

国際放射線防護委員会勧告

職業被曝による体内汚染からの
身体組織への線量の評価

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

職業被曝による体内汚染からの
身体組織への線量の評価

ICRP Publication 10

国際放射線防護委員会
専門委員会 4 の報告

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 Report of Committee IV on Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure, ICRP Publication 10, Pergamon Press (1968)”の全訳である。

訳は放射線医学総合研究所の有志によるものに編集者において必要な修正を加え、さらに、これとは独立に、日本原子力研究所保健物理安全管理部の部内資料としてほん訳された、JAERI-memo 3993 および 4486 を、関係者の諒承のもとに参照させていただいて作成したものである。また、参考図は、原報告書にはないが、体内汚染管理上有用であると考えたので、上記 JAERI-memo 4486 に記載されたものを、さらに原研矢部明氏にご検討いただき、ここに転載させていただいた。また、付表調査レベルのまとめも原文にはないが読者の便宜を考えて作成したものである。

この欄をかりて、関係各位の労に厚く謝意を表する。

なお、本書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を基本目的としてまとめられた ICRP Publication 10A 「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」が別に翻訳、刊行されているので、同書もあわせて読まれることを希望する。

編者 日本アイソトープ協会
仁科記念財団

Nishina | Japan
Memorial | Radioisotope
Foundation | Association

Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 10

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Volunteers from the National Institute of Radiological Sciences

Reference Figures* provided by

Division of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute

* Under kind courtesy of JAERI, figures are reprinted from
JAERI-memo 4486, after the examination by Akira YABE.

Editorial Board

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	3
2. 放射性核種の代謝	4
放射性核種の体内への侵入	6
転移と沈着	10
体外への排出	11
3. モニタリングの方法とプログラム	12
モニタリングの方法	13
モニタリングのプログラム	21
4. 線量の計算	23
5. 調査のための指示	29
調査レベル	31
誘導調査レベル	32
その後の調査	38
引 用 文 献	41
付録A：ICRP Publication 2の代謝に関する 数値の一覧表	43
付録B：放射性核種の残留の数式化	45
付録C：個々の核種に関するデータ	50

参 考 図 表 150

1	.....	参
2	.....	1
3	.....	2
8	.....
10	.....
11	.....
12	.....	3
13	.....
17	.....
21	.....	4
22	.....
23	.....	5
24	.....
25	.....
26	.....
27	.....
28	.....
29	.....
30	.....
31	.....
32	.....
33	.....
34	.....
35	.....
36	.....
37	.....
38	.....
39	.....
40	.....
41	.....
42	.....
43	.....
44	.....
45	.....
46	.....
47	.....
48	.....
49	.....
50	.....
51	.....

序

1964年1月、国際放射線防護委員会は、“作業者の体内汚染の評価”について調査を行ない報告するための、次のメンバーからなる課題グループを任命した。

G. C. Butler (委員長)	カナダ
H. T. Daw	アラブ連合
G. W. Dolphin	イギリス
J. Lafuma	フランス
C. Polvani	イタリア
W. S. Snyder	アメリカ
C. G. Stewart	カナダ
J. Vennart	イギリス

この作業を始めるにあたり、本課題グループは ICRP Publication 6⁽¹⁾ の86項の拡大をその目標とした。その項は次のとおりである。

“最大許容濃度を越えるレベルの経口摂取または吸入をひき起こすかもしれない非密封の放射性同位元素を取り扱っている作業者に対して、全身体負荷量を推定するために検査を実施すべきである。このような検査は、放射性同位元素が皮膚、または皮膚の刺創や開放創を通じて体内に入る可能性がある場合にも実施すべきである。これらの検査には、状況によっては呼気と排泄物のモニタリングが必要なこともあり、また全身モニターによる身体負荷量の直接測定が必要なこともあろう。特定の器官または組織が受ける線量を計算し、個人記録に記入すべきであり、また、この“体内”線量を考慮して、体外放射線に対して許される線量を調整すべきである。”

(2)

本課題グループは、貴重な情報を提供され、有益な検討をして下さった次の人々に感謝したいと思う。

S. R. Bernard

P. E. Morrow

I. S. Eve

G. P. Howells

M. R. Ford

S. D. Simpson

また、秘書として協力された J. Grepe, A. McLellan, E. Monson の諸嬢にも感謝する。

専門委員会4の委員構成(1966)

H. Jammet (委員長) (フランス)

D. Mechali (フランス)

D. J. Beninson (アルゼンチン)

C. Polvani (イタリー)

G. C. Butler (カナダ)

P. Recht (ベルギー)

H. T. Daw (アラブ連合)

E. G. Struxness (アメリカ)

H. J. Dunster (イギリス)

F. Western (アメリカ)

K. Koren (ノルウェー)

B. Windeyer (イギリス)

1. 緒 論

(1) 体内汚染を起こした作業者の1つまたは複数の決定器官が受ける総線量を推定するには、その器官の汚染の時間的経過、および特に、たとえば μCi -日で表わした汚染の時間積分の知識が必要である。ICRP Publication 2⁽²⁾には、体内あるいは排泄物中の放射性核種の測定からこの量を計算するのに使用される標準人 (standard man) の代謝モデルと、身体の寸法のいくつかが与えられている。標準人の諸特性から推定される放射性核種の体内量または線量は、ある特定の摂取から起こる実際の値の1つの近似値でありうるにすぎないが、そのような大ざっぱな推定値でも次の目的のためには必要である。

(i) 操作の安全と封じ込め (containment) の計画をたてるため

(ii) 公衆に使用される環境の安全性を算定するため

(iii) 被曝が十分に低くてそれ以上問題とする必要はないか、または被曝が

大きい場合もっと正確な推定をすることが正当であることを指摘するためこのようなすべての場合に、個々の個人と標準人との間の相違を斟酌しなければならぬ。このモデルを使用するに当って我々が忘れてはならないことは、これは50年の間ひきつづいて低レベルの被曝をする平均的な作業者の最大許容1日摂取量と最大許容濃度を計算するために開発されたものであるということである。したがって、もしこのモデルを、急性の1回摂取に由来する排泄を計算する目的で、または標準人と異なる個人に対して、使用しようとする場合には、このモデルはかなりの修正と補足とを必要とする。

(2) 作業者の体内に放射性核種が侵入した結果、作業者が受ける線量を計算する式を作成するためには、2つの理論的モデルを使用することができる。その1つは ICRP Publication 2 と 6 が、 MPC_a と MPC_w の値を表に掲

(4)

げ、指針を与えているもので、一定レベルで毎日被曝する場合に関係がある。これと対照的なモデルは、ある放射性核種を1回の短期間に摂取するとしたもので、専門委員会4のこの報告書の主題である。多くの実際の状況下では短期間被曝が繰り返し起こるので、これらを取り扱うためには、この報告書に述べた理想化された手法はいくらかの修正を必要とするであろう。

(3) この報告書が取り扱っている内容は、放射性核種の代謝に関する現在の知識、代謝の数学的記述、モニタリングの方法とプログラム、および、体内被曝を算定するための定量的な指針である。この報告書の付録Cには、作業者の体内汚染源としてしばしば遭遇する約30の放射性核種の代謝について、詳細な資料が収録されている。人体に関する研究から得られた新しい (ICRP Publication 2 以後の) データが、動物実験からしか新しいデータが得られていない ^{132}Te 、 ^{144}Ce および ^{239}Np を除いた放射性核種について与えられている。付録Cには体内汚染の重要度を評価するに当って用いられる調査レベル (Investigation Level, 第5章参照) の計算に必要な知識と手順も述べられている。

2. 放射性核種の代謝

(4) 体内に取り込まれた放射性核種によって身体およびその構成部位が受ける線量を推定するためには、放射性核種とその化合物の代謝を理解しておく必要がある。体内の放射能の測定結果および排泄物の分析結果を解釈するためにはこの代謝の理解が特に重要である。この章の目的は、現在入手しうる、代謝に関連のある知識を要約することである。

(5) 放射性核種のいわゆる“可溶性”化合物と“不溶性”化合物とはその代謝が非常に異なるので、最初にこの2つの型の挙動を認識し、定義しなけれ

ばならない。1つの部位（腸，肺，傷）から細胞外液への放射性核種の移行，および細胞外液から体内の他の器官または組織への移行を，化学および物理の普通の定義による水溶液での溶解度から予想することは，多くの場合適切でない。これらの例には次のようなものがある。

不溶性酸化ウランの吸入後24時間以内にウランが尿中に排泄される。(4)

^{131}I を含んだ不溶性 AgI を吸入すると甲状腺に ^{131}I が急速に現われる(引用文献5の35頁)。

^{144}Ce を含む易溶性の CeCl_3 を経口摂取したとき， ^{144}Ce は腸から実際上まったく吸収されない ($f_1 < 10^{-4}$)。(2)

(6) したがって，生体の膜を通過して容易に移行するという，放射性核種の入った化合物の特性を記述するためには，“可溶性”という言葉以外の言葉を使用することが望ましいと考えられた。この報告書では，“可搬性 (transportable)” という言葉が，この意味をあらわすために使用されている。1つの部位から他の部位への（しかし必ずしも逆方向は考えなくてよい）可搬性の程度は，取り扱っている化合物の物理的，化学的性質，体細胞および体液との反応，また食作用のような生物学的過程に依存する。外界と身体内部とを分離している最初の膜を迅速に完全に通過する化合物から，非常にゆるやかにごくわずかしか通過しない化合物に至るまで，可搬性には連続した範囲がある。したがって，“可搬性” およびその逆の“非可搬性”という言葉を使用しても，これは放射性化合物をはっきりと定義された2種類に単純に区分できるというように理解すべきでない。この報告書に使用されている意味での“可搬性”という言葉は，肺機能に関する ICRP 課題グループ(6)によって同様に使われている，“排除できる (clearable)” という言葉に相当している。

(7) 図1は，体内汚染において考慮しなければならないもっとも重要な代謝の諸経路を図解的に要約したものである。これらの議論に進む前に，腸の管腔，膀胱，肺の気道，または皮膚の外層に存在する放射性核種はまだ身体の代

(6)

謝過程に入ったとはいわないということ指摘しておくべきである。一旦これらの核種がこれらの部位から細胞外液またはリンパ節に吸収されると、それらは組織系内 (systemic) 汚染をなすという。

放射性核種の体内への侵入

(8) この問題を論ずるに当って、用語をきめておくことが必要である。できる限り次の言葉はそれぞれ以下に与える意味で使用することにする。

摂取量 (intake), 鼻または口に入った量

取り込み量 (uptake), 細胞外液に吸収された量

沈着量 (deposition), 問題の器官に存在する量 (17項参照)

(9) 放射性核種は吸入または経口摂取によって、または無傷なあるいは傷のある皮膚を通じて、体内に入りうる。

吸 入

(10) 放射性の気体、液体または固体は吸入によって体内に入ることがある。たとえば、酸化トリチウムまたは放射性ヨウ素を含んだ気体のような水溶性の気体は、吸入した空気から急速に吸収されるため、数秒のうちに細胞外液中に現われる。エアロゾルの形で吸入された液体または固体の放射性化合物は、それらの物理化学的な諸特性に依存してさまざまのみちすじをとる可能性がある。吸入された化合物の一部は気管支に沈着し、残りは呼吸とともに吸き出される。上部呼吸気道に沈着した部分は繊毛運動によって追い出されて胃腸管に入り、肺のもっと深い部位に沈着した部分は、もしそれが可搬性ならば、完全かつ急速に吸収される。もしそれが非可搬性ならば、一部は除去され、一部はゆるやかに吸収される。肺の深い部位からの非可搬性粒子の排除は十分には理解されていないが、場合場合で非常に異なることがわかっている。これ

は、吸入した物質の可搬性が、粒径および恐らくはその形、その個人の寸法と生理的状态、その放射性化合物の化学的性質と反応性にも依存するためである。これらの因子の影響は引用文献 5, 6, 7, 8 および 9 に詳しく議論されている。実用的な目的のために、ICRP 専門委員会 II は次のモデルを採用した(引用文献 2 の表 10)。

標準人の呼吸器中の粒子状物質

肺における粒子状の物質の残留は、その粒子の大きさ、形、および密度、その物質の化学的な形態、その人に口呼吸の習慣があるかどうかなど、多くの因子に依存する。しかし、特定のデータがない場合には、その分布は次に示すようであると仮定する。

分 布	易溶性化合物 (%)	その他の化合物 (%)
呼気とともにき出されるもの	25	25
上部呼吸気道に沈着、その後、のみこまれるもの	50	50
肺 (下部呼吸気道) に沈着するもの	25 (これは体内に 吸収される)	25*

* このうち、半分は最初の 24 時間内に肺から排出され、のみこまれる。したがってのみこまれるものは合計 62.5% となる。残りの 12.5% は肺の中に 120 日の半減期で残留し、この部分は体液中にとりこまれるものと仮定する。

このモデルを改訂する可能性が ICRP 専門委員会 2 の課題グループによって考察されている。(6)

(11) この表は、可搬性化合物は、吸入後肺から直接に細胞外液に入るか、または、その化合物が気管、気管支から排除され、のみこまれた後に腸から細胞外液に入るかであることを示している。一方、非可搬性の化合物は容易には細胞外液に入らず、上のモデルでは、その 62.5% が胃腸管を通過してその一部は吸収されあるいは排泄されるが、12.5% は肺胞中に長期間とどまる。これら肺胞に沈着したものの一部分は肺のリンパ節に移行し⁽⁵⁾、そこに長くとどま

(8)

るかもしれない。体液にまったく移行しないことがわかっている化合物はごく少数であることは注目すべきであり、また非可搬性化合物の吸入後多くの場合に尿中へのいくらかの排泄が予測できるが、その量はしばしばごくわずかで、体内量と定量的に関係づけることはできない。

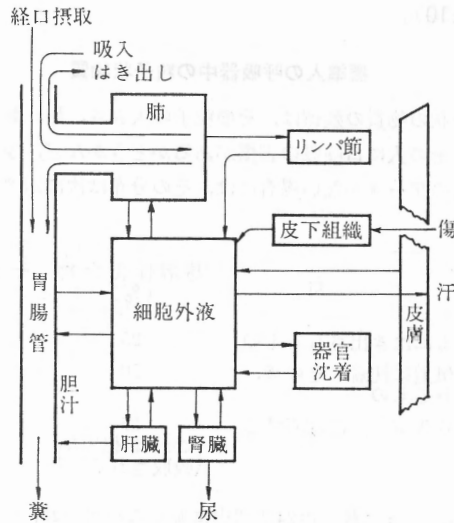


図 1 体内における放射性核種の主な代謝経路

経口摂取

(12) 作業者が放射性物質を経口摂取する時、摂取は通常短い時間内のことであろうから、これは腸への1回摂取となる。作業者は何度もつづけてそのような摂取をするかもしれないけれども、議論を簡単にするためには1回摂取の結果だけを考慮するのがもっともよい。

(13) もしその物質が非可搬性であるならば、その大部分は胃腸管を通過して糞の中に排出される。汚染した個人の代謝に関するくわしい知識がない場合には、ICRP Publication 2の表11を使って、胃腸管のいろいろの部位にお

る濃度と滞留時間とを推定することができる。しかしながら、この考え方は修正を要するかもしれないといういくつかの証拠がある。(10, 11, 41)

(14) もし、その物質が可搬性であるならば、主として小腸を通過中に（標準人で4時間かかる）かなりの部分が細胞外液に吸収されるであろう。ICRP Publication 2 の表12には、放射性核種が胃腸管から細胞外液に吸収される割合、 f_1 の値を掲げてある。この値は付録Aの表1（44ページ）中にも、そこに収録されている24の元素の入っている化合物について示されている。この f_1 の値は、飲料水中の最大許容濃度（MPC_w）の計算において仮定された可搬性の程度を示すにすぎないことを心にとどめておくべきである。したがって、ICRP Publication 2 に使われているこれらの値は単に、“可溶性”という言葉が意味する腸粘膜を通じての移行の程度を定めているにすぎない。特定の場合における f_1 の実際の大きさは、個人の代謝と栄養にも経口摂取される放射性核種の化学形にも依存する。胃腸管の性質の他の面は第3章の糞への排泄を取り扱っている部分（39～41項）で議論する。

経皮吸収

(15) 無傷の皮膚はたいいていの放射性物質の体内への侵入に対し有効な障壁となる。實際上重要な例外は、無傷の皮膚を通しての

液体または蒸気のかたちの酸化トリチウム

蒸気あるいは溶液のかたちのヨウ素および溶液のかたちのヨウ化物の吸収である。(18)

傷からの侵入

(16) 皮膚が破れていたり、刺創があったり、擦りむいていたりすると、放射性物質は皮下の組織に浸透し、そこから、可搬性化合物の場合には急速に、非可搬性化合物の場合にはゆるやかに、細胞外液に入っていく。後者の場合

に、もし傷の汚染除去が行なわれない時には、組織系内汚染の時間的経過は連続被曝の場合の経過に類似するであろう。

転移と沈着

(17) 細胞外液は、可搬性物質を身体の一部から他の部位へ移行させる主要な輸送媒体である。他の輸送手段の2つの例は、不溶性酸化プルトニウムが肺からリンパ節へ動く場合と、放射性核種またはその化合物が赤血球細胞に付着する場合である。細胞外液中の放射性核種の一部は、腎臓、肝臓、腸、皮膚、または肺から排泄され、残りは、その放射性核種が特殊な親和性をもつ器官あるいは組織のどれかに沈着する。可搬性放射性核種の組織系内汚染の後すぐに、沈着器官（1つあるいは複数の）へのその核種の正味の移行がある。これは、沈着器官から逆に細胞外液への放射性核種の正味の移行が起こるレベルに細胞外液の濃度が（排泄と沈着のため）低下するまで続く。この時点において、決定器官中の量はある最大値に達し、この値が線量の計算のために使用される“沈着量”である（62項参照）。2区画系におけるこのような挙動のモデルについて Zilversmit らが記述している。^(14, 15) 酸化トリチウム、種々の塩化物、およびポロニウム化合物のように、いかなる組織にも目立つほど濃縮されない、実用上重要ないくつかの放射性物質があり、細胞外液中のそれらの濃度はかなり長い期間にわたって、1個の指数関数で表わしうる減少を示す（付録C中のこれら核種の節を参照）。

(18) 引用文献2の表12（および付録Aの表1）の中には、放射性核種が血液（または細胞外液）から関連器官へうつる割合（沈着）、 f_2' の値が収録されている。これらの f_2' の値は、1回の被曝後時間が少ししかたないときにも、また沈着の間かなりの減衰がある非常に短寿命の放射性核種にも、適用できないであろう。このような例の1つは甲状腺による ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I および

^{135}I の取り込みである。

(19) その他の割合を示すもの、すなわち

f_2 , 全身中の量に対する決定器官中の量の割合

f_a , 吸入された量のうち決定器官に達するものの割合

f_w , 経口摂取された量のうち決定器官に達するものの割合

もまた引用文献 2 と付録 A の表 1 とに与えられている。

体外への排出

(20) 全経路を合計した、組織系内汚染物質が体外に排出される速度は細胞外液中の濃度に依存する。第 4 章に排出速度の時間的変化を記述し、それを数式化してある。バイオアッセイプログラムの内容は、汚染後のいろいろの時刻における排出速度の測定と、これらの排出速度を基にして体内の残留量、そして可能な場合には体内のいろいろの器官中の残留量を、放射性核種が身体から消失するまでのすべての時期について計算することである。

(21) 図 1 は体外排出が呼気、汗、尿、および糞の経路によって起こることを示している。

(22) 呼気による排出は以下のものに対する重要な経路である。

(a) 吸入したエアロゾルのうち沈着しない部分

(b) 細胞外液に由来する酸化トリチウム蒸気

(c) 体内に沈着したトリウムおよびラジウムの放射性崩壊により生じたトロンとラドン

(d) 放射性炭酸ガス

(23) 汗は細胞外液中に存在するどんな放射性核種も一般に含んでいる。酸化トリチウムの場合には汗の中の濃度と細胞外液中の濃度は等しい。

(24) 尿中に排泄される放射性核種は細胞外液にのみ由来するものである。

(12)

ある種の放射性核種は排泄の過程に腎臓に十分な放射線を与え、その結果、腎臓が決定器官となることがある。

(25) 図1からわかるように、糞中の放射性核種は、非可搬性放射性化合物の経口摂取または吸入に由来するか、または可搬性放射性核種が直接にまたは胆汁を介して胃腸管に入ることに由来する。

(26) これらすべての排出物の分析は、バイオアッセイプログラムの一部として第3章において論ずる。

3. モニタリングの方法とプログラム

(27) この報告書においては、モニタリングとは、汚染事例に関する情報を得ること、分析用試料を集めること、その試料中および全身中の放射能を測定すること、およびこの情報から放射性核種の体内量と決定器官への線量とを算定することを意味する。

(28) 非密封の線源を取り扱う作業における放射線防護の手段には、作業区域内の表面汚染または空气中放射能を測定して作業者の環境を調査すること、あるいは作業者の排泄物の分析または作業者の身体放射能の直接測定によって作業者自身をしらべることが含まれる。この章では、それらの手法について簡単に説明するが、それを実施するに当たっての特別な、あるいは詳細な説明は、最近の出版物^(16~20)中で十分に行なわれているので、記されていない。

モニタリングの方法

(a) 表面汚染

(29) 作業区域内の露出表面上の容易にとりのぞきうる放射性核種の測定は、作業状態を評価する上に有用であるが、潜在的な被曝に対しては非常に間接的な尺度を与えるにすぎない。モニタリングプログラムの中でこのような測定が占める位置は、引用文献21と22に論じられている。酸化トリチウム蒸気、 ^{131}I を含んだヨウ化メチル⁽²³⁾のような放射性ガスは、それらにさらされた表面上に放射性の沈着を残さないであろうから、表面汚染の測定をしても、空气中にそのような汚染物質があるかどうかはまったくわからない。しかし、放射性エアロゾルについては、表面汚染がないということは被曝の可能性がなかった1つのしるしとなりうる。しかし、測定した表面汚染のレベルを放射性核種の体内量と定量的に関連づけることはできない。

(b) 空気試料の採取

(30) 空気で運ばれる放射性核種を測定すると、作業者の被曝をもう少し直接的に推定することができる。ウラン鉱山労働者とウラン精錬工場の作業者にこの種のモニタリングを使うことについては最近のシンポジウム^(20, 24, 25)で討論された。ラドンとトロニ(娘核種を含む)の場合には、空気の測定は気管支に対する線量を計算するために用いられる。^(26~28) 実験室や原子力施設内で空気で運ばれる放射性塵埃にさらされたための体内汚染の大きさを算定するためには、空気汚染の測定は単に間接的な指定値を与えるにすぎない。しかし、そのような測定は次のような重要な実用的応用をもっている。

1. 吸入による体内汚染の場合、空気中の放射性核種の同定は、他の測定と

(14)

結びつけたとき、貴重な予備的な情報となる。

2. 透過性放射線を放出しない放射性核種の重大な事故上の吸入があった場合、空気試料採取の結果は医療処置をする上の唯一の有用な早期の指針であろうし、また、それが非可搬性核種である場合にはもっとも重要な情報であろう。
3. もし、作業区域の適切な空気試料採取によって、空气中で運ばれる放射能が存在しないことがいつも示されるならば、作業者の排泄物や体内の放射性核種の日常測定を減らすことが可能であろう。

このモニタリング方法には多くの限界があることを心にとどめておくべきである。⁽²⁹⁾ すなわち、

空気試料採取は、それが個人サンプリングのとき、すなわちその人の鼻の近くで空気を採取したとき、もっとも代表的なものである。採取点がこの位置から離れれば離れるほど、そのモニタリングは代表的なものでなくなる。

大きな誤差は、空气中に“優勢な粒子” (dominant particle) あるいは“高放射能粒子”が存在することによって起こりうる。その理由は、人が吸入したこれらの粒子の数と空気試料中に収集された数とのちがいが大量の放射能に相当するからである。

理論的には、空気試料採取の結果に統計的方法を適用することによってその結果の信頼性を知ることができると期待されるが、統計の適用は簡単ではない。⁽³⁰⁾

空气中で運ばれる粒子を採取し、その放射能を測定しても、それは肺中の予想される沈着と残留の正確な尺度とはならない。呼吸気道中の沈着の場所とその量とは粒子の大きさに著しく依存することが指摘されており⁽⁶⁾、空气中で運ばれる放射性核種に由来する線量を推定する場合にはいつでもこのことを考慮に入れるべきである。

(c) 排泄物, その他の生体試料の分析

(31) 排泄物その他の生体試料の分析は、身体内のすべての放射性核種を検出するために用いることができ、ある場合には体内量を推定するのにも用いることができる。この分析は中央の試験室で行なわれるので、被検者が測定の間いなくてもよいという利点がある。しかしながら、放射化学的操作と分析操作に時間がかかるので、測定結果は通常遅れて得られ、また、同一試料をふたたび入手することは不可能である。多くの場合、排泄物の分析には非常に少量の放射性核種を測定する必要がある、それは技術的に可能であるが、試料採取と分析の両方の期間中に試料が外から汚染されるという問題が切実となりうる。

(32) 排泄物の収集には、ある程度被検者の協力が必要である。長い期間にわたって試料を規則的に提供することはいやだと本人が考えるかもしれないけれども、適切な保健物理的管理を行なうためには、そのような試料の提供が多くの場合絶対に必要である。

(33) 体内汚染を算定するために生体試料の分析をする場合、その核種の種類、化学的、物理的な形、代謝様式および汚染経路などにもっとも適した試料を選ぶ必要がある。その可能性のあるものは、尿、糞、呼気、鼻汁、痰、唾液、汗である。血液および毛のような身体組織も分析されることがある。これらのことは引用文献31で討議されている。

(34) 尿 尿の試料を採取するには特異な2つの困難がある。1つは、試料が作業中に採取された場合の汚染混入の可能性であり、もう1つは単位時間あたり、通常は1日あたりの、放射性核種の総排泄量を計算できるような試料を採取するという問題である。24時間の全尿を試料として採取することは通常不便なので、ある尿試料が1日排泄量の中で占める割合を推定する必要がしばしば起こる。この推定は、一般にはクレアチニン含有量を測り、それが比較的一定であるクレアチニン日排泄量の何割に当るかを計算することによって行なわ

(16)

れる。⁽³²⁾

(35) 尿中の放射性核種の含有量を測る利点の1つは、注意深く採取した尿試料中に1つの放射性核種が発見されたならば、その放射性核種が細胞外液中にあったということは疑いないという点である。さらに、最適の状況下では、放射性核種の尿中日排泄量は総体内量を直接に計算するのに用いる。実用上重要なもっとも単純な一例は酸化トリチウムであり、尿中と身体の細胞外液中に同一の濃度で存在する。尿排泄量と体内量との関係がもっと複雑な他の例は付録Cに示されている。

(36) ICRP Publication 2 の表9に記されている標準人の水の収支は広い範囲のものの平均値であるということを知っておくことは重要である。たとえば、インドにおける平均的作業者は、ICRP Publication 2 で仮定された1日あたり2.2 l ではなくて、4.5 l の水を摂取するということが報告されている。⁽³³⁾ 発汗は、ある非常に低い値から毎分38 ml の間にある。⁽³⁴⁾ 70 kg の人の尿量は1日あたり600 ml から2,000 ml の間で変動する。⁽³⁴⁾

(37) Pochin ⁽³⁵⁾ は、種々のクリアランス試験ではかった腎機能に大きな変動があることに注目した。その試験結果は、単位体表面積あたりに規準化したときでさえ、平均値から15~25%のずれを示した。

(38) 上述の観察からすると、放射性核種の体内量のうち単位時間あたり排泄される割合には、それができるだけ注意深くコントロールされた条件の下で測定されたときでさえ大きな個人的差異があるということは驚くにあたらない。次に2つの例を示す。

1. 98人の無甲状腺症の被検者の放射性ヨウ素の排泄の結果を Pochin ⁽³⁵⁾ が報告しており、それは甲状腺に無関係なヨウ素の代謝についてのめやすとなるものである。排泄の半減期は平均0.55日で、標準偏差は0.16日であった。

2. 文献にでている数編の報告によると、骨格中に放射性核種を保持してい

る人の尿中への放射性核種の排泄は日によって大きく変動する。このような変動は ^{90}Sr について Müller ら⁽³⁶⁾ によって観察され、また鉛について Kehoe⁽³⁷⁾ によって観察された。Beach と Dolphin⁽³⁸⁾ は、数人の作業者の尿中のプルトニウムを 357 回測定した結果を報告しているが、結果を規準化したのちでさえ、プルトニウムの日排泄量にかなりの日ごとの変動が見られた。この規準化されたデータを全部まとめてみると対数正規分布を示した。著者らは、変動を減らすために同一人からの数個の試料の測定データを組みあわせることが重要であることに注意を喚起した。

(39) 糞 バイオアッセイプログラムにおける糞分析の役割についての一般的な議論は引用文献31, 39, 40に見られる。それらには、この種のバイオアッセイの多くの長所と短所が述べられている。可搬性放射性核種による体内汚染については、糞中への排泄量と体内量とを関係づける資料はほとんどない。糞分析は非可搬性放射性核種の摂取を検出するため、およびそのような物質の肺からの排除の証拠とするために非常に有用である。

(40) 放射性核種が非可搬性の形で経口摂取されたことがわかった場合には、腸粘膜に対する線量を計算することができる。 β 放射体については、この線量は放射性核種が含まれている腸内容物の重量に逆比例し、腸のいま考慮している部分に放射性核種がとどまっている時間に正比例するであろう。引用文献2の表11は標準人の胃腸管の4つの部分の内容物重量と滞留時間とを与えている。線量推定の際にこれらのデータを特定の個人にやたらに適用すると、誤った結果となることがあるということを認識すべきである。Pochin⁽³⁵⁾ の報告によれば、被検者93人の検査において1日あたりの糞の重量(乾燥重量)は1g から 160g まで変化した。Hayes ら⁽¹⁰⁾ は ^{140}La を経口摂取した被検者54人について1日あたりの糞中排泄量をしらべ、胃腸管への線量の個人個人の推定値は、それらを相互に比較した場合にも、標準人について計算した値と比較した場合にも、大きな差異があることをみた。日々の糞の重量の変動による

(18)

いろいろな誤差以外に、標準人の腸モデルにおける2つの時間依存性因子からも誤差が生じると Eve⁽¹¹⁾ は指摘した。すなわち、

(a) 腸の特定の部分がみたされている時間の24時間に対する割合とその部分の内容物の重量とによって長寿命放射性核種からその部分が受ける線量がきまる。

(b) 腸管の一端から他端まで食物が通過する時間によって短寿命放射性核種の減衰の量がきまり、したがって腸管の各部分が受ける線量がきまる。

最近の2つの報告書に胃腸管の放射性汚染にともなう線量算出法が記述されている。(41, 42)

(41) 非可搬性放射性核種を吸入したことがわかったとき、引き続き数日の間に糞中に排泄される総量を、肺の中に残っている量を概算するために用いることができる。現在の ICRP の肺モデル⁽²⁾によれば、残留量は糞中に排泄された量の5分の1であるとされているが、これは修正の必要があるであろう。(6)

(42) 呼気 体内の放射性核種が希ガスである娘核種に崩壊すれば(ラジウム→ラドン, トリウム→トロン), その希ガスは呼気中に出てくる。そして呼気中の希ガスの濃度を体内量の推定に用いることができる。この種のモニタリングの応用例が付録の ²²⁶Ra の節にでている。

(43) 呼気はまた、はき出された水蒸気を用いて体内の ³H の量や、はき出された CO₂ を用いて体内の ¹⁴C の量を測るために分析されることがある。

(44) 鼻汁 鼻汁や鼻孔をこすった綿棒に放射性核種がみつければ、それは吸入された粒子のうちもっとも粗大な粒子が鼻に沈着したことを示す。その存在量を測定しても、必ずしも体内量を定量的に推定するために用いることはできないが、相当の吸入があったことを検出したり、事故にかかわりのある放射性核種を同定したりするためには用いることができる。

(45) 痰 痰を採取できると、その中には、最初肺の中に沈着し、後に繊毛

運動によって排除された不溶性物質を含んでいることがある。

(46) 唾液と汗は、体内汚染の検出のために分析されることがあるが、体内量を推定するのに用いることのできる唯一の実用的な例は酸化トリチウムの場合である。

(47) 血液と毛は、臨界事故による被曝で生ずる中性子放射化物質の場合を除けば、一般には分析されることはない。フルオロリン酸ジイソプロピル中の ^{32}P や、 ^{51}Cr および ^{59}Fe のようないくつかの放射性核種は主に血液か血球に沈着するので、血液試料の分析によって総体内量を非常にたやすく推定できることがある。

(48) 以上の試料の中で、実用的にもっとも重要なものは尿である。比較的簡単に採取でき、多くの場合その放射性核種の含有量は体内量に関係づけられるからである。次に重要なものは糞である。これらとくらべて、その他の排泄物は特殊な場合を除いてはほとんど分析されない。

(d) 体内放射能の直接測定

(49) この方法は、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs のように透過力の強い放射線を出す核種、あるいは ^{32}P 、 ^{90}Sr のように制動放射線を出す核種についてのみ適用できる。体内汚染核種としてよくであることのある放射性核種について付録Cに示されている知見によれば、多くの核種（たとえば ^{22}Na 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 、 ^{86}Rb 、 ^{85}Sr 、 ^{132}Te 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{140}Ba 、 ^{144}Ce 、 ^{198}Au 、 ^{235}U 、 ^{239}Np)が体外計測の可能なほど十分なエネルギーの電磁放射線を放出する。もし、計数装置が前もって校正されているならば、これらのどの放射性核種に対しても、その同定を行ない迅速に定量できるであろう。このような測定は、測定期間中本人が作業から離脱する必要はあるけれども、排泄物試料の提供よりも彼らにとって受け入れやすいものである。この方法では、被検者の体内あるいは体表面の γ 放射性核種のすべてが測定されてしまうので、不用意に直接計測をすると誤った結

(20)

果が得られるかもしれない。しかし、被検者の身体を洗浄し、無汚染の衣服に着替えさせた後、直ちに測定を繰り返すことができる。この方法が誤った結果を与えた場合には、通常高過ぎる側に誤まるのであるから、何も検出されないという結果が得られたならば放射体による体内汚染がないことの確実な証拠となりうる。

(50) 体外計測の場合、感度とエネルギー弁別との要求によって測定器の複雑さが決まる。⁽⁴³⁾ 多くの場合、特別の測定室にたのむことなく、簡単な測定器を各自の作業場で用いることができる。これは、事故の場合のように、大ざっぱではあってもできる限り迅速に測定することが重要なときには利点である。もっと精密な推定をするためには、検出部と被検者との十分な遮蔽、高感度の検出器、およびγ線エネルギーの最高の弁別が必要である。

(51) 現在利用できる検出器は鋭いコリメーションができるほど十分な感度がないので、身体の全般的な汚染と放射性核種濃度の最大の部位とを明確に区別することはすべての場合に可能とはいえない。体内放射性核種の局所的濃度を測定することが体外計測用の特殊な測定器を用いて可能な、重要な例外は次のとおりである。

甲状腺中の ¹³¹I

胸部の非可搬性放射性核種

腸管中の非可搬性放射性核種

傷口中の非可搬性放射性核種

これらの核種は、物質の大部分が体表面上あるいは表面近くに存在するであろうから、透過力の大きい放射線を放出する必要はない。

器官内量を直接測定することは一般にはできないので、器官内量を体内量に關係づける係数を知ることが必要である。ICRP Publication 2 ではこの係数が f_2 として与えられている。これは、1回の汚染の場合には適用できないであろうが、ある場合には利用できる唯一の情報であることがあろう。

モニタリングのプログラム

(52) あらゆる状況下のあらゆる形状のすべての放射性核種に対し適用できる1組のモニタリング方法を記述することは不可能である。したがって、この問題を (a) 日常的手法と (b) 日常的ではない手法に分けて検討し、さらに、可搬性核種と非可搬性核種との取扱法の相違を示すこととする。

(a) 日常モニタリングの手法

(53) 日常モニタリングは普通には尿分析が主体であるが、これは、日常作業に従事し、排泄率が第5章に定義される調査レベルに対応する率以下であるような量の放射性核種を体内にもつ作業者のグループを対象として行なわれる。これらのレベルを超過した場合には、特殊モニタリングの手順を開始する必要がある。

(54) ある作業者グループに対し適切な検査の頻度と種類とは以下の諸項に依存する。

- (i) 作業の性質、特に取り扱う放射性核種の量と種類；少量の放射性核種を取り扱う簡単な日常作業ではあまり厳重な検査は必要でない。
- (ii) 作業者の防護のための施設の設計と施工の妥当性。
- (iii) 検出の容易さおよび取り扱っている放射性核種の化学的、物理学的、生物学的挙動；このような特殊な性質の例としては、無傷な皮膚を通しての酸化トリチウムの吸収性、ヨウ素の表面への吸収と脱離の容易性、ポロニウムの特有な移動性などがある。
- (iv) 過去における区域モニタリングと個人モニタリングの諸結果；これらの諸結果が満足であるかぎりにおいて、個人モニタリングの頻度を減らしてよいであろう。この点に関する指針は ICRP Publication 9 の111

(22)

および112項に示されている。

(55) 日常モニタリングでは、汚染発生についてまったく知識がない場合には、普通もっとも悲観的な仮定、すなわち、発見された汚染は前回のバイオアッセイ試料が採取された直後の日に発生したと仮定する。このことは試料採取の最適頻度の決定に影響を与える。

(56) 体内の非可搬性放射性物質の存在を検出する手法（糞、鼻汁、痰などの試料採取、および傷あるいは全身の直接測定など）は、一般には非日常的な処置である。

(b) 特殊モニタリングの手法

(57) 次のような状況下では、特殊モニタリングを開始することが必要であろう。

高い危険性のあることがわかっているか、あるいはその疑いがあるような、非日常的な作業を行なうとき
事故があったことがわかったとき

日常モニタリングによって作業者にかなりの体内汚染が発見されたとき
これらのいずれの場合でも、もし誘導調査レベル（87項参照）を越えたならば、その事例についてさらに調査を行なうべきである。

(58) もし、日常モニタリングで、ある誘導調査レベルを越えたいという結果が得られたならば、状況に応じてまったく異なったふうにその事実を見ることができよう。よくわかっている連続的な汚染の場合には、調査としては、だれが汚染したかを判別し、彼の被曝歴を調査するのみでよいであろう。一方、もし、その体内汚染が最近発生したもので、調査レベルを越えると推定される量ならば、その後の測定と、実際の摂取量のさらに正確な算定ならびに決定器官に対する線量の推定が必要となるであろう。

(59) 摂取の時期および種類に関する情報が詳細であればあるほど、摂取量

およびそれに由来する線量の大きさの推定の信頼度は高くなるであろう。実際には、このような情報は入手できない場合が多い。このような理由のために、日常検査プログラムはいずれもこの問題に留意しながら設定されるべきである。汚染時期に関してほかの情報が入ってこないとすると、汚染時期の決定の不確定さは、日常試料の採取間隔が短ければ短いほど減少することは明白である。線量推定について同じ精度を得ようとするとき、長い実効半減期を有する核種の方が短い実効半減期のものよりも、試料採取頻度は少なくてよい。

4. 線量の計算

(60) 放射性物質の摂取の重大さを評価するに当っては、その摂取による沈着の結果、体内のいろいろの器官および組織が受ける線量を知ることが必要である。体内のある部位に沈着している放射性物質 $1 \mu\text{Ci}$ 当りの総線量は、その部位の放射能の時間積分、 Q に正比例し、次式によって関係づけられる。

$$\begin{aligned} \text{線量 (rem)} &= Q \times 3.2 \times 10^9 \times \varepsilon \times 1.6 \times 10^{-6} \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{m} \\ &= Q \times 51.2 \times \frac{\varepsilon}{m} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに

Q = 器官への $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みあるいは沈着から生ずる、 μCi -日 で表わした体内汚染の時間積分

$3.2 \times 10^9 = 1 \mu\text{Ci}$ についての 1 日当りの崩壊数

$1.6 \times 10^{-6} = 1 \text{ MeV}$ 当りのエルグ数

$100 = 1 \text{ rad}$ につき組織 1 g 当りのエルグ数

ε (MeV) = ΣEF (RBE) n , 引用文献 2 の表 5 に示した, 1 崩壊当りの

有効吸収エネルギー*

m = 決定器官の重量 (g) (m は通常、引用文献 2 の表 8 から得られ、それは平均値である。ε も m も個々の人に対しては調整が必要であろう。)

(61) 決定器官あるいは組織の汚染の時間積分の計算をここに議論することとする。

$$Q = \int_0^t q_c(t) dt \quad (2)$$

ここに $q_c(t)$ = 最初の沈着より t 日後に決定器官の中に存在する放射性核種の量。この一般式は、決定器官が全身である場合にも、あるいはある器官また組織である場合でも、すべての場合にあてはまる。しばしば、 $q_c(t)$ は直接には測定できずに時刻 t における全身中の放射性核種の量、 $q(t)$ が測定される。このような場合 Q は時に

$$f_2 \int_0^t q(t) dt \quad (3)$$

に等しいとされる。ここに f_2 = 決定器官中の放射性核種の量が全身中の量に対して占める割合である。

(62) 容易に利用し得る f_2 値は引用文献 2 の表 12 にある値だけであって、この報告の付録の表 1 に転載してある。これらの値は放射性核種の長期連続摂取の結果生ずる沈着を記述するために選ばれたものであって、多くの場合、1 回摂取後の急激に変化する状態には適用できない。多くの場合、決定器官中の放射性核種の量は初めはゼロであり、その後最大値にまで増加し、その後は 65 項の式のどれか 1 つに従って減少する。それゆえ、摂取後の短い期間に対する線量を推定するときには、 f_2 を用いることは避け、決定器官に残留する量 $q_c(t)$ についての積分、 $\int_0^t q_c(t) dt$ をその計算のために用いることを勧める。このことについて、後にこの章でさらに述べる。

(63) もし、問題としている放射性核種が透過性 γ 線を放出するならば、全

* (訳注) 現行の定義によれば、(RBE) は (QF) におきかえられるべきである。

身に関する $q(t)$ は直接に測定されるであろう。そしてもしある限定された期間（たとえば1か月）について線量を計算しようとするれば、被曝の時間積分は、 $q(t)$ を何回か測定し、時間に対してそれをプロットしてその曲線下の面積をはかることによって、計算されるであろう。以上は、決定器官が全身である場合当を得た方法であろう。ある都合のよい場合には、ある器官の $q_c(t)$ が体外からの計測によって直接に測定できることもある（例：甲状腺中の ^{131}I ）。

(64) 実際には、放射性核種はしばしば排泄物（普通には尿）中に検出され、1日当りの排泄量がある期間にわたり幾日間か測定される。1日当り排泄される μCi 数は時間の関数として表わされ、付録Bの (B3) 式によって体内量に関連づけられる。すなわち、

$$q(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[q_0 - \int_0^t E(\tau) \exp(\lambda_r \tau) d\tau \right] \quad (4)$$

ここに

$q(t) = q_0 \mu\text{Ci}$ の体内取り込み後、時間 t における体内の放射性核種の μCi 数 (t は普通、日であらわす)

λ_r = 崩壊定数

$E(\tau)$ = 摂取してから時間 τ 後に、単位時間当り排泄される μCi 数 (τ は普通、日であらわす)。

普通 $E(\tau)$ を測定するが、残留と排泄を $1 \mu\text{Ci}$ の摂取に規準化するともっと便利である。このような場合、残留と排泄は付録Bの (B4) 式によって関連づけられる。すなわち

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[1 - \int_0^t \exp(\lambda_r \tau) Y(\tau) d\tau \right] \quad (5)$$

ここに

$R(t)$ = 最初の沈着 $1 \mu\text{Ci}$ のうち時間 t 後に残留している割合

$Y(\tau)$ = 最初の沈着 $1 \mu\text{Ci}$ のうち時間 τ 後に単位時間当り排泄される割合

これに $\exp(\lambda_r \tau)$ を乗ずれば時間 τ の間の放射性崩壊の補正ができる。

(5) 式は残留, 排泄および放射性崩壊の間の一般的な関係である。この関係から, 個々の放射性核種に関する固有の式が導かれるであろう。

(65) 付録Bに説明されているが, $R(\tau)$ は次のように記述される。

(a) 指数方程式, この場合には

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \sum_i K_i \exp(-\beta_i t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{すなわち, } R(t) = & \exp(-\lambda_r t) \{K_1 \exp(-\beta_1 t) \\ & + K_2 \exp(-\beta_2 t) + \dots\} \quad (7) \end{aligned}$$

ここで, 多くの場合 $K_1 + K_2 + K_3 + \dots = 1$

(b) べき関数, この場合は次の結果となる。

初期においては

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) A (t+x)^{-n} \quad (8)$$

A は $t+x=1$ のとき残留する割合である。

その後 $t \gg x$ のとき

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) A t^{-n} \quad (9)$$

(c) 指数関数とべき関数の和。この場合は次の結果となる。

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \{K \exp(-\beta t) + A t^{-n}\} \quad (10)$$

ここに $t \gg x$

短期残留に対する補正項 x は, 初期残留が多くの場合指数項によって記述され, また $K+A \approx 1$ であるので, 省略される。

K_i と β_i あるいは A と n の値は時間に対する排泄率のプロットから決定されるであろう (付録B参照)。付録C中の24の元素の各々についてわかっている場合には残留率式がパラメーターの数値を含めて与えられている。しかし, 放射性崩壊の項はそれぞれの方方程式から省略されている。その理由は, 残留方程式が, 安定同位元素を含めて, 同じ元素のすべての同位体に対し等しく適用できるからである。放射性半減期が, 被曝の時間積分を計算する期間 t にくら

べて十分短いときにはいつでも、計算にあたっては(6)~(9)あるいは(10)式のように放射性崩壊の項を挿入しなければならない*、** このことは、放射性核種 $1 \mu\text{Ci}$ の摂取による線量の計算 (付録Cのそれぞれの核種の6項) において示されるであろう。

(66) 普通、1日当り排泄される放射性核種の総量を測定しないで、1つの経路、もっとも一般的には尿または糞を通して排泄される放射性核種の量のみをはかる。尿、糞、呼気などの中に存在する量の1日当り総排泄量に対する割合 (それぞれ F_u , F_f , F_b など) が比較的一定であるとき、それらの値を使えば、1つの経路を通じて単位時間当りに排泄される量の測定から、 $E(\tau)$ を計算することができる。文献にみられるこれらの比の値は、付録Cの各放射性核種の項目に示されている。

(67) 時間について(6)~(9)または(10)式を積分すると、付録B (B16~B19式) に示されているように、残留率の時間積分を与える。全身被曝に対する μCi -日の値は q_0 に適当な時間積分値をかけて得られる。全身が決定器官であるような場合には、この決定器官に対する線量はたやすく計算することができる。決定器官が全身でない場合には、その器官の残留が残留式の1つの項で近似的に記述されることが実際上しばしばみだされている。たとえば、ストロンチウムに対する残留式のべき関数の部分は、ほとんど確実に骨中の残留を示している。いくつかの指数項をもった残留式においては決定器官に対応する項、それはしばしばもっとも長い生物学的半減期をもつ項であるが、それを決めるのはもっと困難であろう。残留式の中の1つまたはいくつかの適当な項を積分することによって器官被曝を得るこの方法は、全身放射能の積分値に引用文献2に示されている f_2 をかける方法よりも一般によい方法である。決定器

* もし放射能の半減期が、 $T_r (=0.693/\lambda_r) \geq 6.6t$ であるならば、その放射性崩壊は代謝期間 t の間に10%を越えない。

** (訳注) 原文に誤りあり、訳文では訂正した。

官に相当する項を残留式中で定めることができない場合には、全身の残留を計算し、その全量はその器官にあるとみなす方が賢明である。多くの場合、その結果は何倍も誤っていることはないであろうし、誤りは安全側にあるであろう。これは管理の目的には望ましいことである。

(68) 決定器官に沈着した $1\mu\text{Ci}$ 当りの決定器官に対する μCi -日を与えて50年間の時間積分値が、可能なときはいつでも、付録Cの各放射性核種に対して計算されている。このような計算は調査レベルを決めるために必要である。

(69) 純粋な数学的困難さはすべてさておき、指数関数またはべき関数の残留式と排泄式を、それらを求めるのにつかた実際の観察の期間にくらべて、はるかに長い期間にまで補外すると、あやまちを犯す危険がある。特定の放射性核種に対する残留と排泄のべき関数式と指数式の両者のパラメーターは個人によって変わるであろう。これらの変動は、個人が受けるものとして計算された推定線量とその人が結局うける実際の線量との間に、大きな相違をひきおこすことになりうる。特定の場合に適合するように式を修正する理論的な根拠が知られていないので、その個人自身を観察することによってのみ修正が可能である。その個人について観察が多ければ多いほど、また観察期間が長ければ長いほど、その個人が実際に受ける線量の推定値は正確になるであろう。

(70) 汚染事故の時刻がわからない場合には、これらの残留式は使用できないことはあきらかである。前に述べたように、事故の発生がみとめられたとか、あるいは問題の放射性核種を取り扱う時間的に孤立した作業にその作業者が参加したとかいうことから、汚染時刻について若干の知識を得ることができるともかもしれない。これがわからなければ、ゼロ時刻は前回の日常バイオアッセイの試料採取時刻と体内汚染の発見の時刻との間にあることになる。これ以上の情報は、残留が指数関数で表わされるときには、得ることはできない。残留がべき関数で表わされるときには、汚染発生から汚染発見の時刻までの時間

は、(何か他の根拠から、問題としている放射性核種に対する適当な n の値は もちろんわかっていると仮定して) はっきりと異なった $E(t)$ 値を与える時間的に十分離れた2つの時点での排泄率を測定することによって、理論的には推定できる。^(44, 45) しかしながら、実際上は、日々の排泄は広範囲に変動することがしばしばみられ、合理的な計算のためには数日間のバイオアッセイが必要となるであろう。

(71) 放射性核種の最初の体内取り込み量 q_0 は $E(t)$ の1測定値と排泄率式から

$$E(t) = Y(t) q_0 \quad (11)$$

を使って計算できる。あるいは、体内量の1測定値と残留率式から

$$q(t) = R(t) q_0 \quad (12)$$

の関係を用いて計算することができる。(11)、(12)両式とも、摂取から観察までの時間 t の値を知っている必要がある。

5. 調査のための指示

(72) 第3章でその概略を述べたように、体内汚染のための個人モニタリングは、作業者の環境の分析あるいは作業者自身の分析から成りたっている。この後者の型のモニタリングを次の2つの型に分けた。

- (a) ICRP Publication⁹の中で詳細にのべた原則に従い、あらかじめきめられたスケジュールにもとづいて行なわれる日常モニタリング。
- (b) 放射性物質の放出がわかった場合、あるいはその疑いのある場合、それにさらされたあとに行なわれる特殊モニタリング。

これら2つの型のモニタリングの最終目的は、作業者の受ける線量を算定することであるが、それらを行なう直接の理由はまったく異なる。理論的には、環

境の分析と管理がそれまで十分であったならば、個人モニタリングは必要ではないはずである。しかし、作業者の体内に検出されないで見逃されてきた放射性物質の蓄積がこれまでなかったということを示すために、日常個人モニタリングがしばしば行なわれる。一方、特殊個人モニタリングの目的は、放射線防護の観点から、作業者の事故による汚染の重大性の程度を評価することである。

(73) どちらの型のモニタリングにおいても、第一の関心事でありまた算定の指標となるものは、決定器官への線量である。実際には、放射性核種の摂取の多くは、線量としては取るにたらぬもので、すべての場合を詳細に調査することは努力の浪費であろう。それゆえ、どのような時に線量はとるにたらぬものであり、したがって無視し得るものであるのか、あるいは、どのような時に線量が十分大きくて、もっと注意深い推定をするに値するほどなのか、を示す判断規準が必要である。使用する規準は、体内汚染が起こるその起こり方にある程度まで依存するであろう。

(74) 作業者による放射性核種の摂取には、理論的に可能な幅広いパターンがある。一方の極端な例では、被曝はほとんど毎日あるいは一か月に数回も起こるかもしれない。そのような場合に対しては ICRP Publication 2 および 6 が MPC_a および MPC_w の値を表に示して指針を与えている。他の極端な例では、1人の作業者が過去の年月において、1回しか起こらなかった孤立した事故で体内汚染をおこしたかもしれない。後者が特殊モニタリングを必要とする種類の摂取であって、この報告書では、そのレベルを越えれば汚染した個人についてさらに調査と管理が要求される、調査レベルあるいは誘導調査レベルをきめるべきことが示唆されている。連続摂取および1回摂取の両極端の間に、多くの実際の場合を含み、誘導調査レベルをその状況に合うように修正する必要があるであろうような、反復被曝の領域がある。

(75) この章の残りの部分では、調査レベルおよび誘導調査レベルの選択と

適用について論ずる。*

調査レベル

(76) 個人モニタリングおよび個人管理の主要な目的は、器官および組織線量の制限に関する ICRP 勧告に則っていることを確かめることである。調査レベルを確立するための主たる規準は、決定器官に対する総線量（すなわち線量預託）であるべきである。一般的な指針としては、作業者の体内の1つの放射性核種の量と分布が、被曝者の決定器官に対し50年間に ICRP Publication 9の54項で規定された $1/4$ 年線量の $1/10$ 以上すなわち、同書の56項で勧告された最大許容年線量の $1/20$ 以上の線量を与え得る場合は、調査を行なうべきである（線量を計算するためには標準人または付録Cのデータを使う）。これらの線量（以後、まとめて D と記す）は、全身、生殖腺、あるいは赤色骨髓に対しては 0.25 rem 、皮膚、甲状腺および骨に対しては 1.5 rem 、他の器官に対しては 0.75 rem である。

(77) 非常に短い実効半減期をもつ放射性核種は、すべての実用上の目的からみて、摂取後、最初の数日ないし数週間以内にその総線量を与える。そして線量率は、仮にその線量 D が均一な割合で $1/4$ 年あるいは1年の間与えられるとした場合よりも、初期にはもっと高いであろう。これに対し、長寿命の骨親和性核種による体内汚染では、その線量は50年間にわたって極端に低い線量率

* 調査レベル (Investigation Level) および誘導調査レベル (Derived Investigation Level) の定義

調査レベルという用語は摂取量、体内取り込み量あるいはある器官における沈着量に適用することができる。各々の場合に、それは、決定器官に対し D という線量預託を生ずるところの放射能である（76項参照）。

誘導調査レベルという用語は、器官あるいは全身に残存している放射能、あるいは1日あたりに排泄される量に適用され得る。それは、1調査レベルを摂取してから時間 t の後におけるこれらの量の値である。

(32)

で与えられる。それにもかかわらず、総線量が放射線防護の規準として使用される (ICRP Publication 9 の22項および54項)。

(78) この報告書の中には、線量 D に対応する決定器官内の最初の沈着量が、もっとも新しい代謝の資料を用いて計算されており、それらはいくつかの場合には ICRP Publication 2 の代謝のデータを使って推定された値とは異なっている。この初期沈着量が調査レベルといわれるものである。計算の一般的な方法は第4章に述べられ、特定の計算は付録Cに含まれる各々の放射性核種について与えられている。

(79) 実際には、組織に対する線量は日常的には測定されない。そこで、排泄物分析および全身計測のために誘導調査レベルが必要となる。

誘導調査レベル

(80) すべての場合に調査のためのただ1つの規準を使用できれば便利であろう。しかしながら、可搬性放射性化合物と非可搬性放射性化合物との間、短寿命核種と長寿命核種との間、また1回摂取と反復摂取との間には、著しい相違があり、ただ1つの規準を使うことは不可能である。これらの挙動のちがいのいくつかを次に検討する。

短寿命放射性核種と長寿命放射性核種

(81) 可搬性のかたちの、実効半減期の短い ($T_{\text{eff}} < 1$ 年) 放射性核種については、調査レベルは ICRP Publication 9 の54項で規定された最大許容 $1/4$ 年摂取量の $1/10$ の体内への侵入とすべきであることを提案する。摂取量は直接にはめったに測定されないから、たとえば、決定器官における1調査レベルの沈着と結び付いた体内の放射性核種の量、または時刻ゼロで決定器官内に1調査レベルが存在することに対応する、1日あたり尿中に排泄される放射性核種

の量といった、他の誘導調査レベルをきめておくことが必要である。そのような誘導調査レベルの妥当性は、試料採取の頻度、身体からの放射性核種の排出速度、および使用する測定方法によってきまる放射性核種の検出限界に依存する。これら3つの変数間の関係は、典型的な作業における典型的な被曝を仮定して、付録Cに各々の放射性核種について示されている。各々の記述(7項)には、1調査レベルに相当する体内への摂取があったときの尿中排泄量が、汚染事故発生と尿分析との間の時間の関数として計算されている。各放射性核種についての8項では、それ以後では1調査レベルの存在が検出されないようになるまでの時間が計算されている。これは日常モニタリングプログラムにおける試料採取の受けいれうる間隔を決める上で特定の指針を与えるものである。というのは、摂取が最後の日常試料の採取された翌日に起こった時にも、1調査レベルに相当する摂取が標準的な方法によって推定できるように、十分この時間間隔を短くすべきであるからである。

(82) 長寿命の骨親和性放射性核種に対しても、他の放射性核種に対すると同じように誘導調査レベルをきめることが望ましい。しかしながら、表1には ^{90}Sr 、 ^{226}Ra 、天然 Th、 ^{239}Pu および ^{241}Pu が10年以上の実効半減期をもつことが示されており、1調査レベルが骨に存在するとき1日あたり排泄される量は、現在知られている標準的な方法では検出不可能であろう。これは排泄物中に検出されるよりもずっと以前に(たとえば1年以上前に)体内汚染が起こった場合には特にそうである。そのうえ、長い時間経過したあとの汚染の場合には、放射性核種の1日あたりの排泄は、38項で指摘したように非常に変動しやすい。そしてそのような場合には、最近起こった少量摂取の検出を妨げる恐れのあるほど比較的高くかつ変動するレベルでの尿中排泄の存在の下で、何らかの増加分を算定することが必要となろう。これらの理由のために、長寿命の骨親和性物質について誘導調査レベルをきめることは困難である。 ^{90}Sr 、 ^{226}Ra 、天然 Th、 ^{239}Pu および ^{241}Pu の場合には、これらの放射性核種のい

ずれでも、尿中排泄量の予期しない増加が検出されたら、その個人あるいはその人の被曝状況についてさらに調査することが必要であるとみなすのが慎重なやり方であろう。これらの放射性核種の検出限界の例が付録C中に見出されるので、それらを1調査レベルに相当する摂取から生ずる尿中排泄量のレベルと比較することができる。

非可搬性放射性核種

(83) 非可搬性放射性核種による個人の汚染についての誘導調査レベルの選択は、上で可搬性放射性核種についてくわしく述べたものとは大きく異なる考え方にもとづかなければならない。非可搬性放射性核種の沈着と排泄は、その放射性物質の物理的、化学的形態により、またその放射性物質の体内に入る経路により、大きく変わる。したがって、体内量と排泄レベルとを関係づける一般的な公式を作り出すことは不可能である。さらにまた、体内汚染のほとんどの日常モニタリングは尿分析によって行なわれるので、吸収されにくい放射性核種の体内における存在は検出さえされないかもしれない。非可搬性放射性核種による体内汚染の算定には、どんな場合でも通常、特殊モニタリングが関与する。非可搬性放射性物質は、肺、胃腸管あるいは傷口に見出されることがあり、その各々を個別に考察する。

(84) 肺の中のいくつかの非可搬性放射性核種については、その存在および量は、体外からの γ 線計測により求めることができ、また、肺中のこれら γ 線放射体も他のどのような放射性核種も、その存在を一連の糞分析により確認しうるであろう。初期の推定沈着量が、ICRP Publication 2の16ページ*に規定されている呼吸率で、26週の間MPC_aで吸入した結果の値の $1/10$ を越えると思われるのでなければ、それ以後の処置を取る必要はないということが示唆される。(16ページで述べられている呼吸率には、週末および祭日の間の減

* (訳注) 邦訳では32ページ。

少が計算に入っているから、問題の期間の暦の上での全日数を呼吸率にかけたものが総摂取量となることに注意すべきである。) ICRP Publication 9 の54項に規定されている、肺の肺胞部における最大許容¹/₄年沈着量、すなわち

$$I_a = \text{MPC}_a (40 \text{ h}) \times \frac{6.9 \times 10^6}{\text{cm}^3 \text{ 空気/8 時間の日}} \times \frac{0.125}{\text{沈着率}} \times \frac{182}{\text{半年}}$$

$$= \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8$$

は、付録Cに含まれている放射性核種の大部分について計算され、表に示されている。この公式は、ICRP Publication 2 に標準人について与えられている呼吸率、沈着の割合、および残留の半減期にもとづいている。もし汚染した個人および汚染物質についてもっと多くのことがわかっているならば、引用文献6の助けをかりてもっと正確な推定を行なうことができる。

(85) 口に入って飲み込まれた非可搬性放射性核種については、決定器官は腸粘膜である。ICRP Publication 9 (54項) では、1回の摂取量の限度を“最大許容濃度において¹/₂年の間摂取した量に相当する量”としている。このような摂取があったということは、 γ 線放射体についてはそれが腸管内にまだとどまっている間は体外からの計測によって、または、摂取につづく1日または数日間の糞の分析によって、検出することができる。しかしながら、経口摂取された非可搬性放射性核種の体内における平均時間は2日より僅か短い(文献11)ので、事故的な経口摂取のすべてを日常的に検出し評価することが可能なのは、糞分析あるいは全身計測が2日より長くない間隔で行なわれる場合に限る。多くの放射線防護プログラムにおいてそうであるように、このような短い間隔での分析が行なわれないならば、糞中のいかなる放射性核種についても、もし異常な存在があればさらに検討を加える必要があるであろう。

(86) 傷口の放射性汚染は放射線事故と考えなければならないから、そのような場合はすべて医師に相談し、さらにくわしく調査すべきである。

(87) 以上述べた考察から、つぎの誘導調査レベルを示唆する。

1. 可搬性放射性核種

(a) 短半減期のもの ($T_{\text{eff}} < 1$ 年)

決定器官に D という線量 (最大許容年線量の $1/20$) を与える量の血中への吸収に由来する体内または器官内残留, あるいは尿中排泄*

(b) 長半減期の骨親和性核種

日常的方法で検出可能な, これらの放射性核種の日排泄量における予期しない増加

2. 非可搬性放射性核種

(a) 肺における, 初期沈着量 $0.1 \times I_a$ (84項参照) に由来する肺負荷*

(b) 胃腸管における, 何らかの放射性核種の異常な存在

(c) 傷口における, 検出され得る何らかの放射能の存在

誘導調査レベルの修正

(88) 放射線防護業務に責任をもつ担当者が誘導調査レベルを選択する際の前提条件は, その誘導調査レベル以下なら, その担当者の責任下にある作業者に固有の状況下で, 調査レベルを越えてはいなかったという保証を担当者に与えるものでなければならない。

(89) 非常に短い半減期(たとえば数時間)の放射性核種については, 上で定めた誘導調査レベルを用いると, 多くの場合, その事態の重大さについて相当の過小評価をすることになりがちである。上に述べた一般的な手法を用いることはできるが, その場合時間の尺度を日の単位から時間の単位に変えるべきである。もし可能ならば, 汚染の起こった時刻, 時間単位であらわした試料採取間隔, および放射能測定の時刻を知るべきである。また, 沈着曲線における初期の増加段階を無視することのできない場合もあろう。

* (訳注) 原文に誤りあり, 訳文では訂正した。

(90) 体内または排泄物中に、いくらかでも検出し得る放射性核種が異常に存在すれば、それは、被曝の原因を発見する必要があることを十分に示し、かつその被曝原因を除去する必要性を示すものかもしれない。もし、汚染がしばしばまたはある人から別の人へと繰り返されるならば特にそうである。もし、すべての被曝を取り除くように作業条件を改良することが实际的でないならば、より低い誘導調査レベルを用いることが必要であろう（これにあてはまる例としては、多量の酸化トリチウムを取り扱う作業があり、法外の出費と訓練なしには摂取をゼロにすることはできないであろう）。もし放射性核種の生物学的半減期および実効半減期が、試料採取期間を1～2か月以下にする必要があるほど短くないならば、上に掲げた1回被曝についての誘導調査レベルは1年間に数回程度の被曝に対しても適用できることを示唆する。実効半減期が短くなるにつれ、また年間に予期される被曝回数が増加するにつれて、誘導調査レベルを小さくする必要性が増す。このような引き下げの極限値はICRP Publication 2に規定されている連続被曝の最大許容1日摂取量に相当するレベルであろう。

(91) ある放射性核種についての誘導調査レベルをいくらか低減させる必要性のあるもう1つの状態は、2種以上の核種がその各々について1調査レベルに近い量で混在していることが発見されたような場合である。

(92) 他方、ときには、いくぶんより高い誘導調査レベルが使用されてよいことがある。たとえば、長寿命の骨親和性核種による体内汚染の場合には、汚染発生時よりかなり後であっても、1日の尿中排泄量が検出限界あるいは誘導調査レベルをときに越えることが起こりうる。このような偶然のでき事には特別な意味をもたせる必要はなく、このような場合に必要で唯一の調査は、その作業者を確認し、その人の被曝歴をふりかえってしらべて、それが本当は不規則なバラツキであって新しい被曝の結果ではないことを示すためのものである。しかし、このためには、さらに試料採取を行なう必要があるであろう。

その後の調査

(93) いま述べたいくつかの例は例外的な場合で、一般的には、最初の日常検査により調査レベルを越えているということがわかった場合には、体内の放射性核種の量、分布および残留を、もっといねいに推定すべきである。これには、過去の被曝の調査、現在の被曝の詳細、これからの試料採取その他の方法によるモニタリングなどが含まれる。これらの調査を容易にするため、これらの調査の進行中に、汚染した者に新しい汚染が起らないことを保証する必要があるであろう。

(94) 個人の体内汚染の発見後にとられる特殊な処置は、汚染の性質、程度および時期に適したものでなければならない。可搬性放射性核種と非可搬性放射性核種の間には多くの重要な相違があるから、各グループに対して妥当な事後処置を分けて検討する。

(95) 可搬性放射性核種は細胞外液に入り、そして、第2章のモデルおよび、付録Cあるいは原論文に述べられている残留または排泄についての適切な式にしたがって代謝される。これらの式は、体内量が取り込み量と平衡する時を含めて、いろいろな時刻における体内量を推定するのに用いることができる。個人個人の間には大きい差が存在するので、できるならば今しらべている汚染した者についての一連の測定から、摂取、残留および排泄の相互関係を推定する方法がよいであろう。こうすることによって、決定器官に対する線量をより正確に推定することができるであろう。

(96) 非常に長寿命の骨親和性放射性核種については、尿排泄から体内量を算出することはむずかしく、体内器官への摂取と沈着が1年以上も前に起きた場合にはとくに困難である。第2章で述べたように、 ^{239}Pu の日排泄量は日によって大きく変動するので、排泄の少ない日にその最小検出可能量が尿中に見

出されれば、それは最大許容器官内量に対してかなりの割合に相当する器官内量の存在を示すことになろう。そしてこのことは、多分、他のすべての長寿命骨親和性核種についていえるであろう。Lafuma⁽⁴⁷⁾は、0.25 g のジエチレン・トリアミン五酢酸塩 (DTPA) の静脈注射が尿中排泄量を25~30倍にし、また細胞外液に入っている排泄可能なかたちのプルトニウムを一時的に浄化するという知見にもとづいて、幾年も前に起こったプルトニウムの体内汚染を立証する方法を示唆した。

(97) もし、これらの調査の結果が、ICRP Publication 9⁽⁴⁶⁾ の56項にある年間線量限度のいずれかの $1/20$ を越える器官線量を示したならば、この事実はその作業者の被曝記録に記入すべきである。もし、これらの結果が、ICRP Publication 9 の99~102 項に勧告されている最大値のいずれかを越えていることを示す場合には、作業者は委員会の勧告に従って取り扱われるべきである。

(98) 体内で比較的的非可搬性の放射性核種は、これを日常個人モニタリングによって検出することは難しいであろう。最初の徴候は、長く続く低いレベルの尿中排泄であろう。その後の調査は、可搬性放射性核種に対するものとは本質的に異なる。まず第一に、体内の非可搬性核種の存在およびその部位を確証することが必要であり、人体の体外測定が適用できる場合には、これが通常は最良の方法であろう。この段階において、汚染のあることが確認されたときには、肺、消化管あるいは傷口中の物質の種類および量を推定することが必要であろう。肺および胃腸管からの排出を追求するために糞分析が必要と思われる。もし、その量が適切な誘導調査レベル (87項参照) より大きいならば、この量が消失するまで追跡するため、また沈着が起きている1つまたは複数の組織への線量を推定するために、反復測定を行なうべきである。さらに、どの程度、組織系内汚染がおこっているかを発見するため、尿分析のプログラムを設けることが必要であろう。もし、いくらかでも発見されたときには、上に概

略を述べた可搬性核種についての原則に従うべきである。

(99) 汚染した傷はどんな場合でも専門医と協力して調査すべきである。

引用文献

1. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, as amended 1959 and revised 1962*. ICRP Publication 6, Pergamon Press, London (1964).
2. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Report of Committee 2 on Permissible Dose for Internal Radiation. ICRP Publication 2, Pergamon Press, London (1959).
3. *Assessment of Radioactivity in Man*, IAEA, Vienna (1964), STI/PUB/84 (2 volumes).
4. M. LIPPMANN, L. D. Y. ONG and W. B. HARRIS, *The Significance of Urine Uranium Excretion Data*, USAEC Report HASL-120 (1962).
5. *Effects of Inhaled Radioactive Particles*. Publication 848, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington (1961).
6. Task Group on Lung Dynamics, Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract, *Health Physics* **12**, 173 (1966).
7. I. S. EVE, An outline of the metabolism of inhaled and ingested insoluble radionuclides, *Br. J. Radiol.* **37**, 115 (1964).
8. Hanford Symposium on Inhaled Radioactive Particles and Gases, *Health Physics* **10**, 861 (1964).
9. R. G. THOMAS, Influence of aerosol properties and the respiratory pattern upon hazards evaluation following inhalation exposure, in Reference 3, vol. 1, p. 355.
10. R. L. HAYES, J. E. CARLTON and W. R. BUTLER, Jr., Radiation dose to the human intestinal tract from internal emitters, *Health Physics* **9**, 915 (1963).
11. I. S. EVE, A review of the physiology of the gastrointestinal tract in relation to radiation doses from radioactive materials, *Health Physics* **12**, 131 (1966).
12. *Symposium on Occupational Health Experience and Practices in the Uranium Industry*, USAEC Report HASL-58, p. 65 (1959).
13. J. HARRISON, The fate of radioiodine applied to human skin, *Health Physics* **9**, 993 (1963).
14. D. B. ZILVERSMIT, C. ENTENMAN and M. C. FISHLER, On the calculation of "turnover time" and "turnover rate" from experiments involving the use of labelling agents, *J. Gen. Physiol.* **26**, 325 (1943).
15. D. B. ZILVERSMIT and M. L. SHORE, A hydrodynamic model of isotope distribution in living organisms, *Nucleonics* **10**, 32 (1952).
16. *Methods of Radiochemical Analysis*, WHO Technical Report Series No. 173 (1959). (Also available as FAO Atomic Energy Series No. 1.)
17. Health Physics in Nuclear Installations, Symposium organized at Risø, May 1959, by OEEC and ENEA.
18. *Whole-Body Counting*, IAEA, Vienna (1962) STI/PUB/47.
19. *Diagnosis and Treatment of Radioactive Poisoning*, IAEA, Vienna (1963), STI/PUB/65.
20. *Radiological Health and Safety in Mining and Milling of Nuclear Material*, IAEA, Vienna (1964) STI/PUB/78 (2 vols.).
21. H. J. DUNSTER, Surface contamination measurements as an index of control of radioactive materials, *Health Physics* **8**, 353 (1962).
22. G. W. SPANGLER and C. A. WILLIS, Permissible contamination limits. In: *International Symposium on Surface Contamination, Gatlinburg, Tennessee, June 1964*, sponsored by American Association for Contamination Control, Health Physics Society and Oak Ridge National Laboratory.
23. A. E. J. EGGLETON and D. H. F. ATKINS, The identification of trace quantities of radioactive iodine compounds by gas-chromatographic and effusion methods, *Radiochimica Acta* **3**, 151 (1964).

24. D. MECHALI and J. PRADEL, Evaluation de l'irradiation externe et de la contamination interne des travailleurs dans les mines d'uranium francaises, in Reference 20, vol. I, p. 371.
25. J. C. GILLILAND and R. F. BELL, Methodology of monitoring uranium environmental exposures, in Reference 20, vol. I, p. 377.
26. E. POHL, Dose distribution received on inhalation of Rn-222 and its decay products, in Reference 20, vol. I, p. 221.
27. C. G. STEWART and S. D. SIMPSON, The hazards of inhaling radon-222 and its short-lived daughters: consideration of proposed maximum permissible concentrations in air, in Reference 20, vol. I, p. 333.
28. G. WALINDER, Determination of maximum permissible air concentrations of Tn-220 and Rn-222, in Reference 20, vol. I, p. 361.
29. R. J. SHERWOOD, *On the Interpretation of Air Sampling for Radioactive Materials*, UKAEA Report AERE-R4491 (1963).
30. W. A. LANGMEAD and D. T. O'CONNOR, The significance of radioactive aerosol measurements made in the working environment. *First International Congress of the International Radiation Protection Association, Rome, September 1966*, W. S. SNYDER (editor) Pergamon Press (1968).
31. S. JACKSON and G. W. DOLPHIN, The estimation of internal radiation dose from metabolic and urinary excretion data for a number of important radionuclides, *Health Physics* **12**, 481 (1966).
32. S. JACKSON, Creatinine in urine as an index of urinary excretion rate, *Health Physics* **12**, 843 (1966).
33. K. VENKATARAMAN, S. SOMASUNDARAM and S. D. SOMAN, An evaluation of radiation protection standards for Indian conditions, *Health Physics* **9**, 647 (1963).
34. D. S. DITTMER (editor), *Biological Handbooks: Blood and Other Body Fluids*, Federation of American Societies for Experimental Biology, Washington (1961).
35. E. E. POCHIN, Formulation of relationships between the radiation exposure of tissues and the excretion rate of nuclides, in Reference 3, vol. I, p. 3.
36. J. MÜLLER, A. DAVID, M. REJSKOVA and D. BREZIKOVA, Chronic occupational exposure to strontium-90 and radium-226, *Lancet* **ii**, 129 (1961).
37. R. A. KEHOE. In: *Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. II, F. A. PATTY (editor), John Wiley, New York, p. 941 (1963).
38. S. A. BEACH and G. W. DOLPHIN, Determination of plutonium body burdens from measurements of daily urine excretion, in Reference 3, vol. II, p. 603.
39. J. D. EAKINS and A. MORGAN, The role of faecal analysis in a bioassay program, in Reference 3, vol. I, p. 231.
40. C. W. SILL, J. I. ANDERSON and D. R. PERCIVAL, Comparison of excretion analysis with whole-body counting for assessment of internal radioactive contaminants, in Reference 3, vol. I, p. 217.
41. C. FABRY, Schema anatomo-physiologique du tractus gastro-intestinal à prendre en consideration pour le calcul des niveaux de contamination radioactive, Euratom Report EUR 489f (1963).
42. G. W. DOLPHIN and I. S. EVE, Dosimetry of the gastrointestinal tract, *Health Physics* **12**, 163 (1966).
43. J. VENNART, External counting, in Reference 19, p. 3.
44. W. H. LANGHAM, Determination of internally deposited radioactive isotopes from excretion analysis, *Amer. Indust. Hyg. Assoc. Quart.* **17**, 305 (1956).
45. S. M. SANDERS, Jr., Power functions relating excretion to body burden, *Health Physics* **2**, 295 (1960).
46. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, adopted September 17, 1965*. ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford (1966).
47. J. LAFUMA, C.E.A., Fontenay-aux-Roses, Personal communication

付 録 A

ICRP Publication 2 の代謝に関する数値の一覧表
(Publication 6 により改訂)

表 1 (44ページ) において、欄の表題はつぎの意味をもつ。

器官：表 1 (ICRP Publication 2) に示す q の値が最小であるような器官

ϵ : 該当する器官に対する $\Sigma EF (RBE) n$, (E の単位は MeV)

T_r : 放射能の半減期 (日)

T_b : 決定器官に対する生物学的半減期(日), 全身に対する値が決定器官に対する値と異なっている場合には全身に対する値を () 内に示す。

T_{eff} : 実効半減期 (日)

f_1 : 胃腸管から血液へ移行する割合

f_2 : 全身中の量に対する関連器官中の量の割合

f_2' : 血液から関連器官へ移行する割合

f_w : 経口摂取により体内に取り入れられた量のうち, 決定器官にとどまる割合

f_a : 吸入によって体内に取り入れられた量のうち, 決定器官にとどまる割合

q : 最大許容身体負荷量 (μCi)

MPC_w : 放射線作業員に対する飲料水中の40時間の週についての最大許容濃度
($\mu\text{Ci/ml}$)

MPC_a : 放射線作業員に対する吸入空気中の40時間の週についての最大許容濃度
($\mu\text{Ci/cc}$)

表 1 ICRP Publication 2 と 6 からとった代謝に関する数値

表の番号	1	5	12	12	12	12	12	12	12	12	1	1	1
放射性核種	器 官	ϵ	T_r	T_b	T_{eff}	f_1	f_2	f_3	f_o	f_u	q	MPC _w	MPC _n
1 ³ H(oxide)	体組織	0.010	4.5 × 10 ³	12	12	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1 × 10 ³	0.1	5 × 10 ⁻⁸
* 6 ¹⁴ C(CO ₂)	脂 肪	0.27	2.0 × 10 ⁶	40 (10)	40	1.0	0.1	0.025	0.025	0.02	400	0.04	6 × 10 ⁻⁸
11 ²² Na	全 身	1.6	950	11	11	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	10	1 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
15 ³² P	骨	3.5	14.3	1155 (257)	14.1	0.75	0.5	0.5	0.375	0.32	6	5 × 10 ⁻⁴	7 × 10 ⁻⁸
* 16 ³⁵ S	率 丸	0.056	87.1	90	44.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	400	7 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻⁸
17 ³⁶ Cl	全 身	0.26	1.2 × 10 ⁸	29	29	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	80	2 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷
20 ⁴⁵ Ca	骨	0.43	164	1.8 × 10 ⁴ (1.64 × 10 ⁴)	162	0.6	0.9	0.9	0.54	0.5	30	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸
26 ⁵⁹ Fe	脾 臓	0.34	45.1	600 (800)	41.9	0.1	0.02	0.02	2.0 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻³	20	4 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻⁷
27 ⁶⁰ Co	全 身	1.5	1.9 × 10 ³	9.5	9.5	0.3	1.0	1.0	0.3	0.4	10	4 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷
30 ⁶⁵ Zn	全 身	0.32	245	933	194	0.1	1.0	1.0	0.1	0.3	60	3 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻⁷
37 ⁸⁶ Rb	全 身	0.70	18.6	45	13.2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	30	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
38 ⁸⁵ Sr	全 身	0.33	65	1.3 × 10 ⁴	64.7	0.3	1.0	1.0	0.3	0.4	60	3 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
38 ⁸⁹ Sr	骨	2.8	50.5	1.8 × 10 ⁴ (1.3 × 10 ⁴)	50.4	0.3	0.99	0.7	0.21	0.28	4	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸
38 ⁹⁰ Sr	骨	5.5	1.0 × 10 ⁴	1.8 × 10 ⁴ (1.3 × 10 ⁴)	6.4 × 10 ³	0.3	0.99	0.3	0.09	0.12	2	1 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁹
* 52 ¹³² Te	腎 臓	0.96	3.2	30 (15)	2.9	0.9	0.25	0.07	0.02	0.03	3	5 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷
53 ¹³¹ I	甲 状 腺	0.23	8	138	7.6	1.0	0.2	0.3	0.3	0.23	0.7	6 × 10 ⁻⁵	9 × 10 ⁻⁹
53 ¹³² I	甲 状 腺	0.65	0.097	138	0.097	1.0	0.2	0.3	0.3	0.23	0.3	2 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
55 ¹³⁷ Cs	全 身	0.59	1.1 × 10 ⁴	70	70	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	30	4 × 10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻⁸
56 ¹⁴⁰ Ba	骨	4.2	12.8	65	10.7	0.05	0.7	0.7	0.035	0.19	4	6 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻⁷
58 ¹⁴⁴ Ce	骨	6.3	290	1500 (563)	243	<10 ⁻⁴	0.38	0.3	3.0 × 10 ⁻³	0.075	5	0.2	1 × 10 ⁻⁸
* 79 ¹⁹⁸ Au	腎 臓	0.41	2.7	280 (120)	2.7	0.1	0.03	0.03	3.0 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻³	20	0.07	3 × 10 ⁻⁸
* 84 ²¹⁰ Po	脾 臓	55	138.4	60 (30)	42	0.06	0.07	0.04	2.0 × 10 ⁻³	0.01	0.03	2 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻¹⁰
88 ²²⁶ Ra	骨	110	5.9 × 10 ³	1.64 × 10 ⁴ (900)	1.6 × 10 ⁴	0.3	0.99	0.1	0.03	0.04	0.1	4 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻¹¹
90 Th nat	骨	270	?	7.3 × 10 ⁴ (5.7 × 10 ⁴)	7.3 × 10 ⁴	<10 ⁻⁴	0.9	0.7	7.0 × 10 ⁻³	0.18	0.01	3 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹²
92 U nat & ²³⁸ U	腎 臓	43	?	15 (100)	15	<10 ⁻²	0.065	0.11	1.1 × 10 ⁻³	0.028	5 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻¹¹
92 ²³³ U	骨	250	5.9 × 10 ⁷	300 (100)	300	<10 ⁻²	0.85	0.11	1.1 × 10 ⁻³	0.028	0.05	1 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹⁰
92 ²³⁴ U	骨	240	9.1 × 10 ⁷	300 (100)	300	<10 ⁻²	0.85	0.11	1.1 × 10 ⁻³	0.028	0.05	1 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹⁰
92 ²³⁵ U	腎 臓	46	2.6 × 10 ¹¹	15 (100)	15	<10 ⁻²	0.065	0.11	1.1 × 10 ⁻³	0.028	0.03	1 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹⁰
93 ²³⁹ Np	骨	0.98	2.33	7.3 × 10 ⁴ (3.9 × 10 ⁴)	2.33	<10 ⁻⁴	0.45	0.45	4.5 × 10 ⁻⁵	0.11	30	100	4 × 10 ⁻⁸
94 ²³⁹ Pu	骨	270	8.9 × 10 ⁶	7.3 × 10 ⁴ (6.5 × 10 ⁴)	7.2 × 10 ⁴	3 × 10 ⁻⁵	0.9	0.8	2.4 × 10 ⁻⁵	0.2	0.04	1 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²
94 ²⁴¹ Pu	骨	14	4.8 × 10 ³	7.3 × 10 ⁴ (6.5 × 10 ⁴)	4.5 × 10 ³	3 × 10 ⁻⁵	0.81	0.8	2.4 × 10 ⁻⁵	0.2	0.9	7 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻¹¹

* ¹⁴C, ³⁵S, ¹³²Te, ¹⁹⁸Au および ²¹⁰Po の決定器官は付録Cに使用されている決定器官と異なる。

変更理由はそれぞれについてその核種を記載してある付録C中の節に与えられている。

付 録 B

放射性核種の残留の数式化

$q_0 \mu\text{Ci}$ の放射性核種の 1 回取り込みの後、時刻 t における体内量 $q(t)$ は次式にしたがって時間とともに減少していく。

$$\frac{dq(t)}{dt} = -E(t) - \lambda_r q(t) \quad (\text{B } 1)$$

ここで $E(t)$ は時刻 t において単位時間あたり排泄される量、 λ_r は放射性崩壊定数。

時刻ゼロでの体内量に対する割合で表わした、体内量の時間的減少は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dR(t)}{dt} &= \frac{d(q(t)/q_0)}{dt} = -\frac{E(t)}{q_0} - \lambda_r \frac{q(t)}{q_0} \\ &= -Y(t) - \lambda_r R(t) \end{aligned} \quad (\text{B } 2)$$

ここで $R(t)$ は時刻 t における残留量の初期体内量に対する割合、 $Y(t)$ は時刻 t における単位時間あたりの排泄量の初期体内量に対する割合。

(B 1) 式を積分すると

$$q(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[q_0 - \int_0^t \exp(\lambda_r \tau) E(\tau) d\tau \right] \quad (\text{B } 3)$$

ここで $\exp(\lambda_r \tau) \cdot E(\tau)$ は時間 τ の間の放射性崩壊を補正した、時刻 τ における単位時間当りの排泄量である。

同様に(B 2)の積分形は、

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[1 - \int_0^t \exp(\lambda_r \tau) Y(\tau) d\tau \right] \quad (\text{B } 4)$$

汚染した個人から排泄される放射性核種の量を逐次測定し、その放射能の崩壊を汚染時から排泄時までの期間について補正してグラフに描くと、次の2つの数学的な関係式のうちのいずれかが多くの場合に得られることが経験上見出されている。

(a) $\log [E(t) \exp(\lambda_r t)]$ を t に対してプロットすると、それが1つまたは2つ以上の直線に分解できる。このような観測結果を記述する一般式は

$$E(t) \exp(\lambda_r t) = \sum_i k_i \exp(-\beta_i t) \quad (\text{B5})$$

または

$$E(t) = \exp(-\lambda_r t) \sum_i k_i \exp(-\beta_i t) \quad (\text{B6})$$

ここで、各直線につき、 k_i は縦軸との交点の値の逆対数であり、便宜上 $q_0 K_i \beta_i$ に等しいと置く。 β_i は直線の傾斜である。

$$(\text{B6}) \text{より、} Y(t) = \exp(-\lambda_r t) \sum_i K_i \beta_i \exp(-\beta_i t) \quad (\text{B7})$$

もし、その放射性核種の全部が指数関数的に排泄されるならば

$$\sum_i K_i = 1$$

である。

(b) $\log [E(t) \exp(\lambda_r t)]$ を時間の対数に対してプロットすると、汚染の時よりいくらか後の期間において直線となることがあり、次の式があてはまる。

$$E(t) \exp(\lambda_r t) = n a t^{-(n+1)} \quad (\text{B8})$$

またはもっと正確には、比較的早い時刻に対して、

$$E(t) = \exp(-\lambda_r t) \cdot n a (t+x)^{-(n+1)} \quad (\text{B9})$$

ここで $a = q_0 A$ 、 t は汚染の時からの時間、 x は 0.01~10 (普通は 0.1~4) の間の定数、 n は 1 より小さい正数である。

(B9)より、

$$Y(t) = \exp(-\lambda_r t) \cdot n A (t+x)^{-(n+1)} \quad (\text{B10})$$

(B7)式を(B4)式の $Y(t)$ に代入すれば

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[1 - \sum_i K_i + \sum_i K_i \exp(-\beta_i t) \right] \quad (\text{B11})$$

[] のなかの量は安定同位体の体内量の時間的変化を示し、2つの部分にわけて考えられる。第1項の $1 - \sum_i K_i$ は排泄されない部分を示し、残りの $\sum_i K_i \exp(-\beta_i t)$ は排泄される部分の時間的減少を示す。普通そうであるように、 $\sum_i K_i = 1$ であれば、その核種が全部排泄される形で存在することになり、(B11)式は簡単に次の式となる。

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \sum_i K_i \exp(-\beta_i t) \quad (\text{B12})$$

(B10)式を(B4)式の $Y(t)$ に代入すると

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[1 - Ax^{-n} + A(t+x)^{-n} \right]^* \quad (\text{B13})$$

前と同様に [] 内の量は安定同位体の代謝を示し、 $1 - Ax^{-n}$ は排泄されない部分に、 $A(t+x)^{-n}$ は時間とともに次第に排泄される部分に相当する。普通そうであるように $Ax^{-n} = 1$ であれば、(B13)式は簡単に次の式となる。

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \cdot A(t+x)^{-n} \quad (\text{B14})$$

* これらの数式は、次の理由からプルトニウムの残留および排泄には適用できない。

- (a) (B13)式は(B14)式にならない。その理由は、プルトニウムの体内量の僅か数パーセントしか作業者の一生の間に排泄されないからである。
- (b) (B12), (B14)式によって示されるように、ある放射性核種の残留式は一般に排泄式の積分によって得られる。しかし、 ^{239}Pu の場合には、(B8), (B9)および(B10)式中の $(n+1)$ の値は1より小さく、積分した形(B13)および(B14)式では、べき数が正となり、残留が時間とともに増加するという結果となる。この結果は生物学的には不合理であるから、残留式を排泄データのみから誘導することは不可能である。
- (c) (B4)および(B9)式を ^{239}Pu に適用すると

$$R(t) = 1 - \int_x^{t+x} nA(t+x)^{-(n+1)}$$

もし $(n+1)$ が1より小さいと積分は無制限に増大し、最後には $R(t)$ が負になる。Langham はこの困難を指摘したが (*Brit. J. Radiol., Suppl. 7, p. 95 1957*), $(n+1)$ は1に非常に近い (0.94) ので、この積分は t が作業者の一生の 10^{15} 倍以上にならないと1を越えない。

これらの理由により、組織系内プルトニウムによる組織線量を計算する目的のためには、146ページに示すように $R(t)$ は1であると仮定される。

(48)

付録Bの引用文献1, 2および3にこの型の残留関数の使用例が述べられている。

^{90}Sr のようないくつかの放射性核種では, 汚染後の初期には排泄は指数関数的であり, 後期にはべき関数的であることが見出されている。(B12), (B14)式を誘導したのと同じ手順によって, ^{90}Sr の残留は次の一般式で表わされることを示すことができる。

$$R(t) = \exp(-\lambda_r t) \left[K \exp(-\beta_i t) + (1-K) (t+x)^{-n} \right] \quad (\text{B15})$$

体内の放射性核種の残留率式の t_1 から t_2 までの期間にわたる時間積分は, (これは受けた線量に比例する) (B12), (B14)および(B15)式を時間で積分すれば得られる。

(B12)式より

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt &= \int_{t_1}^{t_2} \exp(-\lambda_r t) \cdot \sum_i K_i \exp(-\beta_i t) dt \\ &= \sum_i K_i \frac{\exp\{-(\lambda_r + \beta_i) t_1\} - \exp\{-(\lambda_r + \beta_i) t_2\}}{\lambda_r + \beta_i} \end{aligned} \quad (\text{B16})$$

(B14)式より

$$\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \exp(-\lambda_r t) \cdot A (t+x)^{-n} dt \quad (\text{B17})$$

もし放射能の崩壊が無視できると, 積分は

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt &= \int_{t_1}^{t_2} A (t+x)^{-n} dt \\ &= \frac{A}{1-n} \{(t_2+x)^{1-n} - (t_1+x)^{1-n}\} \end{aligned} \quad (\text{B18})$$

もし t が x に比べ大であれば x は無視され, (B18)式は次のようになる。

$$\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt = \frac{A}{1-n} (t_2^{1-n} - t_1^{1-n}) \quad (\text{B19})$$

もし放射能の崩壊が無視できないならば, (B14)式を積分することはもっと困難である。積分は引用文献1, 2, 4および5に示されているように行なう

ことができるし、または λ, t があまり大きくない場合には (B14) 式の積分は近似的には次の多項式で示される (文献 6)。

$$A \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-\lambda_r)^i}{i! (i+1-n)} \left[t^{i+1-n} \right]_{t_1}^{t_2} \quad (\text{B20})$$

付録 B の引用文献

1. C. G. STEWART, E. VOGT, A. J. W. HITCHMAN and N. JUPE, The excretion of strontium-90 and caesium-137 by the human, *Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, **23**, 123 (1958).
2. S. M. SANDERS, Jr., Power functions relating excretion to body burden, *Health Physics* **2**, 295 (1960).
3. J. H. MARSHALL, Theory of alkaline earth metabolism, *J. Theor. Biol.* **6**, 386 (1963).
4. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Report of Committee 2 on Permissible Dose for Internal Radiation. ICRP Publication 2, Pergamon Press, London, p. 36 (1959).
5. R. E. ROWLAND and C. J. LEUER, *An Evaluation of the Incomplete Gamma Function Over a Range of Biologically Significant Values*, USAEC Report ANL-6398 (Jan.-June 1961).
6. W. S. SNYDER, personal communication.

付 録 C

個々の核種に関するデータ

^3H	52
^{14}C	54
^{22}Na	60
^{32}P	63
^{35}S	65
^{36}Cl	69
^{45}Ca	71
^{59}Fe	74
^{60}Co	78
^{65}Zn	82
^{86}Rb	86
^{85}Sr , ^{89}Sr , ^{90}Sr	89
^{132}Te と ^{132}I	94
^{131}I	103
^{137}Cs	109
^{140}Ba	112
^{144}Ce	115
^{198}Au	118
^{210}Po	122
^{226}Ra	125

天然 Th	129
²³³ U, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U, 天然 U	134
²³⁹ Np	140
²³⁹ Pu, ²⁴¹ Pu	144

用 語

F_e = 排泄された全量のうち呼気中に存在する割合

F_f = 排泄された全量のうち糞中に存在する割合

F_p = 排泄された全量のうち汗中に存在する割合

F_u = 排泄された全量のうち尿中に存在する割合

$R(t)$ = 汚染発生から t 日後に全身中に残留する割合*

$Y(t)$ = 汚染発生後 t 日目に全排泄経路を通じ、1日あたり排泄される割合*

$Y_u(t)$, $Y_f(t)$ など = 単一の経路により排泄される割合*

$Q = 1 \mu\text{Ci}$ の取り込みまたは沈着の結果の μCi -日であらわされた体内汚染の
時間積分

D = 決定器官が受ける許容年線量の20分の1に等しい線量

t = 汚染後の日数

DIL = 誘導調査レベル (Derived Investigation Level)

注意 付録C中に示したすべての残留率式と排泄率式において、放射性崩壊の
項は省略されている。

* (訳注) この割合は最初の取り込み量に対する比で示される。

^3H (酸化物)1. 放射性崩壊データ (文献1)(a) 半減期： 4.5×10^3 日(b) 放射線：型 β^- $E_{\max} = 0.018 \text{ MeV}$ 2. $\Sigma EF(RBE) n$

体組織：0.010

3. 代 謝

酸化トリチウムの代謝は人体について広く研究されてきた(文献2, 3)。それは吸入された空気から急速にかつ完全に吸収される。休息時または軽い活動をおこなっている時、水蒸気の肺を通じての吸収率は、蒸気にさらされた全身の皮膚からの吸収率とほぼ等しい。それは体内水全部と急速に平衡になり、3～4時間すると尿も他の体液と同じ濃度となる。したがって、その排泄割合は水の排泄割合と等しい。

4. 残留率式

$$R(t) = \exp\left(-\frac{0.693}{T_b} t\right)$$

 $T_b = 9.3 \sim 13$ 日 (被検者8人) 平均11.5日 (文献2) $= 9.5 \pm 4.1$ 日 (被検者310人) (文献3) $= 6.5 \sim 12.5$ 日 (被検者12人) 平均9.8日 (文献4)

それゆえ、人における酸化トリチウムの平均の生物学的半減期として10日を採用することは正当であろう。水の体内通過量が増加すると、また、人体の水含有量が減少すると、 T_b はより小さくなる。このことは文献2, 3, 4および5に報告された研究によって結論づけられた。

5. 排泄率式

$$Y(t) = 0.07 \exp\left(-\frac{0.693}{10} t\right), \text{ 1日あたり。}$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性, 全身に対し,

$$Q = \int_0^{50y} \exp(-0.0693) dt \approx 14 \mu\text{Ci} - \text{日}$$

もし, 体内水 (標準人で $4.3 \times 10^4 \text{ g}$ の重さがある) が決定器官であると考えられるならば, $1 \mu\text{Ci}$ の摂取から全身が受ける線量は

$$14 \times 51.2 \times \frac{\epsilon}{m} = 1.67 \times 10^{-4} \text{ rem}$$

∴ 線量 D (0.25 rem) は

$$\frac{0.25}{1.67 \times 10^{-4}} \mu\text{Ci} = 1.5 \text{ mCi}$$

の摂取で与えられる。これは 43 l の体内水 (尿を含む) 中で, $35 \mu\text{Ci/l}$ の初期濃度に相当する。

(b) 非可搬性: 計算しない。

7. 調査レベル

(a) 可搬性: 全身に 1.5 mCi 。

(b) 非可搬性: 計算しない。

(a)に対応する尿中濃度 = $35 \times \exp(-0.07 t) \mu\text{Ci/l}$

t (日)	尿中の DIL ($\mu\text{Ci/l}$)
14	13
30	4
60	0.5

8. 検出限界

尿の液体シンチレーション計数: $0.1 \mu\text{Ci/l}$, $5 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/l}$ まで検出範囲を広げることが可能 (文献 3)。

0.1 $\mu\text{Ci/l}$ という感度によれば, 1 調査レベルの体内汚染の検出は, 発生して12週間後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. E. A. PINSON and W. H. LANGHAM, *J. App. Physiol.* **10**, 108 (1957).
3. F. E. BUTLER, in *Assessment of Radioactivity in Man*, IAEA, Vienna, vol. II, p. 431 (1964), STI/PUB/84.
4. R. V. OSBORNE, Chalk River Nuclear Laboratories, private communication.
5. H. L. BUTLER and J. H. LEROY, *Health Physics* **11**, 283 (1965).

^{14}C

1. 放射性崩壊データ (文献1)

- (a) 半減期: 2.03×10^6 日
- (b) 放射線: 型 β^- $E_{\text{max}} = 0.155 \text{ MeV}$

2. $\Sigma EF (RBE) n$

- (a) 全 身: 0.054
- (b) 骨 : 0.27

3. 代 謝

^{14}C の代謝はそれを含む化合物によってかなり異なる (文献2)。このことは決定器官を定めるうえに重要な関係があろう。もっとも集中的に研究されている化合物は, 重炭酸塩- CO_2 , グリシンおよび酢酸塩であるので, これら3つの形における ^{14}C に限って論ずることにする。

健康な9人についての CO_2 交替の測定は, プールの大きさが $487 \pm 103 \text{ mM/m}^2$ 体表面積, あるいは $13 \pm 2.8 \text{ mM/kg}$ 体重であり, プールを通る流量率が $602 \pm 198 \text{ mM/m}^2/\text{h}$, あるいは $15 \pm 4.7 \text{ mM/kg/h}$ であることを示した

(文献 3, 4)。CO₂ は骨の炭酸塩と 0.2~0.6 mole/h の割合で交換される。

標識された重炭酸塩をネコに静脈注射したのち、¹⁴C の残留は次の式によって記述された (文献 5, 6)。

$$R(t) = 0.284 \exp\left(-\frac{0.693}{0.002} t\right) + 0.415 \exp\left(-\frac{0.693}{0.02} t\right) \\ + 0.301 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right)$$

この式の第 3 項は骨中の残留であると確認された (文献 6)。

4 人の患者に標識された重炭酸塩を静脈注射し、2 時間にわたってはき出された CO₂ を測定したところ (文献 7)、CO₂ は 0.3 分 (これは疑わしい)、0.002 日、0.014 日、0.1 日の半減期で除去されたことを示した。

2 人に標識された重炭酸塩を静脈注射し、6 時間にわたりはき出された放射性 CO₂ を測定 (文献 8) して、73 分 (0.05 日) というはっきりした残留の半減期が得られた。

これらの研究のすべてから、人と動物では、放射性二酸化炭素が血液に入ってから 3 時間でその大部分が呼気によって除かれると結論されよう。しかし、ネコについての結果が人にあてはまるとして、放射性二酸化炭素の 30% が 0.4 日の生物学的半減期で骨中に沈着していると仮定することは、慎重なやり方であろう。こう仮定できれば骨が決定器官となる。

C 2 の位置に標識したグリシンを患者に投与した 3 つの研究から、3 つないし 4 つの指数項をもつ残留方程式がえられた。この結果は次の表のとおりである。1 日以上残留するグリシンが体内のポリペプチドの中に入っているというある証拠がある。もしこれが実際そのとおりだとすれば、全身が決定器官となるろう。

文献 7 で、C 2 に標識されたグリシンまたは酢酸塩の投与後 40 日間にわたる ¹⁴C の全排泄は、

文 献	患者の数	投 与 経 路	残 留 式 の 係 数	半減期(日)
7	4	記されていない	0.22	0.11
			0.20	0.56
			0.08	2.37
			0.18	17.1
9	4	静 脈 内	0.25	0.13
			0.20	1.3
			0.42	10
10	6	記されていない	0.21	0.12
			0.14	0.97
			0.26	6.1
			0.26	71.5

尿 4～10%

糞 1～4%

呼気 68% (最初の日に40%)

と報告された。

C 2 に標識された酢酸塩を 4 人の患者に注射し(文献 7), C 2 に標識されたグリシンと同じ除去率をえた。C 1 に標識された酢酸塩を 5 人に注射後, 最初の 5 時間内に除去された放射性 CO_2 は, 同じ研究における標識重炭酸塩についての値と類似して, 87 分の半減期で減った(文献 8)。

Atwater と Benedict (文献 11) は人の全炭素代謝を多数測定した結果を報告している。彼らが報告した炭素の相対的な排泄の平均は,

$$F_u = 0.036$$

$$F_f = 0.027$$

$$F_e = 0.937$$

である。

4. 残留率式

(a) $\text{NaHCO}_3\text{-CO}_2$ およびカルボキシル基に標識した脂肪酸(代謝データの要

約)

$$R(t) = 0.7 \exp\left(-\frac{0.693}{0.05} t\right) + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right)$$

(b) C 2 に標識されたグリシンと酢酸塩 (代謝データからえらんだもの)

$$R(t) = 0.2 \exp\left(-\frac{0.693}{0.12} t\right) + 0.2 \exp\left(-\frac{0.693}{0.9} t\right) \\ + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{6} t\right) + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{35} t\right)$$

5. 排泄率式

1日より長い時間に対して, 上の残留式のどちらでも第1項は無視され, 残りの項の微分は次式をあたえる。

(a) $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$:

$$Y(t) = 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right)$$

(b) C 2 に標識されたグリシン :

$$Y(t) = 0.15 \exp\left(-\frac{0.693}{0.9} t\right) + 0.03 \exp\left(-\frac{0.693}{6} t\right) \\ + 0.006 \exp\left(-\frac{0.693}{35} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性 :

(i) 骨中の ^{14}C (炭酸塩)

$$Q = \int_0^{50\text{y}} \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right) dt = 0.58 \mu\text{Ci-日}$$

これは, 骨中の初期含有量が $1 \mu\text{Ci}$ のとき, 骨に対し次の線量を与える。

$$0.58 \times 51.2 \times \frac{e}{m} = 0.58 \times 51.2 \times \frac{0.27}{7,000}$$

$$= 1.1 \times 10^{-3} \text{ rem}$$

それゆえ, 線量 D (1.5 rem) は骨中の初期量 1.4 mCi により与えられ, こ

(58)

れは全身につき 4.7 mCi の取り込み量に相当する。

(ii) 全身中の C 2 に標識されたグリシンまたは酢酸塩

$$\begin{aligned} Q &= 0.2 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{0.12} t\right) dt + 0.2 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{0.9} t\right) dt \\ &\quad + 0.3 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{6} t\right) dt + 0.3 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{35} t\right) dt \\ &= 0.035 + 0.26 + 2.6 + 15.2 \mu\text{Ci-日} \\ &= 18.1 \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

これは、1 μCi の体内摂取から全身に対し次の線量を与える。

$$18.1 \times 51.2 \times \frac{0.054}{70,000} = 7.2 \times 10^{-4} \text{ rem}$$

それゆえ、線量 D (0.25 rem) は、350 μCi が体内に摂取されることによって与えられる。

(b) 非可搬性：計算しない。

7. 調査レベル

全身に 4.7 mCi の ^{14}C (炭酸塩) の摂取，または，骨中における 1.4 mCi の初期含有量。

1 日より大きい t の値に対して骨中の 1.4 mCi に対応する呼気への排泄のレベルは

$$\begin{aligned} &F_e \times 1,400 \times 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right) \mu\text{Ci/日} \\ &= 0.937 \times 1,400 \times 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right) \mu\text{Ci/日} \\ &= 656 \exp(-1.73 t) \mu\text{Ci/日} \end{aligned}$$

もし、吸呼率が $2 \times 10^7 \text{ cm}^3/\text{日}$ で、試料採取期間が 5 日ならば、これははき出された空気中で $5.7 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ の濃度に相当することになる。

1 日より大きい t の値に対して骨中の 1.4 mCi に対応する尿中への排泄のレベルは

$$\begin{aligned}
 & F_u \times 1,400 \times 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right) \mu\text{Ci/日} \\
 & = 0.036 \times 1,400 \times 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.4} t\right) \mu\text{Ci/日} \\
 & = 25 \exp(-1.73 t) \mu\text{Ci/日}
 \end{aligned}$$

8. 検出限界

液体シンチレーション計数：尿中の 10 nCi/l (文献12), または CO₂ の 5 pCi/mM

燃焼させ CO₂ を捕集：1 試料あたり 0.1 nCi (文献13, 14)

尿中の 10 nCi/l (14 nCi/日に相当する) という感度によれば, 1 調査レベルの体内汚染の検出は, それが発生して 4 日後にも可能である。CO₂ で 5 pCi/mM, または, はき出された空気では 10 pCi/l という感度によれば, 1 調査レベルの体内取り込みの検出は, 取り込みの 5 日後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. G. P. HOWELLS, Metabolism of tritium- and ¹⁴C-labelled compounds in diagnostic use, MRC Committee on Protection against Ionizing Radiations, PIRC/PL/63/31.
3. G. V. LEROY, G. T. OKITA, E. C. TOCUS and D. CHARLESTON, *Int. J. Appl. Rad. and Isot.* **7**, 273 (1960).
4. G. V. LEROY, G. T. OKITA and E. C. TOCUS, *J. Lab. Clin. Med.* **56**, 922 (1960).
5. H. L. KORNBERG, R. E. DAVIES and D. R. WOOD, *Biochem. J.* **51**, 351 (1952).
6. R. STEELE, *Biochem. J.* **60**, 447 (1955).
7. L. HELLMAN, W. PEACOCK, M. EDINOFF, R. ROSENFELD, T. GALLAGHER and K. DOBRINER, Radioisotope techniques, *Proceedings of the Isotope Techniques Conference, Oxford, July 1951*, H. M. Stationery Office, London (1953).
8. N. BAKER, W. W. SHREEVE, R. A. SHIPLEY, G. E. INCEFY and M. MILLER, *J. Biol. Chem.* **211**, 575 (1954).
9. N. I. BERLIN, B. M. TOLBERT and J. H. LAWRENCE, *J. Clin. Invest.* **30**, 73 (1951).
10. N. I. BERLIN and B. M. TOLBERT, *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* **88**, 386 (1955).
11. W. O. ATWATER and F. G. BENEDICT, *Experiments on the Metabolism of Matter and Energy in the Human Body*, U.S. Department of Agriculture, Office of Experiment Stations - Bulletin No. 138, Government Printing Office, Washington (1903).
12. S. JACKSON and N. A. TAYLOR, UKAEA Report AHSB(RP)R37 (1964).
13. F. H. WOELLER, *Anal. Biochem.* **2**, 508 (1961).
14. H. JEFFAY and J. ALVAREZ, *Anal. Chem.* **33**, 612 (1961).

^{22}Na

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期：950日

(b) 放射線：

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^+	0.544	89.8
	1.830	0.06
E. C.	—	10.2
γ	0.51	180
	1.274	100

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 全身：1.6

(b) 肺：0.8

3. 代謝

Black (文献2) によれば、70 kg の体重の人の体内で安定ナトリウムは次のように分布している。

細胞外液 58%

細胞内液 9%

骨 33%

12人についての実験から、Smilay ら (文献3) はナトリウムの摂取と除去との関係を示した。摂取量を1日当り 0.25 g から 30 g に増加すると、生物学的半減期は335日から5日に短縮された。

$F_u \approx 1.0$ (文献4)

$F_f \approx 0.01 \sim 0.03$ (文献4)

発汗によるナトリウムの排出は、寒い気候で1日当り 0.023~0.184 g であ

り (文献5), 次の F_p に相当すると結論される。

$$\frac{0.023 \sim 0.184 \text{ g/日}}{3 \text{ g Na(尿中)/日}} = 0.007 \sim 0.06$$

暑い気候または激しい運動中には, ナトリウム 9g が発汗によって6時間で失われるであろう (文献2)。嘔吐物は尿および血漿と同じ比放射能をもっている (文献4)。

4. 残留率式

$^{22}\text{NaCl}$ を3人の被検者に1回経口投与したのちおこなった全身計測は次の残留率式を与えた。

$$R(t) = 0.49 \exp\left(-\frac{0.693}{8.5} t\right) + 0.51 \exp\left(-\frac{0.693}{13.5} t\right) \\ + 0.0027 \exp\left(-\frac{0.693}{445} t\right) \quad (\text{文献6})$$

5. 排泄率式 (残留式の微分から)

$$Y(t) = 0.04 \exp\left(-\frac{0.693}{8.5} t\right) + 0.026 \exp\left(-\frac{0.693}{13.5} t\right) \\ + 4.2 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{0.693}{445} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性:

全身に対し

$$Q = 0.49 \int_0^{50y} \exp(-0.082 t) dt + 0.51 \int_0^{50y} \exp(-0.051 t) dt \\ + 0.0027 \int_0^{50y} \exp(-0.0023 t) dt = 17 \mu\text{Ci-日}$$

それゆえ, 初期体内量 $1 \mu\text{Ci}$ からの線量は

$$17 \times 51.2 \times \frac{\epsilon}{m} = 17 \times 51.2 \times \frac{1.6}{70,000} = 0.02 \text{ rem}$$

したがって, 線量 D (0.25 rem) は, $12.5 \mu\text{Ci}$ によって与えられる。

(62)

(b) 非可搬性：計算しない。

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に $13 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：計算しない。

(a)に対応する尿中排泄

$$= 13 [0.04 \exp(-0.082 t) + 0.02 \exp(-0.051 t)] \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)	全身中の DIL (nCi)
30	100	1,900
100	2	60
365	—	20

8. 検出限界

全身計測：1 nCi (文献7)

これによれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して4年後にも可能である。

もし日常の方法による尿中での検出限界が14 nCi/日にあたる 10 nCi/l であるならば、これは1調査レベルの摂取後約2か月たってこれを発見するのに十分であろう。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- D. A. K. BLACK, *Sodium Metabolism in Health and Disease*, Charles C. Thomas Co., 301/327 East Lawrence Avenue, Springfield, Illinois (1952).
- M. G. SMILAY, L. K. DAHL, S. C. SPRARAGEN and L. SILVER, *J. Lab. Clin. Med.* **58**, 60 (1961).
- M. M. MARTIN and G. WALKER, *Metabolism* **6**, 466 (1957).
- M. M. MARTIN, G. WALKER and M. CHAPMAN, *Lancet* **i**, 653 (1957).
- C. R. RICHMOND, USAEC Report LA-2207 (1958).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

32P

1. 放射性崩壊データ (文献 1)

(a) 半減期: 14.2日

(b) 放射線: 型 β^- $E_{\max}=1.71$ MeV2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 肺: 0.69

(b) 骨: 3.5

3. 代謝

これは文献 2 と 3 に適切にまとめられている。

 F_u F_f

0.9 0.1 血中への摂取の場合 (文献 4, 5)

0.75 0.25 非飢餓状態での経口摂取の場合 (文献 2)

0.9 0.1 飢餓状態での経口摂取の場合 (文献 2)

4. 残留率式

Jackson と Dolphin (文献 3) は公表された残留と排泄の測定結果を次式で要約した。

$$R(t) = 0.15 \exp\left(-\frac{0.693}{0.5} t\right) + 0.15 \exp\left(-\frac{0.693}{2} t\right) \\ + 0.4 \exp\left(-\frac{0.693}{19} t\right) + 0.3$$

残る部分 0.3 は骨中残留をあらわしていて, ICRP Publication 2 に定められているように 257日の T_b で排泄されるものと考えられよう。実用上は, 体内からの消失は放射性崩壊に支配されるので, この最後の 30% に対してはどんな T_b を使うことも不必要である。

5. 排泄率式 (残留式の微分から)

(64)

$$Y(t) = 0.21 \exp\left(-\frac{0.693}{0.5} t\right) + 0.052 \exp\left(-\frac{0.693}{2} t\right) \\ + 0.015 \exp\left(-\frac{0.693}{19} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性:

残留式の第4項が骨中残留を示すとすれば、初期骨格内量 $1 \mu\text{Ci}$ は

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{14} t\right) dt = 20 \mu\text{Ci-日}$$

を与え、骨への線量は

$$20 \times 51.2 \times \frac{3.5}{7,000} = 0.51 \text{ rem}$$

となる。それゆえ、線量 D (1.5 rem) は、初期骨格内量 $3 \mu\text{Ci}$ により与えられ、これは全身へ $10 \mu\text{Ci}$ の取り込み量に相当する。

(b) 非可搬性:

肺における最大許容¹/4年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ \text{(40 h)} \\ = 0.1 \times 8 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 = 1.26 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性: 全身への $10 \mu\text{Ci}$ の摂取, または, 骨に $3 \mu\text{Ci}$ の初期沈着

(b) 非可搬性: 肺に $1.3 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$= 10 F_u \left[0.2 \exp\left\{-0.693 \left(\frac{1}{0.5} + \frac{1}{14}\right) t\right\} \right. \\ \left. + 0.05 \exp\left\{-0.693 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{14}\right) t\right\} \right. \\ \left. + 0.015 \exp\left\{-0.693 \left(\frac{1}{19} + \frac{1}{14}\right) t\right\} \right] \mu\text{Ci/日}$$

ここで $F_u=0.9$ 。

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)
14	45
30	10

8. 検出限界

(a) 尿の放射化学分析：40 pCi/l, これは 56 pCi/日に相当する（文献2）。
これによれば1調査レベルに相当する摂取の検出は、それが起こって3か月後にも可能である。

(b) 全身計測：150 nCi（文献6）

これによれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して2か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- J. D. EAKINS, P. J. GOMM and S. JACKSON, UKAEA Report AHSB(RP)R44 (1965).
- S. JACKSON and G. W. DOLPHIN, *Health Physics* **12**, 481 (1966).
- D. L. WEIJER, H. E. DUGGAN and D. B. SCOTT, *J. Can. Assoc. Radiol.* **13**, 81 (1962).
- L. A. ERF, L. W. TUTTLE and J. H. LAWRENCE, *Annals of Int. Med.* **15**, 487 (1941).
- J. RUNDO, AERE, Harwell, personal communication.

35S

1. 放射性崩壊データ（文献1）

(a) 半減期：87日

(b) 放射線：型 β^- $E_{\max}=0.167$ MeV

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 全身：0.056

3. 代 謝

イオウの代謝はそれが入っている化合物の化学形に依存する。イオウの代謝のいくつかの点が文献2に要約されている。放射性イオウの人における代謝に関する情報は、たいてい3つの形、すなわち無機硫酸塩、元素状イオウ、およびシスチンに関して得られている。これらを順に論じることにする。

標識された硫酸ナトリウムを人に静脈注射する方法は、人の細胞外液の容積測定に便利な技法である(文献3, 4)。この方法で、体内にある硫酸塩が分布する容積は体重の $14.6 \pm 2.7\%$ と測定された。7人について注射後1時間にわたって排泄と残留を追跡したところ(文献3)、2つの生物学的半減期、2.5分と139分が確認された。6人に注射した後、尿中排泄をもっと長い期間にわたり間隔をおいて反復測定したところ(文献4)、排泄の半減期は288分から522分で、平均354分(5.9時間)であった。標識された硫酸ナトリウムの大量を、軟骨肉腫をもつ1患者に3回べつべつな時期に静脈注射した(文献5)。残留と尿中排泄の測定結果は次式によって表わすことができた(文献2)。

$$R(t) = 0.8 \exp\left(-\frac{0.693}{0.25} t\right) + 0.2 \exp\left(-\frac{0.693}{7} t\right)$$

$$Y(t) = 2 \exp\left(-\frac{0.693}{0.25} t\right) + 0.02 \exp\left(-\frac{0.693}{7} t\right)$$

90%は尿中に排泄された ($F_u = 0.9$)。

事故により元素状 ^{35}S で汚染した1作業員に関する研究(文献6)により、イオウのこの形での人における代謝の情報が得られた。

標識されたシスチンを10人の正常人と8人の肝硬変症の患者に食物とともに与え、または注射した(文献7)。経口投与後3日間に、 ^{35}S の97%は尿中に、そして3%は糞中に排泄された。40日間の尿中排泄の測定により次のべき関数に適合する結果が得られた。

$$Y(t) = 0.05 t^{-1}$$

標識された硫酸塩、シスチン、およびメチオニンを外科患者へ投与(文献8)

し、これら3つの物質のうちシスチンだけが毛髪に濃縮し、その最大値に達するのは投与して4～6週間後であることが示された。

ICRP Publication 2 に示唆されているように畢丸が1.6gのイオウを含んでいるということは、最近の測定(文献9)によればそうでないことが明らかになった。おそらく全身を決定器官と考えるべきである。

4. 残留率式

無機硫酸塩に対して、

$$R(t) = 0.8 \exp\left(-\frac{0.693}{0.25} t\right) + 0.2 \exp\left(-\frac{0.693}{7} t\right)$$

5. 排泄率式

無機硫酸塩に対して、2日目以後、

$$Y(t) = 0.02 \exp\left(-\frac{0.693}{7} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 全身へ可搬性のもの(硫酸塩) :

$$\begin{aligned} Q &= 0.8 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{0.25} + \frac{0.693}{87}\right) t\right\} dt \\ &\quad + 0.2 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{7} + \frac{0.693}{87}\right) t\right\} dt \\ &= 2.2 \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

血液中への $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みから全身が受ける線量

$$= 2.3 \times 51.2 \times \frac{0.056}{70,000} = 9.4 \times 10^{-5} \text{ rem}$$

それゆえ、線量 D (0.25 rem) は 0.28 mCi によって与えられる。

(b) 非可搬性 :

肺における最大許容^{1/4}年沈着量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40\text{h}) \\ &= 0.1 \times 3 \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^8 \end{aligned}$$

(68)

$$=4.7 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に 2.7 mCi

(b) 非可搬性：肺に 4.7 μCi

(a)に対応する尿中排泄は、 $F_u=0.9$ であるから

$$2,800 \times F_u \times 0.02 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{7} + \frac{0.693}{87}\right) t\right\}$$

$$=50 \exp(-0.107 t) \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿中の DIL ($\mu\text{Ci/日}$)
14	11
20	7
30	2
60	0.08

8. 検出限界

尿の放射化学分析：100 pCi/l (文献10) または 140 pCi/日

これによれば、1 調査レベルの検出は、これを摂取して4 か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- S. JACKSON and G. W. DOLPHIN, UKAEA Report AHSB(RP)R51 (1965).
- M. WALSER, *Proc. Soc. Exper. Biol. Med.* **79**, 372 (1952).
- M. WALSER, D. W. SELDIN and A. GROLLMAN, *J. Clin. Invest.* **32**, 299 (1953).
- J. R. ANDREWS, R. L. SWARM, L. SCHLACHTER, K. C. BRACE, P. RUBIN, D. M. BERGENSTAL, H. GUMP, S. SIEGEL and R. W. SWAIN, *Am. J. Roent. Rad. Ther. Nucl. Med.* **83**, 123 (1960).
- A. R. MAASS, T. L. FLANAGAN, D. BLACKBURN and M. SMYTH, *Health Physics* **9**, 731 (1963).
- W. VOLWILER, P. D. GOLDSWORTHY, M. P. MACMARTIN, P. A. WOOD, I. R. MACKAY and K. FREMONT-SMITH, *J. Clin. Invest.* **34**, 1126 (1955).
- H. B. HALEY and M. B. WILLIAMSON, *J. Cell Comp. Physiol.* **55**, 235 (1960).
- M. MINSKI and J. CLEARY, *Health Physics* **12**, 837 (1966).
- J. D. EAKINS, AERE, Harwell, private communication (1964).

^{36}Cl 1. 放射性崩壊データ(a) 半減期： 1.1×10^8 日

(b) 放射線：	型	エネルギー (MeV)	放出率(%)
	β^-	0.714	98.3
	E. C.	—	1.7

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 全身：0.26

3. 代 謝

標識された塩化ナトリウムを経口投与された2人の健康な人(文献2)で、塩化物の摂取量によって3~30日の間に ^{36}Cl の半分が排出された。 T_b のもっとも確からしい値は7日と15日の間にある。15人に標識された臭化ナトリウムを静脈注射し(臭化物と塩化物の代謝は人では似ていることが示されている)、24時間の尿を採集し分析した。データから計算された T_b の値は5日ないし23日の範囲にあり、平均は10日であった(文献3)。平均の体内量と毎日の摂取量とから T_b は5~20日の範囲内にあると計算される(文献4)。

排泄の比率は値の変動の幅と値の大きさについて ^{22}Na と似ている(文献5)。すなわち

$$F_u \approx 1.0 \quad F_f = 0.03 \quad F_p = 0.02 \sim 0.08$$

4. 残留率式

$$R(t) = \exp\left(-\frac{0.693}{10} t\right)$$

5. 排泄率式(残留率式の微分から)

$$Y(t) = 0.07 \exp\left(-\frac{0.693}{10} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性, 全身に対して:

$$Q = \int_0^{50y} \exp(-0.07 t) dt \approx 14 \mu\text{Ci-日}$$

これは, $1 \mu\text{Ci}$ から全身に対し線量

$$14 \times 51.2 \times \frac{0.26}{70,000} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ rem}$$

を与える。それゆえ, 線量 D (0.25 rem) は $93 \mu\text{Ci}$ によって与えられる。

(b) 非可搬性: 計算しない。

7. 調査レベル

可搬性: 全身中に $93 \mu\text{Ci}$

$93 \mu\text{Ci}$ に対応する尿中排泄は

$$93 \times 0.07 \exp(-0.07 t) \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿中の DIL ($\mu\text{Ci/日}$)
14	2.4
30	0.8

8. 検出限界

尿のシンチレーション計数による検出限界が, 文献6にもとづいた計算から
 予期されるように $0.1 \mu\text{Ci/l}$, あるいは $0.14 \mu\text{Ci/日}$ であるならば, 1 調査レベ
 ルの体内汚染は汚染の発生後 2 か月後にも検出されうる。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes". *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*. Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).

2. C. T. RAY, G. E. BURCH and S. A. THREEFOOT, *J. Lab. Clin. Med.* **39**, 673 (1952)
3. A. F. REID, G. B. FORBES, J. BONDURANT and J. ETHERIDGE, *J. Lab. Clin. Med.* **48**, 63 (1956).
4. J. R. ELKINTON and T. S. DANOWSKI, *The Body Fluids: Basic Physiology and Practical Therapeutics*, William & Wilkins Co., Baltimore (1955).
5. C. L. COMAR and F. BRONNER, *Mineral Metabolism, An Advanced Treatise*, vol. II, Part B, Academic Press, New York (1962).
6. H. G. FORSBERG, *Svensk Kemisk Tidskrift* **74**, 144 (1962).

^{45}Ca

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 165日

(b) 放射線: 型 β^- $E_{\text{max}} = 0.25 \text{ MeV}$

2. $\Sigma EF (RBE) n$

骨: 0.43

3. 代 謝

最近の2つの総説(文献2, 3)は, 健康人と患者のカルシウム代謝についての多くの研究を記述している。交換可能なカルシウムプールの大きさは5~8gで, その $\frac{2}{3}$ は速く, $\frac{1}{3}$ はゆっくりと交換する。骨の無機質に対するカルシウム添加率は一日あたり0.4gであった(文献4)。

経口投与された標識塩化カルシウムの40%は12時間のうちに吸収されることが見出された(文献5)。経口投与後の13日間に ^{45}Ca の6~15%が尿中に排泄された(文献6)。投与された ^{45}Ca が腸管から除かれた後, 内因性の ^{45}Ca は $F_u : F_f = 0.7$ の比で排泄された。

患者に ^{45}Ca または ^{47}Ca を静脈注射した後の $F_u : F_f$ 比は0.2と5の間にあると報告された(文献3, 7, 8, 9)が, 文献4には1.12と与えられている。平均して $F_u \approx F_f \approx 0.5$ と結論してよいであろう。

^{45}Ca の注射後(文献10), 骨の放射性同位体含有量ははじめの1か月間徐々に上昇して, 極大値(注射量の65%)に達し, その後下降した。

(72)

4. 残留率式

成人に ^{47}Ca を静脈注射していくつかの残留式が得られた。

5 時間から 200 時間までの血漿 (尿) の比放射能 (カルシウム 1 g あたりの
投与放射能の割合)

$$= 0.15 \exp\left(-\frac{0.693}{0.6} t\right) + 0.19 \exp\left(-\frac{0.693}{5.5} t\right) \quad (\text{文献 4})$$

残留を 2 週間しらべた結果は、次の T_b の値を示した。

4 日以前は約 1 日

4 日から 14 日までは 5 ~ 8 日

2 週間以後はそれより長い (文献 3)

1 か月間の全身計測は次式に合う結果を与えた。

$$R(t) = 0.25 \exp\left(-\frac{0.693}{1} t\right) + 0.75 \exp\left(-\frac{0.693}{25} t\right) \quad (\text{文献 7})$$

もう 1 つの同様な研究は、はじめの 2 週間、約 27 日の T_b を示した (文献 11)。

残留はまた $R(t) = 0.96 t^{-0.12}$ というべき関数によっても記述され (文献 12), 13 人についての 3 週間の平均残留 (文献 9) は式 $R(t) = t^{-0.16}$ で合
すことができた。べき関数の他の 1 つの形, $R(t) = 2.5^{0.15} (t + 2.5)^{-0.15}$ が
文献 13 に与えられている。

数多くの生物学的半減期が見出され、観察期間が延長されるにつれて半減期
がより長くなっているという事実を考えると、つぎのべき関数をもっとも役に
立つ残留関数であると思われる。すなわち、

$$R(t) = t^{-0.15}$$

5. 排泄率式

排泄率を与える式は残留式を微分することによってえられる。それはまた、
血漿カルシウムの比放射能と、尿および糞中に排泄される内因性カルシウムの
全量から計算することができる。

6. 線量 D を与える沈着量

(a) 骨に可搬性 :

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{165} t\right) t^{-0.15} dt$$

$$= 116 \mu\text{Ci-日} \quad (\text{文献14})$$

∴ 骨中 $1 \mu\text{Ci}$ の沈着から骨が受ける線量

$$= 116 \times 51.2 \times \frac{0.43}{7,000} = 0.36 \text{ rem}$$

∴ 骨に対する線量 D (1.5 rem) は骨中の初期沈着量 $4.2 \mu\text{Ci}$ から生じる。

(b) 非可搬性 :

肺における最大許容¹/₄年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8$$

$$(40 \text{ h})$$

$$= 0.1 \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^8$$

$$= 1.57 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性 : 骨に $4.2 \mu\text{Ci}$

$$= \frac{4.2}{0.65} = 6.5 \mu\text{Ci} \quad (\text{全身中に})$$

(b) 非可搬性 : 肺に $1.6 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$= F_u \times 6.5 \times 0.15 t^{-1.15} \times \exp\left(-\frac{0.693}{165} t\right)$$

$$= 0.5 \times 6.5 \times 0.15 t^{-1.15} \times \exp(-0.0042 t)$$

$$= 0.5 t^{-1.15} \times \exp(-0.0042 t) \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)
14	23
30	9
100	1.6

8. 検出限界

尿の直接液体シンチレーション計数は $0.3 \mu\text{Ci/l}$ を検出するという文献¹⁵から計算しうる。尿の放射化学分析と GM 計数管による計数では、 50 pCi/日 を恐らく検出できるであろう。これによれば、1 調査レベルの検出はそれを摂取して 500 日後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- Medical Uses of Ca-47, IAEA Technical Report Series No. 32, Vienna (1964).
- K. R. COREY, D. WEBER, M. MERLINO, E. GREENBERG, P. KENNY and J. S. LAUGHLIN, in: *Dynamic Clinical Studies with Radioisotopes*, AEC Symposium, Series 3, p. 519 (1964).
- R. P. HEANEY, in Reference 2, p. 57.
- J. SAMACHSON, *Clin. Sc.* **25**, 17 (1963).
- G. MAZZOLI, J. SAMACHSON and D. LASZLO, *J. Lab. Clin. Med.* **52**, 522 (1958).
- T. W. SARGENT, in: *Whole-Body Counting*, IAEA, Vienna, p. 447 (1962), STI/PUB/47.
- H. SPENCER, M. LI, J. SAMACHSON and D. LASZLO, *Metabolism* **9**, 916 (1960).
- B. E. C. NORDIN, D. A. SMITH and J. NISBETT, *Br. J. Radiol.* **37**, 89 (1964).
- A. R. SCHULERT, E. A. PEETS, D. LASZLO, H. SPENCER, M. CHARLES and J. SAMACHSON, *Int. J. App. Rad. and Isotopes* **4**, 144 (1959).
- J. S. LAUGHLIN, D. A. WEBER, P. J. KENNY, K. R. COREY and E. GREENBERG, *Br. J. Radiol.* **37**, 287 (1964).
- R. E. ROWLAND, USAEC Report ANL-6104, p. 41 (1959).
- J. H. MARSHALL, *J. Theoret. Biol.* **6**, 386 (1964).
- R. E. ROWLAND and C. J. LEUER, USAEC Report ANL-6398, p. 24 (Jan.-June 1961).
- H. G. FORSBERG, *Svensk Kemisk Tidskrift* **74**, 144 (1962).

⁵⁹Fe

1. 放射性崩壊データ (文献 1)

- (a) 半減期: 45日

(b) 放射線：

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^-	0.13	1
	0.27	46
	0.46	53
	1.56	0.3
γ	0.14	0.9
	0.19	2.4
	0.34	0.3
	1.10	56
	1.29	44

2. $\Sigma EF (RBE) n$

脾 臓：0.34

3. 代 謝

包括的な総説 (文献2) に、人の正常な鉄の代謝、および出血時と血液疾患による代謝の変化が要約されている。

通常は硫酸第1鉄の形で経口投与されるが、 ^{59}Fe が正常人に吸収される量についていくつかの測定がなされ、次の結果が得られた。

被検者数	吸 収 百 分 率	文 献
4	2~7	3
1	4	4
9	2.2~13, 平均6	5
20	(第1鉄塩 5.3±3.3)	6
	(第2鉄塩 2.8±1.7)	
16	17.1±6.3	2

本報告書の目的には、平均の取り込みを10%と仮定することが合理的であろう。

6日前に $^{59}\text{FeSO}_4$ を静脈注射された1患者 (文献7) についての全身スキャンによれば、 ^{59}Fe は脾臓中で最高濃度を示し、濃度は平均の10倍以上であった。このことから、脾臓の重さが全身の重さの0.0021にあたるという事実

(ICRP Publication 2, 表 8) を使って, 脾臓中に沈着する量の血液に取り込まれた量に対する割合を, $0.0021 \times 10 \approx 0.02$ と計算することができる。

経口投与または非経口的な注射のいずれの場合であっても, 正常人が同化した ^{59}Fe は最初の24時間以後は尿に排泄されない(文献 2 と 4)。鉄の経口摂取後, 1日あたりの糞への排泄は, 最初の100日間で14%から 0% に減少した(文献 2)。非経口的に注射された ^{59}Fe の1日あたりの糞への排泄は, 注射量の 0.008~0.015% であった(文献 4)。

4. 残留率式

体内の ^{59}Fe の量は一般的に, 時間についての1個の指数関数に従って減衰すると考えられている。ただし, これは文献 2 に述べられているように, 恐らく過度の単純化であろう。

正常人に対する生物学的半減期のいろいろな推定値は下表のようである。

人 数	T_b (日)	文 献
5	500	2
1	1,119	5
1	506	
1	770	
?	700	6

この値は約700日という平均値を与え, ICRP Publication 2 に与えられた数値と著しくことなつたものではない。残留式は, そこで,

$$R(t) = \exp\left(-\frac{0.693}{700} t\right)$$

となろう。 $T_r=45$ 日 で T_b はこの値の10倍以上であるから, T_{eff} は45日よりわずかに小さく, T_b の値によって大きく影響されることはない。

5. 排泄率式

これは残留式の微分によって導き出される。

$$Y(t) = 0.001 \exp\left(-\frac{0.693}{700} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 脾臓中に可搬性：

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{45} + \frac{0.693}{700}\right) t\right\} dt = 60 \mu\text{Ci-日}$$

∴ 脾臓中の初期含有量 $1 \mu\text{Ci}$ から脾臓が受ける線量は

$$60 \times 51.2 \times \frac{0.34}{150} = 7 \text{ rem}$$

∴ 脾臓に対する線量 D (0.75 rem) は脾臓中に $0.11 \mu\text{Ci}$, または血液へ

$$\frac{0.11}{0.02} = 5.5 \mu\text{Ci}$$

の取り込みから与えられる。

(b) 非可搬性：

肺における最大許容¹/₄年沈着量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40 \text{ h}) \\ &= 0.1 \times 5 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 \\ &= 0.8 \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：脾臓に $0.11 \mu\text{Ci}$, または全身に $5.5 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $0.8 \mu\text{Ci}$

t (日)	脾臓中の DIL (nCi)	全身中の DIL (nCi)
100	20	1,000
300	1	60

8. 検出限界

(a) 全身計測：2 ~ 20 nCi (文献 8)

(78)

(b) 非常に簡単な検出器で $1\mu\text{Ci}$ のオーダーの量を検出しうるであろう (文献 9)。

検出限界(a)によれば, 体内の 1 調査レベルの検出は, その汚染が生じて 1 年後にも, また検出限界(b)によれば 3 か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
(b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
(c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- D. C. PRICE, in: *Dynamic Clinical Studies with Radioisotopes*, AEC Symposium Series 3, p. 537 (1964).
- R. VAN HOEK, in: *First Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY, ed., Charles C. Thomas Co., Springfield, Illinois, p. 299 (1961).
- W. LANGHAM, *ibid.*, p. 311.
- L. C. MCKEE, J. A. KING, R. C. HARTMANN and R. M. HEYSSEL, in: *Second Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY and S. M. LINDE, eds., Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, p. 402 (1965).
- C. C. LUSHBAUGH and D. B. HALE, *ibid.*, p. 417.
- J. S. LAUGHLIN, D. A. WEBER, P. J. KENNY, K. R. COREY and E. GREENBERG, *Br. J. Radiol.* **37**, 287 (1964).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).
- J. VENNART, *Diagnosis and Treatment of Radioactive Poisoning*, IAEA, Vienna, p. 3 (1963) STI/PUB/65.

^{60}Co

1. 放射性崩壊データ (文献 1)

(a) 半減期: 1.9×10^3 日

(b) 放射線:

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^-	0.312	100
	1.478	0.01
γ	1.1725	100
	1.3325	100

2. $\Sigma EF(RBE) n$

全身: 1.5

3. 代 謝

動物におけるコバルトの代謝は文献2に論議されている。多くの場合、標識された塩化コバルトのネズミの胃腸管からの吸収は20%から40%まで変動していた(文献3)。

^{58}Co のグリシン錯塩を患者に注射すると(文献4)、次のような身体の残留のパターンを示し、血漿からの排除は急速であった。

日	1	2	3	4	5
%残留	61	54	49	45	43

これらの結果は短期間の残留だけにあてはまるものであるけれども、ICRP Publication 2 に与えられている9.5日という生物学的半減期と矛盾はしない。しかしながら、それらの結果は残留関数中に長期間成分のあることを否定するほど十分長く測定を続けて得られたものではなかった。

CoCl_2 を人に静脈注射(5日間に13 mg)し、1週間排泄物を集めたところ(文献5)、17%が尿中に、6%が糞中に排泄され、77%が残留することを示した。 $F_u=0.7$ と推定される。

37人の患者に標識した塩化コバルトを食べさせると(文献6)、服用量の1%から20%の範囲の量が48時間尿中に排泄された。もし組織系内コバルトの6分の1が尿中に排泄されると仮定できるならば(文献5から)、これら尿中排泄は経口投与量の6%~100%(平均50%)の吸収を示すことになる。

文献6によると、トレーサー量の CoCl_2 を経口投与後に引き続く48時間の平均尿中排泄は、絶食中の被検者で8%、1回の食事後で1%であった。文献4では ^{58}Co の39%が注射後24時間内に排泄されたと報告されている。

4. 残留率式

文献4と5に報告された結果から、次式によってコバルト(塩化物またはグ

(80)

リン錯塩として投与された場合) の残留を表わすことは合理的と思われる。

$$R(t) = 0.65 \exp\left(-\frac{0.693}{10} t\right)$$

イヌに ^{60}Co を静脈注射し、400日以上全身計測を行なって、残留式は次式のとおりであることがわかった(文献7)。

$$R(t) = 0.54 \exp\left(-\frac{0.693}{0.26} t\right) + 0.32 \exp\left(-\frac{0.693}{1.8} t\right) \\ + 0.086 \exp\left(-\frac{0.693}{14} t\right) + 0.054 \exp\left(-\frac{0.693}{145} t\right)$$

この式は、少量の ^{60}Co は長い生物学的半減期で体内に残留するらしいという、文献を調査して得られた印象を強める。もしこの式が人についても本当であるならば、下の6項で計算されている線量は50%増加するように訂正することが必要となろう。尿中排泄レベルの数値の意味もまた変わることになろう。

^{60}Co は、標識されたビタミンB-12の人における吸収と残留を測定するために使用されてきた(文献8, 9)が、これは、無機コバルトによる体内汚染とまったく関係がない。

吸入は ^{60}Co による体内汚染のもっとも普通な摂取経路であり、数多くのそのような事例が報告されている(文献10)。次の2つの事例ではいくぶんくわしく報告されている(文献11)。

(a) 吸入された ^{60}Co 酸化物のうち、37%は9日の T_b で、そしてそれと同量が115日の T_b で除去された。残り26%は1.5日の T_b で除去されたらしい。

(b) 金属または酸化物として ^{60}Co を吸入すると、そのうち60%が38日の T_b で、そして残りが6年の T_b で除去された。

5. 排泄率式

残留式の微分から次式がえられる。

$$Y(t) = 0.045 \exp(-0.07 t)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 全身において可搬性:

$$Q = 0.65 \int_0^{50y} \exp \left\{ - \left(\frac{0.693}{1,900} + \frac{0.693}{10} \right) t \right\} dt$$

$$= 9.4 \mu\text{Ci-日}$$

∴ 血液への取り込み $1 \mu\text{Ci}$ から全身が受ける線量は

$$9.4 \times 51.2 \times \frac{1.5}{70,000} = 0.01 \text{ rem}$$

∴ 全身に対する線量 D (0.25 rem) は, 血液への取り込み $25 \mu\text{Ci}$ から与えられる。

(b) 非可搬性:

肺に対する最大許容 $1/4$ 年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times 9 \times 10^{-9} \times 1.57 \times 10^8 = 0.14 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性: 全身に $25 \mu\text{Ci}$ (b) 非可搬性: 肺に $0.14 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$= 25 \times F_u \times 0.045 \exp \left(- \frac{0.693}{10} t \right)$$

$$= 25 \times 0.7 \times 0.045 \exp(-0.07 t)$$

$$= 0.8 \exp(-0.07 t) \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)	全身中の DIL (nCi)
30	100	2,000
100	0.7	15

8. 検出限界

全身計測: $7 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}$ (文献12)これによれば, 全身についての1調査レベル ($25 \mu\text{Ci}$) の検出は, その汚染

が生じたときから20週間後にも可能であり、また、肺における非可搬性コバルトの T_b を13週と仮定すれば、肺についての1調査レベル ($0.14 \mu\text{Ci}$) の検出は、それが沈着して2年後にも可能である (文献13)。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
 (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
 (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. E. L. SMITH, in: *Mineral Metabolism*, C. L. COMAR and F. BRONNER, eds., vol. 2, Part B, Academic Press, New York, chapter 31 (1962).
3. D. M. TAYLOR, *Physics in Med. Biol.* **6**, 445 (1962).
4. D. M. TAYLOR, Ph.D. thesis, Univ. of London (1959).
5. N. L. KENT and R. A. MCCANCE, *Biochem. J.* **35**, 877 (1941).
6. K. R. PALEY and E. S. SUSSMAN, *Metabolism* **2**, 975 (1963).
7. C. R. RICHMOND, private communication (1966).
8. R. VON HOEK, in: *First Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY, ed., Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, p. 299 (1961).
9. R. M. HEYSSEL, R. C. BOZIAN and W. J. DARBY, in: *Dynamic Clinical Studies with Radioisotopes*, AEC Symposium Series 3, p. 497 (1964).
10. C. W. SILL, J. I. ANDERSON and D. R. PERCIVAL, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. I, IAEA, Vienna, p. 217 (1964), STI/PUB/84.
11. R. D. JORDAN, J. S. BURKLE, L. T. BROWN, J. HARGUS and J. H. NICHLOS, in: *Second Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY and S. M. Linde, ed., Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, p. 281 (1965).
12. R. E. COFIELD, *Health Physics* **9**, 283 (1963).
13. Task Group on Lung Dynamics, Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract, *Health Physics* **12**, 173 (1966).

^{65}Zn

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 245日

(b) 放射線:

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^+	0.33	1.5
E. C.		98.5
γ	0.51 (β^+ から)	3
	1.11	45

2. $\Sigma EF (RBE) n$

全 身 : 0.32

3. 代 謝

亜鉛の代謝全般については文献2に論議されている。8人の患者への注射後、尿中および糞中の ^{65}Zn が測定された。最大の尿中排泄率（1日あたり注射量の0.2~1.3%）は、注射後の始めの2日間にみられた。3日目以後は、1日あたりの尿中排泄量の投与量に対する百分率は、どの患者についてもぎわめて一定のままにとどまったが、患者同志の間では0.2%から0.6%の間でちがいがあつた。1ないし2週間にわたつての総排泄の測定値から計算された $F_f : F_u$ は0.5から8まで変動し、平均値は3.3であつた。8人の患者に標識された塩化亜鉛を静脈注射した他の研究（文献4）では、5日間の累積値から求めた $F_f : F_u$ は0.2から10まで変動し、平均値は3であつた。それゆゑ、平均 $F_u = 0.25$ および $F_f = 0.75$ と結論づけることは正当であらう。

経口摂取した場合（文献5）には、排泄された亜鉛の1~5%は尿中にあり、残りは糞中であつた。

4. 残留率式

^{65}Zn の全身残留が、文献4に記載の患者のうち2人について測定された。文献6は4人に ^{65}Zn を食べさせた結果を、そして文献7は2人に食べさせた結果と5人のサイクロトロン作業者の事故汚染の結果を報告している。これらすべての残留の研究の結果は、3つの項をもつ指数関数式に要約することができる。

$$R(t) = K_1 \exp\left(-\frac{0.693}{T_1} t\right) + K_2 \exp\left(-\frac{0.693}{T_2} t\right) \\ + K_3 \exp\left(-\frac{0.693}{T_3} t\right)$$

ここで、

K_1	K_2	K_3	T_1 (日)	T_2 (日)	T_3 (日)	
0	0.26	0.74		13	334	
0	0.24	0.76		12	308	(文献4)
0.38	0.11	0.51	0.3	4	420	
0.09	0.24	0.66	0.7	25	480	
0.61	0.08	0.36	1.2	26	400	
0.72	0.05	0.26	0.6	9	390	(文献6)
0.09	0.23	0.69	0.9	22	433	
0.39	0.11	0.5	0.3	5	433	
(10か月間サイクロロン作業をした者)					245	(文献7)

文献6と7から得られた第1項の指数項が腸からの除去をあらわしていると結論づけるならば、細胞外液に取り込まれた ^{65}Zn の残留を記述するものとして次式が残る。

$$R(t) = 0.25 \exp\left(-\frac{0.693}{14} t\right) + 0.75 \exp\left(-\frac{0.693}{380} t\right)$$

1人の人についての実験(文献8)で、前処置として30日間毎日亜鉛10mgを服用させたところ、 K_1 は0.1から0.55まで増加し、10日目で排泄は3倍以上に増加した。

5. 排泄率式

残留式の微分から次式がえられる。

$$Y(t) = 0.012 \exp(-0.050 t) + 0.0014 \exp(-0.0018 t)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 全身に対し可搬性

$$\begin{aligned} Q &= 0.25 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{14} t\right) dt \\ &\quad + 0.75 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{380} + \frac{0.693}{245}\right) t\right\} dt \\ &= 0.25 \times \frac{1}{0.05} + 0.75 \times \frac{1}{0.0047} = 5 + 160 = 165 \text{ } \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

それゆえ、 $1 \mu\text{Ci}$ の血液中取り込みから全身が受ける線量は

$$165 \times 51.2 \times \frac{0.32}{70,000} = 0.039 \text{ rem}$$

したがって、全身に対する線量 D (0.25 rem) は、血液中への取り込み $6.4 \mu\text{Ci}$ から与えられる。

(b) 非可搬性

肺に対する最大許容¹/₄年摂取量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times 6 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 = 0.94 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に $6 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $1 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$\begin{aligned} &= 0.25 \times 6 \left[0.012 \exp \left\{ - \left(\frac{0.693}{14} + \frac{0.693}{245} \right) t \right\} \right. \\ &\quad \left. + 0.0014 \exp \left\{ - \left(\frac{0.693}{380} + \frac{0.693}{245} \right) t \right\} \right] \\ &= 1.5 \left\{ 0.012 \exp(-0.050 t) + 0.0014 \exp(-0.0046 t) \right\} \mu\text{Ci/日} \end{aligned}$$

t (日)	尿の DIL (nCi/日)	全身中の DIL (μCi)
10	13	5.3
30	6	4.6
100	1	2.9

8. 検出限界

全身計測： $10^{-3} \mu\text{Ci}$ (文献 9)

これによれば、体内の 1 調査レベルの検出は、その汚染が生じて 5 年後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. B. L. VALLEE, in: *Mineral Metabolism*, C. L. COMAR and F. BRONNER, eds., Academic Press, New York, chap. 34 (1962).
3. F. A. GRAIG and E. SIEGEL, *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* **104**, 391 (1960).
4. H. SPENCER, B. ROSOFF, A. FELDMAN, S. H. COHN and E. GUSMANO, *Radiation Research* **24**, 432 (1965).
5. R. A. McCANCE and E. M. WIDDOWSON, *Biochem. J.* **36**, 692 (1942).
6. C. R. RICHMOND, J. F. FURCHNER, G. A. TRAFTON and W. H. LANGHAM, *Health Physics* **8**, 481 (1962).
7. M. A. VAN DILLA, in: *First Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY, ed., Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, p. 219 (1961).
8. J. E. FURCHNER and C. R. RICHMOND, *Health Physics* **8**, 35 (1962).
9. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

 ^{86}Rb

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 18.7日

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^-	0.68	8.5
	1.77	91.5
γ	1.08	8.5

2. $\Sigma EF (RBE) n$

全 身: 0.70

3. 代 謝

一般に、カリウムイオンとルビジウムイオンとは体内で同様の分布と代謝をする。人体のカリウム含有量は年齢および性別に依存することが見出されている (文献2)。

^{86}Rb を静脈注射された4人の被検者では、1日あたり約1%が尿中に排泄され、 $F_u:F_f=3$ すなわち別な表現で $F_u=0.75$ 、 $F_f=0.25$ であった(文献3)。9人の患者が ^{86}Rb の静脈注射をうけ、汗の中の同核種の含有量が測定された(文献4)。 ^{86}Rb は静脈注射後15~60秒で汗の中に現われ、2人の被検者では発汗による除去はKとRbについて同じであった。

4. 残留率式

3人が ^{86}Rb を経口投与され、全身放射能が90日間測定された(文献5)。残留率は次式によって記述された。

$$R(t) = 0.1 \exp\left(-\frac{0.693}{4} t\right) + 0.9 \exp\left(-\frac{0.693}{95} t\right)$$

5. 排泄率式

残留式の微分から

$$Y(t) = 0.017 \exp\left(-\frac{0.693}{4} t\right) + 0.007 \exp\left(-\frac{0.693}{95} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 全身に可搬性：

$$\begin{aligned} Q &= 0.1 \int_0^{50y} \exp\left\{-0.693 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{18.7}\right) t\right\} dt \\ &\quad + 0.9 \int_0^{50y} \exp\left\{-0.693 \left(\frac{1}{95} + \frac{1}{18.7}\right) t\right\} dt \\ &= 0.5 + 20.5 = 21 \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

それゆえ、 $1 \mu\text{Ci}$ の血液中への取り込みから全身が受ける線量は

$$21 \times 51.2 \times \frac{0.70}{70,000} = 0.011 \text{ rem}$$

したがって、全身に対する線量 D (0.25 rem) は、 $23 \mu\text{Ci}$ の摂取量から生じる。

(b) 非可搬性：計算しない。

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に 23 μCi

(b) 非可搬性：計算しない。

(a)に対応する尿中排泄

$$\begin{aligned}
 &= F_u \times 23 \left[0.017 \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{18.7} \right) t \right\} \right. \\
 &\quad \left. + 0.007 \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{1}{95} + \frac{1}{18.7} \right) t \right\} \right] \\
 &= 0.75 \times 23 \left[0.017 \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{18.7} \right) t \right\} \right. \\
 &\quad \left. + 0.007 \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{1}{95} + \frac{1}{18.7} \right) t \right\} \right] \\
 &= 17 \left\{ 0.017 \exp(-0.21 t) + 0.007 \exp(-0.044 t) \right\} \mu\text{Ci/日}
 \end{aligned}$$

t (日)	尿中の DIL ($\mu\text{Ci/日}$)	全身中の DIL (nCi)
30	33	5,300
100	1.5	250

8. 検出限界

全身計測：0.003~0.03 μCi (文献6)

これによれば，体内の1調査レベルの検出は，それを摂取して6か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- W. H. LANGHAM, in: *First Symposium on Radioactivity in Man*, G. R. MENEELY, ed., Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, p. 311 (1961).
- C. T. RAY, S. A. THREEFOOT and G. E. BURCH, *J. Lab. Clin. Med.* **45**, 408 (1955).
- G. S. BERENSON and G. E. BURCH, *J. Lab. Clin. Med.* **49**, 401 (1957).
- C. R. RICHMOND, USAEC Report LA-2207, p. 46 (1958).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

^{85}Sr , ^{89}Sr , ^{90}Sr

1. 放射性崩壊データ (文献1)

	^{85}Sr	^{89}Sr	^{90}Sr
(a) 半減期:	65日	51日	10^4 日
(b) 放射線:	型 エネルギー (MeV) 放出率 (%)	型 エネルギー (MeV) 放出率 (%)	型 エネルギー (MeV) 放出率 (%)
	E. C. 100 <娘核種 ^{85m}Rb >	β^- 1.46 100	β^- 0.54 100 <娘核種 ^{90}Y >
	γ 0.513 100		β^- 2.25 100

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 全身:	0.33		
(b) 骨:	0.091	2.8	5.5

3. 代謝

人体中の放射性ストロンチウムの挙動は近年広く論議されてきた。文献2, 3, 4, 5, 6, 7および8は, 十分ではないが代表的な, 利用できる文献のリストである。これら発表された資料から, 放射性ストロンチウムの経口摂取では1回摂取量の約4分の1, 吸入摂取では3分の1が細胞外液に吸収され, この半分は骨に沈着すると結論づけられよう。身体からの除去はいくつかの項をもつ指数関数あるいは単一べき関数で表わされ, その例は下に与えられている。 $F_u : F_f$ (排泄比) は3から10まで変化した。

連続摂取の場合, それは通常汚染した食物の経路によって生ずるが, 差別比 (Observed Ratio) (文献9) を用いる別のモデルを使ってもよい。これは汚染した作業者の場合には恐らく適用できない。

4. 残留率式

いくつかの式が人における残留を表わすために提案されている。

(90)

$$(a) R(t) = 0.4 \exp\left(-\frac{0.693}{1.7} t\right) + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{4.4} t\right) \\ + 0.14 \exp\left(-\frac{0.693}{50} t\right) + 0.15 \quad (\text{文献7})$$

$$(b) R(t) = 0.73 \exp\left(-\frac{0.693}{3} t\right) + 0.1 \exp\left(-\frac{0.693}{44} t\right) \\ + 17 \exp\left(-\frac{0.693}{4,000} t\right) \quad (\text{文献8})$$

$$(c) R(t) = 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{2.4} t\right) + 0.5 t^{-0.2} \quad (\text{文献10})$$

$$(d) R(t) = 0.56 \exp\left(-\frac{0.693}{1.8} t\right) + 0.24 \exp\left(-\frac{0.693}{8} t\right) \\ + 0.2 \exp\left(-\frac{0.693}{600} t\right) \quad (\text{文献11})$$

5. 排泄率式

上記の文献のうち3つに、次のような排泄式が提案されている。

$$(a) Y(t) = 0.73 \left(\frac{0.693}{3}\right) \exp\left(-\frac{0.693}{3} t\right) + 0.10 \left(\frac{0.693}{44}\right) \exp\left(-\frac{0.693}{44} t\right) \\ + 0.17 \left(\frac{0.693}{4,000}\right) \exp\left(-\frac{0.693}{4,000} t\right) \quad (\text{文献8})$$

$$(b) Y_u(t) = -0.8 \frac{dR}{dt} = 0.12 \exp\left(-\frac{0.693}{2.4} t\right) + 0.08 t^{-1.2} \quad (\text{文献10})$$

$$(c) Y_u(t) = -0.67 \frac{dR}{dt} = 0.14 \exp\left(-\frac{0.693}{1.8} t\right) + 0.14 \exp\left(-\frac{0.693}{8} t\right) \\ + 1.5 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{0.693}{600} t\right) \quad (\text{文献11})$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性

放射性ストロンチウムの1回摂取から生ずる50年間の線量を推定するにあたって、第1の問題は残留式を選定することである。上記4項中に示された4つ

の残留式のうち(b)と(c)は文献の調査から導き出され、放射線防護上利用するために提案されたものである。それゆえに、(b)式と(c)式だけを身体または骨の汚染の時間積分の計算に用いることとする。

^{85}Sr の場合、全身を決定器官としており、全身中の初期含有量 $1\mu\text{Ci}$ は次の結果を与える。

(b)式から、全身に対して

$$\begin{aligned} Q = & 0.73 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{3} + \frac{0.693}{65}\right)t\right\} dt \\ & + 0.10 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{44} + \frac{0.693}{65}\right)t\right\} dt \\ & + 0.17 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{4,000} + \frac{0.693}{65}\right)t\right\} dt \quad \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

(c)式から、全身に対して

$$\begin{aligned} Q = & 0.5 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{2.4} + \frac{0.693}{65}\right)t\right\} dt \\ & + 0.5 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{65}t\right) \times t^{-0.2} dt \quad \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

骨を決定器官とする ^{89}Sr と ^{90}Sr の場合には、 $1\mu\text{Ci}$ の血液中取り込みは次の結果を与える。

(b)式から、骨に対して

$$\begin{aligned} Q = & 0.10 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{44} + \frac{0.693}{T_r}\right)t\right\} dt \\ & + 0.17 \int_0^{50y} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{4,000} + \frac{0.693}{T_r}\right)t\right\} dt \quad \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

(b)式の第1項はおそらく骨中の残留をあらわしていないので省いた。

(c)式から、骨に対して

$$Q = 0.5 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{T_r}t\right) \times t^{-0.2} dt \quad \mu\text{Ci-日}$$

((c)式の第1項はおそらく骨の残留をあらわしていないので省いた。)

これらの積分は次のような数値を与える。

同 位 体	Q (μCi-日)		
	(b)式から	(c)式から	
⁸⁵ Sr	22.2	22.0 ¹⁾	全身に対して
⁸⁹ Sr	18.9	18.1 ¹⁾	骨に対して
⁹⁰ Sr	709	980 ²⁾	骨に対して

¹⁾ 文献12の表によって積分した値

²⁾ 文献13中に与えられた級数を用いて積分した値

(c)式を積分することによって得られた ⁹⁰Sr の Q の値は、(b)式からの値よりも14%大きいことがわかる。控えめとするため、そしてまた ²²⁶Ra のような他の骨親和性物質の取り扱い方と矛盾しないために、べき関数 ((c)式) から得られた Q の値を線量の計算に用いることとする。

これらの線量計算の結果は次のとおりである。

同 位 体	決定器官	Q (μCi-日)	ε	線 量* (rem)	決定器官に線量 D を与える 体内の μCi 数	
					D	μCi
⁸⁵ Sr	全 身	22	0.33	5.3×10^{-3}	0.25	47
⁸⁹ Sr	骨	18	2.8	0.37	1.5	4
⁹⁰ Sr	骨	980	5.5	39	1.5	0.04

* 1 μCi の血液中への取り込みから決定器官の受ける線量

骨線量を推定するまったく異なった方法が文献14に見られる。

(b) 非可搬性

肺に対する最大許容¹/₄年沈着量の10分の1

$$^{85}\text{Sr} \quad 0.1 I_a = 0.1 \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^8 = 1.57 \mu\text{Ci}$$

$$^{89}\text{Sr} \quad 0.1 I_a = 0.1 \times 4 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 = 0.63 \mu\text{Ci}$$

$$^{90}\text{Sr} \quad 0.1 I_a = 0.1 \times 5 \times 10^{-9} \times 1.57 \times 10^8 = 7.85 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル (μCi)

	⁸⁵ Sr	⁸⁹ Sr	⁹⁰ Sr
(a) 可搬性, 全身に	47	4	0.04
(b) 非可搬性, 肺に	1.6	0.6	0.08

5 項の(b)式から, (a)に相当する尿中排泄は次のようである。

同位体	尿中の DIL (nCi/日)			
	7 日	14 日	30 日	100 日
⁸⁵ Sr	1,000	200	40	5
⁸⁹ Sr	80	20	4	0.4
⁹⁰ Sr	1	0.2	0.05	0.01

8. 検出限界

尿の放射化学分析:

⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr $10^{-5} \mu\text{Ci/l}$ (文献15)

全身計測:

⁸⁵Sr $10^{-3} \mu\text{Ci}$ (文献16)

⁸⁹Sr $0.15 \mu\text{Ci}$ (文献17)

⁹⁰Sr $0.08 \mu\text{Ci}$ (文献17)

同位体	方 法	限 界	検出可能な日数
⁸⁹ Sr	放射化学分析(尿)	10 pCi/l (14 pCi/日)	250日
⁹⁰ Sr	〃	10 pCi/l (14 pCi/日)	93日
⁸⁵ Sr	全身計測	$10^{-3} \mu\text{Ci}$	724日
⁸⁹ Sr	〃	$0.15 \mu\text{Ci}$	120日
⁹⁰ Sr	〃	$0.08 \mu\text{Ci}$	1 調査レベル $0.08 \mu\text{Ci}$

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).

- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. A. ENGSTROM, R. BJÖRNERSTEDT, C.-J. CLEMEDSON and A. NELSON, *Bone and Radiostrontium*, John Wiley, New York (1957).
3. J. F. LOUTIT, *Irradiation of Mice and Men*, University of Chicago Press, Chicago (1962).
4. G. W. DOLPHIN and I. S. EVE, *Phys. in Med. Biol.* **8**, 193 (1963).
5. G. W. DOLPHIN and I. S. EVE, *ibid.*, p. 205.
6. G. W. DOLPHIN, S. JACKSON and B. A. J. LISTER, UKAEA Report AHSB(RP)R41 (1964).
7. C. L. COMAR and R. H. WASSERMAN, in: *Mineral Metabolism*, C. L. COMAR and F. BRONNER (eds.), vol. IIA, Academic Press, New York, chap. 23, p. 538 (1964).
8. W. S. SNYDER, M. J. COOK and M. R. FORD, *Health Physics* **10**, 171 (1964).
9. *Report of United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, United Nations, New York (1962).
10. G. W. DOLPHIN and S. JACKSON, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. I, IAEA, Vienna, p. 329 (1964), STI/PUB/84.
11. M. FUJITA, *ibid.*, vol. II, p. 385.
12. G. C. BUTLER and A. VELD, *Health Physics* **13**, 916 (1967).
13. C. G. STEWART, E. VOGT, A. J. W. HITCHMAN and N. JUPE, U.N. Peaceful Uses of Atomic Energy, *Proc. of the Second International Conference, Geneva, Sept. 1958*, vol. 23, p. 123.
14. R. BJÖRNERSTEDT and A. ENGSTROM, in: *Radioisotopes in the Biosphere*, R. S. CALDECOTT and L. A. SNYDER (eds.), University of Minnesota, p. 401 (1960).
15. J. D. EAKINS, AERE, Harwell, personal communication (1964).
16. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).
17. J. RUNDO, AERE, Harwell, personal communication (1964).

 ^{132}Te

1. 放射性崩壊データ (文献1)

		^{132}Te		娘核種 ^{132}I		
(a)	半減期:	3.25日		0.095日		
(b)	放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
		β^-	0.22	100	0.73	15
					0.90	20
					1.16	23
					1.53	24
					2.12	18

r	0.053		0.53	27
	0.23	95	0.62	7
			0.67	100
			0.78	85
			0.96	21
			1.16	9
			1.40	12
			1.96	5
			2.20	2

2. $\Sigma EF (RBE) n$	(a) 全身: 1.9	(c) 甲状腺: 0.65
	(b) 腎臓: 0.96	

3. 代 謝

放射性テルルの代謝は実験動物を用いてだけ研究が行なわれている。吸収と排泄の結果は次の表に示されている。

代謝の知見の要約

種	投経	与路	吸収の率 百分	生物学的半減期(日)	文献
ネズミ	経口	経口	25	15	3
ネズミ	経口	経口	16	約7	4
ネズミ	経口	経口	20~25	吸収されたものの60%が16日間に失われる	5
ネズミ	経口	経口	20		6
ネズミ	経口	経口	10~25	約14	7
ネズミ	腹腔	腹腔	—	0.5と12	8
モルモット	経口	経口	8		4
イヌ	経口	経口	25	吸収されたものの13%が6日間に失われる	9
イヌ	静脈	静脈	—	吸収されたものの20%が6日間に失われる	9
ヒツジ	経口	経口	約1	1~3	10

ネズミ体内の放射性テルルの分布の詳しい研究は Moskalev (文献5) と Hollins (文献8) によってなされ、彼らは投与後いろいろな時間にとったい

くつかの組織を分析している。腎臓はもっとも高い濃度を示し(文献8), それは24時間で体内取り込み量の約5%の割合になる。文献4からの特に興味ある結果は(文献6と8で確かめられた), ネズミの血液中に高い濃度で見いだされたこと, テルルは赤血球のタンパク質に付いていたことである。この結果はハツカネズミ, モルモットあるいはウサギでは得られなかった(文献4)。

乳牛ではミルク中の最大濃度(給餌後24時間)は同じ時刻の尿中濃度の2%で(文献11), 食べさせた放射性テルルの0.5%がミルク中に排泄された。

最初の24時間の放射性テルルの総排泄量は体内取り込み量の $\frac{1}{3}$ であり(文献5と8), 尿中排泄は $\frac{1}{4}$ であった。Moskalev(文献5)は食べさせたテルルの15%(吸収されたものの60%)が投与後最初の16日間で尿中に排泄されたと報告している。ネズミに腹腔注射した後では $F_u:F_f=2$ であった(文献8)。

4. 残留率式

有蹄類はテルルについて独特の短い残留をもっていると思われる。ネズミとイヌから得られた結果を利用し, 人ではそれよりいくぶん長い半減期であると仮定すると, 最初の1日以後は体内テルルの生物学的半減期は約3週間であると結論づけられよう。この結論と最初の1日に測定された排泄量とにもっともよくあてはまる残留式は

$$R(t) = 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{0.5} t\right) + 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{20} t\right) \quad (1)$$

5. 排泄率式

これは残留式の微分によって得られる。

$$Y(t) = 0.7 \exp(-1.4 t) + 0.017 \exp(-0.035 t) \quad (2)$$

$$Y_u(t) = 0.67 Y(t) = 0.5 \exp(-1.4 t) + 0.01 \exp(-0.035 t) \quad (3)$$

6. 線量 D を与える摂取量

(a) 可搬性

放射性娘核種である ^{132}I と平衡になっている ^{132}Te に作業者が被曝したと仮

定すると、両方の放射性核種からの放射線被曝を考慮しなければならない。また、決定器官となる可能性のある組織として次の3つを考えなければならない。すなわち ^{132}Te に対して腸と腎臓、 ^{132}I に対して腎臓と甲状腺である。いろいろな放射線被曝を計算するのに必要な残留式および排泄式は次のようである。

^{132}Te

$$R(t) = 0.5 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{0.5} + \frac{0.693}{3.25}\right)t\right\} + 0.5 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{20} + \frac{0.693}{3.25}\right)t\right\} = 0.5 \exp(-1.6t) + 0.5 \exp(-0.25t) \quad (4)$$

^{132}Te

$$Y(t) = 0.5 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{3.25} + 1.4\right)t\right\} + 0.01 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{3.25} + 0.035\right)t\right\} = 0.5 \exp(-1.6t) + 0.01 \exp(-0.25t) \quad (5)$$

ヨウ素

$$R(t) = 0.7 \exp\left(-\frac{0.693}{0.35}t\right) + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{100}t\right) \quad (6)$$

^{132}I についてはこの式は次のようになる (104頁を見よ)。

^{132}I

甲状腺内で含有量がピーク値に達した後はいつでも

$$R(t) = 0.7 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{0.35} + \frac{0.693}{0.095}\right)t\right\} + 0.08 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{100} + \frac{0.693}{0.095}\right)t\right\} = 0.7 \exp(-9.3t) + 0.08 \exp(-7.3t) \quad (7)$$

初めの項は、 $27l$ とすることが妥当なヨウ化物スペース中における ^{132}I の残留を示す (文献15)。それゆえ、ヨウ化物スペースについては

^{132}I

$$R_b(t) = 0.7 \exp(-9.3t) \quad (8)$$

甲状腺については

¹³²I

$$R_{th}(t) = 0.08 \exp(-7.3t) \quad (9)$$

甲状腺に達したすべての¹³²Iがそこで崩壊し、またすべてのヨウ化物が身体から尿中に排泄されると仮定すると、¹³²Iの排泄式は(6)式を微分し、放射性崩壊の補正をすることによって次のように導かれる。

¹³²I

$$Y_u(t) = 1.4 \exp(-9.3t) \quad (10)$$

これらの式を用いて、¹³²Teの1 μ Ciおよび親核種と平衡になっている¹³²Iの1 μ Ciを経口摂取することによって生じる線量を計算できる。

腸 ICRP Publication 2は経口摂取した¹³²Teの決定器官を大腸下部としている。1 μ Ciの¹³²Teを経口摂取後、0.25 μ Ciが細胞外液に吸収され(文献5, 9), 0.75 μ Ciが標準人で42時間腸管中に残る(文献13)。その結果大腸下部の受ける線量は、文献14に与えられている手順によって計算すると、約10 mremである。

腎臓 注射された放射性テルルの約5%は第1日目に腎臓に沈着し(文献7, 8), おそらく20日の生物学的半減期でそこにとどまる。 T_b の正確な値は¹³²Teの放射性半減期が短いためそれほど重要なことではない。それゆえ、結局1 μ Ciの¹³²Teの経口摂取は腎臓に $0.05 \times 0.25 = 0.0125 \mu$ Ciの沈着をもたらし、この沈着量は0.05 μ Ci-日の放射線被曝、したがって1 mremの線量を与える。腎臓は血液と尿の中の¹³²Teと¹³²Iによっても照射されるであろう。これによって生じる放射線被曝を計算するため、人の腎臓は血液60 mlと尿60 mlを含んでいると仮定してよからう。また、注射された放射性テルルの15%がネズミの血液に見出されること(文献7と8), および前に述べたように、人のヨウ化物スペースは約27 lであること、および尿の1日排泄量は1.4 lであることも知っていなければならない。

これらの分布に関する事実を用い、適切な残留式および排泄式を積分するこ

とによって、腎臓の総線量を約 10 mrem と推定することができる。

甲状腺 ^{132}Te - ^{132}I の $1\mu\text{Ci}$ の経口摂取から生じる甲状腺の総被曝量 (^{132}I 放射能の時間積分) は、被曝が 3 つの部分からなると考えることによって、もっとも良く推定することができる。すなわち、

第 1 の部分 親である ^{132}Te と一緒に摂取された $1\mu\text{Ci}$ の ^{132}I から：この ^{132}I は直ちに吸収される。

第 2 の部分 胃腸管から細胞外液に吸収された $0.25\mu\text{Ci}$ の ^{132}Te の崩壊によって生じた ^{132}I から。

第 3 の部分 胃腸管に 42 時間 (1.75 日) 吸収されずに残留する $0.75\mu\text{Ci}$ の ^{132}Te の崩壊から生じた ^{132}I から：吸収が大腸で起こるかどうかは疑わしいが、このヨウ素は血液中に吸収されると仮定する (文献 17~20)。

第 1 の部分からの放射線被曝は (9) 式を時間について 0 から 50 年まで積分することによって得られ、それは $0.011\mu\text{Ci}$ -日である。

第 2 の部分からの被曝は、 $0.25\mu\text{Ci}$ の親核種 ^{132}Te の取り込み後の時刻 τ (sec) における時間の増分 $d\tau$ の間に生じた ^{132}I の放射能は次式で与えられるという事実から推定される。

ここで λ_1 は ^{132}I の放射性崩壊定数

λ_2 は ^{132}Te の放射性崩壊定数

R_1 は (9) 式から得られた、甲状腺中に ^{132}I が残留する割合

R_2 は (4) 式から得られた、身体中に ^{132}Te が残留する割合

$$dI_2(\tau) = 0.25 \lambda_1 \cdot R_2(\tau) \cdot d\tau \mu\text{Ci} \quad (11)$$

$t \geq \tau$ のとき、時刻 $(t - \tau)$ における甲状腺中に残留する摂取量のこの増分は次によって与えられる。

$$dI_2(\tau, t - \tau) = 0.25 \lambda_1 \cdot R_2(\tau) \cdot d\tau \cdot R_1(t - \tau) \mu\text{Ci} \quad (12)$$

この ^{132}Te と ^{132}I の残留関数にそれぞれ (4) 式と (9) 式を代入し、得られた式

(100)

を時間について0~50年まで積分すると、0.046 μCi -日がえられる。

第3の部分については、腸管中にある0.75 μCi の ^{132}Te から経口摂取の τ 秒後における時間の増分 $d\tau$ の間に生じた ^{132}I の μCi は次式によって与えられる。

$$dI_3(\tau) = 0.75 \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_2 \tau) d\tau \quad (13)$$

$t \geq \tau$ のとき、時刻 $(t-\tau)$ において甲状腺に移行し残留するこの増分の生成量は次式によって与えられる。

$$dI_3(\tau, t-\tau) = 0.75 \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_2 \tau) \cdot d\tau \cdot R_1(t-\tau) \mu\text{Ci} \quad (14)$$

この ^{132}I の残留に(9)式を代入し、時間について τ を0~1.75日にわたって、また $(t-\tau)$ を0~50年にわたって積分すると、0.09 μCi -日がえられる。

それゆえ、経口摂取された1 μCi の ^{132}Te - ^{132}I からの甲状腺の総被曝は0.147 μCi -日であって、それは0.24 remの線量に相当する。

したがって娘核種 ^{132}I と平衡になっている ^{132}Te の経口摂取からおこる ^{132}I による照射の結果の決定器官は甲状腺である。

1 μCi の ^{132}Te - ^{132}I の吸入から甲状腺が受ける線量は以下のように仮定することによって容易に計算できる。すなわち、

- (a) 0.25 μCi は直ちにはき出される
- (b) ^{132}Te と ^{132}I の0.25 μCi は細胞外液に吸収される
- (c) ^{132}Te と ^{132}I の残りの0.5 μCi は胃腸管に移行する

そこで、甲状腺に対する放射線被曝は上の(b)と(c)から生じると考えることができる。

(b)の部分からの被曝 ^{132}I の0.25 μCi からの放射線被曝は(9)式の積分から得られた値の $1/4$ として計算されよう。結果は0.03 μCi -日である。取り込まれた0.25 μCi の ^{132}Te からの被曝は(12)式によって計算されたものと同じ、すなわち、0.046 μCi -日である。それゆえ(b)の部分からの総被曝は0.049 μCi -日である。

(c)の部分からの被曝 前の項で $1 \mu\text{Ci}$ の ^{132}Te - ^{132}I の経口摂取によって、甲状腺の放射線被曝は合計 $=0.147 \mu\text{Ci}$ -日になることが示された。したがって $0.5 \mu\text{Ci}$ の経口摂取による甲状腺の被曝は $0.073 \mu\text{Ci}$ -日である。

$1 \mu\text{Ci}$ の ^{132}Te と $1 \mu\text{Ci}$ の ^{132}I の吸入による甲状腺の総被曝はしたがって $(0.049+0.073)=0.122 \mu\text{Ci}$ -日で、

$$0.122 \times 51.2 \times \frac{0.65}{20} = 0.2 \text{ rem}$$

の線量を甲状腺に与えるであろう。

それゆえ甲状腺に対する 1.5 rem という線量は、 ^{132}I と平衡になっている ^{132}Te の $6.3 \mu\text{Ci}$ の経口摂取、または、 $7.5 \mu\text{Ci}$ の吸入によって生じるであろう。

(b) 非可搬性

肺に対する最大許容¹/4年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times 2 \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^8$$

$$= 3.14 \mu\text{Ci}, \text{ これは } 25 \mu\text{Ci} \text{ の吸入に相当する。}$$

これは甲状腺に線量 D を与える可搬性の ^{132}Te の吸入放射能より大きいことに注意せよ。

7. 調査レベル

(a) 可搬性

経口摂取 $6.3 \mu\text{Ci}$ 、または、吸入摂取 $7.5 \mu\text{Ci}$ 。単純にまた慎重にするため、いずれの経路による体内取り込みであっても $6 \mu\text{Ci}$ を調査レベルとしよう。その摂取の結果、尿中濃度は次のように与えられる。

$$0.25 \times \frac{6}{1.4} Y_u(t) = 1.1 \{0.5 \exp(-1.6 t) + 0.01 \exp(-0.25 t)\} \mu\text{Ci}/l$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/l)
7	2
30	0.006

(b) 非可搬性

可搬性の ^{132}I の考察によって限定される。

8. 検出限界

全身計測： 3×10^{-4} から $3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$ (文献16)

これによれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して4週間後にも可能である。甲状腺カウンターを用いると、その限界はもっと低くなるであろう。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A=5 to A=257*, Springer-Verlag, Berlin (1961)
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. I. L. CHAIKOFF, C. ENTENMAN and M. FISHER, USAEC Report MDDC-1275, pp. 132-44 (1947).
3. J. G. HAMILTON, *Radiology* **49**, 325 (1947).
4. D. W. H. BARNES, G. B. COOK, G. E. HARRISON, J. F. LOUTIT and W. H. A. RAYMOND, *J. Nucl. Energy* **1**, 218 (1955).
5. YU. I. MOSKALEV, *Med. Radiol.* No. 7, p. 149 (1960).
6. S. E. SANDRATSKAYA, *Toxikologiya Redkikh Metallov*, p. 117 (1963).
7. *Raspredelenie, Biologicheskoe Deistvie, Uskorenie Vyvedeniya Radioaktivnykh Izotopov (Distribution, Biological Activity, and Acceleration of Excretion of Radioactive Isotopes)*, YU. I. MOSKALEV, ed., Publishers "Medicine", Moscow, pp. 62-70 (1964).
8. J. G. HOLLINS, private communication (1967).
9. R. H. DEMEIO and F. C. HENRIQUES, JR., *J. Biol. Chem.* **169**, 609 (1947).
10. H. W. CASEY, A. C. CASE, R. O. MCCLELLAN and L. K. BUSTAD, *Health Physics* **9**, 1223 (1963).
11. H. M. SQUIRE, L. J. MIDDLETON, B. F. SANSOM and C. R. COID, *International Conference on Radioisotopes in Scientific Research*, UNESCO/NS/RIC/143, Vol. 4, p. 207 (1957).
12. H. M. SQUIRE, L. J. MIDDLETON, B. F. SANSOM and C. R. COID, *Progress in Nuclear Energy, Series VI, Biological Sciences*, vol. 3, *The Entry of Fission Products into Food Chains*, Pergamon Press, p. 69 (1961).
13. I. S. EVE, *Health Physics* **12**, 131 (1966).
14. G. W. DOLPHIN and I. S. EVE, *Health Physics* **12**, 163 (1966).
15. F. D. MOORE, K. H. OLSEN, J. D. MCMURREY, H. V. PARKER, M. R. BALL and C. M. BOYDEN, *The Body Cell Mass and its Supporting Environment*, W. B. Saunders, Philadelphia, 1963.
16. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).
17. A. ALBERT, A. TENNEY and N. LORENZ, *Endocrinology* **50**, 374 (1952).
18. M. T. HAYS and D. H. SOLOMON, *J. Clin. Invest.* **44**, 117 (1965).
19. I. PASTAN, *Endocrinology* **61**, 93 (1957).
20. V. A. REVIS and I. P. MURAVEI, *Klin. Med. (Mosk.)* **37**, (4), 51 (1959).

131I

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 8.04日

(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β^-		0.25	3
		0.33	9
		0.61	87
		0.81	1
γ		0.08	2
		0.28	5
		0.36	80
		0.64	9
		0.72	3

2. $\Sigma EF (RBE) n$

甲状腺: 0.23

Barnaby (文献2) は β 粒子1個あたりの平均エネルギーを 0.17 MeV としている。この報告書の計算のためには β と γ を合わせたエネルギーを 0.2 MeV とする。

3. 代 謝

身体内、とくに甲状腺および甲状腺ホルモンにおけるヨウ素の代謝は文献3と4で検討されている。放射性ヨウ素の生物学についてシンポジウム(文献5)が催された。文献6は、ヨウ素代謝の定量的な動態研究ならびに、いろいろな区画の大きさについて検討している。

放射性ヨウ化物が血中に入ると、それは甲状腺に取り込まれ、 ^{131}I の1回摂取後約24時間で最大濃度に達する(文献6)。注射された放射性ヨウ化物は非常に速く唾液中にあらわれ(文献3)、その分泌率は、1人の被検者について

投与して3時間後に、1時間あたり1%であった。

ヨウ素の短寿命同位体が甲状腺に到達する割合は、沈着するまでに放射性崩壊がかなりおこるときには減少する。Stewart と Simpson (文献8)は、1回摂取ののちに血液から甲状腺へ短寿命ヨウ素が移行する割合を計算した。彼らはまた、Colard のデータ (文献6) から、甲状腺中の放射性ヨウ素のピーク量の血中取り込み量に対する比も計算した。下に記したこれら2通りの計算結果はよい一致を示していることがわかる。

同位体	甲状腺取り込み量	甲状腺へ移行する割合
^{131}I	0.34	0.3
^{132}I	0.07	0.09
^{133}I	0.21	0.24
^{134}I	0.04	0.04
^{135}I	0.13	0.17

放射性ヨウ素の排泄に関するいくつかの研究は、次表に要約する結果を与えている。

患者数	尿	糞	$F_u : F_f$	文献
	150 $\mu\text{g}/\text{日}$	17.5 $\mu\text{g}/\text{日}$		4
2	75%/4日	2.5%/4日		7
6			2—34(平均13)	9
7	64	15		10

尿中排泄を計算するには $F_u = 1$ を用いる。

4. 残留率式

身体中の残留は次に示す2つの指数項からなる式にしたがって時間とともに減少し、

$$R(t) = K_1 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{b1}} t\right) + K_2 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{b2}} t\right)$$

$K_1 + K_2 = 1$ であり、また第2項が甲状腺中の残留をあらわすと、一般に認められているようである。この式のパラメーターを順に検討してみよう。

K_2

K_2 は放射性ヨウ素の1回投与量のうち沈着する割合と同じで、その測定値は数百人の被検者について報告されている。404人の患者について ^{131}I の甲状腺沈着率の頻度分布をプロットすると、30%のところにはっきりと最頻値があった(文献11)。欧米の多数の研究所の数百人の被検者についてなされた測定値の調査(文献12)は、 K_2 の値が21%から60%までの範囲にあることを示している。文献3では正常甲状腺の患者について同じような範囲が報告されている。文献12では、北アメリカがもっとも低い値を、そして西ヨーロッパがもっとも高い値を示しており、甲状腺に沈着する放射性ヨウ素の割合にははっきりした地理的な差があると考えられる。

食餌中の全ヨウ化物量の K_2 に及ぼす影響が定量的に測定された。63人の子供達をしらべた研究では、安定ヨウ化物の投与量が体表面積 1 m^2 につき $100\text{ }\mu\text{g}/\text{日}$ から $2,000\text{ }\mu\text{g}/\text{日}$ に増すと、 K_2 は0.25から0.05にへった(文献13)。8人の成人男子についての実験では、食物中のヨウ化物量が $50\text{ }\mu\text{g}$ から $300\text{ }\mu\text{g}$ に増すと、 K_2 は0.57から0.17に減少することを示した(文献6)。文献14, 15および16には、人の甲状腺の放射性ヨウ素沈着を減少させる上で、もっと多量のヨウ化カリウムの示す効果が報告されている。

要約すると、北アメリカの成人について K_2 は0.2から0.3まで変わり、線量計算のためには0.25という値がよく用いられている。北アメリカ以外の国々では(ヨーロッパでの測定がもっとも多いが)その値は0.3から0.6まで変動する。もし、1つの値をえらぶとすれば、ICRP 専門委員会2によってはじめに提示された0.3が望ましいと思われる。

環境汚染を評価するさい、放射性ヨウ素の摂取から生じる子供の甲状腺の照射を見積ることがしばしば必要で、それには、子供の K_2 値に関する知識を必要とする。この問題は、研究論文や総説(文献17~21)で繰り返し考察されてきた。発表された事実を要約すると、パーセントであらわした取り込み量は、

(106)

2倍の大きさになるかもしれない出生の最初の数日間を除いて、年齢によって変わらないといってよいであろう。

T_{b1}

次の値が人について報告されている。

T_{b1} (日)	被検者数	文献
0.34	26	22
0.4	4	24
0.5	1	7

T_{b2}

次の値が人について報告されている。

T_{b2} (日)		被検者数	文献
平均	範囲		
74	37~153	4	7
92		26	22
95	26~212	19	20
125	95~158	8	6
138			23

文献6は、ヨウ化物摂取量を $50 \mu\text{g}$ から $300 \mu\text{g}$ にふやすと T_{b2} は158日から95日に減少したと報告している。

明らかに、 T_{b2} の値は人によって、また時間によって大きく変動するが、ヨウ素の短寿命同位体ではどの同位体についても、 T_{b2} の変動は甲状腺汚染の時間積分に極めてわずかな影響しか及ぼさない。たとえば、 ^{131}I について T_0 を100日から50日にしても、 T_{eff} は7.4日から6.9日に変わるだけである。

上記により、平均の残留式は次のようであると思われる。

$$R(t) = 0.7 \exp\left(-\frac{0.693}{0.35} t\right) + 0.3 \exp\left(-\frac{0.693}{100} t\right)$$

5. 排泄率式

これは平均残留式を微分することによって得られる。

$$Y(t) = 1.4 \exp\left(-\frac{0.693}{0.35} t\right) + 2 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{0.693}{100} t\right)$$

最初の3日がすぎたのちには、第1項は無視できる。

6. 線量 D を与える沈着量

(a) 甲状腺に可搬性：

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left\{-0.693\left(\frac{1}{100} + \frac{1}{8}\right)t\right\} dt = 10.7 \mu\text{Ci-日}$$

∴ 甲状腺中の沈着量 $1 \mu\text{Ci}$ から甲状腺がうける線量

$$= 10.7 \times 51.2 \times \frac{0.2}{20} = 5.5 \text{ rem}$$

∴ 甲状腺に対する線量 D (5.5 rem) は、甲状腺の初期含有量 $0.27 \mu\text{Ci}$ から生じる。

(b) 非可搬性：計算しない。

7. 調査レベル

(a) 可搬性：甲状腺の沈着量 $0.3 \mu\text{Ci}$ 、これは全身に $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みにより生ずる。

(b) 非可搬性：計算しない。

(a)の結果生じる尿中排泄は、

$$\begin{aligned} & 1 \times F_u \left[1.4 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{0.35} + \frac{0.693}{8}\right)t\right\} + 2 \right. \\ & \quad \left. \times 10^{-3} \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{100} + \frac{0.693}{8}\right)t\right\} \right] \\ & = \left[1.4 \exp(-2.07 t) + 2 \times 10^{-3} \exp(-0.094 t) \right] \end{aligned}$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)	甲状腺中の DIL (nCi)
7	0.9	150
14	0.5	80
30	0.1	20

8. 検出限界

(a) 尿の放射化学分析：1試料につき 10 pCi (文献25)

たいていのバイオアッセイプログラムでは、これにより 1 l あたり (または 1 日あたり) 100 pCi の検出が可能であろう。したがって 1 調査レベルの体内取り込みの 3~4 週間後にもその検出が可能である。

(b) 全身計測： 10^{-3} μ Ci (文献26)

これによれば、体内の 1 調査レベルの検出はそれを取り込んで 2 か月後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
(b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
(c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. C. F. BARNABY, *Health Physics* **10**, 437 (1964).
3. J. GROSS, in: *Mineral Metabolism*, C. L. COMAR and F. BRONNER (eds.), vol. II, Academic Press, New York, chap. 29 (1962).
4. E. J. WAYNE, D. A. KOUTRAS and W. D. ALEXANDER, *Clinical Aspects of Iodine Metabolism*, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1964).
5. Hanford Symposium on the Biology of Radioiodine, *Health Physics* **9**, No. 12 (1963).
6. J. F. COLARD, W. G. VERLY, J. A. HENRY and R. R. BOULENGER, *Health Physics* **11**, 23 (1965).
7. S. R. BERNARD, B. R. FISH, G. W. ROYSTER, L. B. FARABEE, P. E. BROWN and G. R. PATTERSON, Jr., in Reference 5, p. 1307.
8. C. G. STEWART and S. D. SIMPSON, personal communication (1965).
9. R. L. VOUGHT, W. T. LONDON, L. LUTWAK and T. D. DUBLIN, *J. Clin. Endocrin.* **23**, 1218 (1963).
10. M. T. HARRISON, R. M. HARDEN, W. D. ALEXANDER and E. WAYNE, *J. Clin. Endocrin. and Metab.* **25**, 1077 (1965).
11. S. SILVER, *Radioactive Isotopes in Medicine and Biology*, Henry Kimpton, London, p. 55 (1962).
12. B. STRANGE, *Radioaktivt jod ved Diagnosen af sygdomme i gl. Thyreoides*, Andelsbogtrykkeriet, Odense (1959).
13. K. M. SAXENA, E. M. CHAPMAN and C. V. PRYLES, *Science* **138**, 430 (1962).
14. E. E. POCHIN and C. F. BARNABY, *Health Physics* **7**, 125 (1962).
15. C. A. ADAMS and J. A. BONNELL, *Health Physics* **7**, 127 (1962).
16. D. RAMSDEN, C. O. PEABODY, F. H. PASSANT and R. G. SPEIGHT, UKAEA Report AEEW-R444 (1965).
17. M. F. MAGALOTTI, I. F. HUMMON and E. HIERSCHBIEL, *Am. J. Roentgenol.* **81**, 47 (1959).
18. J. E. KEARNS and H. F. PHILIPSBORN, Jr., *Northwestern University Medical School Quarterly Bulletin* **36**, 47 (1962).
19. M. EISENBUD, B. PASTERNAK, G. LAURER, Y. MOCHIZUKI, M. E. WRENN, L. BŁOCK and R. MOWAFY, in Reference 5, p. 1281.
20. M. D. VAN DILLA and M. J. FULWYLER, *Science* **144**, 178 (1964).
21. P. MALVAUX, C. BECKERS and M. DE VISSCHER, *J. Clin. Endocrin.* **25**, 817 (1965).
22. C. C. LUSHBAUGH, D. B. HALE and C. R. RICHMOND, USAEC Report LAMS-2526, p. 364 (1961).

23. J. VENNART and M. MINSKI, *Br. J. Radiol.* **35**, 372 (1962).
 24. J. HARRISON, *Health Physics* **9**, 993 (1963).
 25. J. D. EAKINS, UKAEA, Harwell, personal communication.
 26. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

^{137}Cs

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 1.1×10^4 日

(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率(%)
	β^-	0.51	92
		1.17	8
	γ	0.66	82

2. $\Sigma EF (RBE) n$

全身: 0.59

3. 代謝

現在ある文献中に、人における ^{134}Cs と ^{137}Cs の代謝についての情報は豊富にある。最近の報告書のうち精選されたものが文献2に見出される。そしてこの文献はそれ以前の文献への手がかりとしても役に立つであろう。

Rundo と Taylor (文献2の一部) は、12人の被検者の $F_f / (F_u + F_f)$ の測定結果を検討した。値は0.1から0.3まで広がっており、平均は約0.2であった。彼らは T_{b2} と糞中に排泄された ^{137}Cs の割合との間に正の相関を見出した。Hammond ら (文献4) は $F_u : F_f$ 比を測定し、1から5.5まで変動することを見出した。この報告書では F_u は0.8と仮定する。

4. 残留率式

多くの研究者は、残留率が次の一般型をもつ式で表現されることに同意している。

$$R(t) = K_1 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{b1}} t\right) + K_2 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{b2}} t\right)$$

文献2によると、 K_1 の値は0.02から0.22までの範囲にあり平均は0.15、 T_{b1} は0.5から2.1までの範囲にあり平均は1.0、 K_2 は0.78から0.97までの範囲にあり平均は0.85、 T_{b2} は60から165までの範囲にあり平均は115である。

Naversten と Lidén (文献2(e))は、 $K=0.01\sim 0.05$ と $T_b=0.5\sim 2.5$ 時間の値をもつ、短寿命の小成分が存在することをみつけている。同じ著者は、フィンランドのラップ族の成人83人について測定して、 T_{b2} が65日±10日であることを見出した。そこで、もしこの値を上述の値の中を含めるならば、 T_{b2} として引用された平均値をかなり引下げることになる。

上記の要約はもっと新しい報告(文献3)と矛盾しない。

T_{b2} に対し平均値を与えることはむずかしい。なぜなら、おそらく T_{b2} は多くの生物学的な要因によって左右されるからである。たとえば、年齢と明らかな相関関係があるようであり、幼児について25日という T_{b2} の値が、そして子供については35日という値が見出された(文献2(e))。

本報告書では残留式は次のようであると仮定する。

$$R(t) = 0.15 \exp\left(-\frac{0.693}{1.0} t\right) + 0.85 \exp\left(-\frac{0.693}{115} t\right)$$

5. 排泄率式

これは残留式の微分によって得られる。

$$Y(t) = 0.1 \exp\left(-\frac{0.693}{1.0} t\right) + 0.005 \exp\left(-\frac{0.693}{115} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性、全身に対し(放射性崩壊は無視できるゆえ)

$$\begin{aligned} Q &= 0.15 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{1.0} t\right) dt + 0.85 \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{115} t\right) dt \\ &= 0.22 + 141 = 141 \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

それゆえ、血液への取り込み量 $1 \mu\text{Ci}$ から全身が受ける線量は

$$141 \times 51.2 \times \frac{0.59}{70,000} = 0.061 \text{ rem}$$

その結果、全身に対する線量 D (0.25 rem) は $4.1 \mu\text{Ci}$ の摂取から生じるであろう。

(b) 非可搬性：

肺に対する最大許容^{1/4}年摂取量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40 \text{ h}) \\ &= 0.1 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 = 0.16 \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に $4 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $0.2 \mu\text{Ci}$

(a) に対応する尿中排泄

$$= 4 \times 0.8 \{0.1 \exp(-0.693 t) + 0.005 \exp(-0.006 t)\} \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿の DIL (nCi/日)	全身の DIL (μCi)
30	13	3
100	9	2

8. 検出限界

全身計測： $0.01 \mu\text{Ci}$ (文献6)

これによれば、全身の1調査レベルの検出は2.5年後に、また肺中の1調査レベルの検出は、肺における非可搬性セシウムの T_b を90と仮定すれば、1年後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).

2. *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna (1964), STI/PUB/84.
 (a) J. RUNDO and B. T. TAYLOR, p. 3.
 (b) L. G. BENGTTSSON, Y. NAVERSTEN and K. G. Svensson, p. 21.
 (c) R. HESP, p. 61.
 (d) L. JEANMAIRE, p. 75.
 (e) Y. NAVERSTEN and K. LIDÉN, p. 79.
 (f) J. HARRISON and K. G. McNEILL, p. 89.
 (g) R. D. JORDAN, J. S. BURKLE, L. T. BROWN, E. B. SCROM, J. W. HARGUS and J. H. NICHOLS, p. 103.
 (h) E. J. HUYCKE and E. OBERHAUSEN, p. 135.
 (i) C. MELANDRI and O. RIMONDI, p. 143.
 (j) E. HÄSÄNEN and J. K. MIETTINEN, p. 183.
3. M. A. VAN DILLA, *Health Physics* **11**, 21 (1965).
 4. S. E. HAMMOND, F. O. BOLD and N. S. MACDONALD, *Health Physics* **9**, 523 (1963).
 5. S. SUGURI, S. OHTANI, J. AKAISHI and N. MAKINO, *Health Physics* **10**, 469 (1964).
 6. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).
 7. Task Group on Lung Dynamics, *Health Physics* **12**, 173 (1966).

 ^{140}Ba

1. 放射性崩壊データ (文献1)

		^{140}Ba		娘核種 ^{140}La		
(a)	半減期:	12.8日		1.7日		
(b)	放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
		β^-	0.48	25	<0.83	約12
			0.59	10	1.10	約26
			0.83	5	1.38	約45
			1.02	60	1.71	約10
					2.20	約7
		γ	0.13	1.4	0.33	19
			0.16	10	0.49	41
			0.30	5	0.82	27
			0.44	5	0.92	11
			0.54	26	1.60	95
					2.54	4

2. $\Sigma EF (RBE) n$

骨: 4.2

3. 代 謝

バリウムの代謝は文献2に検討されている。バリウムの経口投与量の6%が血液に吸収される。カルシウム, ストロンチウム, バリウムの相対的な吸収は10:5:1である(文献3)。バリウムは骨親和性であることが知られており, 眼の色素沈着部分に沈着することがわかっている(文献4)。ネズミへの静脈注射後, 最初の15分間の ^{133}Ba の再分布をしらべた研究が文献5に報告されている。この期間に, 注射された放射性核種の50%が骨格に沈着する。標識された塩化バリウムを2人の人の静脈に注射したとき, 66%は尿中に排泄され, 糞中には極めてわずかしかなかった(文献7)。 $F_u:F_f \approx 20 \sim 30$ (文献3)。この値は, 1人の人について報告されている $F_f:F_u = 9.0$ (文献3(a))とは全く異なっている。

4. 残留率式

ビーグル犬と人におけるアルカリ土類の残留を記述するべき関数を比較すると次のとおりである。

$$R(t) = A t^{-n}$$

元 素	ビーグル犬		人	
	A	n	A	n
Ca	0.76	0.21	0.96	0.12
Sr	0.68	0.21	0.5	0.2
Ba	1.3	0.24		
	0.96	0.23		

もし, パターンに何らかの一致性があるとするならば, 人については $R(t) = 1 t^{-0.2}$ であると結論してもよからう。しかし残念ながら, 人について得られるわずかのデータ(文献2, 3)は6日以上の時点でもとられているものはない。

(114)

5. 排泄率式

上記の残留関数を認めるならば、排泄率式は次のようになる。

$$Y(t) = 0.2 t^{-1.2}$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性、骨に対し：

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{12.8} t\right) \times t^{-0.2} dt = 12 \mu\text{Ci-日} \quad (\text{文献 8})$$

したがって、骨中の初期含有量 $1 \mu\text{Ci}$ から骨が受ける線量は

$$12 \times 51.2 \times \frac{4.2}{7,000} = 0.37 \text{ rem}$$

それゆえ、骨に対する線量 D (1.5 rem) は、骨中の初期含有量 $4 \mu\text{Ci}$ から生じ、これは血液への取り込み量 $8 \mu\text{Ci}$ に相当する。

(b) 非可搬性

肺に対する最大許容 $1/4$ 年摂取量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40 \text{ h}) \\ &= 0.1 \times 4 \times 10^{-8} \times 1.57 \times 10^8 \\ &= 0.63 \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：骨に $4 \mu\text{Ci}$ または全身に $8 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $0.6 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$= 8 \times 0.2 t^{-1.2} \times \exp\left(-\frac{0.693}{12.8} t\right) \mu\text{Ci/日}$$

t (日)	尿の DIL (nCi/日)
14	32
30	5
100	0.03

8. 検出限界

全身計測：0.01 μCi (文献9)

これによれば、体内の1調査レベルの検出は、この汚染が生じて3か月後にも可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. N. R. FRENCH, in: *Radioecology*, Reinhold Publishing Corp., New York, and The American Institute of Biological Sciences, Washington, D. C., p. 557 (1963).
3. G. E. HARRISON, W. H. A. RAYMOND and H. C. TRETHERWAY, *Proceedings of the International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy*, vol. 11, U.N., N.Y., p. 156 (1956).
- (a) G. E. HARRISON, T. E. F. CARR, A. SUTTON, and J. RUNDO, *Nature* **209**, 526 (1966).
4. R. J. GARNER, *Nature* **184**, 733 (1959).
5. R. L. HAYES and J. E. CARLTON, USAEC, Med. Div. Res. Rep. ORINS-49, p. 72 (1965).
6. R. E. ROWLAND, USAEC Report ANL-6104 (1959).
7. G. C. H. BAUER, A. CARLSSON and B. LINDQUIST, *Acta Orthopaed. Scand.* **26**, 241 (1957).
8. R. E. ROWLAND and C. J. LEUER, USAEC Report ANL-6398 (Jan.-June 1961).
9. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

 ^{144}Ce

1. 放射性崩壊データ (文献1)

		^{144}Ce		娘核種 ^{144}Pr	
(a) 半減期:		285日		0.012日	
(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
	β^-	0.19	19.5	0.80	1
		0.24	4.5	2.29	1.3
		0.32	76	2.98	97.7
	γ	0.03から		0.69	1.6
		0.06	小さい		

0.08	1.5	1.49	0.3
0.10	0.03	2.18	0.8
0.13	10.9		

2. $\Sigma EF (RBE) n$

骨：6.3

3. 代 謝

利用しうる代謝の知識の大部分はネズミでの実験から得られたものである(文献2, 3)。筋肉注射の後, 吸収された放射性核種について次の百分率が見出された(文献2)。

	24 時間	96 時間
骨	30	28
肝 臓	54	51
尿	} 6	6
糞		8

ネズミについてのこの表と, ビーグル犬についての文献5とから, 早い時期において, 組織系内 ^{144}Ce の約3分の1が骨に含まれると結論づけることができよう。注射後256日目に(文献2), 注射された放射性核種の20%が骨に, 5%が肝臓に含まれていた。

ネズミでの筋肉注射後の ^{144}Ce の排泄の研究によれば, 最初の2週間に約10%が尿中に排泄され, 以後, 実質的にはほとんど排泄されないことが示された。他方糞中への排泄は256日までずっと続き, 総排泄量は60%に達した。それゆえ, $F_u : F_f$ は摂取後の時間とともに減少し, 約1か月後ではきわめて小さい値となる。

しかし, ビーグル犬での代謝では, 30日間に尿にも糞にも静脈注射された ^{144}Ce の5%以下の量が排泄されたことから, ネズミとは量的にことなるようである(文献4)。

4. 残留率式

文献2の排泄のデータは次の残留式にもっともよくあう。

$$R(t) = 1.2 t^{-0.3}$$

4匹のビーグル犬に標識された塩化セリウムを静脈に注射し、1,000日間において全身計測した結果は、次の残留式と264日という実効半減期を与えた。

$$R(t) = 0.99 \exp\left(-\frac{0.693}{3,750} t\right)$$

そこで、この式を人の線量を算定するのに用いることは、著者が示唆しているように、慎重なやり方であろう(文献6)。

5. 排泄率式

これは、上の式を微分することによって得られる。

$$Y(t) = 1.8 \times 10^{-4} \exp(-1.8 \times 10^{-4} t)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 骨に可搬性：

$$Q = \int_0^{50y} \exp\left(-\frac{0.693}{264} t\right) dt$$

$$= 383 \mu\text{Ci-日}$$

もし、血液に入った ^{144}Ce の30%が骨に沈着すれば、血中への取り込み量 $1 \mu\text{Ci}$ から骨が受ける線量は

$$0.3 \times 383 \times 51.2 \times \frac{6.3}{7,000} = 5.2 \text{ rem}$$

それゆえ、骨に対する線量 D (1.5 rem) は $0.3 \mu\text{Ci}$ の血中取り込み量から生じるであろう。

(b) 非可搬性：

肺に対する最大許容 $^{1/4}$ 年摂取量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8$$

(40 h)

$$= 0.1 \times 6 \times 10^{-9} \times 1.57 \times 10^8$$

(118)

$$=0.094 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に $0.3 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $0.1 \mu\text{Ci}$

汚染して数日後の F_u が小さな値なので、何らかの ^{144}Ce が尿中に検出されたら調査すべきである。そして、糞分析と全身計測とを行なうべきであろう。

8. 検出限界

全身計測： $0.01 \mu\text{Ci}$ (文献7)

これによれば、体内の1調査レベルの検出は、その体内汚染が発生して40か月後に、または肺中の非可搬性セリウム ($T_b=150$ 日, 文献8) については10か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- P. W. DURBIN, M. H. WILLIAMS, M. GEE, R. H. NEWMAN and J. G. HAMILTON, *Proc. Soc. Exper. Biol. Med.* **91**, 78 (1956).
- P. W. DURBIN, *Health Physics* **2**, 225 (1960).
- LOUISE S. LOMBARD, *Institute of Medicine of Chicago, Proceedings* **25**, 24 (1964).
- P. W. DURBIN, *Health Physics* **8**, 665 (1962).
- C. R. RICHMOND and J. E. LONDON, *Nature* **211**, 1179 (1966).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).
- Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract: a report prepared by a Task Group of Committee 2, *Health Physics* **12**, 173 (1966).

^{198}Au

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期： 2.7 日

(b) 放射線：	型	エネルギー (MeV)	放出率(%)
β^-		0.29	1
		0.96	99
		1.37	0.025
γ		0.412	95.6
		0.68	1.1
		1.09	0.26

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 全身：0.58

(b) 腎臓：0.41

3. 代謝

可溶性の金塩が身体中に取り込まれると、それらは急速に排泄される（文献2）。2人の患者が標識された KAuBr_4 の溶液を飲んだとき、 ^{198}Au の吸収は13%であることがわかった（文献3）。

コロイド状の金でさえ、癌患者の腹腔内に注射された後、急速に血中に吸収され、尿中に排泄されることが知られている（文献4）。のちの研究（文献5）で、腹腔注射後の ^{198}Au の吸収量と尿中排泄量は、金塩をコロイド状の金に還元するのに用いられた還元法によって相違することがわかった。もっとも注意深く還元すると、全尿中排泄量は注射した量の1%よりも少なく、100 mCiの注射後の最大血中濃度は $20\sim 50 \mu\text{Ci/l}$ であった。

この報告書では、 $F_u = 1$ と仮定する。

4. 残留率式

尿中への ^{198}Au の排泄が腹腔注射後に測定され（文献4）、排泄曲線は半減期1.3日の1個の指数項であらわすことができた。 $\text{K}^{198}\text{AuBr}_4$ の経口摂取後、 ^{198}Au の血漿中の量は約3日の初期半減期で減少した（文献3）。そこで

(120)

可搬性の金の残留は次の式で表現されるであろう。

$$R(t) = \exp\left(-\frac{0.693}{1.5} t\right)$$

そしてこの式は文献5にある尿中排泄についてのわずかな情報と合致しないものではないといえる。これから、 $T_{\text{eff}} \approx 1$ 日となる。

しかしながら、本当に非可搬性の金塩については、体内でのへり方は2.7日の放射性半減期に従ってすすむであろう。

5. 排泄率式

残留式の微分は次式を与える。

$$Y(t) = 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{1.5} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 腎臓に可搬性：

組織系内の ^{198}Au は急速に尿中に排泄されるから、腎臓が決定器官である。血中へ $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みは次の尿中濃度を与える。

$$\frac{1}{1,400} \times 0.693 \exp\left(-\frac{0.693}{1} t\right) \mu\text{Ci/ml}$$

そして、腎臓中濃度は、300 g の腎臓が 60 ml の尿を含んでいると仮定する (^{132}Te を参照せよ) と、次のようである。

$$\frac{60}{300} \times \frac{1}{1,400} \times 0.693 \exp\left(-\frac{0.693}{1} t\right) \mu\text{Ci/g}$$

この式の積分値は $1.43 \times 10^{-4} \mu\text{Ci-日/g}$ である。これは次の線量を与える。

$$\begin{aligned} & 1.43 \times 10^{-4} \times 51.2 \times 0.41 \\ & = 3 \times 10^{-3} \text{ rem} \end{aligned}$$

それゆえに、腎臓に対する線量 D (0.75 rem) は、血中への取り込み $250 \mu\text{Ci}$ から生じる。

(b) 非可搬性：

肺に対する最大許容 $^{1/4}$ 年摂取量の10分の1

$$\begin{aligned}
 0.1 \times I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\
 &\quad (40 \text{ h}) \\
 &= 0.1 \times 6 \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^8 \\
 &= 9.4 \mu\text{Ci}
 \end{aligned}$$

7. 調査レベル

- (a) 可搬性：体内に 250 μCi
 (b) 非可搬性：肺に 10 μCi
 (a)に対応する尿中排泄

$$Y_u = F_u \times 250 \times 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{1} t\right) = 125 \exp(-0.693 t)$$

t (日)	尿中の DIL (nCi/日)
7	800
14	6

8. 検出限界

全身計測：1 nCi (文献6)

これによれば、体内の可搬性 ^{198}Au の1調査レベルの推定は、それを摂取して2~3週間後に、または肺中の非可搬性 ^{198}Au の検出は、それが沈着して5週間後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part I, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- B. FRIES and G. WALINDER, *Acta Radiol. (Stockholm)* **48**, 113 (1957).
- H. KLEINSORGE, H.-J. CORRENS, S. DORNBUSCH and E. DRESSLER, *Allergie u. Asthma* **5**, 217 (1959).
- B. BELLION, F. GHEMI and G. L. TURCO, *Minerva Nucleare* **1**, 155 (1957).
- R. CONSTANT, J. MAISIN, P. VANDERLINDEN and A. WAMBERSIE, *Journal Belge de Radiologie* **43**, 393 (1960).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

^{210}Po

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 138.4日

(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率(%)
	α	5.3	100
	γ	0.8	0.001

2. $\Sigma EF (RBE) n$

全身と腎臓: 55

3. 代 謝

文献2は実験動物と3人の入院患者のポロニウムの代謝を述べており、後者では30~40日の排泄の半減期を示した。3人の作業者の ^{210}Po に対する事故被曝(文献3)と彼らについてのその後の研究により、ポロニウムは30日の半減期で尿中に排泄されること、そのデータは200~300日の間、1個の指数項によってあらわされることが明らかになった。事故により汚染した他の作業者についてのもっと最近の研究は、 $T_b = 50$ 日をもつ1つのポロニウム体内プールがあるという結論に達した(文献4)。動物の種の間相互比較で、人についての T_b は37~50日であることが文献5で結論された。このことから、人についての生物学的半減期として40日を選ぶのが適当と思われる。

^{210}Po の静脈注射後6日目で死亡した1人の白血病患者のポロニウムの組織内分布の測定は、胆汁、肝臓、脾臓、腎臓中にもっとも高い濃度を示した(文献2)。いくつかの種類の実験動物に関する研究(文献2, 5)では、注射された放射性核種の5~10%の範囲で ^{210}Po が腎臓中にあり、もっとも高い濃度を示した。文献5は、腎臓が決定器官として指定することができるという結論を

文中で述べている。全身線量にもとづいて計算された許容しうる体内取り込み量はかなり大きいようなので、この提案を採用することは慎重なやり方であろう。この報告書では組織系内 ^{210}Po の10%が腎臓中にあると仮定する。

排泄比の測定はすべての測定でまったくまちまちの結果を与えた。文献2では、人ではポロニウムが尿中よりも10~20倍も高いレベルで糞中に排泄されると結論づけた。文献3には、吸収されたポロニウムの10分の1が尿中に、10分の9が糞中に排泄されたと報告されている。この報告書では、 $F_u=0.1$ と仮定する。

4. 残留率式

$$R(t) = \exp\left(-\frac{0.693}{40} t\right)$$

5. 排泄率式

残留式の微分は次式を与える。

$$Y(t) = 0.017 \exp\left(-\frac{0.693}{40} t\right)$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性、腎臓に対して：

$$\begin{aligned} Q &= 0.1 \int_0^{50y} \exp\left\{\left(-\frac{0.693}{40} - \frac{0.693}{138}\right) t\right\} dt \\ &= 4.5 \mu\text{Ci-日} \end{aligned}$$

もし、血液中に入る ^{210}Po の10%が腎臓に沈着すると仮定するならば、血液中への取り込み $1 \mu\text{Ci}$ から腎臓が受ける線量は

$$4.5 \times 51.2 \times \frac{55}{300} = 42 \text{ rem}$$

∴ 腎臓に対する線量 D (0.75 rem) は、血液中への $0.018 \mu\text{Ci}$ の取り込みから生じる。

(b) 非可搬性：

(124)

肺における最大許容¹/₄年沈着量の10分の1

$$\begin{aligned}
 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\
 &\quad (40 \text{ h}) \\
 &= 0.1 \times 2 \times 10^{-10} \times 1.57 \times 10^8 \\
 &= 3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}
 \end{aligned}$$

7. 調査レベル

- (a) 可搬性：体内に 0.02 μCi
- (b) 非可搬性：肺に 3 nCi
- (a) に対応する尿中排泄

$$= 0.1 \times 0.02 \times 0.017 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{40} + \frac{0.693}{138}\right) t\right\}$$

t (日)	尿中の DIL ($\mu\text{Ci}/\text{日}$)
30	18
60	9
100	4

8. 検出限界

- (a) 尿の放射化学分析：0.1 pCi/l (0.14 pCi/日) (文献6)
- (b) 全身計測：100 μCi (文献7)

限界(a)によれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して8か月後にも可能である。限界(b)は、放射線防護に用いるにはあまりに高すぎる。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. R. M. FINK (ed.), *Biological Studies with Polonium, Radium and Plutonium*, McGraw-Hill, London, p. 122 (1950).
3. D. H. NAIMARK, USAEC Report MLM-67 (1948).
4. N. A. TAYLOR, AWRE, Aldermaston, personal communication (1963).
5. J. N. STANNARD and F. A. SMITH, USAEC Report UR-487 (1957).
6. J. D. EAKINS, AERE, Harwell, personal communication (1964).
7. J. RUNDO, AERE, Harwell, personal communication (1964).

226Ra

1. 放射性崩壊データ (文献1)

同位体	半減期	α エネルギー (MeV)	β エネルギー (MeV)	γ エネルギー (MeV)	内部転換
²²⁶ Ra	1620年	4.589—5.7% 4.777—94.3%	—	0.188—4%	~2%
²²² Rn	3.825日	5.48—~100%	—	—	—
²¹⁸ Po (RaA)	3.05分	6.00—~100%	?—0.02%	—	—
²¹⁸ At	1.3秒	6.70—~0.02% 6.65—~0.001%	?—非常に弱い	—	—
²¹⁸ Rn	1.9×10^{-2} 秒	7.13—非常に弱い	—	0.61—非常に弱い	—
²¹⁴ Pb (RaB)	26.8分	—	0.59—~56% 0.65—~44%	0.24 0.30 0.35 その他—弱い	—
²¹⁴ Bi (RaC)	19.9分	~5.5—0.04%	— 0.4—9% 1.0—23% 1.51—40% 1.88—9% 3.26—19%	— 0.61 } 最も豊富に 1.12 } 存在する 1.76 } ほかに 2.43 MeV まで14本	—
²¹⁴ Po (RaC')	1.6×10^{-4} 秒	7.68—~100%	—	—	—
²¹⁰ Tl (RaC'')	1.3分	—	1.96—0.04%	若干—非常に弱い	—
²¹⁰ Pb (RaD)	21年	—	0.017—85% 0.063—15%	0.047—~5%	~80%
^{210m} Bi (RaE)	5.0日	5.06— 1.7×10^{-4} %	— 1.17—~100%	—	—
²¹⁰ Po (RaF)	138.4日	5.305—~100%	—	0.8— 1.2×10^{-3} %	—

^{206}Tl (RaE')	4.2分	—	$1.51-1.7 \times 10^{-4}\%$	—	—
^{206}Pb	安定	—	—	—	—

すべての百分率は ^{226}Ra の壊変数に対するものである。

2. $\Sigma EF (RBE) n$

骨：110 (Ra+娘核種から)；ICRP Publication 2 の13ページ*を見よ。

3. 代 謝

6人の人が“模造の夜光塗料”の形で ^{224}Ra を経口摂取した研究で、吸収割合は0.2であることが明らかとなった(文献2)。ラジウム代謝についての多くの総説のうち、最近の2編(文献3と4)は、この要約にもっとも役立つものである。ラジウムが血中に入った初期には、それは血中と軟組織中にあり、第1日目に2分の1以上がそこから失われる。これ以後では、体内に残っているラジウムは骨中に次第次第に大きな割合で存在し、そしてそこで、べき関数に従って時間とともに減少しながら、長い期間にわたって残留する。

ラジウム負荷を有する10人の人についての測定によれば、平均の糞中排泄は95%、尿中排泄は5%であった(文献5)。

娘核種ラドンは希ガスなのではき出される。体内でラジウムと平衡になっているラドンがはき出される割合は、ラジウム沈着後の年数によって変化し、この割合として0.45から0.90までの値がいろいろな研究者によって報告されてきた。この平均は約0.7である(文献3と6)。

このことと、 ^{226}Ra の $1 \mu\text{Ci}$ は1分間に ^{222}Rn の 126 pCi を生じること(文献6)、および、呼吸率は毎分約7lであるということから、体内の ^{226}Ra の $1 \mu\text{Ci}$ は呼気中に

$$\frac{126}{7} \times 0.7 = 13 \text{ pCi/l}$$

* (訳注) 邦訳の26ページ

の ^{222}Rn 濃度を生じさせると計算できる。

4. 残留率式

$$R(t) = 0.54 t^{-0.52}$$

(文献7)

5. 排泄率式

$$Y(t) = 0.28 t^{-1.52}$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性, 骨に対し:

$$Q = 0.99 \times 0.54 \int_{1d}^{50y} t^{-0.52} dt = 125 \mu\text{Ci-日}$$

したがって, 血中への $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みから骨が受ける線量は, 危険性の評価上その全部が骨に沈着すると仮定して,

$$125 \times 51.2 \times \frac{110}{7,000} = 100 \text{ rem}$$

となる。

それゆえ, 骨に対する線量 D (1.5 rem) は, 血液への取り込み量 $0.015 \mu\text{Ci}$ から生じるであろう。

(b) 非可搬性:

肺の最大許容¹/4年沈着量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40 \text{ h}) \\ &= 0.1 \times 5 \times 10^{-11} \times 1.57 \times 10^8 \\ &= 7.85 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性: 全身に $0.015 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性: 肺に $8 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}$

文献8で誘導された MPC_a の値, $5 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/ml}$ を用いた。

(a) に対応する尿中排泄

$$= 0.05 \times 0.015 \times 0.28 t^{-1.52}$$

$$= 2.1 \times 10^{-4} t^{-1.52} \mu\text{Ci/日}$$

ここで、 $0.05 = F_u$ である。

t (日)	尿の DIL (pCi/日)
14	4
30	1
100	0.2

8. 検出限界

(a) 全身計測：0.003 μCi (文献9)

(b) 呼気中のラドン測定：0.06 pCi/l (文献6)

(c) 尿の放射化学分析：0.1 pCi/l (文献10)

限界(a)によれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して7日後にも可能であるが、肺中の1調査レベルは、少なすぎて検出できないであろう。

限界(b)によれば、1調査レベルの検出は、それが体内に侵入して2日以内に可能である。

限界(c)によれば、体内の1調査レベルの検出は、それを摂取して4か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- USAEC Annual Progress Report, Contract AT(30-1)-952, May 1965, p. 76.
- E. OBERHAUSEN, in: *Diagnosis and Treatment of Radioactive Poisoning*, IAEA, Vienna, p. 47 (1963), STI/PUB/65.
- R. E. ROWLAND, *ibid.*, p. 57.
- H. MUTH and E. OBERHAUSEN, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 211 (1964), STI/PUB/84.
- J. VENNART, G. MAYCOCK, B. E. GODFREY and B. L. DAVIES, *ibid.*, p. 277, and personal communication from J. VENNART.
- W. P. NORRIS, T. W. SPECKMAN and P. F. GUSTAFSON, *Am. J. Roent. Rad. Therap. Nucl. Med.* **73**, 785 (1955).

8. S. R. BERNARD and M. FORD, *Health Physics* 4, 307 (1961).
 9. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* 9, 607 (1963).
 10. S. JACKSON and N. A. TAYLOR, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. I, IAEA, Vienna, p. 169 (1964), STI/PUB/84.

天然 Th

1. 放射性崩壊データ

ICRP Publication 2 の中で、天然トリウムのカリウムとは 3.7×10^{10} 壊変/秒を与える ^{232}Th と 3.7×10^{10} 壊変/秒を与える ^{228}Th とから成ると定義された。

^{232}Th , ^{228}Th とそれらの娘核種の放射線 (文献 1)

放射性核種	半減期	α	β	γ
^{232}Th	1.41×10^{10} 年	3.948—24% 4.007—76%		0.059—0% (I. C., 24%)
^{228}Ra (MsTh_1)	6.7年*		~0.04—100%	
^{228}Ac (MsTh_2)	6.13時間		1.18—~35% 1.76—~12% 2.10—~12% その他 より低いエネルギー—41%	0.057から 1.64 (多数の γ)
^{228}Th (RdTh)	1.91年	~5.2 — 1% 5.338—28% 5.421—71%		0.084—2% その他—大変弱い
^{224}Ra (ThX)	3.64日	5.445—~5% 5.681—95%		0.24—4%
^{220}Rn (Tn)	51.5秒	6.28—~100%		
^{216}Po (ThA)	0.158秒	6.775—~100%		
^{216}At	3×10^{-4} 秒	7.79—0.04%		

^{212}Pb (ThB)	10.6時間		0.33—80% 0.57—12% その他 より低いエネルギー—8%	0.24—36% 0.30—3%
^{212}Bi (ThC)	60.5分	6.04—25% 6.08—10% その他—1%	1.52—5% 2.25—54% その他 より低いエネルギー—5%	0.73 } 最も豊富に 0.79 } 存在 1.08 } ~10% 1.62 }
^{212}Po (ThC')	3×10^{-7} 秒	8.78—64% その他 より高いエネルギー 大変弱い		
^{208}Tl (ThC'')	3.1分		1.03—1% 1.25—9% 1.52—7% 1.79—19%	0.28—3% 0.51—8% 0.58—31% 0.86—4% 2.62—36%
^{208}Pb (ThD)	安定			

すべての百分率は ^{232}Th の壊変数に対するものである。

* 新しい報告 (文献2) は5.7年と与えている。

2. $\Sigma EF (RBE) n$

	^{228}Th	^{232}Th
(a) 骨:	970	270
(b) 肺(不溶性):	240	46

3. 代 謝

人についてのトリウムに関する情報の多くは、調査の数年前にトロトラスト (コロイド状酸化トリウム) を注射された患者から得られている。これらの場合、トリウムは網内系に存在し、その代謝情報の大部分は作業者の事故による汚染に適用することはできない。この問題に関する4つの新しい報告が文献3に見られ、これは最近の文献の調査結果として役にたつものである。

6人の患者に ^{224}Ra と ^{234}Th を同時に食べさせた研究 (文献4) では、 ^{224}Ra の吸収は ^{234}Th のその1,000倍であり、後者については胃腸管からの

吸収の割合は 2×10^{-4} であることが示された。今行なわれている5人の被検者の研究(文献5)は、 ^{234}Th 塩化物およびクエン酸塩の静脈注射後、約8%が最初の週に排泄され、残り92%が極度に長い半減期で残留していることを示している。これらの結果はネズミ(文献7)とイヌ(文献8)で得られたものと比較しうるもので、このネズミとイヌの結果は、注射したトリウムの約3分の2は正確に定められないほど長い生物学的半減期で残留していることを示していた。

トリウムの排泄についての情報は、Kaul(文献3(b))がトロトラスト患者において、 ^{228}Ra の1日糞中排泄量は全身計測による測定で体内にある量の0.03%、また、 ^{224}Ra で2%であると報告しているとはいえ、断片的である。尿中の量はもちろんさらにずっと低いであろう(^{226}Ra の代謝を見よ)。文献5に報告された5人の患者については、 ^{234}Th の静脈注射後5日目で、1日の尿中排泄量は注射量の0.3%であり、 $F_u:F_f$ は3人の男性において11.0、12.6、12.8、そして2人の女性において24と25であった。

数年前にトロトラストを与えられたことのある患者について呼気中のトロン(^{220}Rn)の濃度が測定された。Kaul(文献3(b))は、はき出される割合は生成される割合の12%であることを10人の患者について見出した。Grillmaierら(文献3(c))は44人のトロトラスト患者について、 $1 \mu\text{Ci}$ の体内量は呼気中のトロン濃度 $5.6 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/l}$ を与えることを見出した。トロンの吐き出し量はトリウムによる体内汚染の性質に依存するらしい。トロトラストが長期間体内に存在した患者では、トロンの吐き出しの割合はその生成する割合の8%と測定され、メソトリウムを体内にもつ文字盤塗布工では0.12%であった(文献2の5ページ)。1.8%という、さらにちがう値が、ずっと昔に体内汚染をおこしたトリウム化学者で測定されている(文献9)。人に ^{224}Ra を静脈注射すると、呼気中のトロンの量は最初の2日間に急にへり、20日後にはその生成割合の1.5%がはき出された(文献10)。

(132)

4. 残留率式

ICRP 専門委員会 2 が与えた 200 年の半減期およびその他の代謝データを変更するのに十分な正当性のある主張があるとは思われない。

5. 排泄率式

知識不十分。

6. 線量 D を与える沈着量

(a) 可搬性:

ICRP 専門委員会 2 の定義によれば、天然 Th の $1 \mu\text{Ci}$ は ^{232}Th の $1 \mu\text{Ci}$ と ^{228}Th の $1 \mu\text{Ci}$ から成る。もしこれら両核種が存在するただ 2 つの放射性核種であるならば、新たに分離されたトリウムについてだけこの定義を適用することができる。 ^{232}Th は放射能半減期が長いので認めうるほど減衰しないであろう。しかし娘核種 ^{228}Th は減衰し、立ちあがってもとの平衡レベルに戻り始めるまでに、本来あった量の約半分に下降するであろう。それゆえ“天然 Th” のどの試料でも、実際の組成はその化学的な履歴によるであろう。これは、天然 Th による体内汚染から生じる線量にも影響をおよぼすであろう。天然 Th の細胞外液への侵入から生じる放射線被曝は、排泄による損失がないと仮定するならば、新しく分離された天然 Th について次のように計算される。

骨中の天然 Th $1 \mu\text{Ci}$ は 50 年間に次の被曝を与えるであろう。

^{232}Th から $18,000 \mu\text{Ci-日}$, そして

^{228}Th から $\int_0^{50\text{y}} \exp\left(-\frac{0.693}{693} t\right) dt = 1,000 \mu\text{Ci-日}$

(ICRP Publication 2 はその T_{eff} として 693 日を与えているので)

これらは骨に対して次のような線量を与えるであろう。

^{232}Th から $18,000 \times 51 \times \frac{270}{7,000} \approx 35,000 \text{ rem}$

$$^{228}\text{Th} \text{ から } 1,000 \times 51 \times \frac{970}{7,000} \approx 7,000 \text{ rem}$$

$$\text{合計} \approx 42,000 \text{ rem}$$

∴ 線量 D (1.5 rem) は $3.6 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}$ の骨中初期含有量によって与えられるであろう。

(b) 非可搬性

肺における最大許容 $^{1/4}$ 年沈着量の10分の1

$$\begin{aligned} 0.1 I_a &= 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ &\quad (40 \text{ h}) \\ &= 0.1 \times 4 \times 10^{-12} \times 1.57 \times 10^8 \\ &= 6.3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：骨に $4 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $6 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}$

(a)に対応する排泄

尿中、1日当たり0.3%が尿中に排泄されると仮定して(文献6), $10^{-7} \mu\text{Ci}/l$ ($1 \mu\text{g}/l$)。

呼気中、体内の $1 \mu\text{Ci}$ が呼気中のトロン $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/l$ を与えると仮定して $8 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/l$, ただし吐き出しは生成割合の1.5%と仮定する。

8. 検出限界

(a) 尿の放射化学分析： $0.2 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{試料}$ (文献11と12)

これによれば、1調査レベルの検出は、その摂取直後には可能である。

(b) 呼気中のトロン測定： $10^{-8} \mu\text{Ci}/l$ (文献13)

これによれば、体内にある1調査レベルの10分の1の検出が、摂取後長期間たったのちにも可能である。

(c) 全身計測：体内に $10^{-3} \mu\text{Ci}$ (文献14)

これは放射線防護に用いるには高過ぎる。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. *USAEC Annual Progress Report*, Contract AT(30-1)-952, May 1960, p. 14.
3. *Assessment of Radioactivity in Man*, IAEA, Vienna (1964), STI/PUB/84.
 - (a) J. RUNDO, vol. II, p. 291.
 - (b) A. KAUL, *ibid.*, p. 445.
 - (c) R. GRILLMAIER, H. MUTH and E. OBERHAUSEN, *ibid.*, p. 473.
 - (d) E. OBERHAUSEN, H. MUTH and R. GRILLMAIER, *ibid.*, p. 491.
4. *USAEC Annual Progress Report*, Contract AT(30-1)-952, May 1965, p. 76.
5. *USAEC Annual Progress Report*, Contract AT(30-1)-952, May 1964, p. 113.
6. *Ibid.*, p. 139.
7. R. G. THOMAS, R. LIE and J. K. SCOTT, *Health Physics* **9**, 153 (1963).
8. B. J. STOVER, D. R. ATHERTON, N. KELLER and D. S. BUSTER, *Rad. Res.* **12**, 657 (1960).
9. *USAEC Annual Progress Report*, Contract AT(30-1)-952, May 1961, p. 3.
10. C. J. MALETSKOS, A. T. KEANE, N. C. TELLES and R. D. EVANS, *Radiation Research*, in the press.
11. R. W. PERKINS and D. R. KALKWARX. *Anal. Chem.* **28**, 1989 (1956).
12. C. TESTA, in: *Radiological Health and Safety in Mining and Milling of Nuclear Materials*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 489 (1964), STI/PUB/78.
13. W. JACOBI, in Reference 3, vol. I, p. 275.
14. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

233U, 234U, 235U, 238U, 天然 U

1. 放射性崩壊データ (文献1)

	233U		234U		235U		238U		
(a) 半減期:	5.9 × 10 ⁷ 日		9.1 × 10 ⁷ 日		2.6 × 10 ¹¹ 日		1.6 × 10 ¹² 日		
(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
	α	4.66	0.08	4.72	28	4.12	6	4.2	100
		4.72	1.6	4.77	72	4.32	8		
		4.77	15			4.33	14		
		4.82	84			4.35	35		
						4.37	25		
						4.52	3		

γ	0.042	0.053	4.56	7	0.048
	0.055	0.117	0.095	9	
	0.071		0.110	5	
	0.097		0.143	12	
	0.245		0.165	> 4	
その他			0.185	55	
			0.200	> 4	

天然Uは、 ^{234}U 、0.0056%

^{235}U 、0.72%

^{238}U 、99.28%

から成る。

天然Uに対する ICRP の特別な 1 Ci の定義は、

$$\begin{aligned}
 &^{238}\text{U} \text{の} 3.7 \times 10^{10} \text{崩壊/秒} \\
 &+ ^{234}\text{U} \text{の} 3.7 \times 10^{10} \text{崩壊/秒} \\
 &+ ^{235}\text{U} \text{の} 1.7 \times 10^9 \text{崩壊/秒}
 \end{aligned}$$

2. $\Sigma EF (RBE) n$

同位体	1崩壊あたりの実効エネルギー	
	肺	骨
^{238}U	50	250
^{234}U	49	240
^{235}U	46	230
^{238}U	43	220

3. 代謝

ウランは化学的毒性を示し、天然Uは低い比放射能をもって腎臓に与える化学的な損傷の方が天然Uの可搬性化合物が血中へ侵入して体組織に与える放射線損傷(文献3)よりも重要のようである(文献2)。これと反対に、肺

あるいは胃腸管中の非可搬性ウラン化合物の量は、それが与える線量によって制限される(文献4)。ウランの可搬性化合物が ^{235}U について濃縮されているならば、 ^{234}U と ^{235}U によって骨が照射されるから、体内汚染は線量によって制限される。たとえば、天然Uが拡散法で12倍に濃縮されたとき、線量についての管理が必要となってくる(文献5)。

可溶性および不溶性のウラン化合物は、吸入後、細胞外液中に吸収され、前者は後者より吸収はずっと容易である(文献5)。ウラニル化合物は皮膚を通して吸収された(文献7と8)。ICRP Publication 6によれば、ウランは胃腸管からわずかしか吸収されない($f_1 < 10^{-2}$)。

6 価のウランを人に静脈注射した後では、もっとも高い濃度が骨と腎臓に見られたが、いっぽう4 価のウランは骨と肝臓に多く存在した(文献9)。

細胞外液中に侵入したウランは、24時間以内に2分の1から4分の3が尿中に排泄される(文献2,3,9,10)。患者への静脈注射に引き続く糞中への排泄量が測定され、無視してよいほどの値がえられた(文献11)。このように、ウランに関する尿分析は発生後まもない体内汚染を容易にチェックする方法であるが、以前から体内にかなりの量をもっている者以外についてだけ、尿中レベルを体内量あるいは器官内量と関係づけることが可能である。ウランの尿中排泄の定量的な意味づけは文献6の中でいくらか検討された。

ウランによる作業者の体内汚染の多くはウラン酸化物の吸入の結果として生じる。この問題に関して3つの報告書と1つの要約が公表されており、それは次のようである。

吸 入 物 質	生物学的半減期(日)	文 献
濃縮された U_3O_8	120	12
種々の不溶性ウラン化合物	120 (選択された値)	13
濃縮された U_3O_8	380	14
二酸化ウラン	150 (1回摂取) 380 (連続摂取)	15

文献13と14の両方とも、半減期が時間とともに増大するということが、および長期間の残留はべき関数によってよりよく書きあらわされるということを描いた。このべき関数は文献14では $t^{-0.4}$ とされている。また、これらの文献では、ウランは尿と糞の両方に排泄されると報告された。

4. 残留率式

可搬性ウラン化合物の残留および排泄は定量的な表現で繰り返し記述されてきた(文献 6, 8, 9)。主なデータは、ウラン塩の静脈注射後もしくは産業上の被曝後、1年かそれ以上の長い期間にわたって毎日の尿中排泄を測定したデータである。式 $Y_u(t) = 0.1 t^{-1.5}$ は、 $t > 1$ 日に対し患者の毎日の尿中排泄をかなりうまく表現しているが(文献9)、しかし、前に述べたように注射量の2分の1から4分の3までの範囲にある最初の1日の排泄を十分に表現してはいない。もし個々の患者の排泄データをべき関数によってあらわしうらば、指数は-1.35から-1.81までの範囲内にあり、係数は0.07から0.12までの範囲にあって、このように、個人個人の変動の範囲は幅広いことを示している。残留式、

$$R(t) = 0.2 t^{-0.5} \quad (t > 1 \text{ 日に対して})$$

は、これらのデータおよび文献6のデータとかなりよく合う。ただしこれは、文献9に示された死体解剖データにもとづく推定残留と比較すると、いくらか低い。

5. 排泄率式

$$Y_u = 0.8 \quad (\text{第1日})$$

$$Y_u(t) = 0.1 t^{-1.5} \quad (t > 1 \text{ 日})$$

6. 線量 D を与える取り込み量

(a) 可搬性:

(i) ^{233}U と ^{234}U :

これらの同位体について、決定器官は骨であって、放射性半減期は非常に長

(138)

い。したがって、

$$Q = \int_{1d}^{50y} t^{-0.5} dt = 268 \mu\text{Ci-日}$$

1日目に骨中に $1 \mu\text{Ci}$ という初期存在量,あるいは1日目に体内に $3 \mu\text{Ci}$ という存在量は,

$$^{233}\text{U} \text{ につき } 268 \times 51.2 \times \frac{250}{7,000} = 490 \text{ rem を, また,}$$

$$^{234}\text{U} \text{ につき } 268 \times 51.2 \times \frac{240}{7,000} = 470 \text{ rem}$$

を与えるであろう (文献9)。

それゆえ, 骨に対する線量 $D(1.5 \text{ rem})$ は, ^{233}U の $0.0031 \mu\text{Ci}$, あるいは ^{234}U の $0.0032 \mu\text{Ci}$ の初期骨内量から生じる。

(ii) ^{235}U , ^{238}U および天然U:

これらの同位体については腎臓が決定器官であり, 許容存在量は化学的毒性によって決定される。ICRP Publication 6 の 52 f 項に規定されている最大許容摂取量は,

吸入によって, 1日に 2.5 mg

経口摂取によって, 2日に 150 mg

である。

(b) 非可搬性:

肺における最大許容 $^{1/4}$ 年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \mu\text{Ci} \\ (40 \text{ h})$$

同位体	MPC_a (肺, 不溶性)	沈着量 (μCi)
^{233}U	10^{-10}	1.6×10^{-3}
^{234}U	10^{-10}	1.6×10^{-3}
^{235}U	10^{-10}	1.6×10^{-3}
天然U	6×10^{-11}	9.4×10^{-4}

7. 調査レベル

(a) 可搬性:

同位体	1日目の骨中含有量	1日目の体内量
^{233}U	$3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$	$0.01 \mu\text{Ci}$
^{234}U	$3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$	$0.01 \mu\text{Ci}$
^{235}U	—	0.06 mg
^{238}U	—	0.06 mg
天然U	—	0.06 mg

* 吸入量 (2.5 mg) の4分の1が吸収され (本文10項), そしてこの量の10分の1を調査レベルとする。

(b) 非可搬性:

これらは, 6(b)の表中の“沈着量”の欄に与えられている。

(a)に対応する尿中排泄。汚染後24時間以内に, 体内量の約半分が尿の1 l中に排泄される (文献3)。それより後の時刻では, 尿1 l中に

$$\text{体内量} \times \frac{0.1 t^{-1.5}}{1.4} \quad (t \text{は日数})$$

(μCi または μg)

を含むであろう。

8. 検出限界

(a) 尿の放射化学分析: 0.1 pCi/l (文献16)(b) 尿のケイ光分析: $5 \mu\text{g/l}$ (文献16)(c) ^{235}U の全身計測: $10^{-3} \mu\text{Ci}$ (0.5 mg) (文献17)

同位体	限界	1調査レベルを検出できる日数
^{233}U	(a) 0.1 pCi/l	365 日
^{234}U	(a) 0.1 pCi/l	365 日
^{235}U	(c) 0.1 pCi/l	20 日
^{235}U	(b) $5 \mu\text{g/l}$	1 日
体内あるいは肺中の ^{235}U	(c) $10^{-3} \mu\text{Ci}$	1 調査レベルの検出は不能
^{238}U } 天然U }	(b) $5 \mu\text{g/l}$	1 日

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual, Part 1*, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
2. C. VOEGTLIN and H. C. HODGE, *Pharmacology and Toxicology of Uranium Compounds*, McGraw-Hill, New York, p. 1221 (1953).
3. I. S. EVE, *Health Physics* **10**, 773 (1964).
4. Page 2126 in Reference 2 (above).
5. S. JACKSON, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 549 (1964), STI/PUB/84.
6. M. LIPPMANN, L. D. ONG and W. B. HARRIS, USAEC Report HASL-120 (1962).
7. Page 953 in Reference 2 (above).
8. R. H. WILSON, in: USAEC Report HASL-58, p. 79 (1959).
9. S. R. BERNARD, *Health Physics* **1**, 288 (1958).
10. J. B. HURSH, in: USAEC Report HASL-58, p. 137 (1959).
11. S. R. BERNARD and E. G. STRUXNESS, USAEC Report ORNL-2304 (1957).
12. B. R. FISH, in: *Inhaled Particles and Vapours*, C. N. DAVIES, ed., Pergamon Press, p. 151 (1961).
13. L. M. SCOTT and C. M. WEST, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 523 (1964), STI/PUB/84.
14. W. N. SAXBY, N. A. TAYLOR, J. GARLAND, J. RUNDO and D. NEWTON, *ibid.*, p. 535.
15. Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract: a report prepared by an ICRP Task Group. *Health Physics* **12**, 173 (1966).
16. S. JACKSON and N. A. TAYLOR, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. I, IAEA, Vienna, p. 169 (1964), STI/PUB/84.
17. J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

 ^{239}Np

1. 放射性崩壊データ (文献1)

(a) 半減期: 2.3日

(b) 放射線:

型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
β	0.33	45
	0.38	27
	0.44	21
	0.66	7
	0.72	
γ	0.06	0.1
	0.07	0.1

0.11	18
0.21	3
0.23	10
0.28	11
その他	弱い

2. $\Sigma EF(RBE) n$

(a) 全身 : 0.29

(b) 骨 : 0.98

3. 代謝

Np の可搬性化合物に関する知識はすべてネズミについての実験から得られたものである。Np (4+ または 5+) の筋肉注射後 1 日で、次のような相対的な含有量が測定された。

骨, 44%; 腎臓, 2.6%; 肝臓, 8.5%; 尿, 37% (文献 2)。もう一つの研究では、ネズミに ^{237}Np を静脈注射し、1, 3, 7, 21 日後に分析した (文献 3)。“ ^{237}Np の濃度は初め肝臓でもっとも高かった。3 日後、骨中の濃度は肝臓と等しくなり、そして実験の残りの期間中、骨が最高濃度であった。骨と脾臓中の濃度は比較的高く、21 日間の期間にわたって一定であった。21 日後で投与量の 50% は動物体内に残留した。この期間中、投与量の 36% は排泄物中に回収され、おおよそ尿と糞に等分されていた。これらの大変限られた残留データに正確な意味をもたせるべきでないが、これらのデータはプルトニウムのそれと大きくは異なる全般的挙動を示しているように見える。” 同じ研究で、3 つの異なる原子価状態にある ^{237}Np をネズミに食べさせて、次のような吸収百分率が得られた。すなわち IV : 0.3, V : 1.1 そして VI : 2.3 である。

これらの結果 (文献 3) から、ICRP Publication 2 の f_1 値は大量の経口摂取に対しては低すぎるように思われる。ICRP Publication 2 の長い生物学的半減期を変更する根拠はないと思われるが、しかし約 25 日の生物学的半

(142)

減期で排除される短寿命成分（血中に吸収された量の約2分の1）を認めてもよいであろう。 ^{239}Np の場合には、この生物学的半減期を考慮することは、大変短い放射性半減期（2.3日）のため、純学問的なものである。

ネズミへの静脈注射後、 ^{237}Np は尿と糞の経路に等分に排泄された（文献3）。ネプツニウムには化学的毒性のあることが示され、ヒツジでは長寿命の ^{237}Np を体重 1 kg 当り $1 \mu\text{Ci}$ 静脈注射すると肝臓機能の減退を生じ（文献4）、 $8 \mu\text{Ci}/\text{kg}$ は致死量であった。

4. 残留率式

$$R(t) = 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{25} t\right) + 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{7 \times 10^4} t\right)$$

5. 排泄率式

$$Y(t) = 0.014 \exp\left(-\frac{0.693}{25} t\right)$$

6. 線量 D を与える沈着量

(a) 可搬性、骨に対し：

$$Q = \int_0^{50y} 0.5 \exp\left\{-\left(\frac{0.693}{25} + \frac{0.693}{2.3}\right) t\right\} + 0.5 \exp\left(-\frac{0.693}{2.3} t\right) dt$$
$$= 3.2 \mu\text{Ci-日}$$

∴ 骨中の初期含有量 $1 \mu\text{Ci}$ から骨が受ける線量

$$= 3.2 \times 51.2 \times \frac{0.98}{7,000} = 0.023 \text{ rem}$$

∴ 骨に対する線量 D (1.5 rem) は、骨中 $65 \mu\text{Ci}$ あるいは全身中約 $140 \mu\text{Ci}$ の初期含有量から生じるであろう ($f'_2 = 0.45$ を用いて)。

(b) 非可搬性：

肺における最大許容 $^{1/4}$ 年沈着量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8$$

(40 h)

$$=0.1 \times 2 \times 10^{-6} \times 1.57 \times 10^8$$

$$=31 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性：全身に $140 \mu\text{Ci}$

(b) 非可搬性：肺に $30 \mu\text{Ci}$

(a)に対応する尿中排泄

$$=140 \times 0.5 \times 0.014 \exp\left\{-0.693\left(\frac{1}{2.3} + \frac{1}{25}\right)t\right\} \mu\text{Ci/日}$$

$$=\exp(-0.33 t) \mu\text{Ci/日}$$

ここで $0.5 = F_u$

t (日)	尿の DIL (nCi/日)
7	100
14	10

8. 検出限界

全身計測： $0.003 \sim 0.03 \mu\text{Ci}$ (文献5)

この値によれば、1 調査レベルの検出は、これを摂取してのち1か月後にも可能である。

9. 文 献

- (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
 (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
 (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962).
- P. W. DURBIN, *Health Physics* **2**, 225 (1960) and **8**, 665 (1962).
- J. E. BALLOU, W. J. BAIR, A. C. CASE and R. C. THOMPSON, *Health Physics* **8**, 685 (1962).
- H. W. CASEY, R. O. MCCLELLAN, W. J. CLARKE and L. K. BUSTAD, *Health Physics* **9**, 827 (1963).
- J. MEHL and J. RUNDO, *Health Physics* **9**, 607 (1963).

^{239}Pu , ^{241}Pu

1. 放射性崩壊データ (文献1)

	^{239}Pu		^{241}Pu		^{241}Am (^{241}Pu の娘核種)	
(a) 半減期:	8.92 × 10 ⁶ 日		4.7 × 10 ³ 日		1.67 × 10 ⁵ 日	
(b) 放射線:	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)	型	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
	α	5.06	11	α	4.85	0.003
		5.13	17		4.89	
		5.15	73			
				β	0.02	99
	γ	0.013				
		0.038		γ	0.10	
		0.051			0.15	
		α粒子の4%ほどのL X線光子がある(文献2)				
					γ	0.06
						1.7
						12.6
						85
						0.23
						0.35

2. $\Sigma EF (RBE) n$

(a) 肝 臓:	53	1
(b) 骨 :	270	14

3. 代 謝

プルトニウムの代謝は Langham (文献3, 4), Robertson と Cohn (文献5) および Lister (文献6) によって要約されている。飲み込まれたプルトニウムのうち非常に僅かな割合だけが細胞外液に吸収されるので、この汚染経路は作業者に対し大きな危険はもたらさない。産業上の被曝の多くは、酸化プルトニウムの吸入とそれに続く肺からの遅い吸収によって生じる。このような被曝の結果は吸収されたプルトニウムが骨と肝臓に等分されているのが通常である。もしプルトニウムが初め可溶性の形であったならば、骨中の量は相対的により大きく、多分組織系内プルトニウムの80%あるいはそれ以上である

う。

4. 残留率式

細胞外液に達したプルトニウムの排泄はふつう速度も量も小さく、その結果、総排泄量は50年の期間をとっても吸収された物質のわずか10~20%の量にしかならないであろう。それゆえ組織系内プルトニウムによる組織線量を推定する上で、作業者の一生の間排泄がないと考えることが実際的である。

肺中の残留は吸入したプルトニウム化合物の物理的、化学的な形によって変わるであろう。標準肺モデルでは肺の深部での残留率を次式のように予想している。

$$R(t) = 0.125 \exp\left(-\frac{0.693}{365} t\right)$$

肺の初期含有量の約60%が最初の数日中に糞中に排泄されることになろう。

5. 排泄率式

血液中に1単位摂取された後、1日あたりの排泄は次の式によって近似されている(文献4)。

$$\text{尿に対して } Y_u(t) = 0.0023 t^{-0.77}$$

$$\text{糞に対して } Y_f(t) = 0.0063 t^{-1.09} \quad 1 < t \leq 138$$

$$\text{計} \quad Y_t(t) = 0.0079 t^{-0.94}$$

Beach と Dolphin (文献7) は、排泄がもっとはやい早期の数日間を考慮に入れた尿中排泄の式を与えた。その式および同様な糞中排泄の式は次のようである。

$$Y_u(t) = 0.0041 \exp(-0.67 t) + 0.0016 t^{-0.68}$$

$$Y_f(t) = 0.004 \exp(-0.46 t) + 0.004 t^{-1}$$

これらの式は、最初の数日間のよりは早い排泄をわけて表現した点で、文献4からの上述の式とは異なっている。これは、総排泄量ではわずかな違いしか生

じないが、初期の排泄データから摂取量を推定するにはより重要である。

汚染発生後まもなくは糞中排泄が尿中排泄より大きく、約30日以後は尿中排泄が優勢になるということに注意しなければならない。

これらの排泄式はプルトニウムのクエン酸塩を静脈注射された12人ほどの入院患者の排泄データにべき関数あるいは指数関数をあてはめることによって得られた(文献5)。個々の患者の尿のデータに式 $A t^{-n}$ をあてはめて、文献8に示された A と n の値の範囲が得られた。これは、 A と n の値は個人間で変動するが、全部のデータにこの式をあてはめて得られた値は、未知の個人の残留と排泄を一層よく代表すると期待できることを示している。

これらの式は、特定の経路によって投与された特定の化学形のプルトニウムに適用されるが、しかし、汚染に引き続く最初の数日をへたのちには、組織系内のプルトニウムの排泄率は作業者が被曝した化学形がどうであっても同様であるということを記憶しておくべきである。1日の排泄量には幅広い変動があり、このため、これらの式は長期間の傾向を示すことができるだけであるということがよく知られている。前に述べた入院患者の場合には、プロットされた毎日の排泄量のうち約80%が、適当に滑らかにされた曲線から係数2の範囲内にある。しかしながら、作業者の事故による汚染ののち排泄されたプルトニウムの毎日の量には、より大きい変動が見られる。

排泄式を実際に適用する上で2つの難点があるかもしれない。すなわち、

- (a) もし全排泄の式で、 t が -1 と 0 の間にあるべき数をもつならば、残留式中の t は正の指数をもつことになる。これはありえないから、このような排泄式を積分して残留式を得ることはできない。
- (b) もし全排泄の式で t が < -1 のべき数をもち、体内量を計算するために 0 から ∞ まで積分されたとすると、得られた推定値は実際に体内にある量のわずかな割合 ($4 \sim 8\%$) にしかならないであろう(文献9)。

“連続”被曝の際の体内量の推定

プルトニウムの尿中排泄を断続的な被曝の結果体内に存在する量と関係づける式がたてられている。これらのうち最近のものは Beach と Dolphin によって報告された (文献7)。24時間の排泄量の一連の測定値からプルトニウムの体内量を推定するための計算機コードが Lawrence (文献10) と Snyder (文献11) によって作られている。

6. 線量 D を与える沈着量

(a) 可搬性, 骨に対して:

$$^{239}\text{Pu} \quad Q = 18,000 \mu\text{Ci-日} \quad (1 \mu\text{Ci} \text{ が骨に50年間残留すると仮定して})$$

∴ 骨中の初期含有量 $1 \mu\text{Ci}$ から骨が受ける線量

$$= 18,000 \times 51.2 \times \frac{270}{7,000} = 35,600 \text{ rem}$$

∴ 骨に対する線量 D (1.5 rem) は, 骨中 $4.2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}$ の初期沈着量から生じる。

$$^{241}\text{Pu} \quad Q = \int_0^{50\text{y}} \exp\left(-\frac{0.693}{4.7 \times 10^3} t\right) dt = 6,300 \mu\text{Ci-日}$$

∴ 骨中 $1 \mu\text{Ci}$ の初期沈着量から骨が受ける線量

$$= 6,300 \times 51.2 \times \frac{14}{7,000} = 640 \text{ rem}$$

∴ 骨に対する線量 D (1.5 rem) は, $0.0023 \mu\text{Ci}$ の初期骨内量から生じる。

(b) 非可搬性

肺に対する最大許容 $^{1/4}$ 年摂取量の10分の1

$$0.1 I_a = 0.1 \times \text{MPC}_a \times 1.57 \times 10^8 \\ (40 \text{ h})$$

$$^{239}\text{Pu} \text{ に対して: } 6.3 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}$$

$$^{241}\text{Pu} \text{ に対して: } 0.63 \mu\text{Ci}$$

7. 調査レベル

(a) 可搬性 ^{239}Pu : 骨に $4 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}$

^{241}Pu : 骨に 2 nCi

(b) 非可搬性 ^{239}Pu : 肺に $6 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}$

^{241}Pu : 肺に 0.6 μCi

(a)に対応する尿中排泄は Langham によって提案された式(文献2)から計算されよう。

$$D_E = 500 UT^{0.74}$$

ここで D_E = 汚染時の組織系内負荷量, U = 摂取後 T 日目における尿中日排泄量, T = バイオアッセイ試料採取間の日数。

8. 検出限界

^{239}Pu : 尿の放射化学分析 : 0.06 pCi/24 h (文献12)

全身計測 : 300 nCi (文献2)

^{241}Pu : 1 試料当たり 100 pCi (文献13)

= もしこの 100 pCi が 1 ml 中にあると仮定すれば, 尿 1 l 当たり 100 nCi

尿の放射化学分析によるこれら ^{239}Pu と ^{241}Pu との検出限界によれば, 身体内の 1 調査レベルの検出はその汚染発生後わずか 1 ~ 2 日間のみ可能である。

9. 文 献

1. (a) D. STROMINGER, J. M. HOLLANDER and G. T. SEABORG, "Table of Isotopes", *Rev. Mod. Phys.* **30**, 585 (1958).
- (b) LANDOLT-BORNSTEIN, *Energy Levels of Nuclei: A = 5 to A = 257*, Springer-Verlag, Berlin (1961).
- (c) *The Radiochemical Manual*, Part 1, The Radiochemical Centre, Amersham, England (1962), and *ibid*; 2nd ed. (1966).
- (d) V. M. VDOVENKO, *USAEC Report*, AEC-tr-6421 (1960).
2. W. C. ROESCH and H. E. PALMER, *Health Physics* **8**, 773 (1962).
3. W. H. LANGHAM, *Health Physics* **2**, 172 (1959).
4. W. H. LANGHAM, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 565 (1964), STI/PUB/84.
5. J. S. ROBERTSON and S. H. COHN, *Health Physics* **10**, 373 (1964).
6. B. A. J. LISTER, UKAEA Report AERE-L151 (1964).
7. S. A. BEACH and G. W. DOLPHIN, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 603 (1964), STI/PUB/84.
8. W. S. SNYDER, *Health Physics* **8**, 767 (1962).
9. B. A. J. LISTER, A. MORGAN and R. J. SHERWOOD, UKAEA Report AERE-R4064 (1962).
10. J. N. P. LAWRENCE, *Health Physics* **8**, 61 (1962).
11. W. S. SNYDER, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. II, IAEA, Vienna, p. 583 (1964), STI/PUB/84.

12. S. JACKSON and N. A. TAYLOR, in: *Assessment of Radioactivity in Man*, vol. I, IAEA, Vienna, p. 169 (1964), STI/PUB/84.
13. H. J. GALE and L. H. J. PEAPLE, *Phys. Med. Biol.* **8**, 297 (1963).

参 考 図 表

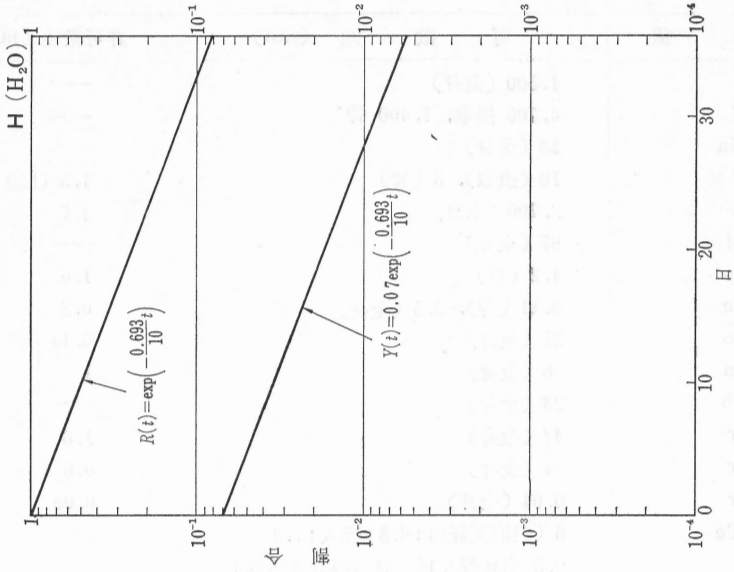
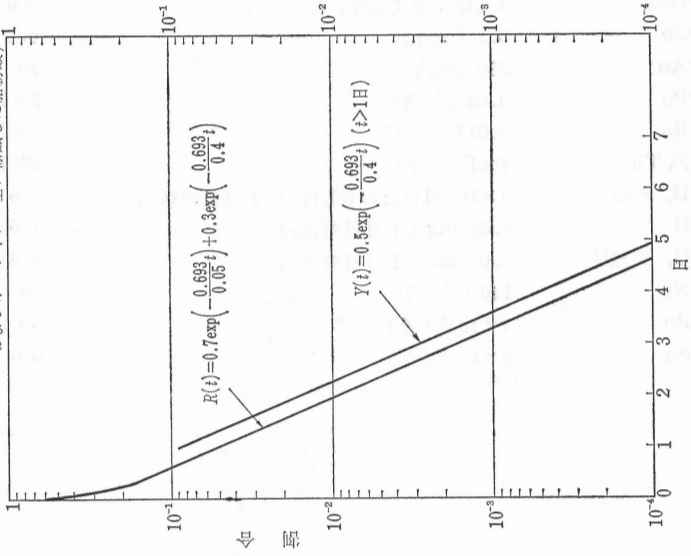
次の表は原報告書の付録Cに記されている調査レベルの値を、みやすいように一覧表としたものである。また、図は、残留率式 ($R(t)$) および排泄率式 ($Y(t)$) を各元素ごとにプロットしたものである。この表と図はいずれも原報告書にはないものであるが、読者にとって役立つと思われたのでつけ加えた。図は日本原子力研究所内部資料に掲載されていたものを、関係者のご諒解を得てここに転載させていただいた。

編 者

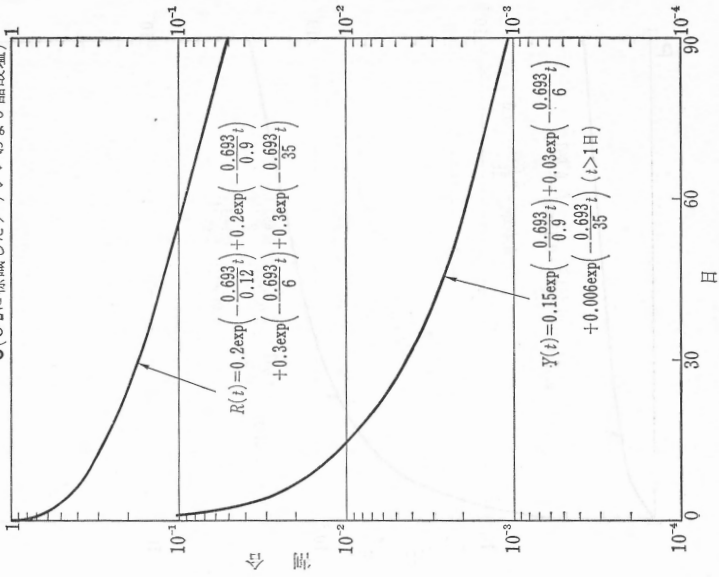
調 査 レ ベ ル

核 種	可 搬 性 (μCi)	非可搬性 (μCi)
^3H	1,500 (全身)	—
^{14}C	4,700 摂取, 1,400 骨	—
^{22}Na	13 (全身)	—
^{32}P	10 (摂取), 3 (骨)	1.3 (肺)
^{35}S	2,700 (全身)	4.7
^{36}Cl	97 (全身)	—
^{45}Ca	4.2 (骨)	1.6
^{59}Fe	0.11 (脾), 5.5 (全身)	0.8
^{60}Co	25 (全身)	0.14
^{65}Zn	6 (全身)	1
^{86}Rb	23 (全身)	—
^{85}Sr	47 (全身)	1.6
^{89}Sr	4 (全身)	0.6
^{90}Sr	0.04 (全身)	0.08
^{132}Te	6 (摂取)(経口:6.3;吸入:7.3)	—
^{131}I	0.3(甲状腺), 1(全身への取り込み)	—
^{137}Cs	4 (全身)	0.2
^{140}Ba	4 (骨), 8 (全身)	0.6
^{144}Ce	0.3 (全身)	0.1
^{198}Au	250 (体内)	10
^{210}Po	0.02 (体内)	3×10^{-3}
^{226}Ra	0.015 (全身)	8×10^{-4}
天然 Th	4×10^{-5} (骨)	6×10^{-5}
^{233}U , ^{234}U	3×10^{-3} (1日目の骨), 0.01(1日目の体内)	1.6×10^{-3}
^{235}U	0.06 mg (1日目の体内)	1.6×10^{-3}
^{238}U , 天然U	0.06 mg (1日目の体内)	9.4×10^{-4}
^{238}Np	140 (全身)	30
^{239}Pu	4×10^{-5} (骨)	6×10^{-4}
^{241}Pu	2×10^{-3} (骨)	0.6

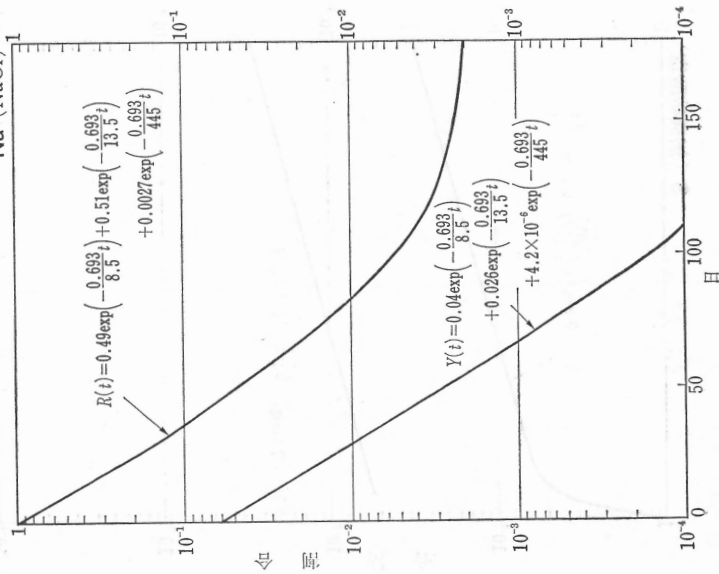
C(酸性炭酸ナトリウム-CO₂およびカルボキシ基に標識した脂肪酸)

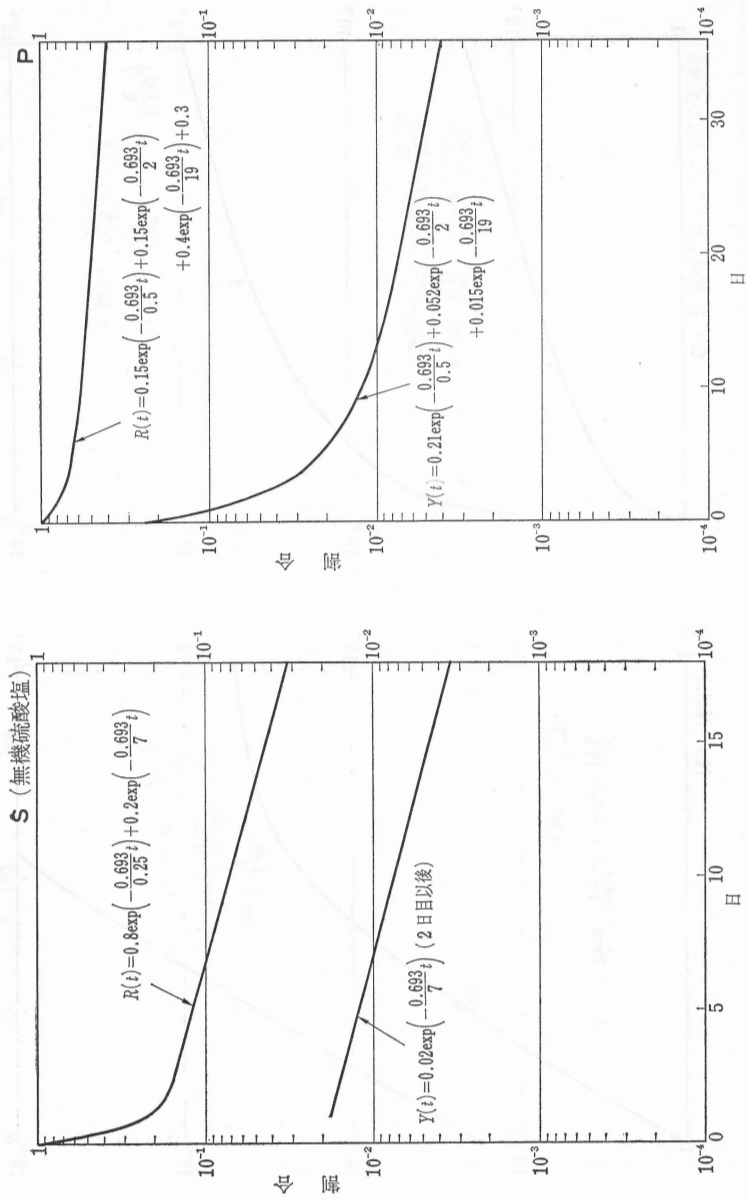


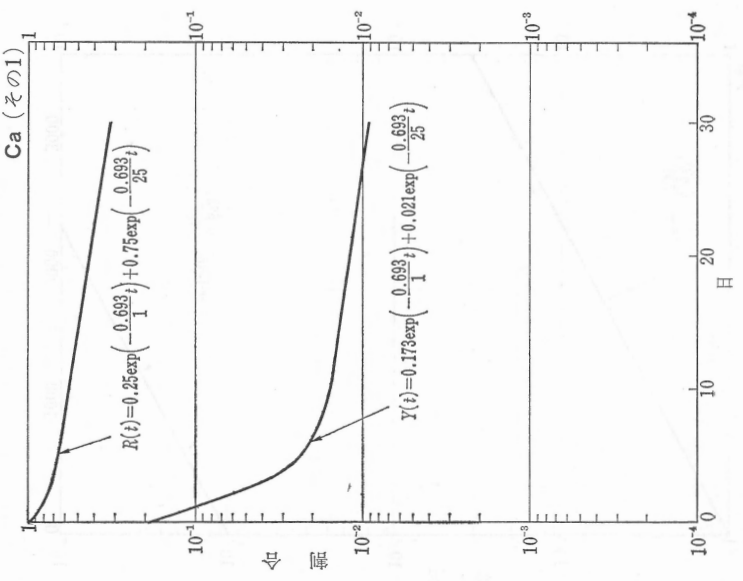
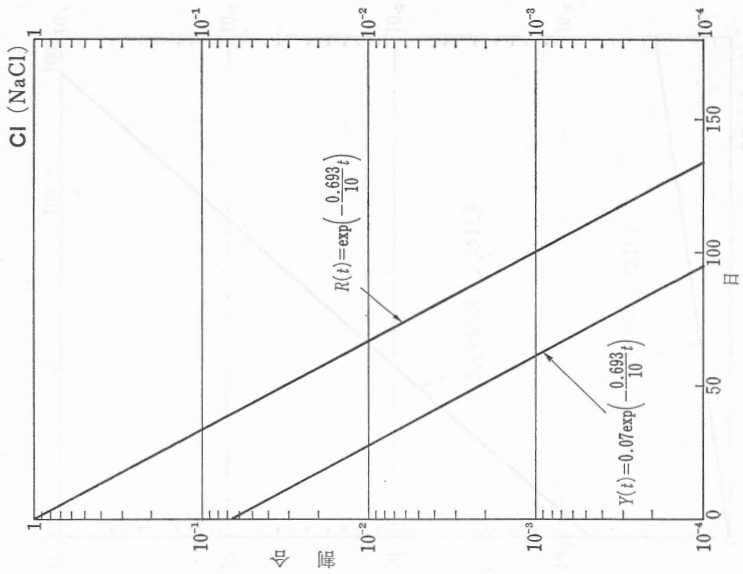
C(C2)に標識したグリシンおよび醋酸塩

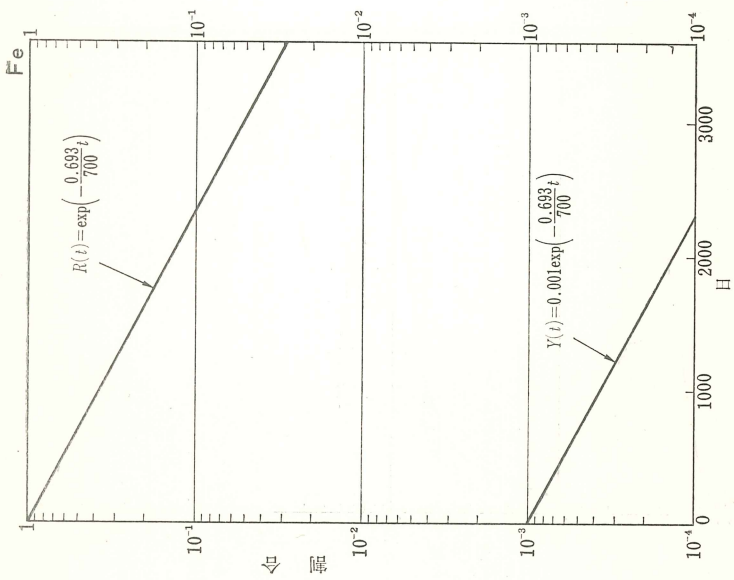
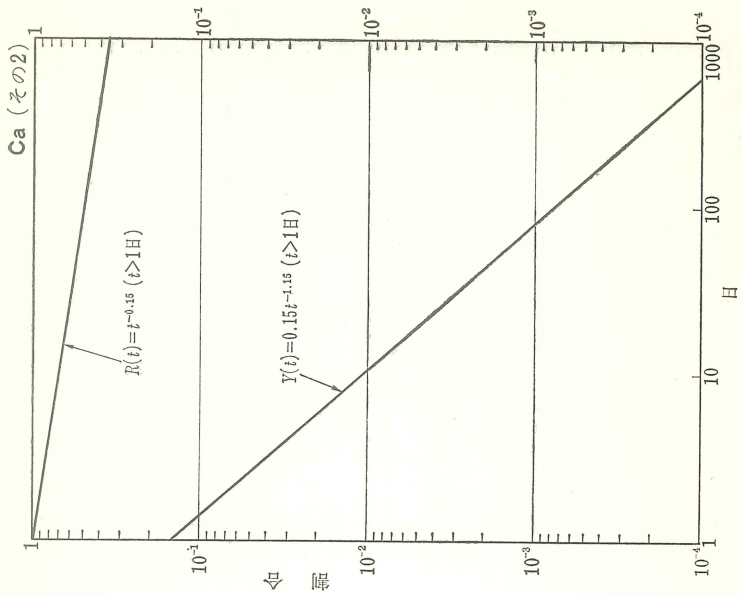


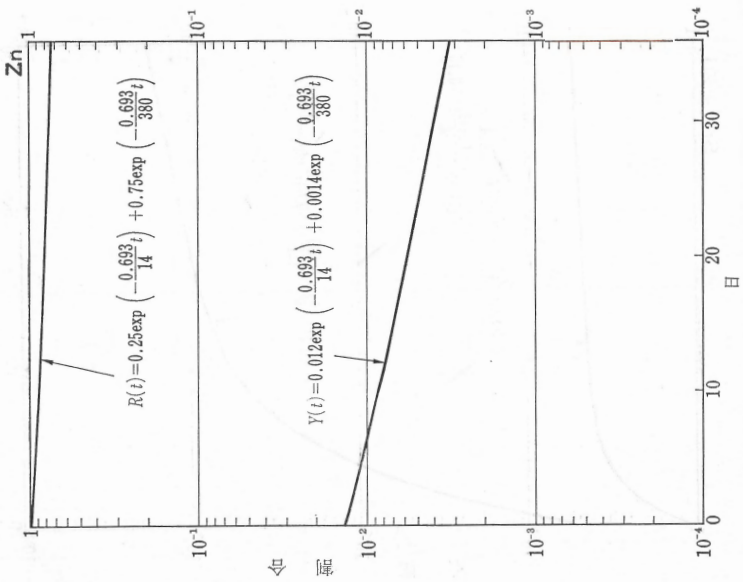
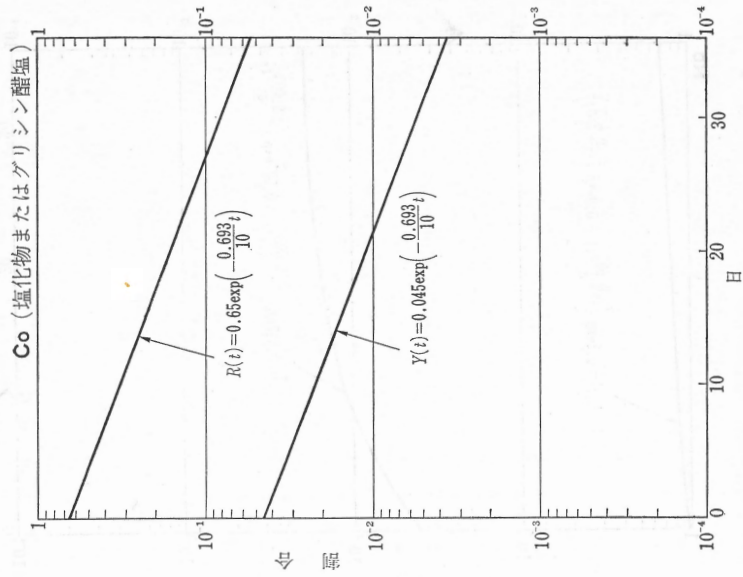
Na (NaCl)

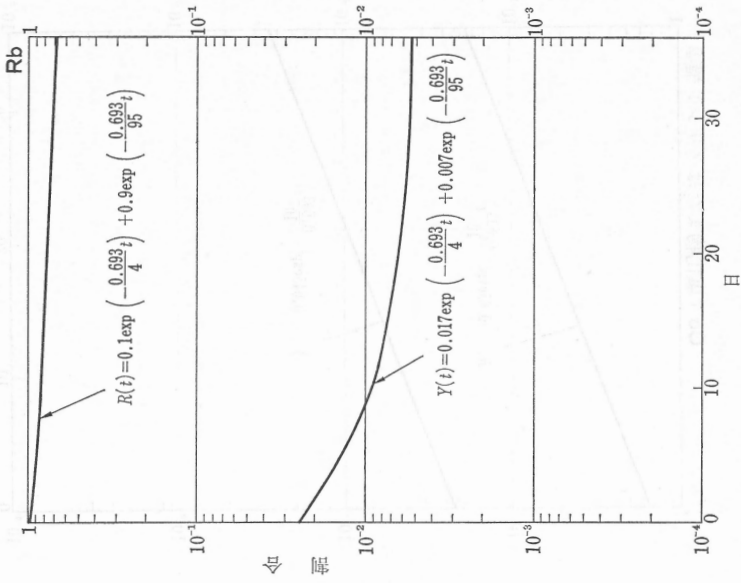
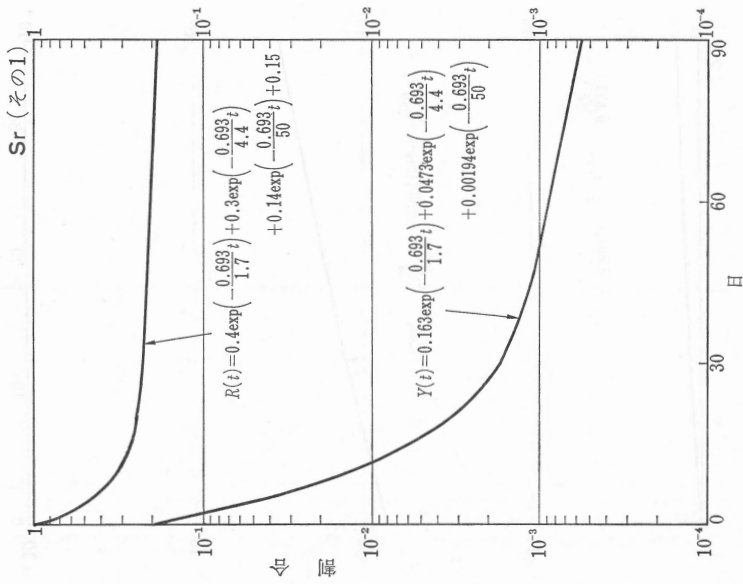


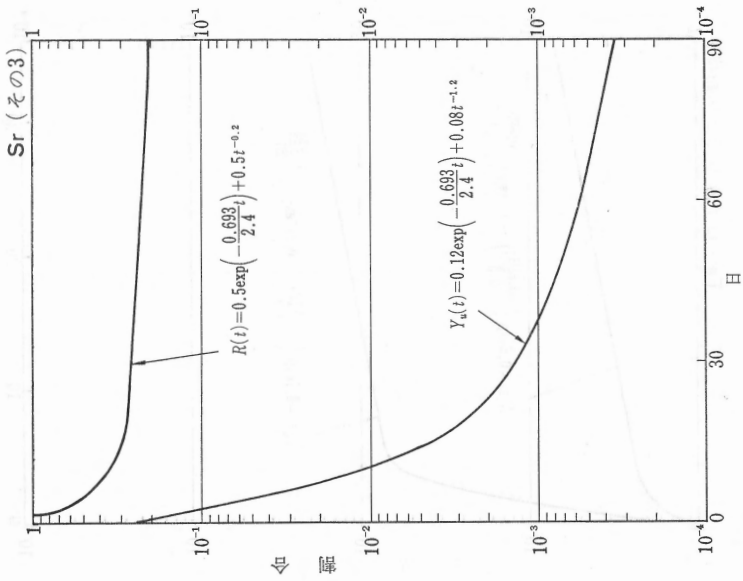
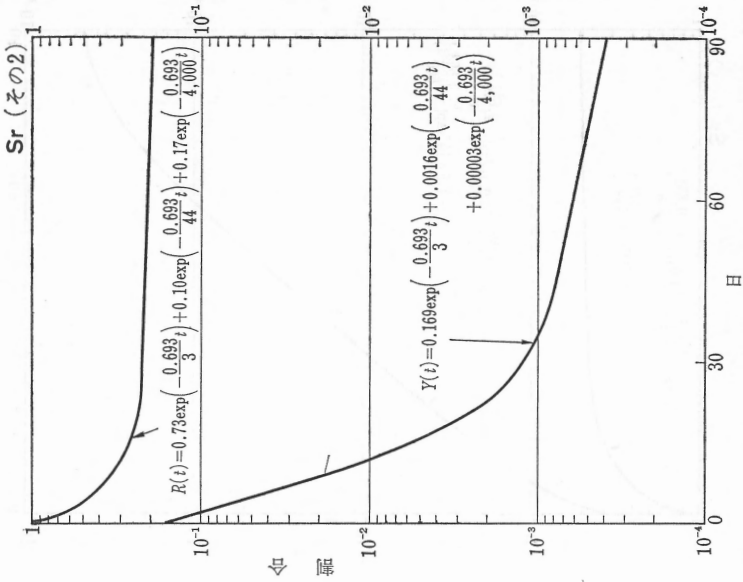


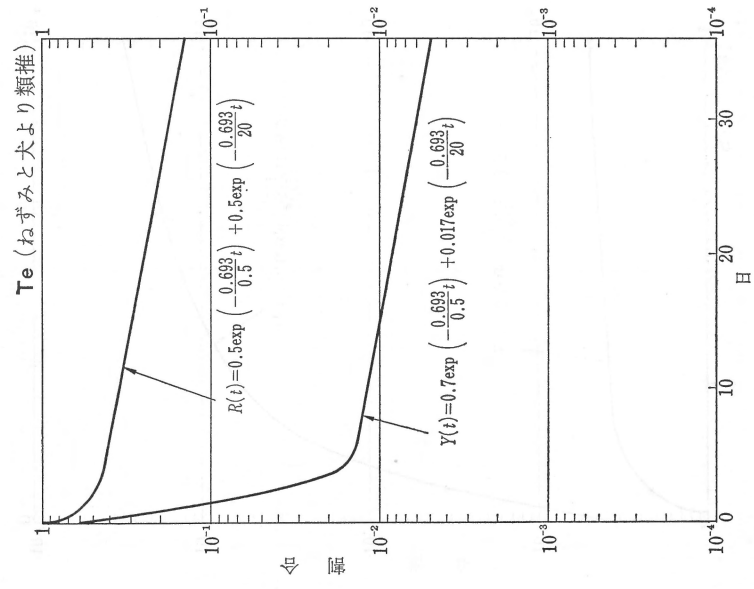
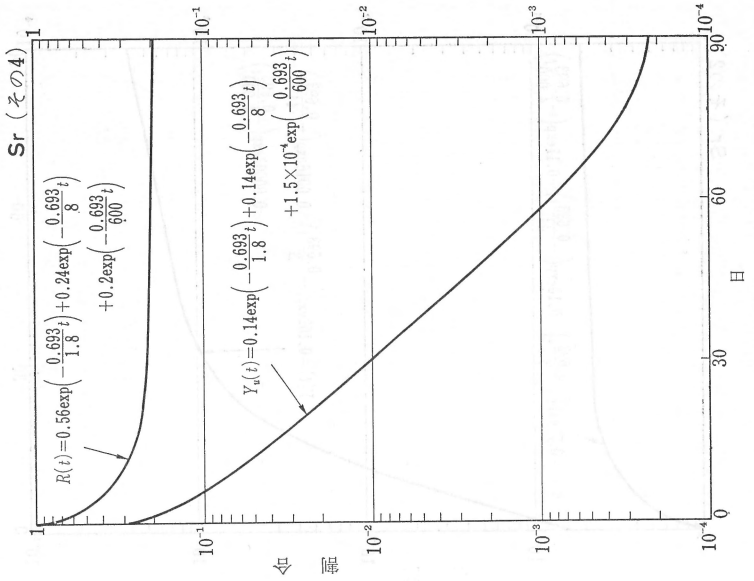


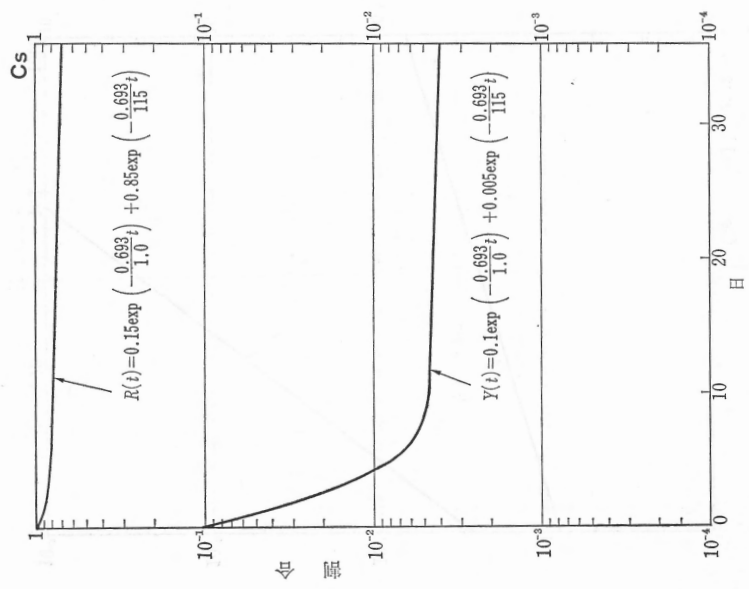
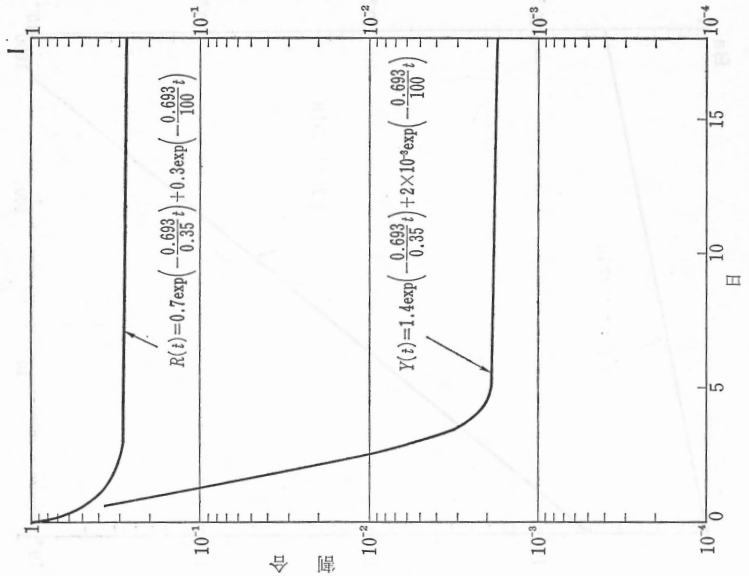


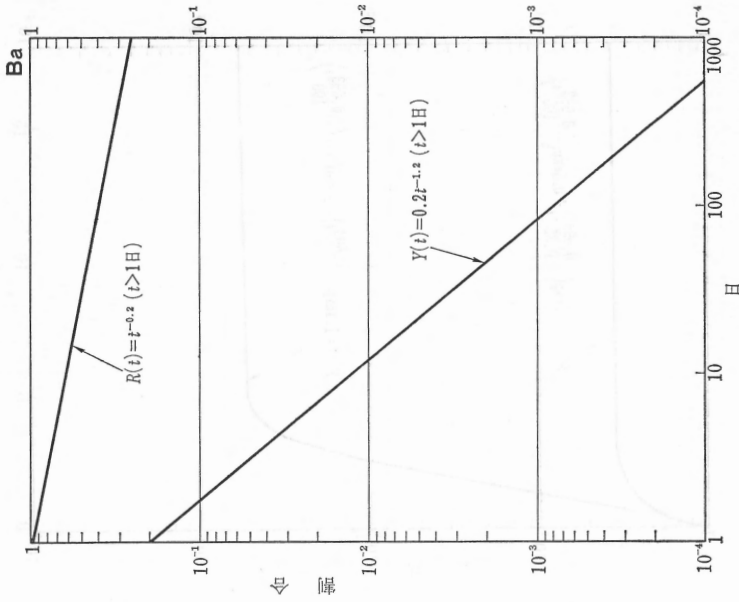
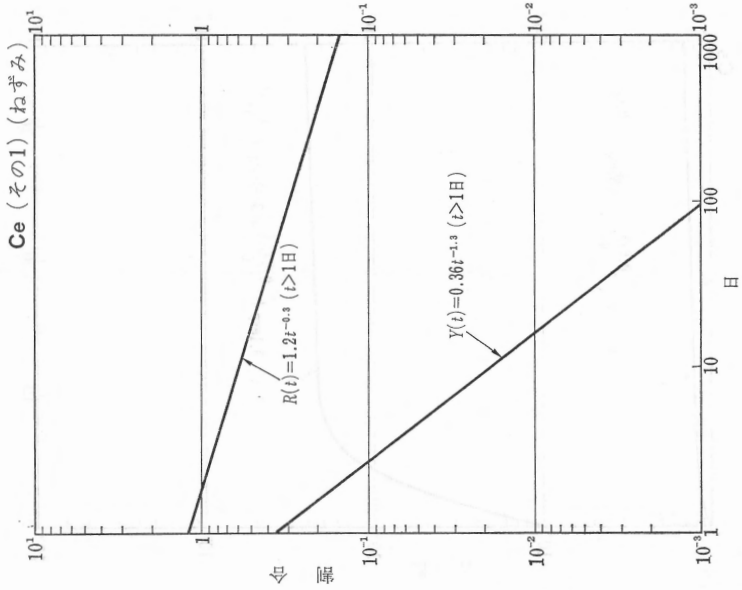


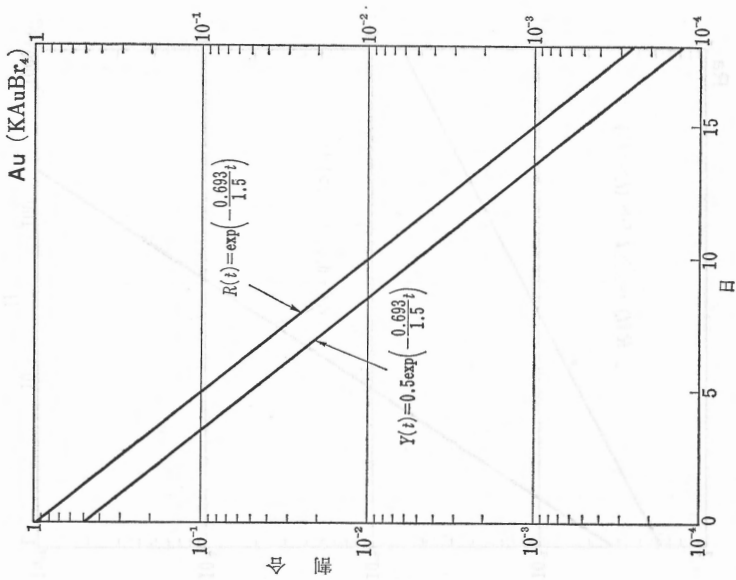
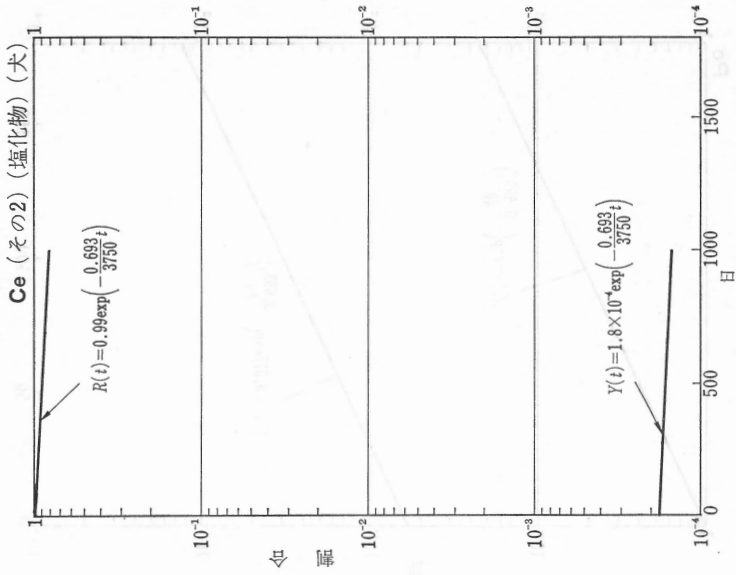


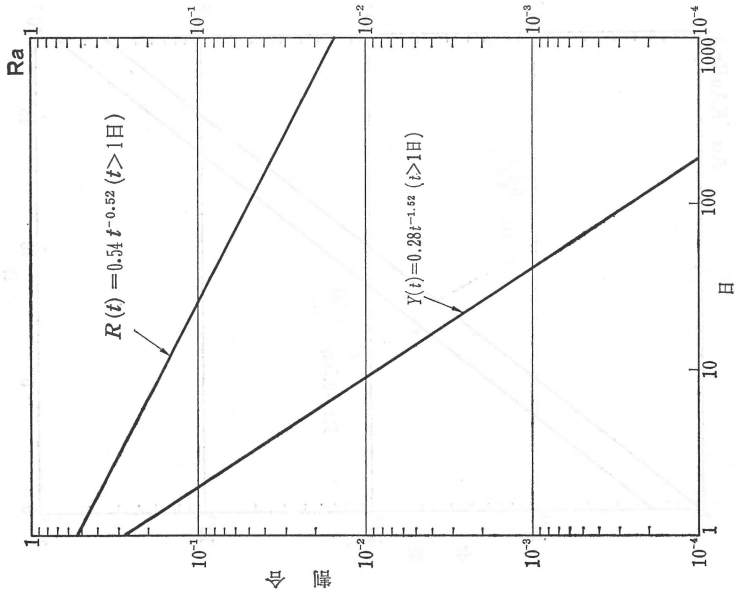
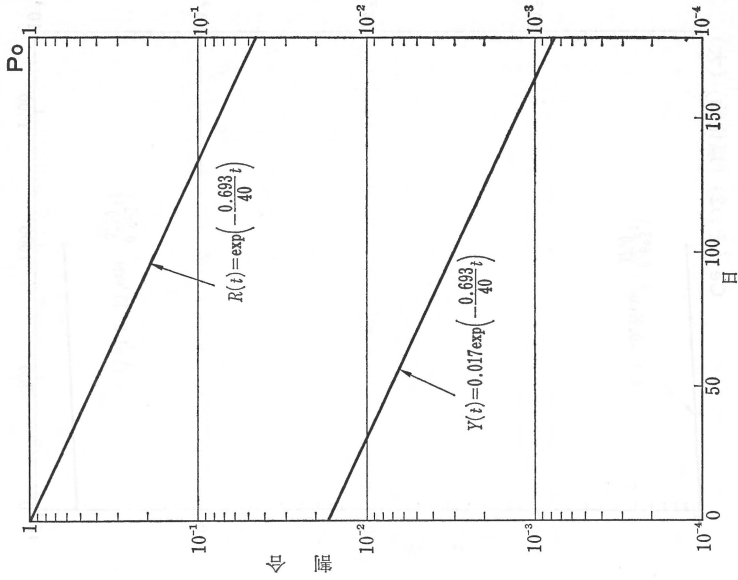


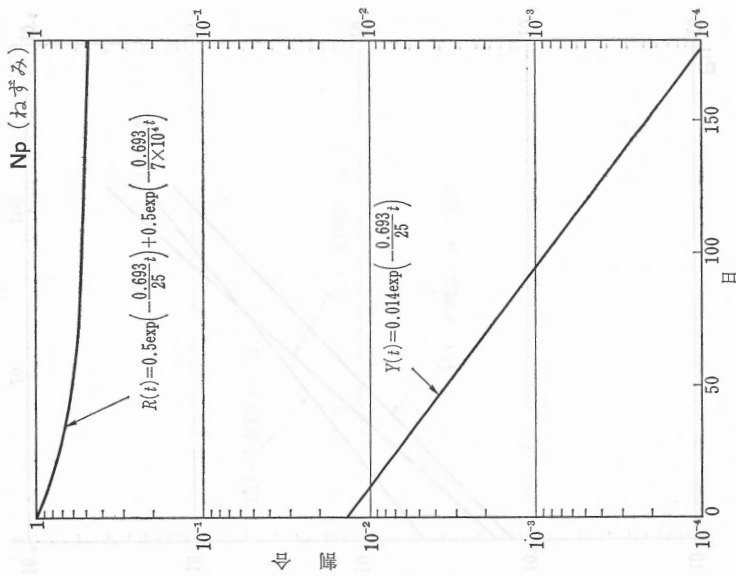
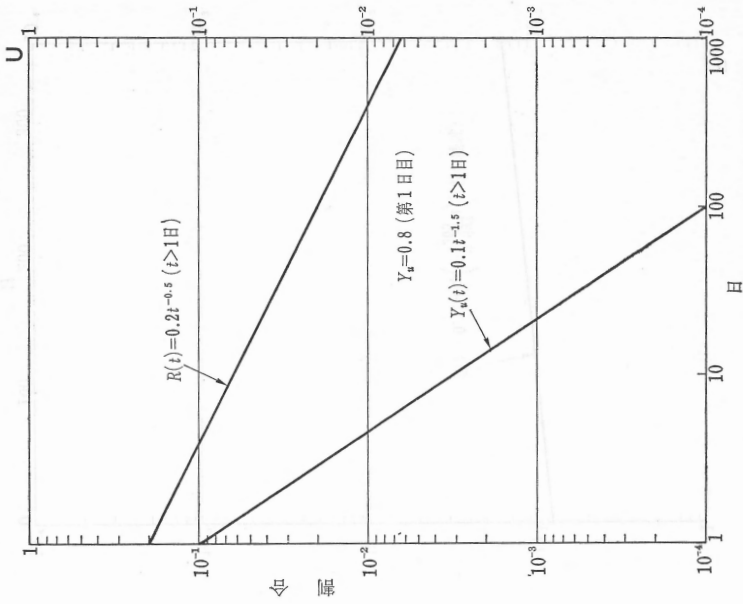


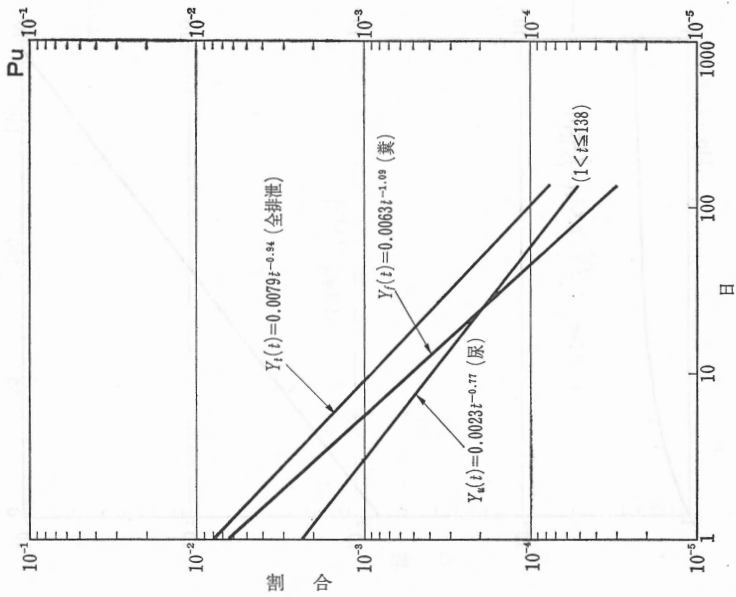
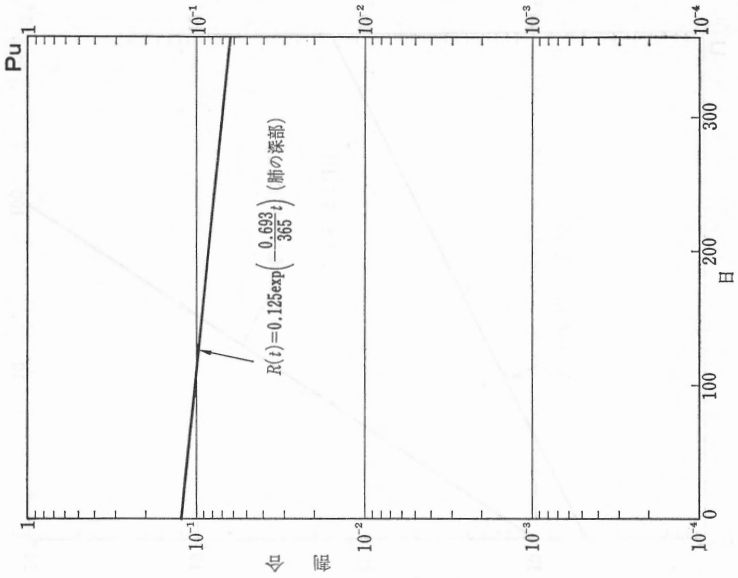


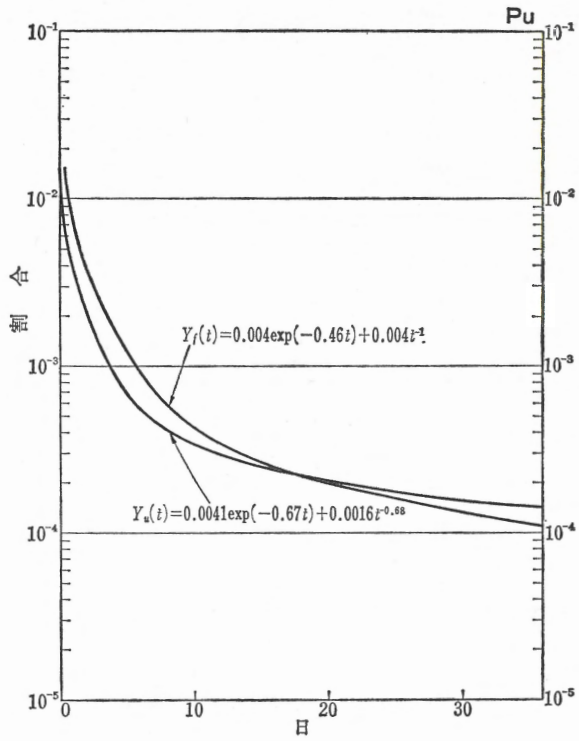












職業被曝による体内汚染からの
身体組織への線量の評価

¥ 780

昭和47年11月15日 発行

編 集 社 団 日 本 ア イ ソ ト ー プ 協 会
お よ び 法 人
発 行 財 団 仁 科 記 念 財 団
法 人

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 大洋印刷産業株式会社

