

作業者による放射性核種の 摂取の限度

Part 1

付 ICRP Publication 30 Part 1 に対する補遺(主文)

社団法人 日本アイソトープ協会

財団法人 仁科記念財団

作業者による放射性核種の摂取の限度

ICRP Publication 30

Part 1

国際放射線防護委員会専門委員会 2 の報告書

1978年7月に委員会によって採択されたもの

ICRP Publication 2 に置きかわるもの

社団法人 日本アイソトープ協会

財団法人 仁科記念財団

Nishina Memorial Foundation || Japan Radioisotope Association

Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 30 Part 1

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Masami IZAWA, Takashi SHIROTANI, Minoru FUJITA, Akira YABE,
Jun AKAISHI, Kazuo TAKADA, Seiichi MIZUSHITA

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.

邦訳版への序

本書は ICRP 専門委員会 2 の報告書、

Limits for Intakes of Radionuclides by Workers (ICRP Publication 30) の Part 1 (Annals of the ICRP, Vol. 2, Nos. 3~4, pp. 116) の全文、および、Part 1 に対する補遺 (Annals of the ICRP, Vol. 3, Nos. 1~4, pp. 555) のうちの本文 (4 頁) を、ICRP の諒解のもとに翻訳したものである。

ICRP Publication 30 は、その表題が示すように、さきに刊行された ICRP Publication 2 「体内放射線の許容線量」におきかわる、作業者の体内被曝の制御に関する報告書であって、ここに訳出した Part 1 のほか、引き続き発表されることになっている Part 2 および Part 3 が含まれる。

Part 1 は、Publication 30 を通して用いられている線量算定法を詳述した本文と、放射線防護上重要な 21 種の元素の 187 放射性核種に関する代謝データ、および、これら放射性核種の年摂取限度 (ALI) と誘導空气中濃度 (DAC) との計算値の表から成る。

Part 1 に対する補遺は、これら放射性核種の ALI と DAC の算出に用いられた諸データを、米国オークリッジ研究所のコンピュータからのプリントアウトのまま複写したものであるが、かなり大部の数表であり、かつ、専門的にわたるデータであるため、ここに訳出、転載はしなかった。ただ補遺の最初の 4 頁は、Part 1 には説明されていない、計算上のこまかい約束ごとについての記述であるので、この部分のみを翻訳して載せた。補遺のデータは、空気力学的放射能中央径 (AMAD) が $1\ \mu\text{m}$ と異なるエアロゾルの吸入の場合の ALI を算出するのに必要であり、また、吸入、経口摂取、サブマージョンが複合した場合に、Part 1 および ICRP Publication 26 に示されている便法でなくて、

(ii)

基本的原則にさかのぼってもっと正しい計算を試みようとする場合にも必要であるが、読者は Pergamon Press から直接に入手されたい。

Part 1 に記載されている 21 元素以外の元素とその放射性同位体に関する同様なデータは、引き続いて Part 2 (31元素) および Part 3 (43元素) として 1981年に刊行される予定になっている。各 Part にはそれぞれ Part 1 と同様の内容をもつ補遺が付く。

計算のベースに使われた核壊変に関する詳細なデータは、それだけまとめて別に刊行されることになっている。

翻訳をはじめ、日本原子力研究所の次の諸氏により、その素訳が作られた。

赤石 準, 城谷 孝, 高田一夫, 藤田 稔*, 水戸誠一, 矢部 明

(* 現在は東北大学)

ついで、この素稿をもとに、全体としての訳文の統一、再検討が、次の諸氏により行われた：

伊沢正実, 城谷 孝, 藤田 稔, 矢部 明

この原稿に編者によってさらに多少の手が加えられて、印刷原稿となった。したがって、この翻訳文の最終的な責任は編者にある。

訳出にあたっては、従来の ICRP の刊行物の翻訳でとった方針を踏襲し、また、それらとの訳語等の整合をはかった。医学用語その他の術語については、慣用されているものを使用するように心がけたが、本書でとくに定義づけて使っている用語などには、例外もある。たとえば：

transformation (変換) : disintegration (壊変) と同義、

pulmonary region (肺胞領域) : pulmonary は普通 lung (肺) と同義に使われるが、本書では肺の一部分 (酸素交換の機能をもつ部分) をいう。(「肺動態課題グループ」報告書参照)

cortical bone (皮質骨), trabecular bone (梁骨) 等、骨の名称 : 「用語の解説」に記されている意味をもつ。(ICRP Publication 11 も参

照。)

原文のあきらかな誤りはことわりなく訂正した。また、わずかながら訳注を付し、読者の便に供した。原文では代謝データ中の ALI と DAC は一つの表として与えられているけれども、この訳書では、見やすいように ALI の表と DAC の表とに分けて記した。

与えられた ALI と DAC は多くの仮定にもとづいて算出されているから、これらの使用にあたっては慎重な考慮を要する。使用上の注意は本文の中の該当する個所で述べられ、またとくに第9章に記されているが、参考のために、それらの主なものをここでくりかえし述べておく。

1. ALI と DAC は作業者の放射線防護に使うものであり、たとえば組織の質量と摂取量を変更しただけで公衆の構成員にあてはめることができると考えてはならない(9.5節など)。

2. これらの値や算出に用いたいろいろなパラメータを、被曝によるがんのリスクを推定するためなど、別の目的に無批判に使ってはならない(第1章)。

3. 本書では放射能だけを考慮しており、Publication 2 とちがって化学毒性は全く考慮していない。半減期がきわめて長い放射性核種の ALI と DAC も、放射能だけの考察から算出されている。(9.6節)

4. DAC は使用上の便宜を考慮して与えたものであって、守らなければならないのは ALI または積分濃度(サブマージョンの場合)である(3.4節, 3.5節, 8.4節など)。

本書は当然のことながら、ICRP の基本的な勧告 (ICRP Publication 26) へのとっっているけれども、細部にわたっては多少異なる点がみられる。たとえば、本書の補遺では、リスク係数と荷重係数の対象とする「残りの組織」(Remainder) をくわしくきめている(3.4.4)が、これは Publication 26 の105項の「残りの組織」とは内容が異なる。なお、補遺ではこのほかに、「その他の組織」(Other tissue)(3.3.2)、また、「身体の残りの部分」(the rest

(iv)

of the body) (3.3.2 および 3.2.2) 等の用語があり、それぞれちがった意味に使われているので、注意を要する。本書では、「標準人に関する課題グループ」報告書(ICRP Publication 23) の Appendix I にある比吸収割合の表を計算に用いることになっているが、「全身」を標的組織とはしていない(3.2.2) など、多少の相違がある。そのほか、Publication 26 を厳密に読むと、確率的影響の考察からきまる年摂取量の限度を ALI とよぶと解される(109項)が、本書では、確率的影響の考察から導かれる年摂取量の最大値と非確率的影響からきまる最大値のいずれか低い方を ALI と定義している。(本書の 3.3 節など)そして、表を簡単にするためであろうが、ALI が非確率的影響によって決まる場合に、ALI とは呼ばないにもかかわらず、確率的影響から決まる年摂取量の最大値も同じ ALI の表の中に示している。

このような使用上の限界などを十分に理解して、本書の意図するところ、ひいては ICRP の基本的な考え方に基づき、誤りのないよう本書を有効に利用して頂きたいと考える。

本書の刊行の直前に、ICRP から、1980年3月の会合における決定事項が、声明と勧告(Statement and Recommendations)として発表された*。その中で ICRP は、眼の水晶体に関し、1年につき0.3 Sv (30 rem) という、ICRP Publication 26 で勧告され、本書で使われた、非確率的影響を防止するための線量当量限度を厳しくし、1年につき 0.15 Sv (15 rem) にすることを新たに勧告した。本書の必要箇所にはこの旨注記したが、表にある Kr についての DAC の値は変えていないので、読者は注意されたい。

最後に、複雑な式や数字の多い本書の編集と校正には、多大の労力と忍耐とを必要とした。その任にあたって下さった方々の労を多としたい。

昭和55年5月

* Isotope news, 1980年6月号, 2~5頁にその全文が掲載されている。

目 次

	頁
序	1
故 W.S. Snyder 氏への謝辞	3
用語の解説	4
1. 緒 論	8
文 献	15
2. 体内線量を制御するための基本限度	16
2.1 緒 論	16
2.2 職業上の被曝に関する線量当量限度	16
2.3 作業者による放射性物質の摂取に関する限度	18
2.4 放射性物質の摂取の率についての制限	19
文 献	20
3. 体内線量を制御するための補助限度および誘導限度	21
3.1 標準人	21
3.2 預託線量当量 (H_{60})	21
3.3 年摂取限度 (ALI)	21
3.3.1 年摂取限度の適用	22
3.4 誘導空気中濃度 (DAC)	23
3.5 サブマージョンに関する誘導空気中濃度 DAC (Submersion)	24
3.5.1 元素状トリチウムに関する DAC (Submersion)	24
3.5.2 放射性希ガスに関する DAC (Submersion)	25
文 献	26

(vi)

4. 預託線量当量 (H_{50}) と年摂取限度 (ALI).....	27
4.1 緒論	27
4.2 量と単位	27
4.2.1 放射能	27
4.2.2 線量当量	27
4.3 預託線量当量 (H_{50})	28
4.4 細胞レベルの線量分布	31
4.5 比実効エネルギー (SEE).....	33
4.5.1 崩壊図式	34
4.5.2 身体の器官の質量	34
4.6 線源器官における50年間の変換の数	35
4.6.1 娘放射性核種のビルドアップ	38
4.7 年摂取限度 (ALI).....	41
4.8 誘導空気中濃度 (DAC).....	42
4.9 線量算定用データに示されている値	43
文献.....	43
5. 呼吸器系に関する線量算定用モデル.....	45
5.1 緒論	45
5.2 沈着および残留のモデル	46
5.3 肺から体液あるいは胃腸管への放射性核種の直接の移動	52
5.4 肺における預託線量当量 H_{50} の計算.....	53
5.5 粒子サイズの補正	55
文献.....	56
6. 胃腸管に関する線量算定用モデル.....	57
6.1 緒論	57

6.2	線量算定用モデル	57
6.3	呼吸器系から胃腸管に移る放射能	59
6.4	体液に移る放射能	60
6.5	胃腸管の各区分に対する預託線量当量 H_{50} の計算	60
	文献	64
7.	骨に関する線量算定用モデル	65
7.1	緒論	65
7.2	骨表面上の細胞および活性赤色骨髄に対する 預託線量当量 H_{50} の計算	65
7.2.1	骨格組織中における吸収割合の推定値	68
7.2.1.1	光子放射体	68
7.2.1.2	無機質骨の体積全体に均等に分布する α 放射体	68
7.2.1.3	骨表面にあると仮定される α 放射体	71
7.2.1.4	骨の体積全体に均等に分布する β 放射体	72
7.2.1.5	骨表面にあると仮定される β 放射体	75
7.2.1.6	核分裂片と反跳原子	77
7.2.1.7	吸収割合の値の要約	77
7.2.2	梁骨中と皮質骨中の変換の数の推定値	78
7.2.2.1	親放射性核種	78
7.2.2.2	娘放射性核種	79
7.3	骨表面近くの細胞と活性赤色骨髄に対する預託線量当量 H_{50}	81
7.3.1	光子放射体	81
7.3.2	α 放射体および β 放射体	82
	文献	82
8.	放射性雲中のサブマージョンに関する線量算定用モデル	85
8.1	緒論	85

(vii)

8.2	体外放射線と体内放射線の線量当量率の相対的な大きさ	85
8.2.1	トリチウム	87
8.2.2	ラドンおよびトロン	88
8.2.3	希ガス	88
8.2.3.1	娘放射性核種	89
8.3	サブマージョンによる身体組織の線量当量率	89
8.3.1	光子放射体	89
8.3.2	電子および β 放射体	90
8.4	サブマージョンに関する誘導空气中濃度 DAC (Submersion)	91
	文献	93
9.	線量算定用データの使用とその限界	94
9.1	緒論	94
9.2	化学形および物理形に関する仮定	94
9.3	代謝モデルに関する仮定	95
9.4	娘放射性核種に関する仮定	95
9.5	被曝する個人に関する仮定	96
9.6	化学毒性に関する仮定	96
9.7	放射性核種の混合物の吸入, 経口摂取, およびサブマージョンによる被曝	97
	文献	99
	いろいろな年齢の人々における放射性核種による 線量当量の推定に関する文献目録	99
付録		100
	この報告書に使用されたコンパートメントモデルの 厳密解および近似解	100

A.1	2コンパートメント連鎖の各コンパートメント中の積分放射能…	102
A.2	肺の気管—気管支領域における吸入放射性核種の変換の総数……	103
A.3	肺胞領域における娘放射性核種の変換の総数……	105
A.4	肺および胃腸管の各コンパートメントにおける 変換の総数を表す近似式……	106
A.4.1	吸入放射性核種と経口摂取放射性核種……	106
A.4.2	吸入放射性核種と経口摂取放射性核種との娘放射性核種……	107
	文 献……	109
	代謝データ ……	110

ICRP Publication 30
Part 1 に対する補遺(主文)

序

国際放射線防護委員会 (ICRP) は1967年に、ICRP 専門委員会 2 に対して、*ICRP Publication 2* として1959年に刊行された「体内放射線の許容線量」に関する報告書の新版を作成するよう要請した。その報告書の作成は、標準人課題グループ、肺動態課題グループ、および、骨の諸組織の放射線感受性に関する課題グループが与える助言に大きく依存するであろうことが認められた。また、この報告書を完成するには、現在は *ICRP Publication 26* として入手できる委員会の基本的勧告の改訂を待たなければならなかった。

この報告書の最終版を作成した ICRP 専門委員会 2 の構成員は次の人々であった。

J. Vennart (委員長), W.J. Bair, G.C. Butler, G.W. Dolphin (書記), L.E. Feinendegen, W. Jacobi, J. Lafuma, C. Mays, P.E. Morrow, P. V. Ramzaev, W.S. Snyder (1977年6月死去) および R.C. Thompson。

さらに、次の人々はこの報告書について議論を行った初めの段階の専門委員会 2 の構成員であった。

B. Chr. Christensen, M. Dousset, M. Izawa, J. Liniecki, L.D. Marinelli, W.G. Marley, K.Z. Morgan, J. Müller, V. Shamov および C.G. Stewart。

専門委員会 2 は、データの収集およびこの報告書の作成に大きな援助を下さった N. Adams と M.C. Thorne の労に対し感謝の意を記し、また、秘書として協力され、また、きわめて忍耐づよくいくつかの草稿を作成して下さった E. Henry 夫人と J. Rowley 夫人に感謝の意を表したい。

線量計算は、初めは W.S. Snyder を長として、後には M.R. Ford 夫人を長として作業した次の課題グループが責任をもって行った。

(2)

専門委員会2の報告

W.S. Snyder (1977年6月死去), S.R. Bernard, L.T. Dillman (1977年5月より), Mary R. Ford 夫人, J.W. Poston および Sarah B. Watson 夫人。

専門委員会2は, Snyder 博士のあいにくの逝去の後, 非常に困難な状況のもとでこの骨の折れる仕事を遂行できたのは, この課題グループ, そしてとくに Ford 夫人のおかげであることを記しておきたい。

故 W.S. Snyder 氏への謝辞

委員会は、この報告書および他の多くの ICRP 報告書の作成にあたって、骨身を惜しまず努力された、故 W.S. Snyder 氏に負うところが大きいことを記しておきたい。とくに専門委員会 2 に関する Snyder 博士の仕事、そして広くは放射性核種の線量算定法の進歩に関する仕事は、彼自身の生前においてさえ信じがたいほど大きなものであった。彼は倦むことなく努力し、その膨大な知識のたくわえを、直接の同僚にも、世界中の研究者、専門家にも、いつも喜んで分け与えることを望んでいた。彼の死によってわれわれは、一人の尊敬すべきそして信頼のできる同僚を失うとともに、一人の友人をも失ったのである。

用語の解説

吸収割合 (Absorbed Fraction—AF)

特定の線源組織内で特定の種類の放射線として放出されたエネルギーのうち、特定の標的組織に吸収される割合。

空気力学的放射能中央径 (Activity Median Aerodynamic Diameter—AMAD)

エアロゾル全体の放射能の中央値をその放射能とするエアロゾル粒子の空気中における沈降終速度と同一の沈降終速度をもつ、密度1の球の直径。

年摂取限度 (Annual Limit on Intake*—ALI)

ある放射性核種が単独で摂取された場合に、標準人で代表される個人を、職業上の被曝の各1年につき ICRP が定めた限度まで照射することになる放射能。

ベクレル (becquerel—Bq)

放射能の SI** 単位の特別な名称, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ ($\approx 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$)。

骨表面近くの細胞 (Cells near Bone Surfaces—BS)

骨内膜面および上皮で被われた骨表面上の $10 \mu\text{m}$ 以内にある組織。

預託線量当量 (Committed Dose Equivalent— H_{50})

ある組織全体で平均したある放射性核種による線量当量の、その核種が体内に摂取された後の50年間にわたる総和。

皮質骨 (Cortical Bone—CORT. B.***)

ICRP Publication 20 における“ちみつ骨 (Compact Bone)”と同じも

* 訳注 ICRP Publication 26 などでは、Annual Limit of Intake となっている。

** 訳注 Système International d'Unités (国際単位系)。

*** 訳注 原文にはないが、訳ではこの略字を用いる。

の。60 cm²cm⁻³よりも小さい表面積/体積の比をもつすべての骨。標準人ではこの質量は4,000 gである。

沈着確率(肺の領域における)(Deposition Probability (in lung region))

吸入されたエアロゾルの放射能あるいは質量のうち、肺のある特定の領域に沈着する割合。

誘導空气中濃度(Derived Air Concentration—DAC)

ある放射性核種のALIを、標準人が1年間の労働時間内に吸入する空気の体積(すなわち、2.4×10⁹ m³)で割った値。DACの単位はBq m⁻³である。

サブマージョンに関する誘導空气中濃度(Derived Air Concentration for Submersion—DAC (Submersion))

ある放射性核種の空气中濃度の、1年間の労働時間にわたる時間積分値の2千分の1で、その濃度単独で1年間の労働時間内に個人をICRPによって規定された限度まで照射することになる値。

線量当量(Dose Equivalent—*H*)

吸収線量、線質係数(*Q*)、および、その他のあらゆる修正係数の積(*N*)の相乗積。(現在では*N*=1。)

線量当量限度(Dose-Equivalent Limits)

職業上被曝する個人の個々の器官が1年間に受けうる預託線量当量の最大限の値(非確率的影響の限度)、および、均等照射された全身が1年間に受けうる預託線量当量の最大限の値(確率的影響の限度)で、*ICRP Publication 26 (1977)*に勧告されているもの。

グレイ(gray—Gy)

吸収線量のSI単位の特別な名称、1 Gy=1 Jkg⁻¹≡100 rad
ラングクラス*(D, W あるいは Y) (Lung Class (D, W or Y))

* 訳注 本文中で吸入のクラス(inhalation class)と呼んでいる。

肺の肺泡領域からのクリアランス速度により分けた、吸入される物質の分類。

非確率的影響 (Non-stochastic Effects)

眼の水晶体の混濁のような影響で、その影響の重篤度が線量の大きさとともに変わり、そのためしきい値がありうるような影響。

線質係数 (Quality Factor— Q)

吸収線量から線量当量を導くために用いられる主たる修正係数 (荷電粒子の衝突阻止能に依存する)。

赤色骨髄 (活性) (Red Bone Marrow (active)—RM)

造血幹細胞の大部分を含む骨髄の成分 (この報告書では 1,500 g の質量をもつと仮定する)。

標準人 (Reference Man)

「標準人に関する ICRP 課題グループ」の報告書 (*ICRP Publication 23*) で規定された解剖学および生理学的特性をもつ個人。

シーベルト (sievert—Sv)

線量当量の SI 単位の特別な名称, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Jkg}^{-1} \equiv 100 \text{ rem}$

線源組織 (Source Tissue— S)

ある放射性核種を体内に摂取した後、その放射性核種の有意な量を含有する組織 (身体器官であることもある)。

比吸収割合 (Specific Absorbed Fraction)

ある線源組織内で特定の種類の放射線として放出されたエネルギーのうち、ある標的組織の 1 g に吸収される割合。

比実効エネルギー (Specific Effective Energy— $SEE^*(T \leftarrow S)_i$)

線源組織 (S) 内で生じた 1 個の核変換によってある特定の放射線 (i) が放出された結果、ある標的組織 (T) の g 当たり付与されるエネルギー (MeV) を、適当な線質係数で修正したもの。

確率的影響 (Stochastic Effects)

悪性腫瘍および遺伝的な疾患で、その重篤度ではなく、その起こる確率がしきい値のない線量の関数とみなされる影響。

標的組織 (Target Tissue— T)

放射線が吸収される組織 (身体器官であることもある)。

梁骨 (Trabecular Bone—TRAB. B.*)

ICRP Publication 20 における“網状骨 (Cancellous Bone)”と同じもの。60 cm² cm⁻³ よりも大きい表面積/体積の比をもつすべての骨。標準人ではこの質量は1,000 g である。

通過コンパートメント (Transfer Compartment)

放射性物質が体液に入ってから特定の組織に沈着するまでに起こる遅れを考慮に入れるために、この報告書で用いられる代謝モデルの大部分に (数学的な便宜のため) 導入されたコンパートメント。

荷重預託線量当量 (Weighted Committed Dose Equivalent ($w_R H_{50,R}$))

ある特定の組織の預託線量当量と荷重係数との積。

荷重係数 (Weighting Factor— w_R)

全身が均等に照射されたとき、組織 T に生ずる確率的影響のリスクの、リスク全体に対する比。

* 訳注 原文にはないが、訳ではこの略字を用いる。

1. 緒 論

国際放射線防護委員会は1959年に *Publication 2*, すなわち、「体内放射線の許容線量」に関する専門委員会2の報告書を刊行した。その後、*ICRP Publication 6* (1964) において、個々のいくつかの放射性核種に関していくらかの変更と追加の勧告が行われたが、*ICRP Publication 2* について系統だった改訂は公表されなかった。この報告書はその意図が多少誤解されたり、その勧告が多少誤って使われたりしたが、委員会の基本的な基準を満たすための放射性核種の体内への摂取を制御する指針として十分役に立ってきた。その後今日までの間に、放射線の身体に対する影響と放射性物質の身体組織への取り込みと残留についての新しい情報、および、放射性崩壊図式についてのいっそうよいデータが蓄積してきた。これらの要因のため、また *ICRP Publication 26* に記述されている、委員会の基本的勧告の変更があったため、この専門委員会が報告書を新たに刊行する必要性が生じた。専門委員会2の前の報告書が刊行された1959年当時においては、職業上の被曝に関する委員会の勧告は、任意の13週の期間に身体の器官および組織が受ける線量当量の限度を用いて組み立てられ、それに加えて、生殖腺、造血器官および眼の水晶体については、年齢の増加に伴う線量蓄積の率についての制限があった。受けた線量の線量限度に対する比が最大となる器官を決定器官と名づけ、個人の被曝はこの決定器官における線量当量によって制限された (*ICRP Publication 1*, 1959, および増補, 1960)。*ICRP Publication 2* は、多くの放射性核種について空気中および水中の最大許容濃度 (MPC) および最大許容身体負荷量 (MPBB) の値を勧告した。どの放射性核種についても、標準人がどちらかの MPC の値に50年という就労の全期間中連続してさらされると、その期間の最後には、その人は MPBB

の放射性核種を体内に保有する結果となる。MPBB の値は、それぞれの決定器官における線量当量率が、それぞれにあてはまるきめられた期間について、委員会が勧告した線量当量限度を超えることがないように算定されたのである。委員会は *ICRP Publication 2* において、任意の1/4年の摂取量がそれぞれの MPC のレベルに13週間続けてさらされたときの摂取量よりも多くない限り、放射性核種の摂取の率は変動してもよいということを強調したのであるが、MPC の概念は誤って用いられ、MPC はいかなる状況でも決して超えるべきでない空气中または水中の最大の濃度を示すものとされた。同様に MPBB も誤って用いられ、体内における放射能の最大値を示すものとされた。しかし、体内における滞留時間の短い放射性核種を MPBB よりも多く1回摂取しても、線量についての委員会の限度を越すことにはならないということは明らかである。このような理由と以下に議論する他の理由のため、MPC と MPBB の概念はこの報告書では使用されていない。

第4章に記すように、国際単位系 (SI) の量と単位が、この報告書全体にわたって使用されている。SI 単位の特別な名称は、吸収線量についてはグレイ (Gy)、線量当量についてはシーベルト (Sv)、放射能についてはベクレル (Bq) である。委員会が勧告した線量当量の限度が本文中に与えられている箇所では、レムで表した値が括弧内に示されている。

委員会の勧告は長年にわたって展開されてきたが、初めは、早期に発現する放射線で誘発される影響を避けることが目的であり、後には、放射線で誘発されるがんおよび遺伝的疾患を最小限にすることが目的となった。現在では、放射線の影響について十分なデータが入手できるようになり、被曝した人々における放射線で誘発される致死性のがんおよび被曝した人々の子孫における重大な疾患の、単位線量当量当たりのリスクの値を委員会が示すことができるようになった (*ICRP Publication 26*, 36-67項)。

これらの影響のリスクと線量当量との間にはしきい値のない正比例の関係が

あるという仮説を用いて、これらのリスクの値を、放射線防護において関心のある線量と線量率の領域において適用する考えである。それゆえ、個人、グループ、または集団における致死性がんのリスクおよび子孫における遺伝的疾患のリスクは、線量当量率および線量当量の分割のされ方には無関係に、個人が受けた全線量当量によって決定されるか、あるいは被曝したグループまたは集団における集団線量当量によって決定されることになる (ICRP Publication 26, 22-24項)。そのため、委員会は、1つの線量制限体系によってこれらの疾患のリスクを最小にすることを提案しており (ICRP Publication 26, 12項)、その線量制限体系のおもな原則は次のとおりである。

- (a) いかなる行為も、その導入が正味でプラスの利益を生むのでなければ、採用してはならない；
- (b) すべての被曝は、経済的および社会的な要因を考慮に入れながら、合理的に達成できる限り低く保たなければならない；
- (c) 個人に対する線量当量は、委員会がそれぞれの状況に応じて勧告する限度を超えてはならない。

この報告書は、条項(c)にそうように、作業者の放射性核種の摂取を制限する補助的な基準の誘導のみを取り扱っている。しかしながら、多くの場合、条項(a)および(b)に示唆された費用—利益解析と判断とが行われるから、作業員全員に対する平均の線量は、おそらくこの限度よりはるかに低くなるであろうということが認められている。

職業上の被曝を制御するために用いられる基本限度を第2章で議論する。放射性物質に対する職業上の被曝に関しては、線量当量を積分すべき期間は、これまでどおり50年という就労期間であると委員会は考える。この報告書では、1つの放射性核種を体内に摂取した後の50年間の、任意の組織における総線量当量を預託線量当量 H_{50} と名づける。

ある放射性核種が身体内に入った後、いくつかの器官および組織が照射を受

けるであろう。就労している任意の1年間において、体内のすべての器官における H_{50} の値は、被曝の結果起こるがんおよび遺伝的疾患の全リスクが、*ICRP Publication 26* において委員会が勧告した、全身均等被曝についての年線量当量限度50 mSv (5 rem) を全身が均等に受けた場合のリスクよりも小さいか同じであるように、制限しなければならない。また、あるしきい線量を超えた場合にのみ現れるような影響の発生を防止するための、もう1つの制約も加えられている。 H_{50} の値を制限するために用いる方法を第2章で議論する。

実際に使用するための補助限度および誘導限度を第3章で議論する。各放射性核種のいくつかの異なった化学形のものについて、経口摂取と吸入の場合の年摂取限度 (ALI) が、補助的な基準として与えられている。このような摂取をした標準人 (*ICRP Publication 23*) は、前項で述べたように、職業上被曝する1年ごとに委員会が設定した限度まで照射を受けることになる。また、各放射性物質の誘導空気中濃度 (DAC) の値も与えられている。この値は、標準人が1年間の労働時間内に吸入する空気量で ALI を割ることによって得られる。また、放射性の不活性ガスおよび元素状のトリチウムの雲に標準人が囲まれた場合の DAC も誘導されている。この場合、就労している任意の1年間に、体外放射線から身体の器官および組織が受ける線量当量に制限が課される。

DAC の値は *ICRP Publication 2* で誘導された MPC (空気中) の値と類似している。DAC の値は常に慎重に用いられなければならないことを強調しておく。放射性核種の吸入の場合、優先する限度は ALI であり、サブマージョンの場合、優先する限度は空気中の放射性核種の濃度を就労している任意の1年間について積分した時間積分である。水中における誘導濃度については、水は経口摂取される物質の1つの源にすぎないという理由から、この報告書では基準を作らなかった。任意の1年間に経口摂取される総放射能は、経口摂取に関する ALI の値を使って制御されるべきである。

放射性核種の単位摂取当たりの H_{50} を計算するに当たって使用する一般的な原則を第4章で述べる。この報告書では、任意の標的器官の H_{50} には、標的器官それ自身の中にある放射性核種から出てくる放射線による線量のほか、身体その他の器官の中にある放射性核種が放出する光子による線量も含まれている。任意の線源器官中の放射性核種の変換ごとに任意の標的器官が単位質量当たり吸収する全エネルギーを、線質係数で適当に重みづけをしたものを、比実効エネルギー (SEE) とよぶ。任意の標的器官についての H_{50} は、SEE および放射性核種を摂取した後の50年間に線源器官中で起こる変換の数 U に比例する。 H_{50} として与えた値はすべて、指定された放射性核種のみを単位質量摂取した場合のものであるが、親放射性核種の体内での変換により生じた任意の娘放射性核種による預託線量当量を含んでいる。親の放射性核種の U と娘核種の U' 等々を計算するさいに用いる方法の原則も第4章で議論する。ある放射性核種とその娘核種の体内における挙動を記述するために用いられるどんなモデルも、実際に起こるであろう状況を過度に単純化したものであるということにはわかっている。この報告書で用いたモデルは、体内の放射性核種の線量算定に統一した方法を提供するために採用したものであって、放射性物質に対する作業者の被曝の限度を誘導するという現在の目的には、十分正確であると考える。

放射性物質の体内への侵入経路に関する特別のモデル、すなわち、呼吸器系モデルと胃腸管モデルは、それぞれ第5章と第6章に記述する。呼吸器系モデルは肺の平均預託線量当量を計算するために使用するものである。委員会は、放射線防護の目的上、肺を気管および気管支、ならびに肺泡領域とそれに付随した局所のリンパ組織からなる複合組織であると考える。このモデルは吸入された放射能のうち体液または胃腸管のいずれかへ移動する割合の計算にも使用される。同様に、胃腸管モデルは、第一には、解剖学的に明確に区別でき、委員会の基本限度を適用するとき別個の器官とみなされる、胃腸管の各区分の伝

平均預託線量当量を計算するために使用され、第二には、経口摂取された放射能のうち体液に移行する割合を計算するために使用される。

第7章には骨中に存在する放射性核種の線量算定に使用するモデルが記述されている。問題となる標的組織であると確認された、骨表面近くのある種の細胞および赤色骨髄について、預託線量当量が推定されている。

第8章には、放射性であって化学的に不活性なガスまたは元素状のトリチウムに人が囲まれた場合（サブマージョン）のDACを誘導するために用いる方法が述べられている。トリチウムについては制限因子は肺の照射であり、不活性ガスについては身体の体外照射であることを示す論拠が与えられている。吸収されたガスによる身体の体内照射は考える必要がないことが示されている。

いくつかの元素の放射性同位体に関するALIおよびDACを計算するのに必要な、関連のある代謝データが、この報告書の110-205頁に掲載されている。そこには、「標準人」に関する報告書（*ICRP Publication 23*）およびその他の情報源から採った、安定元素の1日当たりの摂取量、排泄量、身体含有量および体内分布に関するデータが与えられている。元素の化合物の代謝についての記述とそれらの胃腸管から体液への吸収に関する値、呼吸器系の線量算定用モデルに使用するそれら化合物の肺クリアランスの分類、ならびに、成人の全身および関連のある器官中の残留を記述するモデルが与えられている。元素ごとにそれぞれの代謝データが示された後、放射性半減期が10分より長い放射性同位体についてのALIとDACの値が与えられている。元素の個々の同位体に関する、関連のある線量算定用データは、この報告書の補遺に計算機のプリントアウトの形で与えられる。線量算定用データに含まれているものは、放射性核種の放射性変換に関する情報、異なる線源器官中の放射能に由来するいくつかの標的器官に関するSEEの値、いろいろな化学形の放射性核種を単位放射能経口摂取した場合と吸入した場合の、いくつかの線源器官における50年間の変換の数、そのときの H_{50} の値と H_{50} に放射線誘発性のがんおよび遺

的疾患に対する組織の感受性の重みづけをした値、そして最後に、職業上の被曝に関する ALI と DAC の値の表である。まだ収録されていない元素の代謝データおよびその元素の放射性同位体の線量算定用データは、入手でき次第刊行されるであろう。

第9章では、データの使用上の限界を取り扱っている。個人が実際にあびた総線量当量および放射性物質に過去に被曝した結果その人が将来受けることになる総線量当量が、その個人の放射線被曝に関する現状を決定する主要因子であるということが強調されている。この報告書あるいは補遺に与えられている H_{60} , ALI, および, DAC の値は、成人の職業上の被曝を解釈する場合のみ使用できる規準である。その他の年齢の人々についての情報は与えられていない。ALI の値は放射線の線量だけの考察に基づいたもので、化学毒性は考慮されていない。

この報告書に与えられているデータは、*ICRP Publication 26* に記述されている基本的勧告の枠組の中でのみ使用されるべきものであるということを委員会は強調したい。とくに注意をしてほしいのは勧告の102項であって、102項では、作業者のうちのかなりの部分の人々が ALI またはそれに近いレベルで放射性核種を長期にわたって連続して摂取することは、費用-利益解析を注意深く行って、結果として生ずるリスクが正当であることが示された場合にだけ容認できると述べている。この報告書に使用されたモデルは、作業者を確実に防護するための ALI および DAC の値を誘導する目的で、しばしば安全側に選択されたものである。したがって、ここに与えられたデータは、たとえば個々の事例におけるがんのリスクを推定するというような、文脈を離れた無分別な使い方をすべきではない。使われているいろいろな仮定は仮定とみなすべきであって、確立された事実とみなしてはならない。使用したモデルを改善するために、さらに研究とデータが必要である。

文 献

- ICRP Publication 1, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* (Adopted 9 September 1958.) Pergamon Press, Oxford, 1959.
- ICRP Report on Decisions at the 1959 Meeting of the International Commission on Radiological Protection: *Radiology* **74**, 116-119 (1960); *Am. J. Roentg.* **83**, 372-375 (1960); *Strahlentherapie* **112**, 481-485 (1960); *Acta. Radiol.* **53**, 166-170 (1960); *Br. J. Radiol.* **33**, 189-192 (1960).
- ICRP Publication 2, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation* (1959). Pergamon Press, Oxford, 1960.
- ICRP Publication 6, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (as amended 1959 and revised 1962). Pergamon Press, Oxford, 1964.
- ICRP Publication 9, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* (Adopted 17 September 1965.) Pergamon Press, Oxford, 1966.
- ICRP Publication 23, International Commission on Radiological Protection, Task Group Report on Reference Man.* Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* Pergamon Press, Oxford, 1977.

2. 体内線量を制御するための基本限度

2.1 緒 論

ICRP のこの前の勧告が刊行されて以来10年ほどの間に、電離放射線の吸収線量と生物学的影響のリスクとの関係について、いっそう多くの情報が入手できるようになった。この新しい情報によって委員会は、電離放射線に対する被曝の限度を、従来用いてきた根拠とは異なる根拠に基づいて定めることが可能となった (*ICRP Publication 26*)。放射線で誘発される影響については2つの大まかな区分けが考えられる。すなわち、

- (i) 悪性腫瘍および遺伝的疾患で、その重篤度ではなく、その起こる確率がしきい値のない線量の関数とみなされる影響 (確率的影響)、および
- (ii) 水晶体の混濁および美容上受け入れがたい皮膚の変化のような影響で、線量がしきい値あるいは見かけ上のしきい値を超えてはじめてその影響が誘発されるもの (非確率的影響)。

委員会の勧告は非確率的影響を防止し、確率的影響の発生を容認できるレベルに制限することを意図したものである。

2.2 職業上の被曝に関する線量当量限度

委員会は、非確率的影響の防止は、眼の水晶体を除くすべての組織に対して1年につき0.5 Sv (50 rem) という線量当量限度を適用することによって、達成できるであろうと信ずる。水晶体については、委員会は1年につき0.3 Sv (30 rem) という限度を勧告する*。これらの限度は、これらの組織が単独で照

* 訳注 1980年に0.15 Sv (15rem) にひき上げられた。(Statement (次頁に続く))

2. 体内線量を制御するための基本限度 (17)

射されるか他の器官とともに照射されるかに関係なくあてはまり、そしてこれらの限度は、次に議論する確率的影響の制限を満たす被曝を拘束することを意図するものである。

確率的影響に関しては、委員会が勧告する被曝制限体系は、全身が均等に照射されても不均等に照射されても、リスクの限度は同じであるべきであるという原則に基づいている。この条件は、次の式が成り立つならば満たされる。

$$\sum_T w_T H_T \leq H_{wb} \quad (2.1)$$

ここで、

w_T : 全身が均等に照射されたとき、組織 (T) に生ずる確率的影響のリスクのリスク全体に対する比を表す荷重係数、

H_T : 組織 (T) が受ける線量当量、

H_{wb} : 全身が均等に照射された場合の確率的影響に関する線量当量限度*

である。職業上の被曝について委員会は、 H_{wb} に関して任意の1年について50 mSv (5 rem) を、また w_T に関して表 2.1 に示す値を勧告している。これら

表 2.1 確率的影響のリスクについて委員会
勧告した荷重係数

器官または組織	w_T
生殖腺	0.25
乳房	0.15
赤色骨髓	0.12
肺	0.12
甲状腺	0.03
骨表面	0.03
残りの組織	0.30

(前頁より) and Recommendations of the ICRP from Its 1980 Meeting)

* 訳注 ICRP Publication 26 などでは $H_{wb, L}$ と記されている。

の値は、年齢あるいは性別とは無関係に、任意の作業者の防護に適切なものとして勧告されている (ICRP Publication 26, 104—106項)。

骨表面について示した w_T の値は、骨内膜細胞と骨表面にある上皮に関する値である (第 7 章)。“残りの組織” についての w_T の値はさらに説明する必要がある。委員会が ICRP Publication 26 の 105 項で述べた理由によって、この残りの組織のうち大きい線量当量を受ける上位 5 つの器官あるいは組織に、それぞれ 0.06 という w_T の値を適用でき、そして、このグループのこの 5 つ以外のすべての組織の被曝を無視する。皮膚と水晶体 (ICRP Publication 26, 61—64 項) は、がんの誘発に対する感受性が非常に低いため、確率的影響を制限する上で“残りの組織” のうちの組織とは考えない。胃腸管が照射される場合には、胃、小腸、大腸上部および大腸下部を 4 つの別な器官と考える。

2.3 作業者による放射性物質の摂取に関する限度

委員会が確率的影響についての線量当量限度の根拠としているのは、放射線で誘発されるがんと遺伝的疾患のリスクの推定値であって、これらは、ある影響のリスクと線量当量とは直線関係にあるという仮定を用いて計算されている。それゆえ、組織における影響の大きさを決定するのは、その線量当量が与えられる時間に関係なく、任意の器官または組織について、その全体で平均した総線量当量である。放射性物質の体内への摂取の限度に関連して、委員会は、この総線量当量を求めるために積分すべき期間の問題を再度考察し、従来用いられていた 50 年という期間は職業についている期間として適切であると結論した。任意の放射性核種を体内に摂取した後の 50 年間にわたるその組織の総線量当量は、預託線量当量 H_{50} とよばれる。これは、その放射性物質を摂取した後標準人が 50 年の間生存し、その放射性核種の体外排出を促進する手段を講じなかったと仮定した場合に、標準人が受けると仮定される線量当量であることを強調しておく。

したがって、作業者の被曝についての委員会の基本限度を満たすためには、任意の1年間における放射性物質の摂取を次の2つの条件を満足するように制限しなければならない。すなわち、

$$\sum_T w_T H_{50,T} \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (2.2a)$$

および

$$H_{50,T} \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (2.2b)$$

ここで、

w_T : 表 2.1 に示す荷重係数,

$H_{50,T}$ (Sv): 問題とする1年間における放射性物質の摂取によりもたらされる、あらゆる源からの組織 (T) の預託線量当量の総和、である。

関係式 (2.2a) は放射性物質の摂取によって生ずる確率的影響を制限し、関係式 (2.2b) は放射性物質の摂取によって生ずる非確率的影響を制限する。(2.2b) に関しては、水晶体混濁が放射性物質の摂取を制限する因子となる事例は知られていないので、任意の組織についての非確率的影響に関する限度を 0.5 Sv (50 rem) とする。放射性希ガス中でサブマージョンにより体外照射される場合には、水晶体混濁が制限因子になることもあろう。そしてこのような場合の誘導空気中濃度の値は第3章および第8章で論じられている。

2.4 放射性物質の摂取の率についての制限

委員会は、任意の1年間における放射性物質の摂取を、勧告した限度に制限すれば十分であると考えるので、摂取の率についてそれ以上なんらの制限も勧告しない。ただし、*ICRP Publication 26* の 35, 115 および 116 の各項で議論したように、生殖能力のある女性および妊娠中の女性の職業上の被曝の場合を除く。

(20)

専門委員会 2 の報告

文 献

ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, 1977.

3. 体内線量を制御するための補助限度 および誘導限度

3.1 標準人

作業者の体内線量を制御するための基準値は、「標準人に関する ICRP 課題グループ」の報告書 (*ICRP Publication 23*) において規定されている，決められた解剖学的および生理学的性質をもつ成人について誘導されている(第4章，表 4.1 も参照)。吸入あるいは経口摂取後の放射性核種の血液への移動は，呼吸器系と胃腸管についての線量算定用モデルをそれぞれ取り扱っている第5章と第6章において論ずる。この報告書で考察されているいろいろな元素についての代謝データには，吸入および経口摂取後のそれら元素の呼吸器系および胃腸管における挙動と，体液に入った後のいろいろな身体の器官および組織の間の分配と残留とが含まれる。

3.2 預託線量当量 (H_{50})

ある特定の器官あるいは組織についての預託線量当量 (H_{50}) とは，ある放射性核種を摂取した後の50年間にその器官あるいは組織が受けることになる総線量当量である。放射性核種の単位摂取当たりの H_{50} の推定は第4章に述べられている方法で行われ，その数値は，多くの器官と組織について，個々の放射性核種の線量算定用データを記載している補遺に与えられている。これらの推定値は標準人の特性に基づいたものである。

3.3 年摂取限度 (ALI)

放射性核種の年摂取限度 (ALI) は，委員会が勧告した職業上の被曝に関する

る基本限度を満たすように意図された補助限度の1つであり、以下のように第2章の関係式(2.2a)および(2.2b)から誘導される。すなわち、ALIは次の不等式の両方を満足する年摂取量 I の最大値である。

$$I \sum_T \{w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake})\} \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (3.1a)$$

$$I (H_{50,T} \text{ per unit intake}) \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (3.1b)$$

ここで、

I (Bq): 経口摂取あるいは吸入のどちらかによる特定の放射性核種の年間の摂取量,

w_T : 組織(T)についての荷重係数, 第2章, 2.2節に示された値,

$(H_{50,T} \text{ per unit intake})$ (Sv Bq^{-1}): 特定の経路によって単位放射能の放射性核種を摂取したときの, 組織(T)の預託線量当量,

である。

3.3.1 年摂取限度の適用

(a) ALI の値は、経口摂取と吸入の両方による特定の放射性核種に対する被曝について推定されている。その特定の放射性核種を摂取したのちに体内で生成する娘核種はすべて考慮されている。摂取したものが放射性核種の混合物である場合、または被曝が経口摂取と吸入の両方で起こった場合、またはこの2つが複合した場合には、ALI の値はそのままでは適用できない。このような場合にはいつでも、すべての線源からの預託線量当量に関して第2章, 2.3節に述べられた諸式が満たされるように、任意の1年間の摂取を制限すべきであることを勧告する。放射性物質の混合物に対する被曝を制限するために勧告される方法についてのもっと完全な記述は、第9章に与えられる。

(b) ALI の値と単位摂取当たりの H_{50} の値は、職業上の被曝の制限に用

3. 体内線量を制御するための補助限度および誘導限度 (23)

いることを意図したものであり、標準人のパラメータをもとにしてい
る。しかしながら、ある特定の個人がALI を超えて摂取したと考えるべ
き理由があり、そしてその結果としての預託線量当量を推定する必要が
あると思われる場合には、その人の年齢およびわかっている生物学的パ
ラメータを、実行できる限り考慮に入れるべきであることを勧告する。

3.4 誘導空気中濃度 (DAC)

以前に委員会は、放射性核種に対する被曝の制限の指針として、空気中およ
び水中の最大許容濃度を勧告した。しかし、1/4 年あるいはそれ以上の長期間
にわたる被曝を制限することを意図したものであったにもかかわらず、これら
の値は、それより短い期間だけこれらの値を超過した場合でさえも、過剰被曝
を意味するものと誤って用いられることがしばしばあった。

委員会は、ある放射性核種の吸入に関する限度は該当する ALI であることを
を強調したい。任意の1年間の空気中の放射性核種の濃度は次のように制限さ
れる。

$$\int C(t)B(t)dt \leq \text{ALI} \quad \text{Bq} \quad (3.2)$$

ここで任意の時刻 t において、

$C(t)$ (Bq m^{-3}): 空気中の放射性核種の濃度、

$B(t)$ (単位時間当たりの m^3): 単位時間当たりに作業者が呼吸する空気
量、

であり、積分の範囲は1年間の労働時間である。 $B(t)$ の値は行う作業の種類
によって変わり、重労働の場合には、*ICRP Publication 28* に与えられてい
る“軽作業”についての標準値の2倍を超えることがある。

便宜のために、委員会は誘導空気中濃度 (DAC) の値を勧告する。任意の放
射性核種についての DAC は、標準人が“軽作業”の条件のもとで年間 2,000

時間(1週間40時間で50週)労働して呼吸したとき、結果として吸入の場合のALIになるような空気中の濃度($Bq\ m^{-3}$)であると定義する。すなわち、

$$DAC = ALI / (2,000 \times 60 \times 0.02) = ALI / 2.4 \times 10^3\ Bq\ m^{-3} \quad (3.3)$$

ここで、

0.02: “軽作業”の条件のもとで、標準人が作業中に1分間当たり呼吸する空気の体積(m^3) (*ICRP Publication 23*),
 である。DACに連続的に被曝し、平均して1分間当たり $0.02\ m^3$ 以上の率で空気を呼吸することはありそうもないことであるが、このような場合、1年間の労働時間内に吸入する放射能はALIを超えることになろう。これに関して強調すべきことは、ALIが優先する限度であって、誘導限度であるDACはいつも慎重に使用されるべきであるということである。

3.5 サブマージョンに関する誘導空気中濃度 DAC (Submersion)

放射性希ガスおよび元素状トリチウムに対する被曝を伴う作業については、これらのガス雲中の標準人のサブマージョンに関する誘導空気中濃度、すなわちDAC (Submersion)の値が与えられている。これらの値を誘導するために用いられる方法は以下に、また、より詳細には第8章に記述する。

3.5.1 元素状トリチウムに関するDAC (Submersion)

任意の1年間における空気中の元素状トリチウムに対する被曝は、次に示すように肺における確率的影響の考察により制限される。

$$w_{\text{Lung}} \dot{H}_{\text{Lung}} \int C(t) dt \leq 0.05\ Sv \quad (3.4)$$

ここで、

w_{Lung} : 第2章、表2.1において与えられた肺の荷重係数、

3. 体内線量を制御するための補助限度および誘導限度 (25)

\dot{H}_{Lung} ($\text{Sv m}^3 \text{Bq}^{-1} \text{h}^{-1}$): 単位濃度 (すなわち 1Bq m^{-3}) の空气中トリチウムに被曝したことによる肺の線量当量率,

$C(t)$ (Bq m^{-3}): 任意の時刻 t における元素状トリチウムの空气中濃度, 積分の範囲は1年間の労働時間,

である。便宜のため, 委員会は, 元素状トリチウムについての DAC の値を, 関係式 (3.4) を満足する $\int C(t) dt$ の最大値の $1/2,000$ であると勧告する。関係式 (3.4) の条件が満たされているならば, 元素状トリチウムの空气中濃度が DAC より高くても, 作業者が被曝することは許される。

3.5.2 放射性希ガスに関する DAC (Submersion)

放射性希ガスに対する任意の1年間の被曝は, 別の報告書の主題になっているラドンおよびトロンを除き, 身体の体外被曝を考慮して次のように制限される。

$$\sum_T w_T \dot{H}_T \int C(t) dt \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (3.5 a)$$

および

$$\dot{H}_T \int C(t) dt \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (3.5 b)$$

および

$$\dot{H}_{\text{Lungs}} \int C(t) dt \leq 0.3 \text{ Sv} \quad (3.5 c)^*$$

ここで,

$C(t)$ (Bq m^{-3}): 任意の時刻 t における希ガスの空气中濃度, 積分の範囲は1年間の労働時間,

w_T : 組織 (T) の荷重係数, 第2章, 2.2節に示した値,

* 訳注 16頁訳注参照。

\dot{H}_T (Sv m³ Bq⁻¹ h⁻¹): 単位濃度 (すなわち 1 Bq m⁻³) の空气中希ガスの中に標準人が存在する場合の, 任意の組織 (T) の線量当量率,
 \dot{H}_{Lens} : 単位濃度 (すなわち 1 Bq m⁻³) の空气中希ガスの中に標準人が存在する場合の, 眼の水晶体の線量当量率,
である。便宜のため, 委員会は, 放射性希ガスについての DAC の値を, 関係式 (3.5) を満足する $\int C(t) dt$ の最大値の 1/2,000 であると勧告する (2,000 は 1 年間の労働時間数である)。関係式 (3.5) で示される条件が満たされているならば, 空气中濃度が DAC の値よりも高い希ガスに作業者がさらされることは許される。

文 献

- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.

4. 預託線量当量 (H_{50}) と年摂取限度 (ALI)

4.1 緒 論

前章までに説明したように、ある放射性核種の体内摂取の年摂取限度(ALI)は、有意に照射されるすべての標的組織の預託線量当量 H_{50} の値によって決定される。体内に摂取される単位放射能当たりの H_{50} および ALI を計算するために用いられる方法を以下に述べる。

4.2 量と単位

4.2.1 放射能

国際放射線単位・測定委員会は、ある量の放射性核種の放射能 A とは dN を dt で割った値であると述べている (ICRU, 1971)。ここで dN は時間間隔 dt 内にこの量の中で生ずる自然核変換の数である。すなわち、

$$A = \frac{dN}{dt}$$

この報告書で用いられる放射能の SI 単位の特別な名称はベクレル (Bq)、すなわち、

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} (\approx 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci})$$

である。

4.2.2 線量当量

線量当量 H (ICRU, 1973) は、問題とする点における D 、 Q および N の積である。ここで D は吸収線量、 Q は線質係数、 N はその他のすべての修正係数

の積である。すなわち、

$$H = DQN$$

この報告書では、線量当量の SI 単位の特別な名称はシーベルト (Sv)、また吸収線量の SI 単位の特別な名称はグレイ (Gy)、すなわち、

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1} (\equiv 100 \text{ rad})$$

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1} (\equiv 100 \text{ rem})$$

である。修正係数 Q と N はディメンションをもたない。

4.3 預託線量当量 (H_{50})

放射線防護における計画の目的には、ある着目した生物学的影響のリスクは線量当量に正比例するものと仮定する。このような状況のもとでは、ある影響のリスクは、その線量当量を受けた期間には依存せず、リスクを考えるべき器官または組織の全体について平均した総線量当量によって決まる。放射性物質を取り扱う作業の計画のために、ICRP は線量当量を積分する適切な期間として、50年という就労期間を勧告している。任意の組織について、ある放射性核種を体内に摂取した後の50年間にわたる、その組織全体で平均した総線量当量は預託線量当量 H_{50} とよばれる。したがって、

$$H_{50} = \sum_i \frac{\int^M D_{50,t} Q_i N_i dm}{\int^M dm} \quad (4.1)$$

で与えられる。ここで、

M : 特定の器官または組織の質量、

そして、放射線のそれぞれの種類 i に関し、

$D_{50,t}$: 放射性核種を体内に摂取した後の50年という期間内の、その特定

の器官または組織の質量素片 dm における吸収線量の総和、

Q_i : 線質係数、

N_i : 線量率や分割照射に対する修正係数のような、 Q 以外のすべての修正係数の積、

である。線質係数 Q は水中の衝突阻止能の連続関数として定義されている (ICRP Publication 21)。したがって、 Q_i の値は電離粒子の飛跡にそって変化するであろうし、また、問題としている照射された組織中の質量 dm の個々の素片ごとに異なるであろう。しかしながら、放射性物質を摂取した後の組織の線量の推定には多くの不確かさがあることを考えると、委員会は、体内被曝に関しては、1つの与えられた種類の放射線に関する Q の値は一定と考えてよいこと、および次の3つの値のいずれかを採用することを勧告する (ICRP Publication 26, 20項)。

$Q = 1$ β 粒子, 電子, および, γ 線, X線ならびに制動放射線を含むすべての電磁放射線。

$Q = 10$ 陽子および自発核分裂で放出される核分裂中性子。

$Q = 20$ 重い反跳粒子, 核分裂片, および核変換から生ずる α 粒子。

委員会は、その他のすべての修正係数の積 N は第2章に規定した限度以下の線量当量の値に関しては1とすべきであると勧告する (ICRP Publication 26, 18項)。この問題については、この報告書ではこれ以上考察しない。

したがって、任意の種類放射線 i に関し一定な、上に記した Q の値を用いて、式 (4.1) で示す H_{50} は、

$$H_{50} = \sum_i Q_i \overline{D_{50,i}} \quad (4.2)$$

と簡単になる。ここで、

$\overline{D_{50,i}}$: 放射性核種を体内に摂取した後の50年間の総吸収線量で、放射線の種類 i ごとに特定の器官あるいは組織全体で平均したもの。特定の器官あるいは組織とは、第2章および個々の元素に関する代謝データ中で指定した器官および組織の1つをいう。

この報告書では、ある与えられた1つの線源器官中の放射能による預託線量当量を、多くの標的器官について推定している。放射線の種類*i*のそれぞれに関し、線源器官*S*中の放射性核種*j*に起因する標的器官*T*の $H_{50,i}$ は、次の2つの因子の積である。

(a) 摂取した後の50年間にわたる線源器官*S*中の放射性核種*j*の変換の総数。

(b) 線源器官*S*中の放射性核種*j*の変換ごとに放出される種類*i*の放射線による、標的器官*T*の*g*あたりに吸収されるエネルギーを、線質係数で適切に修正したもの。

すなわち、放射性核種*j*からの種類*i*の放射線それぞれに関し

$$\begin{aligned} H_{50}(T \leftarrow S)_i &= Q_i \overline{D_{50}}(T \leftarrow S)_i \\ &= U_S \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ SEE}(T \leftarrow S)_i \times 10^9 \text{ Sv} \end{aligned}$$

である。ここで、

U_S : 放射性核種*j*を摂取した後の50年間にわたる線源器官*S*中のその核種の変換の数、

1.6×10^{-13} : 1 MeV のジュール数、

$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ (MeV g^{-1} /変換): 線源器官*S*中の個々の変換により、標的器官*T*に吸収される、種類*i*の放射線に関する比実効エネルギーを、線質係数で適切に修正したもの(4.5 節参照)、

10^9 : g^{-1} から kg^{-1} への換算係数、

である。したがって、

$$H_{50}(T \leftarrow S)_i = 1.6 \times 10^{-10} U_S \text{ SEE}(T \leftarrow S)_i \text{ Sv} \quad (4.3)$$

また、放射性核種*j*から放出されるすべての種類の放射線に関しては

$$H_{50}(T \leftarrow S)_j = 1.6 \times 10^{-10} [U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (4.4)$$

となる。

その放射性核種が娘放射性核種 j' をもつ場合には

4. 預託線量当量 (H_{50}) と年摂取限度 (ALD) (31)

$$H_{50} (T \leftarrow S)_{j+j'} = 1.6 \times 10^{-10} [\{U_S \sum_i \text{SEE} (T \leftarrow S)_i\}_j + \{U_S \sum_i \text{SEE} (T \leftarrow S)_i\}_{j'}] \text{ Sv} \quad (4.5)$$

一般に、放射性核種の任意の混合物の摂取、すなわち、ある放射性核種とその娘核種および／または他の放射性核種の混合物の摂取に関して、線源器官 S 中の放射能による標的器官 T の H_{50} は

$$\sum_j H_{50} (T \leftarrow S)_j = 1.6 \times 10^{-10} \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE} (T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (4.6)$$

で与えられる。ここで、 j についての加算は線源器官に含まれているすべての放射性核種について行う。

最後に、標的器官 T はいくつかの異なった線源器官 S で生ずる放射線によって照射されることがある。このとき、標的器官 T の H_{50} の総和は

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE} (T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (4.7)$$

で与えられる。

4.4 細胞レベルの線量分布

この報告書で算出されている H_{50} の値は、第2章の2.2節に指定した標的組織の平均預託線量当量である。この標的組織は、胃腸管の各部分に関しては粘膜層であり（第6章参照）、骨に関しては骨表面から10 μm 以内にある細胞であり（第7章参照）、皮膚に関しては70 μm の深さにあるとされる表皮の基底層である（第8章参照）と考えている。他のすべての場合には、標的組織内の放射線感受性の高い細胞の位置はまだ決められていない。たとえば、放出される放射線の飛程が非常に短く、放射線感受性の高い微小領域の近くに集まる放射性核種の場合のように、実際生ずる影響が平均線量の考察から予想される影響と異なるような状況があることが認められている。放射性の粒子に関しては、委員会は、晩発性の確率的影響について、一定量の放射線の吸収は、これが均等に分

布しているときより一連の“ホット・スポット”によるときの方が、影響が通常小さいようであるという見解を表明した (*ICRP Publication 26*, 33項)。

^3H , ^{14}C , および ^{125}I のような放射性核種で標識された化合物で、DNA を合成している細胞の核に取り込まれるものについても考慮が必要である。そのような場合に、生物学的影響は放出された放射線による電離および励起によるほかに、原子の変換、すなわち電荷の突然の変化と反跳を伴うこの核種の化学的性質の変化から起こることもありうる。

原子の変換による影響に基づいて放射線防護における現行の勧告を修正することは正当でないと思われる。細胞の増殖不能に関しては、細胞核の吸収線量に基づいて比較をするならば、チミジンに組み込まれた ^3H は水中の ^3H と同様な効率をもつことがわかっている。 ^3H -チミジンは突然変異とがんを生成することが証明されているが、この化学形の ^3H による照射は外部からの放射線と識別できるほど効果的であることはないと考えられる。DNA 中のピリミジン環のいずれかの位置に ^3H と ^{14}C が組み込まれることによる突然変異誘発の可能性、および、 ^{125}I におけるオージェ効果の放射線損傷への寄与の可能性を調べるために、さらに研究が必要である (IAEA, 1968; Ertl ら, 1970; Feinendegen, 1975; Wartens ら, 1975 参照)。

放射線防護における実際の対策に関連して注目すべきことは、 ^3H または ^{14}C で標識したチミジンおよび [^{125}I] ヨードデオキシウリジンのような化合物は、作業中の事故によって生ずるかもしれない血流中への直接の侵入がとくに重要であるということである。そのときでさえも、血流中に入った後の DNA への取り込みは決して完全ではない ([^3H] チミジンに関して、Feinendegen と Cronkite, 1977 および Bond と Feinendegen, 1966 参照)。 [^{125}I] ヨードデオキシウリジンの場合には、90~95%が急速に分解され (Hughes ら, 1964)、生成したヨウ素は、その元素の線量算定用データ中に述べられているように、ヨウ化物として投与されたヨウ素と同様に振舞う。これらの化合物が経口摂取ま

4. 預託線量当量 (H_{50}) と年摂取限度 (ALI) (33)

たは吸入された場合には、異化作用、とくに胃腸管における異化作用によって、より簡単な形になるため、DNA にはもっとずっと少ない割合しか取り込まれないであろう (たとえば $[^3\text{H}]$ チミジンに関しては Lambert と Clifton, 1968 参照)。最後に、これらの化合物は、通常的环境ではあまり揮発性ではないので、作業中に吸入される確率は小さいことを記しておく。

この問題は引き続き検討されるであろう。さしあたり、線量の微視的分布が重要であると考えられる事例は、当該元素に関する代謝データの中でとくに言及してある。その他のすべての場合については、預託線量当量 $H_{50}(T \leftarrow S)$ は、ある線源器官中の放射能による、ある標的組織の平均線量当量を指す (ICRP Publication 26, 32項参照)。 $H_{50}(T \leftarrow S)$ を算定するために必要な量、すなわち、 $SEE(T \leftarrow S)$ と U_S の誘導を次に議論する。

4.5 比実効エネルギー (SEE)

この報告書の補遺に与えられている個々の放射性核種に関する線量算定用データの中に、多くの標的器官および線源器官について

$$SEE(T \leftarrow S) = \sum_i SEE(T \leftarrow S)_i$$

の値が与えられている。この値は、そこに示された放射性核種だけについてのものであって、娘放射性核種を生ずる場合、その寄与は含んでいないことを強調しておく。娘放射性核種に関する値は別に与えられている。任意の放射性核種 j について、標的器官 T と線源器官 S に関する $SEE(T \leftarrow S)_j$ は、

$$SEE(T \leftarrow S)_j = \sum_i \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV g}^{-1}/\text{変換} \quad (4.8)$$

と与えられる。ここで、加算は線源器官 S 中の放射性核種 j の変換当たりに生成するすべての放射線について行う。また、

Y_i : 放射性核種 j の変換当たり、種類 i の放射線の放出割合、

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

$AF(T \leftarrow S)_i$: 線源器官 S における放射線 i の放出当たり、標的器官 T に吸収されるエネルギーの割合。大部分の器官では、 α 粒子および電子のエネルギーは線源器官内で完全に吸収されるものと仮定する。顕著な例外として、無機質骨 (第7章参照) と胃腸管の内容物 (第6章参照) がある。光子のエネルギーのうち吸収される割合は、*ICRP Publication 23* に記載されている比吸収割合 (標的器官の g 当たり に吸収される割合) のデータを用いて推定される。核分裂中性子に関するこの吸収割合は、Dillman と Jones (1975), および Ford ら (1977) が与えたデータから得られている。

Q_i : 4.3 節で論じた、種類 i の放射線にあてはまる線質係数、

$M_T(g)$: 標的器官の質量、

である。

4.5.1 崩壊図式

線量算定用データの中には、崩壊のおもな形式のみが掲げられており、これらは、線量算定のための適切な根拠としてよりはむしろデータをチェックするための根拠として、ある程度の情報を提供するために与えられたものである。内部転換電子、オージェ電子およびX線、ならびに β 線および陽電子線の放出割合とエネルギーは、Dillman (1979) の方法によって推定されている。この計算に用いられた崩壊図式に関するデータは別に刊行されるはずである。

4.5.2 身体の器官の質量

この報告書に用いられた標的器官の質量は、*ICRP Publication 23* から引用したもので、表 4.1 に示す。卵巣と子宮を除いて、それらは 70kg の標準人

に適用する。

表 4.1 この報告書に用いられた標準人の器官
および組織の質量

線源器官	質量(g)	標的器官	質量(g)
卵 巢	11	卵 巢	11
精 巢	35	精 巢	35
筋 肉	28,000	筋 肉	28,000
赤 色 骨 髄	1,500	赤 色 骨 髄	1,500
肺	1,000	肺	1,000
甲 状 腺	20	甲 状 腺	20
胃 内 容 物	250	骨 表 面	120
小 腸 内 容 物	400	胃 壁	150
大腸上部内容物	220	小 腸 壁	640
大腸下部内容物	135	大 腸 上 部 壁	210
腎 臓	310	大 腸 下 部 壁	160
肝 臓	1,800	腎 臓	310
脾 臓	100	肝 臓	1,800
皮 質 骨	4,000	脾 臓	100
梁 骨	1,000	皮 膚	2,600
皮 膚	2,600	脾 臓	180
脾 臓	180	胸 腺	20
副 腎	14	子 宮	80
膀胱内容物	200	副 腎	14
全 身	70,000	膀 胱 壁	45

4.6 線源器官における50年間の変換の数

身体の任意の器官あるいは組織における放射性核種の任意の期間の変換の数とは、その器官あるいは組織内の放射性核種の放射能のその期間にわたる時間積分であり、この報告書では記号 H で表す。放射性核種を経口摂取あるいは吸入した後のある身体組織における取り込みと残留を記述する関数は非常に複雑なことがあり、したがって、計算が容易な、しかもこの報告書の目的には十分

な精度で線量の推定値が得られる、簡単なモデルによって、放射性核種の身体内での移動を表すのが便利である。たとえば骨におけるアルカリ土類放射性核種の場合（第7章参照）のような例外はあるが、ここで使用するモデルは、身体がいくつかの独立したコンパートメントからなると仮定している。任意の器官あるいは組織は、1つのコンパートメントからなることもあり、多くのコンパートメントからなることもある。任意のコンパートメントからの放射性核種の喪失の速度は、そのコンパートメントに存在する放射能に比例するものとする。したがって、任意の器官あるいは組織におけるある元素の残留は、通常、1個の指数項あるいはいくつかの指数項の和によって表される。その詳細は、個々の元素に関する代謝データ中に与えられている。例外はその代謝データ中に記されている。

呼吸器系および胃腸管系に関して用いたコンパートメントモデルは、それぞれ第5章および第6章に述べられている。放射性核種が吸入あるいは経口摂取された後に体液に移行する速度は、呼吸器系および胃腸管系のいろいろなコンパートメントについての速度定数とその放射性核種の放射性崩壊定数とによって決まる。身体のいろいろな器官および組織を表すコンパートメントへのその後の移行を、図4.1に模式的に示す。放射性核種が体液中に入った後、沈着する器官および組織に移行するのに要する有限の時間は、モデルでは通過コンパートメント **a** で表され、個々の元素に関する代謝データ中に特別の記載がない限り、半減期0.25日の一次反応の関係に従ってそこから除去されるものと仮定する。通過コンパートメント中で起こる変換は、質量70,000 gの全身中に均等に分布するものと仮定する。各沈着器官あるいは沈着組織は、1つあるいは2つ以上のコンパートメントから成るものと仮定し、放射性核種はこれらコンパートメントの各々からそれぞれの固有の速度で排泄経路に移行する。実際には体液への移動が起こることが認められているが、簡単にするために、排泄経路からも器官コンパートメントからも通過コンパートメントへのフィードバック

胃腸管系および呼吸器系から

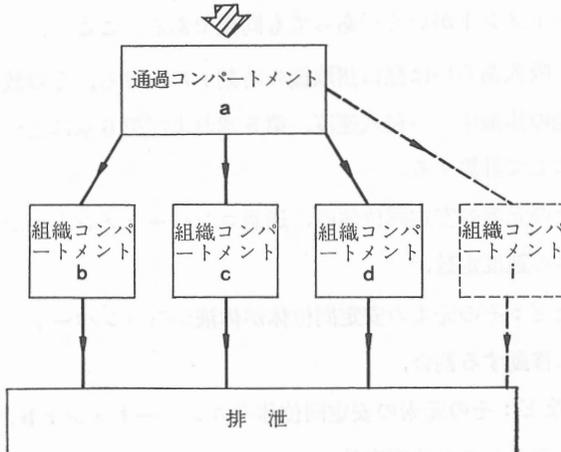


図 4.1 放射性核種の体内における挙動を記述するのに通常使用される数学的モデル：このモデルに対する例外は個々の元素に関する代謝データの中に記されている。

はないものと通常は仮定する。したがって、排泄経路にそった線量の推定は通常行わない。このように仮定するため、吸入あるいは経口摂取後の任意の時刻に通過コンパートメント **a** 中に存在する放射性核種の量を、その時刻に体液中に存在する放射性核種の量を推定するために使うことはできない、ということに注意すべきである。

上のモデルから、任意のコンパートメント中の時刻 t における放射能 $q(t)$ は次式を用いて計算される。

通過コンパートメント **a** においては、

$$\frac{d}{dt}q_a(t) = I(t) - \lambda_a q_a(t) - \lambda_R q_a(t) \quad (4.9a)$$

組織コンパートメント **b** においては、

$$\frac{d}{dt}q_b(t) = b\lambda_a q_a(t) - \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_b(t) \quad (4.9b)$$

以下コンパートメントがいくつあっても同様である。ここで、

$\dot{I}(t)$: 吸入あるいは経口摂取後の時刻 t における、その放射性核種の放射能の体液中への侵入速度、第 5 章および第 6 章に述べられているようにして計算する、

λ_a : その元素の安定同位体の、通過コンパートメント **a** からのクリアランスの速度定数、

b, c など: その元素の安定同位体が体液からコンパートメント **b**, **c** などに移動する割合、

λ_b, λ_c など: その元素の安定同位体のコンパートメント **b**, **c** などからのクリアランスの速度定数、

λ_R : その放射性核種の放射性崩壊定数、

である。 b, c など、および λ_b, λ_c などの値は、個々の元素に関する代謝データから得ることができる。

身体のあるコンパートメントにおける放射能を計算するこの一般的な方法に対して例外がある場合には、ヨウ素の例のように、その元素に関する代謝データ中に記されている。

4.6.1 娘放射性核種のビルドアップ

この報告書では、単位摂取当たりの H_{50} , ALI および DAC は、そこに示されている放射性核種のみでの摂取についてのものである。しかし、その放射性核種が娘放射性核種をもつ場合には、親核種から体内で生じた娘放射性核種のビルドアップによる預託線量当量も考慮に加えてある。これらの娘核種がその親核種と一緒に残留し、親核種と同じように振舞うのか、あるいは生成すると同時に固有の代謝挙動をとるのかを示す証拠は一般に少ししかない。たとえば、

体内の親核種 ^{226}Ra および ^{224}Ra から生成される希ガスのラドンおよびトロン
の挙動のように、実験的証拠が得られている場合には、それは代謝データ中に
与えられている。他のすべての場合には、体内（呼吸器系および胃腸管系を含
む）で生ずる娘核種およびこれに続くすべての子孫核種は、吸入あるいは経口
摂取された親放射核種と一緒に残留し、同様な代謝挙動をとるものと仮定す
る。しかし、これと相反する証拠が得られた場合には、その知見を用いて、問
題の放射性核種あるいは放射性核種の混合物についての修正された ALI を計
算すべきであると勧告する（第9章参照）。

この仮定を用いて、親核種を摂取した後の任意の時刻 t における通過コンパ
ートメント \mathbf{a} 、または任意の器官コンパートメントあるいは組織コンパートメ
ント \mathbf{b} 中の娘放射性核種の放射能 $q'(t)$ は、以下の式を使って得ることができ
る。

$$-\frac{d}{dt} q'_a(t) = \dot{I}'(t) + \lambda'_{Rq} q_a(t) - \lambda_a q'_a(t) - \lambda'_{Rq'} q'_a(t) \quad (4.10a)$$

ここで、

$\dot{I}'(t)$: 時刻 t における娘放射性核種の放射能の通過コンパートメントへ
の侵入速度。この放射能は、第5章および第6章に述べるように、呼
吸器系あるいは胃腸管の中での親放射性核種の放射性崩壊の結果生じ
たものである。

λ'_{R} : 娘放射性核種の放射性崩壊定数、

$q_a(t)$: 時刻 t における通過コンパートメント中の親放射性核種の放射
能。式 (4.9a) によって決まる。

λ_a : 体内で生じた娘放射性核種の通過コンパートメントからの生物学的
クリアランス速度定数（親核種の値と同じと仮定する）、

$q'_a(t)$: 時刻 t における通過コンパートメント中の娘放射性核種の放射
能、

である。また、

$$\frac{d}{dt} q'_b(t) = b\lambda_a q'_a(t) + \lambda'_R q_b(t) - \lambda_b q'_b(t) - \lambda'_R q_b'(t) \quad (4.10 b)$$

ここで、

$q'_b(t)$: 時刻 t における組織コンパートメント b 中の娘核種の放射能、

b : 通過コンパートメントからコンパートメント b へ移行する娘核種の割合。この割合は親放射性核種の安定同位体と同じであると仮定する。

λ_a と λ_b : それぞれ、通過コンパートメントおよびコンパートメント b からの娘放射性核種の生物学的クリアランス速度定数（親放射性核種の値と同じと仮定する）、

λ'_R : 娘放射性核種の放射性崩壊定数、

$q'_a(t)$: 時刻 t における通過コンパートメント中の娘核種の放射能、

$q_b(t)$: 時刻 t における組織コンパートメント b 中の親放射性核種の放射能、

である。

同様の方法で、親と娘の放射性核種の連鎖の放射能を記述する一連の式を導くことができ、ここで各娘核種の放射能は連鎖の直前の先行核種の放射能によって決定される。すべての放射性子孫核種の代謝挙動は、体内に取り込まれた祖先の放射性核種の挙動と同じであると仮定する。これらの式は、呼吸器系および胃腸管について第5章および第6章に与えられている式とともに、体内の任意の線源器官における変換の数 U_S の値を計算するためにこの報告書で通常用いられているモデルを完全に規定している。計算の詳細はここではふれないので、読者はこれらの量を推定するために使われる諸方法を簡潔に論じた付録を参照されたい。どの放射性核種の線量算定用データにも、その放射性核種の U_S の値と、単位放射能の親核種を経口摂取あるいは吸入した後の50年間に体内でビルドアップする娘放射性核種についての U_S' , U_S'' 等の値が与えられて

いる。

4.7 年摂取限度 (ALI)

各放射性核種 j についての線量算定用データには、経口摂取あるいは吸入された単位放射能当たりの H_{50} の値が、有意な程度に照射されるいくつかの器官および組織について与えられている。また、単位摂取当たりの H_{50} に第2章で与えられた荷重係数 w_T を掛けることによって、放射線誘発性のがんあるいは遺伝的疾患に対する個々の器官あるいは組織の放射線感受性について荷重した値も与えられている。いろいろな化学形の放射性核種を吸入した場合の ALI と経口摂取した場合の ALI を、第3章に述べたようにして計算した値も与えられている。すなわち、 ALI_j は次の2つの不等式をともに満足する I_j の最大値である。確率的影響に関して、

$$I_j \sum_T w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake}) \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (4.11 \text{ a})$$

また、非確率的影響に関して

$$I_j (H_{50,T} \text{ per unit intake}) \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (4.11 \text{ b})$$

関係式 (4.11 a) において、加算は第2章、表 2.1 に示したすべての組織と、残りの組織のうちで大きい預託線量当量を受ける上位5つの組織について行う。ある組織に対する単位摂取当たりの H_{50} の荷重値が、任意の組織における単位摂取当たりの H_{50} の荷重値の最大値の10%より大きい場合、すなわち、

$$w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake}) \geq 0.1 [w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake})]_{\max} \quad (4.12)$$

である場合に、その組織 T は有意な程度に照射されたとみなし、任意の放射性核種について、関係式 (4.12) を満足する標的組織のみが表に記載される。

SEE ($T \leftarrow S$) の値は、不等式 (4.12) を満足する標的組織の預託線量当量に1%以上寄与するすべての線源器官について与えられている。

注目すべきことであるが、骨表面、甲状腺、あるいは残りの 5 つの組織のいずれか 1 つにおいて非確率的影響の起こる可能性があるために関係式 (4.11 b) が優先するということがない限り、体内への放射性物質の摂取は関係式 (4.11 a) によって制限される。こうなる可能性は、上述の組織には小さい荷重係数 ($w_r \leq 0.06$) が適用されるためである。ALI が非確率的影響の考察によって決まる場合には、当該器官あるいは組織の名を ALI の値の下に記す。そのような場合にはすべて、確率的影響を制限するための委員会勧告を満たす最大の年摂取量 (関係式 (4.11 a)) を、ALI の値と組織あるいは器官名との間に括弧に入れて示す。この値は、いくつかの源からの被曝の制限を考えるとときに有用であり(第 9 章参照)、また、委員会の線量制限体系 (*ICRP Publication 26*, E 章) を適用して、ある作業者が確率的影響に関する線量当量限度のうちの一部しか受けないようにする必要のあるときに役立つ。経口摂取の場合の ALI の値は、経口摂取されたその元素の化合物が血中に吸収される割合、すなわち f_1 の値ごとに与えられている (第 6 章参照)。吸入による ALI の値は、当該元素のいろいろな化学形の化合物にあてはまる吸入のクラス D, W あるいは Y 別 (第 5 章参照) に与えられている。

4.8 誘導空気中濃度 (DAC)

第 3 章に述べたように、ある放射性核種の誘導空気中濃度は、その核種の吸入の場合の ALI と次のような関係にある。

$$\text{DAC}_j = \text{ALI}_j / 2.4 \times 10^3 \text{ Bq m}^{-3} \quad (4.13)$$

吸入の場合の DAC と ALI について与えられているすべての値は、空気力学的放射能中央径 (AMAD) が $1 \mu\text{m}$ のエアロゾルについて計算されている。しかし、呼吸器系の鼻道 (N-P)、気管—気管支 (T-B) および肺泡領域 (P) への沈着に起因する預託線量当量の百分率の値が線量算定用データ中に与えられているので、 $1 \mu\text{m}$ とは異なった AMAD のエアロゾルに対しては適切

な修正が可能である (第 5 章参照)。

4.9 線量算定用データに示されている数値

この報告書の110—205頁に集められている ALI および DAC の値は有効数字1個で示されている。体内における放射性核種の代謝と影響に関する不確かさを考慮すると、これ以上の精度を要求することはほとんど意味がない。補遺に集められている SEE, U_s および単位摂取当たりの H_{60} の値は、掛け算を繰り返すことによる誤差を小さくするために、2個の有効数字で与えられている。

U_s , H_{60} , ALI および DAC の値はすべて、名前をあげてある単独の放射性核種が特定した侵入経路で体内に摂取された場合に関するものであることを強調しておく。これらの値には、親核種を摂取した結果、体内で生じたどの娘放射性核種の放射能に対しても適切な考慮が払われている。親放射性核種と娘放射性核種の両方を摂取する場合には、第 9 章で述べられている混合物に適用される一般的方法によって取り扱うべきである。

作業者が、放射性核種を経口摂取し、かつ吸入する場合、また体外放射線にも被曝する場合には、ALI の値はそのままでは適用されない (第 9 章)。

代謝データおよび線量算定用データ中のすべての情報は標準人 (ICRP Publication 23) についてのものであり、放射性物質に対する職業上の被曝を計画するために用いることを意図している。これらのデータは、特定の個人に対しては慎重に使用しなければならない。また、集団中の比較的若い人々に対しては正しくないであろう (第 9 章参照)。

文 献

- Bond, V.P. and Feinendegen, L.E. (1966). Intranuclear ^3H thymidine; dosimetric, radiobiological and radiation protection aspects. *Health Phys.*, **12**, 1007-1020.

- Dillman, L.T. and Jones, T.D. (1975). Internal dosimetry of spontaneously fissioning nuclides. *Health Phys.*, **29**, 111-123.
- Dillman, L.T. (1979). EDISTR—A computer program to obtain a nuclear data base for radiation dosimetry. ORNL/TM-6689.
- Ertl, H.H., Feinendegen, L.E. and Heiniger, H.J. (1970). Iodine-125, a tracer in cell biology: physical properties and biological aspects. *Phys. Med. Biol.*, **15**, 447-456.
- Feinendegen, L.E. (1975). Biological damage from the Auger effect, possible benefits. *Radiat. Environ. Biophys.*, **12**, 85-100.
- Feinendegen, L.E. and Cronkite, E.P. (1977). Effects of microdistribution of radionuclides on recommended limits in radiation protection, a model. *Curr. Top. Radiat. Res. Q.*, **12**, 83-99.
- Ford, M.R., Snyder, W.S., Dillman, L.T. and Watson, S.B. (1977). Maximum permissible concentration (MPC) values for spontaneously fissioning radionuclides. *Health Phys.*, **33**, 35-43.
- Hughes, W.L., Commerford, S.L., Gitlin, D., Krueger, R.C., Schultze, B., Shah, V. and Reilly, P. (1964). Deoxyribonucleic acid metabolism *in vivo*: I. Cell proliferation and death as measured by incorporation and elimination of iododeoxyuridine. *Fed. Proc.*, **23**, 640-648.
- International Atomic Energy Agency, *Biological Effects of Transmutation and Decay of Incorporated Radioisotopes*. IAEA, Vienna, 1968, pp. 233-241.
- ICRP Publication 21, *Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources*. Pergamon Press, Oxford, 1973.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- ICRU Report 19, *Radiation Quantities and Units*. ICRU, Washington, 1971.
- ICRU Supplement to Report 19, *Dose Equivalent*. ICRU, Washington, 1973.
- Lambert, B.E. and Clifton, R.J. (1968). Radiation doses resulting from the ingestion of tritiated thymidine by the rat. *Health Phys.*, **15**, 3-9.
- Warters, R.L., Hofer, K.G., Harris, C.R. and Smith, J.M. (1977). Radionuclide toxicity in cultured mammalian cells: elucidation of the primary site of radiation damage. *Curr. Top. Radiat. Res. Q.*, **12**, 389-407.

5. 呼吸器系に関する線量算定用モデル

5.1 緒 論

この章で記述する線量算定用モデルは放射性エアロゾルの吸入に関するものである。ガスおよび自由イオンの沈着という特殊な場合は別に考察することにする。いくつかの特殊な場合は、個々の元素の代謝データの中で述べ、第8章でも言及する。

放射性エアロゾルを吸入した場合、呼吸器系の各部分は照射を受ける。身体他の器官および組織も、肺から出る放射線により、また吸入された物質が呼吸器系から身体組織へ移行する結果、照射されることになる。

放射性エアロゾルを吸入した後に呼吸器系のいろいろな領域が受ける線量は、吸入された物質の粒度分布に依存して大きく異なることが認められる。この報告書では、鼻咽頭領域の受ける線量は、それ以外の領域が受ける線量と比較して大部分の粒子サイズについて通常は小さいため、これを無視した。肺胞領域から除去された不溶性粒子が一部の肺リンパ節に与える線量は、肺組織が受ける線量より何倍も大きいことがあろう。しかしながら、肺リンパ節がその一部にすぎないリンパ組織全体に起こる可能性のある影響の考察と、プルトニウム粒子を吸入した人の剖検データの考察とから、委員会は、吸入された不溶性の放射性粒子に関しては、肺の照射の方がリンパ組織の照射よりもおそらく制限因子であるらしいと結論した (*ICRP Publication 26*, 52項と53項)。吸入された粒子による肺の細胞に対する線量の分布も非常に不均一であろう。悪性腫瘍の誘発に関して委員会は、肺の中の放射性粒子の危険性は、肺に均等に分布した同量の物質の危険性よりも小さいようであると考える (*ICRP Publi-*

ation 26, 49項と50項)。ここに記述するモデルは、原則的には呼吸器系内のいろいろな領域における線量当量を推定するのに用いることができ、このことは研究には役に立つであろうけれども、たとえばリスクを考えるべき細胞の正確な位置の不確かさといった他の不確かさがあるために、このような推定値はALIの値をきめる十分な根拠となるとは考えられない。それゆえ、委員会は、放射線防護の目的には、成人については、気管—気管支領域、肺泡領域および肺リンパ節を質量が1,000 gの1つの複合器官と考え、(ICRP Publication 26, 54項)、表2.1で与えた肺に関する荷重係数をこれに対して適用すれば十分であろうと考える。

前章までに説明したように、放射性物質に対する作業者の被曝は、身体組織の預託線量当量 H_{60} の考察によって制限される。 H_{60} を計算するのに用いる方法は第4章に記述した。そこでは、任意の標的器官についての H_{60} は、放射性核種を摂取した後の50年間にわたる線源器官内での変換の総数 U_S 、および、線源器官内で生成する各種の放射線が標的器官内で吸収される比実効エネルギー $SEE(T \leftarrow S)$ に依存することを説明した。呼吸器系の各部分についての U_S と $SEE(T \leftarrow S)$ の計算法、および、上に定義した複合肺組織に関する H_{60} の計算法を以下に述べる。

5.2 沈着および残留のモデル

呼吸器系における物質の分布と残留の推定値はICRPの「肺動態課題グループ」の報告書(1966)に提案されたモデルを基本にしている。このモデルは粒子サイズを考慮にいれ、またエアロゾルの化学形も反映している残留の3つのクラスを定義している。さらに、このモデルは肺からのいろいろな除去経路についての情報を与えている。この課題グループの報告書の刊行以来、この課題グループおよび専門委員会2においてさらに検討された結果、沈着とクリアランスに関するパラメータの値には多くの変更があったけれども、この報告書の

モデルは実質的に課題グループのモデルである (ICRP Publication 19 も参照)。

呼吸器系ははっきりした3つの領域、すなわち、鼻道(N-P)、気管および気管支(T-B)ならびに肺実質(P)に区分されている。沈着はエアロゾル分布の空気力学的特性によって変化すると仮定し、その沈着は、吸入された物質のうちN-P、T-B およびP領域それぞれに初めに沈着する割合を表す3つのパラメータ、 D_{N-P} 、 D_{T-B} および D_P で記述する。エアロゾルの直径が対数正規分布を示す典型的と思われる場合には、沈着のパターンはエアロゾルの空気力学的放射能中央径 (AMAD) と関係づけることができる (図 5.1)。この報告書

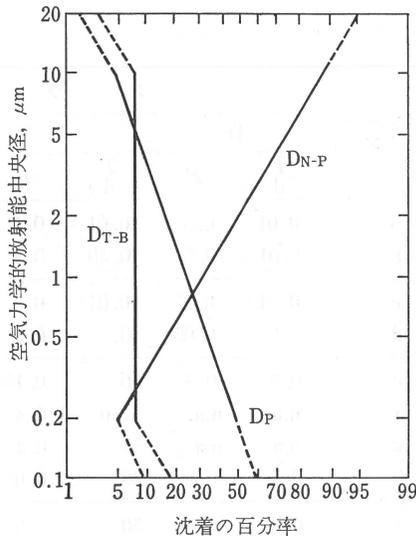
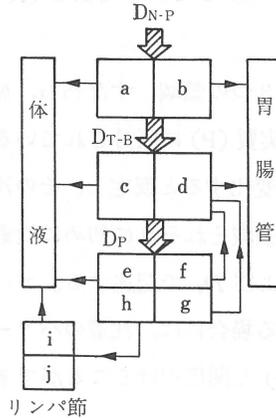


図 5.1 呼吸器系における塵埃の沈着

N-P 領域、T-B 領域およびP領域に沈着するエアロゾルの放射能百分率または質量百分率を、エアロゾル分布の空気力学的放射能中央径 (AMAD) と関係づけて表している。このモデルは、AMAD が $0.2 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ との間で、幾何学的標準偏差が4.5未満のエアロゾル分布について使用することを意図している。この範囲外の粒子に対する沈着の暫定的推定値は破線によって与えられている。AMAD が $20 \mu\text{m}$ を超える一般的なでない分布については、N-P 領域に全量が沈着すると仮定できる。このモデルは AMAD が $0.1 \mu\text{m}$ 未満のエアロゾルには適用されない。



領域	コンパートメント	クラス					
		D		W		Y	
		T_1 (d)	F_1	T_1 (d)	F_1	T_1 (d)	F_1
N-P ($D_{N-P}=0.30$)	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99
T-B ($D_{T-B}=0.08$)	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01
	d	0.2	0.05	0.2	0.5	0.2	0.99
P ($D_P=0.25$)	e	0.5	0.8	50	0.15	500	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.4	1.0	0.4
	g	n.a.	n.a.	50	0.4	500	0.4
	h	0.5	0.2	50	0.05	500	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	∞	0.1

図 5.2 呼吸器系からのクリアランスを記述するために用いられる数学的モデル

除去の半減期 T_1 から T_1 の値と各領域内のコンパートメント間の割合 F_1 から F_1 の値は、残留している物質の3つのクラス別に、この図の表の部分に与えられている。 D_{N-P} 、 D_{T-B} および D_P として与えられている値(最左欄)は、AMADが $1\mu\text{m}$ のエアロゾルの各領域への沈着割合である。上の模式図は、4つの呼吸器領域 N-P、T-B、P および L の中のもの a から i までのコンパートメントからのいろいろなクリアランス経路を表す。n.a. は適用されないという意味を表す。

では預託線量当量の計算は AMAD が $1 \mu\text{m}$ のエアロゾルについて行われている。他の AMAD の場合の推定値は、5.5 節で述べるように図 5.1 のデータを用いて得ることができる。

吸入された放射性物質の肺からのクリアランスを表すために、肺胞領域における残留に関連して物質を D, W または Y に分類する。この分類は次の半減期の範囲にあてはまる。すなわち、Dは10日未満、Wは10日から100日、Yは100日を超えるものである。上に述べた3つの領域、N—P, T—B および Pは、それぞれ図5.2に示すように2つまたは4つのコンパートメントに分割される。これらのコンパートメントのおおのは、クリアランスの半減期が T 日であって、その速度でこの領域から出ていく割合が F であるような特定のクリアランス経路に対応している。すなわち、コンパートメント a, c および e は吸収過程と対応し、一方、b, d, f および g は、物質を胃腸管へ移行させる、繊毛粘液輸送を含む粒子輸送過程と対応している。肺リンパ系(L)も肺から塵埃を除去するのに役立つ。これは肺の P 領域内のコンパートメント h と関連しており、この h から物質は肺リンパ節中のコンパートメント i と j に移行する。コンパートメント i 中の物質は体液に移行するが、コンパートメント j 中の物質はそこに永久に留まるものと仮定する。このコンパートメント j はクラス Y のエアロゾルについてのみ適用されるものとする。そして、クラス D とクラス W のエアロゾルについては、コンパートメント h からコンパートメント j に入る割合 (F_j) はゼロに等しいとおく。上に述べた各コンパートメントからの物質のクリアランスはクリアランス速度がそのコンパートメントに存在する放射能に比例するという関係によって支配されると仮定するので、各コンパートメントはクリアランスの速度定数 λ と関連し、クリアランスの半減期は $T = 0.693 / (86,400\lambda)$ である。それゆえ、吸入された物質の肺からのクリアランスは、互いに関連した一組の一次微分方程式で以下のように表される。

$$\frac{d}{dt}q_a(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_a - \lambda_a q_a(t) - \lambda_R q_a(t) \quad (5.1 a)$$

$$\frac{d}{dt}q_b(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_b - \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_b(t) \quad (5.1 b)$$

$$\frac{d}{dt}q_c(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{T-B} \cdot F_c - \lambda_c q_c(t) - \lambda_R q_c(t) \quad (5.1 c)$$

$$\frac{d}{dt}q_d(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{T-B} \cdot F_d + \lambda_r q_r(t) + \lambda_g q_g(t) - \lambda_a q_d(t) - \lambda_R q_d(t) \quad (5.1 d)$$

$$\frac{d}{dt}q_e(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_e - \lambda_e q_e(t) - \lambda_R q_e(t) \quad (5.1 e)$$

$$\frac{d}{dt}q_f(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_f - \lambda_f q_f(t) - \lambda_R q_f(t) \quad (5.1 f)$$

$$\frac{d}{dt}q_g(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_g - \lambda_g q_g(t) - \lambda_R q_g(t) \quad (5.1 g)$$

$$\frac{d}{dt}q_h(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_h - \lambda_h q_h(t) - \lambda_R q_h(t) \quad (5.1 h)$$

$$\frac{d}{dt}q_i(t) = F_i \lambda_h q_h(t) - \lambda_i q_i(t) - \lambda_R q_i(t) \quad (5.1 i)$$

$$\frac{d}{dt}q_j(t) = F_j \lambda_h q_h(t) - \lambda_R q_j(t) \quad (5.1 j)$$

ここで、

$q_a(t)$, $q_b(t)$ など: 時刻 t においてコンパートメント a, b, などの中に
ある, 吸入されたある放射性核種の放射能,

$\dot{I}(t)$: この放射性核種の放射能の吸入速度,

λ_a から λ_i : コンパートメント a からコンパートメント i までの生物学
的クリアランスの速度定数,

λ_R : この放射性核種の放射性崩壊定数,

F_a から F_j まで: 肺の各領域に入った物質のうち, その領域内の各コン
パートメントにおける割合,

である。

F_a から F_j までの値は吸入のクラス D, W および Y 別に図 5.2 に与えられている。 T_a から T_i までの値も同様に、これらのクラス別に与えられており、 λ_a から λ_i までの値は T_a から T_i までの値から $\lambda = 0.693 / (86,400T)$ の関係式を用いて得られる。ここで、 λ の単位は s^{-1} 、 T の単位は日、そして 86,400 は 1 日の秒数である。ある放射性核種の異なった化学形のものについての D, W, Y のクラス分けは、個々の元素に関する代謝データの中に与えられている。第 4 章で述べたように、娘放射性核種は吸入された親放射性核種とともに残留し、親核種と同様の代謝挙動をとるものと仮定する。実際には、肺の中で生成される娘放射性核種の挙動についてはデータはあまりない。しかしながら少くとも、放射性粒子の内部で生成された娘核種はその粒子内に留まると仮定するのはもっともらしい。したがって、肺の異なるコンパートメント内で生成される娘放射性核種のビルドアップおよびクリアランスは、式 (5.1) と同様な一連の一次微分方程式によって支配される。任意のコンパートメント中の時刻 t における娘放射性核種の放射能を $q'(t)$ とし、 $q(t)$ をその直前の先行核種の放射能とすれば、

$$\frac{d}{dt} q'_a(t) = \lambda'_{Rq_a}(t) - \lambda_a q'_a(t) - \lambda'_{Rq'_a}(t) \quad (5.2a)$$

$$\frac{d}{dt} q'_b(t) = \lambda'_{Rq_b}(t) - \lambda_b q'_b(t) - \lambda'_{Rq'_b}(t) \quad (5.2b)$$

$$\frac{d}{dt} q'_c(t) = \lambda'_{Rq_c}(t) - \lambda_c q'_c(t) - \lambda'_{Rq'_c}(t) \quad (5.2c)$$

$$\frac{d}{dt} q'_d(t) = \lambda'_{Rq_d}(t) + \lambda_r q'_r(t) + \lambda_g q'_g(t) - \lambda_d q'_d(t) - \lambda'_{Rq'_d}(t) \quad (5.2d)$$

$$\frac{d}{dt} q'_e(t) = \lambda'_{Rq_e}(t) - \lambda_e q'_e(t) - \lambda'_{Rq'_e}(t) \quad (5.2e)$$

$$\frac{d}{dt} q'_f(t) = \lambda'_{Rq_f}(t) - \lambda_f q'_f(t) - \lambda'_{Rq'_f}(t) \quad (5.2f)$$

$$\frac{d}{dt}q'_g(t) = \lambda'_{Rg}q_g(t) - \lambda_gq'_g(t) - \lambda'_{Rg}q'_g(t) \quad (5.2g)$$

$$\frac{d}{dt}q'_h(t) = \lambda'_{Rh}q_h(t) - \lambda_hq'_h(t) - \lambda'_{Rh}q'_h(t) \quad (5.2h)$$

$$\frac{d}{dt}q'_i(t) = \lambda'_{Ri}q_i(t) + F_i\lambda_hq'_h(t) - \lambda_iq'_i(t) - \lambda'_{Ri}q'_i(t) \quad (5.2i)$$

$$\frac{d}{dt}q'_j(t) = \lambda'_{Rj}q_j(t) + F_j\lambda_hq'_h(t) - \lambda'_{Rj}q'_j(t) \quad (5.2j)$$

ここで、

λ'_{R} : 娘放射性核種の放射性崩壊定数、

F_1 から F_j まで: 吸入された親放射性核種のクラスにあてはまるそれぞれの値、

である。

各娘核種の放射能は連鎖の中の直前の核種によって決定されるので、同様にして、親放射性核種と娘核種との連鎖の放射能を表す一連の方程式を導くことができる。すべての子孫放射性核種の代謝挙動は、吸入された祖先の放射性核種の挙動と同じと仮定する。

5.3 肺から体液あるいは胃腸管への放射性核種の直接の移動

図5.2と上に掲げた式(5.1aから5.1j, および5.2aから5.2j)とから、ある放射性核種が肺から直接に体液に移動する速度($BF(t)$)は、その放射性核種が吸入されたものであっても肺の中で生成したものであっても、次式で与えられることが容易にわかる。

$$BF(t) = \lambda_a q_a(t) + \lambda_c q_c(t) + \lambda_o q_o(t) + \lambda_i q_i(t) \quad (5.3)$$

同様にして、ある放射性核種の放射能が肺から胃腸管に移動する速度($G(t)$)は、その放射性核種が吸入されたものであっても肺の中で生成したものであっても、次式で与えられる。

$$G(t) = \lambda_b q_b(t) + \lambda_a q_a(t) \quad (5.4)$$

親核種が吸入され、その娘放射性核種が体液あるいは胃腸管に達したのちのその娘核種の代謝は、吸入された親核種の代謝モデルに支配されると仮定するのが通例である（第4章参照）。

上に掲げた式は、この報告書で用いた肺モデルを完全に規定しており、この報告書の補遺に集められたいろいろな放射性核種に関する線量算定用データに与えられている、肺および他の器官中での変換の数(U)を計算するのに使われた。これらの計算の詳細はここでは述べない。これらの値を推定するのに用いることのできる方法の簡単な議論については、読者は付録を参照されたい。

5.4 肺における預託線量当量 H_{50} の計算

第4章に記したように、いくつかの放射性核種の任意の混合物が入っている多くの線源器官 S からの、標的器官 T についての $H_{50,T}$ は次式で与えられる。

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (5.5)$$

ここで

U_S : 放射性核種 j を摂取した後の50年間にわたる線源器官 S の中での変換の数,

$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ ($\text{MeVg}^{-1}/\text{変換}$): 線源器官 S の中で放射される種類 i の放射線が、標的器官 T の中で吸収される比実効エネルギー,

である。

呼吸器系のいろいろな区分について U_S を計算する方法は、親放射性核種およびその娘放射性核種の両者について5.2節に記述した。放射性核種 j から放出される種類 i の任意の放射線について、 $\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ は次式で与えられる。

$$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeVg}^{-1}/\text{変換} \quad (5.6)$$

ここで、

Y_j : 放射性核種 j の変換当たりの、種類 i の放射線の放出割合、

E_i (MeV): 放射線 i の平均エネルギーまたは単一のエネルギー、

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

Q_i : 第4章で論じた放射線 i にはてはまる線質係数、

M_T (g): 標的器官の質量、

である。

5.1節で説明したように、N-P 領域における線量は無視し、式(5.5)中の標的組織 T は T-B 領域、P 領域および L 領域からなる総質量 1,000 g の肺とする。 $H_{50,T}$ は2つの成分をもつ——その1つは肺の中(つまり T-B, P および L から成る標的組織 T の中)の放射性物質による預託線量当量であり、他の1つは身体の他の器官および組織 S の中で発生する光子による預託線量当量である。すなわち、

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \left[\sum_j \{ U_T \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow T)_i \}_j \right. \\ \left. + \sum_S \sum_j \{ U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i \}_j \right] \text{ Sv} \quad (5.7)^*$$

それぞれの場合に、加算は親核種の吸入後ビルドアップする娘放射性核種を含めたすべての放射性核種について行う。 $U_T (= U_{T-B} + U_P + U_L)$ の値と娘核種についての対応する値とは、親放射性核種 j の線量算定用データ中に与えられている。もし、線量に有意の寄与をするのであれば、 U_S の値と娘核種についてのそれに対応する値も、放射性核種 j の線量算定用データ中に与えられている。

任意の放射性核種 j に関する SEE の値は式(5.6)から導かれる。式の中の M_T は 1,000 g であり、 $AF(T \leftarrow S)_i$ は次に示す値をとる。

(a) $\text{SEE}(T \leftarrow T)_i$, すなわち肺自身の中にある放射性物質については、光

* 訳注 原文では式中の U_T, U_S は U_T', U_S' となっているが、他の式、記号との統一をはかるため、 U_T, U_S とした。次の文章中の U_{T-B}, U_P および U_L も同様である。

子と中性子とを除くすべての放射線について $AF(T \leftarrow S)_i = 1$ 。光子と核分裂中性子についての $AF(T \leftarrow T)_i / M_T$ の値、すなわち比吸収割合は、*ICRP Publication 23* に与えられているか、または Dillman と Jones (1975) のデータおよび Ford ら (1977) のデータから導かれる。

(b) $SEE(T \leftarrow S)_i$ 、すなわち呼吸器系以外の器官および組織 S 中にある放射性物質については、光子と中性子を除くすべての放射線について $AF(T \leftarrow S)_i = 0$ 。光子と核分裂中性子についての $AF(T \leftarrow S)_i / M_T$ の値、すなわち比吸収割合は、*ICRP Publication 23* に与えられているか、または Dillman と Jones (1975) のデータおよび Ford ら (1977) のデータから導かれる。

5.5 粒子サイズの補正

この報告書の補遺に集められている線量算定用データ中に示された、個々の放射性核種についての単位摂取当たりの H_{60} 、年摂取限度 (ALI)、および誘導空気中濃度 (DAC) の値は、AMAD が $1 \mu\text{m}$ の放射性核種についての値である。 H_{60} の値とともに、N-P、T-B および P それぞれの領域への沈着の結果生ずる、問題とする組織における預託線量当量の割合、 f_{N-P} 、 f_{T-B} および f_P の値が、括弧に入れて示されている。AMAD が $1 \mu\text{m}$ でないエアロゾルについての H_{60} ($H_{60}(\text{AMAD})$) は、したがって次式で推定されよう。

$$\begin{aligned} \frac{H_{60}(\text{AMAD})}{H_{60}(1 \mu\text{m})} &= f_{N-P} \frac{D_{N-P}(\text{AMAD})}{D_{N-P}(1 \mu\text{m})} + f_{T-B} \frac{D_{T-B}(\text{AMAD})}{D_{T-B}(1 \mu\text{m})} \\ &+ f_P \frac{D_P(\text{AMAD})}{D_P(1 \mu\text{m})} \end{aligned} \quad (5.8)$$

ここで、 D_{N-P} 、 D_{T-B} および D_P は、与えられた AMAD についての各呼吸器領域における沈着確率である (図 5.1)。

AMAD が不明な場合には、線量算定用データ中に示されている AMAD が $1 \mu\text{m}$ のエアロゾルについての H_{60} 、ALI および DAC の値を用いることを勧

告する。

文 献

- Dillman, L.T. and Jones, T.D. (1975). Internal dosimetry of spontaneously fissioning nuclides. *Health Phys.*, **29**, 111-123.
- Ford, M.R., Snyder, W.S., Dillman, L.T. and Watson, S.B. (1977). Maximum permissible concentration (MPC) values for spontaneously fissioning radionuclides. *Health Phys.*, **33**, 35-43.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **19**, 173-207.
- ICRP Publication 19, *The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides*. Pergamon Press, Oxford, 1972.
- ICRP Publication 23, *Task Group Report on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.

6. 胃腸管に関する線量算定用モデル

6.1 緒 論

この報告書のこれまでの章で説明したように、作業者の放射性物質に対する被曝は、問題とする放射性核種を摂取した後に身体の器官および組織が受ける預託線量当量 H_{60} を考察することによって制限される。 H_{60} の計算に用いる一般的な方法は第4章で論じた。第4章では、標的器官 T における $H_{60,T}$ は、放射性核種を摂取した後の50年間にわたる線源器官 S の中での変換の数 U_S と、線源器官 S から出る放射線に由来する、標的器官 T が吸収する比実効エネルギー-SEE ($T \leftarrow S$) に依存することを説明した。ある放射性核種を経口摂取した後の、胃腸管の各区分に対する U_S , SEE($T \leftarrow S$), および $H_{60,T}$ を計算する方法を以下に論ずる。胃腸管の各区分は別個の標的組織として取り扱うものとする (ICRP Publication 26, 105 項)。胃腸管以外の身体の器官および組織も、放射性核種のうち体液に入った部分により、またときには、胃腸管内に残留している物質から出る光子によっても、照射を受ける。放射性核種が体液に入った後の $H_{60,T}$ を計算する一般的な方法は第4章で述べた。経口摂取された放射性核種またはその娘放射性核種の放射能のうち、胃腸管から体液へ移動する放射能を計算する方法を以下に論ずる。

6.2 線量算定用モデル

この線量算定用モデルは Eve (1966) が発展させた生物学的モデルを基礎としている。放射線防護の目的には、胃腸管は図 6.1 (63頁参照) に模式的に示した4つの区分からなるものとする。

これらの区分の各々を単一のコンパートメントと考え、一つのコンパートメントから次のコンパートメントへの移行の速度はそのコンパートメントに存在する量に比例するものとする。したがって、時刻 t において、あるコンパートメント中における経口摂取された放射性核種の放射能を $q(t)$ とすれば、このモデルは次の諸式によって完全に記述される。

$$\frac{d}{dt} q_{ST}(t) = -\lambda_{ST} q_{ST}(t) - \lambda_{R} q_{ST}(t) + \dot{I}(t) \quad (6.1 a)$$

$$\frac{d}{dt} q_{SI}(t) = -\lambda_{SI} q_{SI}(t) - \lambda_{R} q_{SI}(t) - \lambda_{B} q_{SI}(t) + \lambda_{ST} q_{ST}(t) \quad (6.1 b)$$

$$\frac{d}{dt} q_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI} q_{ULI}(t) - \lambda_{R} q_{ULI}(t) + \lambda_{SI} q_{SI}(t) \quad (6.1 c)$$

$$\frac{d}{dt} q_{LLI}(t) = -\lambda_{LLI} q_{LLI}(t) - \lambda_{R} q_{LLI}(t) + \lambda_{ULI} q_{ULI}(t) \quad (6.1 d)$$

ここで、

λ_R : 問題にしている放射性核種の放射性崩壊定数、

$\lambda_B q_{SI}(t)$: 放射能が小腸から体液に移動する速度。小腸が胃腸管から体液への吸収の起こる唯一の場所であると仮定する。

$\dot{I}(t)$: 放射性核種の放射能の、時刻 t における経口摂取の速度、

である。同様に、経口摂取された親放射性核種から胃腸管内で生成する娘放射性核種に関するモデルは次の諸式によって完全に記述される。

$$\frac{d}{dt} q'_{ST}(t) = -\lambda_{ST} q'_{ST}(t) - \lambda'_{R} q'_{ST}(t) + \lambda'_{R} q_{ST}(t) \quad (6.2 a)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{SI}(t) = -\lambda_{SI} q'_{SI}(t) - \lambda'_{R} q'_{SI}(t) - \lambda_{B} q'_{SI}(t) + \lambda_{ST} q'_{ST}(t) + \lambda'_{R} q_{SI}(t) \quad (6.2 b)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI} q'_{ULI}(t) - \lambda'_{R} q'_{ULI}(t) + \lambda_{SI} q'_{SI}(t) + \lambda'_{R} q_{ULI}(t) \quad (6.2 c)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{LLI}(t) = -\lambda_{LLI} q'_{LLI}(t) - \lambda'_{R} q'_{LLI}(t) + \lambda_{ULI} q'_{ULI}(t) + \lambda'_{R} q_{LLI}(t) \quad (6.2 d)$$

ここで,

λ'_R : 問題にしている娘放射性核種の放射性崩壊定数,

$q'(t)$: 任意のコンパートメントにおける娘核種の放射能,

$q(t)$: 直前の親核種の放射能,

である。 λ_B の値は, 安定元素を経口摂取した後体液に達する割合 f_1 から次式によって推定することができる。

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_B}{\lambda_{SI} + \lambda_B} &= f_1 \\ \therefore \frac{f_1 \lambda_{SI}}{1 - f_1} &= \lambda_B \end{aligned} \quad (6.3)$$

f_1 の値は, 代謝データの中で, 個々の元素の化合物をいくつかのクラスに分け, それぞれについて与えられている。胃腸管の中で親核種の崩壊によって生成する娘放射性核種についての f_1 の値には, 普通, 経口摂取された放射性核種の同位体である安定元素にあてはまる値を用いる (第4章参照)。 $f_1=1$ という値が与えられている場合は, その放射性核種が胃から直接体液に移って, 胃腸管の他の区分は通過しないと仮定している。

各々の娘核種の放射能が連鎖の直前の先行核種の放射能できまる, 親と娘の放射性核種の連鎖の放射能を記述する, (6.1)および(6.2)に似た1組の式を誘導することができる。すべての放射性の子孫核種の代謝挙動は, 経口摂取した祖先の放射性核種の代謝挙動と同じであると仮定する。

6.3 呼吸器系から胃腸管に移る放射能

吸入された放射性核種のうち胃腸管の任意の区分に存在する放射能は, 式(6.1a)-(6.1d)によって記述される。式(6.1a)中の $\dot{I}(t)$ という項は, 放射性核種の放射能が呼吸器系から胃腸管に入る速度である(第5章)。胃腸管の任意の区分における娘放射性核種の放射能は, 式(6.2a)の右辺に $\dot{I}'(t)$ という項を追加して, 式(6.2a)から(6.2d)によって記述される。 $\dot{I}'(t)$ は, 呼吸器

系内の親放射性核種の崩壊によって生成した娘放射性核種の放射能が胃腸管に入る速度である。呼吸器系内で生成したいずれの娘放射性核種の f_1 の値も、親核種の値と同じであると通常は仮定する(第4章)。

6.4 体液に移る放射能

体液に移る放射能は、親核種については $\lambda_{BqSI}(t)$ を、その娘核種については $\lambda_{Bq'SI}(t)$ を、50年間にわたって積分したものである。その計算法は付録に記載されている。

6.5 胃腸管の各区分に対する預託線量当量 H_{50} の計算

第4章に述べたように、放射性核種 j の混合物が入っている多数の線源器官 S からの任意の標的器官 T の $H_{50,T}$ は、次式によって与えられる。

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (6.4)$$

ここで、

U_S : ある放射性核種 j を摂取した後の50年間にわたる、線源器官 S の中における変換の総数、

$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ (MeVg⁻¹/変換): S から出る種類 i の放射線からの比実効エネルギー、

である。線源器官が胃腸管の一つの区分であるときには、 U は式(6.1) および(6.2)から得られるそれぞれの区分についての $q(t)$ および $q'(t)$ の値を50年間にわたって積分したものである。親放射性核種の単位放射能を経口摂取した後、胃腸管のある区分の中にある親放射性核種およびその娘核種の U を計算する方法を付録においてさらに論ずる。

任意の放射性核種 j について、 $\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ は

$$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV g}^{-1} / \text{変換}$$

で与えられる。ここで、

Y_i : 放射性核種 j の変換当たり、種類 i の放射線の放出割合、

$E_i(\text{MeV})$: 放射線 i の平均エネルギーまたは単一のエネルギー、

$AF(T \leftarrow S)_i$: 線源器官 S から出る放射線 i のエネルギーのうち、 T に吸収される平均の割合、

Q_i : 放射線 i にあてはまる線質係数、

$M_T(\text{g})$: 標的器官の質量、

である。

$H_{50,T}$ は胃腸管の各区分の壁について推定される。そして、SEE の値は非透過性 (np) 放射線と透過性 (p) 放射線について別々に考察した方が便利である。ここで、非透過性放射線とは、重い反跳粒子、核分裂片、 α 粒子および β 線と β 線に似た放射線とする。また、透過性放射線とは、X線、 γ 線および核分裂中性子とする。

p 放射線と np 放射線の両方とも、 $H_{50,T}$ の計算は胃腸管の各区分の粘膜層について行う。p 放射線については、胃腸管の壁に対する平均線量を、粘膜層に対する線量を表すものとして使う。このため、標的となる胃腸管の任意の区分について、胃腸管内の放射性核種 j から放出されるすべての放射線について、SEE の値は次式によって与えられる。

$$\text{SEE} = \sum_{\text{np}} \frac{Y_{\text{np}} E_{\text{np}} Q_{\text{np}} AF(\text{ML} \leftarrow T)_{\text{np}}}{M_T^{\text{ML}}} + \sum_S \sum_p \frac{Y_p E_p Q_p AF(W \leftarrow S)_p}{M_T^W} \text{ MeV g}^{-1}/\text{変換}^*$$

ここで、

* 訳注 SEE は、線源組織(S)中での放射性核種の1変換当たり放出される放射線*i*により、標的組織(T)1gのあたりに付与されるエネルギー(MeV、ただしQで修正したもの)である(「用語の解説」参照)から、この式のように複数のS(それらの中に存在する放射能はそれぞれ異なる)について合計してSEEを算出することは意味がない。

Y_{np} : その放射性核種の変換当たりの非透過性放射線の放出割合,
 $E_{np}(\text{MeV})$: 非透過性放射線の平均エネルギーまたは単一のエネルギー,
 Q_{np} : 第4章に述べたように, 反跳原子, 核分裂片および α 粒子に対し
 20, 電子に対し1,

$\frac{AF(\text{ML} \leftarrow T)_{np}}{M_T^{\text{ML}}}$: 今考えている胃腸管の区分の粘膜層に対する比吸収
 割合であって, $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{M_T^g} \cdot \nu$ に等しいとする。

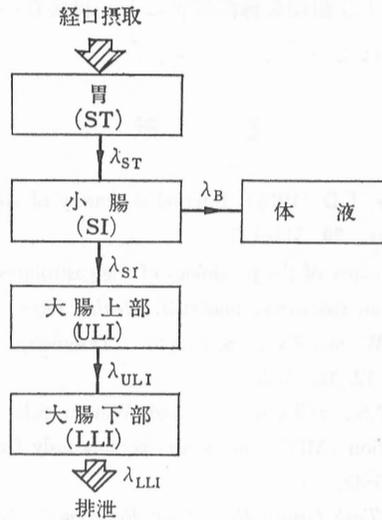
ここで, 式中の M_T^g は g で表され, 胃腸管のその区分の内容物の質量であり(図 6.1), ν は, これらの放射線が粘膜を透過する程度を表す0と1の間の係数である。係数1/2は, np放射線の場合, 内容物の表面における線量が内容物の体積内の線量のほぼ1/2であるという理由で導入されたものである。 ν は, β 粒子については1, 反跳原子については0, α 粒子および核分裂片については0.01とする。この0.01という係数は明らかに任意に決めたものであるが, この値の使用を是認する実験的な根拠が存在する(Sullivanら, 1960)。

$M_T^w(g)$: 問題の標的区分の壁の質量(図 6.1),

Y_p : その放射性核種の変換当たりの透過性放射線の放出割合,
 $E_p(\text{MeV})$: 透過性放射線の平均のエネルギーまたは単一のエネルギー,
 Q_p : 光子について1, 核分裂中性子について10,
 $AF(W \leftarrow S)_p$: 線源器官 S の中で放出される光子または核分裂中性子の
 エネルギーのうち, 問題の標的区分 T の壁に吸収される割合,

である。

$AF(W \leftarrow S)_p / M_T^w$ の値, すなわち光子の比吸収割合は, *ICRP Publication 23* に与えられている。核分裂中性子のこれに対応する値は, Dillman と Jones (1975) および Ford ら (1977) のデータから導かれている。



胃腸管の区分	壁の質量* (g)	内容物の質量* (g)	平均滞留期間 (d)	λ (1/d)
胃 (ST)	150	250	1/24	24
小腸 (SI)	640	400	4/24	6
大腸上部 (ULI)	210	220	13/24	1.8
大腸下部 (LLI)	160	135	24/24	1

* ICRP Publication 23 (1975) より

図 6.1 胃腸管の中の放射性核種の動態を記述するために使用する数学的モデル

経口摂取された親核種が胃腸管の中で生成した娘核種と共存する場合も含め、多くの放射性核種が関与する一般の場合、 H_{60} は、前に第4章において述べたように、 U_S と SEE との積をすべての放射性核種とすべての線源器官にわたって加算することによって導かれる。この報告書の補遺に集められている各放射性核種に関する線量算定用データの中に、 U_S の値が、経口摂取された親核種についても、また胃腸管のいろいろな区分において生成した娘放射性核種についても、与えられている。SEE の値も、胃腸管のいろいろな区分の内容

物と身体の他の器官および組織を線源器官とし、胃腸管のいろいろな区分を標的器官として、与えられている。

文 献

- Dillman, L.T. and Jones, T.D. (1975). Internal dosimetry of spontaneously fissioning nuclides. *Health Phys.*, **29**, 111-123.
- Eve, I.S. (1966). A review of the physiology of the gastrointestinal tract in relation to radiation doses from radioactive materials. *Health Phys.*, **12**, 131-161.
- See also Dolphin, G.W. and Eve, I.S. (1966). Dosimetry of the gastrointestinal tract. *Health Phys.*, **12**, 163-172.
- Ford, M.R., Snyder, W.S., Dillman, L.T. and Watson, S.B. (1977). Maximum permissible concentration (MPC) values for spontaneously fissioning radionuclides. *Health Phys.*, **33**, 35-43.
- ICRP Publication 23, *Task Group Report on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- Sullivan, M.F., Hackett, P.L., George, L.A. and Thompson, R.C. (1960). Irradiation of the intestine by radioisotopes. *Radiat. Res.*, **13**, 343-355.

7. 骨に関する線量算定用モデル

7.1 緒 論

骨格の中で発がんのリスクを考えるべき細胞は、骨髄の造血幹細胞、および造骨細胞、とくに骨内膜面にある造骨細胞、ならびに骨表面に近いある種の上皮細胞であることが確認されている (*ICRP Publication 11*)。成人の造血幹細胞は、主として梁骨内の造血骨髄全体に無秩序に分布していると仮定されている (*ICRP Publication 11*)。したがって、これらの細胞に対する線量は、梁骨内の内腔を完全に満たしている組織の平均値として計算される。骨内膜面にある造骨組織および骨表面にある上皮については、線量当量は、問題としている骨表面から $10\ \mu\text{m}$ までの距離の組織の平均値として計算すべきであると委員会は勧告している (*ICRP Publication 26, 47*項)。

ある特定の放射性核種の摂取に由来するこれら組織の預託線量当量を推定するには、骨格の個々の組織内のその放射性核種の分布と残留を知る必要がある。現在のところ、このようなデータは数種の放射性核種についてのみ得られているにすぎず、この分野における研究がいっそう促進されることを希望する。それまでは、放射線防護の目的には、すべての骨親和性放射性核種の摂取に由来する骨表面上の細胞と活性赤色骨髄の預託線量当量を推定するのに、以下に記述する方法が十分正確であると考えられる。

7.2 骨表面上の細胞および活性赤色骨髄に対する 預託線量当量 H_{50} の計算

第4章で説明したように、標的器官 T の H_{50} は次式で与えられる。

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv} \quad (7.1)$$

ここで、

U_S : 線源器官 S 中の核種 j の変換の数、

また、

$$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV g}^{-1}/\text{変換} \quad (7.2)$$

である。ここで、

Y_i : 変換当たりの種類 i の放射線の放出割合、

E_i (MeV): 放射線 i の平均エネルギーまたは単一エネルギーのうち、
いずれかあてはまるもの、

$A F(T \leftarrow S)_i$: 線源器官 S を源とする放射線 i のエネルギーのうち標的
器官 T に吸収される割合、

Q_i : 種類 i の放射線にあてはまる線質係数、

M_T (g): 標的器官の質量、

である。

骨の場合には、2つの標的組織は上に述べたように骨表面近くの細胞 (BS) および活性赤色骨髄 (RM) である。 γ 放射体を除くすべての放射性核種について、線源組織は普通、皮質骨 (CORT. B.*) と梁骨 (TRAB. B*) であろう。

したがって、骨の線量算定には、梁骨と皮質骨に関する U_S の推定値と、すべての放射線、放射性核種、線源器官および標的組織に関する $A F(T \leftarrow S)_i$ の推定値を必要とする。代謝と線量算定についての考察から、放射性核種およびその放出放射線を次の6つのクラスに大きく分ける。

(a) すべての放射性核種からの光子。

(b) 骨の体積全体に均等に分布すると仮定される放射性核種からの α 粒子。

* この訳書では以下このように略記する。

- (c) 骨表面にあると仮定される放射性核種からの α 粒子。
- (d) 骨の体積全体に均等に分布すると仮定される放射性核種からの β 粒子。
- (e) 骨表面にあると仮定される放射性核種からの β 粒子で、0.2 MeV以上の平均の β エネルギー(\bar{E}_β)をもつもの。
- (f) 骨表面にあると仮定される放射性核種からの β 粒子で、 \bar{E}_β が0.2 MeV未満のもの。

ある放射性核種が2つ以上のクラスに属する場合、たとえば、 β 放射体で γ 崩壊を伴うような場合があり得ることに留意すべきである。このような場合には、異なる種類の放射線の各々による線量を別々に考察しなければならない。一つ一つの特定の放射性核種から放出される一つ一つの特定の放射線について $AF(T \leftarrow S)_i$ を定めているのはこの理由による。 ^{226}Ra のように、その変換の大部分が骨の体積全体に分布している間に起こる放射性核種と、 ^{239}Pu のように、後には骨の沈着によって埋まるであろうが骨表面に結合する傾向のある、その他の放射性核種とでは、線量算定法がはっきりとちがうことにも留意すべきである (Vaughan, 1973; Marshall と Lloyd, 1973)。ある放射性核種が骨の体積全体に分布する核種と仮定されるか、骨表面に存在する核種と仮定されるかについての決定は、個々の元素の代謝データ中で与えられている。しかし、2つの大まかな規準をここに掲げることは可能である。

- (1) アルカリ土類元素の同位体で、放射性半減期が15日より長いものは、骨の体積全体に均等に分布すると考える (ICRP Publication 20)。
- (2) 放射性半減期が15日より短い放射性核種は、崩壊しないうちに骨の体積内の深部に移動することはないので、骨表面に分布すると考える。

したがって、 ^{224}Ra は骨表面にあると仮定し、 ^{226}Ra は骨の体積全体に均等に分布するものと仮定する。

線量算定の目的で、骨中の2つの標的組織の寸法と所在を単純化して規定した。すなわち、骨表面近くの細胞 (BS) については、平均預託線量当量はすべての骨内膜面および上皮で覆われたすべての表面をおおう厚さ $10\mu\text{m}$ の組織の層を対象に計算する。Lloyd と Hodges の研究(1971)から人の骨内膜面の総面積は 11.2m^2 と推定されているが、Beddoe らによるその後の研究 (1976) によれば約 16.0m^2 の値が示唆される (Spiers と Vaughan, 1976)。これとくらべて骨の上皮の表面積は小さい。この報告書では、骨格の骨内膜の総面積を 12m^2 とし、そのうち半分が皮質骨に、半分が梁骨に属するとした (ICRP Publication 20 および 23)。したがって、預託線量当量の平均を算出すべき骨表面上の厚さ $10\mu\text{m}$ の層 (BS) の質量は 120g となる。梁骨中の内腔にある活性赤色骨髄 (RM) の質量は $1,500\text{g}$ とする (ICRP Publication 23)。

7.2.1 骨格組織における吸収割合の推定値

7.2.1.1 光子放射体 光子放射体については、線源器官 S は放射性核種を含んでいる身体内の任意の器官であり、標的器官 T は骨表面の細胞あるいは活性赤色骨髄のいずれかである。比吸収割合、 $\text{AF}(T \leftarrow S)_i/M_T$ の値は、骨格と赤色骨髄を標的組織とし、この報告書で関心のあるすべての器官と組織を線源として、ICRP Publication 23 (1975) に与えられている。そこに骨格について与えられている比吸収割合の値がこの報告書では骨表面の細胞に当てはまるものとする。

7.2.1.2 無機質骨の体積全体に均等に分布する α 放射体 以下の議論においては、皮質骨中でも梁骨中でも、考察している放射性核種は均等に分布するものと仮定するが、この2種の骨中の濃度は必ずしも等しくないと仮定する。

- (a) $\text{AF}(\text{BS} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i$ α 粒子の組織中での飛程は短いので、 α 粒子の線量算定の目的には、梁骨の表面は実質的に無限かつ平坦であると考

えることができる。この仮定のもとで、Thorne (1977) は、いろいろな深さに埋め込まれたいろいろなエネルギーをもった α 放射体について、厚さ $10 \mu\text{m}$ の層のエネルギー吸収の割合を計算した。これらの計算結果は、梁骨の体積全体に均等に分布している異なるエネルギーをもつ α 放射体の $\text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{TRAB. B.})_i$ の値を推定するのに利用できる。これらの値は、 3 MeV の α 粒子を放出する放射性核種についての 0.018 から、 8 MeV の α 粒子を放出する放射性核種についての 0.032 までの範囲にあり、Mays と Sears の研究 (1962) から導き出される値とよく一致している。この報告書では、梁骨の体積全体に均等に分布すると仮定されるすべての α 放出放射性核種について 0.025 という値を用いた。

- (b) $\text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{CORT. B.})_i$ 預託線量当量を推定すべき骨表面上の組織 120 g の一部はハバース管の表面に存在する。この管の寸法が小さい(直径約 $50 \mu\text{m}$) ために、 α 粒子でさえも“クロスファイア*”を多少生ずる可能性があり、そのため表面にある細胞の線量は増加する。しかし、たとえそうであっても、皮質骨の場合の方が放出される α 粒子のうち骨表面にとどくものが少いため、 $\text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{CORT. B.})_i$ は梁骨を線源器官として求めた対応する値 $\text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{TRAB. B.})_i$ より小さいであろう。この2つの種類の骨の表面積は等しいとしてよい (ICRP Publication 23) から、クロスファイアがない場合、次の関係が成り立つことが容易に示される。

$$\text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{CORT. B.})_i = \frac{M_x}{M_z} \text{AF}(\text{BS}\leftarrow\text{TRAB. B.})_i$$

ここで、

M_x : 梁骨の質量で、 $1,000 \text{ g}$ (ICRP Publication 23),

M_z : 皮質骨の質量で、 $4,000 \text{ g}$ (ICRP Publication 23),

* 訳注 “十字砲火”。放出される放射線（ここでは α 粒子）が媒質内で文字通り交差し、そのため、その場所での線量が増加することをいっている。

AF(BS←TRAB. B.)_i: 7.2.1.2(a)で推定したように、0.025である。

したがって実際の場合で、クロスファイアの効果を含める場合には、

$$AF(BS←CORT. B.)_i > 0.006。$$

となる。しかし、もし放射性核種が皮質骨全体に均等に分布しているならば、AF(BS←CORT. B.)_iが kM_{EZ}/M_Z を超えることはあり得ない。ここで、 k は、 α 粒子についての軟組織の質量阻止能の無機質骨の質量阻止能に対する比であり、 M_{EZ} は皮質骨に付随する表層の質量、 M_Z は前述のように皮質骨の質量である。したがって、 M_Z を4,000 g (ICRP Publication 23), M_{EZ} を60 g, および k を1.3 (Thorne, 1976)とすれば、

$$0.006 < AF(BS←CORT. B.)_i \leq 0.020$$

の関係が得られる。²²⁶Raに関するSpiersの直接の計算(1974 a)から、AF(BS←CORT. B.)_iについて0.01という値が導き出せる。そこで、ここではこの値を、骨の体積全体に分布する α 放出放射性核種すべてに採用することとした。

(c) AF(RM←TRAB. B.)_i Thorne が与えたデータ(1977)から、AF(RM←TRAB. B.)_iは3 MeVの α 粒子を放出する放射性核種について0.02, 8 MeVの α 粒子を放出する放射性核種について0.09と計算され、これらはMaysとSears(1962)の研究から導くことのできる値とよく一致している。この報告書では、梁骨の体積全体に均等に分布すると仮定されるすべての α 放出放射性核種について、AF(RM←TRAB. B.)_iは0.05とした。

(d) AF(RM←CORT. B.)_i 活性赤色骨髓は梁骨の骨髓腔内にすべて存在するときめた(ICRP Publication 23)ので、骨の体積全体に均等に分布している α 放出放射性核種について、AF(RM←CORT. B.)_iは

AF(RM←TRAB. B.)_i よりかなり小さい。Whitwell と Spiers の研究(1976)から、低エネルギーのβ粒子を放出する放射性核種では、AF(RM←CORT. B.)_i は AF(RM←TRAB. B.)_i にくらべて無視できることが明らかにされている。これらのβ粒子はα粒子と同程度の飛程をもつので、この結果はα放出放射性核種についても正しいであろう。この理由で、皮質骨の体積全体に均等に分布すると仮定されるすべてのα放出放射性核種について、AF(RM←CORT. B.)_i はゼロとした。

7.2.1.3 骨表面にあると仮定されるα放射体 この報告書では、骨表面にあると仮定される放射性核種は、問題とする骨の表面の無限に薄い層中に均等に広がっているものとする。この仮定は、骨の無機質が新たに沈着して放射性沈着物が埋没することを考慮していないので、骨表面にある細胞および活性骨髄の受ける預託線量当量を過大に見つめることになる。このような効果は、この報告書で考察している放射性核種のうちいくつかの核種にとってはかなり重要であるかもしれないが、この問題はあまりにも複雑であり、また、この原因によって預託線量当量がどのくらい減るかについて、なんらかの合理的な推定をするために利用できるデータは不十分であると判断した。しかし、この問題は引き続き調査、検討されるであろう。その間、ここで問題とする放射性核種のALIの値は厳しすぎる可能性があるということに注意をはらうべきであろう。

(a) AF(BS←TRAB. B.)_i Thorne (1977) は、無機質骨の表面に無限に薄い層となって分布するα放出放射性核種により、厚さ 10 μm の層に与えられるエネルギーの割合を計算した。この計算結果は、3 MeV のα粒子を放出する放射性核種について AF(BS←TRAB. B.)_i は0.43、8 MeV のα粒子を放出する放射性核種については0.15であることを示している。これらの値は Mays と Sears の研究(1962)から導くことのできる値とよく一致している。この報告書では、骨表面に存在すると

仮定される α 放出放射性核種のすべてについて、0.25 という公称値を採用した。

- (b) $AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i$ もし骨の小さな内腔内のクロスファイアが無視できるならば、骨表面に薄い層となって分布する α 放出放射性核種については、 $AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i$ は $AF(BS \leftarrow TRAB. B.)_i$ に等しいであろう。モンテカルロ計算が示唆するところによれば、そのようなクロスファイアの効果は、 $25 \mu m$ より小さい曲率半径をもつ内腔についてのみ重要である (Thorne, 1977)。しかし、そのような内腔は皮質骨においてさえまれである (Whitwell と Spiers, 1976)。この理由により、骨表面に分布すると仮定されるすべての α 放出放射性核種について、 $AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i$ は梁骨の対応する値と同じ値、すなわち 0.25 であるとした。

- (c) $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ 梁骨の表面は、第一近似として、組織中での α 粒子の飛程と比較すれば無限平面とみなしてさしつかえないであろう。もしこのように仮定し、この表面がクロスファイアの効果を無視できるほど十分に互いに離れているということも仮定すれば、簡単な幾何学的論拠から $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ は 0.5 に等しいことになる。この値をこの報告書では採用した。

- (d) $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ 活性赤色骨髄は梁骨の骨髓腔内にすべて存在するときめたので、 $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ は $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ よりずっと小さい。そして、放射線防護の目的には、骨表面にあると仮定されるすべての α 放出放射性核種に対してゼロとしてよい (7.2.1.2 節参照)。

7.2.1.4 骨の体積全体に均等に分布する β 放射体 Spiers とその共同研究者たち (Spiers, 1968, 1969, 1974 a, b; Whitwell と Spiers, 1976) は、活性赤色骨髄および骨表面から $10 \mu m$ 以内にある細胞が骨の体積全体に均等に

分布している β 放出放射性核種から受ける平均線量率を計算する方法を記述している。彼らの用語では、 D_0 は、単位質量当たり 1 単位の放射能のレベルに均等に汚染した、無限の大きさをもつ無機質骨の中の、組織で満たされた小さな空洞における吸収線量率であり、 D_1 から D_4 は、成人の無機質骨が単位質量当たり 1 単位の放射能のレベルに汚染している場合に、表 7.1 に示した線源器官および標的器官の組合せについて与えられる吸収線量率である。

表 7.1 骨格の線源器官と標的器官

標 的	線 源	
	梁 骨 (TRAB. B.)	皮質骨 (CORT. B.)
骨表面近くの細胞 (BS)	D_1	D_2
活性赤色骨髄 (RM)	D_3	D_4

量 P_1 から P_4 は $P_j = D_j/D_0$ と定義され、 j は 1 から 4 までである。これらの量は、骨の汚染レベルに無関係で、平均エネルギーが \bar{E}_β (MeV) の β 粒子を放出するいろいろな放射性核種について、表 7.2 に与えられている。

P_j は、均等に汚染した無限の大きさをもつ無機質骨の中にある標的組織の線量率を、同じ無機質骨の中にある、組織で満たされた小さな空洞の線量率で割ったものであるから、次式でも表される。

$$P_j = \frac{Y_i E_i A F (T \leftarrow S)_i Q_i C_S}{M_T} \bigg/ \frac{Y_i E_i Q_i C_S k}{M_S} = \frac{M_S A F (T \leftarrow S)_i}{M_T k}$$

表 7.2 β 放出放射性核種が無機質骨の体積全体に均等に分布する場合の骨表面および赤色骨髄についての吸収線量率比 P_j の値。Spiers (1974a) および Whitwell と Spiers (1976) による推定値。

核 種	\bar{E}_β MeV	P_1	P_2	P_3	P_4
^{45}Ca	0.08	0.21	0.42	0.11	0.00
^{90}Sr	0.20	0.21	0.47	0.22	0.02
^{89}Sr	0.55	0.19	0.47	0.26	0.04
$^{90}\text{Y}^*$	0.93	0.16	0.45	0.27	0.06

* 骨中で親核種 ^{90}Sr から生成するとき、無機質骨の体積全体に均等に分布すると仮定する。

したがって、

$$AF(T \leftarrow S)_i = \frac{kM_T P_j}{M_S} \quad (7.3)$$

ここで、

$Y_i, E_i, AF(T \leftarrow S)_i$ および Q_i : 前と同じ定義、

M_S : 線源器官の質量、

M_T : 標的器官の質量、

C_S : 線源器官中の放射能、

k : 軟組織中における電子の阻止能の骨中における電子の阻止能に対する比、

である。したがって、

$$AF(BS \leftarrow TRAB. B.)_i = \frac{0.12k}{1} P_1$$

$$AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i = \frac{0.12k}{4} P_2$$

$$AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i = \frac{1.5k}{1} P_3$$

$$AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i = \frac{1.5k}{4} P_4$$

ここで、

1.5 (kg): 活性赤色骨髄の質量、

4 (kg): 皮質骨の質量、

1 (kg): 梁骨の質量 (*ICRP Publication 23*)、

0.12(kg): 皮質骨と梁骨の表面 $0 \mu\text{m}$ から $10 \mu\text{m}$ までの間にある層の質量、

k : 1.07, 電子に対して広いエネルギー範囲にわたってあてはまる値 (Berger と Seltzer, 1966)、

である。いくつかの放射性核種について、吸収割合の値を表7.3に示す。

赤色骨髄の線量当量へのおもな寄与は梁骨の放射能から生ずるので、皮質骨

表 7.3 無機質骨の体積全体に均等に分布する β 放射体に関する吸収割合の値

核 種	^{45}Ca	^{90}Sr	^{90}Sr	$^{90}\text{Y}^*$
\bar{E}_β	0.08	0.20	0.55	0.93
AF(BS←TRAB. B.) _i	0.027	0.027	0.024	0.021
AF(BS←CORT. B.) _i	0.013	0.015	0.015	0.014
AF(RM←TRAB. B.) _i	0.18	0.35	0.42	0.43
AF(RM←CORT. B.) _i	0.000	0.007	0.014	0.021

* 骨中で親核種 ^{90}Sr から生成するとき、無機質骨の体積全体に均等に分布すると仮定する。

中の β 放射能からの赤色骨髓の線量当量への寄与を無視し、また、無機質骨の体積全体に均等に分布する β 放出放射性核種について吸収割合に公称値を採用することは合理的である。そこで、表 7.3 に示す値を次の代表的な値になおしてさしつかえないであろう。

$$\text{AF}(\text{BS} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i = 0.025$$

$$\text{AF}(\text{BS} \leftarrow \text{CORT. B.})_i = 0.015$$

$$\text{AF}(\text{RM} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i = 0.35$$

$$\text{AF}(\text{RM} \leftarrow \text{CORT. B.})_i = 0.0$$

7.2.1.5 骨表面にあると仮定される β 放射体

(a) AF(BS←TRAB. B.)_i \bar{E}_β が 0.05 MeV より低ければ、 β 粒子の平均飛程は組織中において α 粒子の飛程と同程度であり、AF(BS←TRAB. B.)_i は約 0.25 であろう。しかし、 \bar{E}_β が約 1 MeV であれば、 β 粒子の平均飛程は骨髓腔あるいは梁骨組織の平均寸法の幾倍にもなるであろう。そしてAF(BS←TRAB. B.)_i は、骨の体積全体に均等に分布する β 放射体についての値と同じ 0.025 としてよいであろう。

したがって、骨の表面にある低エネルギー β 放射体と高エネルギー β 放射体とで吸収割合にかなりの差がある。AF(BS←TRAB. B.)_i に対して、このエネルギーの全範囲にわたって適切な一つの公称値を決めるこ

とは不可能である。そこで、次の2つの公称値を選択した。

(i) \bar{E}_β の値が 0.2 MeV 未満の場合にはすべて、

$$AF(BS \leftarrow TRAB. B.)_i = 0.25$$

(ii) \bar{E}_β の値が 0.2 MeV 以上の場合にはすべて

$$AF(BS \leftarrow TRAB. B.)_i = 0.025$$

この2つの区分の境界線、0.2 MeV は、梁骨の表面上の細胞がその直下にある骨表面の放射能から受ける吸収線量と、この細胞がその他の部位の表面にある放射能から受ける吸収線量率を考察して選ばれた。これら2つの成分のうち第一の成分は、 \bar{E}_β が増加するにつれ急速に減少するが、一方、第二の成分は、 \bar{E}_β が増加するにしたがってむしろ比較的緩やかに増加する。AF(BS←TRAB. B.)_i の値は、 $\bar{E}_\beta = 0.2$ MeV のところでは $\bar{E}_\beta = 1$ MeV に対する値よりあまり大きくないが、エネルギーが 0.2 MeV より低いとエネルギーが減少するにしたがって著しく増加する (Spiers, 1974 a) ので、2つの区分の境界として 0.2 MeV というエネルギーが選ばれた。

(b) AF(BS←CORT. B.)_i 上述と同様な論拠により、この吸収割合 AF(BS←CORT. B.)_i にも2つの公称値が採用された。

(i) \bar{E}_β が 0.2 MeV 未満の場合、

$$AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i = 0.25$$

(ii) \bar{E}_β が 0.2 MeV 以上の場合、

$$AF(BS \leftarrow CORT. B.)_i = 0.015$$

(c) AF(RM←TRAB. B.)_i \bar{E}_β が 0.05 MeV 未満の場合、 β 粒子の平均飛程は組織中では α 粒子の飛程と同程度であろう。したがって、この場合には、AF(RM←TRAB. B.)_i は、骨表面に沈着すると仮定される α 放射体に対して用いる値、すなわち、0.5 としてよいであろう。しかし、 \bar{E}_β が約 1 MeV であれば、 β 粒子の飛程は梁骨の平均の厚さよりも

かなり大きいであろう。この場合には、 $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ は、上述のエネルギーをもち梁骨の体積全体に均等に分布する β 放射体に対して適切な値、すなわち、約 0.4 となるであろう(表 7.3)。それゆえ、おもに骨表面に分布するすべての β 放射体について、 $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ を 0.5 とすることは合理的である。

- (d) $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ 活性赤色骨髄はすべて梁骨内に入っていると仮定されるので、 $\bar{E}_\beta \leq 0.05 \text{ MeV}$ の場合、 $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ は $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ よりも非常に小さい(7.2.1.2節参照)。しかし、 \bar{E}_β が約 1 MeV であれば、その β 粒子の飛程は皮質骨の平均の厚さよりもかなり大きいであろう。この場合、 $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ は、表 7.3 に示したように、上述のエネルギーをもち皮質骨の体積全体に均等に分布する β 放射体に対して適切な値、すなわち、約 0.02 になるであろう。したがって、この場合も、 $AF(RM \leftarrow CORT. B.)_i$ は $AF(RM \leftarrow TRAB. B.)_i$ よりもずっと小さく、放射線防護の目的には、ゼロとしてよい。

7.2.1.6 核分裂片と反跳原子 核分裂片は組織内で約 $20 \mu\text{m}$ の飛程をもち (Green ら, 1977), それは 3 MeV の α 粒子の飛程とほぼ等しい。核分裂片の吸収割合の値は、すべての場合、 α 粒子の値と同じであるとする。反跳原子のエネルギーは一次放出粒子のエネルギーにくらべて無視できるので、骨の

表 7.4 骨にある放射性核種の線量算定用に勧告される吸収割合の値

放射性核種の分類 (7.2節参照)

線源器官	標的器官	体積内に均等に分布する α 放射体	骨表面にある α 放射体	体積内に均等に分布する β 放射体	骨表面にある β 放射体 $\bar{E}_\beta \geq 0.2 \text{ MeV}$	骨表面にある β 放射体 $\bar{E}_\beta < 0.2 \text{ MeV}$
梁骨	骨表面(BS)	0.025	0.25	0.025	0.025	0.25
皮質骨	骨表面(BS)	0.01	0.25	0.015	0.015	0.25
梁骨	赤色骨髄(RM)	0.05	0.5	0.35	0.5	0.5
皮質骨	赤色骨髄(RM)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

線量算定の目的には考慮に入れない。

7.2.1.7 吸収割合の値の要約 (吸収割合の値は表 7.4 に示されている。)

7.2.2 梁骨中と皮質骨中の変換の数の推定値

7.2.2.1 親放射性核種 現在の知識では、骨親和性の放射性核種の多くについて、 $U_{\text{TRAB.B.}}$ と $U_{\text{CORT.B.}}$ を独立に推定することは不可能である。無機質骨 (MINERAL B.) に取り込まれるアルカリ土類元素についてのみ、梁骨と皮質骨の間の放射能分布に関して詳細なモデルがある (ICRP Publication 20)。骨親和性の放射性核種の多くについて、 $U_{\text{TRAB.B.}}$ と $U_{\text{CORT.B.}}$ を正確には計算することはできないけれども、それらの量を推定することはできる。

- (a) もし、ある放射性核種がすべての骨表面に均等に沈着し、皮質骨と梁骨の両方から同じ速度で除去されるならば、皮質骨と梁骨の表面積を等しいと仮定しているため、

$$U_{\text{TRAB.B.}} = U_{\text{CORT.B.}} = 0.5 U_{\text{MINERAL B.}}$$

- (b) もし、ある放射性核種が、その放射性半減期および骨中の滞留時間の両方とくらべて短い時間で、骨全体を均等に汚染するように再分布するならば、

$$\frac{U_{\text{TRAB.B.}}}{U_{\text{CORT.B.}}} \approx \frac{M_X}{M_Z}$$

ここで、

M_X : 梁骨の質量で 1 kg,

M_Z : 皮質骨の質量で 4 kg,

とすると、 $U_{\text{TRAB.B.}} \approx 0.2 U_{\text{MINERAL B.}}$ および $U_{\text{CORT.B.}} \approx 0.8 U_{\text{MINERAL B.}}$ となる。したがって、ある放射性核種の分布に関して特別な情報が得られない場合には、次の近似を用いる。

- (i) 骨表面にあると仮定される放射性核種について、

$$U_{\text{TRAB.B.}} = U_{\text{CORT.B.}} = 0.5 U_{\text{MINERAL B.}}$$

(ii) 無機質骨の体積全体に均等に分布すると仮定される放射性核種について、 $U_{\text{TRAB. B.}} = 0.2 U_{\text{MINERAL B.}}$ および

$$U_{\text{CORT. B.}} = 0.8 U_{\text{MINERAL B.}}$$

アルカリ土類元素の放射性同位体については、皮質骨と梁骨の中の U の値は、*ICRP Publication 20* に与えられている残留関数から直接に得ることができる。

7.2.2.2 娘放射性核種 第4章で説明したように、身体内で生成したすべての娘放射性核種は、経口摂取または吸入された親放射性核種と一緒に残留し、代謝上は同様に挙動すると通常仮定している。親放射性核種に関する代謝モデルが、一次の速度定数で結ばれた枝わかれの無いコンパートメントの連鎖から構成されている場合、この仮定の意味は第4章および付録に示されている。しかしながら、アルカリ土類の代謝挙動を記述するために *ICRP Publication 20* で用いられているモデルは、一次の速度定数によって完全に支配されているものではなく、これらの元素の放射性同位体から体内で生成する娘放射性核種の U の値を推定するために以下の方法が用いられる。呼吸器系および胃腸管系の中で生成した娘核種は、身体の残りの組織中で生成した娘核種とは別に考慮する。

アルカリ土類元素の代謝を記述するために用いるモデルにおいては、通過コンパートメントに入った物質は3つの一般的なコンパートメント、すなわち、皮質骨、梁骨および軟組織に移行する。通過コンパートメントに入った後の任意の時刻 t において、アルカリ土類の安定同位体がこれら3つのコンパートメント中に残留する割合 $R(t)$ の関係が与えられている。これら残留の割合は、放射性崩壊について考慮すれば、親放射性核種が吸入または経口摂取された後に通過コンパートメントに入った、アルカリ土類の放射性同位体の娘放射性核種の皮質骨、梁骨および軟組織中における U の値を計算するのに直接利用できる。たとえば、呼吸器系および胃腸管系の中で ^{90}Sr から生成した ^{90}Y は、

第 4 章で一般的な場合について述べたように、通過コンパートメントに入った後、ストロンチウムと同一の代謝挙動をとると仮定する。

この 3 つのコンパートメントのうちの任意の 1 つのコンパートメントに入っているアルカリ土類元素の安定同位体の生物学的排出 (あるいは蓄積) の速度を、その時刻の残留量に対する割合で表したものは、通過コンパートメントに入った後の時刻 t において、 $(dR(t)/dt)/R(t)=F(t)$ 、すなわち、残留曲線の勾配を時刻 t における残留割合で割ったもので与えられる。第 4 章で述べた一般的な場合と同じく、皮質骨、梁骨および軟組織 (SOFT T.) 中で生成した娘放射性核種は、これらのコンパートメントに残留する親放射性核種の安定同位体と同様の代謝挙動をとるものとする。たとえば、これらのコンパートメントの中で、残留している ^{90}Sr から生成する ^{90}Y は、 ^{90}Sr と同様の代謝挙動をとるものとする。あるアルカリ土類元素のある放射性同位体からこれらの 3 つのコンパートメント中で生じた娘放射性核種の残留を記述するために、以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} q'(t)_{\text{CORT. B.}} &= \lambda'_{R} q(t)_{\text{CORT. B.}} + F(t)_{\text{CORT. B.}} q'(t)_{\text{CORT. B.}} \\ &\quad - \lambda'_{R} q'(t)_{\text{CORT. B.}} \end{aligned} \quad (7.4 a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} q'(t)_{\text{TRAB. B.}} &= \lambda'_{R} q(t)_{\text{TRAB. B.}} + F(t)_{\text{TRAB. B.}} q'(t)_{\text{TRAB. B.}} \\ &\quad - \lambda'_{R} q'(t)_{\text{TRAB. B.}} \end{aligned} \quad (7.4 b)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} q'(t)_{\text{SOFT T.}} &= \lambda'_{R} q(t)_{\text{SOFT T.}} + F(t)_{\text{SOFT T.}} q'(t)_{\text{SOFT T.}} \\ &\quad - \lambda'_{R} q'(t)_{\text{SOFT T.}} \end{aligned} \quad (7.4 c)$$

ここで、

$q'(t)$: 時刻 t におけるそのコンパートメント中の娘放射性核種の放射能,

$q(t)$: 時刻 t におけるそのコンパートメント中のあるアルカリ土類の親

放射性同位体の放射能, *ICRP Publication 20* に示されている残留関数から導くことができる。

t : 吸入あるいは経口摂取された放射性核種が通過コンパートメントに入ってから時間,

$F(t)$: 親放射性核種の安定同位体の減少 (あるいは増加) の速度を残留量に対する割合で表わしたもの, 残留曲線の勾配により正か負かのいずれかになる。

λ'_R : 娘放射性核種の放射性崩壊定数,

である。同様に親と娘の放射性核種の連鎖の放射能を記述する一連の式を導くことができ, ここで, 各娘核種の放射能は連鎖の直前の先行核種の放射能によって決定される。すべての場合, 娘核種の代謝挙動は, 体内に取り込まれた祖先の核種の代謝挙動と同一であると仮定する。

7.3 骨表面近くの細胞と活性赤色骨髓に対する 預託線量当量 H_{50}

7.3.1 光子放射体

前に論じたように, 光子放射体による任意の標的器官の $H_{50,T}$ は次式で与えられる。

$$H_{50,T} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_S \sum_j [U_S \sum_i \text{SEE}(T \leftarrow S)_i]_j \text{ Sv}$$

ここで $\text{SEE}(T \leftarrow S)_i$ は

$$\text{SEE}(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV g}^{-1} / \text{変換}$$

によって与えられる。線源器官 S は骨格を含めて身体のいずれの器官であってもよいが, 標的器官 T は骨表面にある細胞か, または赤色骨髓かのいずれか該当する方である。骨格および赤色骨髓についての光子の比吸収割合,

AF ($T \leftarrow S$)_i/M_T の値は ICRP Publication 23 に与えられている。そこに与えられている骨格の比吸収割合の値は、この報告書では骨表面上の細胞にあてはまるものとする。

7.3.2 α放射体およびβ放射体

この場合には、標的器官は、骨表面にある質量120 gの細胞か、質量1,500 gの活性赤色骨髄かのいずれかであろう。したがって、

$$H_{50,BS} = 1.6 \times 10^{-10} \sum_j [U_{\text{TRAB.B.}} \sum_i \text{SEE}(\text{BS} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i]_j \\ + U_{\text{CORT.B.}} \sum_i \text{SEE}(\text{BS} \leftarrow \text{CORT. B.})_i]_j \text{ Sv} \quad (7.5)$$

同様に

$$H_{50,RM} = 1.6 \times 10^{-10} \\ \times \sum_j [U_{\text{TRAB.B.}} \sum_i \text{SEE}(\text{RM} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i]_j \text{ Sv} \quad (7.6)$$

ここで SEE($\text{BS} \leftarrow \text{TRAB. B.}$)_i

$$= \frac{Y_i E_i \text{AF}(\text{BS} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i Q_i}{120} \quad \text{MeV g}^{-1}/\text{変換}$$

SEE($\text{BS} \leftarrow \text{CORT. B.}$)_i

$$= \frac{Y_i E_i \text{AF}(\text{BS} \leftarrow \text{CORT. B.})_i Q_i}{120} \quad \text{MeV g}^{-1}/\text{変換}$$

SEE($\text{RM} \leftarrow \text{TRAB. B.}$)_i

$$= \frac{Y_i E_i \text{AF}(\text{RM} \leftarrow \text{TRAB. B.})_i Q_i}{1,500} \quad \text{MeV g}^{-1}/\text{変換}$$

AF($T \leftarrow S$)_i の値は表 7.4 に示されている。

皮質骨に由来する赤色骨髄の預託線量当量は非常に小さいので、式(7.6)では無視した (AF=0, 表 7.4)。

文 献

Beddoe, A.H., Darley, P.J. and Spiers, F.W. (1976). Measurements of trabecular

- bone structure in man. *Phys. Med. Biol.*, **21**, 589-607.
- Berger, M.S. and Seltzer, S.M. (1966). *Additional Stopping Power and Range Tables for Protons, Mesons and Electrons*. Washington D.C., Office of Technology Utilization, National Aeronautics and Space Administration (NASA SP-3036).
- Green, D., Howells, G. and Thorne, M. (1977). A new method for the accurate localization of ^{239}Pu in bone. *Phys. Med. Biol.*, **22**, 284-297.
- ICRP Publication 11, *Task Group Report on Radiosensitivity of Tissues in Bone*. Pergamon Press, Oxford, 1968.
- ICRP Publication 20, *Task Group Report on Alkaline Earth Metabolism in Adult Man*. Pergamon Press, Oxford, 1973.
- ICRP Publication 23, *Task Group Report on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- Lloyd, E. and Hodges, D. (1971). Quantitative characterization of bone: a computer analysis of microradiographs. *Clin. Orthop.*, **78**, 230-250.
- Marshall, J.H. and Lloyd, E. (1973). The effect of the remodelling of bone upon the relative toxicities of radium and plutonium in man and dog. In: *Radionuclide Carcinogenesis*, Eds. Sanders, C.L., Busch, R.H., Ballou, J.E. and Mahlum, D.D. Oak Ridge, Tenn., USAEC, pp. 421-436. (AEC Symposium Series 29.)
- Mays, C.W. and Sears, K.A. (1962). Determination of localised alpha dose. III: From surface and volume deposits of Pu^{239} , Th^{228} and Ra^{226} . University of Utah, pp. 78-85. (COO-226.)
- Spiers, F.W. *Radioisotopes in the Human Body*. Academic Press, New York and London, (1968).
- Spiers, F.W. Beta particle dosimetry in trabecular bone. In: *Delayed Effects of Bone Seeking Radionuclides*, Eds. Mays, C.W., Jee, W.S.S., Lloyd, R.D., Stover, B.J., Dougherty, J.H. and Taylor, G.N. pp. 95-108. University of Utah Press, Salt Lake City. (1969).
- Spiers, F.W. (1974a). *A New Approach to Setting Maximum Permissible Levels of Radionuclides in Bone*. Medical Research Council, Committee on Protection against Ionizing Radiations, PIRC 74/3.
- Spiers, F.W. (1974b). Radionuclides and bone—from ^{226}Ra to ^{90}Sr . *Br. J. Radiol.*, **47**, 833-844.

- Spiers, F.W. and Vaughan, J. (1976). Hazards of plutonium with special reference to the skeleton. *Nature*, **259**, 531-534.
- Thorne, M.C. (1976). Aspects of the dosimetry of plutonium in bone. *Nature*, **259**, 539-541.
- Thorne, M.C. (1977). Aspects of the dosimetry of α -emitting radionuclides in bone with particular emphasis on ^{226}Ra and ^{239}Pu . *Phys. Med. Biol.*, **22**, 36-46.
- Vaughan, J. The pattern of ^{239}Pu distribution in the skeleton. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B. pp. 397-421. Springer-Verlag, Berlin, (1973).
- Whitwell, J.R. and Spiers, F.W. The dosimetry of beta-emitters in bone: theoretical methods. In: *Contamination par Radionucléides Ostéotropes et Radioprotection*. pp. 401-417. 5th International Meeting of the French Society of Radiation Protection, Grenoble, (1971).
- Whitwell, J.R. and Spiers, F.W. (1976). Calculated beta-ray dose factors for trabecular bone. *Phys. Med. Biol.*, **21**, 16-38.

8. 放射性雲中のサブマージョンに関する 線量算定用モデル

8.1 緒 論

人が放射性ガスに囲まれている場合、皮膚および身体他の器官は、体外からの照射と身体組織に吸収されたガスによる体内からの照射との両方から照射をうけるであろう。呼吸器系および他の器官は、肺の中に入っているガスによっても照射されるであろう。以下に論ずるように、不活性の放射性ガスと元素状トリチウムに対する作業者の被曝は、これらの源からの照射により制限される。

8.2 体外放射線と体内放射線の線量当量率の 相対的な大きさ

人が、体積濃度 C (Bq m^{-3}) の無限に広がった放射性雲に囲まれていると考える。体外放射線による任意の組織に対する線量当量を \dot{H}_E , 吸収されたガスによる体内照射からの線量当量率を \dot{H}_A , 肺の中に入っているガスによる肺に対する線量当量率を \dot{H}_L とする。

そうすると、無限に広がった放射性雲に囲まれている人の組織の微小素片についての \dot{H}_E は、

$$\dot{H}_E = C s k_E / \rho_A \quad \text{Sv h}^{-1} \quad (8.1)$$

で与えられる。ここで、

ρ_A : 空気の密度, 約 $1,300 \text{ g m}^{-3}$,

s (Sv h^{-1}): 1 Bq g^{-1} の濃度で均等に汚染した、無限に広がった任意の媒質の微小素片の線量当量率,

k : 放射線の組織中における質量阻止能の, 空気中における質量阻止能に対する比で, 通常は1に近い。

g_E : 体表から微小素片までの間にある組織による遮蔽を考慮するための幾何学的因子,

である。 g_E の値はトリチウムからの β 線およびすべての α 線に関してつねにゼロである。その理由は, 線量算定の目的で, それぞれ3 mmおよび70 μm の深さにあるとしている眼の水晶体と表皮の基底層 (ICRP Publication 26, 62項と64項)を含めて, 身体の放射線感受性の高いどの組織にもこれらの放射線は到達し得ないからである。大部分の β 線と低エネルギー光子について, g_E は身体表面近くの組織では約0.5であり, 深部にある組織ではゼロに近づく。非常に透過力のある光子については, g_E は身体のすべての組織について1に近づく。

人が放射性雲に長期間さらされていると, 空気中のガスの濃度と組織中のガスの濃度は平衡に達する。このような状況では, 組織中のガスの濃度 C_T は,

$$C_T = \delta C / \rho_T \quad \text{Bq g}^{-1} \quad (8.2)$$

となることが示される。ここで,

ρ_T : 組織の密度で約 10^6 g m^{-3} ,

δ : 組織中のガスの溶解度。標準大気圧のもとで, 単位体積の組織と平衡状態にあるガスの体積で表す。

この溶解度係数は, ガスの原子量とともに増加する。たとえば, 体温に等しい温度の水では, この値は水素の約0.02からキセノンの約0.1まで変わる (KayeとLaby, 1956)。これらの値は, 脂肪組織中では3~20倍に増すであろう (Lawrenceら, 1946)。したがって, 吸収されたガスによる組織の線量当量率 \dot{H}_A は,

$$\dot{H}_A = s \delta C g_A / \rho_T \quad \text{Sv h}^{-1} \quad (8.3)$$

で与えられる。ここで,

8. 放射性雲中のサブマージョンに関する線量算定用モデル (87)

g_A : 人の寸法と問題とする放射線の飛程とにより決まる幾何学的因子。

α 線と β 線に関して、また低エネルギー光子に関しても、 g_A は身体の中心にある組織について約1、表面の組織について0.5である。エネルギーのさらに高い光子については、 g_A はすべての組織について1よりもずっと小さく、光子のエネルギーが増加するにつれて減少する。

肺に入っているガスによる肺の線量当量率 \dot{H}_L は

$$\dot{H}_L = sCV_L g_L / M_L \text{ Sv h}^{-1} \quad (8.4)$$

で与えられる。ここで、

V_L : 肺に入っている空気の平均の体積で、約 $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,

M_L : 肺の質量で、1,000 g とする (*ICRP Publication 23*),

g_L : 幾何学的因子。 α 線、 β 線および低エネルギー光子に関して約1である。 g_L の値は光子のエネルギーが増加するにつれて減少する。

8.2.1 トリチウム

この核種に関しては、式(8.1)で与えられる \dot{H}_E は、トリチウムの β 線の組織中での飛程が短いため、考えられるすべての身体組織についてゼロである。吸収されたガスによる任意の組織の線量当量率の、肺に入っているガスによる肺の線量当量率に対する比は、式(8.3)と式(8.4)とから、

$$\frac{\dot{H}_A}{\dot{H}_L} = \frac{\delta g_A M_L}{V_L g_L \rho_T} \quad (8.5)$$

で与えられる。 ρ_T は約 10^6 gm^{-3} 、 $M_L/V_L = 10^6/3 \text{ gm}^{-3}$ 、また g_A と g_L はともにトリチウムの β 線に関し約1であるので、この式は

$$\frac{\dot{H}_A}{\dot{H}_L} \approx \frac{\delta}{3} \quad (8.6)$$

と簡単になる。トリチウムに関して、 δ は水分の多い組織では約0.02、脂肪組織では0.05である(Lawrenceら, 1946)。そこで、肺に入っているトリチウム

ガスによる肺の線量当量率は、ガスを吸収した任意の組織の線量当量率の60～150倍となる。したがって、この報告書では、トリチウムガス中のサブマージョンは肺の線量当量率だけの考察によって制限される。しかし、トリチウム水に対する被曝の限度は元素状トリチウムに対する限度よりも著しく小さいので、実際に起こるほとんどの場合、トリチウム水に対する被曝が制限因子であることを強調しておく(水素の線量算定用データ参照)。

8.2.2 ラドンおよびトロン

ラドンとトロンに対する被曝の限度は、委員会の別の報告書の主題である。

8.2.3 希ガス

この報告書で考察している希ガスのアルゴン、クリプトンおよびキセノンの放射性同位体すべては、光子かまたはかなりのエネルギーの β 粒子のいずれかを放出する。したがって、皮膚を含めて、身体表面近くの組織に関しては g_E は約0.5である。式(8.1)と式(8.4)から、

$$\frac{\dot{H}_E}{\dot{H}_L} = \frac{M_L k g_E}{V_L g_L \rho_A} \geq \frac{130}{g_L} \quad (8.7)$$

また、 g_L は1をこえることはないから、 \dot{H}_E は \dot{H}_L の130倍以上である。同様に、式(8.1)と式(8.3)から、

$$\frac{\dot{H}_E}{\dot{H}_A} = \frac{\rho_T k g_E}{\rho_A \delta g_A} \quad (8.8)$$

そして、 $\delta \leq 2$ (Lawrence ら, 1946), $\rho_T/\rho_A \approx 800$ および $g_A \leq 1$ であるので、 \dot{H}_E は \dot{H}_A の200倍以上である。

したがって、第2章で述べた線量制限体系を適用する場合、希ガスの放射性同位体中のサブマージョンによる被曝に関しては、体外照射の方が重要で、これだけを考えればよいことは明らかである。そこで、この報告書では、吸収されたガスによる線量当量と肺に入っているガスによる線量当量は無視した。体

8. 放射性雲中のサブマージョンに関する算量算定用モデル (89)

外照射による線量当量率を計算するために用いる方法は8.3節で論ずる。

8.2.3.1 娘放射性核種 放射性不活性ガスの崩壊により生成する娘放射性核種自身が不活性ガスであれば、8.2.3の考察があてはまり、娘放射性核種中のサブマージョンによる被曝は体外放射線による組織の線量当量で制限される。娘放射性核種が不活性な放射性ガスでなければ、身体組織に吸収された親核種から生成する娘放射性核種による線量当量は、実際には体外にある親核種と娘核種による体外線量に比較して通常小さいことを示すことができる。この報告書では、身体組織中の親核種から生成した娘核種による線量当量は無視した。しかし、9.4節と9.7節に述べるように、人が囲まれている放射性雲中に存在する任意の娘放射性核種の吸入によってもたらされる線量当量に対しては、考慮を払わなければならない。

8.3 サブマージョンによる身体組織の線量当量率

8.3.1 光子放射体

無限に広がった空気中における単一エネルギーの光子の放射線源からのエネルギースペクトルは、Dillman (1971) によって計算されている。これらのデータから、身体の器官および組織に対する線量当量率 \dot{H} (Sv h^{-1}) は、標準人が床面によって区切られた半無限の雲の中に立っている場合について、Poston と Snyder (1974) によって述べられた方法を用いて計算することができる。

水晶体の線量当量率は皮膚の線量当量率と同じと仮定し、この計算の目的では0 mmから2 mmの深さにあるとしている (ICRP Publication 23)。

室内の放射性雲のような有限の寸法の放射性雲の中の光子線源に関してはエネルギースペクトルは得られていないが、皮膚あるいは体内の器官の線量当量率のおよその推定値は、

$$2\dot{H}[1-\exp(-\mu_{AP} \rho_{AR})] \quad (8.9)$$

で与えられる。ここで、

\dot{H} : 半無限の雲について計算された線量当量率 (Poston と Snyder, 1974)。たいていの部屋の寸法では、少なくとも立っている作業者の頭を問題にすると、床は雲による照射をもはや 2π ジオメトリーには制限しない。そのため係数2を用いる、

μ_A : 空気中における質量エネルギー吸収係数、

ρ_A : 空気の密度、

r : 部屋の実効半径、

である。部屋の体積に等しい体積の球の半径を r とした場合には、この線量当量率は、部屋の形状にもよるが、わずかに過大評価となる。

$[1 - \exp(-\mu_A \rho_A r)]$ は、室外に光子線源がないという事実を考えに入れて、無限の広がりをもつ放射性雲からの一次の相互作用の線量を減らすための係数である。

この報告書では、補正係数が必要とされる部屋の体積、 100 m^3 ($r=2.9 \text{ m}$)、 500 m^3 ($r=4.9 \text{ m}$) および $1,000 \text{ m}^3$ ($r=6.2 \text{ m}$) について、補正係数が与えられている。

8.3.2 電子および β 放射体

電子を放出する半無限の雲に由来する、深さ $70 \mu\text{m}$ にある皮膚および深さ 3 mm にある水晶体の線量当量率は、その放射体がこの線量当量率に寄与することのできる範囲の空気中の適切な場所にわたって、Berger (1971) の点積分核* を積分することによって計算される。この点積分核は、組織の質量阻止能の空気の質量阻止能に対する比をすべての電子のエネルギーについて1.14とし

* 訳注 point kernel, 無限均質媒質のある一点における単位放射能の等方線源から放出されるエネルギーのうち、線源から距離 r にある同一媒質内の単位質量当たり吸収されるエネルギーの割合について、Berger の与えた用語。なお、次の文献参照、M.J. Berger, "Beta-Ray Dosimetry Calculations with the Use of Point Kernels" pp.63-86, "Medical Radionuclides: Radiation Dose and Effects", Proceedings of a Symposium held at the Oak Ridge Associated Universities, December 8-11, 1969.

て補正した (Berger, 1974)。部屋の寸法に関する補正はほとんどの場合小さいので、この報告書では電子についてはこの補正を推定していない。

電子線源についての制動放射線のエネルギーは、Dillman ら (1973) によって計算されており、これらの光子線源による線量当量率は上に述べたようにして推定される。線量当量率全体に対する制動放射線の寄与は非常に小さい。

8.4 サブマージョンに関する誘導空気中濃度 DAC (Submersion)

8.2.1 項と第3章で論じたように、空気中の元素状トリチウムに対する任意の1年間の被曝は、肺の確率的影響の考察によって次のように制限される。

$$w_{\text{Lung}} \dot{H}_{\text{Lung}} \int C(t) dt \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (8.10)$$

ここで、

w_{Lung} : 第2章の表2.1に与えられている肺に関する荷重係数、

\dot{H}_{Lung} (Sv m³ Bq⁻¹h⁻¹): 空気中の単位濃度 (すなわち1 Bq m⁻³) のトリチウムにさらされたことによる肺の線量当量率、

$C(t)$ (Bq m⁻³): 任意の時刻 t における空気中の元素状トリチウムの濃度。積分の範囲は1年間の労働時間、

である。

任意の1年間の不活性放射性ガスによる被曝 (8.2.3 項および第3章参照) は、体外からの放射線の考察から次のように制限される。

$$\sum_T w_T \dot{H}_T \int C(t) dt \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (8.11 \text{ a})$$

および

$$\dot{H}_T \int C(t) dt \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (8.11 \text{ b})$$

および

$$\dot{H}_{\text{Lens}} \int C(t) dt \leq 0.3 \text{ Sv} \quad (8.11 \text{ c})^*$$

* 訳注 16頁訳注参照。

ここで、

w_T : 組織 T に関する荷重係数, その値は第 2 章の表 2.1 に与えられている。

\dot{H}_T ($\text{Sv m}^3 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$): 任意の組織 T の線量当量率,

\dot{H}_{Lens} : 空気中の単位濃度 (すなわち 1 Bq m^{-3}) の不活性ガス中におけるサブマージョンによって標準人が受ける眼の水晶体の線量当量率,

$C(t)$ (Bq m^{-3}): 任意の時刻 t における空気中の不活性放射性ガスの濃度。積分の範囲は 1 年間の労働時間,

である。

便宜上, 委員会は, 元素状トリチウムに関しては関係式 (8.10) を満足し, 不活性放射性ガスに関しては関係式 (8.11) を満足する, $\int C(t) dt$ の最大値の $1/2,000$ を誘導空気中濃度 (DAC) として勧告する。不活性放射性ガスに関する DAC が非確率的影響の考察により決定される場合には, 問題とする器官または組織 (通常は皮膚) の名を DAC の値の下に記す。そのような場合にはすべて, それより大きい DAC の値が括弧内に与えてあり, この値は, 確率的影響を制限するための委員会の勧告, すなわち, 上述の関係式 (8.11 a) の考察によって決定された値である。確率的影響を考察して決まるこの DAC の値は, いくつかの線源からの被曝の制限を考えると役に立ち (第 9 章参照), また委員会の線量制限体系 (*ICRP Publication 26*, E 章) を適用した結果, 作業者が確率的影響に関する線量当量限度の一部しか受けられないときに役立つ。

DAC は常に慎重に用いなければならないことを強調しておく (第 3 章参照)。元素状トリチウムへのサブマージョンによる被曝の限度は, 関係式 (8.10) により優先的に決定され, 不活性放射性ガスに対する限度は関係式 (8.11) により優先的に決定される。

文 献

- Berger, M.J. (1971). Distribution of absorbed dose around point sources of electrons and beta particles in water and other media. *J. Nucl. Med.*, **12**, Suppl. 5, 5-23.
- Berger, M.J. (1974). Beta-ray dose in tissue-equivalent material immersed in a radioactive cloud. *Health Phys.*, **26**, 1-12.
- Dillman, L.T. Scattered energy spectrum for a monoenergetic gamma emitter uniformly distributed in an infinite cloud. In: *Health Physics Division Annual Progress Report for Period ending 31 July 1970*. pp. 216-222. Oak Ridge National Laboratory (ORNL 4584), (1971).
- Dillman, L.T., Snyder, W.S. and Ford, M.R. Nuclear data compilations of utility in medical and biological applications. In: *Nuclear Data in Science and Technology: Proceedings of a Symposium, Paris, 12-26 March 1973*. Vol. 2, pp. 529-539. IAEA, Vienna, (1973).
- ICRP Publication 23, ICRP Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- Kaye, G.W.C. and Laby, T.H. *Tables of Physical and Chemical Constants*, 11th Edition, p. 137. William Clowes, London, (1956).
- Lawrence, J.H., Loomis, W.F., Tobias, C.A. and Turpin, F.H. (1946). Preliminary observations on the narcotic effect of xenon with a review of values for solubilities of gases in water and oils. *J. Physiol.*, **105**, 197-204.
- Poston, J.W. and Snyder, W.S. (1974). A model for exposure to a semi-infinite cloud of a photon emitter. *Health Phys.*, **26**, 287-293.

9. 線量算定用データの使用とその限界

9.1 緒 論

ある個人の被曝の現状を決める基礎となるのは、その個人が受けた線量当量と、放射性物質にさらされた結果その後50年間に受けることになる線量当量を合わせたものであることを強調する。この報告書の補遺に示されている単位摂取当たりの H_{60} の値は、ある放射性物質を摂取した後50年間にわたる期間における線量当量の予測推定値である。補助限度である ALI、およびこれに対応する誘導限度の DAC は、作業者の被曝を解釈するための有用な規準である。

各放射性核種について与えられている H_{60} 、ALI および DAC の推定値は、これらの量を適切に使おうとするならば知っておかなければならない、非常に多くの仮定に基づいている。これらの仮定を取り入れた一般的モデルはこれまでの諸章で述べてきた。各元素に特有な仮定は、この報告書の 110-205 頁に与えられているその元素の代謝データの中で論じられている。これらの仮定およびそれらがもつ意味のいくつかを以下の諸節で論ずる。

9.2 化学形および物理形に関する仮定

化学形および物理形の効果を考慮するための努力が従来払われてきた。たとえば、第5章で論じた呼吸器系の線量算定用モデルでは化合物について3つの一般的なクラスを考え、また、胃腸管からの吸収に関する値 f_1 については、異なる f_1 値の中から適切な選択ができるように、情報が得られている場合には2つ以上の値が採用されている。掲げられた f_1 値が常に実際にあてはまるとは限らないであろうから、利用者は、適切な場合には、与えられた値をもとに

補間によって、自身で選択すべきである。 H_{50} 、ALI および DAC は、AMAD が $1\mu\text{m}$ の場合について計算されているが、粒子の大きさが $1\mu\text{m}$ とは異なることが知られている場合に粒子サイズの効果を補正するために使う方法は、第5章に述べられている。任意の特定の物質の挙動は用いたモデルにおける挙動とは著しく異なることもあり得るから、モデルの適用に当たっては、修正を正当とする特別なデータが得られる場合には、修正を行うべきである。

9.3 代謝モデルに関する仮定

線量算定用データの計算に使われた特定の代謝モデルは、この報告書の110-205頁の、その元素に関する代謝データの中に記されている。これらのモデルの出所あるいは誘導に関する参考文献が示されている。ある場合には、モデルは非常に詳細で、人における観察に基づいた多くの実験的証拠によって支持されている。他の場合には、データが1種類の実験動物に関する数少ない観察に限られているものもある。代謝に関するこの知識の不足が、預託線量当量の大多数の推定値における不確かさの最大の要因となっている。新しいデータが得られるようになれば、線量算定用データを適切に修正することが可能となるにちがいない。この報告書の利用者が、実際に起こった事例、および、特定の放射性核種の代謝挙動についての指針となるような事例について、データを公にすることを希望する。

9.4 娘放射性核種に関する仮定

体内でその親核種から生成した娘放射性核種は親核種とともに留まり、親核種と同様の代謝挙動をとるものと通常は仮定する。もしこれに反する証拠があれば、代謝データの中に述べてあるように、それを採用した。新しい事実が利用できるようになれば、この知見を用いて H_{50} 、ALI および DAC の値を改めるべきである。

9.5 被曝する個人に関する仮定

線量算定用データは職業上被曝する成人について計算されている。この個人に関する詳細な仮定は *ICRP Publication 23* から得られる。これらの仮定のうち重要なもののいくつかは第3章と第4章で論じ、また表として示した。特定の元素に関連する仮定はその元素の代謝データの中で論じられている。委員会は、集団の構成員に対する預託線量当量、たとえば環境中の放射性核種による預託線量当量を推定するのに、この報告書で述べたデータおよびモデルを、器官の質量あるいは摂取の大きさの差だけを補正して使用することを勧告しない。これらのデータから集団被曝に関してある程度はわかるであろうが、これらのデータはこの目的を念頭において集めたものではない。異なった年齢の人々の放射性核種の摂取による預託線量当量の推定に関する文献目録を、決して完全なものではないが、本章の末尾に示す。

9.6 化学毒性に関する仮定

この報告書の中および補遺に集められている線量算定用データの中にあるALIの値は、身体の器官および組織が受ける放射線量の制限だけに関係し、化学毒性とは関係がない。ベクレル単位で示されているこれらの値は、該当する比放射能の値を使って質量に変えることができる。委員会は、いくつかの物質、たとえばウランのいくつかの同位体では、化学的性質の方がその放射能よりも、作業員に対し大きなリスクとなるであろうということを承知している。委員会はまた、比放射能の非常に低いいくつかの放射性核種、たとえば ^{116}In では、作業員が任意の1年間に吸入あるいは経口摂取しうると考えることが妥当であるような物質の量よりも、ALIに相当する量の方が大きいことも承知している。したがって、ALIの値は、それが線量当量のみを考察によって決定されたものであることを思い起こし、常に慎重に使用すべきである。

9.7 放射性核種の混合物の吸入，経口摂取， およびサブマージョンによる被曝

各 ALI は，作業者がその放射性核種を経口摂取または吸入のどちらか1つの経路によって体内に摂取すると仮定して，導かれている。実際には，作業者は放射性核種の混合物を吸入しかつ経口摂取することがあり，さらに化学的に不活性な放射性ガス雲あるいはガス状のトリチウム雲にとりかこまれることもあり，またそのうえに，他の体外放射線源に被曝することもある。そのような状況では，表に示した ALI の値はそのまま使用することはできず，被曝は以下に述べるように制限されなければならない (*ICRP Publication 26*, 110 項も参照)。

特定の放射性核種に関する ALI は確率的影響および非確率的影響の両者を考察して導かれている (第2章参照)。このことは放射性雲中のサブマージョンに関する DAC についてもいえる (第8章参照)。したがって，放射性核種の混合物の経口摂取と吸入に加えて放射性ガス雲中のサブマージョンが重なることを考察する場合には，第2章で述べた不等式を満足するように総被曝を制限すべきである。しかしながら，いろいろな場合に適切な H_{60} の値を計算するよりも，該当する ALI および DAC を使う方がしばしば便利であることが認められている。就労している任意の1年間について，第2章で述べた条件は次の不等式が成り立つならば満たされるであろう。

$$\sum_j \frac{(I_j)_{\text{ING}}}{(\text{ALI}_j)_{\text{ING}}} + \sum_j \frac{(I_j)_{\text{INH}}}{(\text{ALI}_j)_{\text{INH}}} + \sum_{j'} \frac{U_{j'}}{2,000 \text{ DAC}(\text{Submersion})_{j'}} \leq 1$$

ここで，

$(I_j)_{\text{ING}}$: 任意の1年間の経口摂取による放射性核種 j の摂取量，

$(I_j)_{\text{INH}}$: 任意の1年間の吸入による放射性核種 j の摂取量，

$(\text{ALI}_j)_{\text{ING}}$: 経口摂取による放射性核種 j の年摂取限度，

$(ALI_j)_{INH}$: 吸入による放射性核種 j の年摂取限度,

U_j : $U_j = \int C_{j'}(t) dt$, ここで t の単位は時間 (h), $C_{j'}(t)$ は時刻 t において人がとりかこまれている放射性核種 j' の濃度, 時間積分は就労している1年間とする (第3章および第8章参照)。

$DAC(Submersion)_{j'}$: 放射性核種 j' のサブマージョンに関する誘導空気中濃度,

2,000: 1年間の労働時間数,

である。

作業者が放射性物質の非密封線源に加えて体外放射線源に被曝する場合には, 就労している任意の1年間における総被曝を, *ICRP Publication 26* の110項および1978年のストックホルムでの会合後に委員会が行った声明 (*Annals of the ICRP*, 1978) で論じられているところにしたがって制限するのが便利であろう。

しかしながら, もし ALI あるいは DAC のうちの1つあるいは2つ以上が非確率的影響によって決まったものであれば, ある状況のもとでは, 上述の不等式および *ICRP Publication 26* の110項で述べた不等式は, 第2章で述べた条件よりもきびしいこともある, ということに注意すべきである。したがって, これらの不等式に基づいて提案される被曝管理が不当にきびしいと考えられるならば, 第2章および *ICRP Publication 26* の103項に述べられている関係を満たすような, もっと正しい計算を行うことを勧告する。この観点から, この報告書の補遺に掲げる線量算定用データには, 有用な数値的な情報, たとえば放射性核種の単位摂取当たりの $H_{50,T}$ および $w_T H_{50,T}$ の値が含まれている。1年間の労働時間内の確率的影響を制限するための委員会勧告を満たす, 任意の1年間の放射性核種の摂取放射能 I の値および放射性不活性ガスの DAC の値も与えられている。こうした値は, ALI あるいは DAC (Submersion) が非確率的影響によって決定される場合にはいつも, 非確率的影響により決まる値

の下に、それぞれ括弧に入れて示してある。

文 献

ICRP Publication 26, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, Oxford, 1977.

Annals of the ICRP. Statement after the Stockholm Meeting of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*, 2(1), 1978.

いろいろな年齢の人々における放射性核種による 線量当量の推定に関する文献目録

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 1977.

Ibid. 1958; 1962; 1964; 1966; 1969 and 1972.

National Academy of Sciences (1972). *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*. A report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. National Research Council, Washington, D.C.

Medical Research Council (1975). *The Toxicity of Plutonium*. Her Majesty's Stationery Office, London.

Medical Research Council (1975). *Criteria for Controlling Radiation Doses to the Public after Accidental Escape of Radioactive Material*. Her Majesty's Stationery Office, London.

Papworth, D.G. and Vennart, J. (1973). Retention of ^{90}Sr in human bones at different ages and the resulting radiation doses. *Phys. Med. Biol.*, 18, 169-186.

Vennart, J. and Ash, Patricia J.N.D. (1976). Derived limits for ^{35}S in food and air. *Health Phys.*, 30, 291-294.

Wash 1400 (1975). *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*. Appendix V, Appendix D-1 to D-39, United States Nuclear Regulatory Commission, October 1975.

付 録

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解

この報告書では、用いたすべての代謝モデルは、アルカリ土類について用いたモデル（第7章参照）を除いて、係数が定数である一連の一次微分方程式の形で表現できる。このような一連の方程式の特定の境界条件のもとでの厳密解は、*ICRP Publication 2* (1959), Jacques (1972), Rutherford (1913), および Skrable ら(1974)によって研究された。とくに、この報告書の中で用いた大部分のモデルはフィードバックを含まないから、Rutherford (1913) および Skrable ら (1974) によって論じられたコンパートメントの線形連鎖に簡単化することができる。このような線形連鎖は次に示す形の一連の微分方程式によって記述される。

$$\begin{aligned}\frac{dq_1(t)}{dt} &= \dot{I}_1(t) - \lambda_1 q_1(t) \\ \frac{dq_i(t)}{dt} &= \dot{I}_i(t) + \lambda_{(i-1,i)} q_{(i-1)}(t) - \lambda_i q_i(t) \quad i=2 \text{ から } n \text{ まで}\end{aligned}\tag{A.1}$$

ここで、

$q_i(t)$: 時刻 t におけるコンパートメント i 中の放射能の総量,

$\dot{I}_i(t)$: 時刻 t において放射能がこの系の外からコンパートメント i に
摂取される速度,

$\lambda_{(i-1,i)}$: コンパートメント $i-1$ からコンパートメント i への物質の移動の速度定数,

λ_i : コンパートメント i からの物質の喪失の速度定数,

である。

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解 (101)

この連鎖の各コンパートメント中の変換の数 U を算出する場合、次の理由で計算が簡単になる。すなわち、ある量の放射能が連鎖の最初のコンパートメントに瞬間的に沈着すると仮定し、さらに、その後は連鎖のどのコンパートメントにも、放射能の系外からの摂取はそれ以上起こらないと仮定するためである。したがって、この瞬間的な1回摂取の時刻 t をゼロとすれば、すべての i について $\dot{I}_i(t)$ をゼロに等しいとおくことができ、 $q_1(0)$ を最初のコンパートメントに瞬間的に沈着した放射能の量に等しいとおくことができ、また、 $q_i(0)$ を2から n までのすべての i について、すなわち連鎖の他のすべてのコンパートメントについて、ゼロとおくことができる。これらの境界条件のもとで、Skrableら(1974)は次の関係式を示した。

$$q_i(t) = \left[\left(\prod_{k=1}^{i-1} \lambda_{(k,k+1)} \right) \sum_{k=1}^i \left(\frac{q_1(0)e^{-\lambda_k t}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^i (\lambda_p - \lambda_k)} \right) \right] \quad (\text{A.2})$$

ここで $n \geq m$ ならば

$$\prod_{i=m}^n a_i = a_m \times a_{m+1} \times \cdots \times a_n$$

また $m > n$ ならば

$$\prod_{i=m}^n a_i = 1$$

である。 $q_i(t)$ に関する上式を時刻ゼロから時刻 T まで積分すると次式が得られる。

$$U_i(T) = \int_0^T q_i(t) dt = \left[\left(\prod_{k=1}^{i-1} \lambda_{(k,k+1)} \right) \sum_{k=1}^i \left(\frac{q_1(0)(1-e^{-\lambda_k T})}{\lambda_k \prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^i (\lambda_p - \lambda_k)} \right) \right] \quad (\text{A.3})$$

したがって、 $q_i(t)$ を時刻 t におけるコンパートメント i 中の放射性核種の放射能とし、また T を50年とすると、式(A.3)は、この連鎖の最初のコンパートメントに放射性核種が摂取された後の50年間における、連鎖の i 番目のコンパートメント中のその放射性核種の積分放射能を表している。式(A.3)は、肺と胃腸管との各コンパートメント中の娘放射性核種の積分放射能を決定するため

にも用いられる。このことは以下のいくつかの例からはっきりするであろう。式(A.2)と式(A.3)は $\lambda_p = \lambda_k$ ($p \neq k$) の場合には成立しないことに注意すべきである。しかし、この場合には、これらの式が λ の交換に関し完全に反対称であるため、 $\lim_{\lambda_p \rightarrow \lambda_k} [q_i(t)]$ と $\lim_{\lambda_p \rightarrow \lambda_k} [U_i(T)]$ は依然として存在することを容易に示すことができる。

A.1 2コンパートメント連鎖の各コンパートメント中の積分放射能

この場合、式(A.1)は、上に論じた境界条件を使用すれば、次のように簡単になる。

$$\frac{dq_1(t)}{dt} = -\lambda_1 q_1(t)$$

$$\frac{dq_2(t)}{dt} = \lambda_{(1,2)} q_1(t) - \lambda_2 q_2(t)$$

この例の1つは、放射性核種が通過コンパートメントに瞬間的に取り込まれた後の、通過コンパートメントとある特定の組織コンパートメントとの間の放射性核種の分布であろう(第4章参照)。この場合には、 $q_1(0)$ は最初に取り込まれた放射能の量 Q に等しく、 $q_1(t)$ は任意の時刻 t における通過コンパートメント中の放射能、 $q_2(t)$ は時刻 t における組織コンパートメント中の放射能である。また $\lambda_1 = \lambda_a + \lambda_R$ 、 $\lambda_{(1,2)} = b\lambda_a$ 、 $\lambda_2 = \lambda_b + \lambda_R$ であり、ここで λ_a は通過コンパートメントからの安定元素の喪失の速度定数、 λ_R はその放射性核種の放射性崩壊定数、 $b\lambda_a$ は通過コンパートメントから組織コンパートメント b への移行速度、 λ_b はこの組織コンパートメントからの喪失の速度定数である(第4章、図4.1参照)。

上の式の解は式(A.2)にこれらを代入することにより得られ、次のようになる。

$$q_1(t) = Qe^{-(\lambda_a + \lambda_R)t}$$

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解 (103)

$$q_2(t) = b\lambda_a \left\{ \frac{Qe^{-(\lambda_a + \lambda_R)t}}{(\lambda_b - \lambda_a)} + \frac{Qe^{-(\lambda_b + \lambda_R)t}}{(\lambda_a - \lambda_b)} \right\}$$

この2番目の式は次の形に書き直すことができる。

$$q_2(t) = \frac{b\lambda_a Q}{(\lambda_a - \lambda_b)} \{ e^{-(\lambda_b + \lambda_R)t} - e^{-(\lambda_a + \lambda_R)t} \}$$

この式は、連鎖の第二のコンパートメント中での放射能のビルドアップとそれに続く減少をはっきりと表している。

同様に、式(A.3)に代入することにより、2つのコンパートメント中の放射能の時間積分が次のように求まる。

$$U_1(T) = \frac{Q(1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_R)T})}{(\lambda_a + \lambda_R)}$$

$$U_2(T) = b\lambda_a \left\{ \frac{Q(1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_R)T})}{(\lambda_a + \lambda_R)(\lambda_b - \lambda_a)} + \frac{Q(1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_R)T})}{(\lambda_b + \lambda_R)(\lambda_a - \lambda_b)} \right\}$$

この2番目の式も次の形に書き直すことができる。

$$U_2(T) = \frac{b\lambda_a Q}{(\lambda_a - \lambda_b)} \left\{ \frac{(1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_R)T})}{(\lambda_b + \lambda_R)} - \frac{(1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_R)T})}{(\lambda_a + \lambda_R)} \right\}$$

中括弧内の第一項は、仮に器官への移動が瞬間的に行われたとした場合この器官の中で生ずるであろう積分放射能を表す。第二項は通過コンパートメントに有限の時間滞留することの補正を表す。

A.2 肺の気管—気管支領域における吸入放射性核種の変換の総数

肺の T-B 領域における放射能は、この領域を構成する2つのコンパートメントに沈着した物質と、P領域から T-B 領域を通過して胃腸管に移る物質に由来する(第5章参照)。コンパートメント c (第5章, 図 5.2 参照) に沈着した物質については、吸入された単位放射能当たり $q_1(0) = D_{T-B}F_0$ であり、また変換の総数 U_i は式(A.3)において $i=1$ とすることにより与えられるので、次式を得る。

$$U_c = \frac{D_{T-B} F_c (1 - e^{-\lambda_1 T})}{\lambda_1}$$

しかし、 λ_1 はコンパートメント c からの喪失の速度定数であるので、 $(\lambda_c + \lambda_R)$ になる (第5章参照)。そこで、

$$U_c = \frac{D_{T-B} F_c (1 - e^{-\eta(\lambda_c + \lambda_R)})}{\lambda_c + \lambda_R}$$

となり、ここで $\eta = 1.58 \times 10^9$ は50年間の秒数、それぞれの速度定数 λ は、ここにおいてもこの付録中の以後の部分においても、 s^{-1} の単位で表す。

同様に、 U_d は次式で与えられる。

$$U_d = \frac{D_{T-B} F_d (1 - e^{-\eta(\lambda_d + \lambda_R)})}{\lambda_d + \lambda_R}$$

P 領域のコンパートメント f から胃腸管に移る物質による T-B 領域内の変換の総数を決定するには、式 (A.3) を用いて $U_2(T)$ を計算する必要がある。

$$\begin{aligned} U_2(T) &= \lambda_{(1,2)} \left\{ \frac{q_1(0)(1 - e^{-\lambda_1 T})}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{q_1(0)(1 - e^{-\lambda_2 T})}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \right\} \\ &= \frac{\lambda_{(1,2)} q_1(0)}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \{ \lambda_2 (1 - e^{-\lambda_1 T}) - \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 T}) \} \\ &= \frac{\lambda_{(1,2)} q_1(0)}{\lambda_1 \lambda_2} \left\{ 1 + \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 T} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right\} \end{aligned}$$

そのさい $q_1(0) = D_p F_f$, $\lambda_{(1,2)} = \lambda_f$, $\lambda_1 = \lambda_f + \lambda_R$, $\lambda_2 = \lambda_d + \lambda_R$ および $T = \eta$ とおくと、次式を得る。

$$\begin{aligned} U_2(T) &= \frac{\lambda_f D_p F_f}{(\lambda_f + \lambda_R)(\lambda_d + \lambda_R)} \\ &\quad \left\{ 1 + \left(\frac{(\lambda_f + \lambda_R) e^{-\eta(\lambda_d + \lambda_R)} - (\lambda_d + \lambda_R) e^{-\eta(\lambda_f + \lambda_R)}}{\lambda_d - \lambda_f} \right) \right\} \end{aligned}$$

同様に、P 領域のコンパートメント g から胃腸管に移る物質による T-B 領域内の変換の総数は次のようになる。

$$\frac{\lambda_g D_p F_g}{(\lambda_g + \lambda_R)(\lambda_d + \lambda_R)} \left\{ 1 + \frac{(\lambda_g + \lambda_R) e^{-\eta(\lambda_d + \lambda_R)} - (\lambda_d + \lambda_R) e^{-\eta(\lambda_g + \lambda_R)}}{(\lambda_d - \lambda_g)} \right\}$$

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解 (105)

そこで、 $\lambda_0, \lambda_d, \lambda_f$ および λ_g はすべて $1/\eta$ より著しく大きいので、上式中の指数項は無視でき、ある放射性核種の単位放射能を吸入した後のすべての源による T-B 領域内の変換の総数 U_{T-B} は、次式で与えられる。

$$U_{T-B} \approx \left[D_{T-B} \left(\frac{F_c}{\lambda_0 + \lambda_R} + \frac{F_d}{\lambda_d + \lambda_R} \right) + \frac{D_p}{\lambda_d + \lambda_R} \left(\frac{\lambda_f F_f}{\lambda_f + \lambda_R} + \frac{\lambda_g F_g}{\lambda_g + \lambda_R} \right) \right]$$

A.3 肺胞領域における娘放射性核種の変換の総数

娘放射性核種が、肺胞領域に沈着した親放射性核種から生成するならば、 $U_2(T)$ を算出する必要がある。前と同様に、

$$U_2(T) = \frac{\lambda_{(1,2)} q_1(0)}{\lambda_1 \lambda_2} \left\{ 1 + \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 T} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right\}$$

そこで、単位放射能の親核種の吸入によるコンパートメント e 内の娘核種の変換の総数 U'_e は、この式に、 $q_1(0) = D_p F_0$ 、 $\lambda_{(1,2)} = \lambda'_R$ 、 $\lambda_1 = \lambda_0 + \lambda_R$ 、 $\lambda_2 = \lambda_0 + \lambda'_R$ および $T = \eta$ とおいて得られる。すなわち、

$$U'_e = \frac{\lambda'_R D_p F_0}{(\lambda_0 + \lambda_R)(\lambda_0 + \lambda'_R)} \left\{ 1 + \frac{(\lambda_0 + \lambda_R) e^{-(\lambda_0 + \lambda'_R)\eta} - (\lambda_0 + \lambda'_R) e^{-(\lambda_0 + \lambda_R)\eta}}{(\lambda'_R - \lambda_R)} \right\}$$

そして、 λ_0 は $1/\eta$ より著しく大きいので、

$$U'_e \approx \frac{\lambda'_R D_p F_0}{(\lambda_0 + \lambda_R)(\lambda_0 + \lambda'_R)}$$

となる。この計算をコンパートメント f, g および h について繰り返すことにより、肺胞領域 P 内の娘核種の変換の総数 U'_p は次のようになる。

$$U'_p \approx \lambda'_R D_p \left\{ \frac{F_0}{(\lambda_0 + \lambda_R)(\lambda_0 + \lambda'_R)} + \frac{F_f}{(\lambda_f + \lambda_R)(\lambda_f + \lambda'_R)} + \frac{F_g}{(\lambda_g + \lambda_R)(\lambda_g + \lambda'_R)} + \frac{F_h}{(\lambda_h + \lambda_R)(\lambda_h + \lambda'_R)} \right\}$$

いろいろなモデルの任意のコンパートメント内の変換の総数を決定するのにも同様な計算を行うことができる。しかしながら、便宜のため、肺と胃腸管との各コンパートメントについて、これらの変換の総数の近似式を以下に述べる。

A.4 肺および胃腸管の各コンパートメントにおける 変換の総数を表す近似式

A.4.1 吸入放射性核種と経口摂取放射性核種

肺の j 以外のすべてのコンパートメントでは、クリアランスの半減期は50年よりはるかに短いので（第5章参照）、各コンパートメント内の 変換の 総数を表す近似式が、先に論じた式を用いて容易に得られる。便宜のため、これらの近似式を表 A.1 に掲げる。

表 A.1 1 Bq の放射能を吸入した後の肺の各コンパートメントにおける変換の数を表す近似式。記号は第5章、図 5.2 で定義した。

コンパートメント	変換の数	コンパートメント	変換の数
a	$\frac{D_{N-P}F_a}{\lambda_a + \lambda_R}$	b	$\frac{D_{N-P}F_b}{\lambda_b + \lambda_R}$
c	$\frac{D_{T-B}F_c}{\lambda_c + \lambda_R}$	d	$\left\{ \frac{D_{T-B}F_d}{\lambda_d + \lambda_R} + \frac{D_p}{\lambda_d + \lambda_R} \left[\frac{\lambda_r F_r}{\lambda_r + \lambda_R} + \frac{\lambda_g F_g}{\lambda_g + \lambda_R} \right] \right\}$
e	$\frac{D_p F_e}{\lambda_e + \lambda_R}$	f	$\frac{D_p F_f}{\lambda_f + \lambda_R}$
g	$\frac{D_p F_g}{\lambda_g + \lambda_R}$	h	$\frac{D_p F_h}{\lambda_h + \lambda_R}$
i	$\frac{D_p F_h \lambda_h F_i}{(\lambda_h + \lambda_R)(\lambda_i + \lambda_R)}$	j	$\frac{D_p F_h \lambda_h F_j (1 - e^{-\lambda_R})}{(\lambda_h + \lambda_R)\lambda_R}$

放射能は肺のコンパートメント b と d から胃腸管に入る。コンパートメント d にはコンパートメント f と g から放射能が移るので、単位放射能当たり胃腸管に入る総放射能は近似的に次のようになる。

$$\frac{D_{N-P}F_b\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_R} + \frac{D_{T-B}F_d\lambda_d}{\lambda_d + \lambda_R} + D_p \left[\frac{F_r\lambda_r}{\lambda_r + \lambda_R} + \frac{F_g\lambda_g}{\lambda_g + \lambda_R} \right] \frac{\lambda_d}{\lambda_d + \lambda_R}$$

ここでは、移動前にコンパートメント内で起こる放射性崩壊について補正がなされている。同様にして、吸入された単位放射能当たり通過コンパートメントに直接運ばれる放射能は、近似的に次のようになる。

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解 (107)

$$\frac{D_{N-P}F_a\lambda_a}{\lambda_a+\lambda_R} + \frac{D_{T-B}F_c\lambda_c}{\lambda_c+\lambda_R} + \frac{D_pF_e\lambda_e}{\lambda_e+\lambda_R} + \frac{D_pF_h\lambda_hF_i\lambda_i}{(\lambda_h+\lambda_R)(\lambda_i+\lambda_R)}$$

これらの移動の過程は50年と比較すると短い時間で実質的に終わるので、放射線防護の目的には、この過程は瞬間的に起こるとみなすことができる。

経口摂取により胃腸管に入った放射能については、滞留時間が各区分とも50年と比較して短く、単位放射能を経口摂取した後の、胃腸管の各区分における積分放射能を表す近似式は、前に述べた方法により得ることができる。これらの近似式を表 A.2 に掲げる。

表 A.2 1Bqの放射能を経口摂取した後の胃腸管の各区分における変換の数を表す近似式。記号は第6章、図 6.1で定義した。

区 分	変 換 の 数
胃	$\frac{1}{\lambda_{ST}+\lambda_R}$
小 腸	$\frac{\lambda_{ST}}{(\lambda_{ST}+\lambda_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda_R)}$
大腸上部	$\frac{\lambda_{ST}\lambda_{SI}}{(\lambda_{ST}+\lambda_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda_R)(\lambda_{ULI}+\lambda_R)}$
大腸下部	$\frac{\lambda_{ST}\lambda_{SI}\lambda_{ULI}}{(\lambda_{ST}+\lambda_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda_R)(\lambda_{ULI}+\lambda_R)(\lambda_{LLI}+\lambda_R)}$

さらに、経口摂取された単位放射能当たり胃腸管から通過コンパートメントに移行する放射能は次のようになる。

$$\frac{\lambda_{ST}\lambda_B}{(\lambda_{ST}+\lambda_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda_R)}$$

そして、胃腸管における滞留時間は、各区分とも50年と比較して短いので、放射線防護の目的には、この移動は瞬間的に起こるとみなしてよい。

A.4.2 吸入放射性核種と経口摂取放射性核種との娘放射性核種

第一近似としては、肺あるいは胃腸管の1つのコンパートメント内にある親放射性核種の崩壊はすべて、摂取した後の50年間のはじめに瞬間的に起こるとみなしてよい。この仮定が著しい誤まりとなる唯一の場合は、寿命の長いクラ

スYの物質の吸入の場合であって、この場合には物質のかかりの量が肺リンパ節に50年の全期間にわたり残留するからである。しかし、この場合においてさえも、生成した娘放射性核種による預託線量当量は、この簡単化した近似を用いても著しい過大評価になることはないであろう。したがって、任意のコンパートメント内の親核種の変換の数を A とすると、そのコンパートメント内に $A\lambda'_R$ (Bq) の娘核種が生成するであろう。ここで λ'_R は娘核種の放射性崩壊定数である。

別に断りがなければ、肺においては、ある特定のコンパートメントからのある娘放射性核種のクリアランスは吸入された親核種と同じであり、また娘核種は、その生成時点では、コンパートメント同士の間で混合しないと仮定する。このような状況における肺の各コンパートメント内の娘核種の放射能の時間積分を表 A.3 に示す。

表 A.3 肺の各コンパートメントにおける娘放射性核種の変換の数を表す近似式。 A_a から A_j までの値は肺の a から j までのコンパートメントにおける親核種の変換の数である。使用した他の記号はこの付録と第5章、図 5.2 ですでに定義した。

コンパートメント	変換の数	コンパートメント	変換の数
a	$\frac{A_a\lambda'_R}{\lambda_a+\lambda'_R}$	b	$\frac{A_b\lambda'_R}{\lambda_b+\lambda'_R}$
c	$\frac{A_c\lambda'_R}{\lambda_c+\lambda'_R}$	d	$\frac{A_d\lambda'_R}{\lambda_d+\lambda'_R} + \frac{\lambda'_R}{\lambda_d+\lambda'_R} \left[\frac{A_r\lambda_r}{\lambda_r+\lambda'_R} + \frac{A_g\lambda_g}{\lambda_g+\lambda'_R} \right]$
e	$\frac{A_e\lambda'_R}{\lambda_e+\lambda'_R}$	f	$\frac{A_f\lambda'_R}{\lambda_f+\lambda'_R}$
g	$\frac{A_g\lambda'_R}{\lambda_g+\lambda'_R}$	h	$\frac{A_h\lambda'_R}{\lambda_h+\lambda'_R}$
i	$\frac{A_i\lambda'_R}{\lambda_i+\lambda'_R} + \frac{A_h\lambda'_R\lambda_hF_1}{(\lambda_h+\lambda'_R)(\lambda_i+\lambda'_R)}$	j	$\left[A_j + \frac{A_h\lambda_hF_1}{\lambda_h+\lambda'_R} \right] (1-e^{-\gamma\lambda'_R})$

同様な式は胃腸管の各区分について得ることができ、それらを表 A.4 に示す。

この報告書に使用されたコンパートメントモデルの厳密解および近似解 (109)

表 A.4 胃腸管の各区分における娘放射性核種の変換の数を表す近似式。 A_{ST} , A_{SI} , A_{ULI} , A_{LLI} は胃腸管のそれぞれの区分における親核種の変換の数で, λ_B は親核種に固有な, 体液への移動係数の値である。使用した他の記号は第6章, 図 6.1で定義した。

区 分	変 換 の 数
胃	$\frac{A_{ST}\lambda'_R}{\lambda_{ST}+\lambda'_R}$
小 腸	$\frac{A_{ST}\lambda'_R\lambda_{ST}}{(\lambda_{ST}+\lambda'_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)} + \frac{A_{SI}\lambda'_R}{(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)}$
大腸上部	$\frac{A_{ST}\lambda'_R\lambda_{ST}\lambda_{SI}}{(\lambda_{ST}+\lambda'_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)} + \frac{A_{SI}\lambda'_R\lambda_{SI}}{(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)}$ $+ \frac{A_{ULI}\lambda'_R}{(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)}$
大腸下部	$\frac{A_{ST}\lambda'_R\lambda_{ST}\lambda_{SI}\lambda_{ULI}}{(\lambda_{ST}+\lambda'_R)(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)(\lambda_{LLI}+\lambda'_R)}$ $+ \frac{A_{SI}\lambda'_R\lambda_{SI}\lambda_{ULI}}{(\lambda_{SI}+\lambda_B+\lambda'_R)(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)(\lambda_{LLI}+\lambda'_R)} + \frac{A_{ULI}\lambda'_R\lambda_{ULI}}{(\lambda_{ULI}+\lambda'_R)(\lambda_{LLI}+\lambda'_R)}$ $+ \frac{A_{LLI}\lambda'_R}{(\lambda_{LLI}+\lambda'_R)}$

文 献

- ICRP Publication 2, *Report of Committee 2 on Permissible Dose for Internal Radiation*. Pergamon Press, Oxford, 1959.
- Jacquez, J.A. *Compartmental Analysis in Biology and Medicine*. Elsevier, Amsterdam, (1972).
- Rutherford, E. *Radioactive Substances and their Radiations*. pp. 410-431. Cambridge University Press, (1913).
- Skrable, K., French, C., Chabot, G. and Major, A. (1974). A general equation for the kinetics of linear first order phenomena and suggested applications. *Health Phys.*, 27, 155-157.

代謝データ

序

以下のページには、個々の元素の関連する代謝データと、それに続いて、その元素の放射性同位体で、放射性半減期が10分以上のものについてのALIとDACの値の表が示されている。

記述されている代謝モデルは、その元素の安定同位体の化合物に関するものである。文献に示されている残留データは、必要に応じ、問題としている放射性核種の放射性崩壊の補正を行った。胃腸管の吸収は個人個人でかなり変動するので、 f_1 の値すなわち胃腸管に入った後体液に達する安定元素の割合は、1個の有効数字だけで示す(第6章, 6.2節)。吸入については、ALIとDACの値はその元素の個々の化合物にあてはまる異なる吸入のクラス(D, WとY)別に示す(第5章)。

代謝データの中で、時間を記号 t で表してある場合には、特記してある場合を除いてその単位は常に日である。

ALIの値(Bq)は、経口および吸入の経路で人体に入る場合について与えられている。吸入に関する限度は吸入の場合のALIであること、そして、週40時間の労働についてのDACの値(Bq/m³)は便宜上示してあるにすぎず、常に注意して使用すべきであることを強調する(第3章, 3.4節)。吸入に関するALIの値およびDACの値は、AMADが1 μ mの粒子についてのものである。他のサイズの粒子についてこれらの値を補正する方法は第5章, 5.5節に記され、必要な数値データは補遺に与えられている。

ALIの値がある特定の器官または組織に対する非確率的線量当量限度によ

って決まる場合には、確率的影響を制限するための委員会の勧告を満足する年摂取量の最大値を、ALIの下に括弧をつけて示す。非確率的限度が適用される器官または組織名を、これらの2つの値の下に示す。ALIが確率的な限度によって決定される場合には、その値のみを示す(第4章, 4.7節)。

ここに示されるALIとDACの値はすべて職業上被曝する成人に関するものであり、ほかの目的には慎重に使用しなければならない(第9章)。

目 次

原子番号	元 素	頁
1	水 素	113
15	リ ン	121
25	マンガン	124
27	コバルト	128
36	クリプトン	133
38	ストロンチウム	134
40	ジルコニウム	138
41	ニオブ	142
42	モリブデン	146
52	テルル	150
53	ヨウ素	155
55	セシウム	159
58	セリウム	163
84	ポロニウム	167
88	ラジウム	171
90	トリウム	175
92	ウラン	179
94	プルトニウム	185
95	アメリカシウム	191
96	キュリウム	196
98	カリホルニウム	201

水素の代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体の水素含有量	7,000 g
軟組織の水素含有量	6,300 g
水素の1日当たりの摂取量	350 g
人体の水含有量	42,000 g
酸化による水を含めた、水の1日当たりの摂取量	3,000 g

多くの軟組織で、水はその質量の約80%を占める。

2. 代謝モデル

(a) 元素状トリチウム

この報告書の第8章で論じたように、空気中の元素状トリチウムに対する被曝は、肺に入っているトリチウムによって、就労している任意の1年間に肺が受ける総線量当量を考察して制限される。

トリチウム水に対する被曝の限度は、元素状トリチウムに対する被曝の限度よりも4桁以上小さく、実際に起こるほとんどの場合、トリチウム水に対する被曝が制限因子になるであろうということを強調しておく。

(b) トリチウム水

(i) 経口摂取 経口摂取されたトリチウム水は、胃腸管から完全にそし

てただちに吸収され、体内の水全部と急速に混合し、そのため、経口摂取の後いつでも、汗、唾液、尿、血液、不感蒸散、および呼気水蒸気の中のトリチウム水の濃度は同一であると仮定する (Pinson と Langham, 1957)。

(ii) 吸入 トリチウム水により汚染された雰囲気にとさらされると、吸入と正常な状態の皮膚を通しての吸収との両方によってトリチウム水を摂取することになる。

C (Bq m^{-3}) の濃度のトリチウム水で汚染した雰囲気にとさらされると、正常な状態の皮膚を通して $10^{-2}C$ (Bq min^{-1}) の吸収が起こることを Osborne (1966) は示した。 $0.02 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ の率で空気を呼吸する標準人 (ICRP, 1975) では、トリチウム水を吸入する率は $2 \times 10^{-2}C$ (Bq min^{-1}) であり、この全量が体液に吸収されると仮定する。それゆえ、トリチウム水の体液中への総吸収率は $3 \times 10^{-2}C$ (Bq min^{-1}) であり、2,000時間という1年間の労働時間では $3.6 \times 10^6 C$ (Bq) である。このトリチウム水は、人体の軟組織全体の間とただちに均等に分布するものと仮定する。

(iii) 分布と残留 多人数のヒトについてのデータは、トリチウム水の残留が、最初の数か月あるいはそれ以上にわたって実質的に単一の指数関数によって記述されることを示している。しかし、第二の指数項あるいは第三の指数項も観測されたいくつかの例が報告されている (Snyder ら, 1968; Sanders と Reinig, 1968; Moghissi ら, 1972)。すなわち、

$$R(t) = Ae^{-0.693t/T_1} + Be^{-0.693t/T_2} + Ce^{-0.693t/T_3}$$

T_1 の値は、体内水の交替と密接に関連している。体内水の交替は液状の食物の摂取と密接に関連しているため、個人の習慣の違いと周囲の温度によって T_1 はかなり変わると考えるべきである (Wylie ら, 1963; Butler と LeRoy, 1965)。観測された T_1 の値は4—18日の範囲内にある。代表的な値は10日 (Butler と LeRoy, 1965) で、この値は、1日当たり3,000 gの水を摂取し、質量42,000 gの水を全身に保有する標準人 (ICRP, 1975) について得られる値

と一致する。すなわち、

$$T_1 = 0.693 \times \frac{42,000}{3,000} \approx 10 \text{日}$$

第二、第三の指数項は、体内水以外のコンパートメントにトリチウムが存在することを示唆し、事実、有機的に結合したトリチウムが、慢性的にトリチウム水にさらされた動物で認められている (Evans, 1969)。しかし、いろいろのデータ (Snyder ら, 1968; Sanders と Reinig, 1968; Moghissi ら, 1972) から、そのようなプールは、トリチウム水の摂取に由来する全身の預託線量当量の10%程度の寄与をしていると推定してよいであろう。そして、この報告書ではそれらのプールを無視した。

結論として、トリチウム水の摂取に由来する人体組織の預託線量当量の値は、トリチウム水の残留のみを考察して推定してよい。この見解は、数人の著者、たとえば Snyder ら (1968) および Lambert と Clifton (1967) によって確かめられている。

トリチウム水は、摂取した後いつでもすべての軟組織の間に均等に分布し、その残留は10日の半減期をもつ1つの指数関数によって記述されるものと仮定する。したがって、トリチウム水として人体に摂取されたトリチウムのうち、 t 日後に体内に残留する割合は次式で与えられる。

$$R(t) = \exp(-0.693t/10)$$

そして、体内含有量が q (Bq) の場合の軟組織中の濃度 C_0 は次式によって与えられる。

$$C_0 = q/63,000 \quad \text{Bq g}^{-1}$$

ここで、63,000 g は標準人 (ICRP, 1975) の身体内における軟組織の質量である。

(c) 有機化合物

(i) 経口摂取 トリチウムで標識された有機化合物が経口摂取された場

合、かなりの割合が胃腸管内で破壊され、トリチウム水が生成する可能性がある。トリチウムの有機化合物は腸から吸収されたのちにも分解されてトリチウム水となる可能性がある。

げっ歯動物では、トリチウム標識チミジンの90%以上が胃腸管内で破壊され、経口摂取された物質のわずかに約2%が実際にDNAに取り込まれる(LambertとClifton, 1968)。トリチウム標識チミジンが経口摂取された後、DNAに取り込まれるトリチウムの割合は、トリチウム標識チミジンが血中に直接に入った後取り込まれる割合の約1/5である(FeinendegenとCronkite, 1977)。他の核酸前駆物質および大部分の他のトリチウム化合物の血液中之への吸収割合はわかっていない。たいていの場合、その割合は多分トリチウム標識チミジンより大きいであろう。

(ii) 吸入 トリチウムの多くの有機化合物は、普通の場合では揮発性は著しくないので、これらが蒸気として吸入される可能性は少ない。それらを吸入するかもしれないような状況の場合には、それらがいったん肺に入ると、化学形を変えることなしに、ただちにかつ完全に、血液に移行すると仮定するのが用心深いやりかたであろう。

(iii) 分布と残留 代謝の前駆物質であるトリチウム有機化合物は、通常、軟組織全体に分布し、特定の細胞に特異的に濃縮されることはまれである。一つの注目すべき例外はトリチウム標識チミジンであって、分解されなければ、DNAを合成している細胞の核にだけ取り込まれる。マウスでは、体内のDNA合成細胞全体の約45%が胃腸管の内層にあり、約15%が骨髄に見出され、残りは主として脾臓、リンパ組織、皮膚、組織実質に分布している(Hughesら, 1964)。これらの細胞は血液に入ったトリチウム標識チミジンのおよそ30%を取り込み(Feinendegenら, 1973)、血液からのクリアランス速度は1時間よりも短い半減期に対応している。この化合物が取り込まれる効率は経口摂取の後では約1/5に減るが、諸組織および諸細胞間の相対的な分布は、血液から取

り込まれた後の分布と同様であると考えられている(Feinendegen と Cronkite, 1977)。

自己の DNA にトリチウム標識チミジンを組み込んだ細胞のうちのあるものは、10日より長い寿命をもち、自分自身を再生し、分化した、機能的に十分能力のある子孫の細胞を産み出す。これらの細胞が、晩発性の放射線影響の発現に決定的な役割をもつ細胞であることが示唆されている(Cronkite ら, 1973)。

核酸の前駆物質となるその他のトリチウム化合物は、量は異なるが、体内のすべての有核細胞に取り込まれ、そのため軟組織全体に広く分布するようになる。マウスでは、これらの化合物が DNA を合成する細胞を大量に含有する組織中に、トリチウム標識チミジンより低い効率で血液から取り込まれることがわかった(Feinendegen, 1978)。

(iv) 組織の吸収線量 トリチウムで標識されたいくつかの有機化合物について実験動物の器官および組織が受ける平均吸収線量が推定されている。これらの有機化合物には、葉酸(Lambert と Clifton, 1967)、チミジン(Lambert と Clifton, 1968)、性ホルモン(Vennart, 1969)、コルチコステロイド(Stan-deven と Clarke, 1967)が含まれる。Vennart(1969)はこれらの実験の報告を調査、検討し、当時受け入れられていた放射線防護規準のもとでは、トリチウム標識チミジンおよびトリチウム標識葉酸の血液への最大許容年摂取量は、トリチウム水の最大許容年摂取量の約1/3とすべきであるが、しかし、トリチウム標識性ホルモンおよびトリチウム標識コルチコステロイドの最大許容年摂取量は、トリチウム水の最大許容年摂取量の約30倍とすべきであると結論した。細胞核の吸収線量(Berry ら, 1966)、推定された生物効果(Lambert, 1969; Bond と Feinendegen, 1966)、および、もっとも重大な影響を受ける細胞は自己再生と DNA 合成を行う長寿命の細胞である可能性(Feinendegen と Cronkite, 1977)を考えると、トリチウム標識チミジンの血液への取り込みの

1年当たりの限度*はトリチウム水の血液への取り込みの1年当たりの限度*の約1/4から1/50とすべきである。さらに、トリチウム標識チミジンの経口摂取によるALIは、トリチウム水に対するその1/10とする必要があるかもしれない(FeinendegenとCronkite, 1977)。

この報告書では、トリチウムの有機化合物に関する特別なALIの値を勧告していないが、それらはトリチウム水についての値とはかなり異なっているかもしれないこと、そして、トリチウム標識チミジンについての値は1/50であるかもしれないことを記しておく。この正確な比は化合物および体内への摂取経路に左右されるであろう。この問題は、トリチウム水と比較したこれら化合物の効果比に関する今後のデータ、およびこれら化合物の代謝の両方に関連して調査、検討を続ける。

文 献

- Berry, R.J., Oliver, R. and Reiskin, A.B. (1966). Reproductive death of mammalian cells due to beta radiation from incorporated thymidine labelled with ^3H or ^{14}C . *Health Phys.*, **12**, 1461-1466.
- Bond, V.P. and Feinendegen, L.E. (1966). Intranuclear ^3H thymidine: dosimetric, radiological and radiation protection aspects. *Health Phys.*, **12**, 1007-1020.
- Butler, H.L. and LeRoy, J.H. (1965). Observations of biological half-life of tritium. *Health Phys.*, **11**, 283-285.
- Cronkite, E.P., Robertson, J.S. and Feinendegen, L.E. Somatic and teratogenic effects of tritium. In: *Tritium*, Eds. Moghissi, A.A. and Carter, M.W. Messenger Graphics Publ., Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada, 1973.
- Evans, A.G. (1969). New dose estimates from chronic tritium exposures. *Health Phys.*, **16**, 57-63.
- Feinendegen, L.E. (1978). Biological damage from radioactive nuclei incorporated into DNA of cells, implications for radiation biology and radiation protection. 6th Symposium on Microdosimetry, Brussels, 22-26 May. (CEC, 1979).

* 訳注 原文ではALIとなっているが、血中への取り込みに関する限度をいっているので、訳文では取り込みの1年当たり限度とした。

- Feinendegen, L.E. and Cronkite, E.F. (1977). Effects of micro-distribution of radionuclides on recommended limits in radiation protection, a model. *Curr. Top. Radiat. Res. Q.*, **12**, 83-99.
- Feinendegen, L.E., Heiniger, H.J., Friedrich, G. and Cronkite, E.P. (1973). Differences in reutilization of thymidine in hemopoietic and lymphopoietic tissues of the normal mouse. *Cell Tissue Kinet.*, **6**, 573-585.
- Hughes, W.L., Commerford, S.L., Gitlin, D., Krueger, R.C., Schultze, B., Shah, V. and Reilly, P. (1964). Studies on deoxyribonucleic acid metabolism *in vivo*. I. Cell proliferation and death as measured by incorporation and elimination of iododeoxyuridine. *Fed. Proc.*, **23**, 640-648.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Lambert, B.E. (1969). Cytological damage produced in the mouse testes by tritiated thymidine, tritiated water and X-rays. *Health Phys.*, **17**, 547-557.
- Lambert, B.E. and Clifton, R.J. (1967). Radiation doses resulting from the administration of tritiated folic acid and tritiated water to the rat. *Br. J. Radiol.*, **40**, 56-61.
- Lambert, B.E. and Clifton, R.J. (1968). Radiation doses resulting from the ingestion of tritiated thymidine by the rat. *Health Phys.*, **15**, 3-9.
- Moghissi, A.A., Carter, M.W. and Bretthauer, E.W. (1972). Further studies on the long term evaluation of the biological half-life of tritium. *Health Phys.*, **23**, 805-806.
- Osborne, R.V. (1966). Absorption of tritiated water vapour by people. *Health Phys.*, **12**, 1527-1537.
- Pinson, E.A. and Langham, W.H. (1975). Physiology and toxicology of tritium in man. *J. Appl. Physiol.*, **10**, 108.
- Sanders, S.M. Jr. and Reinig, W.C. Assessment of tritium in man. In: *Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides*, Eds. Kornberg, H.A. and Norwood, W.D., pp. 534-542. Excerpta Medica Foundation, Amsterdam, 1968.
- Snyder, W.S., Fish, B.R., Bernard, S.R., Ford, Mary R. and Muir, J.R. (1968). Urinary excretion of tritium following exposure of man to HTO—a two exponential model. *Phys. Med. Biol.*, **13**, 547-559.
- Standeven, Margaret and Clarke, D.A. (1967). Estimation of radiation doses to tissues after administration of tritiated corticosteroids to the rat. *Br. J. Radiol.*, **40**, 48-55.

Vennart, J. (1969). Radiotoxicology of tritium and ^{14}C compounds. *Health Phys.*, **16**, 429-440.

Wylie, K.F., Bigler, W.A. and Grove, G.R. (1963). Biological half-life of tritium. *Health Phys.*, **9**, 911-914.

水素の同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m^3) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射核種	経口	吸入
^3H (トリチウム水)	3×10^9	3×10^9
^3H (元素状トリチウム)	—	—

DAC (Bq/m^3) (40 h/wk)

放射核種	吸入
^3H (トリチウム水)	8×10^5
^3H (元素状トリチウム)	2×10^{10}

リンの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のリン含有量	780 g
骨格のリン含有量	700 g
筋肉のリン含有量	50 g
飲食物からの1日当たりの摂取量	1.4 g

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

リンのいろいろな無機化合物がそうであるように、食餌中のリンは胃腸管からよく吸収される (ICRP, 1975; Wiseman, 1964; Honstead と Brady, 1967; Castle ら, 1964)。この報告書では f_1 をリンのすべての化合物について 0.8 とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は、吸入のクラス W に指定されたあるいくつかの元素のリン酸塩を除き、すべてのリン化合物を吸入のクラス D に指定した。この分類をここでも採用する。そして、ある特定の元素のリン酸塩にあてはまる吸入のクラスに関する情報は、その元素についての代謝データあるいは「肺動態課題グループ」の報告書を参照されたい。

吸入のクラス	f_i
D	0.8
W	0.8
Y	—

(c) 分布と残留

人体のリンの残留は Jackson と Dolphin (1966) により検討されている。リンの全身残留は次の形の関数によってよく表されると、彼らは結論している。

$$R(t) = 0.15e^{-0.693t/0.5} + 0.15e^{-0.693t/2} + 0.40e^{-0.693t/19} + 0.30$$

これら4つの項はそれぞれ、血漿、細胞内液、軟組織および無機質骨と関連したものである (Jackson と Dolphin, 1966; Dyson, 1966)。

この報告書では、リンの分布および残留に使用したモデルは Dyson (1966) が提案したモデルに基づいている。通過コンパートメントに入ったリンは、0.5日の半減期でそこに残留するものと仮定する。このリンのうち、0.15は直接に排泄され、0.15は細胞内液に移ってそこに2日の半減期で残留し、0.4は軟組織に移ってそこに19日の半減期で残留し、0.3は無機質骨に移ってそこに永久に残留するものと仮定する。リンは無機質骨中に永久に残留すると仮定したが、「標準人」(ICRP, 1975) のデータを考察すると、この組織中での残留の半減期はおよそ1,500日である。しかしながら、線量算定の目的には、この報告書で考えているリンのすべての同位体の放射性半減期が1,500日よりもはるかに短いため、永久残留を仮定してよい。

リンは、細胞内液あるいは軟組織のいずれに移るにせよ、線量算定の目的には、無機質骨を除いたすべての器官および組織の全体に均等に分布するものと仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

安定なリンは無機質骨に均等に分布する。線量算定の目的には、15日より長

い放射性半減期をもつリンの同位体は無機質骨に均等に分布するものと仮定し、15日より短い半減期をもつものは骨表面に留まるものと仮定する。

文 献

- Castle, J.N., Scott, K.G. and Reilly, W.A. (1964). The skeletal uptake of radio-phosphorus (P^{32}). *Am. J. Roentgenol.*, **91** 1128-1131.
- Dyson, E.D. (1966). A specific activity method for derived working limits of phosphorus-32. *Health Phys.*, **12**, 1521-1526.
- Honstead, J.F. and Brady, D.N. (1967). The uptake and retention of ^{32}P and ^{65}Zn from the consumption of Columbia River fish. *Health Phys.*, **13**, 455-463.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- ICRP Publication 23, Task Group Report on Reference Man. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Jackson, S. and Dolphin, G.W. (1966). The estimation of internal radiation dose from metabolic and urinary excretion data for a number of important radionuclides. *Health Phys.*, **12**, 481-500.
- Wiseman, G. *Absorption from the Intestine*. pp. 241-243. Academic Press, London, 1964.

リンの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq), および誘導空气中濃度 DAC (Bq/m^3) (40 h/wk)

放射性核種	ALI (Bq)		
	経口	吸入	
		クラスD	クラスW
	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=8 \times 10^{-1}$
^{32}P	2×10^7	3×10^7	1×10^7
^{33}P	2×10^8	3×10^8	1×10^8

放射性核種	DAC (Bq/m^3) (40 h/wk)	
	吸入	
	クラスD	クラスW
	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=8 \times 10^{-1}$
^{32}P	1×10^4	6×10^3
^{33}P	1×10^5	4×10^4

マンガンの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のマンガン含有量	12mg
骨格のマンガン含有量	5.2mg
筋肉のマンガン含有量	1.5mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	3.7mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

マンガンの無機化合物は、胃腸管からわずかししか吸収されないことを示唆する証拠がある (Cotzias, 1962; Underwood, 1971; Furchner ら, 1966)。ヒトの胃腸管からの $MnCl_2$ の吸収割合は、正常人で 0.06 から 0.16 の範囲にある (MacDonald と Figueroa, 1969) ので、マンガンのすべての化合物について f_1 を 0.1 とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は、マンガンの酸化物、水酸化物、ハロゲン化物および硝酸塩を吸入のクラスWに、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラスDに指定した。イヌについての研究結果 (Morrow ら, 1964) はこの分類と一致しており、それをここで採用した。

吸入のクラス	f_1
D	0.1
W	0.1
Y	—

(c) 分布と残留

マンガンの代謝は動物種間でかなりの変動を示し (Furchner ら, 1966; Mahoney と Small, 1968), また, 食餌中のマンガンと鉄のレベルにも影響される (Mahoney と Small, 1968; Britton と Cotzias, 1966)。Mahoney と Small (1968) の志願者による人体実験では, 注射後の最初の60日間におけるマンガンの全身残留は次式で記述しうることが示されている。

$$R(t) = 0.3e^{-0.693t/4} + 0.7e^{-0.693t/88}$$

動物種間でマンガンの代謝がかなり異なるので, ラットにおけるマンガンの組織間分布の測定結果 (Furchner ら, 1966) をヒトに直接補外することはできない。しかしながら, これらの測定結果は, 骨および脳が人体のその他の大部分の器官および組織よりもマンガンをずっと多く保持することを示している。この報告書では, 通過コンパートメントに入ったマンガンのうち, 0.35が骨に移ってそこに40日の半減期で残留すると仮定する。残りについては, 0.1と0.15が肝臓に移って, そこにそれぞれ4日と40日の半減期で残留すると仮定する。また0.4が人体のその他すべての器官および組織に均等に分布し, その半分ずつがそれぞれ4日と40日の半減期でそれらの器官および組織に残留すると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

骨格中のマンガンの微細分布に関して利用できる情報はないようである。しかし, ラットの骨からのマンガンの比較的急速なクリアランス (Furchner ら,

1966) は、この元素の大部分が骨表面にゆるく結合していることを示唆している。したがって、線量算定の目的には、この報告書で考察しているマンガンのすべての同位体は、骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Britton, A.A. and Cotzias, G.C. (1966). Dependence of manganese turnover on intake. *Am. J. Physiol.*, **211**, 203-206.
- Cotzias, G.C. Manganese. In: *Mineral Metabolism*, Vol. 2, Part B, Eds. Comar, C.L. and Bronner, F. pp. 403-442. Academic Press, New York, 1962.
- Furchner, J.E., Richmond, C.R. and Drake, G.A. (1966). Comparative metabolism of radionuclides in mammals—III. Retention of manganese-54 in the mouse, rat, monkey and dog. *Health Phys.*, **12**, 1415-1423.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- MacDonald, N.S. and Figueroa, W.G. Manganese absorption and retention in humans. In: *Semi-Annual Progress Report for the Period Ending 30 June 1969*, pp. 51-52. California University, Laboratory of Nuclear Medicine and Radiation Biology, Los Angeles. (UCLA-12-724), 1969.
- Mahoney, J.P. and Small, W.J. (1968). Studies on manganese III. The biological half-life of radiomanganese in man and factors which affect this half-life. *J. Clin. Invest.*, **47**, 643-653.
- Morrow, P.E., Gibb, F.R. and Johnson, L. (1964). Clearance of insoluble dust from the lower respiratory tract. *Health Phys.*, **10**, 543-555.
- Underwood, E.J. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. 3rd ed., pp. 177-207. Academic Press, London, 1971.

マンガンの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq), および誘導空气中濃度 DAC(Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	ALI(Bq)		
	経口 $f_1=1\times 10^{-1}$	吸入	
		クラスD $f_1=1\times 10^{-1}$	クラスW $f_1=1\times 10^{-1}$
⁵¹ Mn	7×10^8	2×10^9	2×10^9
⁵² Mn	3×10^7	4×10^7	3×10^7
^{52m} Mn	1×10^9 (1×10^9) 胃壁	3×10^9	4×10^9
⁵³ Mn	2×10^9	5×10^8 (9×10^8) 骨表面	4×10^8
⁵⁴ Mn	7×10^7	3×10^7	3×10^7
⁵⁶ Mn	2×10^8	6×10^8	8×10^8

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸入	
	クラスD	クラスW
	$f_1=1\times 10^{-1}$	$f_1=1\times 10^{-1}$
⁵¹ Mn	8×10^5	9×10^5
⁵² Mn	2×10^4	1×10^4
^{52m} Mn	1×10^6	2×10^6
⁵³ Mn	2×10^5	2×10^5
⁵⁴ Mn	1×10^4	1×10^4
⁵⁶ Mn	2×10^5	3×10^5

コバルトの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のコバルト含有量	1.5mg
肝臓のコバルト含有量	0.11mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	0.30mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

人についての収支研究のデータは、食餌中のコバルトの胃腸管からの吸収割合は、0.2と0.95の間にあることを示している(HarpとScoular, 1952; Engelら, 1967; Hubbardら, 1966; Valbergら, 1969)。放射性コバルトの吸収は、通常は CoCl_2 として投与されるが、一般にこれよりかなり少なく、投与されたコバルトの量と関係があるようである(PaleyとSussman, 1963; Smithら, 1972)。酸化コバルトを吸入したヒトから得られた証拠(Sillら, 1964)は、この化合物の胃腸管からの吸収がごく少ないことを示唆している。

以上の考察から、 f_1 はコバルトの有機錯化合物について、また、酸化物と水酸化物を除くこの元素の無機化合物すべてについて、担体がある場合は0.3とする。コバルトの酸化物および水酸化物、および、トレーサ量で経口摂取されたこの元素のすべての無機化合物については、 f_1 を0.05とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は、コバルトの酸化物、水酸化物、ハロゲン化物および硝酸塩を吸入のクラスWに、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラスDに指定した。マウス (ICRP, 1966) およびイヌ (Barnes, 1976) についての実験結果はこの分類と一致している。しかし、ヒトについての経験 (Newton と Rundo, 1971) によれば、コバルトの不溶性化合物は、この分類が示唆するよりもはるかに長く肺に残留するらしい。この理由で、この報告書では、コバルトの酸化物、水酸化物、ハロゲン化物および硝酸塩を吸入のクラス Y に指定し、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラス W に指定する。

人体実験による証拠 (Paley と Sussman, 1963; Smith ら 1972) は、トレーサ量のコバルトは胃腸管からわずかしか吸収されないことを示唆している。さらに、実験データは肺から胃腸管に移行するコバルトがわずかしか吸収されないことを示唆している (Sill ら, 1964)。これらの理由で、吸入した後胃腸管に到達したコバルトについては f_1 を 0.05 とする。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	0.05
Y	0.05

(c) 分布と残留

コバルトの長期残留に関する最大の貯蔵場所は骨であろうという示唆 (Holins と McCullough, 1971) があつたが、ラットに毎日 ^{60}Co を飲料水中から摂取させた実験では、この放射性核種の骨中の濃度は肝臓中の濃度よりもつねに低いことを示した (Thomas ら, 1976)。ここでは、体内に取り込まれた後の全身のコバルトは肝臓を除く体内に均等に分布するものと仮定する。肝臓中の

コバルトの濃度は人体の残りの部分の濃度の4倍であると仮定する。

2人のヒトについて1,000日間追跡した Smith らのデータ (1972) から誘導された次の残留関数が、体内に取り込まれた後全身に分布するすべてのコバルトにあてはまるものと仮定する。

$$R(t) = 0.5e^{-0.693t/0.5} + 0.3e^{-0.693t/6} + 0.1e^{-0.693t/60} + 0.1e^{-0.693t/800}$$

この関数は、これより短期間の追跡ではあるがもっと多くの人のデータに基づいて Letourneau ら (1972) が誘導した関数と非常に似ている。

したがって、通過コンパートメントに入ったコバルトのうち、0.5の割合が直接に排泄され、0.05が肝臓に移り、また、0.45が人体のその他の器官および組織に移って、そこに均等に分布するものと仮定する。通過コンパートメントから人体の任意の組織に移行したコバルトのうち、0.6、0.2および0.2の割合が、それぞれ、6日、60日および800日の生物学的半減期で残留するものと仮定する。コバルトは0.5日の半減期で通過コンパートメント中に残留するものと仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

体内に取り込まれた後の全身のコバルトは、肝臓以外の人体のすべての器官および組織の全体に均等に分布するものと仮定する。したがって、骨の線量算定の目的には、コバルトの同位体を分類する必要はない。

文 献

- Barnes, J.E., Kanapilly, G.M. and Newton, G.J. (1976). Cobalt-60 oxide aerosols: methods of production and short-term retention and distribution kinetics in the beagle dog. *Health Phys.*, **30**, 391-398.
- Engel, R.W., Price, N.O. and Miller, R.F. (1967). Copper, manganese, cobalt and molybdenum balance in pre-adolescent girls. *J. Nutr.*, **92**, 197-204.
- Harp, M.J. and Scoular, F.I. (1952). Cobalt metabolism of young college women on self-selected diets. *J. Nutr.*, **47**, 67-72.

- Hollins, J.G. and McCullough, R.S. (1971). Radiation dosimetry of internal contamination by inorganic compounds of cobalt: an analysis of cobalt metabolism in rats. *Health Phys.*, **21**, 233-246.
- Hubbard, D.M., Creech, F.M. and Cholak, J. (1966). Determination of cobalt in air and biological material. *Arch. Environ. Health*, **13**, 190-194.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Letourneau, E.G., Jack, G.C., McCullough, R.S. and Hollins, J.G. (1972). The metabolism of cobalt by the normal human male: whole body retention and radiation dosimetry. *Health Phys.*, **22**, 451-459.
- Newton, D. and Rundo, J. (1971). The long-term retention of inhaled cobalt-60. *Health Phys.*, **21**, 377-384.
- Paley, K.R. and Sussman, E.S. (1963). Absorption of radioactive cobaltous chloride in human subjects. *Metabolism*, **12**, 975-982.
- Sill, C.W., Anderson, J.I. and Percival, D.R. Comparison of excretion analysis with whole-body counting for assessment of internal radioactive contaminants. In: *Assessment of Radioactivity in Man*. Vol. 1, pp. 217-229. IAEA, Vienna, 1964.
- Smith, T., Edmonds, C.J. and Barnaby, C.F. (1972). Absorption and retention of cobalt in man by whole-body counting. *Health Phys.*, **22**, 359-367.
- Thomas, R.G., Furchner, J.E., London, J.E., Drake, G.A., Wilson, J.S. and Richmond, C.R. (1976). Comparative metabolism of radionuclides in mammals—X. Retention of tracer-level cobalt in the mouse, rat, monkey and dog. *Health Phys.*, **31**, 323-333.
- Valberg, L.S., Ludwig, J. and Olatunbosun, D. (1969). Alteration in cobalt absorption in patients with disorders of iron metabolism. *Gastroenterology*, **56**, 241-251.

コバルトの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	経 口		吸 入	
			クラスW	クラスY
	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=3 \times 10^{-1}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$
⁵⁵ Co	4×10^7	6×10^7	1×10^8	1×10^8
⁵⁶ Co	2×10^7	2×10^7	1×10^7	7×10^6
⁵⁷ Co	3×10^8	2×10^8	1×10^8	2×10^7
⁵⁸ Co	6×10^7	5×10^7	4×10^7	3×10^7
^{58m} Co	2×10^9	2×10^9	3×10^9	2×10^9
⁶⁰ Co	2×10^7	7×10^6	6×10^6	1×10^6
^{60m} Co	4×10^{10} (5×10^{10}) 胃壁	4×10^{10} (5×10^{10}) 胃壁	1×10^{11}	1×10^{11}
⁶¹ Co	7×10^8	8×10^8	2×10^9	2×10^9
^{62m} Co	1×10^9 (2×10^9) 胃壁	1×10^9 (2×10^9) 胃壁	6×10^9	6×10^9

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$
⁵⁵ Co	4×10^4	4×10^4
⁵⁶ Co	5×10^3	3×10^3
⁵⁷ Co	4×10^4	1×10^4
⁵⁸ Co	2×10^4	1×10^4
^{58m} Co	1×10^6	1×10^6
⁶⁰ Co	3×10^3	5×10^3
^{60m} Co	6×10^7	4×10^7
⁶¹ Co	1×10^6	9×10^5
^{62m} Co	3×10^6	2×10^6

クリプトンの代謝データ

クリプトンについては代謝モデルは提案されていない。この報告書の第8章で説明したように、放射性希ガスの雲中の被曝は主として体外照射によって決まる。その理由は、組織に吸収されたガスあるいは肺に入っているガスによる線量当量率は、体外照射による器官および組織の線量当量率と比較して無視できるからである。それゆえ、クリプトンについて勧告されたDACの値は体外照射のみの考察に基づいている。

クリプトンの同位体に関する誘導空气中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)*

放射性核種	半無限大の雲	1000m ³ の部屋	500m ³ の部屋	100m ³ の部屋
⁷⁴ Kr	1×10 ⁵	1×10 ⁶ (3×10 ⁶) 皮膚	1×10 ⁶ (3×10 ⁶) 皮膚	1×10 ⁶ (6×10 ⁶) 皮膚
⁷⁶ Kr	3×10 ⁵	7×10 ⁶	9×10 ⁶	2×10 ⁷
⁷⁷ Kr	1×10 ⁵	2×10 ⁶ (3×10 ⁶) 皮膚	2×10 ⁶ (4×10 ⁶) 皮膚	2×10 ⁶ (7×10 ⁶) 皮膚
⁷⁹ Kr	6×10 ⁵	1×10 ⁷	2×10 ⁷	3×10 ⁷
⁸¹ Kr	2×10 ⁷	2×10 ⁸ (5×10 ⁸) 水晶体	2×10 ⁸ (6×10 ⁸) 水晶体	3×10 ⁸ (9×10 ⁸) 水晶体
^{83m} Kr	9×10 ⁸ (7×10 ⁹) 水晶体	9×10 ⁸ (7×10 ⁹) 水晶体	9×10 ⁸ (7×10 ⁹) 水晶体	9×10 ⁸ (8×10 ⁹) 水晶体
^{85m} Kr	8×10 ⁵	5×10 ⁶ (2×10 ⁷) 皮膚	5×10 ⁶ (3×10 ⁷) 皮膚	5×10 ⁶ (4×10 ⁷) 皮膚
⁸⁵ Kr	5×10 ⁶ (5×10 ⁷) 皮膚	5×10 ⁶ (1×10 ⁹) 皮膚	5×10 ⁶ (1×10 ⁹) 皮膚	5×10 ⁶ (2×10 ⁹) 皮膚
⁸⁷ Kr	2×10 ⁵	8×10 ⁵ (5×10 ⁶) 皮膚	8×10 ⁵ (6×10 ⁶) 皮膚	8×10 ⁵ (1×10 ⁷) 皮膚
⁸⁸ Kr	7×10 ⁴	2×10 ⁶	2×10 ⁶	3×10 ⁶ (4×10 ⁶) 皮膚

* 訳注 水晶体は1年につき0.3 Svの限度で計算してある。なお、16頁の訳注参照。

ストロンチウムの代謝データ

1. 代謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のストロンチウム含有量	0.32 g
骨格のストロンチウム含有量	0.32 g
軟組織のストロンチウム含有量	3.3mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	1.9mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

ヒトと動物のデータは両方とも、食餌中のストロンチウム、および、ストロンチウムの可溶性の塩が胃腸管から取り込まれる割合は、0.2から0.5までの範囲内にあることを示唆している (ICRP, 1975; ICRP, 1973; Snyder ら, 1964; Shimmins ら, 1967; Taylor, 1967)。しかし、 SrTiO_3 は胃腸管からほとんど吸収されない (McClellan と Bustad, 1964)。この報告書では、 f_1 はストロンチウムの可溶性の塩について0.3、 SrTiO_3 について0.01とした。

(b) 吸入のクラス

Morrow ら (1968) は、 $^{85}\text{SrCl}_2$ が肺から急速に除去されることを示した。しかし、 SrTiO_3 はもっとずっと長く残留する (Fish ら, 1964)。この報告書では、ストロンチウムの可溶性の化合物を吸入のクラスDに、 SrTiO_3 を吸入

のクラスYに指定した。

吸入のクラス	f_1
D	0.3
W	—
Y	0.01

(c) 分布と残留

成人におけるストロンチウムの残留についてのきわめて詳細なモデルが、「成人のアルカリ土類代謝に関する課題グループ」によって開発された(ICRP, 1973)。ストロンチウムの放射性同位体1 Bqが通過コンパートメントに入ってから50年の間に、軟組織、皮質骨および梁骨中で生じる自発核変換の総数は、この課題グループの報告書(ICRP, 1973)に示された残留関数を使って導くことができる。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

第7章で記述したように、15日より長い放射性半減期をもつアルカリ土類の同位体は無機質骨の体積全体に均等に分布すると仮定する。これに反し、15日より短い放射性半減期をもつ同位体は、骨表面を覆う薄い層に分布すると仮定する。したがって、 ^{90}Sr 、 ^{86}Sr および ^{89}Sr は無機質骨の体積全体に分布すると仮定し、ストロンチウムのその他の放射性同位体はすべて、骨格に沈着した後いつでも骨表面に分布していると仮定する。

文 献

- Fish, B.R., Bernard, S.R., Royster, G.W. Jr., Farabee, L.B., Brown, P.E. and Patterson, G.R. Jr. Applied internal dosimetry. In: *Health Physics Division Annual Progress Report Period Ending 31 July 1964*, pp. 222-226. Oak Ridge National Laboratory (ORNL 3697), 1967.

- ICRP Publication 20, *Task Group Report on Alkaline Earth Metabolism in Adult Man*. Pergamon Press, Oxford, 1973.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- McClellan, R.O. and Bustad, L.K. Gastrointestinal absorption of Sr^{85} titanate. In *Hanford Biology Research Annual Report for 1963*, pp. 100-101. Washington (HW 80500), 1964.
- Morrow, P.E., Gibb, F.R., Davies, H. and Fisher, M. (1968). Dust removal from the lung parenchyma: an investigation of clearance simulants. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **12**, 372-396.
- Shimmins, J., Smith, D.A., Nordin, B.E.C. and Burkinshaw, L. A comparison between calcium-45 and strontium-85 absorption, excretion and skeletal uptake. In: *Strontium Metabolism*, Eds. Lenihan, J.M.A., Loutit, J.F. and Martin, J.H., pp. 149-159. Academic Press, London, 1967.
- Snyder, W.S., Cook, M.J. and Ford, M.R. (1964). Estimates of (MPC)_w for occupational exposure to Sr^{90} , Sr^{89} and Sr^{85} . *Health Phys.*, **10**, 171-182.
- Taylor, D.M. The role of oxidative phosphorylation in calcium and strontium absorption from the gastrointestinal tract. In: *Strontium Metabolism*, Eds. Lenihan, J.M.A., Loutit, J.F. and Martin, J.H., pp. 175-180. Academic Press, London, 1967.

ストロンチウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空

気中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	経 口		吸 入	
			クラスD	クラスY
	$f_1=3\times 10^{-1}$	$f_1=1\times 10^{-2}$	$f_1=3\times 10^{-1}$	$f_1=1\times 10^{-2}$
⁸⁰ Sr	4×10^{10}	4×10^{10}	8×10^{10}	9×10^{10}
⁸¹ Sr	9×10^8	9×10^8	3×10^9	3×10^9
⁸³ Sr	1×10^8	8×10^7	3×10^8	1×10^8
^{85m} Sr	8×10^8	8×10^9	2×10^{10}	3×10^{10}
⁸⁵ Sr	9×10^7	1×10^8	1×10^8	6×10^7
^{87m} Sr	2×10^8	1×10^9	5×10^9	6×10^8
⁸⁹ Sr	2×10^7	2×10^7 (2×10^7) 大腸下部壁	3×10^7	5×10^8
⁹⁰ Sr	1×10^6 (1×10^6) 骨表面	2×10^7	7×10^5 (8×10^5) 骨表面	1×10^5
⁹¹ Sr	8×10^7	6×10^7	2×10^8	1×10^8
⁹² Sr	1×10^8	1×10^8	3×10^8	2×10^8

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスD	クラスY
	$f_1=3\times 10^{-1}$	$f_1=1\times 10^{-2}$
⁸⁰ Sr	3×10^7	4×10^7
⁸¹ Sr	1×10^6	1×10^6
⁸³ Sr	1×10^5	5×10^4
^{85m} Sr	9×10^6	1×10^7
⁸⁵ Sr	4×10^4	2×10^4
^{87m} Sr	2×10^6	2×10^6
⁸⁹ Sr	1×10^4	2×10^3
⁹⁰ Sr	3×10^2	6×10^1
⁹¹ Sr	9×10^4	5×10^4
⁹² Sr	1×10^5	1×10^5

ジルコニウムの代謝データ

1. 代謝

「標準人」(ICRP, 1975)には、軟組織中のジルコニウムの全含有量が420 mgと記載されているが、骨格中の含有量については情報が与えられていない。動物についての研究によれば、身体のジルコニウムの大部分は骨に含まれることが示唆される(Thomasら1971; Schiessleら1961)。

飲食物からの1日当たりの摂取量(ICRP, 1975) 4.2mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

いろいろなジルコニウム化合物のラットの胃腸管吸収に関する比較研究からFletcher(1969)は、取り込み割合が0.0003から0.002まで変動することを見出した。白石と市川(1972)は成熟ラットで同様な結果を報告しているが、幼若動物における胃腸管吸収はこの値よりかなり大きいことを見出している。この報告書においては、すべてのジルコニウム化合物について f_1 を0.002とする。

(b) 吸入のクラス

ICRPの「肺動態課題グループ」(1966)は、炭化ジルコニウムを吸入のクラスYに、ジルコニウムの酸化物、水酸化物、ハロゲン化物および硝酸塩を吸入のクラスWに、そしてこの元素のその他すべての化合物を吸入のクラスDに指定した。マウスの実験(Thomasら, 1971)およびヒトについての経験(Cofield,

1963; Waligora, 1971) はこの分類と一致しており、ここではこの分類を採用した。

実験データが何もないので、吸入した後胃腸管に入ったジルコニウムのすべての化合物について f_1 を 0.002 とした。

吸入のクラス	f_1
D	0.002
W	0.002
Y	0.002

(c) 分布と残留

Furchner ら (1964) は、マウスの腹腔内に注射したクエン酸ジルコニウムの、注射後 420 日間にわたる全身残留を次式で表した。

$$R(t) = 0.5e^{-0.693t/0.5} + 0.2e^{-0.693t/7} + 0.3e^{-0.693t/7700}$$

人については、静脈注射後ジルコニウムが身体から急速に失われるという証拠は何もない (Mealey, 1957)。Furchner ら (1964) によって与えられた残留関数の短期成分は捨て、ヒトにあてはまる全身残留関数を次のように仮定した。

$$R(t) = 0.5e^{-0.693t/7} + 0.5e^{-0.693t/8000}$$

この関数の長期成分は無機質骨に関連するものと仮定され、短期成分は人体のその他すべての器官および組織に関連するものと仮定される。したがって、通過コンパートメントに入ったジルコニウムのうち、0.5 は骨に移行してそこに 8,000 日の生物学的半減期で残留すると仮定し、0.5 は人体のその他すべての器官および組織に移行してそこに 7 日の生物学的半減期で残留すると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

ジルコニウムは無機質骨の主要成分ではなく、アルカリ土類元素となんらかの特別な化学的親和性をもつものでもない。これらの理由により、線量算定の

目的には、ジルコニウムは骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布しているとは仮定する。

文 献

- Cofield, R.E. (1963). *In vivo* gamma spectrometry for inhalations of neptunium-237-protactinium-233, cobalt-60, and zirconium-95-niobium-95. *Health Phys.*, **9**, 283-292.
- Fletcher, C.R. (1969). The radiological hazards of zirconium-95 and niobium-95. *Health Phys.*, **16**, 209-220.
- Furchner, J.E., Richmond, C.R. and Trafton, G.A. Retention of zirconium⁹⁵ after oral and intraperitoneal administration to mice. In: *Biological and Medical Research Group (H4) of the Health Division Annual Report July 1962 through June 1963*, pp. 53-58. Los Alamos Scientific Laboratory (LAMS-3034), 1964.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Mealey, J. (1957). Turnover of carrier-free zirconium-89 in man. *Nature*, **179**, 673-674.
- Schiessle, W., Philipp, K., Jung-Langhorst, U. and Schmidtke, I. (1961). Tierexperimentelle inhalationsuntersuchungen mit radioaktivem zirkonium. *Strahlentherapie*, **116**, 566-584.
- Shiraishi, Y. and Ichikawa, R. (1972). Absorption and retention of ¹⁴⁴Ce and ⁹⁵Zr-⁹⁵Nb in newborn, juvenile and adult rats. *Health Phys.*, **22**, 373-378.
- Thomas, R.G., Walker, S.A. and McClellan, R.O. (1971). Relative hazards for inhaled ⁹⁵Zr and ⁹⁵Nb particles formed under various thermal conditions. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **138**, 228-234.
- Waligora, S.J. (1971). Pulmonary retention of zirconium oxide (⁹⁵Nb) in man and beagle dogs. *Health Phys.*, **20**, 89-91.

ジルコニウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq)

および誘導空気中濃度 DAC (Bq/m³, 40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入			
	経 口	クラスD	クラスW	クラスY
	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$
⁸⁶ Zr	5×10^7	1×10^8	1×10^8	9×10^7
⁸⁸ Zr	1×10^8	8×10^6	2×10^7	1×10^7
⁸⁹ Zr	6×10^7	1×10^8	9×10^7	9×10^7
⁹³ Zr	5×10^7 (1×10^8) 骨表面	2×10^5 (6×10^5) 骨表面	9×10^5 (2×10^6) 骨表面	2×10^6 (3×10^6) 骨表面
⁹⁵ Zr	5×10^7	5×10^6 (1×10^7) 骨表面	1×10^7	1×10^7
⁹⁷ Zr	2×10^7	7×10^7	5×10^7	5×10^7

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入		
	クラスD	クラスW	クラスY
	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$
⁸⁶ Zr	6×10^4	4×10^4	4×10^4
⁸⁸ Zr	3×10^3	7×10^3	5×10^3
⁸⁹ Zr	5×10^4	4×10^4	4×10^4
⁹³ Zr	1×10^2	4×10^2	9×10^2
⁹⁵ Zr	2×10^3	6×10^3	4×10^3
⁹⁷ Zr	3×10^4	2×10^4	2×10^4

ニオブの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

軟組織のニオブ含有量	110mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	0.62mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

尿中に排泄されたニオブのレベルの観察では、食餌中のニオブの胃腸管による吸収割合は少なくとも0.6であることが示されている (Schroeder と Balassa, 1965)。また、「標準人」(ICRP, 1975) に与えられた摂取量および軟組織中の含有量に関するデータも、食餌中のニオブの大部分は胃腸管から吸収されることを示している。しかし、この元素の多くの化合物を用いた小動物の研究は、胃腸管からの吸収割合が0.01あるいはそれ以下であることを示している (Fletcher, 1969; Furchner と Drake; 1971)。この報告書では、0.01という値がニオブの化合物に対する職業上の被曝について妥当と考えられるので、 f_1 を0.01とした。

(b) 吸入のクラス

吸入された酸化ニオブは肺に長期間残留する (Thomas ら, 1971; McClellan, 1968)。シュウ酸ニオブは、シュウ酸ジルコニウムよりも速く肺から失われる (Thomas ら, 1971) が、イヌではかなりの割合が300日以上の生物学的半減期

で残留する (McClellan, 1968)。

ニオブの酸化物および水酸化物を吸入のクラスYに、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラスWに指定する。

吸入のクラス	f_i
D	—
W	0.01
Y	0.01

(c) 分布と残留

Furchner と Drake (1971) は、マウス、ラット、サルおよびイヌのニオブの代謝を比較し、またそれより前の文献を調査、検討した。彼らの研究は、ニオブが全身の平均値の10倍の濃度で無機質骨に選択的に残留し、腎臓、脾臓および精巣に全身の平均値の3倍から5倍の濃度で選択的に残留することを示している。

彼らは、サルおよびイヌでは静脈注射を1回行った後のニオブの残留が、次式の残留関数でよく記述されることを見出した。

$$R(t) = \alpha e^{-0.693t/T_1} + (1-\alpha)e^{-0.693t/T_2}$$

Furchner と Drake のデータ (1971) は、 α の値が0.5、 T_1 の値が6日、そして T_2 の値がイヌの100日からマウスの460日までの範囲にあることを示している。すべての器官および組織は同じ速さでニオブを失うようにみえる (Furchner と Drake, 1971) ので、器官および組織のそれぞれについて同じ残留関数があてはまると仮定する。そこで、通過コンパートメントに入ったニオブのうち、0.71、0.018、0.01、0.002 および 0.26 の割合がそれぞれ、無機質骨、腎臓、脾臓、精巣およびその他すべての組織に移ると仮定する。これらの器官あるいは組織の任意の1つに入ったニオブのうち、0.5は6日の半減期で残留し、残りの0.5は200日の半減期で残留すると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

ニオブの骨格内の全体的な分布を測定したオートラジオグラフによる研究があるが (Bäckström ら, 1967), 分布のもっと詳細な研究は行われていないようである。この報告書では, ニオブのもっとも寿命の長い放射性同位体である ^{93m}Nb と ^{94}Nb は, 無機質骨に沈着した後いつでもその無機質骨の体積全体に均等に分布していると仮定し, 一方, この元素のその他すべての放射性同位体は, 骨格に沈着した後いつでも骨表面に分布していると仮定する。

文 献

- Bäckström, J., Hammarström, L. and Nelson, A. (1967). Distribution of zirconium and niobium in mice: autoradiographic study. *Acta Radiol.*, **6**, 122-128.
- Fletcher, C.R. (1969). The radiological hazards of zirconium-95 and niobium-95. *Health Phys.*, **16**, 209-220.
- Furchner, J.E. and Drake, G.A. (1971). Comparative metabolism of radionuclides in mammals—VI. Retention of ^{95}Nb in the mouse, rat, monkey and dog. *Health Phys.*, **21**, 173-180.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- McClellan, R.O. *Fission Product Inhalation Program. Annual Report 1967-1968*, pp. 115-121. Lovelace Foundation, Albuquerque (LF 39), 1968.
- Schroeder, H.A. and Balassa, J.J. (1965). Abnormal trace metals in man: niobium. *J. Chron. Dis.*, **18**, 229-241.
- Thomas, R.G., Walker, S.A. and McClellan, R.O. (1971). Relative hazards for inhaled ^{95}Zr and ^{95}Nb particles formed under various thermal conditions. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **138**, 228-234.

ニオブの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq)および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	ALI (Bq)		
	経口 $f_1=1 \times 10^{-2}$	吸入	
		クラスW $f_1=1 \times 10^{-2}$	クラスY $f_1=1 \times 10^{-2}$
⁸⁵ Nb	2×10 ⁹ (3×10 ⁹) 胃壁	8×10 ⁹	8×10 ⁹
⁸⁹ Nb (66 min)	4×10 ⁸	2×10 ⁹	1×10 ⁹
⁸⁹ Nb (122 min)	2×10 ⁸	7×10 ⁸	6×10 ⁸
⁹⁰ Nb	4×10 ⁷	1×10 ⁸	9×10 ⁷
^{93m} Nb	3×10 ⁸ (4×10 ⁸) 大腸下部壁	5×10 ⁷	6×10 ⁶
⁹⁴ Nb	4×10 ⁷	7×10 ⁶	6×10 ⁵
⁹⁵ Nb	8×10 ⁷	5×10 ⁷	4×10 ⁷
^{95m} Nb	8×10 ⁷ (9×10 ⁷) 大腸下部壁	1×10 ⁸	8×10 ⁷
⁹⁶ Nb	4×10 ⁷	1×10 ⁸	9×10 ⁷
⁹⁷ Nb	8×10 ⁸	3×10 ⁹	3×10 ⁹
⁹⁸ Nb	5×10 ⁸	2×10 ⁹	2×10 ⁹

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=1 \times 10^{-2}$	$f_1=1 \times 10^{-2}$
⁸⁵ Nb	4×10 ⁶	3×10 ⁶
⁸⁹ Nb (66 min)	6×10 ⁵	6×10 ⁵
⁸⁹ Nb (122 min)	3×10 ⁵	2×10 ⁵
⁹⁰ Nb	4×10 ⁴	4×10 ⁴
^{93m} Nb	2×10 ⁴	3×10 ³
⁹⁴ Nb	3×10 ³	2×10 ²
⁹⁵ Nb	2×10 ⁴	2×10 ⁴
^{95m} Nb	4×10 ⁴	3×10 ⁴
⁹⁶ Nb	4×10 ⁴	4×10 ⁴
⁹⁷ Nb	1×10 ⁶	1×10 ⁶
⁹⁸ Nb	8×10 ⁵	8×10 ⁵

モリブデンの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のモリブデン含有量	9.5mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	0.3mg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

モリブデン酸塩, MoO_3 , あるいは CaMoO_4 のかたちのモリブデンは胃腸管から容易に吸収される (Comar, 1948; Underwood, 1971; Anke ら, 1971)。しかし, MoS_2 はわずかししか吸収されない (Underwood, 1971)。この報告書では, f_1 を, MoS_2 については 0.05, この元素のその他すべての化合物については 0.8 とした。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は, モリブデンの酸化物および水酸化物を吸入のクラス Y に, 硫化物, ハロゲン化物および硝酸塩を吸入のクラス W に, そして, この元素のその他すべての化合物を吸入のクラス D に指定した。モリブデン酸アンモニウムおよび酸化モリブデンを用いたイヌの実験ではこの分類と一致しているが, 塩化モリブデンはクラス W の化合物よりもクラス D の化合物に似た挙動をとるようである (Cuddihy ら, 1969)。

この報告書では, 吸入のクラス Y に指定した酸化物, 水酸化物および MoS_2 を除き, モリブデンのすべての化合物を吸入のクラス D に指定した。

吸入のクラス	f_1
D	0.8
W	—
Y	0.05

(c) 分布と残留

モリブデン酸の塩を投与したマウスを、注射して1時間後および1日後に殺した。この放射性核種の最大の濃度は、これらの動物の肝臓および腎臓中に認められた (Rosoff と Spencer, 1973)。モリブデンを飼料とともに食べさせたヒツジでは、この元素が骨格中で最大の濃度になり、その他すべての器官および組織中では濃度はほぼ等しかった (Dick, 1956)。イヌでは、この元素のいろいろな化合物を吸入した後に肺から移行したモリブデンはおもに肝臓、骨格、筋肉および腎臓に沈着し、肝臓および腎臓中の濃度が最大である (Cuddihyら, 1969)。

この報告書では、通過コンパートメントに入ったモリブデンのうち、0.3, 0.15, 0.05および0.5の割合が、それぞれ、肝臓、無機質骨、腎臓およびその他すべての組織に沈着するものと仮定する。これらの組織すべてにおける残留は、Rosoff と Spencer (1964) によって測定された、ヒトにおけるモリブデンの全身残留 (次式) に従うものと仮定する。

$$R(t) = 0.1e^{-0.693t/1} + 0.9e^{-0.693t/50}$$

すなわち、通過コンパートメントから人体の任意の器官あるいは組織に移行するモリブデンのうち、0.1および0.9の割合がそれぞれ1日および50日の半減期で残留するものと仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

この報告書で考察するモリブデンの放射性同位体はいずれも3日より長い放

放射性半減期をもたない*。したがって、線量算定の目的には、これらの放射性同位体は骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると考えるところとする。

文 献

- Anke, M., Hennig, A., Dietrich, M., Hoffmann, G., Wicke, G. and Pflug, D. (1971). Resorption, exkretion und verteilung von 99 molybdaen nach oraler gabe an laktierende wiederkauer. *Arch. Tierernährung*, **21**, 505-513.
- Comar, C.L.(1948). Radioisotopes in nutritional trace element studies—I. *Nucleonics*, **3**, 32-45.
- Cuddihy, R.G., Boecker, B.B. and Kanapilly, G.M. Tissue distribution of ⁹⁹Mo in the beagle dog after inhalation of aerosols of various chemical forms. *Lovelace Foundation Fission Product Inhalation Program Annual Report 1968-1969*, pp.117-120. Lovelace Foundation, Albuquerque (LF 41), 1969.
- Dick, A.T. In: *Inorganic Nitrogen Metabolism*, Eds. McElroy, W.D., Glass, B., Johns Hopkins Press, Baltimore, 1956.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Rosoff, B. and Spencer, H. (1964). Fate of molybdenum-99 in man. *Nature*, **202**, 410-411.
- Rosoff, B. and Spencer, H. (1973). The distribution and excretion of molybdenum-99 in mice. *Health Phys.*, **25**, 173-175.
- Underwood, E.J. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, 3rd edn. Academic Press, London, 1971.

* 訳注 ただし、⁹⁹Moの半減期は約 3.5×10^8 年である。

モリブデンの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空気中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入			
	経 口		クラスD	クラスY
	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$
⁹⁰ Mo	2×10^8	7×10^7	3×10^8	2×10^8
⁹³ Mo	1×10^8	9×10^8	2×10^8	7×10^8
^{93m} Mo	4×10^8	2×10^8	7×10^8	5×10^8
⁹⁹ Mo	6×10^7	4×10^7 (4×10^7) 大腸下部壁	1×10^8	5×10^7
¹⁰¹ Mo	2×10^9 (2×10^9) 胃 壁	2×10^9 (2×10^9) 胃 壁	5×10^9	6×10^9

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスD	クラスY
	$f_1=8 \times 10^{-1}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$
⁹⁰ Mo	1×10^5	7×10^4
⁹³ Mo	8×10^4	3×10^3
^{93m} Mo	3×10^5	2×10^5
⁹⁹ Mo	4×10^4	2×10^4
¹⁰¹ Mo	2×10^6	2×10^6

テルルの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

軟組織のテルル含有量	8 mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	0.6mg

Schroeder らのデータ (1967) は、全身のテルルの含有量が約 600 mg であり、そのおよそ 90% が無機質骨中にあることを示している。しかし、Soman らのデータ (1970) は、軟組織だけでも 500 mg 以上のテルルが存在することを示している。値がこのように広い範囲にわたる理由は説明されていない。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

Hollins (1969) はラットの胃腸管からのテルル化合物の吸収割合を測定した。彼の結果は f_1 が 0.1 と 0.2 の間の値をもつべきであることを示唆している。これらの結果は、4 価のテルルの胃腸管からの吸収割合がおよそ 0.25 であると結論づけている Scott らの結果 (1947) とだいたい一致している。この報告書では f_1 を 0.2 とした。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は、テルルの酸化物、水酸化物および硝酸塩を吸入のクラス W に、そしてこの元素のその他すべての化合物を吸入のクラス D に指定した。適切な実験データがないので、ここではこの分類を採用した。

吸入のクラス	f_1
D	0.2
W	0.2
Y	—

(c) 分布と残留

Hollins (1969) はラットにおけるテルルの全身残留を研究し、この問題に関する初期のデータを調査、検討した。彼のデータは投与後 200 日に及んでおり、テルルが他の組織よりも無機質骨にずっと長期間残留することを示している。

この報告書では、通過コンパートメントに入ったテルルのうち半分が直接に排泄されると仮定する。残りのうち 0.25 は無機質骨に移行して、そこに 5,000 日の生物学的半減期で残留し、0.25 は人体のその他すべての器官および組織に均等に分布して、そこに 20 日の生物学的半減期で残留すると仮定する。

通過コンパートメントからのクリアランスの半減期はテルルのすべての化合物について 0.8 日と仮定する (Hollins, 1969)。

(d) 娘核種の挙動

この報告書で考察したテルルの同位体のいくつかは、崩壊してヨウ素の放射性同位体になる。人体内でテルルの崩壊によって生成したヨウ素はすべて、無機物の形で通過コンパートメントに瞬間的に移行すると仮定する。このようにして通過コンパートメントに入ったヨウ素の代謝挙動は、その元素の線量算定用データ中で述べるヨウ素の代謝モデルに従うと仮定する。

2. 骨線量算定のための同位体の分類

テルルの同位体の無機質骨中における存在位置に関するデータは見当たらない。これらの同位体の多くは放射性半減期が短く、200 日を超えるものはない。

ので*、線量算定の目的には、テルルのすべての同位体が骨表面に留まると仮定する。しかし、その結果得られる ALI の値は過度に厳しいものであるかもしれない。

文 献

- Hollins, J.G. (1969). The metabolism of tellurium in rats. *Health Phys.*, **17**, 497-505.
- ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group Report on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Schroeder, H.A., Buckman, J. and Balassa, J.J. (1967). Abnormal trace elements in man: tellurium. *J. Chronic Dis.*, **20**, 147-161.
- Scott, K.G., Overstreet, R., Jacobson, L., Hamilton, J.G., Fisher, H., Crowley, J., Chaikoff, I.L., Entenman, C., Fishler, M., Barber, A.J. and Loomis, F. *The Metabolism of Carrier-Free Fission Products in the Rat*. Oak Ridge, Tenn., USAEC (MDDC-1275), 1947.
- Soman, S.D., Joseph, K.T., Raut, S.J., Mulay, C.D., Parameshwaran, M. and Panday, V.K. (1970). Studies on major and trace element content in human tissues. *Health Phys.*, **19**, 641-656.

* 訳注 ただし、 ^{128}Te の半減期は約 10^{13} 年である。

テルルの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入		
	経 口	クラスD	クラスW
	$f_1=2 \times 10^{-1}$	$f_1=2 \times 10^{-1}$	$f_1=2 \times 10^{-1}$
¹¹⁰ Te	3 × 10 ⁸	8 × 10 ⁸	1 × 10 ⁹
¹²¹ Te	1 × 10 ⁸	2 × 10 ⁸	1 × 10 ⁸
^{121m} Te	2 × 10 ⁷ (3 × 10 ⁷) 骨表面	7 × 10 ⁶ (1 × 10 ⁷) 骨表面	2 × 10 ⁷
¹²³ Te	2 × 10 ⁷ (4 × 10 ⁷) 骨表面	7 × 10 ⁶ (2 × 10 ⁷) 骨表面	2 × 10 ⁷ (4 × 10 ⁷) 骨表面
^{123m} Te	2 × 10 ⁷ (4 × 10 ⁷) 骨表面	8 × 10 ⁶ (2 × 10 ⁷) 骨表面	2 × 10 ⁷
^{125m} Te	4 × 10 ⁷ (5 × 10 ⁷) 骨表面	2 × 10 ⁷ (4 × 10 ⁷) 骨表面	3 × 10 ⁷
¹²⁷ Te	3 × 10 ⁸	8 × 10 ⁸	6 × 10 ⁸
^{127m} Te	2 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷ (2 × 10 ⁷) 骨表面	9 × 10 ⁸
¹²⁹ Te	1 × 10 ⁹	2 × 10 ⁹	2 × 10 ⁹
^{129m} Te	2 × 10 ⁷	2 × 10 ⁷	9 × 10 ⁶
¹³¹ Te	1 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁸) 甲状腺	2 × 10 ⁸ (5 × 10 ⁸) 甲状腺	2 × 10 ⁸ (4 × 10 ⁸) 甲状腺
^{131m} Te	1 × 10 ⁷ (2 × 10 ⁷) 甲状腺	2 × 10 ⁷ (5 × 10 ⁷) 甲状腺	1 × 10 ⁷ (3 × 10 ⁷) 甲状腺
¹³² Te	8 × 10 ⁶ (2 × 10 ⁷) 甲状腺	9 × 10 ⁶ (3 × 10 ⁷) 甲状腺	8 × 10 ⁶ (2 × 10 ⁷) 甲状腺
¹³³ Te	5 × 10 ⁸ (1 × 10 ⁹) 甲状腺	8 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁹) 甲状腺	8 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁹) 甲状腺
^{133m} Te	1 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁸) 甲状腺	2 × 10 ⁸ (5 × 10 ⁸) 甲状腺	2 × 10 ⁸ (5 × 10 ⁸) 甲状腺
¹³⁴ Te	6 × 10 ⁸ (9 × 10 ⁸) 甲状腺	9 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁹) 甲状腺	9 × 10 ⁸ (2 × 10 ⁹) 甲状腺

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスD	クラスW
	$f_1=2\times 10^{-1}$	$f_1=2\times 10^{-1}$
¹¹⁶ Te	3×10^5	5×10^5
¹²¹ Te	6×10^4	5×10^4
^{121m} Te	3×10^3	6×10^3
¹²³ Te	3×10^3	7×10^3
^{123m} Te	3×10^3	8×10^3
^{125m} Te	6×10^3	1×10^4
¹²⁷ Te	3×10^5	3×10^5
^{127m} Te	4×10^3	4×10^3
¹²⁹ Te	1×10^6	1×10^6
^{129m} Te	1×10^4	4×10^3
¹³¹ Te	8×10^4	8×10^4
^{131m} Te	6×10^3	6×10^3
¹³² Te	4×10^3	3×10^3
¹³³ Te	4×10^5	4×10^5
^{133m} Te	8×10^4	8×10^4
¹³⁴ Te	4×10^5	4×10^5

ヨウ素の代謝データ

1. 代謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のヨウ素含有量	11mg
甲状腺のヨウ素含有量	10mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	0.2mg

甲状腺の大きさおよび血液からの甲状腺へのヨウ素の取り込み量は、いずれも安定ヨウ素の毎日の摂取量に大きく左右される (Underwood, 1971; Riggs, 1952; Dolphin, 1971)。この報告書では、甲状腺によるヨウ素取り込みの割合を0.3とした。甲状腺への取り込み割合0.3に対応した甲状腺の質量は20gを使用した。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

ヨウ素は胃腸管から (Underwood, 1971), おもに小腸で (Riggs, 1952), 急速にほとんど完全に吸収される。この報告書ではふつうに存在するヨウ素の化合物すべてに対して f_1 を1とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は、ヨウ素の化合物すべてを吸入のクラス D に指定した。マウス, ラット, イヌおよびヒツジの実験からのデータ (Willard と Bair, 1961; Bair ら, 1963) はこの分類と一致しており, ここではそれを採用した。

吸入のクラス	f_i
D	1
W	—
Y	—

(c) 分布と残留

Riggs (1952) は、ヨウ素の代謝を単純な3コンパートメントモデルで記述した。この報告書では実質的にこのモデルを用いた。

通過コンパートメントに入ったヨウ素のうち、0.3の割合が甲状腺に移行するものと仮定し、残りは直接に排泄されるものと仮定する。甲状腺中のヨウ素は、120日の生物学的半減期で残留し、有機ヨウ素の形で甲状腺から失われると仮定する。有機ヨウ素は甲状腺以外の人体のすべての器官および組織に均等に分布し、そこに12日の生物学的半減期で残留すると仮定する。この有機ヨウ素の1/10は、直接、糞便中に排泄され、残りは無機ヨウ素として通過コンパートメントに戻されると仮定する。

(d) 娘核種の挙動

ヨウ素のいくつかの同位体は、崩壊してキセノンの放射性同位体を生成する。線量算定の目的には、これらキセノンの同位体は、問題となるほど崩壊しないうちに人体から排出されると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

有機ヨウ素は、甲状腺以外の人体のすべての器官および組織に均等に分布すると仮定する。それゆえ、骨線量算定の目的にはこの元素の同位体を分類する必要はない。

文 献

- Bair, W.J., Snyder, M.D., Walters, R.A. and Keough, R.F. (1963). Effect of I^{127} on thyroid uptake of inhaled I^{131} . *Health Phys.*, **9**, 1399-1410.
- Dolphin, G.W. (1971). Dietary intakes of iodine and thyroid dosimetry. *Health Phys.*, **21**, 711-712.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Riggs, D.S. (1952). Quantitative aspects of iodine metabolism in man. *Pharmacol. Rev.*, **4**, 284-370.
- Underwood, E.J. *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, 3rd ed. Academic Press, London, 1971.
- Willard, D.H. and Bair, W.J. (1961). Behaviour of I^{131} following its inhalation as a vapour and as a particle. *Acta Radiol.*, **55**, 486-496.

ヨウ素の同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスD		経 口	クラスD
	$f_i=1$	$f_i=1$		$f_i=1$	$f_i=1$
¹²⁰ I	1×10 ⁸ (3×10 ⁸) 甲状腺	3×10 ⁸ (5×10 ⁸) 甲状腺	¹²⁹ I	2×10 ⁵ (7×10 ⁵) 甲状腺	3×10 ⁵ (1×10 ⁶) 甲状腺
^{120m} I	4×10 ⁸ (5×10 ⁸) 甲状腺	8×10 ⁸	¹³⁰ I	1×10 ⁷ (4×10 ⁷) 甲状腺	3×10 ⁷ (7×10 ⁷) 甲状腺
¹²¹ I	4×10 ⁸ (1×10 ⁹) 甲状腺	7×10 ⁸ (2×10 ⁹) 甲状腺	¹³¹ I	1×10 ⁶ (4×10 ⁶) 甲状腺	2×10 ⁶ (6×10 ⁶) 甲状腺
¹²³ I	1×10 ⁸ (4×10 ⁸) 甲状腺	2×10 ⁸ (7×10 ⁸) 甲状腺	¹³² I	1×10 ⁸ (3×10 ⁸) 甲状腺	3×10 ⁸ (6×10 ⁸) 甲状腺
¹²⁴ I	2×10 ⁸ (6×10 ⁸) 甲状腺	3×10 ⁸ (1×10 ⁹) 甲状腺	^{132m} I	1×10 ⁸ (4×10 ⁸) 甲状腺	3×10 ⁸ (7×10 ⁸) 甲状腺
¹²⁵ I	1×10 ⁸ (5×10 ⁸) 甲状腺	2×10 ⁸ (8×10 ⁸) 甲状腺	¹³³ I	5×10 ⁶ (2×10 ⁷) 甲状腺	1×10 ⁷ (3×10 ⁷) 甲状腺
¹²⁶ I	8×10 ⁵ (3×10 ⁶) 甲状腺	1×10 ⁶ (4×10 ⁶) 甲状腺	¹³⁴ I	8×10 ⁸ (1×10 ⁹) 甲状腺	2×10 ⁹
¹²⁸ I	2×10 ⁹ (2×10 ⁹) 胃 壁	4×10 ⁹	¹³⁵ I	3×10 ⁷ (9×10 ⁷) 甲状腺	6×10 ⁷ (2×10 ⁸) 甲状腺

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	放射性核種	吸 入
	クラスD		クラスD
	$f_i=1$		$f_i=1$
¹²⁰ I	1×10 ⁵	¹²⁹ I	1×10 ²
^{120m} I	3×10 ⁵	¹³⁰ I	1×10 ⁴
¹²¹ I	3×10 ⁵	¹³¹ I	7×10 ²
¹²³ I	9×10 ⁴	¹³² I	1×10 ⁵
¹²⁴ I	1×10 ³	^{132m} I	1×10 ⁵
¹²⁵ I	1×10 ³	¹³³ I	4×10 ³
¹²⁶ I	5×10 ²	¹³⁴ I	7×10 ⁵
¹²⁸ I	2×10 ⁶	¹³⁵ I	2×10 ⁴

セシウムの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のセシウム含有量	1.5mg
筋肉のセシウム含有量	0.57mg
骨のセシウム含有量	0.16mg
飲食物からの1日当たりの摂取量	10 μ g

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

塩化セシウム (LeRoy ら, 1966; Rosoff ら, 1963) およびその他の通常存在するセシウム化合物 (LeRoy ら, 1966) は, 急速にかつほとんど完全に胃腸管から吸収されるという証拠がある。この報告書では, セシウムのすべての化合物について f_1 を 1 とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は, セシウムのすべての化合物を吸入のクラスDに指定した。実験による証拠 (Miller, 1964; Lie, 1964; Boecker, 1969) はこの分類と一致しており, ここではそれを採用した。

吸入のクラス	f_1
D	1
W	—
Y	—

(c) 分布と残留

セシウムが人体内に均等に分布することを示す証拠が得られている。「標準人」の器官あるいは組織でセシウムの濃度が筋肉中の濃度より高い場合はない(ICRP, 1975)。

セシウムの残留は、少なくとも初めの1,400日間は次の2つの指数項の式で適切に表される。

$$R(t) = ae^{-0.693t/T_1} + (1-a)e^{-0.693t/T_2}$$

a の値として0.06から0.15の範囲(Rundo, 1964), T_1 の値として1日から2日の値(Rundo, 1964), T_2 の値として、200日までのはなれたいくつかの値はあるが、50日から150日の値(Rundo, 1964; Lloydら, 1970; CryerおよびBaverstock, 1972; Richmondら, 1962)が報告されている。

この報告書では、通過コンパートメントに入ったセシウムのうち、0.5の割合が第一の組織コンパートメントに移行して2日の半減期でそこに残留し、残りは第二の組織コンパートメントに移行して110日の半減期でそこに残留すると仮定する。また、これらのコンパートメントに移行したセシウムは人体全体に均等に分布すると仮定する。

(d) 娘核種の挙動

^{127}Cs は崩壊して ^{127}Xe に、一部は ^{127m}Xe になる。放射性半減期が75秒の ^{127m}Xe はこの核種が生成した部位で崩壊すると仮定する。これに対して、放射性半減期36日の ^{127}Xe は崩壊しないで体外に出ると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

セシウムは人体のすべての器官および組織に均等に分布すると仮定する。それゆえ、骨線量算定の目的でこの元素の同位体を分類する必要はない。

文 献

- Boecker, B.B. (1969). Comparison of ^{137}Cs metabolism in the beagle dog following inhalation and intravenous injection. *Health Phys.*, **16**, 785-788.
- Cryer, M.A. and Baverstock, K.F. (1972). Biological half-life of ^{137}Cs in man. *Health Phys.*, **23**, 394-395.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group Report on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- LeRoy, G.V., Rust, J.H. and Hasterlik, R.J. (1966). The consequences of ingestion by man of real and simulated fallout. *Health Phys.*, **12**, 449-473.
- Lie, R. (1964). Deposition and retention of ^{137}Cs in the rat following inhalation of the chloride and the nitrate. *Health Phys.*, **10**, 1071-1076.
- Lloyd, R.D., Mays, C.W., Church, B.W., Pendleton, R.C. and Mays, S.F. (1970). Does the elimination rate of cesium in humans change with the seasons? *Health Phys.*, **18**, 623-629.
- Miller, C.E. (1964). Retention and distribution of ^{137}Cs after accidental inhalation. *Health Phys.*, **10**, 1065-1070.
- Richmond, C.R., Furchner, J.E. and Langham, W.H. (1962). Long-term retention of radiocesium by man. *Health Phys.*, **8**, 201-205.
- Rosoff, B., Cohn, S.H. and Spencer, H. (1963). Cesium-137 metabolism in man. *Radiat. Res.*, **19**, 643-654.
- Rundo, J. (1964). A survey of the metabolism of cesium in man. *Br. J. Radiol.*, **37**, 108-114.

セシウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスD		経 口	クラスD
	$f_1=1$	$f_1=1$		$f_1=1$	$f_1=1$
¹²⁵ Cs	2×10 ⁹ (3×10 ⁹) 胃壁	5×10 ⁹	^{134m} Cs	4×10 ⁹ (4×10 ⁹) 胃壁	5×10 ⁹
¹²⁷ Cs	2×10 ⁹	4×10 ⁹	¹³⁵ Cs	3×10 ⁷	4×10 ⁷
¹²⁹ Cs	9×10 ⁸	1×10 ⁹	^{135m} Cs	4×10 ⁹	7×10 ⁹
¹³⁰ Cs	2×10 ⁹ (4×10 ⁹) 胃壁	7×10 ⁹	¹³⁶ Cs	2×10 ⁷	2×10 ⁷
¹³¹ Cs	8×10 ⁸	1×10 ⁹	¹³⁷ Cs	4×10 ⁶	6×10 ⁶
¹³² Cs	1×10 ⁸	1×10 ⁸	¹³⁸ Cs	7×10 ⁸ (1×10 ⁹) 胃壁	2×10 ⁹
¹³⁴ Cs	3×10 ⁶	4×10 ⁶			

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスD		経 口	クラスD
	$f_1=1$		$f_1=1$		
¹²⁵ Cs	2×10 ⁶		^{134m} Cs	2×10 ⁶	
¹²⁷ Cs	1×10 ⁶		¹³⁵ Cs	2×10 ⁴	
¹²⁹ Cs	5×10 ⁵		^{135m} Cs	3×10 ⁶	
¹³⁰ Cs	3×10 ⁶		¹³⁶ Cs	1×10 ⁴	
¹³¹ Cs	5×10 ⁵		¹³⁷ Cs	2×10 ³	
¹³² Cs	6×10 ⁴		¹³⁸ Cs	9×10 ⁵	
¹³⁴ Cs	2×10 ³				

セリウムの代謝データ

1. 代謝

セリウムに関しては「標準人」(ICRP, 1975)にデータが与えられていない。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

ラットの胃腸管からのセリウムの吸収割合は 10^{-3} より小さいと報告されている (Durbin ら, 1956)。ニワトリ (Mraz ら, 1964), ブタ (McClellan ら, 1965), ヤギ (Ekman と Åberg, 1962) およびウシ (Miller ら, 1967) についても、低い吸収割合の値が報告されている。ヒトでも、1例の吸入事故のデータ (Sill ら, 1969) は胃腸管からのセリウムの吸収割合が非常に小さいことを示している。この報告書ではセリウムのすべての化合物について f_1 を 3×10^{-4} とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966)は、セリウムの酸化物、水酸化物およびフッ化物を吸入のクラス Y に指定し、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラス W に指定した。この分類は、マウス (Gensicke, 1964), ラット (Abrams ら, 1946; Hennacy, 1961) およびイヌ (Tombropoulos ら, 1969) についての実験によって裏づけられており、ここでも採用する。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	3×10^{-4}
Y	3×10^{-4}

(c) 分布と残留

静脈内に注射されたセリウムは、肝臓、脾臓、骨格、腎臓の皮質および副腎におもに沈着する (Hennacy, 1961; Tombropoulos ら, 1969; McKenney ら, 1961; Plešková ら, 1971; Moskalev, 1959)。この報告書では、通過コンパートメントに入ったセリウムのうちの0.6は肝臓に移行し、0.05は脾臓に、0.2は骨に、そして0.15はその他すべての組織に移行すると仮定する。これらの組織に入ったセリウムは、3,500日の半減期でそれらの組織に残留すると仮定する。これはビーグル犬 (Richmond と London, 1966) におけるセリウムの全身残留の半減期と一致する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

この報告書で考察するセリウムの同位体で285日以上放射性半減期のものは1つもない。セリウムの化学的性質はアルカリ土類よりもアクチニドの化学的性質にいっそう類似しているから、この報告書で考察するセリウムのすべての同位体は、骨格に沈着した後いつでも骨の表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Abrams, R., Seibert, H.C., Potts, A.M., Lohr, W. and Postel, S. *Metabolism of Inhaled Fission Product Aerosols*. Argonne National Laboratory, Chicago (MDDC-248), 1946.
- Durbin, P.W., Williams, M.H., Gee, M., Newman, R.H. and Hamilton, J.G. (1956).

- Metabolism of the lanthanons in the rat. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **91**, 78-85.
- Ekman, L. and Åberg, B. (1962). Excretion of niobium-95, yttrium-91, cerium-144 and promethium-147 in goats. *Res. Vet. Sci.*, **2**, 100-105.
- Gensicke, F. (1964). Die wirkung eingeatmeter hexametaphosphataerosole auf den stoffwechsel von inhaliertem radiocer (^{144}Ce - ^{144}Pr) bei mätisen. *Strahlentherapie*, **124**, 242-253.
- Hennacy, R.A. Translocation and inhalation of $^{144}\text{CeO}_2$. In: *Hanford Biology Research Annual Report for 1960*, pp. 77-80. Washington (HW-69500), 1961. *ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- McClellan, R.O., Bustad, L.K. and Keough, R.F. (1965). Metabolism of some SNAP radionuclides in miniature swine. *Aerosp. Med.*, **36**, 16-20.
- McKenney, J.R., McClellan, R.O. and Bustad, L.K. Preliminary observations on Ce^{144} - Pr^{144} in sheep. In: *Hanford Biology Research Annual Report for 1960*, p. 60. Washington (HW-69500), 1961.
- Miller, J.K., Perry, S.C., Chandler, P.T. and Cragle, R.G. (1967). Evaluation of radiocerium as a non-absorbed reference material for determining gastrointestinal sites of nutrient absorption and excretion in cattle. *J. Dairy Sci.*, **50**, 355.
- Moskalev, Yu. I. (1959). Experiments on the distribution of Ce^{144} . *Med. Radiol.*, **4**, 52. English translation: JPRS: 2860 (1960).
- Mraz, F.R., Wright, P.L., Ferguson, T.M. and Anderson, D.L. (1964). Fission product metabolism in hens and transference to eggs. *Health Phys.*, **10**, 777-782.
- Plešková, A., Trnovec, T., Chorvát, D. and Vladár, M. (1971). The effect of colloidal iron hydroxide on radiocerium metabolism in rats and mice. *Strahlentherapie*, **142**, 480-485.
- Richmond, C.R. and London, L.E. (1966). Long-term *in vivo* retention of cerium-144 by beagles. *Nature*, **211**, 1179.
- Sill, C.W., Voelz, G.L., Olson, D.G. and Anderson, J.I. (1969). Two studies of acute internal exposure to man involving cerium and tantalum radioisotopes. *Health Phys.*, **16**, 325-332.
- Tombropoulos, E.G., Bair, W.J. and Park, J.F. (1969). Removal of inhaled ^{144}Ce - ^{144}Pr oxide by diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) treatment. I. ^{144}Ce - ^{144}Pr oxide prepared by peroxide oxidation. *Health Phys.*, **16**, 333-338.

セリウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	ALI (Bq)		
	経口	吸 入	
		クラスW	クラスY
	$f_1=3\times 10^{-4}$	$f_1=3\times 10^{-4}$	$f_1=3\times 10^{-4}$
¹³⁴ Ce	2×10 ⁷ (2×10 ⁷) 大腸下部壁	3×10 ⁷	2×10 ⁷
¹³⁵ Ce	6×10 ⁷	1×10 ⁸	1×10 ⁸
¹³⁷ Ce	2×10 ⁹	5×10 ⁹	5×10 ⁹
^{137m} Ce	9×10 ⁷ (9×10 ⁷) 大腸下部壁	2×10 ⁸	1×10 ⁸
¹³⁸ Ce	2×10 ⁸	3×10 ⁷	2×10 ⁷
¹⁴¹ Ce	6×10 ⁷ (7×10 ⁷) 大腸下部壁	3×10 ⁷	2×10 ⁷
¹⁴³ Ce	4×10 ⁷ (4×10 ⁷) 大腸下部壁	7×10 ⁷	6×10 ⁷
¹⁴⁴ Ce	8×10 ⁶ (9×10 ⁶) 大腸下部壁	9×10 ⁵	5×10 ⁵

放射性核種	DAC (Bq/m ³) (40 h/wk)	
	吸 入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=3\times 10^{-4}$	$f_1=3\times 10^{-4}$
¹³⁴ Ce	1×10 ⁴	1×10 ⁴
¹³⁵ Ce	6×10 ⁴	5×10 ⁴
¹³⁷ Ce	2×10 ⁶	2×10 ⁶
^{137m} Ce	7×10 ⁴	6×10 ⁴
¹³⁸ Ce	1×10 ⁴	1×10 ⁴
¹⁴¹ Ce	1×10 ⁴	9×10 ³
¹⁴³ Ce	3×10 ⁴	2×10 ⁴
¹⁴⁴ Ce	4×10 ²	2×10 ²

ポロニウムの代謝データ

1. 代謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

ポロニウムの1日当たりの摂取量 0.1 Bq

人体のポロニウム含有量に関するデータは「標準人」(ICRP, 1975) には与えられていない。しかし, Blanchard (1967) および Holtzman (1963) は, いろいろな組織における ^{210}Po 含有量の測定値を報告した。彼らの結果は, 人体の全ポロニウム含有量の代表値は 40 Bq で, この放射能のうちの約60%が無機質骨中にあることを示している。この分布は, ^{210}Po が ^{210}Pb からその場所で生成するために起こるもので, 吸入あるいは経口摂取されたポロニウムの分布とはほとんど関係がない。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

Fink (1950) は, 慢性骨髄性白血病を患っている男性の患者に塩化ポロニウムを経口投与した後の吸収が約20%であると報告した。ラットでは吸収は3—6%であるという報告もあるが (Anthony ら, 1956), 実験の詳細は与えられていない。これ以上の実験データがないので, f_1 に0.1という値を仮定した。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966) は, ポロニウムの酸化物, 水酸化物および硝酸塩を吸入のクラスWに, この元素のその他すべての化合物を吸入の

クラスDに指定した。塩化ポロニウムを用いた動物実験の結果 (Fink, 1950; Smith ら, 1961) はこの分類と一致しており、ここではそれを採用した。

吸入のクラス	f_i
D	0.1
W	0.1
Y	—

(c) 分布と残留

ポロニウムは、肝臓、腎臓および脾臓に沈着し、またおそらく赤血球の表面に結合して血液中にも存在する (Smith ら, 1961)。ヒトに関する排泄データが Jackson と Dolphin (1966) によって要約されている。これらのデータによれば、ポロニウムの全身における生物学的残留は次の形の関数でよく表される。

$$R(t) = e^{-0.693t/50}$$

この残留関数が個々の組織に対してあてはまるものと仮定した。それゆえ、通過コンパートメントに入ったポロニウムのうち、0.1の割合がそれぞれ肝臓、腎臓および脾臓に、0.7がその他すべての組織に移行すると仮定する。ポロニウムは、これらの組織に入った後、50日の生物学的半減期でそこに残留すると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

ポロニウムは、肝臓、腎臓および脾臓以外は、人体のすべての器官および組織に均等に分布すると仮定する。したがって、骨線量算定の目的にはこの元素の同位体を分類する必要はない。

文 献

- Anthony, D.S., Davis, R.K., Cowden, R.N. and Jolley, W.P. Experimental data useful in establishing maximum permissible single and multiple exposures to polonium. In: *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Vol. 13, pp. 215-218. United Nations, New York, 1956.
- Blanchard, R.L. (1967). Concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in human soft tissues. *Health Phys.*, **13**, 625-632
- Fink, R.M. *Biological Studies with Polonium, Radium and Plutonium*. McGraw-Hill, London, 1950.
- Holtzman, R.B. (1963). Measurement of the natural contents of RaD (Pb^{210}) and RaF (Po^{210}) in human bone-estimates of whole-body burdens. *Health Phys.*, **9**, 385-400.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Jackson, S. and Dolphin, D.W. (1966). The estimation of internal radiation dose from metabolic and urinary excretion data in a number of important radionuclides. *Health Phys.*, **12**, 481-500.
- Smith, F.A., Morrow, P.E., Gibb, F.R., Della Rosa, R.J., Casarett, L.J., Scott, J.K., Morken, D.A. and Stannard, J. N. (1961). Distribution and excretion studies in dogs exposed to an aerosol containing polonium-210. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, **22**, 201-208.

ポロニウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	経口	吸入	
		クラスD	クラスW
		$f_i=1 \times 10^{-1}$	$f_i=1 \times 10^{-1}$
²⁰³ Po	9×10^8	2×10^9	3×10^9
²⁰⁵ Po	8×10^8	1×10^9	3×10^9
²⁰⁷ Po	3×10^8	9×10^8	1×10^9
²¹⁰ Po	1×10^5	2×10^4	2×10^4

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸入	
	クラスD	クラスW
	$f_i=1 \times 10^{-1}$	$f_i=1 \times 10^{-1}$
²⁰³ Po	1×10^6	1×10^6
²⁰⁵ Po	6×10^5	1×10^6
²⁰⁷ Po	4×10^5	4×10^5
²¹⁰ Po	1×10^4	1×10^4

ラジウムの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のラジウム含有量	31 pg
骨格のラジウム含有量	27 pg
飲食物からの1日当たりの摂取量	2.3 pg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

「成人のアルカリ土類代謝に関する課題グループ」(ICRP, 1973) は、胃腸管からの吸収割合として0.15から0.21の範囲の値を引用している。これらの値は、ラジウムが飲料水中に存在する場合あるいは食物中に入っている場合についての研究から導かれた値である。RaCl₂の胃腸管からの取り込みの実験が、いろいろな年齢のラットを使用して行われた(Taylorら, 1962)。取り込みは14—18日の年齢のラットでは高く(79%)、60—70週のラットでは減少して低い値(3.2%)であった。

この報告書ではラジウムのすべての化合物について f_1 の値を0.2とした。

(b) 吸入のクラス

ICRPの「肺動態課題グループ」(1966)は、Marinelliらのデータ(1953)を解釈して、肺中のRaSO₄についての生物学的半減期が180日であることを示すものとした。しかし、この解析は肺胞外の沈着を考えに入れておらず、デ

ータを再検討した結果、この化合物が肺からもっと早く除去されることが示唆された。硫酸ラジウムはあまり溶けないラジウム化合物の1つであるので、普通に存在するラジウムのすべての化合物を吸入のクラスWに指定する。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	0.2
Y	—

(c) 分布と残留

成人におけるラジウムの残留についてのきわめて詳細なモデルがICRPの課題グループによって開発された(ICRP, 1973)。放射性ラジウムの同位体の1 Bq を通過コンパートメントに取り込んだ後の50年間における軟組織、皮質骨および梁骨中での自発核変換の総数は、この課題グループの報告書(ICRP, 1973)に与えられている残留関数を用いて導くことができる。

(d) 娘核種の挙動

^{226}Ra は崩壊して3.8日の放射性半減期の ^{222}Rn になる。ラドンは希ガスであるため、軟組織の中で生成した ^{222}Rn はすべて崩壊することなく体外に出ると仮定できる。無機質骨中の ^{222}Rn の残留割合は、親核種の ^{226}Ra がその組織に留まっていた時間の関数であり、1日目における6%から27年後における40%まで変動する(Maysら, 1958)。Norrisら(1955)によって与えられた ^{226}Ra と ^{222}Rn の残留関数を用いて、摂取した後の50年間にわたる無機質骨中の ^{222}Rn の平均の残留割合を算定すると、約0.3と推定することができ、この値をこの報告書で使用した。その他の、もっと半減期の短いラドンの同位体は、全部が親核種とともに残留すると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

第7章で論じたように、放射性半減期が15日より長いアルカリ土類の同位体は無機質骨の体積全体に分布すると仮定する。したがって、 ^{226}Ra と ^{228}Ra は無機質骨の体積全体に分布すると仮定するが、 ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{225}Ra および ^{227}Ra は骨格に沈着した後いつでも骨表面に分布していると仮定する。

文 献

- ICRP Publication 20, ICRP Task Group on Alkaline Earth Metabolism in Adult Man. Pergamon Press, Oxford, 1973.
- ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man. Pergamon Press, Oxford 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Marinelli, L.D., Norris, W.P., Gustafson, P.F. and Speckman, T.W. (1953). Transport of radium sulphate from the lung and its elimination from the human body following single accidental exposures. *Radiology*, **61**, 903-915.
- Mays, C.W., Van Dilla, M.A., Floyd, R.L. and Arnold, J.S. (1958). Radon retention in radium-injected beagles. *Radiat. Res.*, **8**, 480-489.
- Norris, W.P., Speckman, T.W. and Gustafson, P.F. (1955). Studies on the metabolism of radium in man. *Am. J. Roentgen.*, **73**, 785-802.
- Taylor, D.M., Bligh, P.H. and Duggan, M.H. (1962). The absorption of calcium, strontium, barium and radium from the gastrointestinal tract of the rat. *Biochem. J.*, **83**, 25-29.

ラジウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	ALI (Bq)	
	吸 入	
	経 口	クラスW
	$f_1=2\times 10^{-1}$	$f_1=2\times 10^{-1}$
²²³ Ra	2×10 ⁵ (3×10 ⁵) 骨表面	3×10 ⁴
²²⁴ Ra	3×10 ⁵ (6×10 ⁵) 骨表面	6×10 ⁴
²²⁵ Ra	3×10 ⁵ (6×10 ⁵) 骨表面	2×10 ⁴
²²⁶ Ra	7×10 ⁴ (2×10 ⁵) 骨表面	2×10 ⁴
²²⁷ Ra	6×10 ⁵ (9×10 ⁵) 骨表面	5×10 ⁵ (7×10 ⁵) 骨表面
²²⁸ Ra	9×10 ⁴ (1×10 ⁵) 骨表面	4×10 ⁴

放射性核種	DAC (Bq/m ³) (40 h/wk)	
	吸 入	
	クラスW	
	$f_1=2\times 10^{-1}$	
²²³ Ra	1×10 ⁴	
²²⁴ Ra	3×10 ⁴	
²²⁵ Ra	1×10 ⁴	
²²⁶ Ra	1×10 ⁴	
²²⁷ Ra	2×10 ⁵	
²²⁸ Ra	2×10 ⁴	

トリウムの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP 1975) のデータ

飲食物からの1日当たりの摂取量 3 μg

器官および組織のトリウム含有量についてのデータは、「標準人」(ICRP, 1975) に与えられていない。Lucas ら(1970)の研究によれば、無機質骨のトリウム総含有量は 30 μg である。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

ラットの胃腸管からの $^{232}\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ の吸収に関する実験は、 f_1 の値が 5×10^{-3} から 10^{-2} の範囲にあることを示している。しかし、文字盤用ラジウム模擬塗料の形の $^{234}\text{Th}(\text{SO}_4)_2$ の人の胃腸管からの吸収割合は 10^{-4} から 6×10^{-4} の範囲にあって、平均値を推定するとおよそ 2×10^{-4} であることがわかった (Maletskos ら, 1969)。この報告書では、トリウムのすべての化合物について f_1 を 2×10^{-4} とする。

(b) 吸入のクラス

ICRP の「肺動態課題グループ」(1966)は、トリウムの酸化物および水酸化物を吸入のクラスYに指定した。ビーグル犬についての実験結果 (Ballou と Hursh, 1972) はこの分類と一致する。しかし、ラットによる ThCl_4 の吸入の実験結果 (Boecker ら, 1963) は、この化合物を吸入のクラスWに指定すべ

きであることを示している。この報告書では、トリウムの酸化物および水酸化物を吸入のクラスYに、この元素のその他すべての化合物を吸入のクラスWに指定した。

吸入のクラス	f_i
D	—
W	2×10^{-4}
Y	2×10^{-4}

(c) 分布と残留

ビーグル犬のトリウムの残留についての Stover らの結果 (1960, 1965) から、次の代謝モデルが導き出された。通過コンパートメントに入ったトリウムのうち、0.7が骨に移行してそこに8,000日の生物学的半減期で残留し、0.04が肝臓に移行してそこに700日の生物学的半減期で残留し、そして、0.16が人体のその他すべての器官および組織に均等に分布してそれらから700日の生物学的半減期で除去されると仮定する。通過コンパートメントに入ったトリウムの残り0.1は、直接に排泄されると仮定する。トリウムは通過コンパートメントから、0.5日の生物学的半減期で除去されると仮定する (Stover ら, 1960, 1965)。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

トリウムは無機質骨の骨内膜面に大部分が沈着し、再吸収および骨の再構築のような過程により骨の体積全体にゆっくりと分布する (Jee ら, 1962)。この報告書では、トリウムは骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Ballou, J.E. and Hursh, J.B. (1972). The measurement of thoron in the breath of dogs administered inhaled or injected ThO_2 . *Health Phys.*, **22**, 155-159.

- Boecker, B.B., Thomas, R.G. and Scott, J.K. (1963). Thorium distribution and excretion studies II. General patterns following inhalation and the effect of the size of the inhaled dose. *Health Phys.*, **9**, 165-176.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- ICRP Task Group on Lung Dynamics (1966). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. *Health Phys.*, **12**, 173-207.
- Jee, W.S.S., Arnold, J.S., Cochran, T.H., Twente, J.A. and Mical, R.S. Relationship of microdistribution of alpha particles to damage. In: *Some Aspects of Internal Irradiation*, Eds. Dougherty, T.F., Jee, W.S.S., Mays, C.W., and Stover, B.J., pp. 27-45. Pergamon Press, Oxford, 1962.
- Kendysh, I.N. Distribution and elimination of ^{232}Th . In: *Distribution and Biological Effects of Radioactive Isotopes*, Ed. Moskalev, Yu.I., pp. 22-29. Atomizdat, Moscow. (AEC-tr-6944 (Rev.), pp. 25-34), 1966.
- Lucas, H.F., Edgington, D.N. and Markun, F. (1970). Natural thorium in human bone. *Health Phys.*, **19**, 739-742.
- Maletskos, C.J., Keane, A.T., Telles, N.C. and Evans, R.D. Retention and absorption of ^{224}Ra and ^{234}Th and some dosimetric consequences of ^{224}Ra in human beings. In: *Delayed Effects of Bone Seeking Radionuclides*, Ed. Mays, C.W., pp. 29-49. University of Utah Press, Salt Lake City, 1969.
- Stover, B.J., Atherton, D.R., Keller, N. and Buster, D.S. (1960). Metabolism of the Th^{228} decay series in adult beagle dogs. 1. Th^{228} (RdTh). *Radiat. Res.*, **12**, 657-671.
- Stover, B.J., Atherton, D.R., Buster, D.S. and Bruenger, F.W. (1965). The Th^{228} decay series in adult beagles: Ra^{224} , Pb^{212} and Bi^{212} in selected bones and soft tissues. *Radiat. Res.*, **26**, 132-145.
- Traikovich, M. Absorption, distribution and excretion of certain soluble compounds of natural thorium. In: *The Toxicity of Radioactive Substances, Vol. 4: Thorium-232 and Uranium-238*, Eds. Letavet, A.A. and Kurlyandskaya, E.B., pp. 20-29. Pergamon Press, London, 1970.

トリウム同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq)および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³)(40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	ALI (Bq)		
	経口	吸入	
		クラスW	クラスY
	$f_1=2\times 10^{-4}$	$f_1=2\times 10^{-4}$	$f_1=2\times 10^{-4}$
²²⁶ Th	2×10 ⁸ (2×10 ⁸) 胃壁	6×10 ⁶	5×10 ⁶
²²⁷ Th	5×10 ⁶	1×10 ⁴	1×10 ⁴
²²⁸ Th	2×10 ⁵ (5×10 ⁵) 骨表面	4×10 ² (8×10 ²) 骨表面	6×10 ²
²²⁹ Th	2×10 ⁴ (5×10 ⁴) 骨表面	3×10 ¹ (9×10 ¹) 骨表面	9×10 ¹ (1×10 ²) 骨表面
²³⁰ Th	1×10 ⁵ (4×10 ⁵) 骨表面	2×10 ² (6×10 ²) 骨表面	6×10 ² (7×10 ²) 骨表面
²³¹ Th	1×10 ⁸	2×10 ⁸	2×10 ⁸
²³² Th	3×10 ⁴ (7×10 ⁴) 骨表面	4×10 ¹ (1×10 ²) 骨表面	1×10 ² (2×10 ²) 骨表面
²³⁴ Th	1×10 ⁷ (1×10 ⁷) 大腸下部壁	7×10 ⁶	6×10 ⁶

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=2\times 10^{-4}$	$f_1=2\times 10^{-4}$
²²⁶ Th	2×10 ³	2×10 ³
²²⁷ Th	5×10 ⁰	5×10 ⁰
²²⁸ Th	2×10 ⁻¹	3×10 ⁻¹
²²⁹ Th	1×10 ⁻²	4×10 ⁻²
²³⁰ Th	1×10 ⁻¹	2×10 ⁻¹
²³¹ Th	1×10 ⁵	1×10 ⁵
²³² Th	2×10 ⁻²	4×10 ⁻²
²³⁴ Th	3×10 ³	2×10 ³

ウランの代謝データ

1. 代 謝

「標準人」(ICRP, 1975) のデータ

人体のウラン含有量	90 μg
骨格のウラン含有量	59 μg
腎臓のウラン含有量	7 μg
飲食物からの1日当たりの摂取量	1.9 μg

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

Hursh ら (1969) は人の胃腸管からの硝酸ウラニル六水塩の取り込みを調べた。そして、この化合物の0.005ないし0.05が吸収されるようであると結論している。同様な結果が Butterworth (1955)により、1名のヒトについて報告されている。これらの知見は雑種犬についての UO_2F_2 の取り込み割合が 0.0155 であるという報告 (Fish ら, 1960) と一致している。

毒性の研究 (Yuile, 1973) からは、 UO_2 あるいは U_3O_8 のように比較的不溶な化合物の胃腸管からの吸収は0.01よりかなり小さいことが示された。0.2 近くのこれよりも高い吸収の値が職業上の被曝経験のない人の食餌のデータにより示されているが (Hursh および Spoor, 1973), これは極端に低いレベル (1日当たり約1 μg) で、たぶん、有機物と結合した形のウランを摂取したときの値である。

この報告書では、水溶性の無機ウラン化合物(6価ウラン)については f_1 を

0.05とし、 UF_4 、 UO_2 、 U_3O_8 のような、ウランが通常4価である比較的不溶性化合物については0.002とする。

(b) 吸入のクラス

UF_6 、 UO_2F_2 および $UO_2(NO_3)_2$ のようなウラン化合物は肺から急速に吸収される (Chalabreysee, 1970) ので、吸入のクラスDに指定された。それらより溶けにくい UO_3 、 UF_4 および UCl_4 のような化合物は吸入のクラスWに指定された (Hursh と Spoor, 1973; Morrow ら, 1972)。著しく不溶性ウラン酸化物、すなわち、 UO_2 、 U_3O_8 は吸入のクラスYに指定される (Morrow ら, 1966)。

吸入された後胃腸管に入ったクラスDとWの物質については、 f_1 を 0.05 とする。吸入された後に胃腸管に入ったクラスYの物質については f_1 を 0.002 とする。

吸入のクラス	f_1
D	0.05
W	0.05
Y	0.002

(c) 分布と残留

骨と腎臓の残留関数は、職業上被曝した人の死体の分析データ (Donoghue ら, 1972)、および、通常の食餌中に存在するレベルのウランを経口摂取した成人のデータ (Hursh と Spoor, 1973) を用いて、次のように導かれた (Adams と Spoor, 1974)。

$$R_{BONE}(t) = 0.2e^{-0.693t/20} + 0.023e^{-0.693t/5000}$$

$$R_{KIDNEY}(t) = 0.12e^{-0.693t/6} + 0.00052e^{-0.693t/1500}$$

死期のせまった患者に $UO_2(NO_3)_2$ 溶液を静脈に注射して観察したウランの分布をもとにすると (Bernard および Struxness, 1957)、腎臓を除くその他のす

べての軟組織についての残留関数は、上の腎臓についての残留関数と同じとしてよい。すなわち、

$$R_{\text{OTHER}}(t) = 0.12e^{-0.693t/6} + 0.00052e^{-0.693t/1500}$$

したがって、通過コンパートメントに入ったウランのうち0.2および0.023の割合は、無機質骨に移り、そこにそれぞれ20日および5,000日の半減期で残留すると仮定する。0.12および0.00052の割合は腎臓に移り、そこにそれぞれ6日および1,500日の半減期で残留し、0.12および0.00052の割合は人体の他のすべての組織に移り、そこにそれぞれ6日および1,500日の半減期で残留すると仮定する。ウランはこれらその他の組織の間では均等に分布すると仮定する。通過コンパートメントに入った残りのウランは直接に排泄されると仮定する。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

Neuman と Neuman (1948) のオートラジオグラフによる研究では、ウランは主として骨表面に沈着し、容易に血液循環に入ること、そしてこのウランは無機質骨の体積全体に徐々に再分布することが示された。しかし、Rowland と Farnham (1969) による近年の研究では、骨の体積全体への再分布は注射後数か月以内に起こりうることを示された。この理由により、 ^{230}U 、 ^{231}U 、 ^{237}U 、 ^{239}U および ^{240}U は、ウランが骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定し、これに対して、長寿命のウラン同位体である ^{232}U 、 ^{233}U 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U および ^{238}U は、骨格に沈着した後いつでも無機質骨の体積全体に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Adams, N. and Spoor, N.L. (1974). Kidney and bone retention functions in the human metabolism of uranium. *Phys. Med. Biol.*, **19**, 460-471.

- Bernard, S.R. and Struxness, E.G.(1957). A study of the distribution and excretion of uranium in man. USAEC Report ORNL-2304.
- Butterworth, A. (1955). The significance and value of uranium in urine analysis. *Tran. Ass. Ind. Med. Offrs.*, **5**, 36.
- Chalabreysse, J. (1970). Étude et résultats d'examens effectués à la suite d'une inhalation de composés dits solubles d'uranium naturel. *Radioprotection* **5**, 1-17 and 305-310.
- Donoghue, J.K., Dyson, E.D., Hislop, J.S., Leach, A.M. and Spoor, N.L. (1972). Human exposure to natural uranium. *Br. J. Ind. Med.*, **29**, 81-89.
- Fish, B.R., Payne, J.A. and Thompson, J.L. Ingestion of uranium compounds. In: *Health Physics Division Annual Progress Report for Period Ending 31 July 1960*, pp.269-272. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory (ORNL-2994), 1960.
- Hursh, J.B. and Spoor, N.L. Data on man. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp.197-239. Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- Hursh, J.B., Neuman, W.R., Toribara, T., Wilson, H. and Waterhouse, C. (1969). Oral ingestion of uranium by man. *Health Phys.*, **17**, 619-621.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Marrow, P.E., Gibb, F.R. and Leach, L.J. (1966). The clearance of UO₂ dust from the lungs following single and multiple inhalation exposures. *Health Phys.*, **12**, 1217-1223.
- Morrow, P.E., Gibb, F.R. and Beiter, H.D. (1972). Inhalation studies of uranium trioxide. *Health Phys.*, **23**, 273-280.
- Neuman, M.W. and Neuman, W.F. (1948). The deposition of uranium in bone. II. Radioautographic studies. *J. Biol. Chem.*, **175**, 711-714.
- Rowland, R.E. and Farnham, J.E. (1969). The deposition of uranium in bone. *Health Phys.*, **17**, 139-144.
- Yuile, C.L. Animal experiments. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp.165-196. Springer-Verlag, Berlin, 1973.

ウランの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq) および誘導空气中濃度
DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入				
	経 口		クラスD	クラスW	クラスY
	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$
²³⁰ U	1×10 ⁵ (2×10 ⁵) 骨表面	2×10 ⁶	2×10 ⁴ (2×10 ⁴) 骨表面	1×10 ⁴	1×10 ⁴
²³¹ U	2×10 ⁸ (2×10 ⁸) 大腸下部壁	2×10 ⁸ (2×10 ⁸) 大腸下部壁	3×10 ⁸	2×10 ⁸	2×10 ⁸
²³² U	8×10 ⁴ (1×10 ⁵) 骨表面	2×10 ⁶ (3×10 ⁶) 骨表面	8×10 ³ (2×10 ⁴) 骨表面	1×10 ⁴	3×10 ²
²³³ U	4×10 ⁵ (7×10 ⁵) 骨表面	7×10 ⁶	4×10 ⁴ (7×10 ⁴) 骨表面	3×10 ⁴	1×10 ³
²³⁴ U	4×10 ⁵ (7×10 ⁵) 骨表面	7×10 ⁶ —	5×10 ⁴ (7×10 ⁴) 骨表面	3×10 ⁴	1×10 ³
²³⁵ U	5×10 ⁵ (7×10 ⁵) 骨表面	7×10 ⁶	5×10 ⁴ (7×10 ⁴) 骨表面	3×10 ⁴	2×10 ³
²³⁶ U	5×10 ⁵ (7×10 ⁵) 骨表面	8×10 ⁶	5×10 ⁴ (7×10 ⁴) 骨表面	3×10 ⁴	1×10 ³
²³⁷ U	6×10 ⁷ (7×10 ⁷) 大腸下部壁	6×10 ⁷ (7×10 ⁷) 大腸下部壁	1×10 ⁸	6×10 ⁷	6×10 ⁷
²³⁸ U	5×10 ⁵ (8×10 ⁵) 骨表面	8×10 ⁶	5×10 ⁴ (8×10 ⁴) 骨表面	3×10 ⁴	2×10 ³
²³⁹ U	2×10 ⁹	2×10 ⁹	7×10 ⁹	6×10 ⁹	6×10 ⁹
²⁴⁰ U	5×10 ⁷	5×10 ⁷	1×10 ⁸	1×10 ⁸	9×10 ⁷

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入		
	クラスD	クラスW	クラスY
	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=5 \times 10^{-2}$	$f_1=2 \times 10^{-3}$
²³⁰ U	6×10^0	5×10^0	4×10^0
²³¹ U	1×10^5	9×10^4	7×10^4
²³² U	3×10^0	6×10^0	1×10^{-1}
²³³ U	2×10^1	1×10^1	6×10^{-1}
²³⁴ U	2×10^1	1×10^1	6×10^{-1}
²³⁵ U	2×10^1	1×10^1	6×10^{-1}
²³⁶ U	2×10^1	1×10^1	6×10^{-1}
²³⁷ U	4×10^4	3×10^4	2×10^4
²³⁸ U	2×10^1	1×10^1	7×10^{-1}
²³⁹ U	3×10^6	3×10^6	2×10^6
²⁴⁰ U	6×10^4	4×10^4	4×10^4

プルトニウムの代謝データ

1. 代 謝

プルトニウムに関しては、「標準人」(ICRP, 1975) にデータが与えられていない。しかし、核兵器実験による世界的な放射性降下物のため、食物および人体組織中に測定可能な量のプルトニウムが存在している。また、この元素に職業上被曝した人々のプルトニウムの体内分布についてのデータもある。これらヒトについての限られたデータは、一般に、実験動物を用いた研究から得られたずっと広範な代謝データを支持し、裏づけるものである。1970年当時知られていたプルトニウムの代謝は、ICRP の 課題グループ (ICRP, 1972) によって調査、検討された。もっと近年のデータは、他の刊行物 (Dolphin, 1971; Hodge ら, 1973; Bair と Thompson, 1974), とくに Handbook of Experimental Pharmacology の第36巻 (Hodge ら, 1973) の中の広範な論文集の中で調査、検討されている。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

プルトニウムの胃腸管からの吸収は少ない。 f_1 について、課題グループ (ICRP, 1972) は、“溶けやすい方の化合物 (たとえば硝酸プルトニウム)” について 3×10^{-5} の値を、“ PuO_2 などのような比較的不溶な物質” については 10^{-6} の値を勧告した。しかし、Stather と彼の共同研究者(1979) が調査検討した、その後得られたデータは、もっと大きな f_1 の値が適切であることを示唆している。この報告書では、プルトニウムの酸化物および水酸化物について f_1

を 10^{-5} とし、この元素のその他すべての普通に存在する化合物について 10^{-4} とする。

職業上の被曝においては遭遇しそうなないプルトニウムのある種の化合物、たとえば6価のプルトニウム化合物、クエン酸塩およびその他の有機錯化合物について、胃腸管での非常に高い吸収を示すデータが報告されていることに注目すべきである。またごく若年でも吸収は増大する (ICRP, 1972)。

(b) 吸入のクラス

課題グループ (ICRP, 1972) は、吸入のクラス D に指定すべきプルトニウム化合物 (以下に論ずるキレートを除く) がないこと、 PuO_2 は吸入のクラス Y に指定すべきこと、またこの元素のその他すべての普通に存在する化合物は吸入のクラス W に指定すべきこと、を結論づけた。近年のデータ (Bair ら, 1973; Park ら, 1974; Watts, 1975) は、プルトニウム化合物の肺内残留のパターンは複雑であることを強調したけれども、吸入のクラス指定は変更していない。そこで、 $^{238}\text{PuO}_2$ は $^{239}\text{PuO}_2$ よりも肺から速やかに移行し、また ^{238}Pu は ^{239}Pu よりも骨と肝臓に非常に高い濃度に蓄積する (Park ら, 1974) けれども、それでもなお、 $^{238}\text{PuO}_2$ はクラス Y の化合物としてもっともよく表される。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	10^{-4}
Y	10^{-5}

(c) 分布と残留

血流中に吸収されたプルトニウムは、主として肝臓および骨格に沈着する。この2つの器官への相対的な沈着量は、ヒトの死体解剖でも動物実験のデータでも、著しく変動することを示している。課題グループ (ICRP, 1972) は、

血液からの沈着割合に関し、肝臓に0.45、骨に0.45、そしてその他すべての組織と早期の排泄に残りの0.10という値を勧告した。ヒトについて得られたデータおよび数種の哺乳動物から得られたデータに基づいて、課題グループは、ヒトについての生物学的半減期を、骨格中の残留については100年、肝臓中の残留については40年と示唆した (ICRP, 1972)。

この報告書では、通過コンパートメントに入ったプルトニウムのうち0.45が骨に、0.45が肝臓に移行するものと仮定する。Richmond と Thomas(1975)が調査、検討したデータは、生殖腺に沈着するプルトニウムの割合は男性について約 3×10^{-4} 、女性について 10^{-4} であるらしいことを示す。この報告書では、通過コンパートメントに入ったプルトニウムのうち、生殖腺に移行する割合は男性について 3.5×10^{-4} 、女性について 1.1×10^{-4} であると仮定する。これらの値は、それぞれの場合の生殖腺への移行の割合が生殖腺組織1g当たり 10^{-5} に相当する。通過コンパートメントに入ったプルトニウムの残りは直接に排泄されるものと仮定する。

生殖腺組織に沈着したプルトニウムは永久にそこに残留するものと仮定するが、肝臓に沈着したプルトニウムは40年の生物学的半減期で残留し、骨格に沈着したプルトニウムは100年の生物学的半減期で残留すると仮定する。

(d) キレート化合物

キレート形のプルトニウムはこの報告書では考察していない。それらはある程度腸壁を通過することが知られているがまたプルトニウムのその他の化合物よりも容易に排泄されることも知られている (Baxter と Sullivan, 1972)。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

プルトニウムはおもに無機質骨の骨内膜面に沈着し、再吸収と埋没のような過程により、その体積全体に徐々に再分布する (Vaughan, 1973; Schlenker

ら, 1976)。この理由により, この報告書で考えられているプルトニウムのすべての同位体は, 線量算定の目的には, 骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Bair, W.J. and Thompson, R.C. (1974). Plutonium: biomedical research. *Science*, **183**, 715-722.
- Bair, W.J., Ballou, J.E., Park, J.F. and Sanders, C.L. Plutonium in soft tissues with emphasis on the respiratory tract. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds, Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp. 503-568. Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- Baxter, D.W. and Sullivan, M.F. (1972). Gastrointestinal absorption and retention of plutonium chelates. *Health Phys.*, **22**, 785-786.
- Dolphin, G.W. (1971). The biological problems in the radiological protection of workers exposed to ^{239}Pu . *Health Phys.*, **20**, 549-557.
- Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., Eds. *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements* (Handbook of Experimental Pharmacology, Vol. 36). Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- ICRP Publication 19, *The Metabolism of Compounds of Plutonium and Other Actinides*. Pergamon Press, Oxford, 1972.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Park, J.F., Catt, D.L., Craig, K.D., Olson, R.J. and Smith, V.H. Solubility changes of ^{239}Pu oxides in water suspension and effect on biological behaviour after inhalation by beagle dogs. In: *Proc. Third Int. Cong. Int. Radiat. Prot. Assn., Washington DC September 1973*, Ed. Snyder, W.S., Vol. 1, pp. 719-724 (CONF-730901-P1), 1974.
- Richmond, C.R. and Thomas, R.L. (1975). Plutonium and other actinide elements in gonadal tissue of man and animals. *Health Phys.*, **29**, 241-250.
- Schlenker, R.A., Oltman, B.G. and Cummings, H.T. Microscopic distribution of ^{239}Pu deposited in bone from a human injection case. In: *The Health Effects of Plutonium and Radium*, Ed. Jee, W.S.S., pp. 321-328. J.W. Press, Salt Lake City, 1976.

Stather, J.W., Harrison, J.D., Rodwell, P. and David, A.J. (1979). The gastrointestinal absorption of plutonium and americium in the hamster. *Phys. Med. Biol.*, **24**, 396-407.

Vaughan, J. The pattern of ²³⁹Pu distribution in the skeleton. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp. 397-421. Springer-Verlag, Berlin, 1973.

Watts, L. (1975). Clearance rates of insoluble plutonium-239 compounds from the lung. *Health Phys.*, **29**, 53-59.

プルトニウムの同位体に関する年摂取限度 ALI (Bq)および誘導空気中濃度 DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	経口		吸入	
			クラスW	クラスY
	$f_1=1 \times 10^{-4}$	$f_1=1 \times 10^{-5}$	$f_1=1 \times 10^{-4}$	$f_1=1 \times 10^{-5}$
²³⁴ Pu	3×10^8	3×10^8	8×10^6	7×10^6
²³⁵ Pu	3×10^{10}	3×10^{10}	1×10^{11}	9×10^{10}
²³⁶ Pu	8×10^5 (1×10^6) 骨表面	6×10^6	7×10^2 (1×10^3) 骨表面	1×10^3
²³⁷ Pu	5×10^8	5×10^8	1×10^8	1×10^8
²³⁸ Pu	3×10^5 (5×10^5) 骨表面	3×10^6 (3×10^6) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	6×10^2 (6×10^2) 骨表面
²³⁹ Pu	2×10^5 (4×10^5) 骨表面	2×10^6 (3×10^6) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	5×10^2 (6×10^2) 骨表面
²⁴⁰ Pu	2×10^5 (4×10^5) 骨表面	2×10^6 (3×10^6) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	5×10^2 (6×10^2) 骨表面
²⁴¹ Pu	1×10^7 (2×10^7) 骨表面	1×10^8 (2×10^8) 骨表面	1×10^4 (2×10^4) 骨表面	2×10^4 (3×10^4) 骨表面
²⁴² Pu	3×10^5 (5×10^5) 骨表面	3×10^6 (3×10^6) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	6×10^2 (6×10^2) 骨表面
²⁴³ Pu	6×10^8	6×10^8	1×10^9	1×10^9
²⁴⁴ Pu	3×10^5 (5×10^5) 骨表面	3×10^6 (3×10^6) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	6×10^2 (6×10^2) 骨表面
²⁴⁵ Pu	8×10^7	8×10^7	2×10^8	2×10^8

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=1\times 10^{-4}$	$f_1=1\times 10^{-5}$
²³⁴ Pu	3×10^3	3×10^3
²³⁵ Pu	5×10^7	4×10^7
²³⁶ Pu	3×10^{-1}	6×10^{-1}
²³⁷ Pu	5×10^4	5×10^4
²³⁸ Pu	9×10^{-2}	3×10^{-1}
²³⁹ Pu	8×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁴⁰ Pu	8×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁴¹ Pu	4	1×10^1
²⁴² Pu	9×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁴³ Pu	5×10^5	6×10^5
²⁴⁴ Pu	9×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁴⁵ Pu	7×10^4	6×10^4

アメリカシウムの代謝データ

1. 代 謝

アメリカシウムに関しては、「標準人」(1975)にデータが与えられていない。核兵器実験による放射性物質の降下の結果として、測定可能な量が世界中に広く分布しているが、人体内のアメリカシウムの分布についての広範なデータは得られていない。したがって、動物のデータによらなければならないが、これらのデータは、1970年に ICRP の課題グループ (ICRP, 1972) によって、またその後 Durbin (1973) によっても、調査、検討された。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

アメリカシウム化合物の胃腸管からの吸収はラットにおいてのみ研究され (Scott ら, 1948; Zalikin ら, 1968; Buldakov と Nifatov, 1972; Moskalev ら, 1973; Sullivan と Crosby, 1975), その報告された値は 10^{-4} 未満 (Scott ら, 1948) から 0.0014 (Buldakov と Nifatov, 1972) までの範囲にある。したがって、この報告書では、アメリカシウムのすべての化合物について f_1 を 5×10^{-4} とした。この元素の錯体形のもものは胃腸管からの吸収がより大きくなると予想されること、および、非常に若いラットでは吸収が大きいと報告されていることに注目すべきである (Moskalev ら, 1973; Sullivan と Crosby, 1975)。

(b) 吸入のクラス

動物実験 (Scott ら, 1948) は, アメリシウム化合物がプルトニウム化合物よりも肺から速やかに除去されることを示している。とくに酸化物 (Lafuma ら, 1974; Craig ら, 1975) に認められるこのより大きな移動性は, アメリシウムのすべての化合物を吸入のクラス W に指定すべきであることを示唆している。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	5×10^{-4}
Y	—

(c) 分布と残留

実験動物におけるアメリシウムの代謝挙動について入手し得るかなりのデータは, プルトニウムに用いられている代謝モデルをアメリシウムにも使用するべきであるとする, 「プルトニウムおよびその他のアクチニドの化合物の代謝に関する 課題グループ」の勧告 (ICRP, 1972) と概して一致している。実験的証拠 (Richmond と Thomas, 1975) によれば, アメリシウムおよびプルトニウムが生殖腺に移行する割合はかなり似ている。

この報告書では, 通過コンパートメントに入ったアメリシウムのうち0.45は骨に, 0.45は肝臓に移行するものと仮定した。生殖腺に移行するアメリシウムの割合は, 精巣について 3.5×10^{-4} , 卵巣について 1.1×10^{-4} と仮定する。これらの値は, 生殖腺組織1g 当たり 10^{-5} の割合で生殖腺に移行することに相当する。通過コンパートメントに入ったアメリシウムのうち, 残りは直接に排泄されるものと仮定する。

生殖腺組織に沈着したアメリシウムはそこに永久に残留するものと仮定するが, 肝臓に沈着したアメリシウムは40年の生物学的半減期で, また骨格に沈着

したアメリカシウムは100年の生物学的半減期で、残留するものと仮定する。

(d) キレート化合物

キレート形のアメリカシウムはこの報告書では考察しない。これらは他のアメリカシウム化合物よりも生物学的に動きやすいことが知られている (Durbin, 1973)。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

アメリカシウムは、主として骨膜面と骨内膜面に沈着し、ふつうは骨内膜面の方がより濃く標識される。アメリカシウムは再吸収あるいは埋没のような過程によって無機質骨の体積全体にゆっくりと再分配される (Durbin, 1973)。そこで、線量算定の目的には、この報告書で考察するアメリカシウムのすべての同位体は、骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Buldakov, L.A. and Nifatov, A.P. Biological effectiveness of americium-241 following oral and parenteral administration. In: *Biological Effects of Radiation from External and Internal Sources*, Eds. Moskalev, Yu. I., Kalistratova, V.S. pp. 305-331. Meditsina, Moscow, 1972.
- Craig, D.K., Cannon, W.C., Catt, D.L., Herring, J.P., Olson, R.J., Powers, G.J. and Watson, C.R. Distribution of ^{241}Am and ^{244}Cm in dogs after inhalation of the oxides. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research. Part 1 Biomedical Sciences*, pp. 17-18 (BNWL-1950-Pt. 1), 1975.
- Durbin, P.W. Metabolism and biological effects of the transplutonium elements. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp. 739-896. Springer Verlag, Berlin, 1973.
- ICRP Publication 19, *The Metabolism of Compounds of Plutonium and Other*

- Actinides*. Pergamon Press, Oxford, 1972.
- ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- LaFuma, J., Nénot, J.C., Morin, M., Masse, R., Metivier, H., Nolibé, D. and Skupinski, W. Respiratory carcinogenesis in rats after inhalation of radioactive aerosols of actinides and lanthanides in various physicochemical forms. In: *Experimental Lung Cancer: Carcinogenesis and Bioassays*, Eds. Karbe, E. and Park, J.F., pp. 443-453. Springer-Verlag, Berlin, 1974.
- Moskalev, Yu. I., Zalikin, G.A. and Trofimov, V.I. (1973). Influence of age on the resorption of ^{241}Am from the gastrointestinal tract of rats. *Radiobiologiya*, **13**, 155.
- Richmond, C.R. and Thomas, R.L. (1975). Plutonium and other actinide elements in gonadal tissue of man and animals. *Health Phys.*, **29**, 241-250.
- Scott, K.G., Copp, D.H., Axelrod, D.J. and Hamilton, J.G. (1948). The metabolism of americium in the rat. *J. Biol. Chem.*, **175**, 691-703.
- Sullivan, M.F. and Crosby, A.L. Absorption of uranium-233, neptunium-237, plutonium-238, americium-241, curium-244 and einsteinium-253 from the gastrointestinal tract of newborn and adult rats. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 of the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research, Part 1 Biomedical Sciences*, pp. 105-108 (BNWL-1950 Pt. 1), 1975.
- Zalikin, G.A., Moskalev, Yu. I. and Petrovich, I.K. (1968). Distribution and biological effects of ^{241}Am . *Radiobiologiya*, **8**, 65-71. (AEC-tr-6950, pp. 107-118.)

アメリカシウムの同位体に関する年摂取限度ALI (Bq)

および誘導空气中濃度DAC (Bq/m³) (40h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスW		経 口	クラスW
	$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$		$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$
²³⁷ Am	3×10^9	1×10^{10}	²⁴³ Am	5×10^4 (9×10^4) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面
²³⁸ Am	1×10^9	1×10^8 (2×10^8) 骨表面	^{244m} Am	2×10^9 (3×10^9) 胃壁	1×10^8 (2×10^8) 骨表面
²³⁹ Am	2×10^8	5×10^8	²⁴⁴ Am	1×10^8	6×10^6 (1×10^7) 骨表面
²⁴⁰ Am	8×10^7	1×10^8	²⁴⁵ Am	1×10^9	3×10^8
²⁴¹ Am	5×10^4 (9×10^4) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	^{246m} Am	2×10^9 (2×10^9) 胃壁	6×10^9
^{242m} Am	5×10^4 (9×10^4) 骨表面	2×10^2 (4×10^2) 骨表面	²⁴⁶ Am	1×10^9	4×10^8
²⁴² Am	2×10^8	3×10^6 (3×10^6)			

DAC (Bq) (Bq/m³) (40h/wk)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	クラスW	$f_1=5 \times 10^{-4}$		クラスW	$f_1=5 \times 10^{-4}$
²³⁷ Am		4×10^6	²⁴³ Am		8×10^{-2}
²³⁸ Am		4×10^4	^{244m} Am		6×10^4
²³⁹ Am		2×10^5	²⁴⁴ Am		3×10^3
²⁴⁰ Am		4×10^4	²⁴⁵ Am		1×10^6
²⁴¹ Am		8×10^{-2}	^{246m} Am		3×10^6
^{242m} Am		8×10^{-2}	²⁴⁶ Am		2×10^6
²⁴² Am		1×10^3			

キュリウムの代謝データ

1. 代 謝

キュリウムについてのデータは、「標準人」(ICRP, 1975)には与えられていない。

それゆえ、動物のデータによらなければならず、これらのデータは ICRP の課題グループ (ICRP, 1972) により、またその後 Durbin (1973) により、調査、検討された。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

キュリウム化合物の胃腸管からの吸収割合はラットについてのみ研究され (Semenov, 1971, 1972; Semenov ら, 1973; Sullivan と Crosby, 1975), 3×10^{-5} から 7×10^{-4} の範囲の値が報告されている。キュリウムと化学的に類似していて、いっそう広範に研究されているアメリシウムから類推して、 f_1 の値を 5×10^{-4} とする。キュリウムの錯体形のもものは胃腸管からの吸収がより大きいと予想されること、および非常に若いラットでは吸収が大きいと報告されていることは注目すべきである (Semenov ら, 1973; Sullivan と Crosby, 1975)。

(b) 吸入のクラス

アメリシウムと同様に、キュリウムの化合物は、酸化物も含めて対応するプルトニウムの化合物よりも急速に肺から排出される。限られたデータは、キュ

リウムのすべての化合物を吸入のクラスWに指定すべきことを示唆する。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	5×10^{-4}
Y	—

(c) 分布と残留

動物におけるキュリウムの代謝挙動についての入手可能なデータは、プルトニウムに用いられている代謝モデルを他のアクチニドにも使用すべきであるとする課題グループ (ICRP, 1972) の勧告と、概して一致している。実験的証拠 (Richmond と Thomas, 1975) によれば、キュリウムとプルトニウムの生殖腺に移行する割合はかなり似ている。

この報告書では、通過コンパートメントに入ったキュリウムのうち0.45が骨に、0.45が肝臓に移行すると仮定した。生殖腺に移行するキュリウムの割合は精巣について 3.5×10^{-4} 、卵巣について 1.1×10^{-4} と仮定する。これらの値は生殖腺組織1g 当たり 10^{-5} の割合で生殖腺に移行することに相当する。通過コンパートメントに入ったキュリウムのうち残りは直接に排泄されると仮定する。

無機質骨に移行したキュリウムは、その組織に100年の生物学的半減期で残留し、一方、肝臓に移行したキュリウムは、その組織に40年の生物学的半減期で残留すると仮定する。生殖腺に移行したキュリウムはその組織に無期限に残留すると仮定する (Richmond と Thomas, 1975)。

(d) キレート化合物

キレート形のキュリウムはこの報告書では考察しない。これらは他のキュリウムの化合物よりも生物学的に動きやすいことが知られている (Durbin, 1973)。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

ラットの骨格中のキュリウムの分布はアメリシウムの分布と区別できない。この元素は無機質骨の骨内膜面に主として沈着し、再吸収および埋没のような過程により無機質骨の体積全体にゆっくりと再分布する。この理由により、線量算定の目的には、この報告書で考察するキュリウムのすべての同位体は、骨格に沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Craig, D.K., Cannon, W.C., Catt, D.L., Herring, J.P., Olson, R.J., Powers, G.J. and Watson, C.R. Distribution of ^{241}Am and ^{244}Cm in dogs after inhalation of the oxides. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research. Part 1 Biomedical Sciences*, pp. 17-18 (BNWL-1950 Pt. 1), 1975.
- Durbin, P.W. Metabolism and biological effects of the transplutonium elements. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp. 739-896. Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- ICRP Publication 19, *The Metabolism of Compounds of Plutonium and Other Actinides*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- McClellan, R.O., Boyd, H.A., Gallegos, A.F. and Thomas, R.G. (1972). Retention and distribution of ^{244}Cm following inhalation of $^{244}\text{CmCl}_3$ and $^{244}\text{CmO}_{1.73}$ by beagle dogs. *Health Phys.*, **22**, 877-885.
- Richmond, C.R. and Thomas, R.L. (1975). Plutonium and other actinide elements in gonadal tissue of man and animals. *Health Phys.*, **29**, 241-250.
- Sanders, C.L. Toxicology of inhaled $^{244}\text{CmO}_3$ in rats. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research. Part 1 Biomedical Sciences*, pp. 35-37 (BNWL-1950 Pt. 1), 1975.
- Semenov, A.I. (1971). Kinetics of the exchange of ^{244}Cm . *Radiobiologiya*, **11**,

155.

- Semenov, A.I. Distribution of curium 244 in the rat organism. In: *Biological Effects of Radiation from External and Internal Sources*, Eds. Moskalev, Yu. I. and Kalistratova, V.S., pp. 302-305. Meditsina, Moscow, 1972.
- Semenov, A.I., Moskalev, Yu. I. and Zalikin, G.A. (1973). Influence of age on the absorption of ^{244}Cm from the rat gastrointestinal tract. *Radiobiologiya*, **13**, 155.
- Sullivan, M.F. and Crosby, A.L. Absorption of uranium-233, neptunium-237, plutonium-238, americium-241, curium-244 and einsteinium-253 from the gastrointestinal tract of newborn and adult rats. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1974 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research. Part 1 Biomedical Sciences*, pp. 105-108 (BNWL-1950 Pt. 1), 1975.

セシウム同位体に関する年摂取限度ALI (Bq) および
誘導空气中濃度DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

ALI (Bq)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスW		経 口	クラスW
	$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$		$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$
²³⁸ Cm	6×10 ⁸	4×10 ⁷	²⁴⁵ Cm	5×10 ⁴	2×10 ²
²⁴⁰ Cm	4×10 ⁶ (5×10 ⁶) 骨表面	2×10 ⁴ (2×10 ⁴) 骨表面		(8×10 ⁴) 骨表面	(3×10 ²) 骨表面
²⁴¹ Cm	5×10 ⁷	9×10 ⁵ (1×10 ⁶) 骨表面	²⁴⁶ Cm	5×10 ⁴ (8×10 ⁴) 骨表面	2×10 ² (3×10 ²) 骨表面
²⁴² Cm	2×10 ⁶ (3×10 ⁶) 骨表面	1×10 ⁴ (1×10 ⁴) 骨表面	²⁴⁷ Cm	5×10 ⁴ (9×10 ⁴) 骨表面	2×10 ² (4×10 ²) 骨表面
²⁴³ Cm	7×10 ⁴ (1×10 ⁵) 骨表面	3×10 ² (5×10 ²) 骨表面	²⁴⁸ Cm	1×10 ⁴ (2×10 ⁴) 骨表面	5×10 ¹ (9×10 ¹) 骨表面
²⁴⁴ Cm	9×10 ⁴ (2×10 ⁵) 骨表面	4×10 ² (7×10 ²) 骨表面	²⁴⁹ Cm	2×10 ⁹	5×10 ⁸ (8×10 ⁸) 骨表面

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入		放射性核種	吸 入	
	経 口	クラスW		経 口	クラスW
	$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$		$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$
²³⁸ Cm	2×10 ⁴		²⁴⁵ Cm	8×10 ⁻²	
²⁴⁰ Cm	8		²⁴⁶ Cm	8×10 ⁻²	
²⁴¹ Cm	4×10 ²		²⁴⁷ Cm	9×10 ⁻²	
²⁴² Cm	4		²⁴⁸ Cm	2×10 ⁻²	
²⁴³ Cm	1×10 ⁻¹		²⁴⁹ Cm	2×10 ⁵	
²⁴⁴ Cm	2×10 ⁻¹				

カリホルニウムの代謝データ

1. 代 謝

カリホルニウムについてのデータは、「標準人」(ICRP, 1975)には与えられていない。

それゆえ、動物のデータによらなければならず、これらのデータは ICRP の課題グループ (ICRP, 1972) により、またその後 Durbin (1973) により、調査検討された。

2. 代謝モデル

(a) 血液への取り込み

胃に投与された $^{252}\text{Cf}(\text{NO}_3)_3$ の 0.001 が胃腸管から吸収されることがラットについて報告されている。ただし、報告された肝臓と骨への沈着量からは、吸収は 0.0001 と推定される (Sullivan, 1974)。カリホルニウムと化学的に類似していて、いっそう広範に研究されているアメリシウムから類推し、カリホルニウムのすべての化合物について f_1 を 5×10^{-4} とする。

(b) 吸入のクラス

一例のヒトの被曝についての観測値 (Rundo と Sedlet, 1974) は、カリホルニウムの不溶性化合物が吸入のクラス Y として挙動するらしいことを示す。それゆえ、プルトニウムから類推して、カリホルニウムの酸化物および水酸化物を吸入のクラス Y に指定し、そしてこの元素のその他すべての化合物を吸入のクラス W に指定する。

吸入のクラス	f_1
D	—
W	5×10^{-4}
Y	5×10^{-4}

(c) 分布と残留

マウス、ラット、ハムスター、およびイヌにおけるカリホルニウムの代謝挙動についての限られたデータ (Durbin, 1973) は、プルトニウムについて用いられている代謝モデルを、他のアクチニドにも用いるべきであるとする、「プルトニウムおよびその他のアクチニドの化合物の代謝に関する課題グループ」の勧告(ICRP, 1972) と概して一致している。したがってこの報告書では、通過コンパートメントに入ったカリホルニウムのうち 0.45 が骨に、0.45 が肝臓に移行すると仮定する。生殖腺に移行するカリホルニウムの割合は、精巣について 3.5×10^{-4} 、卵巣について 1.1×10^{-4} と仮定する。これらの値は生殖腺組織 1g 当たり 10^{-5} の割合で生殖腺に移行することに相当する (Richmond と Thomas, 1975)。通過コンパートメントに入った残りのカリホルニウムは直接に排泄されると仮定する。生殖腺組織に沈着したカリホルニウムは、そこに永久に残留すると仮定するが、肝臓に沈着したカリホルニウムは40年の生物学的半減期で残留し、骨格に沈着したカリホルニウムは100年の生物学的半減期で残留すると仮定する。

(d) キレート化合物

キレート形のカリホルニウムはこの報告書では考察しない。これらはその他のカリホルニウムの化合物よりは動きやすいと仮定してよい (Parker ら, 1962)。

3. 骨線量算定のための同位体の分類

カリホルニウムは主として無機質骨の骨内膜面に沈着し、再吸収および埋没のような過程によって無機質骨の体積全体にゆっくりと再分布する (Durbin, 1973)。この理由によって、この報告書で考察されたカリホルニウムのすべての同位体は、線量算定の目的には、骨格にそれらが沈着した後いつでも骨表面に均等に分布していると仮定する。

文 献

- Durbin, P.W. Metabolism and biological effects of the transplutonium elements. In: *Uranium, Plutonium, Transplutonium Elements*, Eds. Hodge, H.C., Stannard, J.N. and Hursh, J.B., pp. 739-896. Springer Verlag, Berlin, 1973.
- ICRP Publication 19, *The Metabolism of Compounds of Plutonium and Other Actinides*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- ICRP Publication 23, *Report of the Task Group on Reference Man*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Parker, H.G., Low-Beer, A. de G. and Issac, E.L. (1962). Comparison of retention and organ distribution of Am^{241} and Cf^{252} in mice: The effect of *in vivo* DTPA chelation. *Health Phys.*, 8, 679-684.
- Richmond, C.R. and Thomas, R.L. (1975). Plutonium and other actinide elements in gonadal tissue of man and animals. *Health Phys.*, 29, 241-250.
- Rundo, J. and Sedlet, J. Retention and elimination of berkelium-249, californium-249 following acute accidental inhalation. In: *Proc. Third Int. Cong. Int. Radiat. Prot. Assn.*, Ed. Snyder, W.S., Vol. 1, pp. 731-735 (CONF 730907-P1), 1974.
- Sullivan, M.F. Absorption of curium-244 and californium-252 from the gastrointestinal tract of new born and adult rats. In: *Pacific Northwest Laboratory Annual Report for 1973 to the USAEC Division of Biomedical and Environmental Research. Part 1 Biological Sciences*, pp. 15-17 (BNWL-1850 Pt. 1), 1974.

カリホルニウムの同位体に関する年摂取限度ALI (Bq) および
誘導空气中濃度DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	ALI (Bq)		
	経口 $f_1=5\times 10^{-4}$	吸入	
		クラスW $f_1=5\times 10^{-4}$	クラスY $f_1=5\times 10^{-4}$
²⁴⁴ Cf	9×10 ⁸ (1×10 ⁹) 胃壁	2×10 ⁷	2×10 ⁷
²⁴⁸ Cf	1×10 ⁷ (2×10 ⁷) 大腸下部壁	4×10 ⁵	3×10 ⁵
²⁴⁸ Cf	8×10 ⁵ (1×10 ⁶) 骨表面	3×10 ³ (5×10 ³) 骨表面	4×10 ³
²⁴⁹ Cf	4×10 ⁴ (8×10 ⁴) 骨表面	2×10 ² (3×10 ²) 骨表面	5×10 ² (5×10 ²) 骨表面
²⁵⁰ Cf	1×10 ⁵ (2×10 ⁵) 骨表面	5×10 ² (8×10 ²) 骨表面	1×10 ³
²⁵¹ Cf	4×10 ⁴ (8×10 ⁴) 骨表面	2×10 ² (3×10 ²) 骨表面	5×10 ² (5×10 ²) 骨表面
²⁵² Cf	2×10 ⁵ (4×10 ⁵) 骨表面	1×10 ³ (2×10 ³) 骨表面	1×10 ³
²⁵³ Cf	2×10 ⁷ (3×10 ⁷) 骨表面	7×10 ⁴	6×10 ⁴
²⁵⁴ Cf	1×10 ⁵	8×10 ²	6×10 ²

DAC (Bq/m³) (40 h/wk)

放射性核種	吸 入	
	クラスW	クラスY
	$f_1=5 \times 10^{-4}$	$f_1=5 \times 10^{-4}$
²⁴⁴ Cf	9×10^3	9×10^3
²⁴⁶ Cf	2×10^2	1×10^2
²⁴⁸ Cf	1	2
²⁴⁹ Cf	8×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁵⁰ Cf	2×10^{-1}	4×10^{-1}
²⁵¹ Cf	8×10^{-2}	2×10^{-1}
²⁵² Cf	4×10^{-1}	6×10^{-1}
²⁵³ Cf	3×10^1	3×10^1
²⁵⁴ Cf	4×10^{-1}	3×10^{-1}

TABLE I

Year	Area II	Area III
1957	1000	1000
1958	1000	1000
1959	1000	1000
1960	1000	1000
1961	1000	1000
1962	1000	1000
1963	1000	1000
1964	1000	1000
1965	1000	1000
1966	1000	1000
1967	1000	1000
1968	1000	1000
1969	1000	1000
1970	1000	1000
1971	1000	1000
1972	1000	1000
1973	1000	1000
1974	1000	1000
1975	1000	1000
1976	1000	1000
1977	1000	1000
1978	1000	1000
1979	1000	1000
1980	1000	1000
1981	1000	1000
1982	1000	1000
1983	1000	1000
1984	1000	1000
1985	1000	1000
1986	1000	1000
1987	1000	1000
1988	1000	1000
1989	1000	1000
1990	1000	1000
1991	1000	1000
1992	1000	1000
1993	1000	1000
1994	1000	1000
1995	1000	1000
1996	1000	1000
1997	1000	1000
1998	1000	1000
1999	1000	1000
2000	1000	1000
2001	1000	1000
2002	1000	1000
2003	1000	1000
2004	1000	1000
2005	1000	1000
2006	1000	1000
2007	1000	1000
2008	1000	1000
2009	1000	1000
2010	1000	1000
2011	1000	1000
2012	1000	1000
2013	1000	1000
2014	1000	1000
2015	1000	1000
2016	1000	1000
2017	1000	1000
2018	1000	1000
2019	1000	1000
2020	1000	1000

ICRP Publication 30
Part 1 に対する補遺(主文)*

* 訳注 この補遺は原文で555頁であるが、ここにはその主文(4頁分)のみを訳出した。

The first part of the paper discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. This is essential for ensuring the integrity of the financial statements and for providing a clear audit trail. The second part of the paper focuses on the role of the auditor in verifying the accuracy of the records and in providing an independent opinion on the financial statements. The third part of the paper discusses the various methods used to audit financial statements, including the use of sampling and the use of analytical procedures. The fourth part of the paper discusses the importance of communication between the auditor and the client, and the role of the auditor in providing advice and assistance to the client. The fifth part of the paper discusses the various ethical issues that may arise in the course of an audit, and the importance of maintaining high ethical standards. The sixth part of the paper discusses the various legal issues that may arise in the course of an audit, and the importance of understanding the applicable laws and regulations. The seventh part of the paper discusses the various professional standards that apply to auditors, and the importance of adhering to these standards. The eighth part of the paper discusses the various factors that may affect the quality of an audit, and the importance of ensuring that the audit is conducted in a timely and efficient manner. The ninth part of the paper discusses the various challenges that may be faced by auditors, and the importance of developing effective strategies to overcome these challenges. The tenth part of the paper discusses the various opportunities that may be available to auditors, and the importance of staying up-to-date on the latest developments in the field.

In conclusion, the paper emphasizes the importance of maintaining high standards of accuracy, integrity, and ethical conduct in the auditing profession. It also highlights the need for continuous learning and professional development to ensure that auditors are equipped to handle the challenges of a rapidly changing business environment.

1. 緒 論

この補遺では、ICRP Publication 30, Part 1(以下 Part 1 と記す)で考察した放射性核種の線量算定に関連のあるデータが与えられている。これらのデータは、Part 1 に与えられている年摂取限度 (ALI) および誘導空気中濃度 (DAC) の値を決定するために用いたコンピュータのプリントアウトを、直接に複写したものである。これらの表の中で使われている特別な約束ごとおよび記号で、Part 1 で用いたもの以外について、以下に簡単に説明する。引用してある章は、Part 1 の章である。

2. 放射性核種の崩壊図式

データをチェックするのに役立つように、簡略化した崩壊図式のみが示されている。計算に用いる詳細な崩壊図式は別に刊行される予定である。

3. データの諸表

3.1 一般的事項

3.1.1 トリチウムの表を除き、このデータの諸表はコンピュータのプリントアウトを直接に複写したものである。したがって、すべての値は通常の指数の表し方で与えられている。たとえば、 $3.0E-02$ は 3.0×10^{-2} 、 $7.1E03$ は

(2)

7.1×10^3 と読む。そして崩壊図式では、これらの値は省略してそれぞれ $3.0 E-2$ および $7.1 E3$ と記してある。

3.1.2 代謝モデルと崩壊図式データの不確かさを考慮して、ALI と DAC の値は 1 個の有効数字で与えられている。これら ALI の基礎になったデータを使用したいという読者の便宜のため、その他すべての表の中に示す量は、丸めの誤差を減らすため 2 個の有効数字で与えられている。

3.1.3 表に含まれるべきデータの選択にあたっては、初めに“10%規則”を適用して標的器官を選び、次に“1%規則”を適用して線源器官を選んだ (Part 1, 4.7節)。

3.1.4 娘放射性核種に関するデータは、親放射性核種の体内での変換から生ずる娘核種の諸量に関するものである (Part 1, 4.6.1項)。娘放射性核種に関するデータは、吸入あるいは経口による親放射性核種の摂取の仕方少なくとも 1 つについて、その娘核種の寄与が荷重預託線量当量の総和の 0.1% 以上である場合にのみ表示されている。

3.2 比実効エネルギー

3.2.1 多くの線源器官で生ずる変換に由来する多くの標的器官における比実効エネルギー (SEE) の値が、指定した核種について与えられ、また、この指定した核種の体内での変換から生成する娘放射性核種がある場合には、SEE の値が、それら娘核種のいずれについても与えられている。

3.2.2 変換の数の表では全身 (total body) を線源器官として掲げてはいないが、身体のいろいろな器官および組織の預託線量当量を計算するために用いた方法の関係で、SEE の表ではしばしば全身を線源器官としている。計算の方法は以下の例で説明する (3.3.2項も参照)。

質量 M_i (g) の器官 i における変換の総数を U_i とし、身体の残りの質量 $(70,000 - \sum_i M_i)$ (g) における変換の総数を U_{ROB} とすると、身体内の変換の

分布は次の2つの成分の和としても表すことができる。

- (a) 身体のすべての器官および組織全体に均等に分布した変換の数,

$$\frac{U_{\text{ROB}} \times 70,000}{(70,000 - \sum_i M_i)}$$

- (b) 各器官 i における変換の数,

$$U_i = \frac{M_i \times U_{\text{ROB}}}{(70,000 - \sum_i M_i)}$$

特定の標的器官および組織の預託線量当量については、これら成分の各々を別々に計算し、次にこれを加算すれば、その標的器官および組織の預託線量当量の総和が得られる。したがって、全身を線源器官としたSEEの値は(a)で与えられる変換の総数と組み合わせて常に用いられ、特定の線源器官に関するSEEは(b)と関連して用いられる。

3.3 変換の数

3.3.1 指定した放射性核種の単位放射能を経口摂取および吸入した後の50年間に種々の線源器官内で生ずる変換の数 U の値が与えられている。指定した放射性核種の体内での変換によって生成する娘放射性核種のいずれについての U の値も与えられている。経口摂取に関しては、 U の値は、経口摂取された元素の化合物が血液に吸収される割合 f_1 (Part 1, 第6章) のそれぞれの値ごとに示されている。また吸入に関しては、吸入のクラス D, W, および Y (Part 1, 第5章) のそれぞれごとに、 U の値が示されている。異なる化合物についての f_1 の値および D, W, あるいは Y の区分は、Part 1 で論じられた各元素の代謝データ中に与えられている。

3.3.2 考察した線源器官は、体内に入った放射性核種を含む組織をすべて網羅している。“その他の組織”(other tissue)とは、その元素に関する代謝データの2c節中で記されている代謝モデルの中に挙げられていて同時に Part 1

(4)

の表4.1にも線源器官として挙げられている器官および組織を、全身から差し引いた身体の残りの部分(rest of the body) (3.2.2項参照)をいう。たとえばリンについては、代謝モデルの中に挙げられていて、同時に Part 1 の表 4.1 において線源組織として指定されたただ一つの組織は無機質骨である。したがって、リンの同位体に関する“その他の組織”の質量は、全身の質量(70,000 g)から無機質骨の質量(5,000 g)を差し引いた、65,000 gである。“その他の組織”を表に示した個所では、その下にその質量(g)が括弧内に与えられている。

3.3.3 通過コンパートメント (Part 1, 4.6節および図4.1) における変換は、身体のすべての器官および組織全体に均等に分布すると仮定する。それゆえ、ある特定の器官または組織についての変換の数は、次の2つの成分の和である。

(a) 代謝モデルによって計算したその器官または組織における変換の数、

(b) 通過コンパートメントにおける変換の一部分 (U_1)。

U_1 は次式で与えられる。

$$U_1 = \frac{M \times U_{\text{TRANSFER}}}{70,000}$$

ここで、

M : 器官または組織の質量 (g),

U_{TRANSFER} : 通過コンパートメントにおける変換の数、

70,000: 全身の質量 (g),

である。

3.4 預託線量当量および荷重預託線量当量

3.4.1 生殖腺の預託線量当量は、精巣と卵巣の預託線量当量のうち大きい方とする。

3.4.2 乳房には筋肉の預託線量当量を使用する。

3.4.3 ある吸入クラスの下に掲げた各器官または組織の預託線量当量の値は、空気力学的放射能中央径 (AMAD) が $1 \mu\text{m}$ のエアロゾルに用いる。肺の N-P 領域, T-B 領域および P 領域のそれぞれに沈着した成分に由来する預託線量当量の百分率は、預託線量当量の値のすぐ下に括弧内に示されている。これらの百分率は、 $1 \mu\text{m}$ 以外の AMAD をもつエアロゾルの預託線量当量を計算するために使用することができる (第 5 章, 5.5 節)。

3.4.4 “残りの組織” (Remainder) とは、

- (a) 代謝モデル,
- (b) 胃腸管モデル (第 6 章), および
- (c) 荷重係数の表 (第 2 章, 表 2.1)

に挙げられていない、すべての標的器官および組織をまとめて記述するために与えられた名称である。

“残りの組織”に割り当てた預託線量当量は、第 4 章, 表 4.1 に示されているが上の (a), (b), (c) のいずれにも含まれない任意の標的器官または組織のうち最大預託線量当量である。預託線量当量の表には、0.06, 0.12, 0.18, 0.24 あるいは 0.30 という荷重係数が、“残りの組織”の預託線量当量の下に示してある。この荷重係数は、“10%規則”によって除外されず、また上の (a), (b), (c) のいずれにも含まれず、さらに 0.06 という荷重係数をあてはめるべき、標的器官および組織の数 (最大 5 つまで) によって決まる (Part 1, 2.2 節 および 4.7 節) このような器官または組織がない場合には、残りの組織について預託線量当量あるいは荷重預託線量当量は与えられていない。

例: その元素の代謝モデルでは、肝臓、腎臓および身体の残りの部分が挙げられているものとする。……………(a)

胃腸管モデルでは、胃、小腸、大腸上部および大腸下部の名が挙げられている。……………(b)

(6)

荷重係数の表では、生殖腺、乳房、肺、赤色骨髄、甲状腺および骨表面の名が挙げられている。……(c)

さらに、大腸下部、肝臓、および腎臓も、身体の残りの部分のうち子宮、脾臓および副腎も、“10%規則”によって除外されないものとする。そうすると、“残りの組織”には、子宮、脾臓あるいは副腎についての預託線量当量のうちの最大値に等しい預託線量当量と、その下に示されている0.12という荷重係数が割り当てられることになる。他の3つの器官すなわち大腸下部、肝臓および腎臓の名称は、すでに述べた分類(a),(b),(c)の中に挙げられているので、この0.12という荷重係数は“残りの組織”(第2章、表2.1)として許される最大5つの組織のうちの2つに対応するものである。

3.5 サブマージョンによる線量当量率および荷重線量当量率

単位放射能濃度の希ガス中のサブマージョンによる皮膚と水晶体の線量当量率の値が与えられている。これらの組織については確率の影響は考慮しないので、荷重線量当量率の値はない。

3.6 年摂取限度および誘導空气中濃度

3.6.1 ALIが基本となる補助限度であることを強調する。したがって、吸入に関しては、 $C(t)$ (Bq m^{-3}) をある放射性核種のある瞬間の空气中濃度とし、 $B(t)$ を単位時間当たりの m^3 で表したその瞬間の呼吸率とすると、被曝の限度は次式で与えられる。

$$\int C(t)B(t)dt \leq \text{ALI}$$

ここで、この積分は就労している任意の1年間について行う(第3章、3.4節)。

便宜のために、DACの値が与えられている。すなわち、

$$\text{DAC} = \text{ALI} / 2.4 \times 10^8 \text{ Bq m}^{-3}$$

この DAC の値は常に注意して使用すべきである。この値は“軽作業”の条件で年間 2,000 時間（1 週 40 時間で 50 週）の作業をする標準人についてのみ適用される（第 3 章，3.4 節）。

3.6.2 もし ALI がある特定の器官または組織の線量当量の非確率的限度によって決まる場合（Part 1，4.7 節）には，その器官または組織名を ALI の値の下に示す。また，確率的影響を制限するための委員会の勧告（Part 1，4.7 節）を満たす年摂取量の最大値 $I(\text{Bq})$ を括弧の中に示す。ALI が確率的限度によって決まる場合には，ALI の値の下に器官名は示さない。

3.6.3 放射性希ガス中のサブマージョンに関する DAC が任意の器官または組織（通常は皮膚）に対する非確率的限度により決まる場合には，その器官または組織名を DAC の下に示す。また，確率的影響を制限するための委員会勧告を満たす DAC の値を括弧の中に示す（第 8 章，8.4 節）。DAC は 2,000 時間という 1 年間の労働時間について導かれたものであることを強調する。もし，Part 1 の 3.5.2 項に記した条件が満たされているならば，空气中濃度が DAC の値よりも高い放射性希ガスに作業者がさらされることは許される。

作業者による放射性核種の摂取の限度 Part 1 ¥2,000

昭和55年6月20日 初版第1刷発行

編集	社団	日本アイントープ協会
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

振替 東京 8-143345

印刷・製本 富士美術印刷KK (803) 1171~9