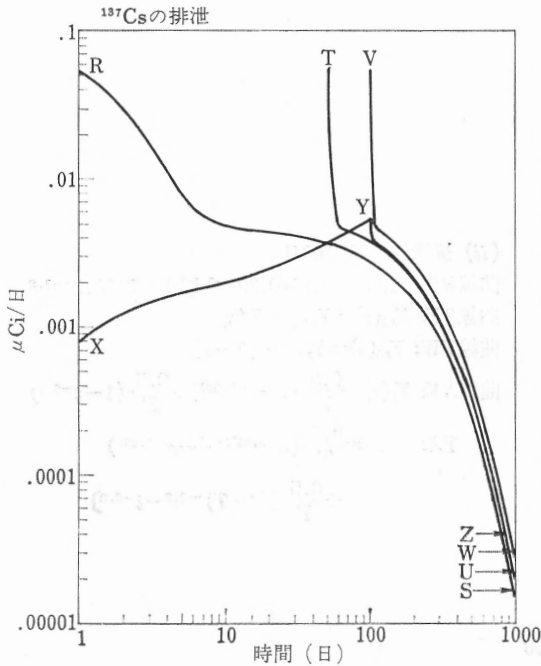
$$\begin{aligned} YZ: = & \frac{0.7 \times 1.98}{2.07T}(e^{-2.07(t-T)} - e^{-2.07t}) \\ & + \frac{0.3 \times 0.0069}{0.094T}(e^{-0.094(t-T)} - e^{-0.094t}) \end{aligned}$$

図6 1 μCi の総取り込みに対する <sup>131</sup>I の残留と排泄の曲線



(i) 残留式  $T=100$  H曲線AB:  $R_{s1}(t) = 0.15e^{-0.7t} + 0.85e^{-0.006t}$ 曲線CD:  $R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$ 曲線EF:  $R_{s3}(t) = R_{s1}(t - (T-1))$ 

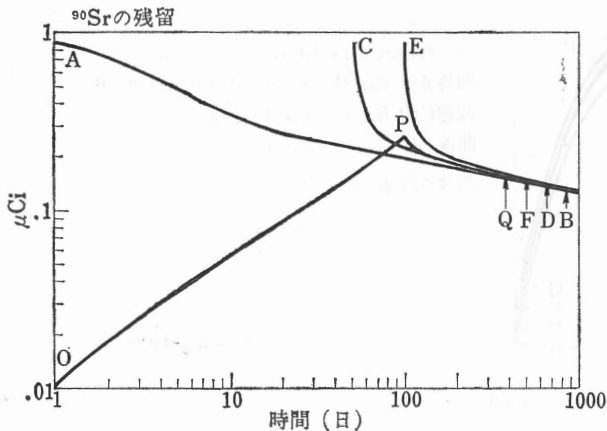
$$\text{曲線OP: } R_c(t) = \frac{0.15}{0.7T}(1 - e^{-0.7t}) + \frac{0.85}{0.006T}(1 - e^{-0.006t})$$

$$\text{PQ: } = \frac{0.15}{0.7T}(e^{0.7(t-T)} - e^{-0.7t}) + \frac{0.85}{0.006T}(e^{-0.006(t-T)} - e^{-0.006t})$$
(ii) 排泄式  $T=100$  H
$$\text{曲線RS: } Y_{s1}(t) = 0.15 \times 0.7e^{-0.7t} + 0.85 \times 0.006e^{-0.006t}$$
曲線TU:  $Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$ 曲線VW:  $Y_{s3}(t) = Y_{s1}(t - (T-1))$ 

$$\text{曲線XY: } Y_c(t) = \frac{0.15}{T}(1 - e^{-0.7t}) + \frac{0.85}{T}(1 - e^{-0.006t})$$

$$\text{YZ: } = \frac{0.15}{T}(e^{-0.7(t-T)} - e^{-0.7t}) + \frac{0.85}{T}(e^{-0.006(t-T)} - e^{-0.006t})$$

図7 1  $\mu\text{Ci}$  の総取り込みに対する  $^{137}\text{Cs}$  の残留と排泄の曲線



(i) 残留式  $T=100$ 日

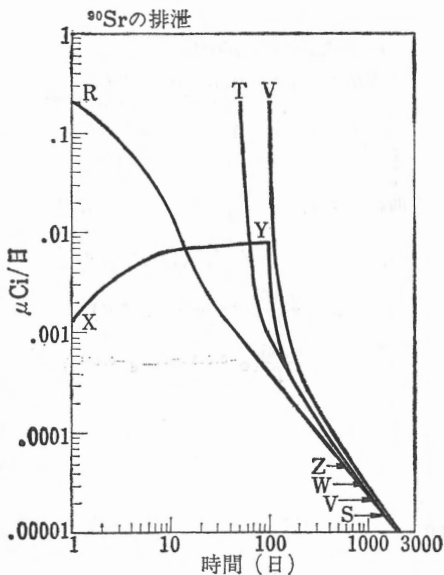
曲線AB:  $R_{s1}(t) = 0.5e^{-0.29t} + 0.5t^{-0.2}$

曲線CD:  $R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$

曲線EF:  $R_{s3}(t) = R_{s1}(t - (T-1))$

曲線OP:  $R_c(t) = \frac{0.5}{0.29T}(1 - e^{-0.29t}) + \frac{0.5}{0.8T}t^{0.8}$

$$PQ: = \frac{0.5}{0.29T}(e^{-0.29(t-T)} - e^{-0.29t}) + \frac{0.5}{0.8T}(t^{0.8} - (t-T)^{0.8})$$



(ii) 排泄式  $T=100$ 日

曲線RS:  $Y_{s1}(t) = 0.5 \times 0.29e^{-0.29t} + 0.5 \times 0.2t^{-1.2}$

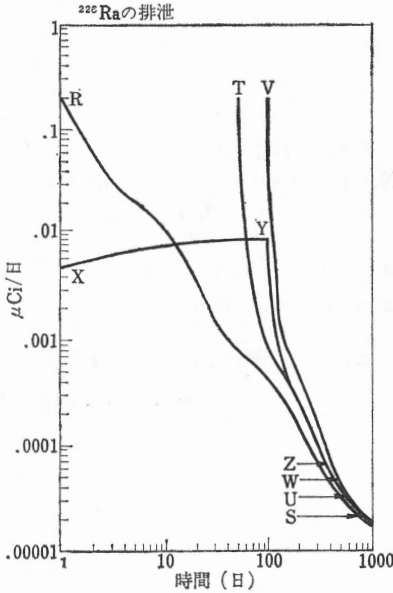
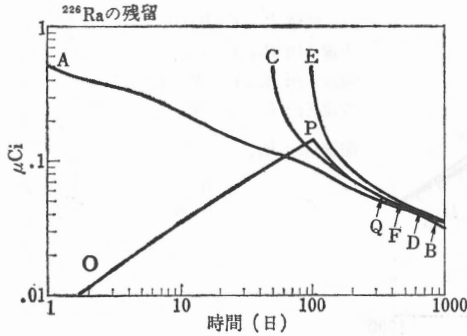
曲線TU:  $Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$

曲線VW:  $Y_{s3}(t) = Y_{s1}(t - (T-1))$

曲線XY:  $Y_c(t) = \frac{0.5}{T}(1 - e^{-0.29t}) + \frac{0.5}{T}(1 - t^{-0.2})$

$$YZ: = \frac{0.5}{T}(e^{-0.29(t-T)} - e^{-0.29t}) + \frac{0.5}{T}[(t-T)^{-0.2} - t^{-0.2}]$$

図8 1 μCi の総取り込みに対する <sup>90</sup>Sr の残留と排泄の曲線

(i) 残留式  $T=100$ 日

$$\begin{aligned} \text{曲線AB: } R_{s1}(t) = & 0.54e^{-1.74t} + 0.29e^{-0.14t} \\ & + 0.11e^{-0.012t} \\ & + 0.04e^{-0.001t} \\ & + 0.02e^{-0.00014t} \end{aligned}$$

$$\text{曲線CD: } R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$$

$$\text{曲線EF: } R_{s3}(t) = R_{s1}(t - (T-1))$$

$$\begin{aligned} \text{曲線OP: } R_c(t) = & \frac{0.54}{1.74T}(1 - e^{-1.74t}) \\ & + \frac{0.29}{0.14T}(1 - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{0.012T}(1 - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{0.001T}(1 - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{0.00014T}(1 - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PQ: } = & \frac{0.54}{1.74T}(e^{-1.74(t-T)} - e^{-1.74t}) \\ & + \frac{0.29}{0.14T}(e^{-0.14(t-T)} - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{0.012T}(e^{-0.012(t-T)} - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{0.001T}(e^{-0.001(t-T)} - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{0.00014T}(e^{-0.00014(t-T)} - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

(ii) 排泄式  $T=100$ 日

$$\begin{aligned} \text{曲線RS: } Y_{s1}(t) = & 0.54 \times 1.74e^{-1.74t} + 0.29 \times 0.14e^{-0.14t} \\ & + 0.11 \times 0.012e^{-0.012t} \\ & + 0.04 \times 0.001e^{-0.001t} \\ & + 0.02 \times 0.00014e^{-0.00014t} \end{aligned}$$

$$\text{曲線TU: } Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$$

$$\text{曲線VW: } Y_{s3}(t) = Y_{s1}(t - (T-1))$$

$$\text{曲線XY: } Y_c(t) = \frac{0.54}{T}(1 - e^{-1.74t}) + \frac{0.29}{T}(1 - e^{-0.14t})$$

$$+ \frac{0.11}{T}(1 - e^{-0.012t})$$

$$+ \frac{0.04}{T}(1 - e^{-0.001t})$$

$$+ \frac{0.02}{T}(1 - e^{-0.00014t})$$

$$\text{YZ: } = \frac{0.54}{T}(e^{-1.74(t-T)} - e^{-1.74t})$$

$$+ \frac{0.29}{T}(e^{-0.14(t-T)} - e^{-0.14t})$$

$$+ \frac{0.11}{T}(e^{-0.012(t-T)} - e^{-0.012t})$$

$$+ \frac{0.04}{T}(e^{-0.001(t-T)} - e^{-0.001t})$$

$$+ \frac{0.02}{T}(e^{-0.00014(t-T)} - e^{-0.00014t})$$

図9 1 μCi の総取り込みに対する <sup>226</sup>Ra の残留と排泄の曲線

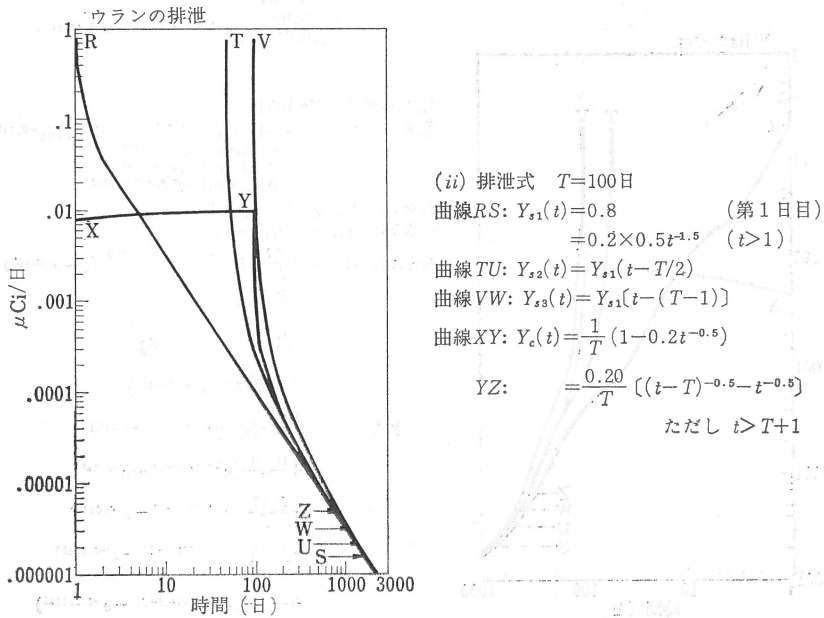
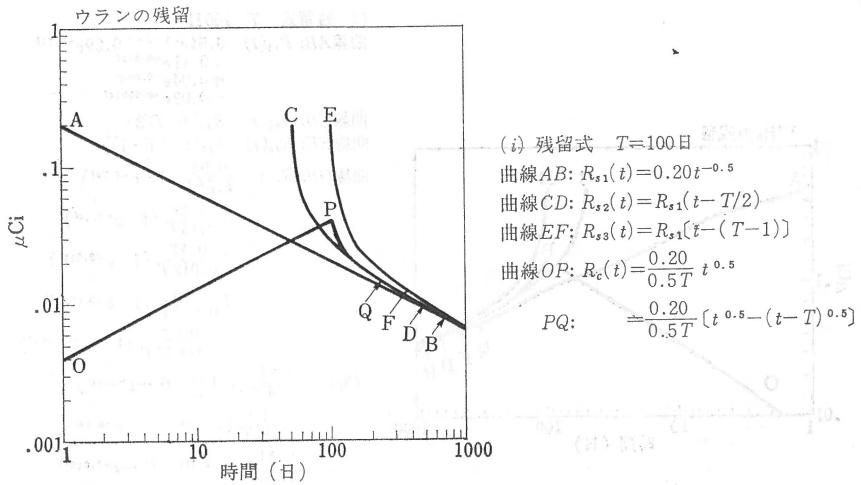


図10 1  $\mu\text{Ci}$  の総取り込みに対するウランの残留と排泄の曲線

## 5. 引 用 文 献

1. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation.* ICRP Publication 2, Pergamon Press, London (1959).
2. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, as amended 1959 and revised 1962.* ICRP Publication 6, Pergamon Press, London (1964).
3. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Report of Committee 4 on Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure.* ICRP Publication 10, Pergamon Press, London (1968).
4. D. N. Tapper and N. L. Tapper, Appendix to Cs-137 dose measurements in tissue. II. An accumulation model for repeated equally spaced feedings of radionuclides of the Cs-137 type, *Health Physics*, **8**, 231 (1962).
5. J. G. Defares and I. N. Sneddon, *An Introduction to the Mathematics of Medicine and Biology*, Yearbook Medical Publishers, Chicago, p. 255 (1964).
6. W. P. Norris, S. A. Tyler and A. M. Brues, Retention of radioactive bone-seekers, *Science*, **128**, 456 (1958).
7. S. D. Simpson, C. G. Stewart, G. R. Yourt and H. Bloy, Canadian experience in the measurement and control of radiation hazards in uranium mines and mills, *Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, vol. 23, p. 195 (1958).
8. S. M. Sanders, Jr., Power functions relating excretion to body burden, *Health Physics*, **2**, 295 (1960).
9. S. R. Bernard, B. R. Fish, G. W. Royster, Jr., L. B. Farabee, P. E. Brown and G. R. Patterson, Jr., Human thyroid uptake and bodily elimination of I-131 for the case of single and continual ingestion of bound iodine in resin-treated milk, *Health Physics*, **9**, 1307 (1963).
10. J. H. Marshall, Alkaline earth metabolism, *J. Theor. Biol.* **6**, 386 (1964).
11. J. Rundo and A. L. Lillegraven, Uptake and retention of radioactive strontium in normal subjects, *Br. J. Radiol.* **39**, 676 (1966).
12. *Effects of Inhaled Radioactive Particles.* Publication 848, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington (1961).
13. Task Group on Lung Dynamics, Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract, *Health Physics*, **12**, 173 (1966).
14. N. B. Schultz, *Inhalation Cases of Enriched Insoluble Uranium Oxides*, USAEC Report K-C-822 (30 August 1966).
15. L. M. Scott and C. M. West, An evaluation of  $U_3O_8$  exposure with an estimate of systemic body burden, *Health Physics*, **13**, 21 (1967).
16. P. E. Morrow, F. R. Gibb, H. Davies, J. Mitola, D. Wood, N. Wraight and H. S. Campbell, The retention and fate of inhaled plutonium dioxide in dogs, *Health Physics*, **13**, 113 (1967).
17. T. T. Mercer, On the role of particle size in the dissolution of lung burdens, *Health Physics*, **13**, 1211 (1967).
18. W. R. Wood and W. E. Sheehan, Evaluation of the PUQFUA method of calculating body burdens, in USAEC Report CONF-661018, p. 134 (1966).
19. W. J. Bair and J. F. Park, Comparative disposition of four types of plutonium dioxides inhaled by dogs, in USAEC Report BNWL-480, p. 63 (1967).
20. R. G. Thomas, Transport of relatively insoluble materials from lung to lymph nodes, *Health Physics*, **14**, 111 (1968).
21. W. J. Bair, Private communication (March 1969).
22. Statement of Committee 2 to the Commission on the Evaluation of Doses to Tissue of the Respiratory System from Inhaled Radionuclides. ICRP Working Paper ICRP/67/L:C2-13 (6 April 1967).
23. J. W. Healy, Estimation of plutonium lung burden by urine analysis, *Am. Ind. Hyg. Assoc. Quart.* **18**, 261 (1957).
24. S. A. Beach and G. W. Dolphin, Determination of plutonium body burdens from measurements of daily urine excretions, in *The Assessment of Radioactivity in Man*, vol. 2, IAEA, Vienna, p. 603 (1964), STI/PUB/84.
25. I. C. Nelson, *Theoretical Excretion of Plutonium in Urine Based on the New ICRP Model*, USAEC Report BNWL-SA-1247 (June 1967).
26. F. Breuer, *Mathematical Expression to Facilitate the Calculation of Systemic Retention and Urinary*

- Excretion Rate in Cases of Internal Contamination due to Inhalation of "Slowly Soluble" Compounds of Radioactive Elements*, CNEN Report RT/PROT (67) 15, Rome (1967).
27. B. R. Fish, Inhalation of uranium aerosols by mouse, rat, dog and man, in *Inhaled Particles and Vapours*, C. N. Davies (editor), Pergamon Press (1961).
  28. W. N. Saxby, N. A. Taylor, J. Garland, J. Rundo and D. Newton, A case of inhalation of enriched uranium dust, in *The Assessment of Radioactivity in Man*, vol. 2, IAEA, Vienna, p. 535 (1964), STI/PUB/84.
  29. W. F. Neuman, Urinary uranium as a measure of exposure hazard, *Ind. Med. Surg.* **19**, 185 (1950).
  30. S. R. Bernard, Maximum permissible amounts of natural uranium in the body, air and drinking water based on human experimental data, *Health Physics*, **1**, 288 (1958).
  31. W. S. Snyder, The distribution of  $^{239}\text{Pu}$  in the body following exposure by inhalation, *Health Physics*, **10**, 1035 (1964).
  32. P. J. Dionne and B. O. Stuart, *Plutonium Inhalation Model Simulates the Long-term Burdens of the Deep Lung and Systemic Organs*, USAEC Report BNWL-SA-1540, CONF-680502-1 (1 March 1968).
  33. C. W. Mays, G. N. Taylor, W. S. S. Jee and T. F. Dougherty, Speculations on the risk to adult man from a "permissible" body burden of  $^{239}\text{Pu}$  (0.04  $\mu\text{Ci}$ ) equally divided between bone and liver, in USAEC Report COO-119-240, p. 262 (1969).
  34. J. F. Park, W. J. Clarke and W. J. Bair, Chronic effects of inhaled  $^{239}\text{PuO}_2$  in beagles, in USAEC Report BNWL-714, p. 3.3 (May 1968).
  35. K. G. Scott, D. J. Axelrod, H. Fisher, J. F. Crowley and J. G. Hamilton, The metabolism of plutonium in rats following intramuscular injection, *J. Biol. Chem.* **176**, 283 (1948).
  36. E. L. Geiger and S. M. Sanders, Jr., Acute uptake of plutonium and uranium following wound contamination, *Proc. Health Phys. Soc.*, p. 61 (1957).
  37. W. H. Langham, J. N. P. Lawrence, J. McClelland and L. H. Hempelmann, The Los Alamos Scientific Laboratory's experience with plutonium in man, *Health Physics*, **8**, 753 (1962).
  38. B. A. J. Lister, A. Morgan and R. J. Sherwood, *Excretion of Plutonium Following Accidental Skin Contamination*, UKAEA Report AERE-R-4064 (1962).
  39. B. A. J. Lister, A. Morgan and R. J. Sherwood, Excretion of plutonium following accidental skin contamination, *Health Physics*, **9**, 803 (1963).
  40. S. E. Hammond, Plutonium excretion following acute accidental exposure, in USAEC Report WASH-1023, p. 84 (1964).
  41. S. E. Hammond and E. A. Putzier, Observed effects of plutonium in wounds over a long period of time, *Health Physics*, **10**, 399 (1964).
  42. W. H. Langham, Physiological properties of plutonium and assessment of body burden in man, in *The Assessment of Radioactivity in Man*, vol. 2, IAEA, Vienna, p. 565 (1964), STI/PUB/84.
  43. W. V. Baumgartner, H. V. Larson, G. H. Crook and C. E. Newton, Jr., *The Treatment and Evaluation of Internal Deposition from a Plutonium Wound*, USAEC Report BNWL-SA-39 (1965).
  44. J. Müller, V. Klener, R. Tuscany, J. Thomas, D. Březíková and M. Houšková, Study of internal contamination with strontium-90 and radium-226 in man in relation to clinical findings, *Health Physics*, **12**, 993 (1966).
  45. V. M. Malykhin and V. P. Shamov, Calculation of integral burden in bone tissue due to incorporated radium-226, in *The Assessment of Radioactivity in Man*, vol. 2, IAEA, Vienna, p. 153 (1964), STI/PUB/84. NRC Technical Translation 1280.
  46. D. B. Zilversmit and M. L. Shore, A hydrodynamic model of isotope distribution in living organisms, *Nucleonics*, **10**, 32 (1952).
  47. S. R. Bernard, V. R. Rao Uppuluri and L. R. Shenton, *Stochastic Models for the Distribution of Radioactive Material in a Connected System of Compartments*, USAEC Report ORNL-3809 (June 1965).
  48. J. H. Marshall, Calcium pools and the power function, in *Compartments, Pools and Spaces in Medical Physiology*, USAEC Symposium Series No. 11, p. 451 (August 1967).
  49. J. S. Robertson and S. H. Cohn, Evaluation of plutonium exposures in man, *Health Physics*, **10**, 373 (1964).
  50. C. E. Miller and A. J. Finkel, Radium retention in man after multiple injections. The power function re-evaluated, *Am. J. Roentgenol. Rad. Ther. & Nucl. Med.* **103**, 871 (1968).
  51. J. H. Marshall, J. Rundo and G. E. Harrison, Retention of radium in man, *Radiation Res.* **39**, 445 (1969).

## 6. 付 録

### 付録A. 基本式の誘導

放射性核種の反覆取り込みによる体内量と線量を数式化する場合の時間的尺度を図11に示す。

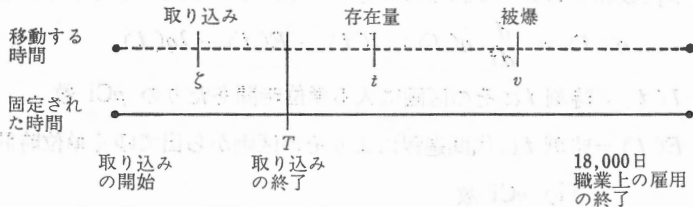


図11 放射性核種の反覆取り込みに由来する残留と被曝の時間的尺度

この時間的尺度をつぎの2つの部分にわけて考えると都合がよい。すなわち、1つは、ICRPにより任意に50年と選ばれている、職業上の雇用の終了で終わる固定された尺度であり、もう1つは数式中に用いられる3つの変数によって指定される3個の移動点をもつ尺度である。定義により、 $\zeta$ は0とTの間で変化し、 $\zeta \leq t$ である。時刻 $t$ における残留量は0から50年にいたる任意の時刻について評価される。また、 $v \geq t$ である。放射線防護の業務においては、取り込みの開始につづく50年間の線量預託の推定をしばしば必要とするが、このためには $v$ を0から18000日の間で積分する。

時刻 $\zeta$ における取り込みの素量は  $I(\zeta) d\zeta$  であり、それが  $t - \zeta$  日間残留したのち時刻  $t$  において残っている量は

$$I(\zeta) \cdot d\zeta \cdot n_s(t - \zeta)$$

( 34 )

ここで  $r_s(t) = R_s(t) \cdot e^{-\lambda t}$ , ただし  $\lambda$  = 放射性崩壊定数,

また  $R_s(t)$  = 放射性核種の 1 回の沈着の残留率 (放射性崩壊を無視する)。

各取り込み素量の残留は他のすべてと独立であるから, 時刻  $t$  における存在量は

$$q(t) = \int_0^t I(\zeta) r_s(t - \zeta) d\zeta \quad (\text{A } 1)$$

あるいは,  $t - \zeta = u$  において,

$$q(t) = \int_0^t I(t - u) r_s(u) du \quad (\text{A } 2)$$

$q(t)$  の変化率すなわち  $q'(t)$  は, その区画への流入およびそれからの流出の時間率の代数和である。これらはずぎのように 1 つの式にまとめることができる

$$q'(t) = \frac{d}{dt} q(t) = I(t) - E(t) - \lambda q(t) \quad (\text{A } 3)$$

ここで  $I(t)$  = 時刻  $t$  にその区画に入る単位時間あたりの  $\mu\text{Ci}$  数

$E(t)$  = 時刻  $t$  に代間過程によりその区画から出てゆく単位時間あたりの  $\mu\text{Ci}$  数

$\lambda q(t)$  = 時刻  $t$  に放射性崩壊をする単位時間あたりの  $\mu\text{Ci}$  数

(A 1) から, 微分により

$$q'(t) = I(t) \cdot r_s(0) + \int_0^t I(\zeta) r_s'(t - \zeta) d\zeta$$

しかるに,  $r_s(t - \zeta) = R_s(t - \zeta) \cdot e^{-\lambda(t - \zeta)}$  であるから,

$$\begin{aligned} r_s'(t - \zeta) &= R_s'(t - \zeta) \cdot e^{-\lambda(t - \zeta)} - \lambda R_s(t - \zeta) \cdot e^{-\lambda(t - \zeta)} \\ &= R_s'(t - \zeta) \cdot e^{-\lambda(t - \zeta)} - \lambda r_s(t - \zeta) \end{aligned}$$

したがって,

$$\begin{aligned} q'(t) &= I(t) \cdot r_s(0) + \int_0^t I(\zeta) R_s'(t - \zeta) e^{-\lambda(t - \zeta)} d\zeta \\ &\quad - \lambda \int_0^t I(\zeta) r_s(t - \zeta) d\zeta \\ &= I(t) + \int_0^t I(\zeta) \cdot R_s'(t - \zeta) \cdot e^{-\lambda(t - \zeta)} d\zeta - \lambda q(t) \end{aligned} \quad (\text{A } 4)$$

(A 3) 式と (A 4) 式の各項をくらべると,  $E(t)$  は次式で定義されなければならないことがわかる,



$$E(t) = -\int_0^t I(\zeta) R'_s(t-\zeta) e^{-\lambda(t-\zeta)} d\zeta \quad (\text{A } 5)$$

$$= -\int_0^t I(\zeta) r_s(t-\zeta) \frac{R'_s(t-\zeta)}{R_s(t-\zeta)} d\zeta \quad (\text{A } 6)$$

ただし  $R'_s(t-\zeta)$  は負である。

とくに関心の深い1つの例は

$$R(t) = K \cdot e^{-kt}$$

の場合であって、そのときには

$$\frac{R'_s(t-\zeta)}{R_s(t-\zeta)} = \frac{-k K e^{-k(t-\zeta)}}{K e^{-k(t-\zeta)}} = -k$$

したがって、(A 6) 式はつぎのように簡単になる、

$$\begin{aligned} E(t) &= k \int_0^t I(\zeta) r_s(t-\zeta) d\zeta \\ &= k q(t) \end{aligned} \quad ((\text{A } 1)\text{式による}) \quad (\text{A } 7)$$

この場合 (A 3) 式はつぎのようになる

$$q'(t) = I(t) - kq(t) - \lambda q(t) \quad (\text{A } 8)$$

存在量  $q(t)$  に由来する被曝は

$$Q(v) = \int_0^v q(t) dt$$

$q(t)$  に (A 1) 式を代入して

$$Q(v) = \int_0^v \left[ \int_0^t I(\zeta) r_s(t-\zeta) d\zeta \right] dt$$

これが実際にどのように積分されるかを示すため、

$u = t - \zeta$  とおき、積分を分離して

$$\begin{aligned} Q(v) &= \int_0^v \int_0^{v-\zeta} I(\zeta) r_s(u) du \cdot d\zeta \\ &= \int_0^v I(\zeta) \left[ \int_0^{v-\zeta} r_s(u) du \right] d\zeta \end{aligned} \quad (\text{A } 9)$$

あるいは、 $q(t)$  に関する表式は  $r_s$  と  $I$  について対称であるから、

$$Q(v) = \int_0^v r_s(\zeta) \left[ \int_0^{v-\zeta} I(u) du \right] d\zeta$$

ある場合には、(A 9) 式をつぎのように書きなおすと計算が容易になる、

$$Q(v) = \int_0^v I(v-\theta) \left[ \int_0^\theta r_s(u) du \right] d\theta$$

ここで  $\theta = v - \zeta$

上述の一般的取り扱いでは、取り込みが  $t$  日間にわたって続く（必ずしも一定の取り込み率でなくてよい）場合のみを考慮した。実際上関心のもたれるもう1つの状況は、取り込みが時刻  $T$  においてなくなる場合である。この状況の数式化は本文の38項で考察されており、 $q(t)$  に対する該当の数式は40項に、 $E(t)$  の式は41項に、また  $Q(v)$  の式は44項に示されている。

### 付録 B. ICRP Publication 10 に記載の10核種 に対する残留関数と排泄関数

$$r_s(t) = R_s e^{-\lambda r t}$$

$$r'_s(t) = R'_s(t) e^{-\lambda r t} - R_s(t) \lambda r e^{-\lambda r t} \quad [R'_s(t) \text{ は負である}]$$

$$= -Y_s(t) - \lambda r r_s(t) \quad Y_s(t) \text{ の定義については5ページを参照}$$

HTO  $r_s(t) = e^{-\frac{0.693}{10} t}$

$$Y_s(t) = 0.07 e^{-\frac{0.693}{10} t}$$

$^{90}\text{Sr}$   $r_s(t) = 0.5 e^{-\frac{0.693}{2.4} t} + 0.5 t^{-0.2} e^{-\frac{0.693}{10,000} t}$

$$Y_s(t) = 0.15 e^{-\frac{0.693}{2.4} t} + 0.1 t^{-1.2} e^{-\frac{0.693}{10,000} t}$$

$^{132}\text{Te}$   $r_s(t) = 0.5 e^{-1.6 t} + 0.5 e^{-0.25 t}$

$$Y_s(t) = 0.7 e^{-1.6 t} + 0.017 e^{-0.25 t}$$

$^{132}\text{I}$   $r_s(t) = 0.7 e^{-9.3 t} + 0.08 e^{-7.3 t}$

$$Y_s(t) = 1.4 e^{-9.3 t} + 5.5 \times 10^{-4} e^{-7.3 t}$$

$^{131}\text{I}$   $r_s(t) = 0.7 e^{-2.1 t} + 0.3 e^{-0.094 t}$

$$Y_s(t) = 1.4 e^{-2.1 t} + 0.002 e^{-0.094 t}$$

$^{137}\text{Cs}$   $r_s(t) = 0.15 e^{-\frac{0.693}{1} t} + 0.85 e^{-\frac{0.693}{115} t}$

$$Y_s(t) = 0.1 e^{-\frac{0.693}{1} t} + 0.005 e^{-\frac{0.693}{115} t}$$

$^{226}\text{Ra}^*$   $r_s(t) = 0.26 \cdot 0.4 (t + 0.26)^{-0.4} e^{-(\lambda r + 10^{-4}) t}$  [(16)式]

\*人体内におけるラジウムの残留に関するこれら2つの式は等価であり、Publication 10に与えられたものとは異なる。これらの式は人の静脈内に注射されたラジウムの代謝に関する最近の知識（文献10, 50, 51）と合ったものである。

$$\begin{aligned} & \text{または } 0.54 e^{-1.74t} + 0.29 e^{-0.14t} + 0.11 e^{-0.012t} \\ & \quad + 0.04 e^{-0.001t} + 0.02 e^{-0.00014t} \end{aligned}$$

$$Y_s(t) = 0.26^{0.4} (t + 0.26)^{-0.4}$$

$$\left[ e^{-(\lambda_r + 10^{-4})t} \left( \frac{0.4}{t + 0.26} + 10^{-4} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{または } 0.54 \times 1.74 e^{-1.74t} + 0.29 \times 0.14 e^{-0.14t} \\ & \quad + 0.11 \times 0.012 e^{-0.012t} + 0.04 \times 0.001 e^{-0.001t} \\ & \quad + 0.02 \times 0.00014 e^{-0.00014t} \end{aligned}$$

$$^{233}\text{U} \quad r_s(t) = 0.8 e^{-1.8t} + 0.2 t^{-0.5}$$

$$^{234}\text{U} \quad Y_s(t) = 1.4 e^{-1.8t} + 0.1 t^{-1.5}$$

$$^{239}\text{Pu} \quad r_s(t) = 1$$

$$Y_u(t) = 0.004 e^{-0.67t} + 0.0016 t^{-0.68} \quad (\text{文献24})$$

付録C 細胞外液中に取り込まれた元素の総排泄のうち、尿による割合 ( $F_u$ ) と糞による割合 ( $F_f$ ) (ICRP Publication 10より引用)

元 素	$F_u$	$F_f$
H (水として)	0.6	
Na	~1.0	~0.01
P (リン酸塩として)	0.9	0.1
S (硫酸塩として)	0.9	0.1
Cl		Na とおなじ
Ca	0.5	0.5
Fe	0	?
Co	0.7	0.3
Zn	0.25	0.75
Rb	0.75	0.25
Sr	0.85	0.15
Te	0.75	0.25
I	0.93	0.07
Cs	0.8	0.2
Ba	0.1	0.9
Ce	0—0.1	0.9—1.0 時間とともに に変化する
Po	0.1	0.9
Ra	0.05	0.95
Th	1.0	0.01
U	1.0	0
Np	0.5	0.5
Pu	0.29 $t^{0.17}$	0.8 $t^{-0.15}$

付録D. 取り込み率一定の期間につづく排泄に対する  
誘導調査レベル

この付録に取り上げられた7種類の核種のそれぞれについて、 $T$ 日間の一定率取り込みに由来する排泄に対し、2組の「誘導調査レベル」を与える。第1の組は、決定器官に対し許容年線量の1/20の線量または線量預託を与えるような取り込みに対するものであり、第2の組は、もし1年間続けば許容年線量の3/10を与えるような $T$ 日間の取り込みに対するものである。

$A$  = 線量預託  $D$  を与えるような取り込み (ICRP Publication 10)

$q(T)$  =  $T$  日目における存在量

$$= \frac{A}{T} \int_0^T r_s(\eta) d\eta$$

$E(T+1)$  =  $(T+1)$  日目における排泄量

$$= \frac{A}{T} [r_s(1) - r_s(T+1)] - \lambda_r q(T+1)$$

HTO

$$A = 1.5 \text{ mCi} \quad \lambda_r \approx 0 \quad F_u = 0.6$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \cdot \frac{1}{0.07} (1 - e^{-0.07T})$$

$$E(T+1) = \frac{A}{T} e^{-0.07} (1 - e^{-0.07T}) - \lambda_r q(T+1)$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ ( $\mu\text{Ci}$ )	誘導調査レベル	
		$F_u \cdot E(T+1)$ ( $\mu\text{Ci}/\text{日}$ )	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot F_u \cdot E(T+1)$
7	1190	46	5.3
14	960	37	8.6
30	630	25	12.1
90	240	9.3	13.8
180	120	4.7	13.8
360	60	2.3	13.8

131I

$$A = 0.27 \mu\text{Ci} \text{ 甲状腺に対し } \lambda_r = 0.086 \quad F_u = 1$$

$$0.9 \mu\text{Ci} \text{ 全身に対し}$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \times \frac{0.3}{0.093} (1 - e^{-0.093T})$$

$$E(T+1) = \frac{A}{T} [0.7 e^{-2.1} (1 - e^{-2.1T}) + 0.3 e^{-0.093} (1 - e^{-0.093T})] - \lambda_r q(T+1)$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ (nCi)	誘導調査レベル	
		$F_u \cdot E(T+1)$ (nCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot F_u \cdot E(T+1)$
7	241	11.6	1.34
14	172	6.2	1.42
30	101	3.0	1.48
90	36	1.0	1.50
180	18	0.5	1.50
360	9	0.25	1.50

<sup>90</sup>Sr

$$A = 0.04 \mu\text{Ci} \quad \lambda_r \approx 0 \quad F_u = 0.8$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \left[ \frac{0.5}{0.29} (1 - e^{-0.29T}) + \frac{0.5}{0.8} T^{0.8} \right]$$

$$E(T+1) = \frac{A}{T} [0.5 e^{-0.29} (1 - e^{-0.29T}) + 0.5 - 0.5(T+1)^{-0.2}] - \lambda_r q(T+1)$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ (nCi)	誘導調査レベル	
		$F_u \cdot E(T+1)$ (nCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot F_u \cdot E(T+1)$
7	25	2.3	0.26
14	20	1.3	0.30
30	15	0.66	0.33
90	10.9	0.24	0.35
180	9.2	0.12	0.37
360	7.9	0.06	0.38

$^{137}\text{Cs}$ 

$$A = 4.1 \mu\text{Ci} \quad \lambda_r \approx 0 \quad F_u = 1$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \left[ \frac{0.15}{0.7} (1 - e^{-0.7T}) + \frac{0.85}{0.006} (1 - e^{-0.006T}) \right]$$

$$E(T+1) = \frac{A}{T} [0.15 e^{-0.7} (1 - e^{-0.7T}) + 0.85 e^{-0.006} (1 - e^{-0.006T})] - \lambda_r q(T+1)$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ ( $\mu\text{Ci}$ )	誘導調査レベル	
		$F_u \cdot E(T+1)$ ( $\mu\text{Ci}/\text{日}$ )	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot F_u \cdot E(T+1)$
7	3.5	0.064	0.0073
14	3.4	0.042	0.0096
30	3.2	0.029	0.0144
90	2.7	0.019	0.0288
180	2.1	0.014	0.0426
360	1.4	0.009	0.0554

 $^{226}\text{Ra}$ 

$$A = 0.015 \mu\text{Ci} \quad \lambda_r \approx 0 \quad F_f = 1 \quad F_u = 0.05$$

$$q(T) = \frac{A}{T} [0.31 (1 - e^{-1.74T}) + 2.07 (1 - e^{-0.14T}) + 9.17 (1 - e^{-0.012T}) + 40.0 (1 - e^{-0.001T}) + 142.9 (1 - e^{-0.00014T})]$$

$$E(T+1) = \frac{A}{T} [0.54 (e^{-1.74} - e^{-1.74(T+1)}) + 0.29 (e^{-0.14} - e^{-0.14(T+1)}) + 0.11 (e^{-0.012} - e^{-0.012(T+1)}) + 0.04 (e^{-0.001} - e^{-0.001(T+1)}) + 0.02 (e^{-0.00014} - e^{-0.00014(T+1)})]$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ (nCi)	誘導調査レベル			
		$F_f \cdot E(T+1)$ (nCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} F_f \cdot E(T+1)$	$F_u \cdot E(T+1)$ (pCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot F_u \cdot E(T+1)$
7	5.9	0.56	0.06	28.0	3.2
14	4.7	0.35	0.08	17.6	4.1
30	3.5	0.19	0.09	9.4	4.7
90	2.3	0.07	0.10	3.5	5.2
180	1.7	0.04	0.11	1.9	5.5
360	1.3	0.02	0.12	0.97	5.8

$^{233}\text{U}$  および  $^{234}\text{U}$ 

$$A = 0.003 \mu\text{Ci} \text{ 骨格に対し} \quad \lambda_r \approx 0 \quad F_u = 1$$

$$0.015 \mu\text{Ci} \text{ 全身に対し}$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \int_0^T 0.2 t^{-0.5} dt = 0.4 A T^{-0.5}$$

$$E_u(T+1) = \frac{A}{T} \left[ \frac{1.46}{1.82} e^{-1.82} (1 - e^{-1.82 T}) + 0.2 \{1 - (T+1)^{-0.5}\} \right] *$$

試料採取の周期 $T$ (日)	最終体内量 $q(T)$ (pCi)	誘導調査レベル	
		$E_u(T+1)$ (pCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot E_u(T+1)$
7	2300	550	64
14	1600	300	69
30	1100	150	73
90	630	50	76
180	450	25	78
360	320	14	78

 $^{239}\text{Pu}$ 

$$A = 42 \text{ pCi} \text{ 骨格, 全身それぞれに対し} \quad \lambda_r \approx 0$$

$$q(T) = \frac{A}{T} \int_0^T 1 d\eta = A \text{ pCi}$$

$$E_u(T+1) = \frac{A}{T} \left[ \frac{0.004}{0.67} e^{-0.67} (1 - e^{-0.67 T}) + \frac{0.0016}{0.32} \{(T+1)^{0.32} - 1\} \right] *$$

\*これらは  $E_u(t) = \int_0^t K(\zeta) Y_u(t-\zeta) d\zeta$  から誘導される。ここで  $Y_u(t)$  は 0 日目の沈着量のうち  $t$  日目に排泄されるものの割合であり、それに対する式は付録 B に与えてある。

試料採取の周期 $T$ (日)	誘導調査レベル	
	$E_u(T+1)$ (pCi/日)	$\frac{T \cdot 6}{365} \cdot E_u(T+1)$
7	0.046	0.0054
14	0.030	0.0069
30	0.018	0.0090
90	0.009	0.0133
180	0.0057	0.0169
360	0.0036	0.0214



反覆取り込みまたは長期の取り込み  
に由来する体内汚染の算定

¥ 300

---

昭和47年11月15日 発行

編 集 社団法人 日本アイソトープ協会  
および 財団法人 仁科記念財団  
発 行 財団法人 仁科記念財団

113 東京都文京区本駒込二丁目28番45号  
電 話 (03) 946-7111

---

印刷・製本 大洋印刷産業KK