

内部被曝線量評価法調査報告書

Report of Study Group of Internal Dose Evaluation

1980年11月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村村松4-33
動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所
技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33,Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1980年11月17日

内部被曝線量評価法調査報告書

Report of Study Group of Internal Dose Evaluation

主　查	石黒　秀治 ^{*1}
委　員	小泉　勝三 ^{*2}
"	宮部賢次郎 ^{*2}
"	金盛　正至 ^{*2}
"	堀　　和昭 ^{*3}
"	篠原　邦彦 ^{*4}
オブザーバー	齊藤　節子 ^{*5}

期間 1976年9月22日～1980年9月30日

目的 安全管理部内、各課における内部被曝管理の現状及び新しく勧告された内部被曝線量評価法を紹介し、内部被曝管理業務へ適用する際の検討資料とする。

要旨 従来の内部被曝線量評価法はICRP, Pub 2とPub 10に基づいて行われてきたが、最近、ICRPから新しい勧告内容をもりこんだPub 26とPub 30が発行された。

この検討会では各課における現在の内部被曝管理の現状、従来及び新しく勧告されたICRP報告書を中心とした線量評価法の概要、並びに計算例、さらに適用する際に問題となる点についてまとめた。

*1 安全管理部 安全対策課

*2 " 放射線管理第一課

*3 " " 二課

*4 " 環境安全課

*5 健康管理室

目 次

1. まえがき	1
2. 検討会の活動概要	2
3. 各課の現状のレビュー	3
3-1 安全対策課	3
3-2 環境安全課	8
3-3 放射線管理第一課	12
3-4 放射線管理第二課	16
4. ICRP 報告書を中心とした線量評価法の概要	29
4-1 ICRP Pub 2 と 30 の比較、並びに線量当量計算式の比較	29
4-2 ICRP Pub 10 の概要	30
4-3 ICRP Pub 26 の概要	38
4-4 ICRP Pub 30 の概要	49
4-5 肺モデルについての解説	62
5. 線量評価の実際	82
5-1 ICRP Pub 30 に基づく、Co-60 の預託線量当量の計算	82
5-2 ICRP Pub 30 に基づく、Pu-239 のALI 及び H ⁵⁰ の計算	84
5-3 Co-60 の吸入例	87
5-4 Cs-137 の吸入例	89
5-5 Pu-239 の吸入例	91
5-6 再処理セル内作業における空気汚染管理	93
6. 当面の線量評価法の諸問題	100
7. あとがき	101
8. Appendix	102
8-1 AEEW-R1118 の要約	102
8-2 Pub 23 AF Data	117
8-3 ウインズケール再処理工場における肺中酸化 ¹⁰⁶ Ru の in vivo 計測と線量評価	134

1. 線量評価がめき

最近 ICRP 26 および 30 と内部被曝の線量評価法に関する新しい勧告が発行された。内容は従来の ICRP Pub 2 および ICRP Pub 10 の評価法と大巾に変わり、内部被曝管理の実務への応用が最近問題視されている。

動燃東海事業所でも個人被曝管理や環境評価を担当する部門では内部被曝の線量評価法については ICRP を基にして実施してきた。

今回安全管理部の部会に於いて部内各課の内部被曝線量評価の情報交換をかねて、最近の ICRP の勉強会を各課の担当者レベルで実施しようとの決定に基づいて各課 1 ~ 2 名からなる「内部被曝線量評価法検討会」を設け合計 8 回の会合をもち各課の現状レビューと ICRP 勧告書の勉強会を行った。

最終会合後各委員とも業務に追われ報告書の作成は遅れたが、ここに本検討会の報告書をまとめたので、内部被曝を担当する部門での参考となれば幸いである。

検討会主査 石黒 秀治
(安全対策課)

検討会構成メンバー

主 査	石黒 秀治	安全対策課線量計測係
委 員	小泉 勝三	放射線管理第一課
"	宮部賢次郎	"
"	金盛 正至	"
"	堀 和昭	放射線管理第二課
"	篠原 邦彦	環境安全課環境管理係
オブザーバー	斎藤 節子	健康管理室

2. 検討会の活動概要

検討会の活動概要を表(2)に示す。

表(2) 検討会の活動概要

回数	日程	内 容	出席者
第一回	54. 9/22	① 部長挨拶 ② 本検討会において討議する内容及びスケジュール、作業分担などの決定	福田, 加藤 石黒, 小泉 篠原, 金盛 堀, 宮部
第二回	10/12	① 各課における内部被曝評価の現状紹介 a) 環境安全課 b) 放管第一課	齊藤, 石黒 小泉, 篠原 金盛, 堀 宮部
第三回	11/6	① 各課における内部被曝評価の現状紹介 c) 安全対策課 d) 放管第二課	石黒, 小泉 篠原, 金盛 堀, 宮部
第四回	12/4	① ICRP Pub 2, Pub 10 の解説 初期のICRP勧告における内部被曝評価の紹介 ② ICRP Pub 26 の解説 従来の勧告と変った点の紹介	齊藤, 石黒 小泉, 篠原 金盛, 宮部
第五回	55. 1/12	① Lung Model 1 に関する解説 Health physics Vol 12 における呼吸器モデルの紹介	齊藤, 石黒 小泉, 金盛 宮部
第六回	2/1	① ICRP Pub 30 に関する解説 Pub 30における骨モデル及び胃腸管モデルの紹介 及び説明	齊藤, 石黒 小泉, 篠原 金盛, 宮部
第七回	2/20	① 内部被ばく評価の計算演習 ICRP Pub 30に基づき, ^{60}Co 及び ^{239}Pu を例として、吸入摂取における内部被曝線量の計算演習	齊藤, 石黒 小泉, 篠原 金盛, 宮部
第八回	4/25	① 報告書原案のまとめ	石黒 小泉 宮部

3. 各課の現状のレビュー

3-1 安全対策課

(1) 線量評価の特徴

- ① Accident または Incident に伴う個人個人の線量評価を行う。
- ② 計算に必要な情報は、(a)作業環境の中の放射能濃度、(b)体外計測データ、(c)バイオアッセイデータで一次評価は主に体外計測データによることが多い。
- ③ 一次評価は代謝モデルを仮定して行う。この場合化学形の情報が必要である。
- ④ 最終評価は、体外計測、バイオアッセイの追跡データから、本人の残留関数を求め、これと標準人のデータを用いて行う。
- ⑤ 線量評価には同一核種、同一化学形の過去の事故例の追跡データが最も役に立つ。
- ⑥ 線量評価の結果が医療処置の判断基準になることもある。

(2) 線量評価の現状

① 頻度

Pu燃	3～5回／月	3～10人／年
再処理	1～2回／月	10～30人／年

- ② Incident の都度、核種、化学形、粒度分布、沈着臓器、沈着放射能、排泄放射能の確認を行い、個人の線量を評価している。
- ③ $^{239}\text{PuO}_2$ については鼻スミアと初期糞の相関データが、 ^{137}Cs , ^{106}Ru については体外計測の追跡データが得られている。
- ④ 計算の基本式には ICRP Pub 10 を用いている。

(3) 線量当量計算の基本的な考え方

- ① ICRP Pub 10 の代謝データと計算式を使用する。
- ② ICRP Pub 10 ないものについては Pub 2 のデータを使用する。
- ③ 当人の代謝データが得られた場合にはそれを使用する。
- ④ 新らしいICRPの計算方式は公式に認められた段階から使用する。
- ⑤ 被曝線量計算期間は 50 年間とする。その線量をその 1 年の被曝線量に加算し 2 年目以降は 0 と見なす。(例外 可搬性 Pu) (ただし、一次評価時の報告は 1 年線量とする。)
- ⑥ Pu の線量評価には Task group の肺モデルと、ICRP Pub 19 のパラメータを使用する。

(4) 内部被曝線量の計算

放射性物質を体内に摂取した場合、摂取による沈着の結果、体内の各器官および組織の受ける線量を知ることは、その摂取による重大さを評価する上で必要である。

体内のある部位に沈着している放射性物質 $1 \mu\text{Ci}$ 当たりの総線量は、その部位の放射能の時間積分 Q に正比例し、次式によって求められる。

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

ここに

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

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

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

$100 = 1 \text{ rem}$ につき組織 1 g 当たりのエルグ数

$\epsilon (\text{MeV}) = \Sigma \text{EF (RBE)} n$; 1 崩壊当たりの有効吸収エネルギー

m = 決定器官の重量(g) (m は通常、標準人の値を使用し、それは平均値である。 ϵ も m も個々の人に対しては調整が必要であろう。)

決定器官あるいは組織の体内汚染の時間積分は

$$Q = \int_0^t \cdot q_e(t) dt$$

となる。

ここに

$q_e(t)$ = 最初の沈着より t 日後に決定器官の中に存在する放射性核種の量

この一般式は、決定器官が全身である場合にも、ある器官または組織である場合でもすべての場合にあてはまる。しばしば、 $q_e(t)$ は直接に測定できずに時刻 t における全身中の放射性核種の量 $q(t)$ が測定される。

このような場合 Q は時に

$$f_2 \int_0^t \cdot q(t) dt$$

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

器官内に沈着される $q_e \mu\text{Ci}$ の放射性核種は、実効半減期 T_{eff} (日) によって残留する指數関数に従うものとすると時間積分は

$$Q = \int_0^t q_e \exp \left(-0.693 \frac{t}{T} \right) = \frac{T \cdot q_e}{0.693} \left[1 - \exp \left(-0.693 \frac{t}{T} \right) \right]$$

となる。

(5) 放射性核種の残留と排泄

体内にとりこまれた放射性核種は、時間とともに減少していく。減少速度は、放射性

核種の物理的な崩壊と生物学的な代謝に対応し、時間に関して指数関数的またはべき関数的である。

ウランおよびプルトニウムについての残留式、排泄率式を表(3-1-1)に示す。

表(3-1-1) ウランおよびプルトニウムの残留式と排泄率式

	ウラン (^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , 天然ウラン)	プルトニウム (^{239}Pu , ^{241}Pu)
残留式	可溶性ウランについて $R(t) = 0.2 t^{-0.5}$ ($t > 1$ 日に対して)	血液中に移行したプルトニウムに対して $R(t) = 1^*$ 不溶性プルトニウムを吸入した場合の標準肺モデルでの肺深部の残留式 $R(t) = 0.125 \exp(-\frac{0.693}{365}t)$
排泄率式	可溶性ウランに対して $Y_u = 0.8$ (第1日) $Y_u(t) = 0.1 t^{-1.5}$ ($t > 1$ 日)	可溶性プルトニウムに対して $Y_u(t) = 0.0041 \exp(-0.67t) + 0.0016 t^{-0.68}$ $Y_f(t) = 0.004 \exp(-0.46t) + 0.004 t^{-1}$

(* 血液中に移行したプルトニウムの排泄は、速度も量も小さく、被曝線量を推定する上で、作業者の一生の間に排泄がないと考えることが実際的であるとして、きめられている。)

ここに、

$R(t)$: 体内摂取してから t 日後に全身中に残留する割合

$Y(t)$: 体内摂取してから t 日目に全排泄経路を通じ、1日あたり排泄される割合

$Y_u(t)$, $Y_f(t)$: 単一の経路により尿、糞などにより排泄される割合

t = 体内摂取後の日数

$E_u(t) = q_0 \times Y_u(t)$ $E_u(t)$: t 日後に尿に排泄される μCi 数

$E_f(t) = q_0 \times Y_f(t)$ $E_f(t)$: " 糞 " "

q_0 : 最初の体内取り込み量

内部被ばく線量を評価する場合には、決定器官に対する総線量が問題となる。すなわち、実効半減期の長い放射性核種については、決定器官に対する50年間被曝線量を知る必要がある。

$q_0 = 1 \mu\text{Ci}$, $t = 50$ 年とし、総線量 D を求めた。その値を表(3-1-2)に示す。

表(3-1-2) 1 μCiあたりの各器官の受ける総線量(rem)

放射性核種	器 官	器官の質量 m (g)	実効半減期 T (日)	実効エネルギー ε (MeV)	器官に移る割 合 f _z	1 μCi沈着あたりの 総線量D (rem)
⁹² U ²³⁴ (可溶)	骨	7×10^3	300	240	0.85	7.6×10^2
	腎臓	300	15	49	0.065	1.8×10^2
	全 身	7×10^4	100	49	1.0	5.2
	(不溶) 肺	10^3	120	49		4.4×10^2
⁹² U ²³⁵ (可溶)	腎臓	300	15	46	0.065	1.7×10^2
	骨	7×10^3	300	228	0.85	7.3×10^2
	全 身	7×10^4	100	46	1.0	4.9
	(不溶) 肺	10^3	120	46		4.1×10^2
⁹² U ²³⁸ (可溶)	腎臓	300	15	43	0.065	1.6×10^2
	骨	7×10^3	300	220	0.85	7.0×10^2
	全 身	7×10^4	100	43	1.0	4.6
	(不溶) 肺	10^3	120	43		3.8×10^2
⁹² U天然(可溶)	腎臓	300				3.4×10^2
	骨	7×10^3				1.5×10^3
	全 身	7×10^4				9.8
	(不溶) 肺	10^3				8.2×10^2
⁹⁴ Pu ²³⁸ (可溶)	骨	7×10^3	2.3×10^4	280	0.83	2.9×10^4
	肝臓	1.7×10^3	1.6×10^4	57	0.11	2.2×10^4
	腎臓	300	1.6×10^4	57	0.015	1.2×10^5
	全 身	7×10^4	2.2×10^4	57	1.0	5.8×10^2
	(不溶) 肺	10^3	365	57		1.6×10^3

(6) バイオアッセイ糞分析結果に基づく内部被曝線量評価の実際

糞分析結果から、総摂取量及び長期肺沈着量を推定する。モデルには Task Group の Lung Model と ICRP Pub 19 のデータを用いる。

クリアランスの分類 : PuO₂ (クラスY) について計算する。

AMAD ; 推定値として $1.0 \mu\text{m}$ とする。
(空気力学的放射能中央径)

AMAD = $1 \mu\text{m}$, クラスYの時 N-P, T-B, P領域への沈着割合及びクリアランスは表(3-1-3), 表(3-1-4)に示す様になる。

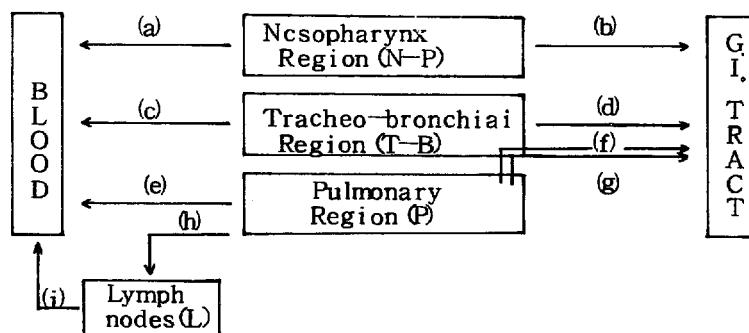
表(3-1-3) 呼吸器系への沈着割合(図3-1-5から)

総 摂 取 量 (AMAD = $1.0 \mu\text{m}$)	沈 着 割 合		
	N-P (D ₃)	T-B (D ₄)	P (D ₅)
1.0	0.3	0.08	0.25

表(3-1-3)から、初期糞に排泄されるものは、N-P領域の99%，T-B領域の99%及びP領域の40%であり、N-P領域、T-B領域、及びP領域の沈着割合は表(3-1-3)で与えられるので、次式が成立する。

表(3-1-4) 肺モデルのパラメータ

Region	Pathway	Compound class		
		(D)	(W)	(Y)
N-P	(a)	0.01d/0.5	0.01d/0.1	0.01d/0.01
	(b)	0.01d/0.5	0.4d/0.9	0.4d/0.99
T-B	(c)	0.01d/0.95	0.01d/0.5	0.01d/0.01
	(d)	0.2d/0.05	0.2d/0.5	0.2d/0.99
P	(e)	0.5d/0.8	50d/0.15	500d/0.05
	(f)	—	1d/0.4	1d/0.4
	(g)	—	50d/0.4	500d/0.4
	(h)	0.5d/0.2	50d/0.05	500d/0.15
L	(i)	0.5d/1.0	50d/1.0	1000d/0.9



$$E(t) = \{ (0.3 \times 0.99) + (0.08 \times 0.99) + (0.25 \times 0.4) \} \times (\text{摂取量})$$

E(t) ; 初期糞中に排泄される Pu の量 (pCi)

$$\therefore \text{摂取量} = E(t) / 0.476 \dots\dots\dots (1)$$

一方、摂取量を 1.0 とした時・P 領域に長期沈着する割合は表(3-1-3)と表(3-1-4)から $(0.25 \times 0.6) = 0.15$ となる。

$$(\text{肺胞部長期取込量}) = (\text{摂取量}) \times 0.150 \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式を整理すると、

$$(\text{肺取込量}) = \frac{0.150}{0.476} \times E(t) \quad (\text{初期糞中排泄量})$$

$$= 0.32 \times E(t) \quad (\text{初期糞中排泄量})$$

すなわち初期糞中に検出された量の約 3 割が肺胞に長期間 ($T_{1/2} = 500$ 日) 残留するこ

になる。

肺の被曝線量は次式から求められる。

$$D = 74 \times \frac{\epsilon \times T}{m} \times q_e \times (1 - e^{-\lambda t}) \text{ [rem]} \dots\dots\dots (4)$$

D : 期間 t 日の被曝線量 (rem)

ϵ : 有効エネルギー 53 (MeV)

T : 有効半減期 (日) 500 日

q_e : 肺中 Pu の沈着量 (μCi)

λ : $0.693/T$

t : 被曝期間 365 日または 18250 日

m : 肺の重量 $10^3(\text{g})$

以上の計算式の各人の肺沈着量 (g_e) を入力して計算する。

3-2 環境安全課

(1) 施設外環境の平常時の被曝評価

施設外環境の平常時の被曝評価は、次の 2 つに大別できる。

(a) 施設の設計段階あるいは稼動前における事前評価

(b) 施設の稼動に伴なって放出された放射性廃棄物等からの被曝評価

(a)は、施設設計あるいは運転モードの妥当性を検討するための指標となるものである。

発電用軽水型炉の場合には、設計目標値として敷地外で全身 5 mrem/年以下という被曝線量が定められており、評価法も米国の Regulatory Guide 1.109、我国の軽水炉線量評価指針といったような、ほぼ確立した手法で行われている。しかしながら、再処理施設については、このような指針は存在しておらず〔独自の評価法 + 軽水炉準拠〕というのが現状である。

(b)については、年間放出量に対するモデル公衆個人の被曝線量を算出し国に報告している。評価手法としては、「被曝線量算出要領 (SN852-77-06)」を定めているが、一部は安全審査において使用した方法を用いている。報告値の記載方法は、発電炉の場合 0.1 mrem/年以下の場合には 0. とすることが行われているが、再処理の場合には算出した数值を有効数字 2 衔に丸めてそのまま報告している。

内部被曝線量算出手法としては、基本的には ICRP Pub 2 に従うものであり、海洋放出の放射性ヨウ素については比放射能法を用いている。図 (3-2-1) に、東海再処理施設の被曝評価経路を示す。また、図 (3-2-2) に、軽水炉の被曝評価経路を示す。

(2) 環境被曝評価の特徴

環境被曝評価の特徴は次のとおりである。

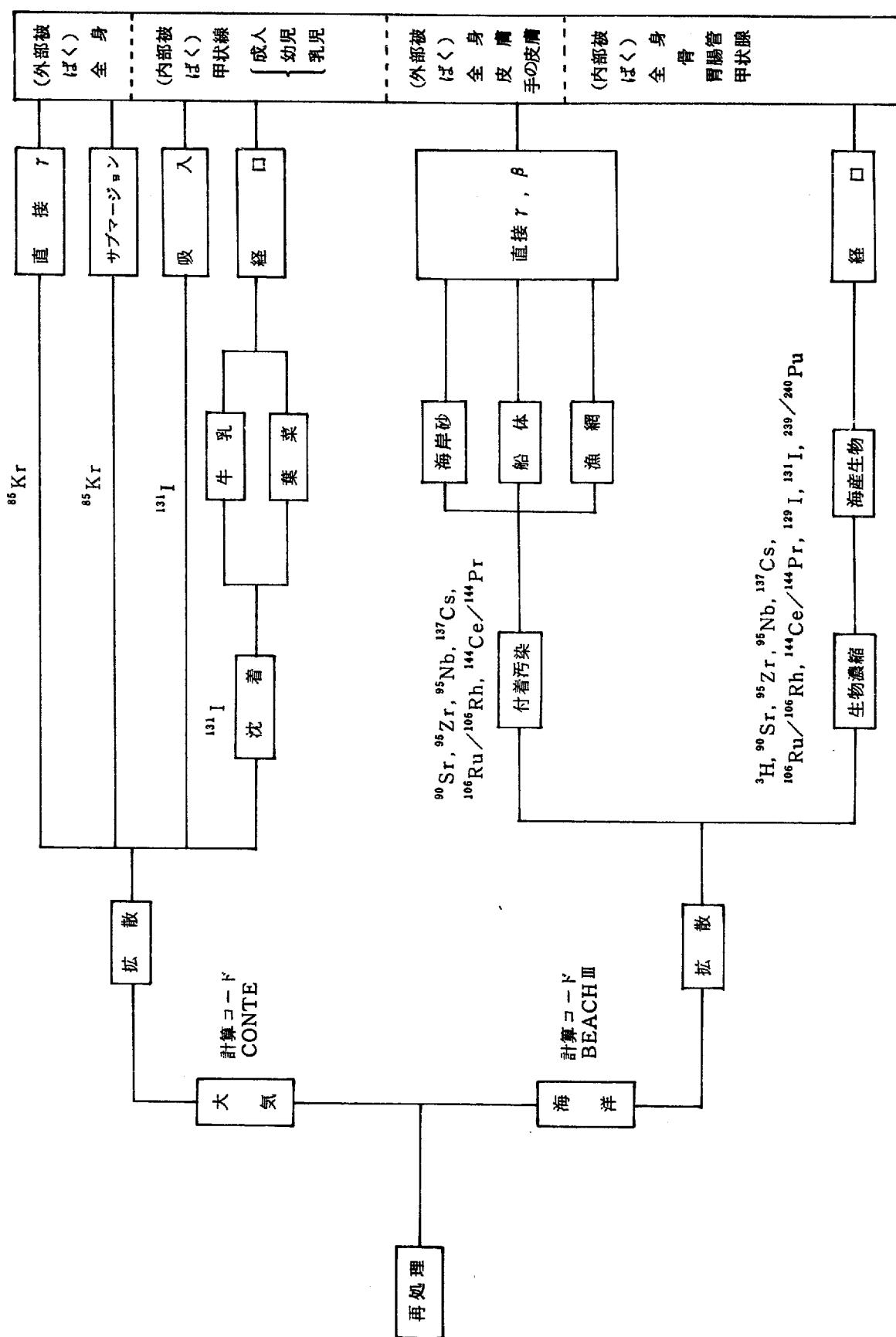
- (a) 公衆の構成員一人一人の被曝管理は不可能であるため、計算による推定を行う。
- (b) 推定の精度を高めるためには、施設から人に致る経路に係る様々なパラメータを決定する必要があり、環境中での放射性物質の挙動等広範な研究を必要とする。
- (c) 事故時を除き、長期的観点からの評価を行う必要がある。
- (d) 施設内における作業者に対する評価と比較して大きな次元の評価となり、算出した数値が直接的に放射線防護上の意味を持つものではない（事故時を除く）。

評価を用いる環境データの整理および環境中での拡散、挙動等の解析のため計算コードの開発・整備を行っており、世界的にも多くのコードが開発されている。表(3-2-1)に、動燃東海で整備している計算コードを示す。

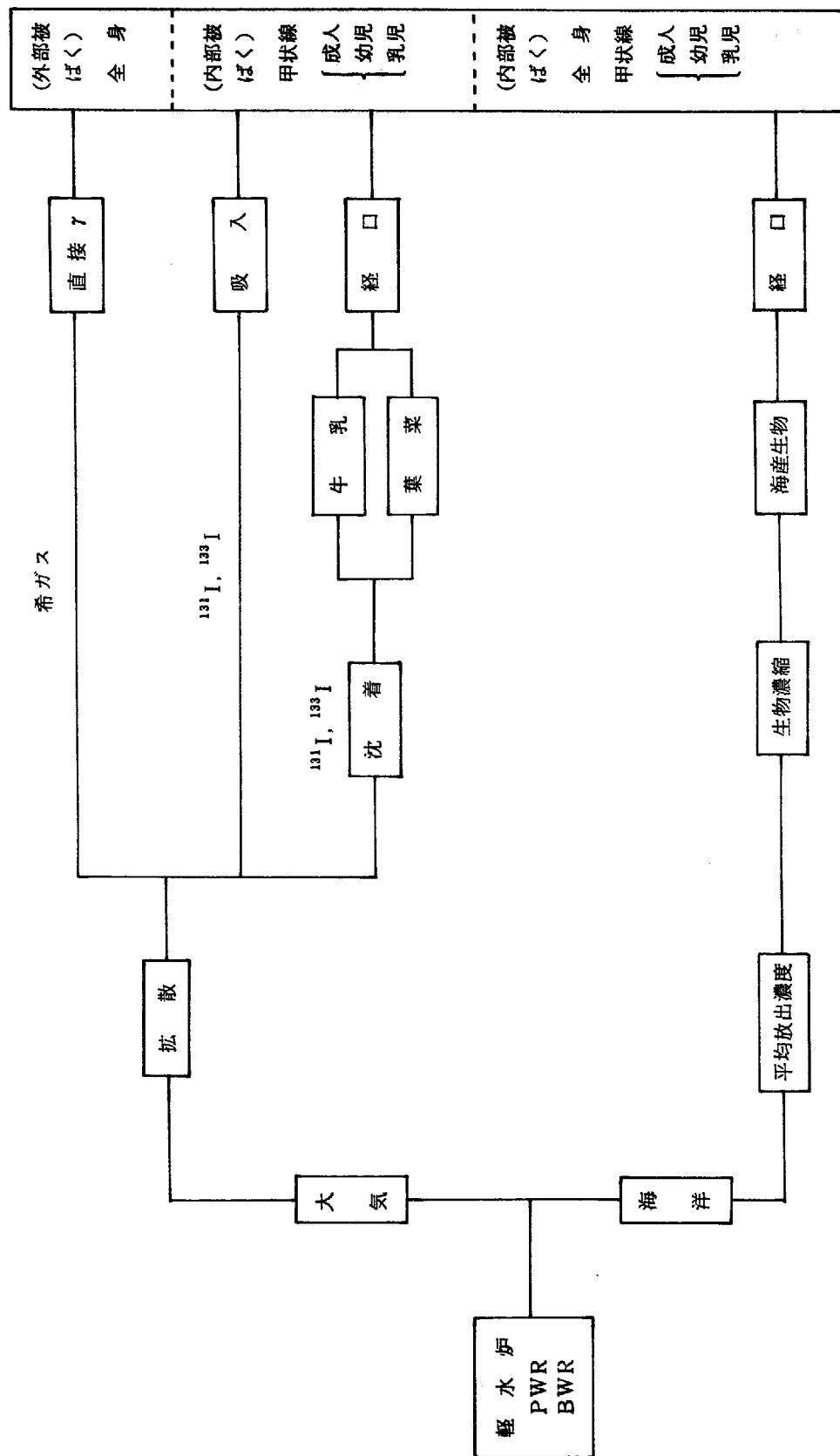
環境被曝評価法開発のトピックスは、長半減期核種(^{239}I および ^{239}Pu)による被曝評価法の調査である。環境安全課では昭和54年度に、原子力安全研究会委託で実施し、文献調査を行った。現在、我国においては、これら長半減期核種による環境被曝法は確立されておらず、核燃料再処理、高速増殖炉の開発に伴ないその十分な検討と確立が急がれる。

表(3-2-1) 環境安全課の所有コード(内部被曝評価)

コード名	内 容	作成者
ACRA-II	原子炉仮想事故時の内・外部被曝計算	ORNL
ACRO	ICRPタスク・グループ肺モデルによる内部被曝計算	PNC
ANDOSE	軽水炉線量評価指針のコード化	JAERI
BEACH-III	再処理からの海洋放出に伴なう内・外部被曝計算	PNC
CONTE	再処理からの大気放出に伴なう内・外部被曝計算	PNC
IODE 3C	放射性よう素摂取に伴なう甲状腺負荷量の計算、3コンパートメント・モデル	PNC
PLUME	原子炉事故時の内・外部被曝計算	ORNL



図(3-2-1) 東海事業所(再処理)の被ばく評価経路



* 計算コードとしては、原研開発のANDOSEが公開されている。
希ガスからのクラウドガンマ線量計算用には、中国電力開発 GAMMA-CLOUD が電力会社共通に使用されている。

図 (3-2-2) 軽水評価指針の被曝評価経路

3-3 放射線管理第一課

(1) 概 要

放射線管理第一課では、実際の現場施設において作業環境モニタリング及び個人モニタリングを行うことにより内部被曝の評価を実施しているが、これらのモニタリングの内容は次のとおりである。

i) 作業環境モニタリング

作業環境の空気汚染濃度及び表面汚染濃度の連続モニタリング及び汎紙採集モニタリング

ii) 個人モニタリング

作業者の摂取吸入に関するモニタリング

これらの業務の対象となる施設は、主に、プルトニウム燃料施設、ウラン濃縮施設等であるため、内部被曝評価において問題とされる核種は²³⁹Pu、²⁴¹Am、²³⁸U、²³⁵U等（一部の施設では¹³¹I、¹²⁹I等も含む）に限定されるが、これらの施設での放射線管理はすべて各種保安規則等に基づいた放射線管理マニュアルにそって行われている。

(2) 作業環境モニタリング

放射線管理における作業環境モニタリングは、平常時及び特殊作業時のいずれにおいても、次のようなことを目的として実施している。

i) 作業環境における平常時の濃度を監視する。

ii) 放射性物質の取扱い工程からの逸脱を早期に発見する。

iii) 吸入事故時における個人モニタリングへの情報を提供する。

④ 作業環境モニタリングにおける諸基準値

作業環境のモニタリングに際しては種々の基準値等が設けられているが、その一覧を表(3-3-1)、表(3-3-2)に示す。

表(3-3-1) 空気中放射性物質濃度の基準値

基 準 値 等	空気中放射性物質濃度	
	Pu	U
法 令 値	$6.0 \times 10^{-13} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (3カ月平均)	$2.0 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (3カ月平均)
管 理 目 標 値	$2.0 \times 10^{-13} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (3カ月平均)	$2.0 \times 10^{-12} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (3カ月平均)
管 理 基 準 値	$6.0 \times 10^{-13} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (1週間平均)	$2.0 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (1週間平均)

表 (3-3-2) 表面放射性物質濃度の基準値

基準値等	測定方法	表面汚染密度	
		α線	β線
法令値		$10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 22000 dpm/ 100cm^2	$10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 220000 dpm/ 100cm^2
管理目標値		$10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 220 dpm/ 100cm^2	
管理基準値	直接サーベイ法	$10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 2200 dpm/ 100cm^2	$10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 22000 dpm/ 100cm^2
	スミヤ法	$10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 220 dpm/ 100cm^2	$10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 2200 dpm/ 100cm^2

(注) 表中の dpm/ 100cm^2 単位は換算の際に有効数字 2桁を取って基準とした。

④ モニタリングの方法

空気汚染管理のために実施する測定の方法には、定置式ダストモニタによる連続測定、エアスニッファによるダストの集塵測定等があるが、それらの分類を表(3-3-3)に示す。

表 (3-3-3) 空気汚染管理のための測定方法

分類	測定法又は測定器	測定線種	測定場所	測定頻度	測定対象	モニタリングの役割
定常モニタリング	エアスニッファ (オーブンタイプ)	α $\beta \cdot \gamma$	管理区域	連続採取 (毎日1回) (毎週1回) (作業中, 1回)	作業環境の空気中放射性物質濃度	封じ込め機能の正常性を裏付けるために実施
	"	"	"	汚染のおそれのある時	"	汚染の発見とレベルの把握のために実施
	ダストモニタ	α	"	連続測定 (毎週1回)	"	汚染の発見と拡大防止のために実施
	"	"	"	毎日1回	測定部のレートメータ及び記録紙の点検	"
非定常モニタリング	放射化学分析	α $\beta \cdot \gamma$		必要時	作業環境の空気中放射性物質濃度	核種分析 低レベル汚染の把握のために実施
	携帯型ダストサンプラー	"	管理区域	"	特定作業環境の空気中放射性物質濃度	汚染の発見と拡大防止のために実施
	個人用ダストサンプラー	"	"	"	作業者の呼吸域の空気中放射性物質濃度	作業者の吸入摂取の有無の確認のため実施

① ダストモニター

◎ 測定方式

○検出器 表面障壁型 Si 半導体検出器 ($1''\phi$)○測定対象 α 線 ($3.5 \sim 5$ MeV)

○サンプリング方式

　　□紙 HE-40 T ($1''\phi$)　　流量 60 l/min ○警報設定 $50 \text{ MPC a} \cdot \text{hr}$ ($1.0 \times 10^{-10} \mu\text{Ci/cm}^2/\text{hr}$)○最高検出感度 $4.0 \times 10^{-12} \mu\text{Ci/cm}^2/\text{hr}$

◎ 空気汚染濃度の評価

定期的に交換採集した沪紙は、自動試料交換型放射能測定装置（検出器 ZnS(Ag) シンチレータ）で全 α 線測定装置を行い、次式により空気汚染濃度を求める。但し、測定は Rn-Tn 娘核種を減衰を持ってから行う。

$$\text{空気中汚染濃度} = (N_s - N_b) \times \frac{100}{\eta_f} \times \frac{100}{\eta_d} \times \frac{1}{2.22 \times 10^6} \times \frac{1}{Q}$$

Ns : 試料計数率 [cpm]

Nb : 自然計数率 [cpm]

 η_f : 沪紙の採集効率 (%) (≈ 100) η_d : 測定器の計数効率 (%)

Q : 流量 [l/min]

② エアスニッパー

◎ サンプリング方式

沪紙 HE-40 T

流量 60 l/min

◎ 測定方法

定期的に交換採集した沪紙は自動試料交換型放射能測定装置（検出器 ZnS(Ag) シンチレータ、ガスフロー型比例計数管、GM 管等）で全 α 線、 $\beta(\gamma)$ 線の測定を行う。尚、空気汚染濃度の算出方法はダストモニタの場合と同様である。

(3) 個人モニタリング

個人モニタリングでは、作業者の内部被曝量を定期的、不定期的に測定評価しているだけでなく、事故時における吸入摂取の有無を確認している。

個人モニタリングを表 (3-3-4) に示す。

表(3-3-4) 個人モニタリング

区分	管理の種類	検査項目	測定器名	頻度
従事者	定常モニタリング	体内摂取	肺モニタ	年1回
			バイオアッセイ	
従事者	特殊モニタリング	体内摂取	肺モニタ	その都度
			バイオアッセイ	
			鼻スミアー	

① バイオアッセイ、肺モニタ

バイオアッセイ及び肺モニタによる内部被曝評価は安全対策課及び環境安全課に依頼している。

② 鼻スミアー

放射性物質の吸入の有無及び大まかな量の推定を行う。

◎ 鼻スミアーの採取方法

- i) 線棒に戸紙(35 mm^2)を巻き、鼻孔をスミアーする。
- ii) 線棒より戸紙をはずし、赤外線で乾燥する。
- iii) 5分間測定を行う。

◎ 測定方法

○検出器 $\left\{ \begin{array}{ll} \alpha & 2\text{系統放射能測定装置 ZnS (Ag)} \\ \beta \cdot \gamma & " GM\text{管} \end{array} \right.$

○検出限界

鼻スミアー試料の検出限界(最少検出放射能)は次式により求める。

$$N_{dc} = \frac{2}{t_s} + 2\sqrt{\left(\frac{1}{t_s}\right)^2 + Nb\left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)}$$

t_s : 試料の測定時間(min)

t_b : バックグラウンドの測定時間(min)

N_b : バックグラウンドの計数率(cpm)

N_{dc} : 最少検出限界計数率(cpm)

$$\text{検出限界} = N_{dc} \times \frac{100}{\eta}$$

η : 測定器の計数効率(%)

3-4 放射線管理第2課

(1) 目的

再処理工場における定常作業及び非定常作業中の内部被曝を、法律に定められた基準値以下に管理する。このために、保安規定及び放射線管理基準を定めこれらの基準にそった管理を実施していることが目的である。

(2) 内部被曝管理上の基本的態度

内部被曝を管理して行く上での基本的態度は、特に他の被曝管理と異なることはないが、内部被曝管理上で重要となってくる点は2点ある。第1点は、内部被曝評価のための各種の因子に不明なものが多いうる点であり、線量評価上は現状ではどうしても1.2の仮定をすることになるという点である。第2点は、内部被曝線量は短時間に求めるのが困難な場合が多いが、それに反して評価値そのものは短時間に決定することが必要となってくる。この2つのことから、内部被曝線量を評価したり、あるいは管理したりする場合には必然的に安全側に評価管理してゆくことになる。放管マニュアルの中にも安全側に評価する場合について記されている。

- 作業環境の放射線レベル、作業内容を把握し、作業に伴なう被曝などを正確に評価すること。もし、放射線レベル、作業条件等の中で不明な因子がある場合、もしくは至急に結果が必要な場合は必ず安全側に評価すること。
- 『実行可能な限り低くする』の精神に則とり、被曝が低減するよう作業者に助言する。

(3) 内部被曝管理及び評価の概要

再処理工場における内部被曝管理は大きくわけて、

- 1) 定常モニタリングによる内部被曝管理
- 2) 非定常モニタリングによる内部被曝管理

の2種類にわけることができる。1)の定常モニタリングとは、再処理工場が運転しているといいないとにかくわらず常に作業環境の空气中放射性物質をモニタリングしているので、作業環境・内部被曝を管理する上で1番重要な役割を担っている。内部被曝の直接的原因は空気汚染であるが、空気汚染が空気汚染としてのみ存在する場合もあれば表面汚染、空間線量上昇のある区域から2次的に発生してくる場合も多く、この面からの管理も必要となってくる。つまり、表面汚染がある程度あれば、その面からの汚染物質の再浮遊があり、結果的に空気汚染が発生することになるし、配管等の線量上昇のある部分では、配管にあるフランジ部等からのリークにより空気汚染が発生する例もある。そこで定常モニタリング上は、

- 1) 空気中放射性物質濃度の推移
- 2) 表面汚染濃度の推移

3) 空間線量率の推移

の3点にそれぞれ注意し監視している。それぞれ空気汚染の管理・表面汚染の管理・空間線量の管理は放射線管理基準の基準値に従って管理することになっているが、実際上は、現在再処理工場内の通常人が立ち入る区域が空気汚染・表面汚染とも検出限界以下に管理されているために、検出限界以上の有意な汚染がある場合には速やかに対応がとれる状態になっている。空気汚染のモニタリングは、

- 1) エアスニファ
- 2) ベータダストモニタ
- 3) プルトニウムダストモニタ

により定常的な管理が実施されており、エアスニファシステムは再処理工場内全域をカバーし、1週間に一度測定を実施している。ベータダストモニタとプルトニウムダストモニタは、作業環境空気汚染の連続モニタリング装置で、空気汚染が発生すれば中央安全管理室(G 220)において即時確認できるモニタリングシステムである。

2)の非定常モニタリングによる内部被曝の管理は、実際の工場の運転及び保守作業等に伴って、部分的に時間的にもある期間の間だけ実施されるものである。これらは、一般的には非定常作業（放射線作業相談、及び特殊放射線作業相談によって実施される作業）に伴って実施されるモニタリングで、殆どの場合表面汚染あるいは非密封の放射性物質と接する作業であり当然空気汚染の発生が予想される。そこで、必然的に向らかの形で作業者が放射性物質を体内に吸入することを防ぐことが必要となってくる。定常的な作業との大きな違いはこの点にあり、作業者は呼吸保護具、身体防護具等を着用して作業を実施する。このような非定常作業に伴って、実施されるモニタリングとしては、定常モニタリング同様、空気汚染モニタリング、表面汚染モニタリング、空間線量率モニタリングがある。この中で一般的に見て内部被曝管理上重要なのは空気と表面の汚染のモニタリングである。非定常の作業をモニタリングする機材としては空気汚染モニタリング用として、

- 1) 移動式ダストモニタ（ダストサンプラー）
- 2) 放射性ガス測定装置（トリトン等）
- 3) パーソナルダストサンプラー

があり、定常空気モニタリング装置と併用される場合も多い。表(3-4-1)に空気汚染管理方式の概要をまとめて示す。

以上のように各種のモニタリング装置を使用して作業環境のモニタリングを行い内部被曝管理を実施している。

管理基準値及びモニタリング装置の詳細については節をあらためて述べる。また表面汚染及び空間線量率との関連も指摘したが、内部被曝評価上直接結びつく事例についてのみ、

線量評価の実際でふれたい。尚、飲料水による内部被曝、環境中へ放出している放射性物質のモニタリングも内部被曝と関連する問題としてあるがここでは取り上げない。

表(3-4-1) 空気汚染の管理方式の概要

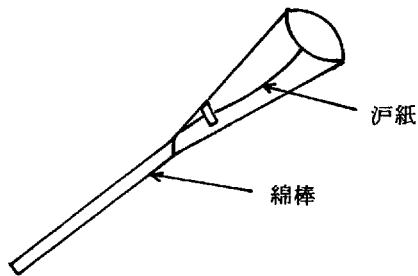
モニタリングの分類	モニタリングの項目	測定頻度	使用測定器
定常モニタリング	ダストモニタのメータ指示および記録計チャート上のチェック	毎日1回	β 線ダストモニタ Puダストモニタ
	ダストモニタ汎紙の定期的な交換、測定	毎週1回	
	エアスニファ汎紙の定期的な交換、測定	毎週1回	オープンタイプエアスニファ オンラインタイプエアスニファ
	特定場所の空気試料をまとめて化学分析 (対象場所は、施設内の管理状況を見て選定する)	毎3月1回 および 必要な都度	(環安課に分析依頼)
非定常モニタリング	作業モニタリング 放射線作業実施時のモニタリング	必要の都度	ダスト・ガスマニタ ダストサンプラ エアスニファ 個人用ダストサンプラ (P.D.S) ガス捕集測定装置
特殊モニタリング	セル内の空気汚染濃度の調査等	必要の都度	ダスト、ガスマニタ ダストサンプラ エアスニファ ガス捕集測定装置 表面汚染 → 空気汚染 密 度 ↑ 濃 度 遊離係数

内部被曝の評価は、定常モニタリング、非定常モニタリングのいずれについても実施するが、被曝評価を実施するのは以下の条件のいずれかの場合である。

- 1) あきらかに空気汚染がある区域に作業者が呼吸保護具なしで入った場合
- 2) 作業者が事故等で放射性物質を吸入したと考えられる場合
- 3) 作業者が呼吸保護具を着用して作業していても、呼吸保護具の故障、あるいは性能以上の空気汚染があるなどして作業者が放射性物質を吸入したと考えられるとき

内部被曝があったかどうかを簡便に測定するには、鼻スミヤ法が用いられている。作業者が放射性物質を吸入したと考られる場合には、まず鼻スミヤを実施し、しかる後に肺モニタ、ホールボディーカウタにより直接的に放射性物質を測定する方法がとられている。鼻スミヤの採取は、鼻スミヤ汎紙(線棒の先端に比較的柔らかな汎紙を巻きテープで固定したもの図(3-4-1)を参照)を使用し左右の鼻孔を別々に鼻スミヤ採取を行い別々に測定する。さらに表(3-4-2)に示す検出限界計数率を超えたものについては、左右の鼻スミ

ヤの放射能測定値を合計した値を1サンプル当たりの放射能として評価している。評価に当っては、1サンプル（左右2本の鼻スミヤ値を加算したもの）の放射能を20～40倍してその値を作業者の吸入した放射能量としている。現状における鼻スミヤ測定の検出限界値は、全 α 及び全 $\beta(\gamma)$ 測定法に対して表(3-4-2)に示す値である。



図(3-4-1) 鼻スミヤ汎紙

表(3-4-2) ガスフロー-PR自動測定装置の検出限界値

α			$\beta(\gamma)$		
自然計数率 c/min	限界計数率 cpm μCi		自然計数率 c/min	限界計数率 cpm μCi	
0 / 5 min	0.8 cpm $1.8 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$		9 / 5 min	1.7 cpm $2.1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$	
1 / 5 min	1.1 cpm $2.5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$		10 / 5 min	1.8 cpm $2.3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$	
2 / 5 min	1.3 cpm $2.9 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$		11 / 5 min	1.9 cpm $2.4 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$	
3 / 5 min	1.5 cpm $3.4 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$		12 / 5 min	2.0 cpm $2.5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}$	

* 計数効率は、 $\alpha = 20\%$ 、 $\beta(\gamma) = 36\%$ とする。

● 通常時検出限限値

(4) 内部被曝に係る主要な核種

再処理工場内では、照射済核燃料をせん断・溶解しているために、²³⁵Uの核分裂生成物及び超ウラン元素（Pu等）のすべてが工程中に存在する。そこで工程中で異常があり空気汚染が発生するとそのすべての核種の空気汚染が発生する可能性があるわけである。しかし実際には、ある作業区域で取り扱われる放射性核種は限られている場合が多いので、一概にすべての核種の空気汚染が発生し内部被曝につながると言えない。そこで現在までに発生したことのある空気汚染の核種を分析した結果検出された核種を以下にあげる。より詳細なデータについては、再処理工場における放射線管理試料のガンマ線スペクトル集ZN-841-80-02等を参照して頂きたい。

現在までに再処理工場内で空気汚染として検出された核種は、

1) アルファ線放出核種

²³⁸Pu, ²³⁹Pu
²⁴¹Am } 超ウラン元素
²³⁵U, ²³⁸U } ウラン

2) ベータ、ガンマ線放出核種

³H, ⁹⁰Sr-Y
⁵⁴Mn, ⁶⁰Co
¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹⁰⁶Ru-Rh, ¹⁴⁴Ce, ¹²⁵Sb, ¹⁵⁴Eu, ¹⁵⁵Eu
¹²⁹I, ¹³¹I, ⁸⁵Kr

であり、溶解液中に含まれていると考えられる核種は殆ど空気汚染として確認されている。このうち、²³⁹Pu等のアルファ核種は再処理工場内でも、プルトニウム操作区域系に限定されている場合が多いが、 $\beta(\gamma)$ 放出核種は、再処理工場内の保守作業に伴う空気汚染の原因の主要なものとなっている。（より詳細は再処理工場における放射線管理試料の核種の種類と工程との関係ZN-841-80-06を参照）

(5) 管理基準値

空気中放射性物質に関する許容濃度は、原則としてアンバー区域に対する基準が、科学技術庁告示の21号に示されている値であり、グリーン区域に対してはその1/10以下に管理することになっている。管理基準値の一覧表を表(3-4-3)～表(3-4-7)に示す。

(6) 呼吸保護具類の種類と着用基準

呼吸保護具には、半面マスク、全面マスク、エアマスク、エアラインマスク、エアライソース、ハウエル型加圧服の6種類があり、現状ではそれぞれの作業環境の空気汚染濃度及び作業形態に合わせて放射線管理課員が着用すべき呼吸保護具を選択し、現場が決定して使用している。

呼吸保護具類の種類と着用基準を表(3-4-8)に示す。

表(3-4-3) 管理区域内の管理基準

管理区分	設定基準	管 理 基 準 値		
		表面汚染濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$		空気中放射性物質濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$
		α	β	
レッド区域	50ミリレム/h 以上	—	—	—
アンバー区域	1.25～ 50ミリレム/h	10^{-6} $(2 \times 10^2 \text{ dpm}/100\text{cm}^2)$	10^{-6} $(2 \times 10^3 \text{ dpm}/100\text{cm}^2)$	第2-3表(MPC) a × 0.75を越えないこと。
グリーン区域	1.25ミリレム/h 以下			第2-3表(MPC) a × $0.75 \times \frac{1}{10}$ を越えないこと。
一時管理区域	—	同上，アンバー，グリーン区域に準ずる。		

注) ここに掲げた基準値以内であっても、汚染は速やかに可能な限り除染することが原則である。

表(3-4-4) 空気中放射性物質濃度

区 分	許容濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)
放射性物質の核種が明らかでない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	2×10^{-13}
^{231}Pa , Th (天然の混合比のもの), ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu , ^{248}Cm , ^{249}Cf 及び ^{251}Cf が含まれていない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	7×10^{-13}
^{227}Ac , ^{230}Th , ^{231}Pa , ^{232}Th , Th (天然の混合比のもの), ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu , ^{248}Cm , ^{249}Cf 及び ^{251}Cf が含まれていない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	1×10^{-12}
アルファ線を放出する放射性物質及び ^{227}Ac が含まれていない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	1×10^{-11}
アルファ線を放出する放射性物質並びに ^{210}Pb , ^{227}Ac , ^{228}Ra 及び ^{241}Pu が含まれていない場合(次に掲げる場合を除く。)	1×10^{-10}
アルファ線を放出する放射性物質並びに ^{90}Sr , ^{129}I , ^{210}Pb , ^{227}Ac , ^{228}Ra , ^{230}Pu , ^{241}Pu 及び ^{249}Bk が含まれていない場合	1×10^{-9}
プルトニウムおよびその娘核種のみの場合	6×10^{-13}

表(3-4-5) 核種が1種類の場合の空気中放射性物質濃度

区分	許容濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)
よう素およびその娘核種のみの場合	6×10^{-10}
^{35}Kr のみの場合	3×10^{-6}
^3H のみの場合	2×10^{-6}
^{60}Co のみの場合	3×10^{-9}
^{90}Sr のみの場合	4×10^{-9}
^{106}Ru のみの場合	2×10^{-9}
^{134}Cs のみの場合	4×10^{-9}
^{137}Cs のみの場合	5×10^{-9}

以上に掲げる場合のほか、種類が明らかでかつ1種類もしくは2種類以上である場合については、昭和35年9月30日科学技術庁告示第21号による。

表(3-4-6) 種類が明らかでない放射性物質の場合の水中濃度の管理基準

区分	許容濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)
放射性物質の核種が明らかでない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	1×10^{-7}
^{226}Ra 及び ^{228}Ra が含まれていない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	1×10^{-6}
^{90}Sr , ^{129}I , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{238}U , U (天然の混合比のもの), ^{248}Cm 及び ^{254}Cf が含まれていない場合(次以下に掲げる場合を除く。)	7×10^{-6}
^{90}Sr , ^{129}I , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{223}Ra , ^{226}Ra , ^{231}Pa , ^{232}U , Th (天然の混合比のもの), ^{238}U , U (天然の混合比のもの), ^{248}Cm , ^{254}Cf 及び ^{256}Fm が含まれていない場合(次に掲げる場合を除く。)	2×10^{-5}
^{90}Sr , ^{125}I , ^{126}I , ^{129}I , ^{131}I , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{211}At , ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{227}Ac , ^{228}Ra , ^{230}Th , ^{230}U , ^{231}Pa , ^{232}Th , ^{232}U , Th (天然の混合比のもの), ^{238}U , U (天然の混合比のもの), ^{248}Cm , ^{254}Cf 及び ^{256}Fm が含まれていない場合	3×10^{-5}

(注1) 以上に掲げる場合の他、種類が明らかで、かつ1種類もしくは2種類以上である場合については、昭和35年9月30日科学技術庁告示第21号による。

(注2) 種類が明らかで1種類である放射性物質の場合の許容濃度は、昭和35年9月30日科学技術庁告示第21号の別表第1による。

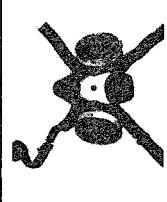
表(3-4-7) 立入禁止または立入制限等の設定基準

区分	管理区域	立入規制区域	立入制限区域	立入禁止区域	汚染区域	指定期間
放射線量率	グリーン	——	1.25 mrem/h以上	50 mrem/h以上	——	立入制限、立入禁止 → 工場長 立入規制区域 → 施設担当課長 汚染区域→放管2課長
	アンバー	2.5 mrem/h以上を目安	——	50 mrem/h以上	——	
表面汚染密度	グリーン	α 10^{-6} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上 β 10^{-5} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上	——	——	α 10^{-5} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上 β 10^{-4} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上	
	アンバー	α 10^{-6} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上 β 10^{-5} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上	——	——	α 10^{-5} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上 β 10^{-4} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上	
空気中放射性物質濃度	グリーン	(表3-4-4) $\times \frac{1}{10} \times 0.75$ 未満	——	——	(表3-4-4) $\times \frac{1}{10} \times 0.75$ 以上	
	アンバー	(表3-4-4) $\times 0.75$ 未満	——	——	(表3-4-4) $\times 0.75$ 以上	

注1) 立入禁止区域及び汚染区域の設定基準に該当する区域が生じた場合には、その区移の管理は汚染拡大防止を目的とした汚染区域として処置しなければならない。

注2) 汚染区域設定基準について、ここに掲げた値を越えた場合、汚染の拡大防止を効果的な除染を集中して行うために汚染区域を設定するものである。

表(3-4-8) 呼吸保護具類の種類と着用基準

種類	型式名	メーカー	適用	写真No.	着用基準目安 (空気汚染濃度)	使用上の注意	防護系数(P·F) 使用状態	マスク写真
全面マスク	カスタムカンホ型 カスタムカンホⅡ型 (Hウルトラフィルター タイプ)	MSA社	ダスト用	① ②	< 5 (MPC) a • hr	○フィルター交換は1回／2年以上 ○酸素欠乏、ガスの防護に無効	10	
	カスタムカンホ型 (GMC-Hフィルター タイプ)		ダスト及びガス用 (酸性機) ヨウ素系	—	< 5 (MPC) a • hr ※ 2.4	○吸気抵抗のため短時間 ○目的防護に注意 ○ガスの種類と濃度により使用時間が異な つくるので注意 ○酸素欠乏には無効	10	
全面マスク	ツインタイプ (全面マスクフィルター共通)	MSA社	ダスト用	※ 2	③	○面体のフィットの状態に注意 ○全面マスクの注意事項参照	100	
	シングルタイプ (アウエル89/SST フィルタータイプ)		ダスト及びガス用 (ヨウ素系ガス)	※ 2	④ ダストに対して 5～10 (MPC) a • hr	○ダスト用ツインタイプ(半 面マスクフィルタ共通)	100	
エアマスク	ツインタイプ (全面マスクフィルター共通)	MSA社	ダスト及びガス用 (酸性機) ヨウ素系	※ 2.4	⑤ ダスト用 (ヨウ素系ガス)	○ダスト用ツインタイプ(半 面マスクフィルタ共通)	100	
	401型(デマンドタイプ)	MSA社	ダスト及びガス用 (酸素欠乏時使用及 び短時間緊急用)	—	⑥ 1.0～100 (MPC) a • hr	○面体のフィットの状態に注意 ○使用時間に注意(通常約30分) ○空気ボンベ未使用2300 PSI(約160kgf) ○重量 約15 kg	100	
エアライ スマスク	コンスタントフロータイプ	MSA社	ダスト及びガス用	—	⑦ 1.00～10.00 (MPC) a • hr	○空気供給圧力 約0.5～1 kg ○歩く時ジョイント部保護のためエアライ ンホースを手に持て歩くこと ○ホース長さ 20～30 m	1000	
エアライ スマスク	コンスタントフロータイプ	重松	ダスト及び不透性ガス 用	—	—	○よりも止めを使用 ○スージーの材質とガスの種類によって防護 性能に変化がある ○エアライスマスクの注意事項参照	1000	
ハウェル型 加压服	マーチン デール	マーチン デール	ダスト及びガス用 (酸性機) ヨウ素系	ガス	⑨ 1000 (MPC) a • hr	○バッテリーの充電が充分であること ○バッテリ容量が最大において連続7時 間使用 ○よりも止めを使用 ○酸素欠乏には無効	1000	

(注) *1 空気中の放射性物質濃度(MPC) a • hrは、1週48時間の(MPC) aが1時間継続した場合の濃度である。

*2 空気浄化型ガス用マスクは、ガスの種類と濃度レベルにより使用可能時間が異なってるので注意を要する。また、製造会社の使用上の注意に従って使用すること。

*3 スージーの材質とガスの種類によって防護性能に変化がある。ダスト及び不透性のガスに対する1000 (MPC) a • hrでも使用できる。

*4 ダストに対しては全面マスクの場合5～10 (MPC) a • hrの範囲で、全面マスクの場合5 (MPC) a • hr以下での範囲で使用可。ガスに対しては上記※2のとおりとする。

*5 防護系数(P·F)は環境空気中の汚染物濃度に使用条件下におけるエクロージェア(通常フェースピースの内側)の汚染物濃度を除して得られた係数である。

(7) 定置式モニタの機能及び構成

定置式モニタ全体の機能及び構成について表(3-4-9)にまとめて示す。個人被曝及び基準値と直接的に関係してくるのは、それぞれのモニタのアラーム設定値であるが代表的な例としてPuダストモニタについて、アラーム値の設定理由及びその意味について記す。

アラームレベルは、汚染検出の感度をより低く保つという考え方から、モニタの検出限界値に設定しており、バックグラウンド+3σのカウント数(40 cpm)に設定している。プルトニウムの(MPC)aは、 $6 \times 10^{-13} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であり、Puダストモニタは $60 \ell/\text{min}$ の流量で運転されているので、1(MPC)aの空気が一週間継続した(内部被曝評価などの関連で、これを168(MPC)a・hの空気汚染という場合がある)とするとPuダストモニタの戸紙上には、

$$\begin{aligned} & (\text{MPC})\text{a} \\ & 6 \times 10^{-13} (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3) \times 60 (\ell/\text{min}) \times 1000 (\text{cm}^3/\ell) \\ & \quad \times 168 (\text{h}) \times 60 (\text{min}/\text{h}) \\ & = 3.6 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} (806 \text{ dpm}) \end{aligned}$$

一方、40 cpmのアラーム設定値は、測定効率が10%，バックグラウンドが16 cpm(現在は、かなりバックグラウンドが減少し1~5 cpmとなっているのでこれは設計値)とすると、

$$\frac{(40 \text{ (cpm)} - 16 \text{ (cpm)} \times 100)}{10} \times \frac{1}{2.22 \times 10^6} \div 1.1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} (240 \text{ dpm})$$

となり、先の168(MPC)a・hの場合の放射能 $3.6 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} (806 \text{ dpm})$ との比較から、

$$\frac{1.1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}}{3.6 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} / 168 (\text{MPC})\text{a}\cdot\text{h}} \times 168 = 50 (\text{MPC})\text{a}\cdot\text{h}$$

となり50(MPC)a・h相当ということになる。結論として、50(MPC)a・hの濃度でアラームで吹鳴することにより、168hの平均濃度を $6 \times 10^{-13} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以下に保つようにつとめていることになる。

ベータダストモニタも同様な考え方によりアラームが設定されている。現在では、建設初期から比較すると、バックグラウンド計数値が、Puダストモニタ1~5 cpm、βダストモニタが20~140 cpmとなっており特にアルファ放出核種はかなり低下しているので、アラームレベルの考え方については若干の修正が必要である。それぞれのモニタのアラームレベルについても表(3-4-9)を参照して頂きたい。

表(3-4-9) 定置式モニタ一覧

モニタの種類	モニタリングの項目	測定対象	校正定数	測定範囲	警報設定値	検出器	モニタの機器部	備考
γ線エリモニタ 外部放射線のモニタリング	0.1~2MeVのγ線 7.8×10 ⁻⁴ mR/h/ cpm	7.8×10 ⁻⁴ mR/h/ (2段切換)	0.625~ 60mR/h (放管基準) (表参照)	場所に応じて 0.625~ 60mR/h (放管基準) (表参照)	窒息防止回路付GM管検出器 型式 RD 212 東芝 (GM管型式 18504 タイ アス 使用電圧 470V)	GM管仕様 閾定範囲 : (⁶⁰ Co) 10 ⁻⁴ ~ 1R/h ブロード範囲 : 400~600V 感度 : 2~3m ² /cm ² 有効距離 : 9mm クエンチングガス : Ne, Ar, ハロゲン	—	—
β線エリモニタ 外部放射線のモニタリング	Pr(アントーノフ)の自発 核分裂およびアルファ- ベータトロン反応等か らの速中性子線 (モデレーターにて熱中 性子として測定する)	0.1~10 ¹ 3 cps./nv (但し 0 R/h の時)	0.1~10 ⁷ (ログレートメータ目盛 は 10~10 ⁷ cpm)	0.1~10 ¹ (ログレートメータ目盛 は 10~10 ⁷ cpm)	400 cpm (1mrem/h に相当)	B ¹⁰ F ₃ 比例計数管検出器 型式 RD 402 東芝 (B ¹⁰ F ₃ 管型式 12 EB 40 20 th センチ、シリカ使用電圧 1800V)	GM管仕様 動作電圧 : 700V ブロード範囲 : 100V以上 感度 : 2~3m ² /cm ² 有効距離 : 50mm クエンチングガス : ハロゲン	感度材 : 100mm 厚 パラフィン
β線ダストモニタ 空気汚染のモニタリング	0.3~3MeVのβ線放 出粉塵	3×10 ⁻⁷ μCi/cm ³ / cpm	10~10 ⁷ cpm (2段切換)	300 cpm (⁶⁰ Si ¹ (MPC) a· h に相当)	端窓型GM管検出器 型式 RD 213 東芝 (GM管型式 9310 富士 使用電圧 700V)	伊紙 : 東洋戸紙 HE -10~50 m ³ /min 吸引量 : 60 L/min	GM管仕様 動作電圧 : 700V ブロード範囲 : 100V以上 感度 : 2~3m ² /cm ² 有効距離 : 50mm クエンチングガス : ハロゲン	—
ブルトニウムダストモ ニタ	約4~5.5MeVのα線 放出粉塵	3~4×10 ⁻⁵ μCi/cpm	10 ⁻⁴ ~10 ³ cpm	²³⁹ Pu ⁵⁰ (MPC) a·h相当)	シリコン表面障壁型(AZ接合 型式 RD 211 東芝 (SSD使用電圧 24V)	伊紙 : 東洋戸紙 HE -40~50 m ³ /min	SSD仕様 有効面積 : 200mm ² 有効距離 : 150mm 以下 電荷取率 : 90%以上 入射蒸厚 : A 500A	β線ダストモニタに同じ
ダスト・ガスマニタ 空気汚染のモニタリング	0.3~3MeVのβ線放 出粉塵	β線ダストモニタに同 じ	β線ダストモニタに同 じ	作業状況に応じて適宜 設定	β線ダストモニタに同じ	β線ダストモニタに同じ	β線ダストモニタに同じ	β線ダストモニタに同じ
トリチウム、クリプトン キセノン	トリチウム、クリプトン キセノン	0~10 ⁴ μCi/m ³ (トリチウムの場合)	—	作業状況に応じて適宜 設定	β線捕獲型電離箱 型式 SDCG11 SEIN	ガスの連続流入口方式 —	γ線捕獲は同一装置で 5TR/hまで 出力感度 10 ⁻⁴ μCi/cm ³	β線ダストモニタに同じ
臨界事故のモニタリング	n線	—	—	360 mR/h	プラスチック、シンチレータ検 出器型式 SDCN20 SEIN	—	の検出器よりも1系が3箇 out of 3で作動	β線ダストモニタに同じ
排气モニタ	0.3~3MeVのβ線放 出粉塵 よう素(³¹ I, ¹³¹ I)	—	—	5 kRad	U-235 (93%濃縮) ターゲ ット接合型ダイオード検出器 型式 SDCN20 SEIN	—	β線ダストモニタに同じ	β線ダストモニタに同じ
クリプトン、キセノン	クリプトン、キセノン	1×10 ⁻⁷ μCi/cm ³ / cpm	—	—	β線ダストモニタに同じ	—	β線ダストモニタは船 50mm 厚相 当運搬	β線ダストモニタに同じ
トリチウム	トリチウム	—	0~10 ⁴ μCi/m ³	—	β線ダストモニタに同じ	—	—	β線ダストモニタに同じ
オペレーショナル モニタリング	各種	各種	—	—	β線ダストモニタに同じ	—	—	—
エア・スニッフルシステム	空気汚染のモニタリング	—	—	—	伊紙 : 東洋戸紙 HE -40~50 m ³ /min	回収戸紙を バックマッシュドベータⅡ等で 測定	—	—

4. ICRP 報告書を中心とした線量評価法の概要

4-1 ICRP, Pub 2と30の比較, 並びに線量当量計算式の比較

ICRP, Pub 2と30の比較を表(4-1-1)に, 線量当量計算式を表(4-1-2)に示す。

表(4-1-1) ICRP, Pub 2と30の比較

		Pub. 30	Pub. 2	法 令
放射線障害上考慮する線量		組織・器官の預託線量当量 ($H_{50,T}$)	決定組織・器官の年線量当量率	(全身の) 線量率, 集積線量
基 本 限 度	線量当量 限 度	確率的影響に対し, $\sum wT^* H_{50,T} = 0.05 \text{ Sv}$ 非確率的影響に対し, $H_{50,T} = 0.5 \text{ Sv}$ ある核種の摂取について, 上の両式の $H_{50,T}$ を比較し, 小さい方を限度とする。	全身に対し, 5 rem/年 甲状腺, 骨に対し, 30 rem/年 その他の単一器官に対し, 15 rem/年	3 rem/3か月 および N歳まで 5 (N - 18) rem
	補助限度	確率的影響に対し, $I_j(\sum wT H_{50,T})$ (単位摂取あたり) = 0.05 Sv 非確率的影響に対し, $I_j(H_{50,T})$ (単位摂取あたり) = 0.5 Sv 上の両式の I_j を比較し, 小さい方を ALI (年摂取限度) とする。	ALI に相当するものは与えられていない。 (ただし, Publ. 9では, $\frac{1}{4}$ 年の摂取量に対し, 限度を与えている。)	ALI に相当するものはない。
誘導限度		DAC (誘導空气中濃度) = ALI / (1年間の呼吸空気量) 上式から計算される DAC が与えられている。 水中的誘導限度なし	空気中のMPCあり (MPCは DACと同じ) 水中的MPCあり	空気中のMPCあり 水中的MPCあり
放射性核種の化 学 形		化学形を考慮し, DAC は化学形のグループごとに与えられている。	不溶性, 可溶性の表現のみで, 具体的な化学形は与えられていない。	化学形は考慮せず, 法令の MPC は ICRP の MPC (不溶, 可溶) のより厳しい方を採用)
線量評価方法		透過放射線については, 線源器官から標的器官への寄与を考慮に入れた。 骨の線量評価法が変わり, 骨髓と骨表面の線量を評価する。	問題にしている器官の線量はその器官に含まれる放射能によってのみ定まる。 骨全体の平均線量を求め, 骨髓と骨表面をとくに考慮せず。	単一器官の線量はすべて評価しない。 放射能濃度と摂取時間から (全身) 線量を評価する方法が例示されている。

*組織・器官の荷重係数。Publ. 26に数値が与えられている。

表 (4-1-2) 線量当量計算式の比較

	線量当量	換算係数	残留に関連した量	吸収されるエネルギーに関連した量
ICRP Pub 2 (1959) Pub 10 (1968)	$H = 51.2 \times Q \times \text{e}^{-\lambda t}$ 〔レム〕 $\left[\frac{\text{壊変} \cdot g \cdot \text{rad}}{\text{MeV}} / \mu\text{Ci-day} \right] [\mu\text{Ci-day}] \left[\frac{\text{MeV}}{g \cdot \text{壊変}} \right]$ (核種、標的器官 (=線源器官) ごと) Pub 2 $R(t) = e^{-\lambda t}$ Pub 10 $R(t) = ae^{-\lambda t} + (1-a)e^{-\lambda t}$ 参考資料 JAERI 2644			
ORNL - 5000 (1977)	$DE = I \times U \times S$ 〔レム〕 $\left[\mu\text{Ci-day} \right] \left[\frac{\text{レム}}{\mu\text{Ci-day}} \right]$ (核種、標的器官、線源器官ごと)			
ICRP, Pub 23 (1974)	$D(T \leftarrow S) = 51.15 \times U_s \times \sum_i f_i E_i \emptyset(T \leftarrow S)$ 〔レム〕 $\left[\frac{\text{壊変} \cdot g \cdot \text{rad}}{\text{MeV}} / \mu\text{Ci-day} \right] [\mu\text{Ci-day}] \left[\frac{\text{MeV} \cdot Q}{g \cdot \text{壊変}} \right]$ T: Target organ f: 壊変あたりの放射線の放出率 E: 放射線のエネルギー S: Source organ ∅: 1 g 当たりの吸収割合 Q: 放射線の線質係数			
新しい ICRP Pub 30	$H_{50} = 1.6 \times 10^{-10} \times U_s \times \sum_i SEE(T \leftarrow S)$ 〔Sv/50年〕 $\left[\frac{J}{kg} / \text{MeV} \cdot g \right] \left[\frac{\text{壊変}}{50\text{年}} \right] \left[\frac{\text{MeV} \cdot Q}{g \cdot \text{壊変}} \right]$ 22 核種			

4-2 ICRP Pub 10 の概要

(1) 諸論

内部被曝に係わる放射性核種の体内量と線量の推定評価の目的として、Pub 2 には

- (i) 操作の安全と封じ込めの計画をたてるため
- (ii) 公衆に使用される環境の安全性を算定するため
- (iii) 被曝を十分に低くてそれ以上問題とする必要はないか、または被曝が大きいためもつと正確な推定をすることが正当であることを指摘するため。

以上3点をあげてあり、最大許容濃度の計算は50年間の低レベル連続摂取を想定している。従って1回摂取の適用には修正と補足が必要である。Pub 10はある放射性核種を1回の短期間の摂取するとした時のモデルを考えている。

Pub 10が取り扱っている内容は、代謝に関する現在の知識、代謝の数学的記述、モニタリングの方法とプログラム、および体内被曝を算定するための定量的な指針である。

(2) 放射性核種の代謝

従来の“可溶性”“不溶性”化合物という分類を“可搬性(transportable)”“非可搬性”とした。可搬性の程度は、取り扱っている化合物の物理的、化学的性質、体細胞および体液との反応、また食作用のような生物学的過程に依存する。

図4-2-1に重要な代謝の諸経路を図解的に要約して示す。

放射性核種の体内への侵入

用語の定義

摂取量(intake) 鼻または口に入った量

取り込み量(uptake) 細胞外液に吸収された量

沈着量(deposition) 問題の器官に存在する量

吸入

標準人の呼吸器中の粒子状物質

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

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

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

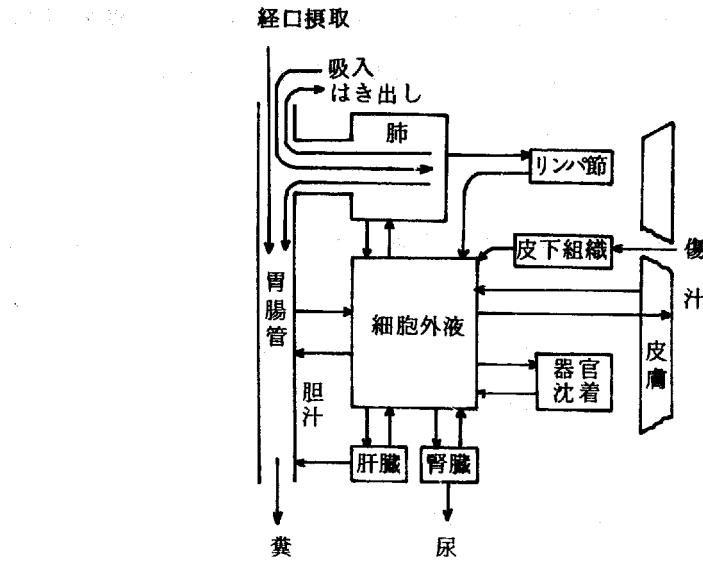


図 4-2-1 体内における放射性核種の主な代謝経路

経口摂取

非可搬性化合物であれば、その大部分は胃腸管を通過して糞の中に排出される。また可搬性であれば、主として小腸を通過中に（標準人で 4 時間かかる）かなりの部分が細胞外液に吸収されるであろう。Pub 2 に放射性核種が胃腸管から細胞外液に吸収される割合、 f_1 の値を掲げてある。

経皮吸收

無傷の皮膚を通しての液体または蒸気のかたちの酸化トリチウム蒸気あるいは溶液のかたちのヨウ素および溶液

転移と沈着

付録 A に、放射性核種が血液（または細胞外液）から関連器官へうつる割合（沈着）、 f_2' の値が収録されている。

f_2 , 全身中の量に対する決定器官中の割合

f_a , 吸入された量のうち決定器官に達するものの割合

f_w , 経口摂取された量のうち決定器官に達するものの割合

体外への排出

バイオアッセイプログラムの内容

汚染後のいろいろの時刻における排出速度の測定と、これらの排出速度を基にして身体内の残留量、そして可能な場合には体内のいろいろの器官中の残留量を、放射性核種が身体から消失するまでのすべての時期について計算する。

吸気による排出が重要な経路となるケース

- (a) 吸入したエーロゾルのうち沈着しない部分
- (b) 細胞外液に由来する酸化トリチウム蒸気
- (c) 体内に沈着したトリウムおよびラジウムの放射性崩壊により生じたトロンとラドン
- (d) 放射性炭酸ガス

○尿中に排泄される放射性核種は細胞外液にのみ由来する。

(3) モニタリングの方法とプログラム

モニタリングとは

（汚染事例に関する情報を得ること，分析用試料を集めること，その試料中および全身中の放射能を測定すること，この情報から放射性核種の体内量と決定器官への線量とを算定すること）

モニタリングの方法

(a) 表面汚染

酸化トリチウム蒸気や ^{131}I を含んだヨウ化メチルのような放射性ガスはスミヤ法が有効ではないので空気汚染情報を与えない。

(b) 空気試料の採取

空気モニタリングの実用的応用

1. 核種同定

- 2. α β 放出核種は空気試料採取の結果は医療処置をする上の有用な早期の指針
- 3. 作業者の排泄物や体内の放射性核種の日常測定の頻度を減らせる可能性

個人の吸入被曝と空気モニタリングデータの結びつけについては粒子径の情報，肺モードとの適用，dominant 粒子の存在に着目する必要がある。

(c) 排泄物，その他の生体試料の分析

（極微量放射能測定
クロスコンタミの防止
被検者の試料提供の協力）

試料：尿，糞，呼気，鼻汁，痰，唾液，汗，血液，毛

尿中の放射性核種の含有量を測る利点の1つは，試料中に1つの放射性核種が発見されたならば，その放射性核種が細胞外液中にあったことは疑いないという点である。

糞分析は非可搬性放射性核種の摂取を検出するため，およびそのような物質の肺からの排除の証拠とするために非常に有用である。

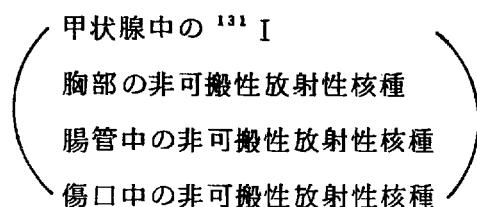
非可搬性放射性核種が吸入したことがわかった時，引き続く数日の間に糞中に排泄される総量を，肺の中に残っている量を概算するために用いることができる。現在の

ICRPの肺モデル（Pub 2 の旧モデル）によれば、残留量は糞中に排泄された量の5分の1であるとしているが修正の必要がある。

(d) 体内放射能の直接測定

^{60}Co , ^{137}Cs のように透過力の強い放射線を出す核種、あるいは ^{32}P , ^{90}Sr のように制動放射線を出す核種についてのみ適用できる。

体内放射性核種の局所的濃度を測定することが体外計測用の特殊な測定器を用いて可能な、重要な例外は次のとおりである。



モニタリングのプログラム

(a) 日常モニタリングの手法

適切な検査の頻度と種類の依存する項目

- (i) 作業の性質、特に取り扱う放射性核種の量と種類
- (ii) 作業者の防護のための施設の設計と施工の妥当性
- (iii) 検出の容易さおよび取り扱っている放射性核種の化学的、物理学的、生物学的挙動
- (iv) 過去における区域モニタリングと個人モニタリングの諸結果

(b) 特殊モニタリングの手法

開始の状況

- (i) 高い危険性のあることがわかっているか、あるいはその疑いがあるような、非日常的な作業を行なうとき
- (ii) 事故があったことがわかったとき
- (iii) 日常モニタリングによって作業者にかなりの体内汚染が発見されたとき

特殊モニタリングの場合に、摂取の時期および種類に関する情報が詳細であればあるほど、摂取量およびそれに由来する線量の大きさの推定の信頼度は高くなる。

(4) 線量の計算

体内のある部位に沈着している放射性物質 $1 \mu\text{Ci}$ 当りの総線量は、その部位の放射能の時間積分、Qに正比例し、次式により関係づけられる。

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

ここで

$Q =$ 器官への $1 \mu\text{Ci}$ の取り込みあるいは沈着から生ずる、 μCi 一日で表わした体内汚

染の時間積分

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

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

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

$\epsilon (\text{MeV}) = \sum E F (\text{RBE})_n$, 1 崩壊当たりの有効吸収エネルギー

$m = \text{決定器官の重量 (g)}$

汚染の時間積分 Q は次式より求める。

$$Q = \int_0^t q_e(t) dt$$

ここで, $q_e(t)$ は最初の沈着より t 日後に決定器官の中に存在する放射性核種の量。

$q_e(t)$ は直接には測定できずに時刻 t における全身中の放射性核種の量, $q(t)$ が測定される場合には Q は

$$Q = f_2 \int_0^t q(t) dt$$

に等しい。ここで f_2 は決定器官中の放射性核種の量が全身中の量に対して占める割合。

この f_2 値は長期連続摂取の結果生ずる沈着を記述するために選ばれたものであって、多くの場合、決定器官中の放射性核種の量は初めはゼロであり、その後最大値まで増加しその後減少する。それゆえ、摂取後の短い期間に対する線量を推定するときには、 f_2 を用いることを避け、決定器官に残留する量 $q_e(t)$ についての積分、 $\int_0^t q_e(t) dt$ をその計算のために用いることを勧めている。

実際には $q(t)$ は 1 日当たりの排泄量と次式により時間の関数として表わされる。

$$q(t) = e \times P(-\lambda_r t) [q_0 - \int_0^t E(t) e \times p(\lambda_r t) dt]$$

ここに

$q(t) = q_0 \mu\text{Ci}$ の体内取り込み後、時間 t における体内の放射性核種の μCi 数 (t は日数を表わす)

λ_r = 崩壊定数

$E(t)$ = 摂取してから時間 t 後に、単位時間当たり排泄される μCi 数 (t は日数を表わす)

普通 $E(t)$ を測定するが、残留と排泄を $1 \mu\text{Ci}$ の摂取に規準化すると次式で表わされる。

$$R(t) = e \times p(-\lambda_r t) [1 - \int_0^t e \times p(\lambda_r t) Y(t) dt]$$

ここに

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

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

$R(t)$ は個々の放射性核種に関する固有の式として次のように記述される。

(a) 指数方程式

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

ここで $K_1 + K_2 + K_3 + \dots = 1$

(b) べき関数

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

A は $t+x=1$ のとき残留する割合

その後 $t \gg x$ のとき

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

(c) 指数関数とべき関数の和

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

ここに $t \gg x$

K_i と β_i あるいは A と n の値は時間に対する排泄率のプロットから決定される。

放射性核種の最初の体内取り込み量 q_0 は 1 測定値と排泄率式より

$$E(t) = Y(t) q_0$$

あるいは、体内量の 1 測定値と残留率式より

$$q(t) = R(t) q_0$$

の関係より求めることができる。

(5) 調査のための指示

体内汚染のための個人モニタリングの分類は次の 2 つの型に分けられる。

(a) 日常モニタリング： 1 CRP Pub 9 の中で詳細に述べた原則に従い、あらかじめきめられたスケジュールに基づいて行なわれるモニタリング

(b) 特殊モニタリング： 放射性物質の放出がわかった場合、あるいはその疑いのある場合、それにさらされたあとに行なわれるモニタリング

これらの 2 つの型のモニタリングは作業者の決定器官への線量が第一の関心事でありまた算定の指標となるが、実施する直接の目的は日常モニタリングは作業者の体内に検出されないで見逃されてきた放射性物質の蓄積がこれまでなかったということをさらに確信するために実施するのに対し、特殊モニタリングの目的は放射線防護の観点から、作業者の事故による汚染の重大性の程度を評価することにある。

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

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

誘導調査レベルという用語は、器官あるいは全身に残留している放射能、あるいは 1 日あたりに排泄される量に適用され得る。それは 1 調査レベルを摂取してから時間 t の後に

おけるこれらの量の値である。

調査レベル

調査レベルに関する一般的な指針としては「作業者の体内の1つの放射性核種の量と分布が、被曝者の決定器官に対し50年間に1 CRP Pub 9 の 54 項に規定された $1/4$ 年線量の $1/10$ 以上すなわち、同書の 56 項で勧告された最大許容年線量の $1/20$ 以上の線量を与える場合は、調査を行なうべきである。これらの線量は全身、生殖腺、あるいは赤色骨髄に対しては、0.25 rem、皮膚、甲状腺および骨に対しては 1.5 rem、他の器官に対しては 0.75 rem である。

Pub 10 には上記線量に対応する決定器官内の最初の沈着量が、もっとも新しい代謝の資料を用いて計算されており、この初期沈着量が調査レベルと呼ばれる。

誘導調査レベル

短寿命放射性核種と長寿命放射性核種

可搬性の短寿命放射性核種 ($T_{eff} < 1$ 年) については、調査レベルは Pub 9 の 54 項で規定された最大許容 $1/4$ 年摂取量の $1/10$ の体内への摂取量を提案する。従って誘導調査レベルは決定器官における 1 調査レベルの沈着と結び付いた体内の放射性核種の量、または時刻ゼロで決定器官内に 1 調査レベルが存在することに対応する 1 日あたり尿中に排泄される放射性核種の量に対応する。

長寿命の骨親和性放射性核種（例えば ^{90}Sr , ^{226}Ra , 天然 Th, ^{239}Pu および ^{241}Pu 等）は誘導調査レベルを決めるのが困難なため、尿中排泄量の予期しない増加が検出されたら原因調査する必要があるとしている。

非可搬性放射性核種

調査レベル

$$\begin{aligned} \frac{1}{10} \text{ Ia} &= 0.1 \times \text{MPCa} (40 \text{ h}) \times 6.9 \times 10^6 \times 0.125 \times 182 \\ &= \text{MPCa} \times 1.57 \times 10^7 (\mu\text{Ci}) \end{aligned}$$

誘導調査レベルの考え方

1. 可搬性放射性核種

(a) 短半減期のもの ($T_{1/2} < 1$ 年)

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

(b) 長半減期の骨親和性核種

日常的で検出可能な、これらの放射性核種の日排泄量における予期しない増加

2. 非可搬性放射性核種

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

(b) 胃腸管における、何らかの放射性核種の異常な存在

(c) 傷口における、検出され得る何らかの放射能の存在

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

誘導調査レベルは実効半減期が短くなるにつれ、また年間に予期される被曝回数が増加するにつれて、誘導調査レベルを小さくする必要性が増す。このような引き下げの極限値はPub 2に規定されている連続被曝の最大許容1日摂取量に相当するレベルである。

その後の調査

一般的には、最初の日常検査により調査レベルを超えているということがわかつた場合には、体内の放射性核種の量、分布および残留をもとついに推定すべきである。

その際汚染の性質、程度および時期に適したものでなければならぬ。可搬性放射性核種と非可搬性放射性核種の間には多くの重要な相違があるから、適当な事後処理を検討する必要がある。

4-3 ICRP Pub 26 の概要

A 緒論

1977年1月17日、ICRPは勧告Publication 26を採択し、Publication 9以来、約10年ぶりにICRP勧告の大改正を行なった。その特徴は、

- ① Pub 9以来蓄積してきた放射線生物学、医学上の新しい成果、知見を取り入れた。
- ② 「放射線作業のリスクは他の安全な産業のリスクと同程度に抑えればよい。」という考え方を取り入れた。

ことにある。全体の構成は次の通りである。

A. 緒論

B. 放射線防護の目標

C. 基本的な概念

D. 放射線生物学上の考察

E. 線量制限の体系

F. 放射線防護実施の一般原則

G. 種類の異なる被曝への適用

B 放射線防護の目標

放射線防護の目的として、Pub 26では

① 非確率的な有害な影響を防止する。また確率的影響の確率を容認できると思われるレベルにまで制限する。

② 放射線被曝を伴なう行為が確実に正当とされるようにする。

の2点をあげている。確率的影響とは、その影響の起る確率が線量の関数で、しきい値がないとみなされる影響をいい（例：発癌作用、遺伝的影響），非確率影響とは、その影響の重篤度が線量の関数で、しきい値があり得るような影響をいう（例：白内障、生殖細胞の損傷）。これらの目的を実現する方法については次のように述べている。

① 非確率的影響の防止は、線量当量限度をしきい値に達しないよう、十分低い値に設定すれば達成できる。

② 確率的影響の制限は、「線量当量限度を決して越えないという条件を守りつつ、正当化できるすべての被曝を、経済的および社会的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つ。」ことによって達成できる。

さらに話を進め、「委員会は1つの線量制限体系を勧告する。」として、その特徴を以下に示す3つに要約している。

(a) 正当化 (justification)

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) 最適化 (optimization)

すべての被曝は、経済的・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) 制限 (limitation)

個人に対する線量当量は、各委員会がそれぞれの状況に応じて勧告する限度を越えてはならない。

ここで注意すべきは、(a)が(b), (c)に優先することである。すなわち、ある行為が(b), (c)を満足していても、(a)を満たしていないければ、その行為の採用は「損」と判断され禁止される。(b)は一般に集団の被曝（人・レム）を対象とした条件であるが、それだけだと、ある個人が過度に被曝する可能性がある。そこで、それらの人々を守るために(c)が設けられ、「個人の線量当量は定められたら限度を越えてはならない。」とされたのである。

C 基本的な概念

ICRPの新しい放射線防護の体系を理解するうえで必要な基本的概念のうち、特に重要なものについて説明する。

(a) 損害 (detriment)

放射線による損害とは「放射線被曝によってこうむる害の数学的な期待値である。」と定義している。例えば健康に対する損害は、次式によって与えられる。

$$G = P \sum_i p_i g_i \quad (1)$$

ただし P : そのグループの人数

p_i : 影響をこうむる確率

g_i : 影響の重篤度を表わす荷重係数

である。

(b) 線量当量 (dose equivalent) (H)

記号および単位が新しくなり、線量当量 H は次式によって表現される。

$$H = DQN \quad [\text{Sv}] \quad (2)$$

ただし D : 吸収線量 [Gy]

Q : 線質係数

N : 他のすべての修正係数の積

である。現在のところ、 $N = 1$ である。

(c) 線量当量預託 (dose-equivalent commitment) (H_c) と預託線量当量 (committed dose equivalent) (H_{50}) それぞれ次のように定義されている。

$$\text{線量当量預託 } H_c = \int_0^{10} \bar{H}(t) dt \quad (3)$$

$$\text{預託線量当量 } H_{50} = \int_{t_0}^{t_0+50\text{年}} \bar{H}(t) dt \quad (4)$$

ただし $\bar{H}(t)$: ある特定の集団に対する、ある器官あるいは組織における 1 人あたりの平均の線量当量率

$\bar{H}(t)$: 放射性物質の身体内への 1 回摂取によって、ある個人がある器官または組織に受ける線量当量率

t_0 : 摂取の時刻 50 年 : 勤労時間

すなわち H_{50} は、放射性物質の 1 回摂取による個人の 50 年間の全線量を表すことになる。

D 放射線生物学上の考察

§ 1 線量反応関係 (dose-response relationships)

Pub 26 では、「ある集団を対象とした場合、線量とある確率的な影響の起こる確率との間には直線関係が存在する。」と仮定している。また、ある 1 つの有害な効果の単位線量あたりの頻度を「リスク係数 (risk factor)」と呼んでいる。そのリスク係数を推定するさい、0.5 Gy 程度以下のデータを基にする場合は、放射線防護で問題となる

のような線量範囲において大幅な過大評価になることはないが、しかし、高線量域から得られたデータから求める場合には、おそらく過大に評価するであろうと考えられている。したがって、Pub 26 のリスク係数としては、データにある適当な係数で補正した値が採用されている。

§ 2 線量-効果(反応)関係についての諸仮定の意味合い

Pub 26 では「線量と反応は比例する。」という仮定に随伴する事項として、器官または組織の平均線量と線量蓄積率の問題にふれている。すなわち「晚発性の確率的影響に対しては、均等に分布しているときよりも、いわゆる『ホット・スポット』によるときの方が効果としては普通小さくなる。従って、ある組織中の粒子状の放射線源について、均等線量分布を仮定してリスクを算定すると、おそらく実際のリスクより過大に評価するであろう。」と述べている。それ故、例えび Pu のホット・パーティクルを肺に吸入・沈着したときも、放射線管理上は、肺の平均線量当量を評価すればよいことになる。

また、線量-反応の直線性は、線量率効果の存在しないことを暗に含むので、「1回の被曝線量当量の大きさは年線量当量限度の $1/2$ に制限すべきである。」という Pub 9 の勧告は不要であるとして削除された。また瞬間的な率についても、線量当量蓄積の率(年令と関連した式)についても年線量当量限度以外の制限を勧告していない。

§ 3 リスクを考えるべき組織

2つ以上の器官が被曝したとき、従来「個人に対する線量制限は、決定器官に与えられた線量当量限度によって決る。」とされ、他器官の被曝は原則として無視された。しかし、その後の研究により、「ある特定の器官のみがとびぬけてリスクが高いということではなく照射された器官・組織のリスクをすべて考慮した方が合理的である。」と考えられるようになってきた。Pub 26 ではこのような考え方を採用して、ある被曝状況での全組織の総リスクが計算できるよう、前述のリスク係数が与えられた訳である。個人の総リスクは年令と性によって変化するが、その変動幅はそれ程大きくないため、ICRP としては平均のリスクから得た値をそのまま用いている。またリスクとしては、致死悪性腫瘍の誘発、非確率的な変化の誘発、重大な遺伝的欠陥の誘発考慮しているが、リスク係数の対象となっているものは、致死悪性腫瘍と遺伝的欠陥である。表(4-3-1)にいろいろな組織のリスク係数を示す。

〔生殖線〕線量と遺伝的欠陥の関係について、Pub 26 では、リスク係数として、両親のどちらかの被曝後、最初の2世代に現われる重篤な遺伝的不健康のリスクは約 $10^2 / \text{Sv}$ 、また以降の世代に現われる追加損傷も同じく約 $10^2 / \text{Sv}$ としている。ただし、作業者を対象にした場合、最初の2世代に現われるリスク係数は $4 \times 10^4 \text{ Sv}^{-1}$ となる。

表 (4-3-1) 各組織のリスク係数

組織	リスク係数 (Sv^{-1})
生殖腺 (最初の 2 世代)	約 10^{-2} (4×10^{-3})*
生殖腺 (以降の世代)	約 10^{-2}
乳房	2.5×10^{-3}
赤色骨髓	2×10^{-3}
肺	2×10^{-3}
甲状腺	5×10^{-4}
骨表面	5×10^{-4}
残りの組織全部	5×10^{-3}

* 職業被曝の場合は、生涯の線量当量のうち、遺伝的に有意な割合を考慮して、最初の 2 世代の遺伝的影響の平均リスク係数は $4 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ とする。

() 外の値は 1 人の親が被曝後子供 1 人を産むと仮定した場合。

[赤色骨髓] 赤色骨髓の被曝によって発生する白血病のリスク係数として、 $2 \times 10^{-3} / \text{Sv}$ が与えられている。すなわち、1,000 の人々がすべて 1 Sv の被曝を1回受けると、推定見込数として、2人が一生のうちに白血病になる。また 1,000 人の人々がすべて連続的に、毎年 1 Sv ずつ被曝すると、平衡状態においては毎年 2 人の人が白血病になると推定される。

その他、組織のうちで問題とする細胞と線量当量評価法についての記載があるが、それらを表 (4-3-2) にまとめてみた。

その他、非確率的影響に対しては、しきい値の記載がある。例えば、眼の水晶体の場合は、視力障害を起こす混濁が生じない線量として 15 Sv を与えている。線量当量限度の勧告値としては、水晶体が 0.3 Sv/年、それ以外のすべての組織に対しては 0.5 Sv/年となっている。

その他、放射線による寿命の短縮という問題は、その証拠が決定的でなく、定量的に使用できないとして Pub 26 においては、線量制限の体系で取り上げていない。

表(4-3-2) 組織の中で問題とする細胞と線量当量評価法

組織	問題とする細胞と線量当量評価法
赤色骨髓	{ 問題とする細胞は造血細胞。線量当量は、骨梁の内腔を充満している組織の平均線量
骨	{ 問題とする細胞は骨内膜の細胞 (=内骨細胞) と上皮細胞。線量当量は、 $10 \mu\text{m}$ の厚さまでの平均線量 (Publ. 9 では骨全体の平均線量を算出し、必要に応じて修正係数 N を 5 としたが、これはすべて 1 となった)
肺	{ リンパ組織を決定器官と考えるべきではない (Publ. 19 に詳しい)。気管、気管支、肺胞および肺リンパ節からなる複合器官を考え、その質量は 1 kg とし、肺の線量当量はこの平均線量とする (線量評価法は Publ. 9 と同じ)
甲状腺	{ 問題の細胞は甲状腺ろ胞の上皮細胞。線量当量は甲状腺全体の平均線量に等しい (線量評価法は Publ. 9 も同じ)
水晶体	{ 水晶体赤道部の前極。眼の表面から 3 mm 後方にある。
皮膚	{ 表皮の基底細胞。平均 $70 \mu\text{m}$ の深さにある。

E 線量制限の体系 (68~135)

線量制限の体系については、B章(12)で既に述べられているが、ここではさらに詳しく、とくに線量制限の考え方と線量当量限度の数値に関するくわしく言及されている。

§ 1 線量当量限度の一般論 (77~86)

線量当量限度決定の基本的な考え方は次のとおりである。確率的影響に関しては、照射されるすべての組織における致死悪性腫瘍と、照射された人の子、および孫とにあらわれる重大な遺伝的欠陥との合計を総リスクと考え、この総リスクが容認できるレベルを上回ることのないよう、1年あたりの線量当量限度を定める。また非確率的影響については、一生涯あるいは就労期間を通して限度いっぱいに被曝しても、しきい線量当量に達しないよう、1年あたりの線量当量限度を定める。

§ 2 自然放射線と医療上の被曝について (87~95)

人間活動による自然放射線からの被曝增加分は線量当量限度の適用対象と考えるのに対し、医療行為による被曝については限度を示していない。

§ 3 容認できるリスクレベル (96~102) (117~124)

放射線によるリスクが容認できるかどうかの判断は放射線作業のリスクを、放射線と関係のない職業で、高い安全水準にあると認められているリスクと比較することによつ

て得られる。種々の調査結果に基づき、高い安全水準の職業というのは、職業上の危険による平均年死亡率が 10^4 を越えない職業のことであるとしている。

§ 4 職業上の被曝の線量当量限度 (103 ~ 116)

委員会は、職業上の被曝に関し、次のような線量当量限度を勧告した。

$$\left\{ \begin{array}{l} H_T \leq 0.5 \text{ Sv/年} (50 \text{ rem/年}) \text{ (水晶体以外)} \\ H_T \leq 0.3 \quad " \quad (30 \text{ rem/年}) \text{ (水晶体)} \end{array} \right.$$

ただし、 H_T は組織の年線量当量

一方、確率的影響に関しては

$$\sum T_W H_T \leq 50 \text{ mSv/年}$$

とした。ただし W_T は荷重係数とよばれ、リスク係数に比例し、かつ合計が 1.0 になるように決めた値である。表 (4-3-3) に各組織の W_T を示す。

表 (4-3-3) 各組織の W_T 値

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

§ 5 補助限度の使用 (107 ~ 109)

実際問題として、体内における線量当量の分布が知られてない場合が多いが、そのような時は深部線量当量指標の限度と年摂取限度という 2 つの補助限度を用いることにより制限を行なうことになる。

§ 6 特殊な場合の制限 (113 ~ 116)

計画特別被曝の場合、1 回の事象につき年限度の 2 倍まで、一生のうちに年限度の 5 倍を越えないよう勧告している。また、胎児保護のために、生殖能力のある女性と妊娠女性に対しては、勧告限度以外にさらに制限が加えられている。

§ 7 公衆の構成員に関する線量当量限度 (117 ~ 128)

公衆の構成員につき勧告される線量当量限度は、職業上の被曝限度の $1/10$ で、これらは公衆の中の決定グループに適用すべきものとされている。すなわち、確率的影響に関する

$$\sum_{\text{T}} W_{\text{T}} H_{\text{T}} \leq 5 \text{ mSv/年}$$

非確率的影響に関して、すべての組織につき

$$H_{\text{T}} \leq 50 \text{ mSv/年}$$

としている。

§ 8 集団の被曝（129～132）

国民全体の平均線量当量および遺伝線量限度については、これまでに述べたような防護が行なわれる限り集団の平均線量当量が 0.5 mSv/年、また遺伝線量限度（5 rem/30 年）に達することはあり得ないとして、勧告を行なっていない。

§ 9 事故と緊急事態（133～135）

予想可能な事故については、介入レベルが決められていて、それを緊急時計画に含めるべきこと、および救済処置は限度を越えれば必ずしもるべきものとは限らないことが述べられている。

F 放射線防護実施の一般原則（136～159）

この章では、放射線被曝を伴なう諸活動や企画の、立案段階から平常作業時の被曝制限、さらには事故や緊急時の対策にいたる、一般的な防護の原則について略述している。それらの具体的方策については G 章に述べられている。

§ 1 防護の諸基準（144～152）

放射線防護上のさまざまな基準を表（4-3-4）に示す。

表（4-3-4）いろいろな防護基準

限 度	{	線量当量限度
基本限度		補助限度 { 深部線量当量指標の限度 年摂取限度
誘導限度	{	たとえば 作業場所の線量当量率の限度 空気汚染の限度 表面汚染の限度 環境物質の汚染の限度
認定限度	{	たとえば 個人モニタリングの限度 環境モニタリングの限度 放出の限度
参考レベル	{	たとえば 記録レベル 調査レベル — 誘導調査レベル 介入レベル — 誘導介入レベル

各用語（基本限度については省略）の意味は次のとおりである。

- ① 誘導限度：あるきまつたモデルを仲介として、基本限度と対応する値として算出されたいいろいろな量の限度のこと。
- ② 認定限度：監督官庁または施設管理者が定める限度のことといわば規制値の意味合いを持つ。
- ③ 参考レベル：ある量の数値がこのレベルを越えるか、または越えることが予想されるときに、何らかの処置をとるために定められるものである。
- ④ 記録レベル：線量当量または摂取量についてきめられ、これを越えれば記録し保管する必要がある。
- ⑤ 調査レベル：これを越えた場合に状況調査を要すると考えられる線量当量または摂取量。
- ⑥ 介入レベル：このレベルを越えないか、または越えると予想されない場合には、介入措置をとる必要のないレベルと定義される。

§ 2 最適化の実施（153～159）

防護レベルの選択に最適化手法を適用するさいにはそのときどきの状況検討が必要である。原則としてはいくつかの被曝低減を比較し、1つの方策から他の策へ移ったときの費用の差を被曝の差とを適當な共通の尺度で比較して、プラスの大きい方を採用することになる。

G 種類の異なる被曝への適用

§ 1 職業上の被曝

作業条件の分類を表(4-3-5)に、作業場所の分類を表(4-3-6)に示す。

表(4-3-5) 作業条件の分類

		定義	コメント	Pub ⁹ との対応
職業上の被曝	A 作業条件	1年間の被曝が線量当量限度の3/10*を超えるおそれのある条件	個人モニタリングをして、必要な場合、被曝を制限する	同
	B 作業条件	1年間の被曝が線量当量限度の3/10*を超えることは到底ありそうにない条件	個人モニタリングは不要(ただし、作業条件が守られていることを確認する手段として個人モニタリングを行うことがある)	じ
被曝と関係のない作業		(一般公衆の限度を守る)		新規

* この基本限度の3/10は参考レベルであって、限度ではない。

表(4-3-6) 作業場所の分類

名 称	定 義	Pub 9 と の対 応
管 理 区 域 (controlled area)	継続して作業すると、作業条件A（年限度 $3/10$ を越えるおそれ）になることがあり、立ち入りを制限する区域。 境界の決定には、既存の建物の境界を用いる	同 じ
監 視 区 域 * (supervised area)	この区域の外の年間線量当量 ($500\text{mrem}/\text{y}$) が年度限の $1/10$ (公衆の構成員に対する限度)を越えることが、とうていありそうにない区域	新 規

また「個人モニタリングの調査レベルと記録レベル」に関して表(4-3-7)に、皮膚のモニタリングを表(4-3-8)に示す。

表(4-3-7) 個人モニタリングの調査レベルと記録レベル

	Pub. 26	Pub. 9, 10, 12
日常モニタリ ングの調査レ ベル	年線量当量限度の $3/10$ に個人モニタリングの測定期間の 1 年に対する割合をかけた値を基とする (178) (Pub 10, 12 と同じ)	Pub 9 では調査レベルという用語はない。Pub 10 では、体内被曝に対して、調査レベルは年限度の $1/20$ ($= (3/10) \times (1/6)$) (体内摂取が 1 年に 6 回起ると仮定して)。Pub 12 (98) では、体外被曝に対して、年限度の $3/10$ の線量計の 1 年間ににおける測定頻度で割った値 (例: 頻度 4 なら全身 300 ミリレム)
日常モニタリ ングでない場 合の調査レベ ル	年限度の $3/10$ を、単発の事象の 1 年間ににおける期待数で割った値 (179)	Pub 12 (99)。上記の調査レベルを越えることがしばしばあれば、調査はもっと高い現実的なレベルから開始する。この場合、上記レベルは記録レベルとする。
記録レベル	年限度の $1/10$ に基づく値 (181) (Pub 12 の $3/10$ が $1/10$ に変った)	年限度の $3/10$ に基づく値 (Pub 9, 12)

表(4-3-8) 皮膚のモニタリング

	Pub 26 (182, 183)	Pub 9
日常モニタリング	体外照射：線量計の読みを皮膚の全面積（またはかなりの部分）の代表値として扱い、該当する線量当量限度にそのまま関連させる。 皮膚の表面汚染による照射：不均等で一部分（特に手）に起こる日常の目的には、汚染は 100cm^2 に平均化しているものと見なす。線量当量限度をこの平均値に適用する。	Pub 9 では与えられておらず、Pub 6 では 30cm^2 で平均した。
事故時	吸収線量、線量当量、汚染の分布について詳細な情報を求める。最高の線量当量の部位について 1cm^2 の平均線量当量を評価する。線量分布が極度に不均一（例：微小粒子の皮膚との接触）ならば、吸収線量の局所分布を算定し、起こりうる局所皮膚反応の予測に用いる。 ただし、この局所の吸収線量を、線量当量限度に対応する吸収線量に関連づけることは不適当。	Pub 9 でも、最高の線量を受ける部位の 1cm^2 について線量を平均する。

§ 2 異常事態における介入措置

異常事態における被曝制限のための介入レベルと該当する処置は作業指導書の主題であるべきとし、また緊急時計画に関して以下の 3 つの目的を持つべきであるとしている。

- ① 合理的に達成しうる限り被曝を制限する。
- ② その状況を制御のもとに引きもどす。
- ③ その事象の原因と結果を算定するための情報を入手する。

§ 3 医療上の被曝 (195 ~ 209)

医療の場における放射線の利用については、正当化が必要であり、その決定は担当医または検査を実施する者の責任となる。そして正当性の評価にあたっては、危険を過大に評価すると、正当な検査または治療が、そのためにしりぞけられるかも知れないと注意している。

§ 4 その他の被曝 (210 ~ 243)

職業上および医療上以外の被曝を次の 5 つのカテゴリーに分類している。

- ① 放射性物質の環境中への分散による被曝
- ② 産業・医学および研究に使用される放射線源による直接の被曝
- ③ 広くいきわたった放射線源を含む製品を、日常生活で使用することから生ずる被曝

④ (通常の) 自然バックグラウンド放射線の線量レベル増加をもたらす自然の放射線源および日常生活上の行為による被曝

⑤ 授業で放射線源を使用することによる被曝

それらの被曝に対するモニタリングに関しては、平常状態と異常状態とに区分し、次のように述べている。平常状態では、操業前の考察によって、その施設が公衆の構成員にかなりの被曝を生ずる可能性があると示された場合のみ、環境モニタリングを行なう必要があるとし、個人モニタリングについては、一部の例外を除いて、個人モニタリング公衆の一般被曝モニタリングの一部になることはないとしている。また異常事態におけるモニタリングの目標は、状況を査定するためと、介入措置の必要性に関し決定を下すための情報を得ることであるとしている。

4-4 ICRP Pub 30 の概要

(ICRP Pub 30, Part 1
Limits for Intakes of Radionuclides by Workers)

(1) Chapter 1~3

内部被ばく評価に関して従来適用されてきた ICRP Pub 2 (1959) および Pub 6 (1962) に代わる報告書として Pub 30 が刊行された。Pub 2 以降明らかとなつた新しい知識を取り入れている。

Pub 2 では (MPC)_a, (MPC)_w および MPBB を主な核種について与えている。これらの値は、平均して MPC の濃度の空気あるいは水を Standard man が 50 年間連続して摂取した場合に MPBB となり、また許容線量 (5 rem/y etc) を与えることになるという値である。このため、ある摂取において MPC を超えることはしばしばありうるし、また許容できるものである。ところが、これらの値が、あたかも決して超えてはならない値であるかのように誤解されて用いられているのが現状である。このような理由から、また Pub 26 での ICRP 勧告の systematic な変更により、MPC と MPBB の考え方を止める。また、critical orgn による線量制限という考え方を放棄した。

放射線防護は、実効線量当量限度 (H_E) によって行なわれるが、これの補助限度として年摂取限度 (ALI) および誘導限度として誘導空气中濃度 (DAC) を使用する。

Derived Water Concentration が勧告されなかった理由は、水だけが経口摂取による放射性物質キャリアーではないためである。

ICRP Pub 26 では、放射線による影響を

- stochastic effect (確率的影響)
- non-stochastic effect (非確率的影響)

に区分して考え、放射線防護の目的を、

- non-stochastic effect を防止し、
- stochastic effect の発生を許容できるレベルにまで制限する。

こととしている。

worker による放射性物質摂取の限度を決定するに当っての基本限度は、

$$\sum_T W_T H_{50,T} \leq 0.05 \text{ Sv} (5 \text{ rem})$$

$$H_{50,T} \leq 0.5 \text{ Sv} (50 \text{ rem})$$

ただし、目の水晶体については、0.3 Sv (30 rem)

ここで、 W_T = weighting factor [表(4-4-1)に示す]

表(4-4-1) Weighting factors recommended by the Commission for stochastic risks

Organ or tissue	W_T
Gonads	0.25
Breast	0.15
Red bone marrow	0.12
Lung	0.12
Thyroid	0.03
Bone surfaces	0.03
Remainder	0.30

$H_{50,T}$ = 預託線量当量 (committed dose equivalent)

$$H_{50,T} = \int_t^{t+50y} H_T(t) dt$$

$H_{50,T}$ は、ある 1 年間の摂取に伴なう reference man (Pub 23) に対する 50 年間預託線量である。

補助限度 (secondary limit) および誘導限度 (derived limit) として、ALI および DAC をそれぞれ使用する。

① ALI (Annual Limit on Intake)

$$I \sum_T W_T (H_{50,T} \text{ per unit intake}) \leq 0.05 \text{ Sv}$$

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

I = 年間摂取量 (Bq)

I = ALI の時、それぞれ最大となる。

すなわち、

$$ALI (Bq) = \frac{0.05 (\text{Sv})}{\sum_T W_T \cdot (H_{50,T} \text{ per unit intake}) (\text{Sv/Bq})}$$

$$\text{ALI (Bq)} = \frac{0.5 (\text{Sv})}{(\text{H}_{50,T} \text{ per unit intake}) (\text{Sv/Bq})}$$

($\text{H}_{50,T}$ には、親核種の摂取に伴ない体内で生成する娘核種の寄与も考慮する。)

ICRPの与えるALIは、reference man のデータをもとにしたものであり、理想的には個々人の physiological parameters を考慮して決定すべき。

② DAC (Derived Air Concentration)

$$\text{DAC} = \text{ALI} / (2000 \times 60 \times 0.02)$$

$$= \text{ALI} / 2.4 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$$

ここで、 $2000 = 40 \text{ hr/week} \times 50 \text{ weeks/y}$

$0.02 = \text{air breathing rate m}^3/\text{min (light activity)}$

$60 = 60 \text{ min/hr}$

$0.02 \text{ m}^3/\text{min}$ の呼吸量は、reference man の "light activity" 時の量であり、一般的に適用できない。このため、DAC は状況に応じて使用すべき値である。

一般的に、worker による放射性物質の吸入は、次のように制限される。

$$\int_t^{t+iy} C(t) \cdot B(t) dt \leq \text{ALI (Bq)}$$

$C(t) \cdot$ 空気中放射性物質濃度 (Bq/m^3)

$B(t) \cdot$ 単位時間の作業者の呼吸量 ($\text{m}^3 \text{ per unit time}$)

③ サブマージョンについてのDAC

希ガスやHT (or T₂) による submersion 被ばくの誘導限度として DAC (submersion) を与えている。

◦ DAC (Submersion) for elemental tritium 肺の stochastic effects を考慮する。

$$W_{\text{LUNG}} \dot{H}_{\text{LUNG}} \int C(t) dt \leq 0.05 \text{ Sv}$$

$$W_{\text{LUNG}} = 0.12$$

$$\dot{H}_{\text{LUNG}} = \text{Sv/hr per } 1 \text{ Bq/m}^3$$

$C(t) =$ 時間 t における空気中 elemental tritium 濃度 (Bq/m^3)

DAC は、次のように与えられる。

$$\text{DAC} = \frac{0.05}{2000 \times W_{\text{LUNG}} \dot{H}_{\text{LUNG}}} \text{ Bq/m}^3$$

$$2000 = 50 \text{ (weeks/y)} \times 40 \text{ (hrs/week)}$$

$$\text{すなわち, } \int \text{DAC } dt = 2000 \cdot \text{DAC}$$

◦ DAC (Submersion) for a radioactive noble gas

希ガス(ラドン、トロンを除く)によるSubmersionは、外部被ばくを考え、DAC(Submersion)もこれに適用する。
すなわち、

$$\sum_T W_T \dot{H}_T \int C(t) dt \leq 0.05 \text{ Sv}$$

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

$$\dot{H}_{LENS} \int C(t) dt \leq 0.3 \text{ Sv} \leftarrow \text{水晶体}$$

それだから、DAC(Submersion)は、

$$DAC = \frac{0.05}{2000 \cdot \sum_T W_T \dot{H}_T} \text{ Bq/m}^3$$

$$DAC = \frac{0.5}{2000 \cdot \dot{H}_T} \text{ Bq/m}^3$$

$$DAC = \frac{0.3}{2000 \cdot \dot{H}_{LENS}} \text{ Bq/m}^3 \leftarrow \text{水晶体}$$

(2) Chapter 4

○放射能および線量当量単位としてSI単位系を使用する。

$$\text{activity : } 1 \text{ Bq (ベクレル)} = 1 \text{ S}^{-1} (\approx 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci})$$

$$\text{dose equivalent : } 1 \text{ Sv (シーベルト)} (\equiv 100 \text{ rem})$$

$$H = DQN$$

$$D \cdots \text{absorbed dose : } 1 \text{ Gy (グレイ)} = 1 \text{ J/Kg} (\equiv 100 \text{ rad})$$

$$Q \cdots \text{quality factor}$$

$$\alpha = 20$$

$$\gamma = 1$$

$$\beta = 1$$

$$N = 1$$

○預託線量当量(committed dose equivalent, H_{50})

放射線防護の目的→リスクは線量当量に直線比例すると仮定



50年間のworking lifeにわたる任意の組織に対する合計平均線量(H_{50})を用いる。

$$H_{50} = \sum_i \frac{\int^M D_{50,i} \cdot i Q_i N_i dm}{\int^M dm}$$

M= the mass of the specified organ or tissue for each type of radiation i

$D_{50,i}$ = 器官質量要素 dm 中の 50 年間総吸収線量, for each type of radiation i

Q_i = quality factor 水中の衝突阻止能の連続関数として定義

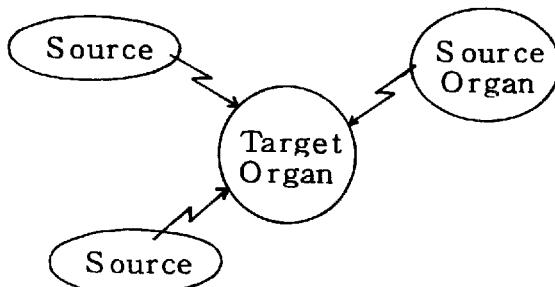
$N_i = 1$

$$H_{50} = \sum_i Q_i D_{50,i}$$

$$D_{50,i} = \frac{\int^M D_{50,i} dm}{\int^M dm}$$

◦ source-target 法

ICRP Pub 30 では、従来の Pub 2 の計算法を止め MIRD に代表される。“Source-Target” 法を採用した。



放射性核種 (j) からの type i の放射線について

$$\begin{aligned} H_{50}(T \leftarrow S)_i &= Q_i D_{50}(T \leftarrow S)_i \\ &= U_s \times 1.6 \times 10^{-13} SEE(T \leftarrow S)_i \times 10^3 \text{ (Sv)} \end{aligned}$$

ここで、 U_s = Source 器官中での 50 年間総崩壊数

$$1.6 \times 10^{-13} = \text{joules/Mev}$$

$SEE(T \leftarrow S)_i = \text{Specific Effective Energy}$
(MeV/g per transformation)

$$10^3 = g/Kg$$

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

核種 j から放出される全てのタイプの放射線について

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

Source 器官 S 中の全核種について、

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

全 source 器官から

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

◦ SEE ($T \leftarrow S$) : Specific Effective Energy

核種 j から放出される全放射線 (i) について

$$\text{SEE} (T \leftarrow S)_j = \sum_i \frac{Y_i E_i A F (T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \text{ MeV/g per tram}$$

ここで、

Y_i = 核種 j の transformation 每に放出される放射線 i の yield

E_i = 放射線 i の平均 or 個有エネルギー (MeV)

$A F (T \leftarrow S)_i$ = Source organ S から放出された放射線 i の target organ T での吸収割合 (Absorbed Fraction)。

γ particle, electron \rightarrow source 中ではほぼ吸収される。 (bone と G I 除く)

$r \rightarrow$ ICRP Pub 23 の Table 1.2 に与えられている。

neutron \rightarrow Dillman & Jones (1975) Fovd et al (1977) を使用できる。

Q_i = 線質係数

M_T = target organ or tissue の mass (g) [表 (4-4-2) に示す]

表 (4-4-2) Masses of organs and tissues of Reference Man* used in this Report

Source organs	Mass (g)	Target organs	Mass (g)
Ovaries	11(8)	Ovaries	11
Testes	35(40)	Testes	35
Muscle	28000(30000)	Muscle	28000
Red marrow	1500(1500)	Red marrow	1500(1500)
Lungs	1000(1000)	Lungs	1000
Thyroid	20(20)	Thyroid	20
ST content	250(250)	Bone surface	120
SI content	400(1100)	ST wall	150
ULI content	220(135)	SI wall	640
LLI content	135(150)	ULI wall	210
Kidneys	310(300)	LLI wall	160
Liver	1800(1700)	Kidneys	310
Pancreas	100(70)	Liver	1800
Cortical bone	4000	Pancreas	100
Trabecular bone	1000(7000)	Skin	2600
Skin	2600	Spleen	180
Spleen	180(150)	Thymus	20(10)
Adrenals	14(20)	Uterus	80
Bladder content	200	Adrenals	14
Total body	70000(70000)	Bladder wall	45

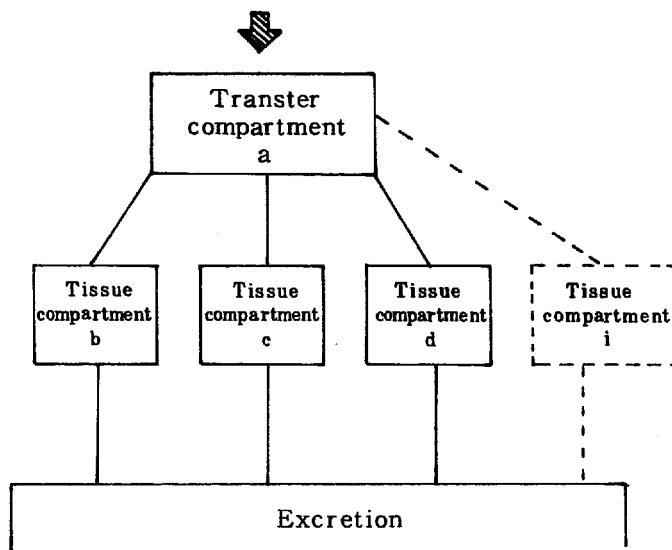
* ICRP Pub 23

** () 内 ICRP Pub 2 ~ Standard Man

◦ source organ 中での 50 年間の transformation 数は organ 中での放射性核種放射能の時間積分として表わされる。 (U)

体内での放射性核種の uptake や retewtion を表わす式は複雑であるため、通常一次指數関数モデルを使用する（骨中のアルカリ土類金属以外）。

From GI tract and respiratory system $I(t)$



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

compartment a 中の activity $q_a(t)$

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

compartment b 中の activity $q_b(t)$

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

$I(t)$ 経口あるいは吸入摂取により body fluviols 中への取り込み率

- Pub 30 の ALI, DAC は特定の核種のみについて与えられている。（Pub 2 では、実効エネルギーに娘核種の寄与も考慮されている。）

Collision stopping power of protons and electrons in water as a function of energy. を表 (4-4-3) に示す。

Quality factor as a function of collision stopping power in water. を表 (4-4-4) に示す。

Quality factors of charged particles as a function of energy. を表 (4-4-5) に示す。

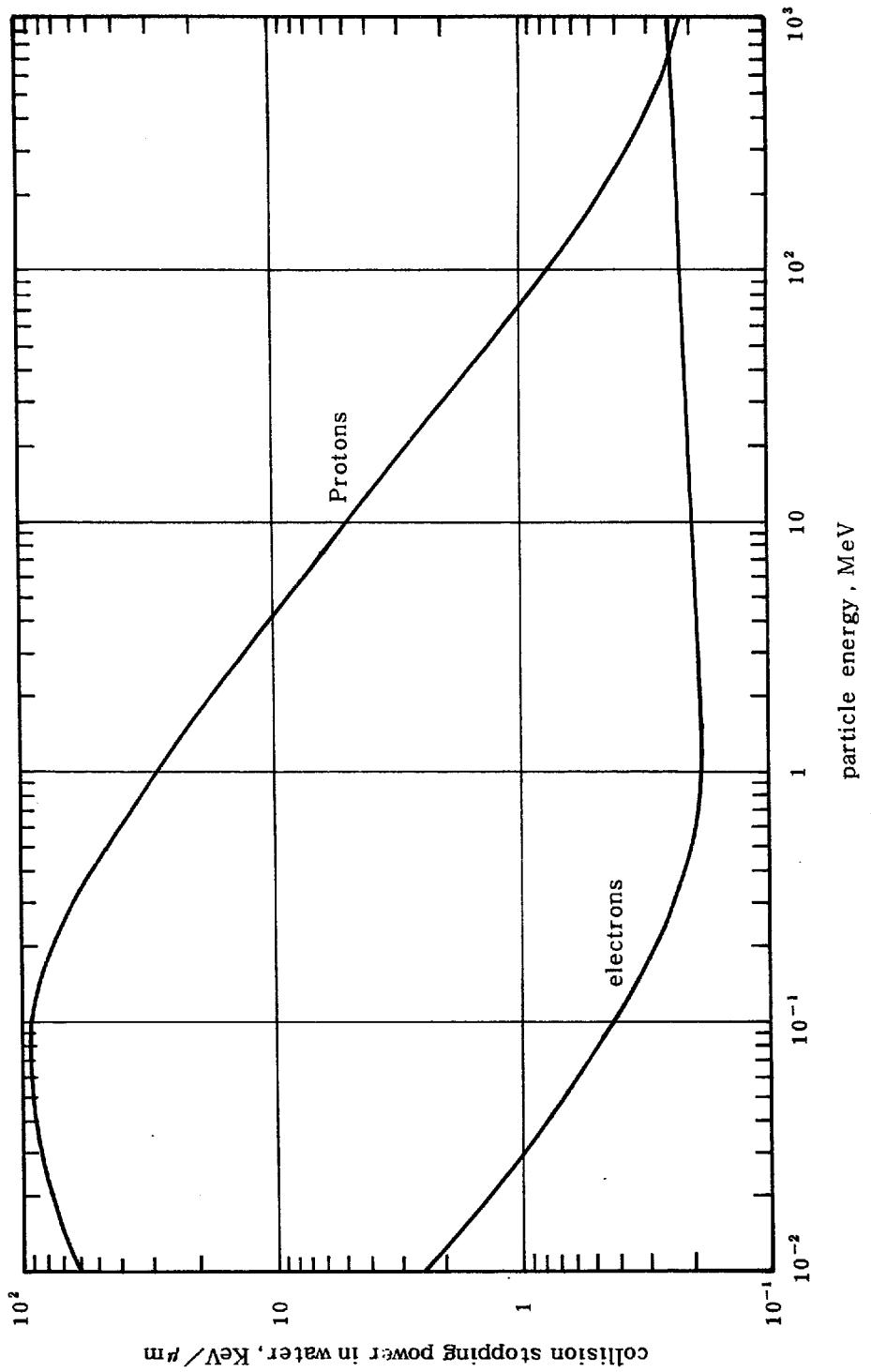


表 (4-4-3) Collision stopping power of protons and electrons in water as a function of energy.

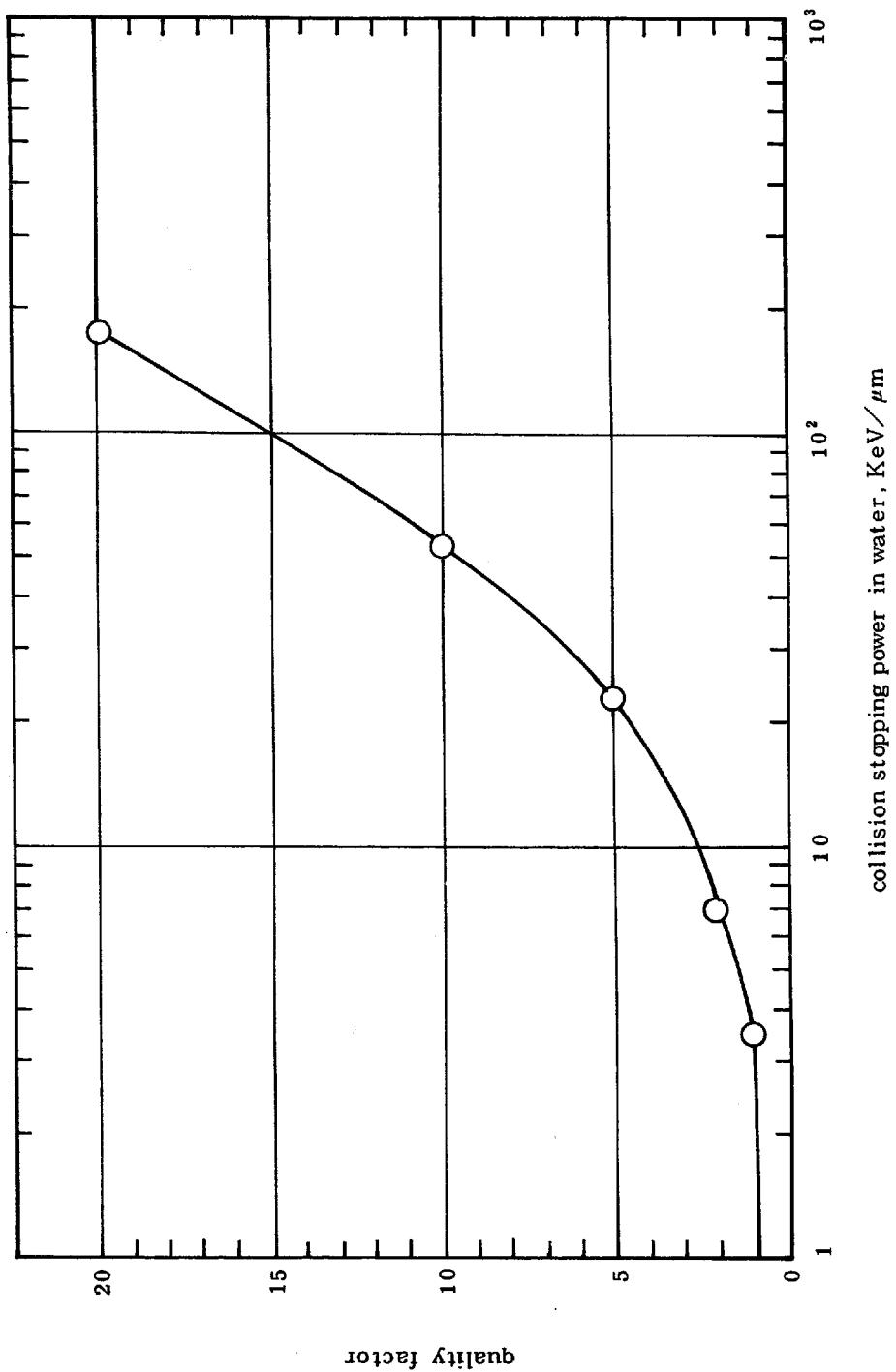


表 (4-4-4) Quality factor as a function of collision stopping power in water

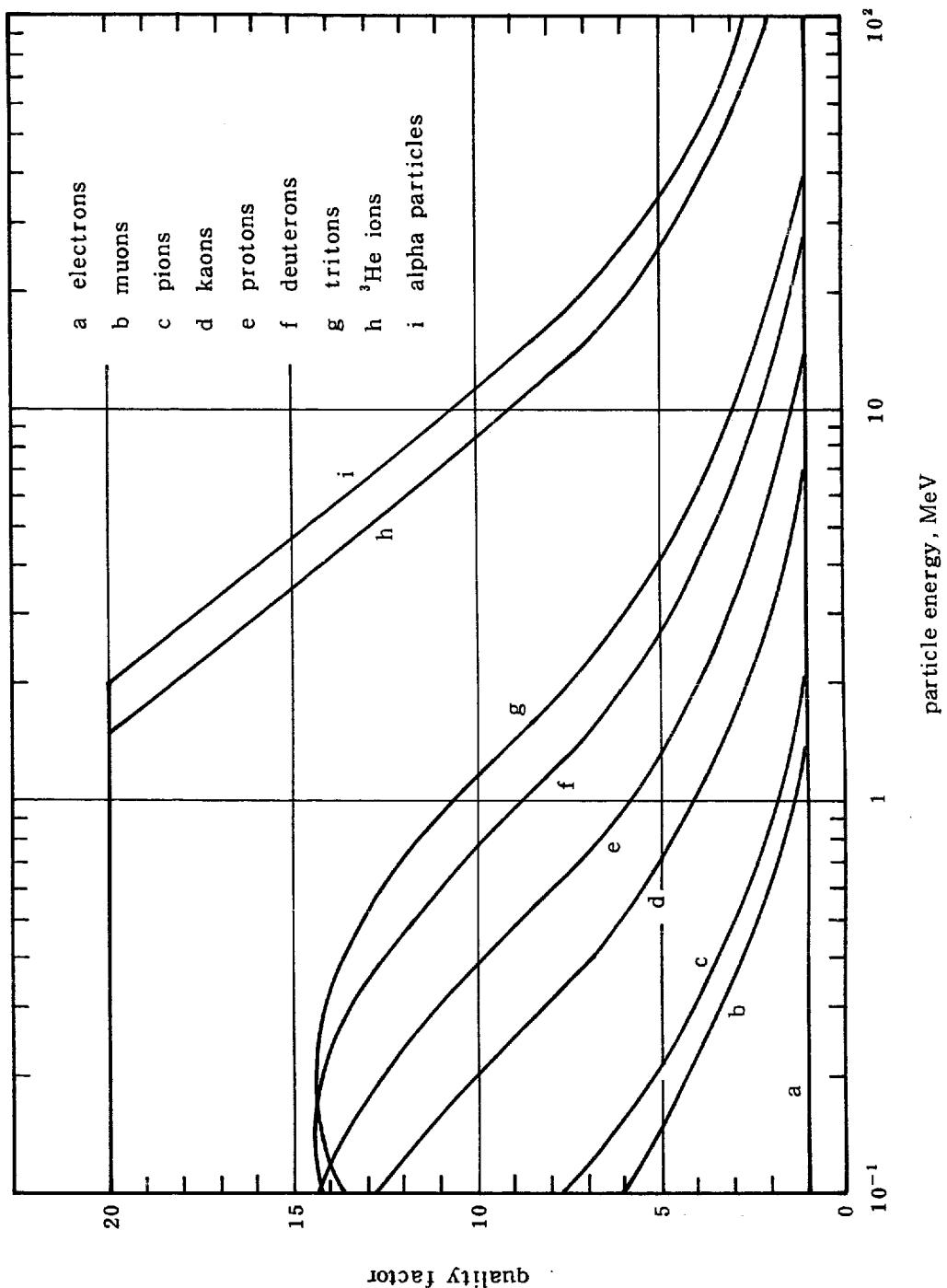


表 (4-4-5) Quality factors of charged particles as a function of energy.

(3) Chapter 6 胃腸管モデル

胃腸管を4つのコンパートメントに区分する。すなわち

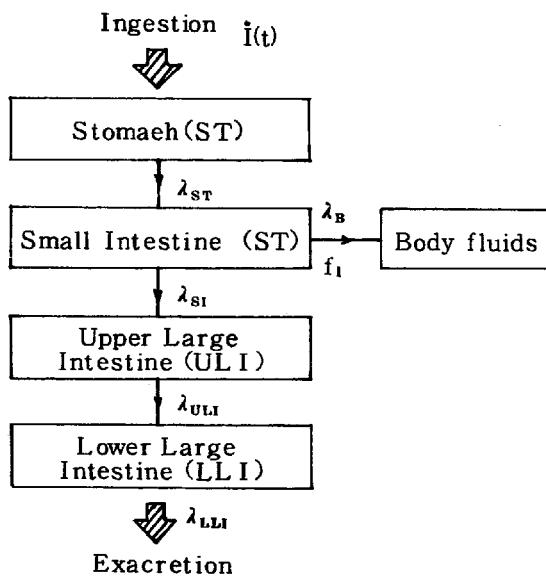
胃 (stomach)

小腸 (small intestine)

大腸上部 (upper large intestine)

大腸下部 (lower large intestine)

図(4-4-1)で表わすと次のようになる。



図(4-4-1) 胃腸管における4つのコンパートメント

時間 t における各コンパートメント中の放射性物質量を、それぞれ $q_{ST}(t)$, $q_{SI}(t)$, $q_{ULI}(t)$ および $q_{LLI}(t)$ とすると、

$$\frac{d}{dt} q_{ST}(t) = -\lambda_{ST} q_{ST}(t) - \lambda_R q_{ST}(t) + i(t)$$

$$\frac{d}{dt} q_{SI}(t) = -\lambda_{SI} q_{ST}(t) - \lambda_R q_{SI}(t) - \lambda_B q_{ST}(t) + \lambda_{ST} q_{ST}(t)$$

$$\frac{d}{dt} q_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI} q_{ULI}(t) - \lambda_R q_{ULI}(t) + \lambda_{SI} q_{SI}(t)$$

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

ここで、

λ_R : 核種の物理学的半減期

$\lambda_B q_{SI}(t)$: 小腸からの吸収率

$$\lambda_B = \frac{\lambda_{ST}}{1 - f_1}$$

$f_1 = \text{胃腸管から血液へ到達する割合}$

$I(t)$: 摂取率

胃腸管中で生成する娘核種については、

$$\frac{d}{dt} q'_{ST}(t) = -\lambda_{ST} q'_{ST}(t) - \lambda'_R q'_{ST}(t) + \lambda_R q_{ST}$$

$$\frac{d}{dt} q'_{SI}(t) = -\lambda_{SI} q'_{SI}(t) - \lambda'_R q'_{SI}(t) - \lambda_B q'_{SI}(t) + \lambda_{ST} q'_{ST} q_{ST}(t) + \lambda_R q_{SI}(t)$$

$$\frac{d}{dt} q'_{ULI}(t) = -\lambda_{ULI} q'_{ULI}(t) - \lambda'_R q'_{ULI}(t) + \lambda_{SI} q'_{SI}(t) + \lambda_R q_{ULI}(t)$$

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

(原文の (6.2a) ~ (6.2d) 式は間違い。)

$f_1 = 1$ の場合は、摂取物は全て胃から吸収されるとし、他のコンパートメントは通過しないものとする。

Section of GI tract	Mass of walls*	Mass of contents*	Mean residence time (day)	λ day ⁻¹
Stomach (ST)	150	250	1/24	24
Small Intestine(SI)	640	400	4/24	6
Upper Large Intestine(ULI)	210	220	13/24	1.8
Lower Large Intestine(LLI)	160	135	24/24	1

* From ICRP Publication 23 (1975).

○ $H_{50,T}$ の計算

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

SEE は、 non-penetrating radiation (α, β -like etc.)

penetrating radiation (r, x, n)

について別々に算出する。

np (non-penetrating) : 粘膜層 (ML)

p (penetrating) : 管壁についての平均線量を使用 (W)

$$SEE = \sum_{np} \frac{Y_{np} E_{np} Q_{np} A_F (ML \leftarrow S)_{np}}{M_T^{ML}}$$

$$+ \sum_S \sum_p \frac{Y_p E_p Q_p A_F (W \leftarrow S)_p}{M_T^W} \text{ MeV}^{-1} \text{ per trans for mation}$$

← Publication 23 (photon)

ここで、

$$\frac{AF(ML \leftarrow T)_{np}}{M_T^{ML}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{M_T^C} \cdot \nu$$

M_T^C : 内容物の質量

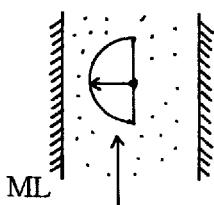
ν : 粘膜への透過の程度を表わすファクタ

$\beta = 1$

α , 核分裂片 = 0.01

反跳原子 = 0

$\frac{1}{2}$:



一方向の ML への放出割合は全体の $1/2$

(4) Chapter 7 骨についての線量評価モデル

① 序

骨ガン発生のリスクがある骨格細胞は、骨髄中の造血細胞と、特に内基礎表面上の造骨細胞および骨表面近くの上皮細胞であるとされている（Publication 11）。

- 成人の造血細胞は、骨梁中の造血骨髄中にランダムに分布していると仮定する。（Publication 11）

造血細胞への線量当量 → 骨梁中の空洞を完全に満たしている組織全体についての平均値。

- 内基礎表面上の造骨組織と骨表面上の上皮組織への線量当量 → 関連する骨表面から $10 \mu m$ の深さまでの組織全体についての平均値。（Publication 26）

これらの評価のためには、骨格のさまざまな組織における放射性核種の分布と残留についての知識が必要であるが、現在は、まだ十分な知識がない。しかしながら、放射線防護の目的のためには、全ての好骨性放射性核種について、ここで記述する方法により十分正確に預託線量当量を評価することができると言える。

② 骨表面上細胞と活性な赤色骨髄への預託線量当量 (H_{50}) の計算

標的器官中の H_{50} は、次式で与えられる。

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

- U_s → 線源器官 S 中で発生する核種 j の転移の数。

$$\circ \text{ SEE } (T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i Q_i}{M_T} \quad \text{MeVg}^{-1} \text{ trans for mation}^{-1}$$

Y_i → 転移毎に発生するタイプ i の放射線数。

E_i (MeV) → 放射線 i の平均または個有のエネルギー。

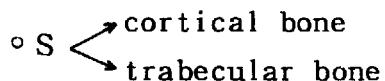
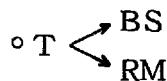
$A F(T \leftarrow S)_i$ → S からの放射線 i のエネルギーのうち、標的器官 T 中で吸収される割合。

Q_i → 放射線 i の線質係数。

M_T → 標的器官の質量、grams。

骨の場合の T (target) は、BS (the cells near bone surfaces) および RM (the active red bone marrow) である。

S (source) は、 γ 放出体を除いて、骨皮質と骨梁である。



このため、骨の線量評価には、

◦ 骨梁と骨皮質についての U_S }
 ◦ $A F(T \leftarrow S)_i$ } の評価が含まれる。

便宜上、放射性核種と放出放射線を、次の 6 クラスに大別する。

- 全ての放射性核種からの光子。
- 骨全体に均一に分布していると仮定した放射性物質からの α 粒子。
- 骨表面にあると仮定した放射性核種からの α 粒子
- 骨全体に均一に分布していると仮定した放射性からの β 粒子。
- 骨表面にあると仮定した放射性核種からの 0.2 MeV 以上の平均エネルギーをもつ β 粒子。
- 骨表面にあると仮定した放射性核種からの 0.2 MeV 以下の平均エネルギーをもつ β 粒子。

上述のクラスの 2 つ以上のものに該当する放射性核種は、異なった放射線について別々に考慮する。(なぜならば、 $A F(T \leftarrow S)_i$ は、放射線毎に与えられている。)

4-5 “肺モデル”についての解説

4-5-1 沈着および滞留モデル（1966）の解説

「Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the

Human Respiratory Tract

— Task group on Lung Dynamics —

Health Physics Vol 12 P 173 (1966)

「人間の吸収器道の内部被曝線量評価のための沈着および滞留モデル」

— ICRP の肺動力学に関する作業班の報告 —

〔呼吸道の定義〕

(1) 鼻咽頭部 (N - P)

前鼻孔からはじまり、咽頭を経て咽頭蓋に至る部分。

(2) 気管 - 気管枝部 (T - B)

気管より下って気管枝に分れ、終末細気枝までの部分。

(3) 肺 部 (P)

呼吸気管枝、肺胞管肺胞などを含むいわゆる換気機能部で線毛を含まない部分。

(1) 各領域の沈着、排除および残留について

N - P 領域

(1) 沈 着

$$\text{沈着率: } N = -0.62 + 0.475 \log D_a^2 F \quad \text{図 (4-5-1)}$$

D_a : 粉じんの空気動力学的径F : 呼気量 (ℓ/min)

- 鼻呼吸は口呼吸より N - P 領域の全沈着率は大きい。その代り口呼吸の場合気管支領域の沈着が大きくなる。(図 (4-5-1) より傾きがゆるい) 図 (4-5-2)

(2) 排除と残留

- 鼻には線毛はないが、皮脂腺をもっている。
- 線毛上に沈着した粒子は分単位のクリアランスで除かれ咽頭へ移る。
- 鼻毛上の粒子のクリアランスは毛の損失や、鼻のブローイングにより約 2 ヶ月である。
- 鼻に沈着するかなり大きな粒子のうち、鼻毛につかまるものは 30 ~ 100 % で、 $2 \sim 40 \mu\text{m}$ ($\rho = 1$) における全平均では 50 %。
- 線毛は、鼻腔からはじまり、気管、気管支を経て、終末気管支までつづいている。
- 移動は、線毛の粘液移動過程によっておこる。
- 吸収は、粒子が体液（蛋白を含有する複雑な組成）に対し、Soluble か Insoluble かで変る。

T - B 領域

(1) 沈 着

- T-B領域の沈着率を粒子径の関数として直接求めることはできない。

(2) 排除と残留

- T-B領域は上皮全部が線毛でおおわれ **goblet cells** と分泌腺からの粘液でぬらされている。
- T-Bの腺毛上に沈着した粒子は咽喉の方へ縦に移行し、咽喉では、最後にえん下されるが、つばとしてもはき出される。
- クリアランスの速度は、20分～20時間と大きく変動する。

P 領 域

(1) 沈 着

- 粒子径 (MMD) と沈着率の関係

0.5 μm 以下では、粒子の密度と無関係な拡散沈着が支配的となる。

(2) 排 除

- P領域からのクリアランスの経路として

(i) T-B領域の粘液プランケットへ移行

(ii) リンパ系による移動

(i)に関しては、**macrophages** (巨大食細胞) が関係している速い第一相のクリアランス (~ 24 時間) にはこの食細胞と腺毛粘液による移行が関係している。

遅い第2相のクリアランスがあるが、これには、粉じんの物理化学的特性が影響を与える。

- 肺胞の上皮細胞を通過する粒子径 $< 0.5 \mu\text{m}$ (食作用によるリンパの流れにのる)

肺リンパ節 (Pulmonary lymph nodes)

- P領域から移行してきたものが 500～1000 日の半減期で留る。

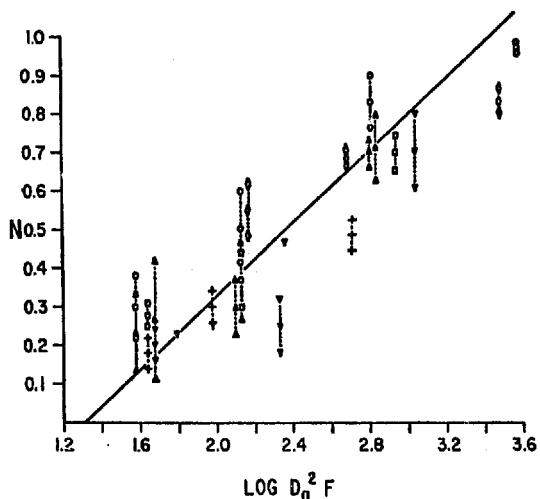


FIG. 1. PATTLE's empirical data are represented by the straight line. The symbols have the following meaning:

- + methylene blue—17 l./min;
- glycerol—17 l./min;
- △ bismuth sub-carbonate—17 l./min;
- tyrosine—17 l./min;
- ▽ corn oil—29 l./min;
- ◇ bismuth sub-carbonate—60 l./min;
- ▲ tri-calcium phosphate—17 l./min.

図 (4-5-1)

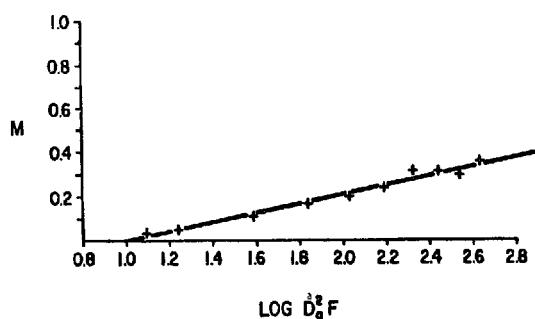
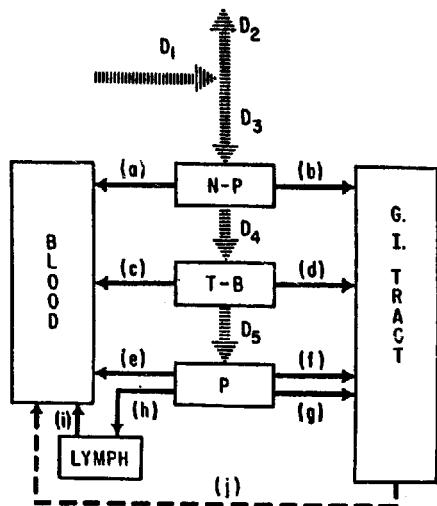


FIG. 2. Deposition in mouth as a function of particle size and flow rate calculated from DENNIS's results for breathing with and without tube in mouth.

図 (4-5-2)



図(4-5-3) 肺モデル概念図

[図(4-5-3)の各区画の詳細説明]

- (a) N-P領域、沈着し、血液に直接移行する物質の速い摂取
- (b) N-P領域より線毛粘液輸送による全粉じんの速いクリアランス
- (c) T-B領域 体液(systemic circulation)に移行する速い摂取
- (d) T-B領域の線毛によって輸送する速いクリアランスで胃腸管に移行する
- (e) P領域から血液に移行する量
- (f) 肺胞領域での比較的速く清除される分を表わし、これは多分、次々補充される貧食細胞と、これと一緒に働いている線毛粘液輸送過程によるものであり、胃腸管に移行する。
- (g) 第2の肺のクリアランス過程で(f)よりもずっと速度は遅いが、なお細胞包喰作用と線毛輸送過程によっているもので、清浄された粉じんは気管支を通って消化管へ出していく。特徴は、クリアランスの速さは粉じんの物理、化学的状態によって変る。
- (h) リンパを経過して肺の部分からゆっくりと移動する粉じんを表わす過程で(g)の過程と定性的に似ているが、線毛輸送の代りにリンパによる移送を示す。
- (i) リンパ系に移ったものが全身の血液系の中に入っていく速度であるが、この経路では清除される物質がリンパ組織、特にリンパ節を貫通する能力によっている。これはその物質の溶解性と共にリンパ球の交代速度にもよっている。
- (j) 一度消化器系に入った粉じんが、それより血液へ吸収される直接又は間接的過程を示している。

Constants for use with clearance model を表(4-5-1)に示す。

Pulmonary clearance classification of inorganic compounds を表(4-5-2)に示す。

表 (4-5-1) Constants for use with clearance model

		Class (D)	Class (W)	Class (Y)
N - P	(a)	4 min/0.50	4 min/0.10	4 min/0.01
	(b)	4 min/0.50	4 min/0.90	4 min/0.99
T - B	(c)	10 min/0.50	10 min/0.10	10 min/0.01
	(d)	10 min/0.50	10 min/0.90	10 min/0.99
P	(e)	30 min/0.80	90 days/0.15	360 days/0.05
	(f)	n. a.	24 hr/0.40	24 hr/0.40
	(g)	n. a.	90 days/0.40	360 days/0.40
	(h)	30 min/0.20	90 days/0.05	360 days/0.15
Lymph	(i)	30 min/1.00	90 days/1.00	360 days/0.10

Note: The first value is the biological half-time; the second is the regional fraction. The lymphatic clearance for Class Y compounds indicates that a 10 per cent regional fraction follows a 360-day biological half-time. The remaining 90 per cent is presumed to be permanently retained in the nodes and is subject only to radioactive decay.

表(4-5-2) Pulmonary clearance classification of inorganic compounds

Class Y - Avid retention: cleared slowly (years)

Carbides - actinides, lanthanides, Zr, Y, Mn

Sulfides - none

Sulfates - none

Carbonates - none

Phosphates - none

Oxides and hydroxides - lanthanides, actinides Groups 8 (V and VI),

1b, 2b (IV and V), 3b except Se, and 6b.

Halides - lanthanide fluorides

Nitrates - none

Class W - Moderate retention: intermediate clearance rates (weeks)

Carbides - Cations of all Class W hydroxides except those listed as Class Y carbides.

Sulfides - Groups 2a (V+VI), 4a (IV-VI), 5a (IV-VI), 1b, 2b and 6b (V+VI).

Sulfates - Groups 2a (IV-VII), and 5a (IV-VI)

Carbonates - lanthanides, Bi³⁺ and Group 2a (IV-VII)

Phosphates - Zn²⁺, Sn²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, Bi³⁺ and lanthanides

Oxides and hydroxides - Groups 2a (II-VII), 3a (III-VI), 4a (III-VI), 5a (IV-VI), 6a (IV-VI), 8, 2b (VI), 4b, 5b and 7b Sc³⁺

Halides - lanthanides (except fluorides), Groups 2a, 3a (III-VI), 4a (I-V-VI), 5a (IV-VI), 8, 1b, 2b, 3b (IV-V), 4b, 5b, 6b and 7b

Nitrates - all cations whose hydroxides are Class Y and W

Class D - Minimal retention: rapid clearance (days)

Carbides - some hydroxides

Sulfides - all except Class W

Sulfates - all except Class W

Carbonates - all except Class W

Phosphates - all except Class W

Oxides and Hydroxides - Groups 1a, 3a (II), 4a (II), 5a (II, III), 6a (III)

Halides - Groups 1a and 7a

Nitrates - all except Class W

Noble Gases - Group 0

Note: Where reference is made from one chemical form to another, it implies that an in vivo conversion occurs, e.g. hydrolysis reaction.

The following periodic table of the elements is used with the foregoing classification.

Period	Group																		0				
	1a	2a	3b	4b	5b	6b	7b	8			1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a						
I	H																		He				
II	Li	Be																B	C	N	O	F	Ne
III	Na	Mg																Al	Si	P	S	Cl	Ar
IV	K	Ca	Se	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Sc	Br	Kr					
V	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
VI	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
VII	Fr	Ra	Act																				
*Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
+Actinides			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw							

(2) 沈着と粒度分布の関係を説明するのにMMADまたはAMADが用いられる理由

0.01 ~ 100 μm 位までの粒度分布をもつ粉じんに対しては、MMADが、沈着率との関係で最もよく全体の分布を代表しうるパラメータであると言える。

質量平均径や他のパラメータをためしてみたが、いずれもこのような単純な整合的関係は見られなかった。（表(4-5-3), 図(4-5-4), 図(4-5-5)参照）

(3) 一回換気量と沈着率の関係 図(4-5-6) ~ (4-5-8), 表(4-5-4)

750cc.....軽作業

1450cc.....中程度作業

2150cc.....重労働作業

一般に一回換気量が大きくなる程（即ち1回の呼吸が深くなる程）また、大きなMMADをもつ粉じん程N-P領域の沈着は大きくなる。

逆に、P領域ではMMADが1 μm より大きな場合には、一回換気量が大きくなると、沈着量は小さくなり、MMADが0.2 μm 以下では逆に一回換気量が大きくなると沈着量は大きくなる。

N-PとPの沈着率が交叉する粉じんのMMADは約0.8 μm である。

(4) 粒度分布(MMAD)と沈着率の関係 図(4-5-10)

① 鼻咽頭部が粉じんの沈着に対しきわめて大きな役割をもっている。（従来、粉じんの沈着は、気管-気管支でおこると考えられていた）

② 空気中で充分安定と考えられる大きさの粉じん（最大100 ~ 200 μ 以下）の内、大体10 μ 以上の粉じんは殆んどN-Pで大部分沈着する。（しかしこのことは、10 μm 以上の粉じんは決して肺部に達しないということではない。）

③ N-Regionは、MMADが大きくなるにつれて沈着率は大きくなる。

④ T-Regionは、MMADに関係なく比較的沈着率は一定。

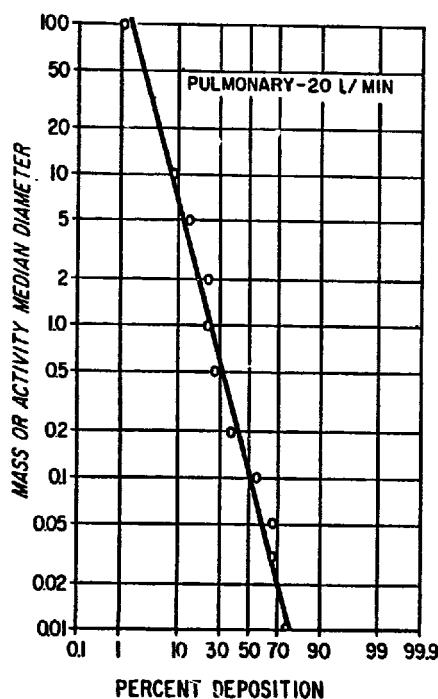
⑤ P領域はMMADが小さくなるにつれて沈着率は大きくなる。

表 (4-5-3) Computed deposition of log-normal aerosols

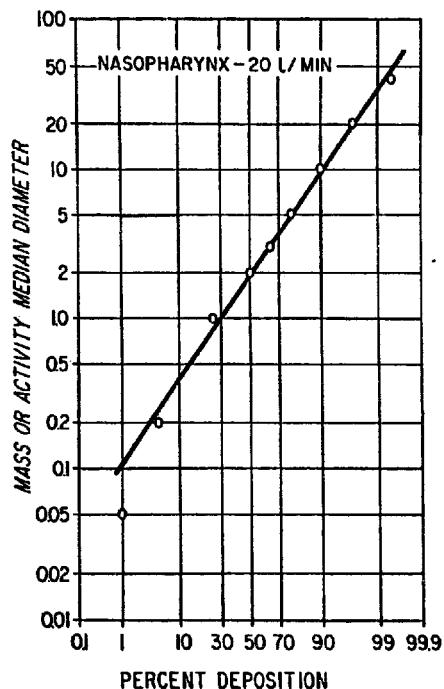
MMAD (μ)	CMAD (μ)	SIGMA (σ_g)	N - P (per cent of inspired dust)	T - B	P
0.020	0.018	1.2	0.00	21.3	68.3
0.020	0.012	1.5	0.00	19.7	65.4
0.020	0.005	2.0	5.20*	20.7*	62.7*
0.020	0.002	2.5	6.70*	22.1*	59.0*
0.20	0.181	1.2	0.00	2.06	36.4
0.20	0.122	1.5	0.01	2.37	39.1
0.20	0.047	2.0	0.78	2.91	41.2
0.20	0.016	2.5	2.36	3.61	42.3
0.20	0.005	3.0	4.09	4.24	42.8
2.00	1.221	1.5	51.1	4.70	27.2
2.00	0.473	2.0	50.7	4.30	23.6
2.00	0.161	2.5	50.4	3.90	21.8
2.00	0.054	3.0	50.2	3.61	21.0
2.00	0.006	4.0	50.1	3.30	20.6
20.0	18.10	1.2	99.9	0.00	0.00
20.0	1.611	2.5	97.2	0.81	1.70
20.0	0.535	3.0	95.6	1.03	2.60
200.0	181.0	1.2	86.0+	0.00	0.00

* Aerosol mass below 0.01μ is presumed to experience an equal deposition in the three compartments: this is an estimated division reflecting the increased deposition probabilities of very small particles in the airways.

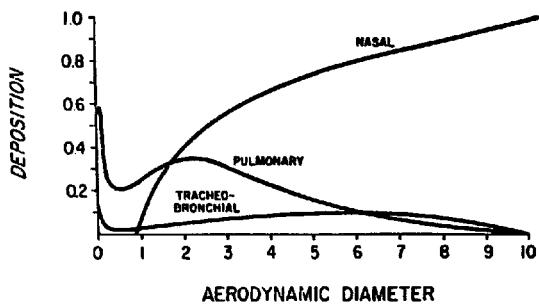
+ Nasal-pharyngeal deposition is modified by non-isokinetic conditions exemplified by 図(4-5-9)



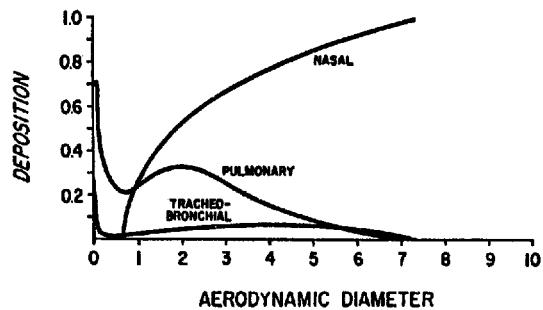
図(4-5-4) The deposition estimate for the pulmonary compartment while breathing at a moderate work rate. Different aerosol distributions are represented by the mass or activity median aerodynamic diameters (0.01 to ~ 100).



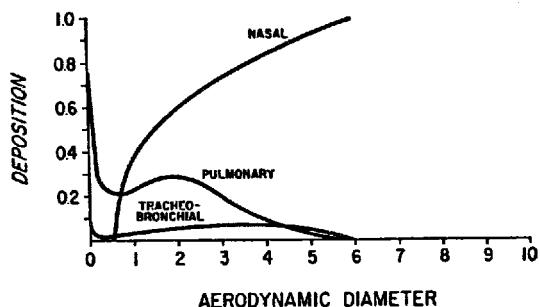
図(4-5-5) The deposition estimate for the nasopharyngeal compartment while breathing at a moderate work rate. Different aerosol distributions are represented by the mass or activity median aerodynamic diameters (0.01 to ~ 100).



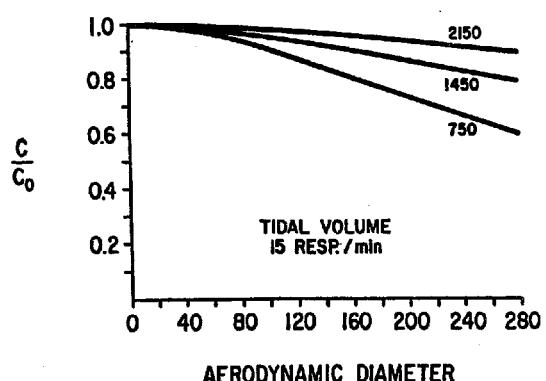
図(4-5-6) Deposition as a function of particle size for 15 respirations/min, 750 cm^3 tidal volume.



図(4-5-7) Deposition as a function of particle size for 15 respirations/min, 1450 cm^3 tidal volume.



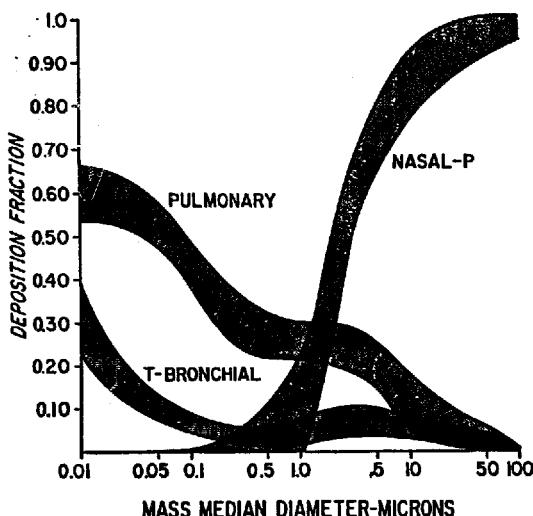
図(4-5-8) Deposition as a function of particle size for 15 respirations/min, 2150 cm^3 tidal volume.



図(4-5-9) Ratio of concentration entering nose to ambient concentration as a function of aerodynamic diameter.

表 (4-5-4) Deposition of unit density spheres

Tidal volume	Location	Diameter of sphere (μ)									
		0.01	0.06	0.20	0.60	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
750 cm ³	N-P	0	0	0	0	0.036	0.406	0.552	0.654	0.799	0.992
	T-B	0.307	0.068	0.027	0.020	0.027	0.051	0.071	0.084	0.091	0.002
	P	0.506	0.585	0.281	0.204	0.250	0.346	0.303	0.238	0.103	0.002
1450 cm ³	N-P	0	0	0	0	0.275	0.522	0.665	0.773	0.923	1.00
	T-B	0.256	0.051	0.017	0.019	0.027	0.050	0.064	0.069	0.043	0
	P	0.676	0.711	0.334	0.215	0.242	0.330	0.250	0.150	0.033	0
2150 cm ³	N-P	0	0	0	0.068	0.371	0.607	0.736	0.844	1.0	1.0
	T-B	0.208	0.035	0.015	0.021	0.030	0.056	0.067	0.062	0	0
	P	0.746	0.653	0.294	0.209	0.226	0.285	0.195	0.092	0	0



図(4-5-10) Each of the shaded areas (envelopes) indicates the variability of deposition for a given mass median (aerodynamic) diameter in each compartment when the distribution parameter σ_g varies from 1.2 to 4.5 and the tidal volume is 1450 ml.

(5) エアロゾルの物理

度数分布の結果を対数確率紙にプロッティングし、グラフから 50% 粒子径として、個数中央値 (count Median Diameter: MD) を求める。

幾何標準偏差 (Geometric Standard Deviation: σ_g) は次式を用いて計算される。

$$\sigma_g = \frac{84.1\% \text{ 粒子径}}{50\% \text{ 粒子径}} = \frac{50\% \text{ 粒子径}}{15.87\% \text{ 粒子径}}$$

さらに、CMD と σ_g が求まれば Hatch-Choate の式から質量中央径MMDを求めるこ

とができる。さらにエアロゾルの密度がわかれば、式(5)から空気力学的質量中央径MMA D (Mass Median Aerodynamic Diameter) を求めることができる。

$$\log MMD = \log CMD + 6.91 \log \sigma_g \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$MMAD = \sqrt{\rho} \times MMD$$

- 電荷、湿度によって粒子の沈着は影響を受けるが、その影響は小さい。（例外； 0.1 μm 以下の粒子）
- 非荷電粒子の沈着をコントロールするものは、慣性と拡散である。

$$Vg = \frac{d^2 \cdot \rho \cdot c}{18 \cdot n} \cdot g$$

d : 粒子の直径 (cm) ; ρ : 粒子の密度

c : カニングヘムの Slip 補正

n : 流体の粘性係数 ; g : 重力加速度

MMD → MMAD 変換

||

$\rho = 1.0$ に規格化した径

||

同じ沈降速度をもつ粒子は空気力学的に同じ径と見直す

$$Vg = \frac{(d_{MMD})^2 \cdot \rho \cdot c}{18 \cdot n} \cdot g$$

$$Vg = \frac{(d_{MMAD})^2 \cdot 1 \cdot c}{18 \cdot n} \cdot g$$

$$Vg = Vg \text{ から } d_{MMAD} = \sqrt{\rho} \cdot d_{MMD}$$

- MMAD と AMAD は、個々の粒子の比放射線が等しければ等しい。

図 (4-5-11) にエアロゾル粒子が対数正規分布に従うとして、その個数中央径が $1.0 \mu m$ 、幾何標準偏差が 2.0 の時の各パラメータの相互関係を示す。また、各パラメータの記号、関係式などについて表 (4-5-5) にまとめて示す。

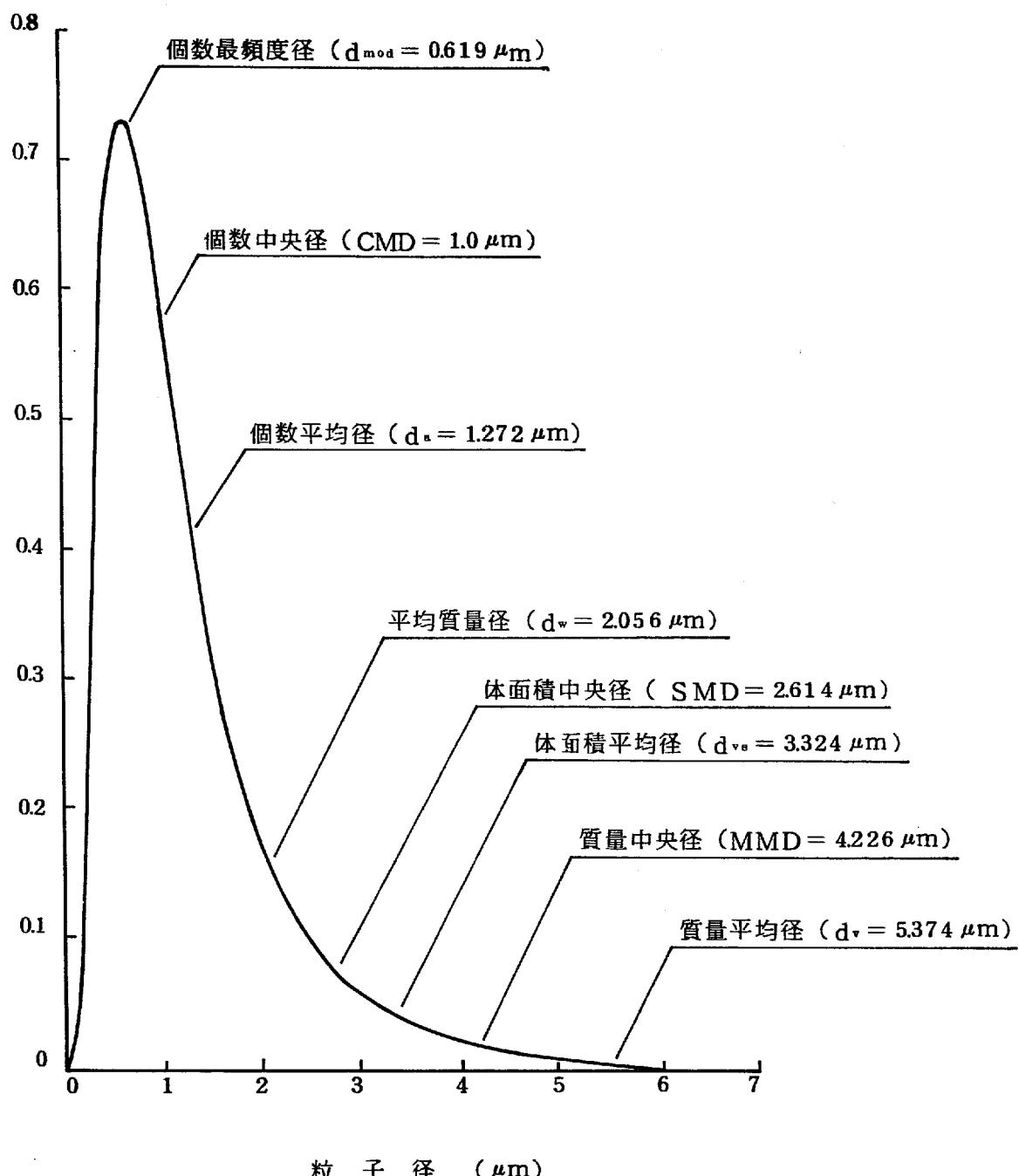


図 (4-5-11) 個数中央値 1.0 μm , 幾何標準偏差 2.0 の場合のエアロゾル粒子の代表的な対数正規分布と各パラメータの位置関係

表(4-5-5) 対数正規分布する粒子群を代表するパラメータ

パラメータ	記号	説明	数学的関係式
最頻度径	d_{mode}	最も数の多い粒子径。 (最多径ともいう)	—
算術平均径	d_a	個々の粒子の径 (d) にその個数 (n) を乗じて平均した時の径。	$\bar{d} = \frac{\sum (n \cdot d)}{\sum n}$
放射能球相当径	d_A	粒子 1 個の放射能から球状粒子に換算した径。	本文(1)式から得られる。
幾何平均径	d_g	対数平均径ともいう。 (個数中央径に等しい)	$\log d_g = \frac{\sum (n \log d)}{\sum n}$
個数中央径	CMD	粒子を大きさ順に並べたときの個数を基準とした中央の粒子径。	$CMD = d_g$
質量中央径	MMD	重量を基準にして個数平均径と同様に求めたもの。	$\log MMD = \log CMD + 6.91 \log^2 \sigma_g$ $MMD = CMD \exp(31 n^2 \sigma_g)$
空気力学的中央径	MAD	吸入評価のための粒子の空気力学的な運動やエアロゾル粒子の密度 (ρ) を考慮して求めた径	$MMAD = \sqrt{\rho} MMD = \sqrt{\rho} CMD \exp(31 n^2 \sigma_g)$
幾何標準偏差	σ_g	粒度分布の分散の度合を表わす。	$\log \sigma_g = [\frac{\sum n (\log d - \log d_g)^2}{\sum n}]^{1/2}$
空気力学的放射能中央径	$AMAD$	吸入評価のための粒子の空気力学的な運動を考慮し放射能を基準にして求めた中央径	粉じんの分布が log-normal 分布をしかつ各粉じん粒子の比放射能が等しい場合 MMAD に等しい。

4-5-2 肺モデルの変遷について

現在までに ICRPP から報告されたいわゆる “肺モデル” は、公にされた順に 1966 年 「Deposition and Retention Model for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract」 (Task Group of Lung Dynamics, Health Physics Vol. 12 p. 173 (1966)) と ICRP Pub. 19 「The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides」 (1972) の中に示されている “TGL M Clearance Model” および ICRP Pub. 30 「Limits for Intakes of Radionuclides by Workers」 (1979) の中に示されている “Dosimetric Model for the Respiratory System” の 3 つがある。

これら 3 つの刊行物のうち肺モデルの基本的な解説は、1966 年の Health Physics Vol. 12 に紹介されている。

ICRP Pub. 19 (1972) と ICRP Pub. 30 (1979) においてモデルの基本的な考え方においては変っていない。

しかし、各コンパートメントへの移行割合と、移行の生物学的半減期については以下に述べるような変遷が見られる。〔図(4-5-12)～(4-5-14) 参照。表(4-5-6)～(4-5-8) 参照。〕

まず、Health Physics Vol. 12 (1966) と ICRP Pub. 19 (1972) においては、

- (1) T-P 領域のクラス D, W, Y についてコンパートメント(d)の生物学的半減期が 10 分から 0.2 日になった。
- (2) P 領域のクラス D の生物学的半減期が、コンパートメント(e)と(h)について 30 分から 0.5 日になった。
- (3) L 領域のクラス D の生物学的半減期が 30 分から 0.5 日になった。
- (4) P 領域のクラス W の生物学的半減期がコンパートメント(e), (g) および(h)について 90 日から 50 日になった。
- (5) L 領域のクラス W の生物学的半減期が 90 日から 50 日になった。
- (6) P 領域のクラス Y の生物学的半減期がコンパートメント(e), (g) および(h)について 360 日から 500 日になった。
- (7) L 領域のクラス Y の生物学的半減期が 360 日から 1000 日になり、移行の割合が 0.1 から 0.9 になった。

また、ICRP Pub. 19 (1972) と ICRP Pub. 30 (1979) においては、

- (1) L 領域のコンパートメントが(j)のみであったものが、(i)と(j)の 2 つのコンパートメントに分れた。
- (2) L 領域のクラス Y に、(j)コンパートメントが加わり、その生物学的半減期は ∞ 、移行割合は 0.1 が割り当てられた。

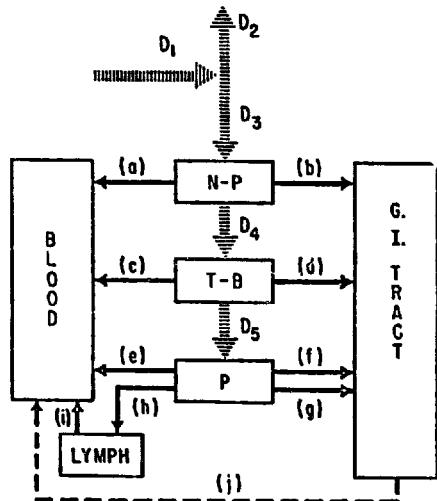
以上に述べた変遷が見られるが、現時点において“肺モデル”を適用する場合には、最も新らしいPub. 30 のパラメータを使用するのが適当である。

次項において、ICRP Pub. 30 に示されている呼吸器系モデルについて詳しく説明する。

表 (4-5-6)

図 (4-5-12) 肺モデルの変遷

Constants for use with clearance model

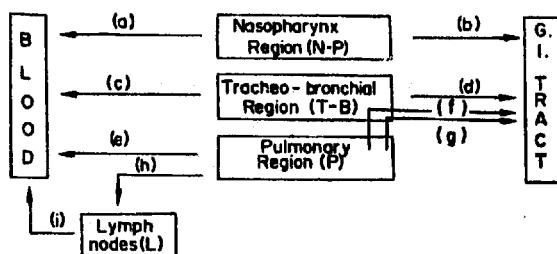


		Class (D)	Class (W)	Class (Y)
N-P	(a)	4 min/0.50	4 min/0.10	4 min/0.01
	(b)	4 min/0.50	4 min/0.90	4 min/0.99
T-B	(c)	10 min/0.50	10 min/0.10	10 min/0.01
	(d)	10 min/0.50	10 min/0.90	10 min/0.99
P	(e)	30 min/0.80	90 days/0.15	360 days/0.05
	(f)	n.a.	24 hr/0.40	24 hr/0.40
	(g)	n.a.	90 days/0.40	360 days/0.40
	(h)	30 min/0.20	90 days/0.05	360 days/0.15
Lymph	(i)	30 min/1.00	90 days/1.00	360 days/0.10

Note: The first value is the biological half-time; the second is the regional fraction. The lymphatic clearance for Class Y compounds indicates that a 10 per cent regional fraction follows a 360 day biological half-time. The remaining 90 per cent is presumed to be permanently retained in the nodes and is subject only to radioactive decay.

- (1) Health physics Vol. 12 (1966) Deposition and Retention Model (TGLM) so-called "Lung model"

表 (4-5-7) AMENDED CONSTANTS FOR USE WITH TGLM CLEARANCE MODEL+



† The first value listed is the biological half-life; the second is the regional fraction.

図 (4-5-13) 肺モデルの変遷

Region	Pathway	Compound class		
		(D)	(W)	(Y)
N-P	(a)	0.01 d/0.5	0.01 d/0.1	0.01 d/0.01
	(b)	0.01 d/0.5	0.4 d/0.9	0.4 d/0.99
T-B	(c)	0.01 d/0.95	0.01 d/0.5	0.01 d/0.01
	(d)	0.2 d/0.05	0.2 d/0.5	0.2 d/0.99
P	(e)	0.5 d/0.8	50 d/0.15	500 d/0.05
	(f)	—	1 d/0.4	1 d/0.4
	(g)	—	50 d/0.4	500 d/0.4
	(h)	0.5 d/0.2	50 d/0.05	500 d/0.15
L	(i)	0.5 d/1.0	50 d/1.0	1000 d/0.9

(2) ICRP Pub 19 (1972) TGLM Clearance Model

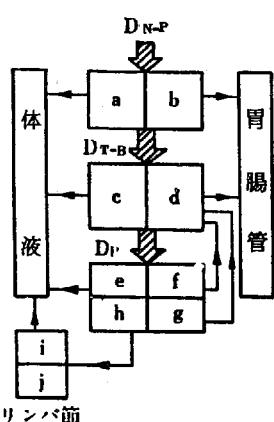


図 (4-5-14) 肺モデルの変遷

肺は、T-B, P及びLからなる複合組織としてその質量を1,000gとする。

表 (4-5-8)

Region	Compart- ment	Class						
		D	W	Y	T day	F	T day	F
N-P ($D_{N-P} = 0.30$)	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99	0.99
T-B ($D_{T-B} = 0.08$)	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01	0.01
	d	0.2	0.05	0.2	0.5	0.2	0.99	0.99
P ($D_P = 0.25$)	e	0.5	0.8	50	0.15	500	0.05	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.4	1.0	0.4	0.4
	g	n.a.	n.a.	50	0.4	500	0.4	0.4
	h	0.5	0.2	50	0.05	500	0.15	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9	0.9
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	∞	0.1	0.1

Mathematical model used to describe clearance from the respiratory system. The values for the removal half-times, $T_{1/2}$, and compartmental fractions, F_{i-1} are given in the tabular portion of the figure for each of the three classes of retained materials. The values given for D_{N-P} , D_{T-B} and D_P (left column) are the regional depositions for an aerosol with an AMAD of 1 μm . The schematic drawing identifies the various clearance pathways from compartments a-i in the four respiratory regions N-P, T-B, P and L.

n.a. =not applicable.

(3) ICRP Pub 30 1979 Dosimetric Model for the Respiratory system

4-5-3 ICRP Pub 30 線量評価用呼吸器系モデル

(1) 呼吸器系モデルの概要

ICRP Pub 30 に与えられている呼吸器系モデルは、

- (i) 呼吸器系は放射線防護の立場から便利なように、N-P（鼻咽腔），T-B（気管-気管支），P（肺胞）の3つの領域に区分する。
- (ii) 吸入した放射性核種は、その粒子径（空気力学的放射能中央径：AMAD）によって、上述の呼吸器系の3つの領域に対する沈着率が決まる。
- (iii) 吸入した放射性核種の化学形によって3つの領域中のクリアランス（排除）の半減期（生物学的半減期）が決まる。すなわち、放射性核種はすべての化学形に応じクリアランスの生物学的半減期の長短が割り当てられ、3つのクラス（D（日），W（週），Y（年））に分類される。そしてそれぞれのクラス毎に、呼吸器系の各領域から血中あるいは胃腸管へ行く割合および半減期について個有の値が与えられている。
- (iv) 肺は、T-B，PおよびL（リンパ節）からなる複合組織と考え、その質量を1000 gとする。

(2) 呼吸器系の各区画の残留を表わす式

各区画からの放射性核種の排除の速度は、その区画内に存在する放射能の量に比例するものと仮定する。

すなわち、放射性核種のクリアランスは、一次反応によって起り、フィードバックはないものと仮定する。

したがって、各区画毎にクラスD，W，Yで与えられたそれぞれの生物学的半減期から、生物学的減衰定数 λ を $\lambda = 0.693/T$ の関係式から求めることができる。

この λ を使って各区画中の放射性核種の残留は、以下の連の微分方程式によって記述される。

$$\frac{dq_n(t)}{dt} = I(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_n - \lambda_n q_n(t) - \lambda_R q_n(t)$$

$$\frac{dq_b(t)}{dt} = I(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_b - \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_b(t)$$

$$\frac{dq_c(t)}{dt} = I(t) \cdot D_{T-B} \cdot F_c - \lambda_c q_c(t) - \lambda_R q_c(t)$$

$$\frac{dq_d(t)}{dt} = I(t) \cdot D_T \cdot F_d - \lambda_d q_d(t) + \lambda_E q_E(t) - \lambda_R q_d(t) - \lambda_R q_d(t)$$

$$\frac{dq_e(t)}{dt} = I(t) \cdot D_P \cdot F_e - \lambda_E q_E(t) - \lambda_R q_E(t)$$

$$\frac{dq_f(t)}{dt} = I(t) \cdot D_P \cdot F_f - \lambda_F q_F(t) - \lambda_R q_F(t)$$

$$\frac{dq_a(t)}{dt} = I(t) \cdot D_p \cdot F_a - \lambda_a q_a(t) - \lambda_R q_a(t)$$

$$\frac{dq_b(t)}{dt} = I(t) \cdot D_p \cdot F_b - \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_b(t)$$

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = F_i \lambda_b q_b(t) - \lambda_i q_i(t) - \lambda_R q_i(t)$$

$$\frac{dq_j(t)}{dt} = F_j \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_j(t)$$

ここに、 $q_a(t)$ 、 $q_b(t)$ ……などは、吸入した放射性核種の区画 a、b……などの時刻 t における放射能である。

$I(t)$ はその放射性核種の吸入の速度

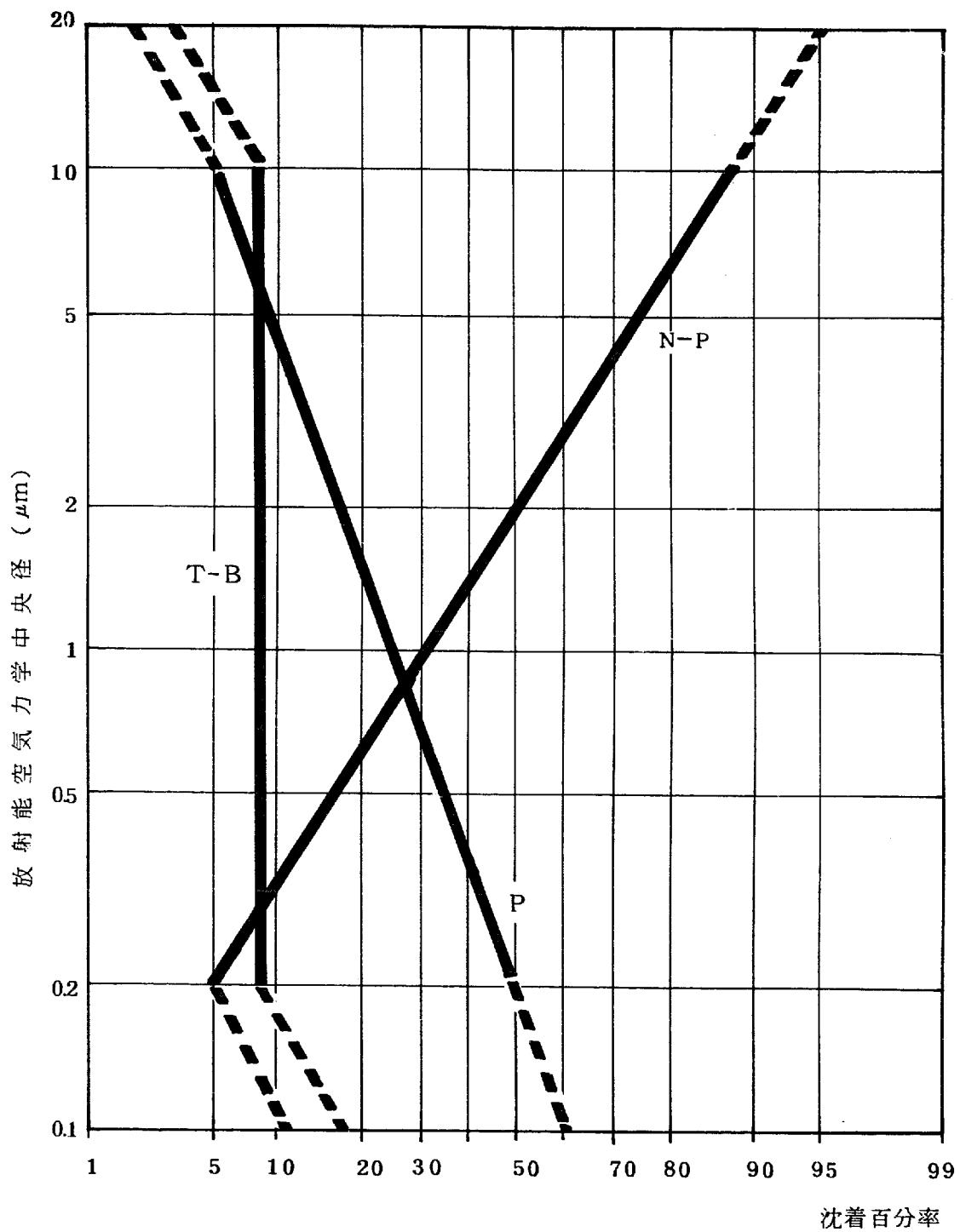
λ_a から λ_i は、区画 a から i までの生物学的減衰定数

λ_R は核種の放射性崩壊定数である。

F_a から F_j は呼吸器系の 3 つの区域に入った核種の量をそれぞれ 1.0 とした時、その区画内で区画 a、b……， j が占める割合である。

λ_a から λ_i は、Table に示した生物学的半減期から求める。

N-P, T-B, P のそれぞれの領域への沈着割合と粒子径 (AMAD) の関係を図(4-5-15) に示す。



図(4-5-15) エアロゾルの粒径(放射能空気力学中央径)と呼吸器系の3つの区域(N-P, T-B, P)における沈着率との関係

5. 線量評価の実際

5-1 ICRP Pub 30に基づく、Co-60の預託線量当量の計算

問1. ^{60}Co クラスY (AMAD = $1\text{ }\mu\text{m}$) を $1\text{ }\mu\text{Ci}$ (1 Bq) 吸入摂取した時の肺の預託線量当量を求めよ。

問2. ^{60}Co クラスY (AMAD = $1\text{ }\mu\text{m}$) を $1\text{ }\mu\text{Ci}$ (1 Bq) 吸入摂取した時の胃腸管(胃、小腸、大腸上部、大腸下部)の預託線量当量を求める。

問3. ^{60}Co クラスY (AMAD = $1\text{ }\mu\text{m}$) の年摂取限度(ALI)を求める。

問1の答

$$^{60}\text{Co} \text{ Class Y} \cdot \text{AMAD} = 1\text{ }\mu\text{m}$$

$$[\text{ }\mu\text{Ci}/\text{日} / 50\text{ 年}] [\text{Trans} / 50\text{ 年}]$$

$$U_{T-B} = 7.5 \times 10^{-2} (2.4 \times 10^8) (= \textcircled{c} + \textcircled{d})$$

$$U_P = 8.6 \times 10^1 (2.7 \times 10^{11}) (= \textcircled{e} + \textcircled{f} + \textcircled{g} + \textcircled{h})$$

$$U_L = 3.4 \times 10^1 (1.1 \times 10^{11}) (= \textcircled{i} + \textcircled{j})$$

$$U_{(TB+P+L)} = 1.2 \times 10^2 (3.8 \times 10^{11}) \Rightarrow 1.0 \times 10^7 \text{ Trans} / 50\text{ 年} / \text{Bq}$$

$$\text{SEE} = \frac{E_\beta \times Y_\beta \times Q_\beta \times AF \text{ (T} \leftarrow \text{S)}}{M_T} + E_r \times Y_r \times Q_r$$

$$= \frac{0.0958 \times 0.999 \times 1 \times 1}{10^3} + \frac{(1.17 \times 1.0 + 1.33 \times 1.0) \times 1 \times 4.5 \times 10^{-2}}{10^3}$$

$$= 9.57 \times 10^{-5} + 1.1 \times 10^{-4}$$

$$= 2.1 \times 10^{-4} [\text{MeV/g} \cdot \text{Trans}]$$

$$\therefore H_{50}(\text{Lung}) = 1.6 \times 10^{-10} \times 1.0 \times 10^7 \times 2.1 \times 10^{-4}$$

$$= 3.4 \times 10^{-7} (\text{Sv} / \text{Bq})$$

$$= 1.3 \text{ (rem}/\mu\text{Ci})$$

問2の答

$$\text{SEE}_{r(s_T)} = \frac{E_r \times Y_r \times Q_r \times AF \text{ (W} \leftarrow \text{S)}}{M_T^W}$$

$$= \frac{E_r \times Y_r \times Q_r \times AF \text{ (W} \leftarrow \text{S)} P}{M_T^W}$$

$$= 3.9 \times 10^{-4} [\text{MeV/g} \cdot \text{Trans}]$$

$$\text{同様に } \text{SEE}_{(\text{SI})} = 2.3 \times 10^{-4} \text{ [MeV/g · Trans]}$$

$$\text{SEE}_{(\text{ULI})} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ["]}$$

$$\text{SEE}_{(\text{LLI})} = 3.9 \times 10^{-4} \text{ ["]}$$

$$\text{SEE}_{\beta(\text{ST})} = E_{\beta} \times Y_{\beta} \times Q_{\beta}$$

$$= E_{\beta} \times Y_{\beta} \times Q_{\beta}$$

$$= 0.0958 \times 0.999 \times 1.0 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{250} \times 1.0$$

$$= 1.9 \times 10^{-4} \text{ (MeV/g · Trans)}$$

$$\text{同様に } \text{SEE}_{(\text{SI})} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ [MeV/g · Trans]}$$

$$\text{SEE}_{(\text{ULI})} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ ["]}$$

$$\text{SEE}_{(\text{LLI})} = 3.5 \times 10^{-4} \text{ ["]}$$

$$U_{\text{ST}} = G \times \frac{1}{\lambda_{\text{ST}} + \lambda_R}$$

$$= 0.56 \times \frac{1}{24} \times 60 \times 60 \times 24 = 2.0 \times 10^3 \text{ Trans/50Y}$$

$$\text{同様に } U_{\text{SI}} = 7.7 \times 10^3 \text{ Trans/50Y}$$

$$U_{\text{ULI}} = 2.5 \times 10^4 \text{ Trans/50Y}$$

$$U_{\text{LLI}} = 4.6 \times 10^4 \text{ Trans/50Y}$$

$$= 1.6 \times 10^{-10} \times \{ \text{SEE}_r + \text{SEE}_{\beta} \} \times U_{\text{SI}}$$

$$= 1.6 \times 10^{-10} \times \{ 3.9 \times 10^{-4} + 1.9 \times 10^{-4} \} \times 2.0 \times 10^3$$

$$= 1.6 \times 10^{-10} \times 5.8 \times 10^{-4} \times 2.0 \times 10^3$$

$$= 1.9 \times 10^{-10} \text{ (Sv/Bq)}$$

$$= 7.0 \times 10^{-4} \text{ (rem/\mu Ci)}$$

同様に

$$H_{50}(\text{SI}) = 4.3 \times 10^{-10} \text{ (Sv/Bq)} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ (rem/\mu Ci)}$$

$$H_{50}(\text{ULI}) = 2.3 \times 10^{-9} \text{ (")} = 8.4 \times 10^{-3} \text{ (")}$$

$$H_{50}(\text{LLI}) = 5.9 \times 10^{-9} \text{ (")} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ (")}$$

問3の答

⁶⁰Co Class Y · AMAD = 1.0 μm の ALI の計算

$$\{ H_{50} \text{ Lung} \times \text{Wt Lung} (+ \text{Liver} + \text{GI} + \dots) \} \times \text{ALI} \leqq 0.05 \text{ (Sv)}$$

$$\therefore \text{ALI} \leqq \frac{0.05}{3.4 \times 10^{-7} \times 0.12} = 1.2 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6 \text{ (Bq)}$$

5-2 ICRP Pub 30に基づく Pu^{239} の ALI 及び H_{50} の計算

問 4. ^{239}Pu クラスY (AMAD = 1 μm) の年摂取限度 (ALI) を求めよ。

問 4 の答

^{239}Pu ALI 計算プロセス

^{239}Pu クラスY・AMAD = 1 μm

器管または組織	預託線量当量 $H_{50T} (\text{Sv/Bq})$	荷重係数 WT	実効線量当量 $H_{50T} \cdot WT (\text{Sv/Bq})$
肺	3.2×10^{-4}	0.12	* 3.8×10^{-5}
骨 表 面	9.5×10^{-4}	0.03	* 2.9×10^{-5}
赤 色 骨 髓	7.6×10^{-5}	0.12	* 9.1×10^{-6}
肝 臓	2.0×10^{-4}	0.06	* 1.2×10^{-5}
生 殖 腺	1.2×10^{-5}	0.25	3.0×10^{-6}

* Max. の $1/10$ までの $\sum 8.8 \times 10^{-5}$

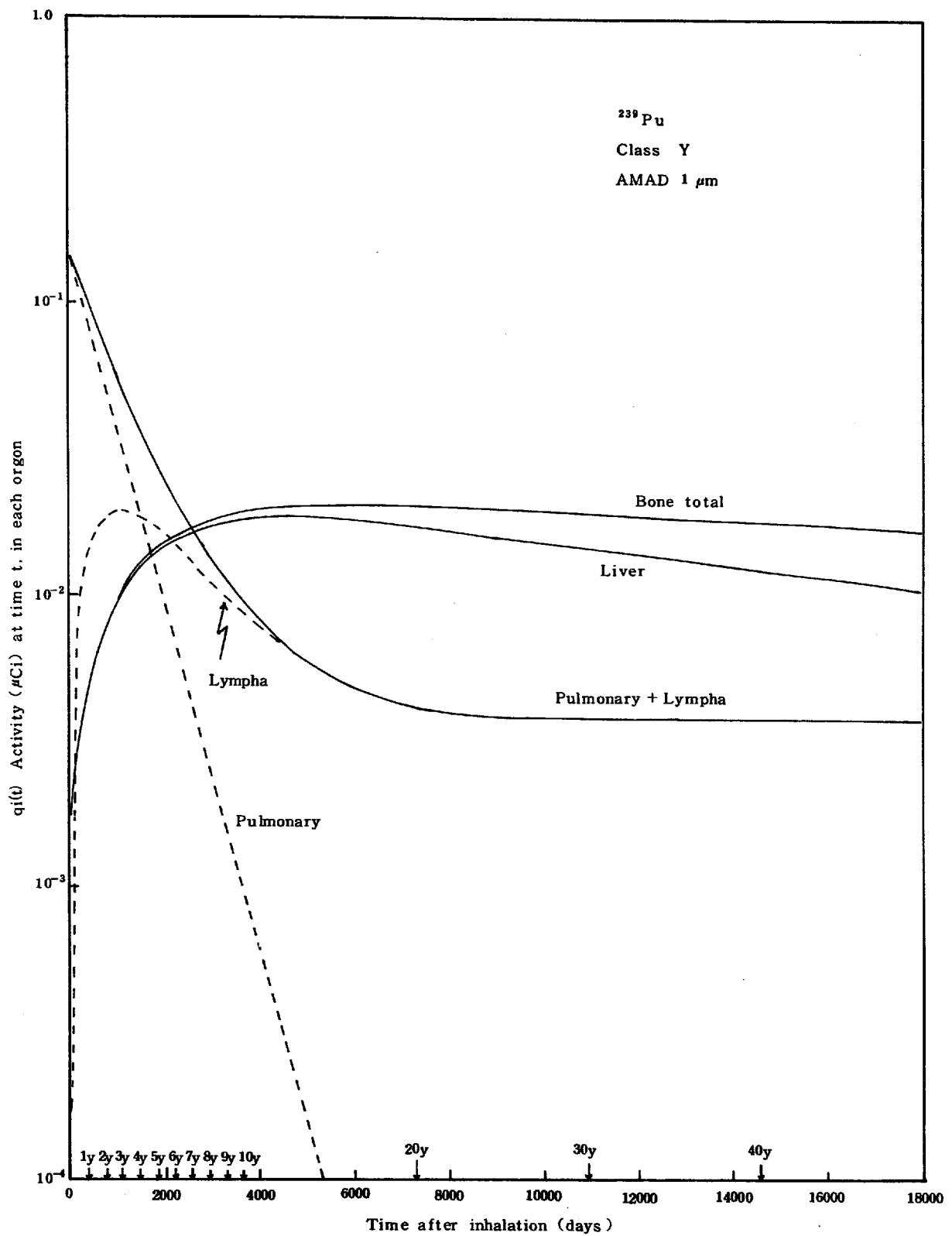
$$\text{確率的影響 } ALI \times (8.8 \times 10^{-5}) \leq 5 \times 10^{-2} \quad ALI \leq 570 \text{ Bq}$$

$$\text{非確率的影響 } ALI \times (9.5 \times 10^{-4}) \leq 0.5 \quad ALI \leq 530 \text{ Bq}$$

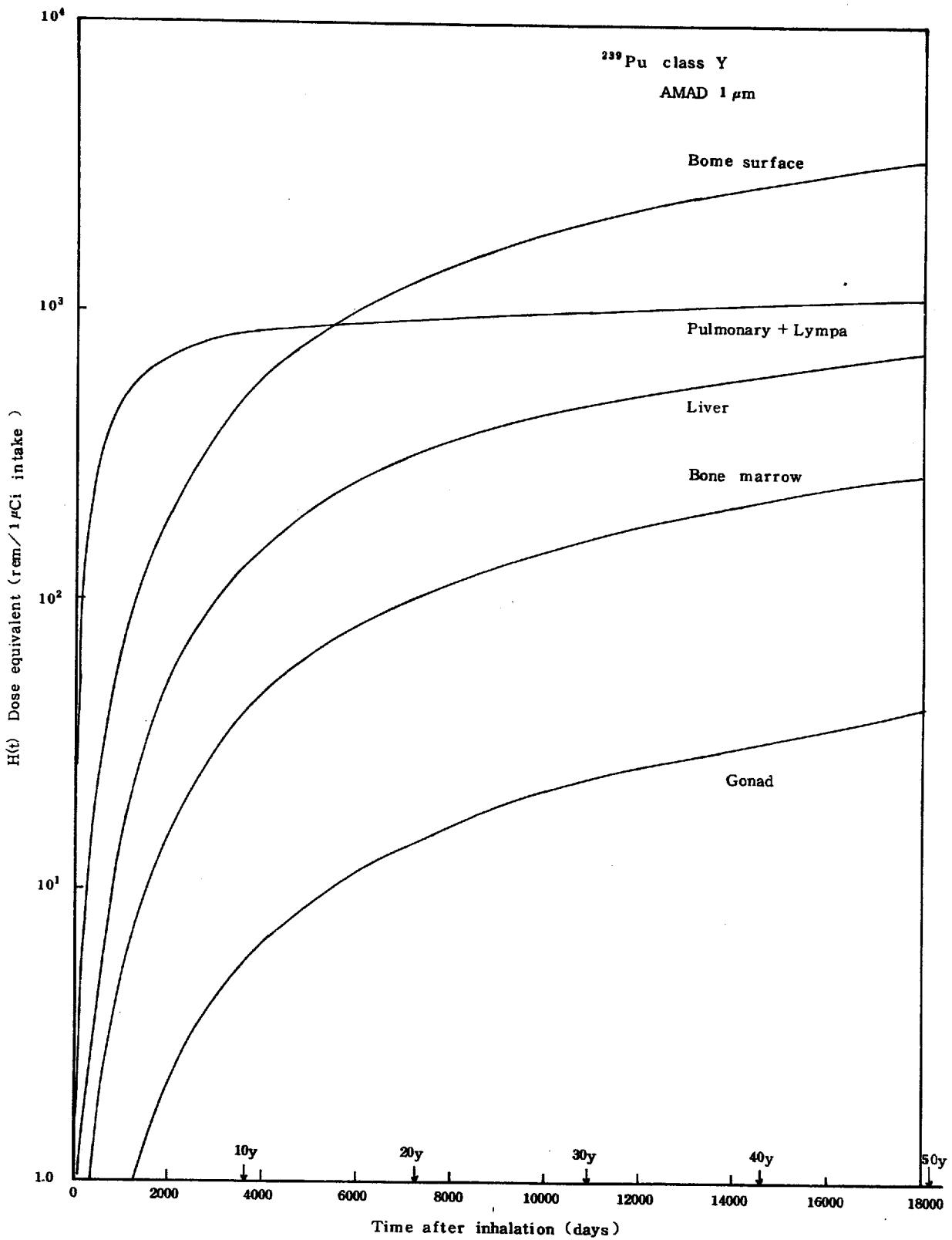
$$ALI \text{ 確率} > ALI \text{ 非確率} \Rightarrow \underline{\underline{ALI = 530 \text{ Bq} \simeq 5 \times 10^2 \text{ Bq}}}$$

1 μCi の 1 回摂取後の時刻 t における各器官に存在する放射能を図 (5-2-1) に示す。

1 μCi の 1 回摂取後の時刻 t までの線量当量を図 (5-2-2) に示す。



図(5-2-1) 1 μCi の1回摂取後の時刻 t における各器官に存在する放射能



図(5-2-2) $1 \mu\text{Ci}$ の1回摂取後の時刻 t までの線量当量

5-3 Co-60の吸入例

INDIVIDUAL MONITORING

DATE OF EXAMINATION	NAME	DATE OF INHALATION
77-12-14	N. A.	不明(S. 46/12~ 複数回吸入:原発定検)
NUCLIDE	PHISICO-CHEMICAL STATE	
Co-60 Mn-54	Nontransportable	
ESTIMATION METHOD		
W. B. C (Single and Scanning)		
ORGAN	RADIOACTIVITY	
	WHOLE BODY COUNTER	NOSE SWAB
肺	Date	12/14
	Co-60	67 nCi
	Mn-54	81 nCi
2/9		—
RETENTION		
$R(t) = 0.53 \exp\left(-\frac{0.693}{110}t\right) + 0.47 \exp\left(-\frac{0.693}{440}t\right)$ $\int_0^{50y} R(t) dt = 382 \mu\text{Ci} - \text{日}$ $\int_0^{1y} R(t) dt = 202 \mu\text{Ci} - \text{日}$		
DOSE COMMITMENT		ICRP Pub 2
ICRP Pub 2 1 $\mu\text{Ci-day}$ 当りの rem 3.7×10^{-2}		$\epsilon = 0.72$
\therefore 測定の日を起点とする H^{50}		$m = 1000 \text{ g}$
$H^{50} = 382 \times 0.067 \times 3.7 \times 10^{-2} = 950 \text{ mrem/50 y}$		
試算式 ICRP Pub 10 $D = 51.2 \times \frac{\epsilon}{m} \times q \times \int_0^{50} R(t) dt$ (500 mrem/1 y)		
COMMENT		
① 摂取時期が不明の時、過去分の線量評価は不可能 ② 金属又は酸化物の ^{60}Co として吸入すると $R(t) = 0.6 \times e^{-\frac{0.698}{38}t} + 0.4 \times e^{-\frac{0.693}{(6 \times 365)}t}$ ICRP Pub 10 ③ $^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$ 比は時間と共に変化する (N : 1.23, Y : 1.65, O : $^{60}\text{Co Only}$) ④ 肺中の挙動は Co, Mn としてではなく、金属（不溶性）として挙動しているのでは？ ⑤ ^{60}Co の体内分布図を図 (5-3-1) に示す。		

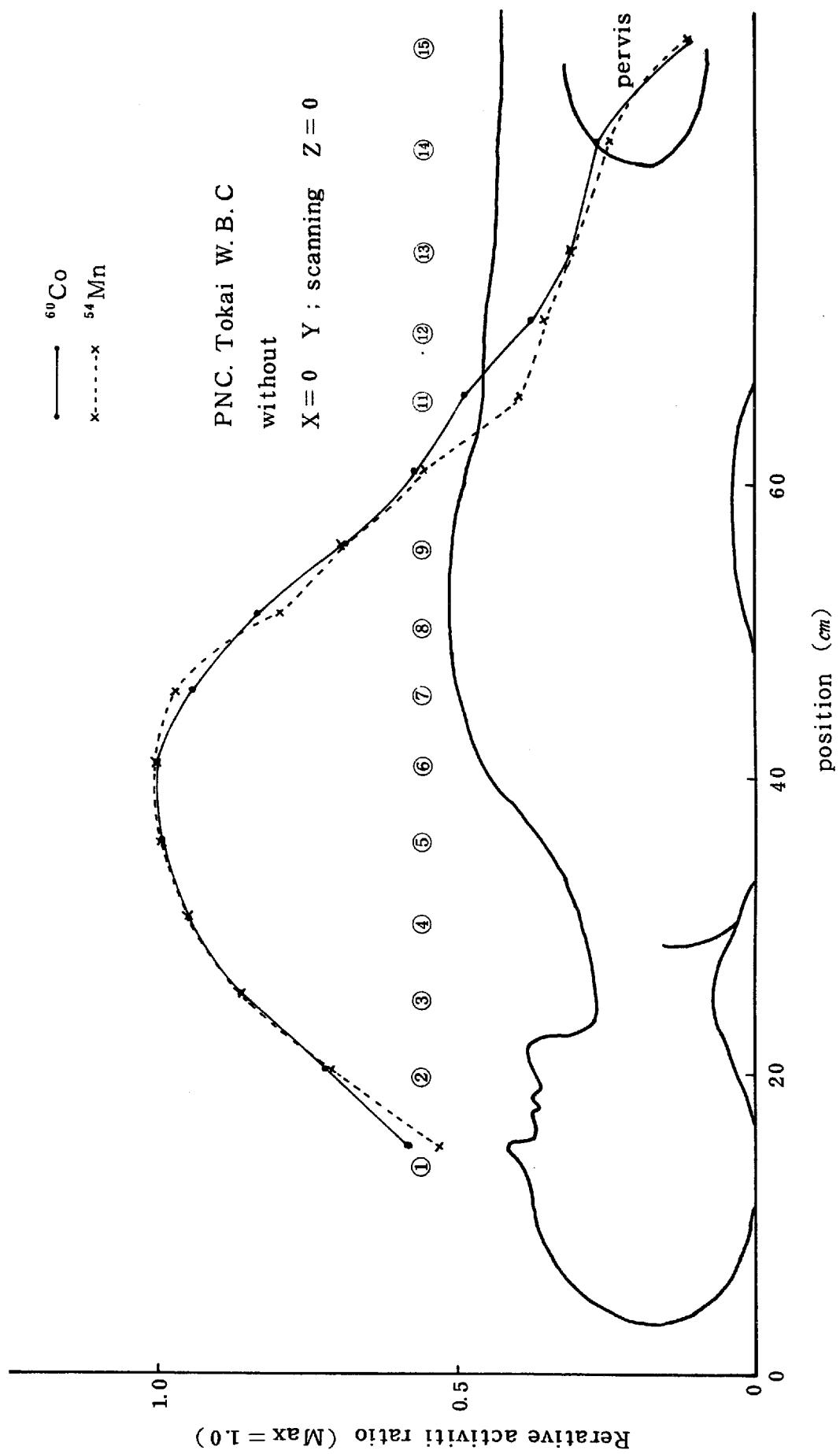
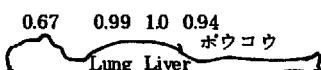


図 (5-3-1) ${}^{60}\text{Co}$ の体内分布図

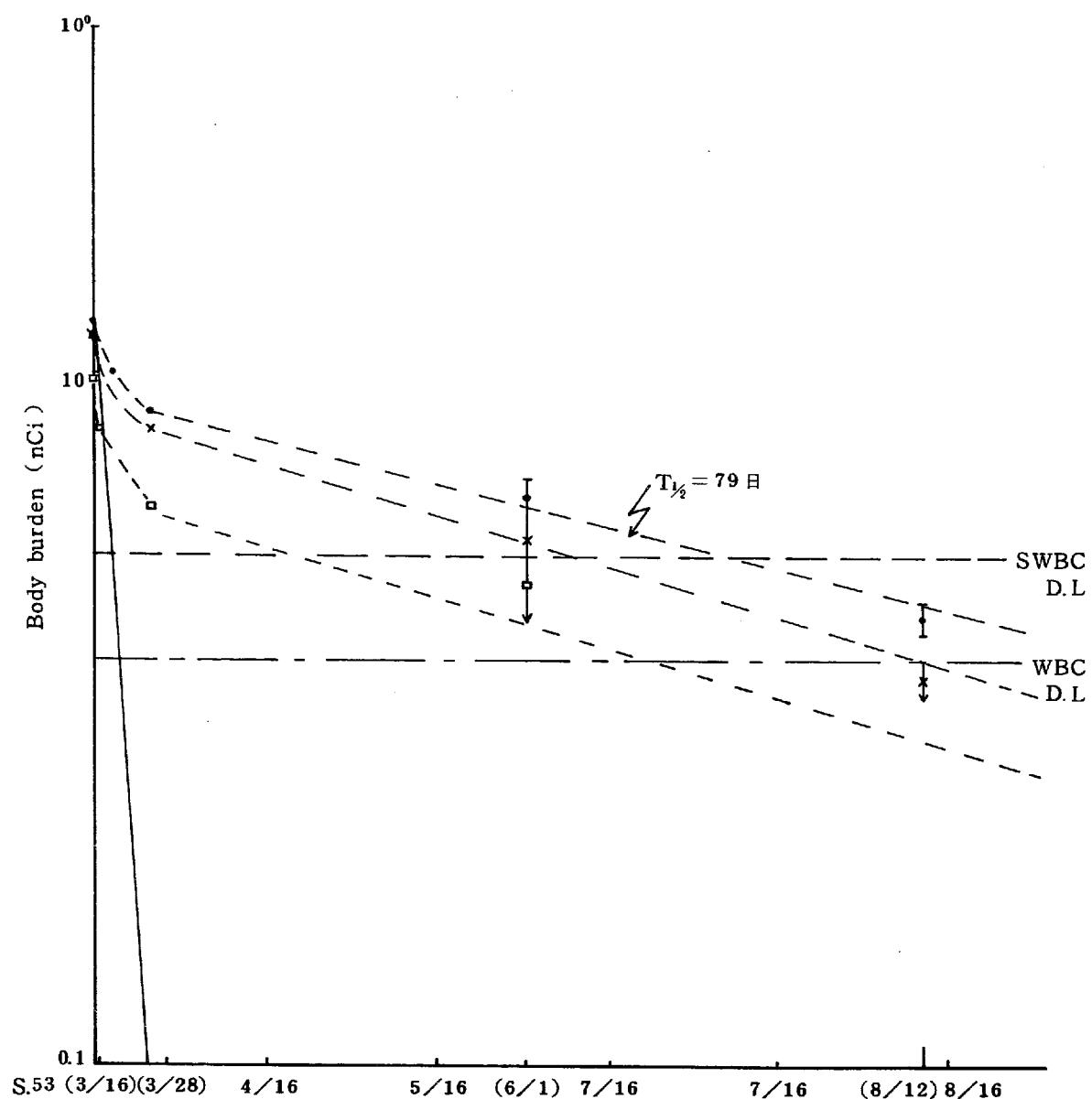
5-4 Cs-137 の吸入例

INDIVIDUAL MONITORING

DATE OF EXAMINATION	NAME	DATE OF INHALATION
78-3-16 ↓ 78-8-12	M.T 他2	78-3-16
NUCLIDE	PHISICO-CHEMICAL STATE	
Cs-137	ミスト (Transportable)	
ESTIMATION METHOD		
W. B. C		
ORGAN	RADIOACTIVITY	
	WHOLE BODY COUNTER	NOSE SWAB
全 身	14 nCi (3/16) 12 " (3/17) 8 " (3/28) 2 " (8/12)	α : B. G $\beta - \gamma$: 0.1 nCi
RETENTION		
$R(t) = \exp \left(-\frac{0.693}{T} t \right) \dots \dots (1)$ $T : 70 \text{ 日 } \int_0^{50y} R(t) dt = 101 \mu\text{Ci} - \text{日}$ ICRP Pub 10 ($R(t) = 0.15 \exp \left(-\frac{0.693}{1.0} t \right) + 0.85 \exp \left(-\frac{0.093}{115} t \right)$) $\dots \dots (2)$		
DOSE COMMITMENT		
$3/16$ の $14 \mu\text{Ci}$ を沈着量とする $\epsilon : 0.59 \text{ Mev}$ (1)式 $D_{50y} = 51.2 \times \frac{\epsilon}{m} \times q \times \int_0^{50y} R(t) dt$ $m : 7 \times 10^4$ $= 0.61 \text{ mrem} (\approx 1 \text{ 年})$ $q : 0.014 \mu\text{Ci}$ (2)式の場合 (0.85 mrem) ($0.76 \text{ mrem}/\text{y}$)		
COMMENT		
Scanning data (3/17) <ul style="list-style-type: none"> ◦ Cs は全身に均一分布する ◦ この事例では Slow retention は 110 日より 70 日に近い ◦ Cs 吸入後の体内残留 Date を図 (5-4-1) に示す。 		



SN843-80-22



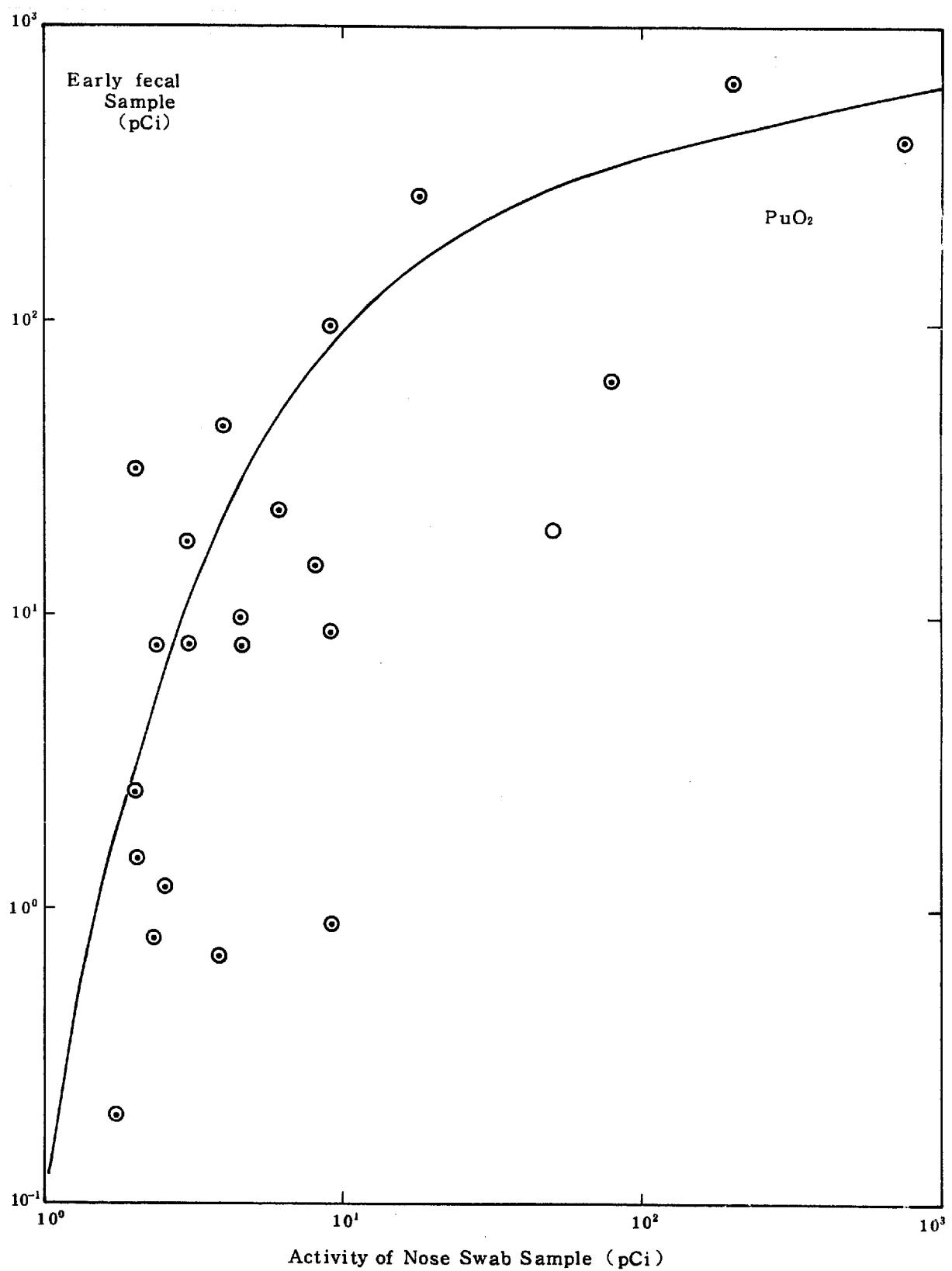
図(5-4-1) Cs吸入後の体内残留Date

5-5 Pu-239 の吸収例

INDIVIDUAL MONITORING

DATE OF EXAMINATION		NAME	DATA OF INHALATION	
78-7-25		S. S 他 5	78-7-25	
NUCLIDE		PHISICO-CHEMICAL STATE		
Pu		PuO ₂ (Non Transportable)		
ESTIMATION METHOD				
L. M		Bioassay feces		
ORGAN	RADIOACTIVITY			
	WHOLE BODY COUNTER		NOSE SWAB	
肺	Bioassay 63 pCi (初期糞) 135 " (In take) 19 " (Lung)	LM BG		$\alpha - 18$ pCi
RETENTION				
Lung model $\epsilon : 53 \text{ MeV}$ Inhalation class : Y $T_e : 500 \text{ 日}$ MMAD (AMAD) : $1.0 \mu\text{m}$ $m : 1 \times 10^3 \text{ g}$ 肺の沈着量は初期糞のデータと Lung model から計算によって求める				
DOSE COMMITMENT				
$D_{(50y)} = 37 \text{ mrem} / 50 \text{ y}$ $(15 \text{ mrem} / \text{y})$				
COMMENT				
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Lung monitor の DL は 6 nCi (Pu) である。 ◦ Bioassay は 5 日分の糞及び尿を sampling する。 ◦ 肺の Retention は, $R(t) = 0.67 \times e^{-\frac{0.693}{30}t} + 0.33 e^{-\frac{0.693}{300}t}$ もある。 ◦ Pu 燃施設で今までに得られた鼻スミヤと BiO の関係グラフを図 (5-5-1) に示す。 				

PNC TN843 80-22



図(5-5-1) Relation between activity of nose swab sample and activity of early fecal sample

5-6. 再処理セル内作業における空気汚染管理

再処理工場では、最近大規模なセル内作業が2件実施された。1つの作業は、主工場酸回収セル内の酸回収蒸発缶(273E30)の故障に伴って実施された作業で、セル内から全長10mあまりの蒸発缶を解体撤去し、新蒸発缶を据えつけるという作業であり、作業延人員7152名、総被曝線量 59.1 man-rem、作業期間約240日であった。作業中に、内部被曝事故が1件発生したが全体としては順調に作業が進行し完了した。もう1つの作業としては、放射性配管分岐室(R018)内フランジ及び床面補修作業である。放射性廃液中間貯槽(U312V10)のフランジ部の液もれと放射性物質で汚染された床面の補修作業で、作業延人員 1,650名、総被曝線量 20.8 man-rem、作業期間約240日であった。

上記の2作業はともに、床面の表面汚染が β (γ)線で $1 - 10^{-1} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 、(R018の場合は α も $\sim 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)これに伴う空気汚染が $\sim 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 、空間線量も $\sim 1 \text{R}$ と短時間でも相当の被曝を伴う作業であり、内部被曝管理上も順調に作業を進めた。ここで酸回収蒸発缶の補修作業について、内部被曝をいかに管理するかという意味で当初設定した管理基準値及びその誘導方法とさらに、表面汚染の再浮遊が大きいと考えられた床面ビニールシート取り外し作業時の着用防護具の選定方法について以下に資料を示す。

273E30 関連作業区域別放射線管理基準を表(5-6-1)に示す。

5-6-1. 空気中放射性物質濃度管理基準の決め方

(1) 全体的な考え方

作業に伴っての体内被曝が鼻スミヤによる検出限界以下となるように管理することを管理基準設定の場合の基本的な条件とした。

管理基準の算出にあたっては、防護具の防護効率は表にある値を用いているが、その他に作業時間が計画作業時間より延長される可能性を考えて、時間の安全係数(=延長時作業時間/計画作業時間)を採用し、さらに防護具が性能通り使用されない可能性を考え防護具安全係数(=最悪の場合のPF/PF)とした。^{注1}

セル内作業に対する管理基準値の決定にあたっては、汚染が局所的な汚染に限定される場合とそうでなくセル内あるいは当該区域全体に広がる場合とに分類して作成した。また緊急時は一区画外の作業員が中の作業員を救助するために作業区域に立ち入ることが考えられるのでその場合でも作業可能なように、1作業区域(グリーンハウス1.2セル内等)中で作業可能な条件を採用した。

(2) R020内の管理基準値

(i) 局所的な空気汚染について

セル内の実作業時間45分、防護具(エアマスク)の防護効率PF 1000とする。管理

基準値算出に際し、両者ともにあくまで局所的であり時間的にも限定された汚染とする。

そこで特に安全係数は考慮しない。エアラインスーツを着用し10分間作業をしても鼻スミヤに検出されない値が $1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ （以下現在の全 $\beta(\gamma)$ 測定による値をさす）であるから

$$1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \times \frac{\frac{10}{45}}{\left(\frac{\text{吸入濃度計算時間}}{\text{作業時間}} \right) \times \frac{\text{実防護効率}}{\text{防護効率}}} = 2.2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

管理基準値 $2.2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

(ii) R 020 セル内霧囲気の管理基準値

當時作業をする場所ということで時間安全係数5を採用した。PFの安全係数は2とした。さらに原則としてセル内一般霧囲気は通常全面マスクでも作業し得るように維持するという考え方沿って、全面マスクによる作業時に鼻スミヤに検出されない濃度 $1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ （10分作業時）を採用した。

$$1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{m}^3 \times \frac{\frac{10}{45 \times 5}}{\frac{50}{100}} = 2.2 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

管理基準値 $2.2 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

(3) グリーンハウス 2 (GH 2) 内の管理基準値

GH 2については、半面マスクでも作業可能な値に管理する。半面マスクで10分作業をして鼻スミヤに検出されない限界値は、 $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ である。時間安全係数2、PF安全係数2を採用した。

$$1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \times \frac{\frac{10}{120 \times 2}}{\frac{5}{10}} = 2 \times 10^{-10} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

管理基準値 $2 \times 10^{-10} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

(4) グリーンハウス 3 (GH 3) の管理基準値

GH 3は防護具を使用しないでも作業可能な状態に管理する。時間安全係数、PF安全係数ともに2を採用した。防護具を使用しない場合の鼻スミヤ検出限界値は10分で $1 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるから管理基準値は以下のとくなる。

$$1 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \times \frac{\frac{10}{120 \times 2}}{\frac{0.5}{1}} = 2 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

管理基準値 $2 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

(5) グリーンハウス 4 (GH 4) の管理基準値

GH 4も防護具を使用しないでも作業可能な状態に管理する。作業時間240分、安全係

数は 2 とする。PF の安全係数 2 とする。

$$1 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2 \times \frac{10}{240 \times 2} \times \frac{0.5}{1} = 1 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$$

$$\text{管理基準値 } 1 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$$

この値はアンバー区域での α 核種の存在しない場合の基準値となっている。

(6)

GH 5 については GH 3 と同一の値に管理する。GH 1 は GH 4 と同じ値に管理する。

5-6-2. 表面汚染密度管理基準値

(1) 全体的な考え方

管理基準値は、再浮遊係数を考慮して、空气中放射性物質濃度が管理基準以下に管理できるような値に設定する。再浮遊係数としては R 020, GH 2 については汚染及び実作業を考慮して、最も安全側の値として $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ^{注2} を採用する。
GH 5 については GH 3 と同一の値に管理する。GH 1 は GH 4 と同じ値に管理する。

(2) R 020 内管理基準値

(i) 局所的な汚染について

局所空気汚染の管理基準が $2.2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるから、再浮遊係数 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ として管理基準値は $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ ($4.8 \times 10^5 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$) とする。

(ii) 周辺区域の汚染について

一般雰囲気の空気汚染濃度 ($2 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) と直接関連がある。そこで再浮遊係数 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ として、 $2.2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ ($4.8 \times 10^3 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$) の値を管理基準とする。

(3) グリーンハウス (GH 2) の管理基準値

空気汚染の管理基準は $2 \times 10^{-10} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であるから、再浮遊係数 10^{-4} cm^{-1} として管理基準値は $2 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ ($440 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$) となる。

(4) グリーンハウス 3 (GH 3) の管理基準値

GH 3 は GH 2 の $1/2$ のレベルに管理する。即 $1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ ($220 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$) となる。

注 1 安全係数の定義；防護効率に対する安全係数とは、防護具の固有の公称防護係数に対して、防護具の個別の不完全性等に対して安全が確保できるように防護効率をひかえめに見積るために見積るための係数である。同様に時間的安全係数とは作業時間が延長された場合等に対する安全係数である。

注 2 再浮遊係数 $\text{cm}^{-1} = \frac{\text{空气中放射性物質濃度 } \mu\text{Ci}/\text{cm}^3}{\text{表面汚染密度 } \mu\text{Ci}/\text{cm}^2}$

注 3 JAER 1-M-6224, TOKAMOTO et al 参照

(5) グリーンハウス 4 (GH 4) の管理基準値

GH 4 は検出感度以下の値に管理する。

(6)

GH 5 は GH 3 と同じ管理基準値を用い、GH 1 は GH 4 と同じ管理基準値を用いる。

5-6-3 床面ビニールシート取り外し時の呼吸保護具の選定

酸回収蒸発セル (R 020) 内のトレイ上には、放射性の汚染物の再浮遊をさけるためにビニールシートを敷き汚染物を密 していたが、セルクロージングにあたりビニール養生の撤去を実施する必要が生じた。この作業に用いる呼吸保護具の選定にあたっては以下に示す 5 項目の点を考慮しエアラインマスクを採用すべきであるという結論となった。

① 除染作業時に得られている放射線データ

- (a) 最下段ビニールシートを敷き壁面部で $10^{-5} \sim 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 程度、また、床面では $10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 以上の高汚染が残存している。
- (b) 除染作業時 A 047 セル排気ダクトのモニタリング結果では、湿式状態で $10^{-12} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であり、乾式状態では $10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 程度であった。

今回の清掃作業でも同様の状況を考えておく必要がある。

② 除染作業時の防護具フィルター汚染状況

- (a) 全面マスクでの立入時は、立入前に散水を行い湿式の状態（セル換気のため作業時には一部半乾式になるところが生じたとのこと）で作業実施されたが退出時にはフィルター汚染として 500 cpm 程度になることが多かった。
- (b) 一度、全面マスクフィルター表面に廃棄物梱包時のビニール袋内エアー抜きにて発生させたとも考えられている汚染、10 Kcpm で鼻スミヤ微量検出のトラブル的汚染を経験している。
- (c) ハウエル加工圧服使用にてのフィルター汚染は、300 cpm 程度で鼻スミヤの検出はなかった。

③ AAF D 018 作業上での放射線管理の実績

ビニールシート取り外し作業と放射線的状況が同一と考えられる R 018 での作業における空気汚染濃度と防護具の関連に係る放管データを得ることが出来たので参考として別添において示す。

④ 作業者の呼吸域で予想される局所空気汚染密度

ビニールシート取り外し作業における作業者附近の局所的な空気汚染濃度の予想としては、除染作業時の A 047 セル排気ダクトでのモニタリング結果が $10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であること

から $10^{-6} \sim 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ の濃度が考えられる。

〔注〕 AAFR 018 作業での空気汚染モニタリング結果からの排気ダクトの濃度と局所的な濃度との間には 1000 倍程度のひらきがあることが認められている。

⑤ 全面マスクの性能

復旧作業に係る放射線管理の計画段階で述べているように、空気中放射性物質濃度管理基準での管理の基本は、体内摂取が検出されないようにすることを第一と考えられるべきであり、その意味でのビニールシート取り外し作業に係る空気汚染濃度の予想及び鼻スミヤでの検出の関連を示すと以下のとくなる。

○全面マスクを使用して鼻スミヤで検出される空気中汚染濃度について

$$\text{鼻スミヤの検出限界 } \beta(r) = 5.6 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{sample}$$

$$\text{鼻スミヤの採取効率} = 1/20$$

$$\text{全面マスクのPF} = 100$$

$$60\text{分作業での呼吸量} = 1.2 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

以上より

$$5.6 \times 10^{-6} \times 100 = 1.12 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}$$

$$1.12 \times 10^{-2} \div 1.2 \times 10^6 = 1.0 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

となり $1.0 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ の空気汚染濃度下での 60 分間の作業を実施すると作業者の鼻スミヤで有意な汚染が発見される可能性がある。

別添：AAFR018 作業上での放射線管理の実績

R020 のビニールシート取り外し作業には、表面汚線レベルも、作業内容も類似していると考えられるR018での作業における空気汚染濃度に係る放管データを得ることができたので参考として紹介する。なお、R018では、全面マスクの使用は一度もなくエアーラインマスクとハウエル加圧服のみで作業が実施された。

① R018における空気中モニタリングについて

R018特作実施中に、作業者の胸の位置、作業区域附近、セル排気ダクトに関する各モニタリングを同時に実施したことが2回あり、どちらも以下に示す様な結果を示している。

作業者の胸の位置 $4.7 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (1時間採取)

作業区域附近 $1.1 \times 10^{-10} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (24時間採取)

セル排気ダクト $2.2 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (1時間採取)

[尚、作業は、濡れウエスでの除染 6月7日のデータ]

以上の結果から、排気ダクトモニタリング濃度に対し、作業者自身は、その1000倍程度の空気汚染濃度下で作業する可能性がある。

② 排気ダクトの空気汚染濃度とハウエル加圧服フィルター汚染の関係

日付	作業内容	1日平均空気汚染濃度	ハウエル加圧服フィルター汚染
5月21日	除染作業	$8 \times 10^{-12} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ (GH 1 6×10^{-11})	1000 cpm
5月22日	"	3.6×10^{-12}	7200 ~ 30 Kcpm
5月26日	"	1.3×10^{-11}	7000 cpm
5月29日	"	2.6×10^{-12}	2200 cpm
6月1日	"	1.0×10^{-11}	5000 cpm

尚鼻スミヤについては、さいわいにも全て検出限界以下であった。

表(5-6-1) 213上〇V実施TF未△吸がぬれ水目生五手

空間線量率及びA143に関しては放射線管理基準に従う。
GHについての非固着汚染は可能な限り除去する。

作業区域	空気中放射性物質濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$		局 所	表 面 汚 染 密 度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$
	局 所	霧 围 気		
R - 020	2.2×10^{-7}	2.2×10^{-9}		2.2×10^{-3} ($4.8 \times 10^5 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$)
GH - 2	—	2.0×10^{-10}	—	2.0×10^{-6} ($4.4 \times 10^3 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$)
GH - 3	—	2.0×10^{-11}	—	1.0×10^{-6} ($2.2 \times 10^2 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$)
GH - 4	—	1.0×10^{-11}	—	検出限界以下
GH - 5	—	2.0×10^{-11}	—	1.0×10^{-6} ($2.2 \times 10^2 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$)
GH - 1	—	1.0×10^{-11}	—	検出限界以下

6. 当面の線量評価法の諸問題

今回の検討会では明確な結論が出ず、今後検討を要すると考える項目を以下に列挙する。

(1) ALI概念の管理実務面への適用について

ALIは管理規制値として摂取量のみで表現されるため、一面ではきわめて単純な管理への応用が想定される。一方このALIは内部被曝管理上一般的測定評価技術である、全身体外計測法(WBC, 肺モニタ等)やバイオアッセイ法の測定値より直接求まる値ではない。すなわち肺モデル他の代謝モデルを用いて逆算して摂取量を求めALIと比較することになる。従って摂取量を算出するための情報が不可欠である。吸入に係わる核種、化学形、代謝データ等を整備する必要がある。

(2) クリアンスクラスD, W, Yの情報入手

放射性物質吸入時の線量評価に際し、肺モデルを適用する上でクリアンスクラスを決定する必要がある。一義的には化学形に依存するため化学形に関する情報、クリアンスクラスに関する情報を吸入が想定される放射性物質についてデータを整備する必要がある。

(3) β 線放出核種の内部モニタリング

再処理工場で想定される β 線放出核種(^3H や $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ 等)の内部被曝モニタリングは現在実施しておらず、作業場での空気モニタリングのみに依存している。現在定期的に実施しているWBCによる測定では β 線のみを放出する核種はカバーしていないため、今までの再処理での運転経験をふまえて β 線放出核種の内部モニタリングを立案する必要がある。

7. あとがき

新しいICRPの勧告Pub 26とPub 30を東海事業所の内部被曝線量評価へどう適用させていくかは当面の大きな課題である。その前にまず安全管理部内各課での内部被曝関連業務の現状サーベイを行い、ICRPの勉強会を行った。又代表的な核種については吸入時の線量計算も行い、それらをまとめたのが本報告書である。

報告書の体裁としてはすっきりしない面もあったが、一応検討会での各委員の提出資料を報告書としてまとめた。

内部被曝線量評価は一方では厳密な測定および線量計算を必要とする側面と、他方大量の被検者を短時間にスクリーニングする実務的業務を消化しなければならない2つの側面をもつ。その背景としてICRPの評価手法モニタリング手法が重要な役割をもっている。

今後ICRP Pub 26およびPub 30を内部被曝管理業務への適用を検討する上の検討資料として本報告書を利用する予定である。

8. Appendix

8-1. AEEW-R 1118 の要約

観察した肺のクリアランス・パターンを用いたプルトニウム酸化物の吸入によるリスク評価

Assessments of risks following the inhalation of plutonium oxide using observed lung clearance pattern

D. Ramsden

Oct. 1977

Summary

プルトニウム酸化物の吸入による線量預託およびリスクをAEE (Atomic Energy Establishment) Winfrithで観察したクリアランス・パターンを用いて計算している。また、この計算したリスクと ICRP肺モデルによって計算できるリスクとを比較している。

8-1-1. 序 章

プルトニウムの最大許容被曝量についての現行許容レベルと、他の体内沈着放射性核種の許容レベルあるいは外部被曝によるリスクとを比較するという方法によって、体内に取り込んだプルトニウムの毒性を考察したレポートが最近いくつか出されている(1, 2, 3, 4)。これらのレポートにざっと目を通すと、ICRPの現行許容レベルについて大きな変更の必要性はないが、吸入経路からのプルトニウム酸化物については約5倍程度大きすぎるということが指摘されている。しかしながら、より詳しく調査すると、この結論にいたった方法が違っていたり、時には相容れないものであるということが明らかになっている。

吸入したプルトニウム酸化物のリスクについての既存のレポートは全てICRP肺モデルを基礎としている(5, 6)。このモデルは、吸入した不溶性粒子(クラス分類Y)の挙動と最終的な体内器官への移行を予測する。AEE Winfrithにおける経験によると(7, 8, 9)，我々はICRPの仮定といくぶん異なったクリアランス・パターンを観察している。不溶性粒子の挙動についてのWinfrithパターンは、ICRP肺モデルのパラメータを変更することで十分に適応できる。それゆえリスク評価法は観察したクリアランス・パターンをICRP法に応用することで行える。この修正モデルの使用は、プルトニウムについての現行許容レベルが許容しうるもので変更の必要性がないという結論に達する。Winfrithでの経験は、プルトニウム酸化物の被曝についてはよくまとめられた数少ないものであり、このデータはICRP勧告レベルの完全な改訂を行う以前に注意深く考慮せられると感ぜられる。

それゆえ、このメモは最近のレポートと同様の方法で、観察した肺のクリアランス・データをもとにリスク評価を行い、それらレポートの適当な部分と比較している。

まず最初に、吸入したプルトニウム酸化物による内部被曝により発生する個人のリスクの定量化する試みは、ある程度未知数の部分があることを認識すべきで、かつ強調しておくべきであろう。放射線の有害な影響は、通常高線量率で高線量を受けた後でのみ観察できる。このような観察をもとにしたリスク係数は、それ自身非常に不正確であり、低線量域への外そうは、ありそうもないと考えられる線量-効果の直線関係を意味している。したがって、^v放射線リスク^vとは、リスクのみについての上限を示すと考えるべきである。

また、提案した修正は、最大許容年摂取量（MPAI）のみに関連して現われるであろうということを強調すべきである。MPAIの考え方は、計画設定のためには有効であるが、プルトニウム施設従事者の日常管理には使用されない。AEE Winfrithで発生するかもしれないプルトニウム酸化物による被曝は、許容量に対する割合としてよりむしろ肺の吸収線量によって調査される¹⁰。

8-1-2. アプローチの方法

ほとんどのレポートにおけるアプローチの方法、1ミクロン径のPu(239)O₂を鼻から1回吸入することにより発生する概念的リスクを計算するというものである（ここでも、比較が容易であるため同様に考えた。）実際には、粒径分布は1ミクロンよりいくぶん大きめの中央径を持つ対数正規分布となるようである。また、吸入放射性核種はPu-239のみでなく、Pu-238, Pu-240, Pu-241, Pu-242そしてAm-241も多少含まれるであろうということにも注目すべきである。

吸入後、肺中の物質分布はICRP肺モデルで予測しているような分布になると仮定した。肺からは、ICRP肺モデルのクリアランス・パターンが応用され、そして体内各部の時間に伴なう放射能の変化は、いくつかの方法により導くことができる。特定の癌についてのリスク係数値は第6章で述べる。リスク係数と線量預託の積は、特定の癌のリスク評価を計算するために用いることができ、また生涯リスクは、これら特定のリスクの和である。

8-1-3. ICRP肺モデル

付録Aでは、ICRP肺モデルについて述べ、同時に通常の方法で解くことのできる微分方程式の解を示している。このモデルの取扱いは、全体的なアプローチの基本であり、我々は観察したクリアランス・パターンを考慮するためこのモデルを若干修正しているので、ここで補足する。

(1) 初期沈着

通常の作業時の呼吸率（訳注：20 L/min ）で吸入した1ミクロン径の粒子を考えると、肺への初期沈着は ICRP タスク・グループ（訳注：ICRP. Task Group on Lung Dynamics）のレポート⁽⁵⁾から直接得られる。それによると 吸入物の30%が鼻腔・咽喉部（NP部），8%が気管・気管支部（TB部）そして25%が胞胞部（P部）に沈着し、残りの37%ははき出される。肺リンパ節（R. L. N）に直接沈着するものはない。

(2) 初期クリアランス

吸入した最初の日のうちに、NP部とTB部の沈着物は有効に排除される。プルトニウム酸化物については、NP部とTB部へ沈着したもの99%が胃腸へ移行し、糞中に入りて排泄される（腸から血液への移行割合は、 10^{-6} のオーダーである。）残り1%は、血液へ溶け込む。

P部への沈着物のうち40%は、繊毛エスカレーターで急速に排除され（半減期=1日）腸へ移行する。残り60%は、^v後期クリアランス^vとして3.3節で考えている。P部へ沈着した物質の、血液への急速な溶け込みと急速な肺リンパ節への移行はない。

初期クリアランスの様子は、すべての吸入した不溶性物質に典型的であり、認められた方法の摂取量評価は、最初の週のうちに糞中に見出される量を測定する方法である。

(3) 後期クリアランス

P部に残った60%の沈着放射性物質について、ICRP肺モデルでは500日の半減期を仮定し、その $\frac{1}{4}$ が肺リンパ節へ、 $\frac{1}{12}$ は直接血液へ移行し、そして $\frac{2}{3}$ がおそらく繊毛エスカレーターでゆっくりと胃腸へ移行する。

肺リンパ節へ移行したものの90%は1000日の半減期でゆっくりと血液に溶け、そして10%が永久に残留する。

(4) 観察した後期クリアランス

肺モニタリングを基礎とした我々の観察は、後期クリアランスが20～50日の半減期と200～500日の半減期をもつ2要素からなることを示している。通常、短かい半減期を持つ割合は、長い半減期のものより多い。本レポートでは2:1の割合で、30日および300日の半減期を用いる。この2要素のクリアランス・パターンは、また他の研究者によって観察されており、使われている⁽¹⁾。

観察したパターンで肺から排除された物質が、どのように血液、リンパ節そして胃腸に分割されるかを決めるため、我々は次の2つの観察を考慮せねばならない。

(a) 我々は肺リンパ節に永久に留まることも、非常に長期間のクリアランス半減期（訳注：ICRPモデルでは1000日）があるということに対して何らの証拠も見出さない。厳密に言って、肺中プルトニウムの検出限界と、我々の研究している低レベル放射能のため

に、肺モデルで提案している程度のリンパ節残留とクリアランスを見出さない。としか言ふことはできない。(付録B参照)

(b) 被曝歴のわかった対象者から得た尿中プルトニウムから、肺モデルで予測できるより低いレベルで尿中プルトニウムを定常的に検出している。厳密に言って、肺モデルは尿による排泄を全く考えていないため、Wright - Langham もあるいは Beach and Dolphin (13) により提案されたような排泄関係を応用しなければならない。

肺中のクラスY物質について、血液への主な移行経路はリンパ節を経るものである。上述の我々の観察は、Winfrithにおいて観察したクリアランス・タイプについて、ICRP モデルで予測されるよりも少ない量が肺からリンパ節へ移行することを示している。仮に、リンパ節へ移行する物質の量は物質が肺中に滞留する時間に依存するという仮定が妥当であるとするならば、短かい半減期の要素はリンパ節中プルトニウムにわずかしか寄与せず、組織体結合物質としてのリンパ節中プルトニウムは大巾に減少する。付録Bは、定量的にこの修正を論じている。

8-1-4 器官中放射能

被曝者の器官中放射能量の時間による変化は、次の2つの場合について計算することができる。

- (a) ICRP肺モデルのパラメータを使う(付録A)。
- (b) AEEWタイプのクリアランスにより修正したものを使う(付録B)。ここで考慮した器官は、(P+TB+NP部)、肺リンパ節(RUN)、骨および肝臓である。

図1は、ICRP肺モデルによるもので、吸入後36年間の変化を表わしている。図2は、AEEWタイプのクリアランスと修正した肺モデルによるものである。

すべての器官で、AEEWタイプのクリアランスによるものは、ICRPタイプによるものより低くなっている。

8-1-5 線量と線量預託

体内に沈着した放射性物質による特定の器官への線量は、次式で計算できる。

$$\text{Dose (rem)} = \frac{N}{M} \times 51 \times E \int_0^T q(t) dt$$

ここでMは器官質量(g)、Nは分布係数、Tは吸入後の経過時間(日)、そしてq(t)は時間tにおける器官中放射能(μCi)である。また、Eは線質係数(QF)を含む実効エネルギー(MeV)である。次のコメントは、別の研究者による異なったアプローチに関するものである。

(1) MRC^{*}のアプローチ "プルトニウムの毒性"

MRCは、骨の分布係数として5、他の器官について1としている。また、 α 線の線質係数として10を用いている。リンパ節中に高濃度のプルトニウムが存在するにもかかわらず、実験動物の肺リンパ節で放射線を原因として誘発される癌がきわめて稀であるということから、"肺"はPおよびTB部のみからなるとしている。

(2) Thorne and Vennartのアプローチ

"肺"は、リンパ節も含む1つの複合器官で、1つの関連したリスク係数を持つと考えている。 α 線の線質係数は20としている。骨の線量評価は、リスクを受ける細胞(内基礎細胞)についての線量を考慮することを基本とし、モンテカルロ法を応用している(14)。骨への精密な微細線量評価(micro-dosimetry)の応用と、肺リンパ節を含む肺への"大まかな"線量評価の応用が堅実であるかどうか議論できる。骨中プルトニウムの予測した深さにもとづく骨の線量評価を使って、造血骨髄への線量が計算でき、白血病のリスクが評価できる。驚いたことに、白血病のリスクは他のリスクと同程度であることがわかる。

(3) AEEWのアプローチ

時間の関数としての器官中放射能分布を使って、器官線量をMRCのアプローチとThorne-Vennartのアプローチ(完全なモンテ・カルロ解析よりむしろ骨の線量評価に使用したスケーリング・ファクタ)について計算した。

表(8-1-1)は、1ミクロン径のPuO₂ 1 μ Ciを吸入した後の50年間線量預託を示している。

表(8-1-1) 1 μ Ciのプルトニウムの吸入による50年間線量預託(rem)

器官	AEEW (a) (b)		MRC (a)	Thorne-Vennart (b)
肺	70	300	300	1200
骨	200	1000	700	3700
肝臓	120	250	400	760
骨髄	-	100	-	300

(a) MRCのアプローチ(5.1節)

(b) Thorne and Vennartのアプローチ(5.2節)

8-1-6 単位放射能摂取あたりのリスク

1 remあたりのリスクがわかっていると、プルトニウム酸化物の吸入によるリスクは線量

*訳注 Medical Research Council

年あたりのリスク（この場合、潜伏期についての若干の余裕が含まれるべきである。）とすることができる。

高線量被曝者の癌誘発統計値からのリスク係数の誘導は、The U. N. Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (15)やThe National Academy of Sciences Advisory Committee on The Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR) (16)により十分に議論されている。それらのデータは基本的に、原爆生存者、初期の発光塗料産業従事者、背椎炎治療のためX線をあびた患者、ウラン鉱夫そしてトロトラスト投与患者から得られている。また、直線線量効果関係仮説が用いられているが、このようなリスク係数は非常に不正確であるということを強調しなければならない。

(1) リスク係数

表(8-1-2)は、MRC, Thorne and Vennartそして我々の使用した1 remあたり 10^6 人あたりのリスク係数を示す。

表(8-1-2) 単位線量あたりの特定の癌についてのリスク係数

影響	リスク係数(ケース/ 10^6 /rem)		
	MRC(1)	Thorne-Vennart(2)	本論文
肺癌(i)	25	20	25
骨腫瘍(ii)	5	5	5
肝臓癌(iii)	20	10	20
白血病	-	30	30

注記 (i) おそらく10~40のレンジ。ウラン鉱夫、原爆生存者そして背椎炎患者についての研究結果。年あたりのリスクは、約 $1/10^6/\text{yr}/\text{rem}$ 。

(ii) Ra-226によるデータを基にしている。MRCはQF=10とした。
Thorne-VennartはQF=20としたが、Ra-226線量のわずか半分が内基礎細胞に与えられると述べている。年あたりのリスクは、約 $0.1/10^6/\text{yr}/\text{rem}$ 。

(iii) MRCとThorne-Vennartの違いは線質係数による。トロトラスト(トリウム酸化物)投与患者のデータを基にしている。年あたりのリスクは、 $0.6/10^6/\text{yr}/\text{rem}$ 。

(2) 生涯(50年)に受けるリスク

表(8-1-3)は、1ミクロンのプルトニウム酸化物 $1 \mu\text{Ci}$ を吸入することで50年間に受けるリスクを示している。

表(8-1-3) PuO₂ 1 μCi の吸入による生涯リスク(ケース/10⁶)

影響	AEEWクリアランス (a)	AEEWクリアランス (b)	MRC (a)	Thorne-Vennart (b)
肺癌	1750	7500	7500	24000
骨腫瘍	1000	5000	3500	18500
肝臓癌	2400	5000	8000	7600
白血病	—	3000	—	9000
合計	5150	20500	19000	59100

(訳注) (a), (b)は表1と同意義。

本表の数値は、表(8-1-1)および表(8-1-2)より簡単に導ける。

(3) 摂取年令によるリスクの変化

摂取が若年に発生するという仮定は、非常に控え目なリスク評価を導くことから一般的に知られている。成人になって発生する摂取については、計算は、70年の生涯を仮定して、積分範囲だけを変え、リスク係数としては同一のものを使用して行える*。しかしながら、生涯リスク係数の使用は、放射線誘発癌の潜伏期間を考慮するよう修正されるべきである。これは、癌の発生しない一定の潜伏期間を仮定することで行える(4)。

確かに、高年令者の摂取について、骨あるいは肝臓の腫瘍に比べて肺癌のリスクは摂取後最初の年に肺に与えられる線量の大きさによって増大する。一方、骨や肝臓への線量は、時間とともにほぼ直線的に増大する。時間とともにリスクの変化は、ここでは論じていない。

8-1-7. リスクの比較

1 μCi のPuO₂を吸入した後 50 年間にわたって受けるリスクを評価する場合、最大被曝レベルで起こるリスクを計算することと、これと最大被曝レベルでの外部被曝について評価したリスクとを比較することは理論的である。比較を容易にするために同じ状況をとることとする。すなわち 1 MPAI のプルトニウム酸化物被曝と、全身に対する外部被曝 5 rem で 50 年間にわたるリスクとを比較する。表(8-1-4)にその結果を示す。この表のプルトニウム被曝とガンマ線被曝との割合は、AEEWで観察したクリアランス・パターンについてプルトニウム被曝の現行レベルが許容しうるものであることを示している。

* (訳注) t₀才で摂取した時次のようになる。

$$\text{リスク} = \int_{t_0}^{T_0} (\text{リスク係数}) \cdot Dose(t) dt$$

表(8-1-4) 許容限度での1年間被曝からのリスク
 外部被曝の限度 - 5 rem/年
 プルトニウム酸化物被曝の限度 - MPAI (最大許容年摂取量)

アプローチ	外部被曝リスク係数 ケース/ 10^6 /rem	MPAI μCi	Nominal 外部被曝	risks 内部被曝	比率 (Pu/r)
AEEW(a)	100	0.08	5	4	0.8
AEEW(b)	180	0.07	9	14	1.6
MRC (a)	100	0.08	5	15	3.0
Thorne-Vennart(b)	180	0.07	9	40	4.4

- (a) MRCのアプローチ法
 (b) Thorne-Vennartのアプローチ法

8-1-8. 結論

最近の論文は、プルトニウム酸化物吸入による現行の被曝基準は5倍ほど高すぎるとしている。これは、最大許容年摂取量(MPAI)の考え方に対応できる。

この結論にいたるために使用した方法の考察は、ICRP肺モデルの出発点および方法それ自身がいくぶん矛盾していることを明らかにする。

AEEWにおける観察によると、ICRP肺モデルはプルトニウム酸化物の吸入被曝を厳密にフォローしないが、すべての観察を満足するよう容易に修正できることを示している。

このような修正肺モデルは、線量評価計算それ自身に矛盾がないとして、プルトニウム酸化物による現行被曝基準が他のICRP基準と矛盾のないことを表すリスク評価を示している。

付 錄 A

肺動力学に関するICRPタスク・グループモデル(6)（ICRP Publication 19(5)で修正されたもの）は、図(8-1-1)のように表わせる。基本的に、タスク・グループは肺液中での溶解度の違いによりD, WおよびY 3クラスの化合物を考えている。肺は、鼻孔・咽頭部（NP部）、気管・気管支部（TB部）および肺胞部（P部）の3つのコンパートメントに分割される。吸入した物質の挙動は、それぞれのコンパートメントへの沈着に依存する。この割合 F_1 , F_2 , F_3 は粒子サイズと呼吸パターンに依存する。

放射能／個数スペクトルは、吸入によって取り込まれる大部分のエアロゾルについて、対数正規型に分布するであろうから、各部への沈着割合は幅広く変化する。

20 l/分の⁷通常作業率⁷呼吸パターンと⁷標準肺生理学⁷に従う鼻呼吸を仮定すると、1ミクロンAMADの粒子サイズについて選択した沈着割合は次表のようになる。また、わずかに異なった粒子サイズについての沈着割合も示す。

AMAD*	0.5	1.0	2.0	5.0
F_1	0.14	0.30	0.50	0.75
F_2	0.08	0.08	0.08	0.08
F_3	0.33	0.25	0.18	0.12
Exhaled	0.37	0.37	0.24	0.05

*(訳注) AMAD = Activity Medium Aerodynamic Diameter

計算は、吸入物質量Q；すなわち最大許容空气中濃度(MPC)aや最大許容年摂取量(MPAI)のような考え方により議論される量で正規化できる。あるいは肺に沈着した物質量で正規化されるかもしれない。ほとんどの実際的な状況において、生体計測で計るパラメータは初期クリアランスが完了した後、肺中に残留している物質量；すなわち沈着割合 F_3 Qの約60%であるまた、一方、最初の数日の間に糞中に排泄される物質量は($(F_1 + F_2 + 0.4 F_3)$ Q)を決定する。

図(8-1-1)に示した肺モデルの挙動を表わす連立微分方程式を次のように示すことができる。小文字は、同じ添字の経路についての移行率を表わす、一方大文字は、その経路に沿った移行の大きさ(The amplitude of the transfer)を表わす。しかしながら、その大きさ(amplitude)の要求を満たすために、モデルは大きさ(amplitude)が競合する移行率定数に比例する真の⁷コンパートメント・モデル⁷として単純に扱うことはできない。それゆえ、それぞれのコンパートメントを引用した大きさ(amplitude)の割合に分割し、それぞれの小区画

は1つのクリアランス経路のみに関連すると考える。

式は次のようになる。

血液コンパートメント(Z)について

$$Z = Z_j + Z_k + Z_e$$

そして

$$\frac{dZ_j}{dt} = -Z_j j + J \{ R_i i + P_e e + TB_c c + X_m + V_n \}$$

$$\frac{dZ_k}{dt} = -Z_k k + K \{ R_i i + P_e e + TB_c c + X_m + V_n \}$$

$$\frac{dZ_e}{dt} = -Z_e e + L \{ R_i i + P_e e + TB_c c + X_m + V_n \}$$

ここで、 $P_e = EQF_3$; $TB_c = CQF_2$; $NP_a = AQF_1$; $R_i = IHQF_3$

通常の方法による解は；

クラスY ($i \neq h$)について

$$P = QF_3 \{ Ee^{-et} + Fe^{-ft} + Ge^{-gt} + He^{-ht} \}$$

$$R = QF_3 F \{ I \frac{h}{(i-h)} (e^{-ht} - e^{-it}) + (1-I) (1 - e^{-ht}) \}$$

$$X = QJ \{ IHF_3 \frac{hi}{(i-h)} [e^{-ht} / (m-h) - e^{-it} (m-i) - e^{-mt} (h-i) / (m-h) (m-i)] + EF_3 \frac{e}{(m-e)} (e^{-et} - e^{-mt}) + CF_2 \frac{c}{(m-c)} (e^{-ct} - e^{-mt}) + AF_1 \frac{a}{(m-a)} (e^{-at} - e^{-mt}) \}$$

$$V \rightarrow \times \{ J \rightarrow K, m \rightarrow n \}$$

時間の関数としての器官中放射能量を図(8-1-2)に示す。

付 錄 B

AEEWで観察した長期肺クリアランス・パターンは、通常次の形である。

$$P = P_0 (X_1 e^{-\lambda_1 t} + X_2 e^{-\lambda_2 t})$$

ここで、 $X_1 : X_2 = 1 : 2$ そして $\lambda_1 : \lambda_2 = 1 : 10$ (半減期は、300日および30日)

この2要素クリアランス・パターンで、我々は次の2つの仮説を考慮する；

- (a) 両要素は、クラスY物質（すなわち不溶性物質）の挙動をフォローする。
- (b) 短かい半減期をもつ要素は、クラスW物質（すなわち可溶性物質）の挙動を表わす。

肺クリアランスの速度は別として、肺モデルのクラスY物質とクラスW物質の主な相異は、クラスW物質では血液へ移行する量がより多いということである。それゆえ、この仮説が正しいと決定するために、我々は尿による排泄パターンを研究した。この研究は、Beach and Dolphinの尿排泄パターン¹³を応用することで行った、また被曝後少なくとも200日で時々 ICRP Publication 10を応用した。現在、わずかに2例のみが十分に解析されているにすぎないが、他のケースからのデータの研究もするつもりである。

次表は2例のデータをまとめたものである。

尿中 排泄 量	観察値 (pCi/day)	予測値 all class Y (pCi/day)	予測値 mixed W & Y (pCi/day)
ケース 1	0.06	0.13	0.37
ケース 2	0.02	0.05	0.40

これから、我々は物質は全て不溶性物質としてふるまうだけでなく、これら対象者の観察レベル（そして組織体負荷量）は、クラスYとして予測した値の半分程度であると結論する。

コンパートメントPからの長期クリアランスのみを考えると；

$$\frac{dp}{dt} = P (g + e + h) = P$$

ICRP肺モデル ($\lambda = 1.387 \times 10^{-3} d^{-1}$)について、 $H = 0.15 / 0.6$; $E = 0.05 / 0.60$; $G = 0.4 / 0.6$ より、 $e = 1.155 \times 10^{-4}$, $h = 3.465 \times 10^{-4}$, $g = 9.24 \times 10^{-4} (d^{-1})$ となる。

クラスY物質の挙動について、明白なクリアランス率(λ)の増加は、3つの移行率定数(e, h, g)全ての釣り合った変化よりもむしろ1つの変化に帰することができよう。尿分析は、増加はeあるいはhでは起らず（我々はここでeとhを定数とする。）胃腸への移行(g)が変数であること示している。

微分方程式の解は、次のようになる；

$$R = QF_3 [X_1 \left\{ \frac{Ih}{(i - \lambda_1)} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-it}) + \frac{(1-I)h}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right\} \\ + X_2 \left\{ \frac{Ih}{(i - \lambda_2)} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-it}) + \frac{(1-I)h}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right\}]$$

$$X = a_1 e^{-\lambda_1 t} + a_2 e^{-\lambda_2 t} + a_3 e^{-\lambda_3 t} + a_4 e^{-at} + a_5 e^{-ct} + a_6 e^{-mt}$$

$$\text{ここで, } a_1 = \frac{K}{\phi} \frac{P_0 X_1}{(m - \lambda_1)} \left\{ e + I \frac{ih}{(i - \lambda_1)} \right\}$$

$$a_2 = \frac{K}{\phi} \frac{P_0 X_2}{(m - \lambda_2)} \left\{ e + I \frac{ih}{(i - \lambda_2)} \right\}$$

$$a_3 = \frac{K}{\phi} \frac{P_0 ihI}{(m - i)} \left\{ \frac{X_1}{(i - \lambda_1)} + \frac{X_2}{(i - \lambda_2)} \right\}$$

$$a_4 = \frac{K}{\phi} \frac{aAQF_1}{(m - a)}$$

$$a_5 = \frac{K}{\phi} \frac{cCQF_2}{(m - c)}$$

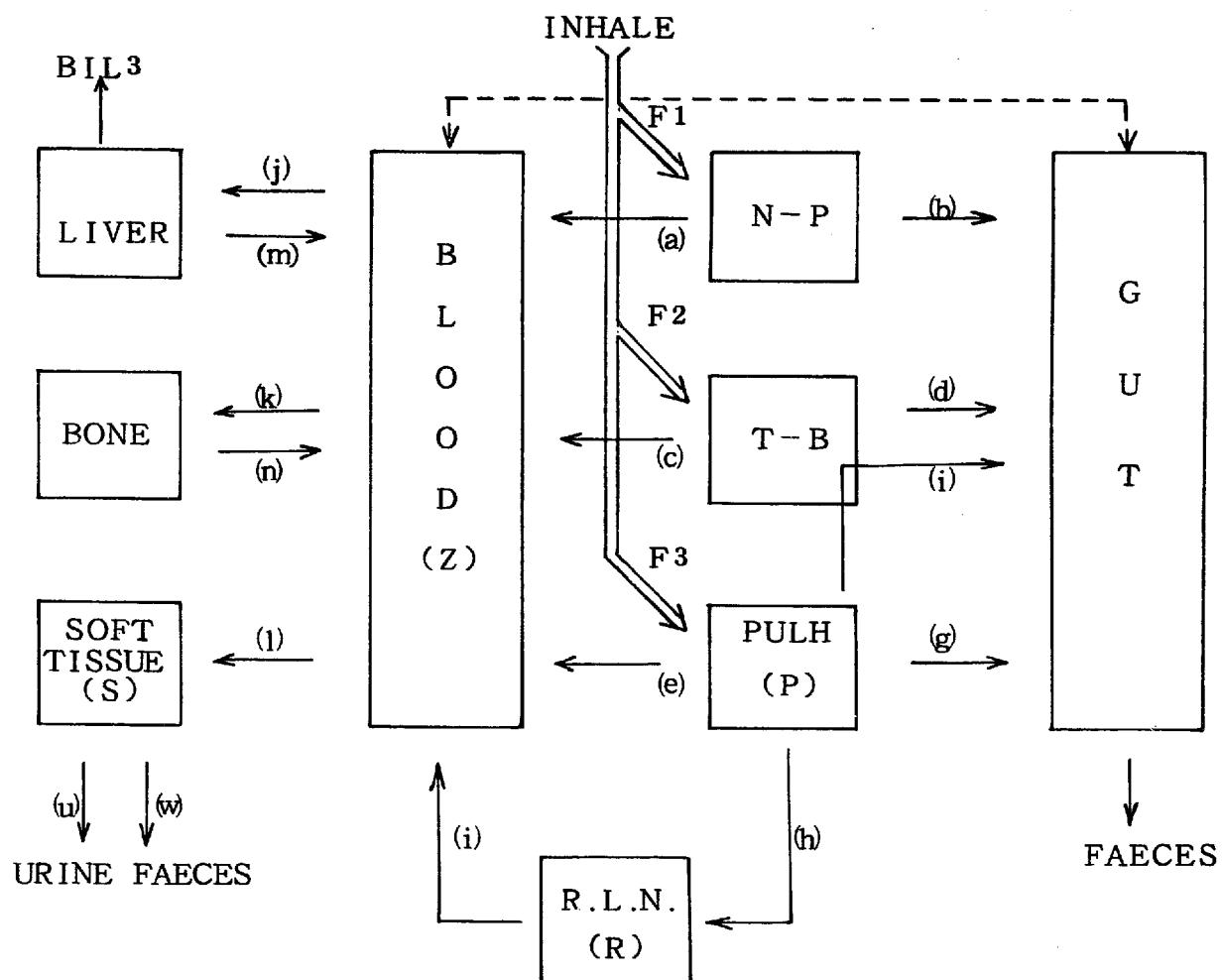
$$a_6 = - \sum_1^5 a_i$$

$$\phi = (k + j + 1)$$

$$V \rightarrow \times (j \rightarrow k, m \rightarrow n)$$

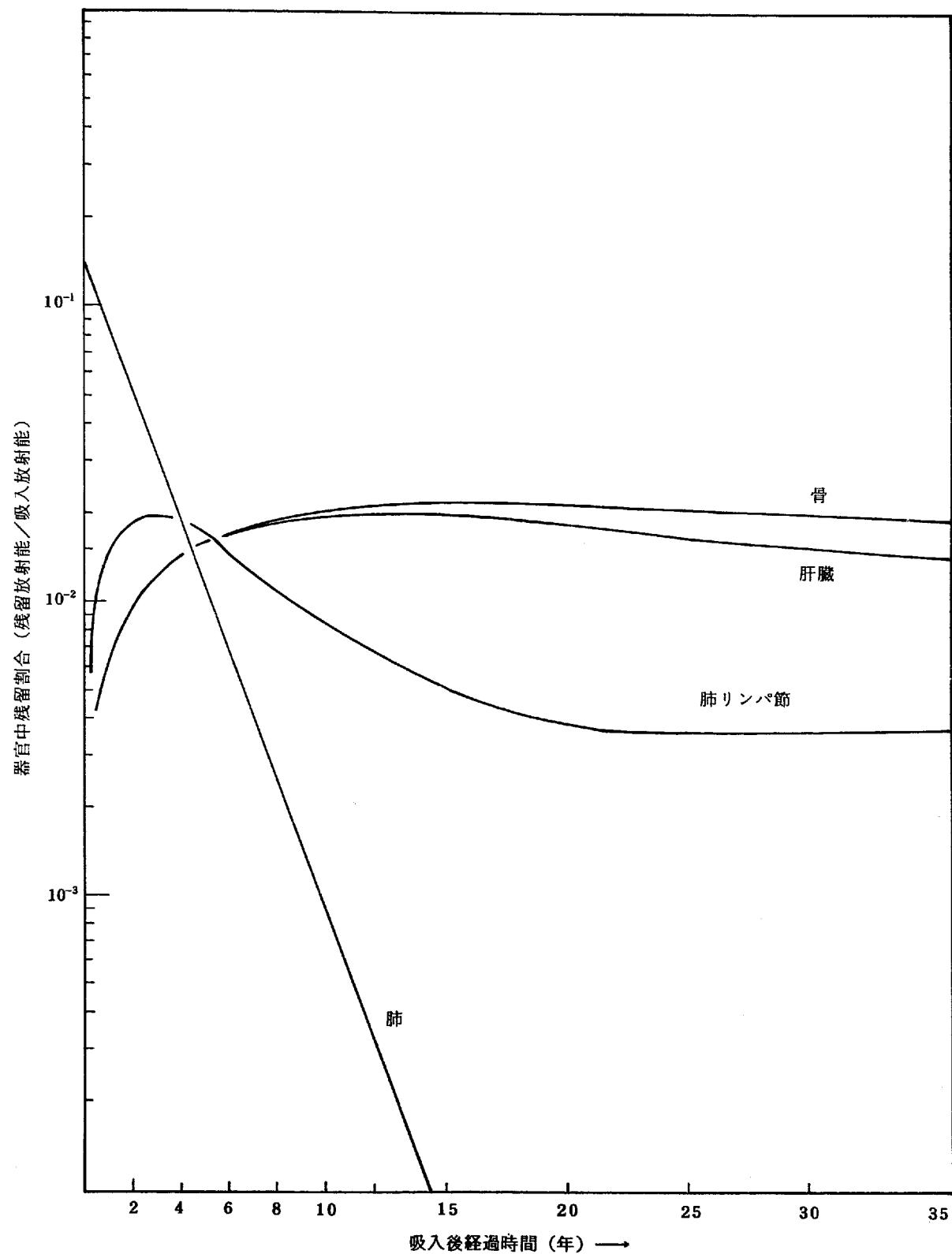
時間の関数としての器官中放射能量を図(8-1-3)に示す。

図(8-1-1) 肺 モ デ ル

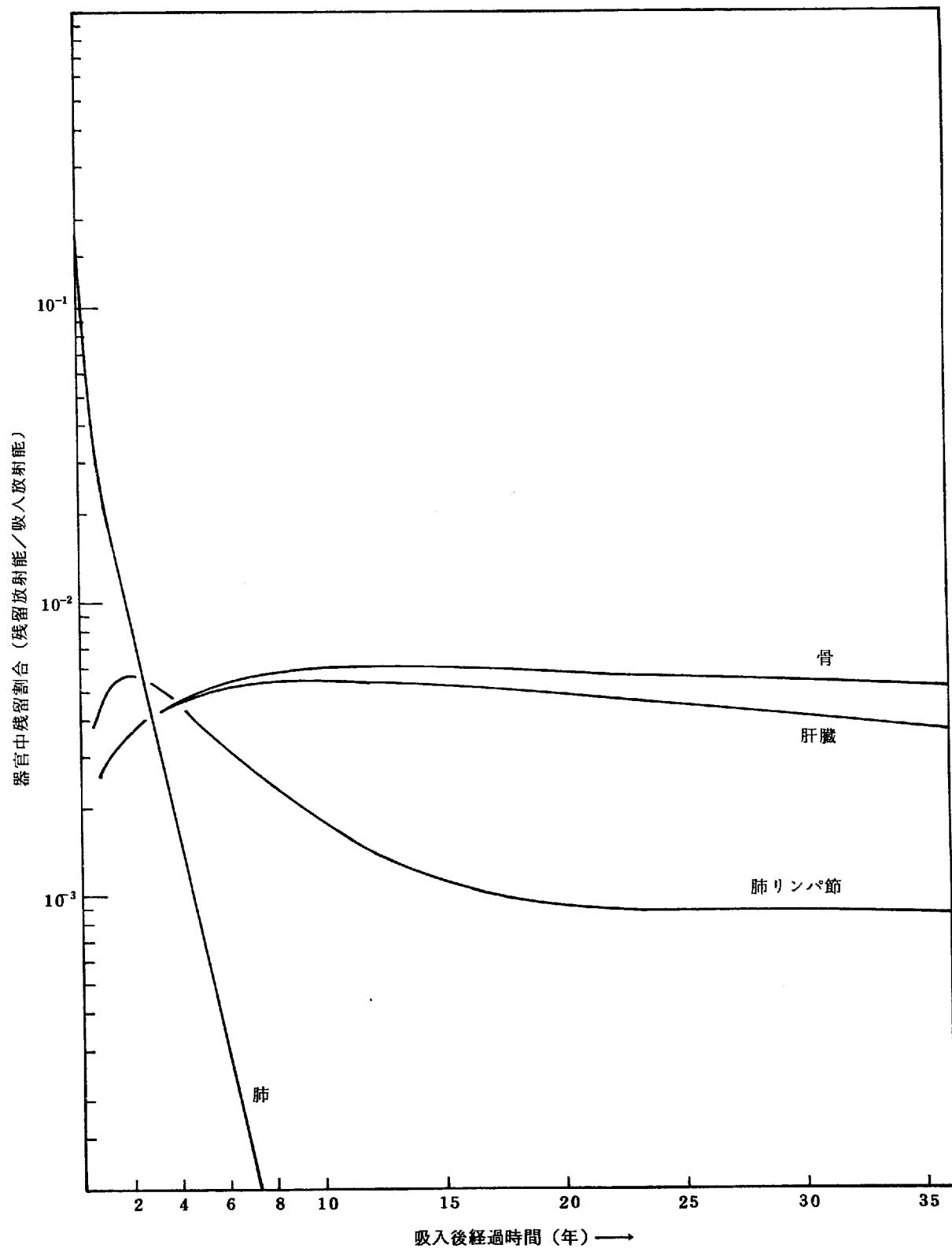


Parametoro - from ICRP pub 19

REGION	PATH	AKPLITUDE W Y	HALF W LIFE Y	COMMENTS
N - P	(a)	0.10 0.01	0.01 d 0.01 d	Clearance complete within few days - mainly to faeces
	(b)	0.50 0.99	0.4 d 0.4 d	
T - B	(c)	0.50 0.01	0.01 d 0.01 d	Clearance complete within few days - class Y mainly to faeces
	(d)	0.50 0.99	0.2 d 0.2 d	
PULM	(e)	0.15 0.05	50d 500 d	60% of clearance - slow
	(f)	0.40 0.40	1d 1 d	80% to faeces
	(g)	0.40 0.40	50d 500 d	
	(h)	0.05 0.15	50d 500 d	
R. L. N.	(i)	1.00 0.90	50d 1000 d	10% of class Y retained indefinitely - clearance to blood
BLOOD	(j)	0.45 0.45	Rapid clearance ≈ 1 d	Class W and class Y now both transportable
	(k)	0.45 0.45		
	(l)	0.10 0.10		
BONE (X)	(m)	?	100 yre	Excretion from Systemic
LIVER (V)	(n)	?	40 yre	Burden to urine governed by $T^{-0.74}$
SOFT TISSUE (S)	(o)	0.40 0.40	?	power law
	(p)	0.40 0.40	?	



図(8-1-2) PuO₂の吸入による器官中放射能の時間変化 - ICRP 肺モデル



図(8-1-3) PuO₂の吸入による器官中放射能の時間変化 - AEEW

8 - 2. Pub 23 AF Data

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY
Source in Bladder Contents

† Build-up factor method. ‡ Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. \odot Calculated by difference.

	Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100
Bladder wall		8.49E - 04	1.40E - 03	1.43E - 03	9.83E - 04	4.49E - 04	2.56E - 04
Stomach wall		2.83E - 18*	4.25E - 18†	1.20E - 11†	3.28E - 08†	4.53E - 07	1.05E - 07
Small intestine plus contents		1.52E - 10*	2.28E - 10†	1.76E - 07	5.11E - 06	1.24E - 05	1.22E - 05
Upper large intestine wall		1.71E - 10*	2.57E - 10†	1.02E - 07†	3.04E - 06	8.59E - 06	8.31E - 06
Lower large intestine wall		3.42E - 07*	5.12E - 07	7.80E - 06	3.51E - 05	4.16E - 05	3.01E - 05
Kidneys		1.52E - 19*	2.28E - 19†	3.95E - 12†	2.46E - 08†	4.05E - 07	9.98E - 07
Liver		2.61E - 19*	3.91E - 19†	2.37E - 12†	2.05E - 08	2.72E - 07	5.55E - 07
Lungs		4.25E - 29*	6.39E - 29†	5.55E - 17†	7.65E - 11†	1.31E - 08	8.89E - 08
“Other tissues” (suggested for muscle)		2.00E - 07 \odot	2.02E - 06 \odot	5.42E - 06 \odot	6.96E - 06 \odot	9.26E - 05	6.86E - 05
Ovaries		6.23E - 09*	9.35E - 09†	1.62E - 06†	2.78E - 05	3.58E - 05	2.82E - 05
Pancreas		3.63E - 22*	5.45E - 22†	2.11E - 13†	6.51E - 09†	2.92E - 07	7.24E - 07
Skeleton (suggested for total endostal cells)		2.56E - 11*	3.84E - 11 \odot	1.60E - 08	1.16E - 06	4.30E - 06	4.06E - 06
Red marrow		2.84E - 08*	4.25E - 08*	5.67E - 08	3.88E - 06	1.21E - 05	1.00E - 05
Skin		2.66E - 08*	3.99E - 08	3.75E - 07	1.70E - 06	2.26E - 06	2.12E - 06
Spleen		2.63E - 22*	3.94E - 22†	1.52E - 13†	4.78E - 09†	1.96E - 07	3.87E - 06
Testes		1.79E - 09*	2.69E - 09†	1.39E - 06	1.54E - 05	2.75E - 05	1.38E - 05
Thymus		5.91E - 37*	8.87E - 37†	1.32E - 20†	2.05E - 12†	2.06E - 09†	2.67E - 08†
Thyroid		6.20E - 25*	9.31E - 25*	1.24E - 24†	2.86E - 14†	1.55E - 10†	4.05E - 09†
Uterus		3.88E - 06*	5.83E - 06	4.28E - 05	1.09E - 04	1.03E - 04	6.21E - 05
Total body		1.43E - 05	1.43E - 05	1.42E - 05	1.31E - 05	1.00E - 05	7.28E - 06
	Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Bladder wall		2.47E - 04	2.56E - 04	2.22E - 04	2.07E - 04	1.91E - 04	1.51E - 04
Stomach wall		1.02E - 06	1.10E - 06	1.86E - 06	1.30E - 06	1.81E - 06	1.53E - 06
Small intestine plus contents		1.03E - 05	8.97E - 06	8.84E - 06	8.17E - 06	8.42E - 06	6.65E - 06
Upper large intestine wall		8.37E - 06	8.18E - 06	6.19E - 06	6.15E - 06	5.80E - 06	5.29E - 06
Lower large intestine wall		2.51E - 05	2.44E - 05	2.09E - 05	2.16E - 05	2.02E - 05	1.36E - 05
Kidneys		1.00E - 06	1.33E - 06	1.17E - 06	1.69E - 06	1.26E - 06	1.37E - 06
Liver		7.70E - 07	9.76E - 07	1.02E - 06	9.60E - 07	1.19E - 06	1.04E - 06
Lungs		9.33E - 08	1.65E - 07	2.83E - 07	3.07E - 07	3.31E - 07	4.61E - 07
“Other tissues” (suggested for muscle)		6.28E - 06 \odot	6.13E - 06 \odot	5.71E - 06 \odot	5.43E - 06 \odot	5.11E - 06 \odot	4.27E - 06 \odot
Ovaries		2.72E - 05	2.17E - 05	1.35E - 05	2.31E - 05	1.66E - 05	1.48E - 05
Pancreas		1.10E - 06	8.92E - 07	1.00E - 06	8.00E - 07	1.40E - 06	8.26E - 07
Skeleton (suggested for total endostal cells)		2.70E - 06	2.03E - 06	1.78E - 06	1.72E - 06	1.71E - 06	1.55E - 06
Red marrow		6.10E - 06	4.33E - 06	3.72E - 06	3.47E - 06	3.36E - 06	3.07E - 06
Skin		2.01E - 06	2.24E - 06	2.35E - 06	2.22E - 06	2.12E - 06	1.89E - 06
Spleen		5.29E - 07	7.80E - 07	8.59E - 07	6.34E - 07	1.12E - 06	4.63E - 07
Testes		1.59E - 05	1.75E - 05	1.57E - 05	1.28E - 05	1.40E - 05	1.21E - 05
Thymus		6.22E - 08†	1.10E - 07†	1.54E - 07†	1.78E - 07†	1.91E - 07†	2.10E - 07†
Thyroid		1.33E - 08†	3.27E - 08†	5.68E - 08†	7.33E - 08†	8.55E - 08†	1.05E - 07†
Uterus		5.51E - 05	5.11E - 05	4.68E - 05	3.08E - 05	4.01E - 05	3.30E - 05
Total body		6.58E - 06	6.44E - 06	5.98E - 06	5.63E - 06	5.35E - 06	4.41E - 06

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
Source in Stomach Contents
† Build-up factor method. © Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. © Calculated by difference.

Target	Energy (MeV)	0.010				
		0.015	0.020	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	1.61E - 18*	2.41E - 18†	8.64E - 12†	2.82E - 08†	5.32E - 07	1.17E - 06
Stomach wall	3.21E - 04	7.61E - 04	8.96E - 04	6.87E - 04	3.28E - 04	1.88E - 04
Small intestine plus contents	1.99E - 07*	2.99E - 07	1.23E - 06	6.72E - 06	1.22E - 05	1.08E - 05
Upper large intestine wall	8.09E - 07*	1.21E - 06	5.67E - 06	1.62E - 05	1.90E - 05	1.40E - 05
Lower large intestine wall	2.56E - 09†	2.80E - 07	1.83E - 06	4.78E - 06	4.44E - 06	4.44E - 06
Kidneys	5.74E - 10*	5.74E - 10†	4.17E - 07	8.18E - 06	1.65E - 05	1.36E - 05
Liver	2.14E - 07*	3.22E - 07*	4.29E - 07	3.99E - 06	8.27E - 06	8.06E - 06
Lungs	1.76E - 07*	2.64E - 07	2.60E - 06	7.91E - 06	6.91E - 06	6.92E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.98E - 08©	1.15E - 06©	3.92E - 06©	7.64E - 06©	7.31E - 06©	5.37E - 06©
Ovaries	1.99E - 14*	2.98E - 14†	1.05E - 09†	2.89E - 07†	2.36E - 06†	2.13E - 06
Pancreas	8.30E - 06*	1.24E - 05	6.95E - 05	1.40E - 04	1.12E - 04	7.10E - 05
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.86E - 08*	5.79E - 08	6.31E - 07	3.05E - 06	5.52E - 06	4.00E - 06
Red marrow	4.00E - 08*	6.00E - 08	6.67E - 07	3.65E - 06	8.53E - 06	7.12E - 06
Skin	1.38E - 08*	2.07E - 08	3.62E - 07	1.53E - 06	1.94E - 06	1.66E - 06
Spleen	1.12E - 07*	1.69E - 07†	1.06E - 05	5.19E - 05	5.98E - 05	3.96E - 05
Testes	3.42E - 26*	5.13E - 26†	1.89E - 15†	5.20E - 10†	5.50E - 08†	1.58E - 07
Thymus	2.19E - 18*	3.29E - 18†	1.18E - 11†	3.41E - 06†	1.58E - 06	1.07E - 06
Thyroid	5.67E - 26*	8.51E - 26†	2.27E - 15†	5.70E - 10†	5.82E - 08†	2.59E - 07
Uterus	7.31E - 16*	1.13E - 15†	2.81E - 10†	1.90E - 07†	1.45E - 06	2.90E - 06
Total body	1.43E - 05	1.42E - 05	1.42E - 05	1.31E - 05	9.75E - 05	6.87E - 06
Target	Energy (MeV)	0.200				
		0.200	0.300	1.000	1.500	2.000
Bladder wall	7.91E - 07	1.58E - 06	1.65E - 06	1.48E - 06	1.03E - 06	1.44E - 06
Stomach wall	1.78E - 04	1.79E - 04	1.65E - 04	1.48E - 04	1.41E - 04	1.15E - 04
Small intestine plus contents	9.27E - 06	9.08E - 06	8.16E - 06	7.37E - 06	7.66E - 06	6.38E - 06
Upper large intestine wall	1.26E - 05	1.13E - 05	9.62E - 06	1.17E - 05	8.40E - 06	7.91E - 06
Lower large intestine wall	4.63E - 06	4.35E - 06	4.53E - 06	4.51E - 06	3.98E - 06	2.76E - 06
Kidneys	1.26E - 05	1.13E - 05	1.06E - 05	9.84E - 06	8.97E - 06	7.42E - 06
Liver	7.00E - 06	7.02E - 06	6.34E - 06	6.15E - 06	6.20E - 06	4.89E - 06
Lungs	5.97E - 06	6.40E - 06	5.72E - 06	5.51E - 06	4.91E - 06	4.28E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.96E - 06©	4.84E - 06©	4.60E - 06©	4.38E - 06©	4.10E - 06©	3.45E - 06©
Ovaries	1.53E - 06	1.70E - 06	5.09E - 06	3.02E - 06†	2.86E - 06†	2.42E - 06†
Pancreas	6.37E - 05	6.02E - 05	5.23E - 05	5.06E - 05	4.40E - 05	3.39E - 05
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.59E - 06	2.08E - 06	1.89E - 06	1.79E - 06	1.73E - 06	1.61E - 06
Red marrow	4.64E - 06	3.61E - 06	3.18E - 06	2.90E - 06	2.78E - 06	2.66E - 06
Skin	1.67E - 06	2.04E - 06	2.07E - 06	1.96E - 06	2.09E - 06	1.70E - 06
Spleen	3.56E - 05	3.26E - 05	3.04E - 05	2.80E - 05	2.49E - 05	1.84E - 05
Testes	2.41E - 07	8.06E - 08	5.72E - 07†	5.91E - 07†	5.95E - 07†	5.61E - 07†
Thymus	8.91E - 07	7.81E - 07	2.87E - 06	2.26E - 06	1.65E - 06	1.42E - 06
Thyroid	4.35E - 07†	5.26E - 07†	5.82E - 07†	5.96E - 07†	6.02E - 07†	5.67E - 07†
Uterus	2.97E - 06	3.08E - 06	3.22E - 06	3.28E - 06	2.54E - 06	4.00E - 06
Total body	6.21E - 06	6.11E - 06	5.74E - 06	5.39E - 06	5.07E - 06	4.22E - 06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)

† Build-up factor method. ⊕ Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. ⊙ Calculated by difference.

Source in Small Intestine Plus Wall

Target	Energy (MeV)				
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050
Bladder wall	4.21E - 10*	6.31E - 10†	1.74E - 07†	5.86E - 06	1.02E - 05
Stomach wall	5.69E - 07	1.80E - 06	8.17E - 06	1.42E - 05	5.77E - 05
Small intestine plus contents	7.40E - 04	6.61E - 04	5.60E - 04	3.71E - 04	1.42E - 04
Upper large intestine wall	4.50E - 04	4.48E - 04	3.95E - 04	2.74E - 04	1.42E - 04
Lower large intestine wall	2.81E - 05	5.12E - 05	6.84E - 05	6.33E - 05	4.28E - 05
Kidneys	4.94E - 09*	7.41E - 09†	8.43E - 07	6.92E - 06	1.28E - 05
Liver	7.60E - 08	3.52E - 07	1.33E - 06	7.67E - 06	7.17E - 06
Lungs	4.44E - 18*	6.67E - 18†	9.65E - 12†	6.31E - 08	4.61E - 07
"Other tissues" (suggested for muscle)	6.96E - 07†	2.14E - 06	4.24E - 06	7.31E - 06	5.95E - 06
Ovaries	1.38E - 05*	2.01E - 05	4.43E - 05	6.26E - 05	6.51E - 05
Pancreas	2.64E - 11*	3.96E - 11†	4.11E - 08†	2.45E - 06	8.13E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.15E - 07	7.10E - 07	1.79E - 06	5.23E - 06	5.61E - 06
Red marrow	9.04E - 07	2.97E - 06	7.39E - 06	2.08E - 05	3.06E - 05
Skin	5.31E - 08*	7.96E - 08*	1.06E - 07	7.67E - 07	1.49E - 06
Spleen	2.12E - 10*	3.18E - 10†	6.00E - 08†	2.67E - 06	5.11E - 06
Testes	2.76E - 18*	4.13E - 18†	1.68E - 11†	4.80E - 08†	4.88E - 07
Thymus	1.05E - 26*	1.38E - 26†	1.07E - 15†	4.01E - 10†	4.76E - 08†
Thyroid	4.34E - 35*	6.50E - 35†	1.11E - 19†	5.17E - 12†	3.48E - 09†
Uterus	1.36E - 06*	2.03E - 06	1.97E - 05	5.49E - 05	3.84E - 05
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.43E - 05	1.37E - 05	1.08E - 05
Target	Energy (MeV)				
	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000
Bladder wall	9.28E - 06	1.18E - 05	6.79E - 06	1.07E - 05	7.97E - 06
Stomach wall	1.31E - 05	1.16E - 05	1.14E - 05	1.08E - 05	9.88E - 06
Small intestine plus contents	1.07E - 04	1.07E - 04	9.57E - 05	9.07E - 05	8.23E - 05
Upper large intestine wall	8.23E - 05	7.83E - 05	7.21E - 05	6.69E - 05	6.31E - 05
Lower large intestine wall	2.52E - 05	2.32E - 05	2.19E - 05	2.03E - 05	2.05E - 05
Kidneys	1.08E - 05	1.09E - 05	1.01E - 05	8.67E - 06	8.59E - 06
Liver	6.64E - 06	6.20E - 06	6.11E - 06	5.67E - 06	5.48E - 06
Lungs	9.02E - 07	1.16E - 06	1.17E - 06	1.07E - 06	1.17E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	5.51E - 06*	5.33E - 06	5.00E - 06	4.73E - 06	4.43E - 06
Ovaries	3.75E - 05	3.00E - 05	3.39E - 05	2.31E - 05	2.13E - 05
Pancreas	7.30E - 06	7.17E - 06	6.55E - 06	5.08E - 06	5.74E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.54E - 06	2.69E - 06	2.53E - 06	2.14E - 06	2.26E - 06
Red marrow	1.16E - 05	8.57E - 06	7.78E - 06	7.07E - 06	6.77E - 06
Skin	1.63E - 06	1.83E - 06	1.91E - 06	1.97E - 06	1.75E - 06
Spleen	5.55E - 06	5.41E - 06	5.03E - 06	5.08E - 06	5.01E - 06†
Testes	1.28E - 06	1.24E - 06	1.79E - 06	1.92E - 06	2.12E - 06
Thymus	3.89E - 07†	4.81E - 07†	5.38E - 07†	5.54E - 07†	5.62E - 07†
Thyroid	8.31E - 08†	1.38E - 07†	1.85E - 07†	2.10E - 07†	2.26E - 07†
Uterus	3.31E - 05	2.99E - 05	2.71E - 05	2.42E - 05	2.21E - 05
Total body	7.02E - 06	6.74E - 06	6.27E - 06	5.92E - 06	5.51E - 06

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. ⊙ Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy.
 Source in *Upper Large Intestine Content*. ^② Calculated by difference.

Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	3.32E - 10*	4.97E - 10†	1.25E - 07†	3.87E - 06	7.40E - 06	8.92E - 06
Stomach wall	2.11E - 06*	3.16E - 06	1.14E - 05	2.22E - 05	2.05E - 05	1.49E - 05
Small intestine plus contents	5.46E - 06	5.06E - 05	1.19E - 04	2.20E - 04	1.01E - 04	6.49E - 05
Upper large intestine wall	3.63E - 04	8.01E - 04	8.62E - 04	5.57E - 04	2.61E - 04	1.52E - 04
Lower large intestine wall	2.47E - 06*	3.70E - 06	1.14E - 05	1.81E - 05	1.51E - 05	1.30E - 05
Kidneys	3.18E - 10*	4.77E - 10†	3.55E - 07	5.76E - 06	1.25E - 05	1.14E - 05
Liver	1.58E - 07*	2.37E - 07	1.93E - 06	7.47E - 06	1.18E - 05	1.00E - 05
Lungs	3.97E - 18*	5.95E - 18†	1.18E - 11†	7.16E - 08	6.14E - 07	9.96E - 07
"Other tissues" (suggested for muscle)	7.42E - 08 ^②	8.77E - 07 ^②	3.19E - 06 ^②	6.95E - 06 ^②	7.28E - 06 ^②	5.74E - 06 ^②
Ovaries	2.01E - 05*	3.02E - 05	5.33E - 05	7.41E - 05	5.59E - 05	4.53E - 05
Pancreas	2.25E - 11*	3.38E - 11†	5.01E - 08†	2.71E - 06	8.10E - 06	9.01E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	1.64E - 07*	2.47E - 07	1.37E - 06	4.87E - 06	7.35E - 06	5.08E - 06
Red marrow	6.91E - 07*	1.04E - 06	5.73E - 06	1.93E - 05	2.62E - 05	1.66E - 05
Skin	8.49E - 10*	1.34E - 09†	9.59E - 08†	9.69E - 07	1.64E - 06	1.52E - 06
Spleen	5.77E - 11*	8.66E - 11†	5.09E - 08†	1.57E - 06	6.08E - 06	5.82E - 06
Testes	1.23E - 17*	1.85E - 17†	2.55E - 11†	4.81E - 08†	5.08E - 07	9.33E - 07
Thymus	1.34E - 26*	2.02E - 26†	1.58E - 15†	5.43E - 10†	5.78E - 08†	3.51E - 07
Thyroid	5.27E - 35*	7.90E - 35†	6.59E - 19†	6.86E - 12†	4.15E - 09†	4.30E - 08†
Uterus	4.28E - 09*	6.41E - 09†	1.21E - 06	1.39E - 05	2.81E - 05	2.27E - 05
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.43E - 05	1.35E - 05	1.05E - 05	7.61E - 06
Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	7.67E - 06	6.53E - 06	7.06E - 06	4.83E - 06	7.28E - 06	4.26E - 06
Stomach wall	1.32E - 05	1.24E - 05	1.16E - 05	9.48E - 06	1.01E - 05	7.76E - 06
Small intestine plus contents	5.39E - 05	5.61E - 05	5.05E - 05	4.54E - 05	4.21E - 05	3.29E - 05
Upper large intestine wall	1.47E - 04	1.47E - 04	1.39E - 04	1.24E - 04	1.18E - 04	9.33E - 05
Lower large intestine wall	1.06E - 05	1.03E - 05	1.08E - 05	8.63E - 06	8.14E - 06	5.99E - 06
Kidneys	9.84E - 06	9.32E - 06	9.40E - 06	8.59E - 06	7.31E - 06	6.25E - 06
Liver	9.31E - 06	8.45E - 06	8.11E - 06	7.67E - 06	7.24E - 06	6.32E - 06
Lungs	9.83E - 07	1.17E - 06	1.38E - 06	1.43E - 06	1.28E - 06	1.13E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	5.22E - 06 ^②	5.10E - 06 ^②	4.80E - 06 ^②	4.55E - 06 ^②	4.36E - 06 ^②	3.60E - 06 ^②
Ovaries	4.10E - 05	4.39E - 05	2.31E - 05	1.87E - 05	1.33E - 05	2.08E - 05
Pancreas	8.74E - 06	6.11E - 06	6.85E - 06	6.31E - 06	7.00E - 06	7.77E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.18E - 06	2.49E - 06	2.21E - 06	2.13E - 06	2.04E - 06	1.75E - 06
Red marrow	9.96E - 06	7.45E - 06	6.40E - 06	6.05E - 06	5.86E - 06	4.85E - 06
Skin	1.63E - 06	1.92E - 06	1.87E - 06	1.86E - 06	1.82E - 06	1.76E - 06
Spleen	5.01E - 06	4.21E - 06	4.55E - 06	4.73E - 06	3.66E - 06	3.79E - 06
Testes	1.15E - 06	1.78E - 06	1.92E - 06	1.30E - 06	1.74E - 06†	1.51E - 06†
Thymus	4.31E - 07†	5.27E - 07†	5.80E - 07†	5.94E - 07†	6.01E - 07†	5.66E - 07†
Thyroid	9.11E - 08†	1.48E - 07†	1.95E - 07†	2.21E - 07†	2.37E - 07†	2.49E - 07†
Uterus	1.68E - 05	1.53E - 05	1.53E - 05	1.55E - 05	1.44E - 05	1.16E - 05
Total body	6.79E - 06	6.57E - 06	6.17E - 06	5.77E - 06	5.46E - 06	4.50E - 06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. (‡) Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. (§) Calculated by difference.
Source in Liver Large Intestine Contents

Target	0.010	0.015	0.020	Energy (MeV)	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	1.38E - 07*	2.08E - 07†	6.01E - 06	2.70E - 05	3.34E - 05	2.80E - 05	
Stomach wall	1.25E - 08*	1.88E - 08†	8.62E - 07	5.03E - 06	7.97E - 06	6.96E - 06	
Small intestine plus contents	2.42E - 06	2.78E - 05	6.14E - 05	7.81E - 05	5.42E - 05	3.65E - 05	
Upper large intestine wall	1.03E - 05	2.22E - 05	3.16E - 05	3.07E - 05	2.21E - 05	1.61E - 05	
Lower large intestine wall	5.53E - 04	1.13E - 03	1.16E - 03	7.02E - 04	2.97E - 04	1.70E - 04	
Kidneys	4.24E - 12*	6.36E - 12†	1.31E - 08†	8.91E - 07	2.59E - 06	3.12E - 06	
Liver	2.92E - 17*	4.38E - 17†	2.34E - 08†	3.25E - 08	4.80E - 07	8.95E - 07	
Lungs	2.61E - 17*	3.92E - 20†	4.15E - 13†	2.91E - 09†	1.15E - 07	2.87E - 07	
"Other tissues" (suggested for muscle)	6.79E - 08‡	1.35E - 06	4.12E - 06‡	7.92E - 06‡	8.26E - 06§	6.51E - 06§	
Ovaries	4.10E - 05*	6.16E - 05	1.62E - 04	1.77E - 04	1.06E - 04	6.25E - 05	
Pancreas	1.71E - 14*	2.57E - 14†	1.18E - 09†	5.69E - 07	1.69E - 06	3.05E - 06	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	4.30E - 08	1.36E - 06	5.69E - 06	1.31E - 05	1.30E - 05	7.25E - 06	
Red marrow	1.81E - 07	5.70E - 06	2.37E - 05	5.24E - 05	4.68E - 05	2.28E - 05	
Skin	8.10E - 08	2.36E - 07	4.75E - 07	1.14E - 06	1.88E - 06	1.79E - 06	
Spleen	1.52E - 12*	2.29E - 12†	7.72E - 09†	5.72E - 07	3.20E - 06	3.22E - 06	
Testes	4.67E - 10*	7.01E - 10†	2.21E - 07†	4.41E - 06	8.39E - 06	6.21E - 06	
Thymus	1.02E - 29*	1.53E - 29†	2.27E - 17†	4.46E - 11†	1.03E - 08†	7.60E - 08†	
Thyroid	1.05E - 37*	1.58E - 37†	7.66E - 21†	7.26E - 14†	8.36E - 10†	1.26E - 08†	
Uterus	5.13E - 09*	7.69E - 09†	2.33E - 06	2.25E - 05	3.65E - 05	2.79E - 05	
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.43E - 05	1.37E - 05	1.08E - 05	7.62E - 06	
Target	0.200	0.500	1.000	Energy (MeV)	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	2.34E - 05	1.94E - 05	1.62E - 05	2.02E - 05	1.67E - 05	1.04E - 05	
Stomach wall	6.34E - 06	6.23E - 06	4.98E - 06	4.73E - 06	5.49E - 06	4.92E - 06	
Small intestine plus contents	3.32E - 05	3.07E - 05	2.84E - 05	2.64E - 05	2.51E - 05	1.99E - 05	
Upper large intestine wall	1.50E - 05	1.45E - 05	1.25E - 05	1.35E - 05	1.08E - 05	9.87E - 06	
Lower large intestine wall	1.74E - 04	1.77E - 04	1.62E - 04	1.52E - 04	1.39E - 04	1.08E - 04	
Kidneys	3.47E - 06	2.84E - 06	3.08E - 06	2.98E - 06	3.54E - 06	2.50E - 06	
Liver	1.02E - 06	1.19E - 06	1.29E - 06	1.30E - 06	1.24E - 06	1.18E - 06	
Lungs	3.14E - 07	3.49E - 07	5.49E - 07	5.49E - 07	7.81E - 07	5.78E - 07	
"Other tissues" (suggested for muscle)	6.01E - 06‡	5.84E - 06‡	5.48E - 06‡	5.18E - 06‡	4.89E - 06§	4.09E - 06§	
Ovaries	7.13E - 05	5.42E - 05	5.50E - 05	5.03E - 05	4.61E - 05	3.51E - 05	
Pancreas	2.49E - 06	2.58E - 06	2.41E - 06	2.00E - 06	2.48E - 06	1.45E - 05	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	4.49E - 06	3.59E - 06	3.25E - 06	3.02E - 06	2.97E - 06	2.43E - 06	
Red marrow	1.36E - 05	1.07E - 05	9.65E - 06	8.77E - 06	8.46E - 06	6.82E - 06	
Skin	1.89E - 06	2.03E - 06	2.05E - 06	2.21E - 06	2.03E - 06	1.85E - 06	
Spleen	2.76E - 06	3.24E - 06	3.56E - 06	3.03E - 06	3.20E - 06	2.23E - 06	
Testes	7.25E - 06	7.14E - 06	4.86E - 06	4.82E - 06	6.10E - 06	3.92E - 06	
Thymus	1.39E - 07†	2.01E - 07†	2.51E - 07†	2.74E - 07†	2.89E - 07†	2.93E - 07†	
Thyroid	3.19E - 08†	6.20E - 08†	9.34E - 08†	1.11E - 07†	1.27E - 07†	1.45E - 07†	
Uterus	2.54E - 05	1.94E - 05	1.79E - 05	1.78E - 05	1.52E - 05	1.29E - 05	
Total body	6.77E - 06	6.84E - 06	6.10E - 06	5.76E - 06	5.10E - 06	4.14E - 06	

STRUCTURE ABSORBED FRACTION OF PHOTON RADIATION (cont.)
 † Build-up factor method. □ Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. △ Calculated by difference.
Source in Kiloevrys

Target	Energy (MeV)				
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.100
Bladder wall	4.59E - 19*	6.88E - 19†	5.48E - 12†	2.72E - 08†	3.14E - 07
Stomach wall	1.35E - 09*	2.01E - 09†	5.45E - 07	7.99E - 06	1.59E - 05
Small intestine plus contents	6.51E - 09*	9.77E - 09†	9.63E - 07	6.48E - 06	1.23E - 05
Upper large intestine wall	7.46E - 10*	1.12E - 09†	3.70E - 07	6.25E - 06	1.17E - 05
Lower large intestine wall	8.29E - 12*	1.24E - 11†	1.16E - 03†	6.63E - 07	1.81E - 06
Kidneys	3.28E - 03	2.74E - 03	2.04E - 03	1.01E - 03	3.93E - 04
Liver	4.43E - 07*	6.65E - 07	4.68E - 06	1.54E - 05	1.95E - 05
Lungs	3.57E - 08*	5.36E - 08*	7.15E - 08	1.18E - 06	3.27E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	1.42E - 06	4.42E - 06	7.39E - 06	8.82E - 06	5.12E - 06
Ovaries	3.68E - 14*	5.51E - 14†	1.76E - 09†	4.81E - 07†	3.71E - 06
Pancreas	2.34E - 08*	3.51E - 08†	4.45E - 06	2.44E - 05	3.22E - 05
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.24E - 07*	3.36E - 07	2.18E - 06	7.54E - 06	1.03E - 05
Red marrow	5.99E - 07*	8.99E - 07	5.72E - 06	2.01E - 05	2.76E - 05
Skin	1.66E - 07*	2.49E - 07	1.16E - 06	2.30E - 06	1.93E - 06
Spleen	6.19E - 06*	9.28E - 06	3.61E - 05	6.69E - 05	5.32E - 05
Testes	4.39E - 27*	6.58E - 27†	8.52E - 16†	4.33E - 10†	5.25E - 08†
Thymus	7.07E - 22*	1.06E - 21†	2.52E - 13†	6.17E - 09†	3.51E - 07
Thyroid	8.15E - 30*	1.22E - 29†	3.87E - 17†	2.07E - 08†	1.40E - 07†
Uterus	1.46E - 15*	2.19E - 15†	4.32E - 10†	3.26E - 07	1.85E - 06
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.40E - 05	1.23E - 05	9.01E - 06
Target	Energy (MeV)				
	0.200	0.500	1.000	1.500	4.000
Bladder wall	1.12E - 06	1.32E - 06	1.59E - 06	1.47E - 06	1.13E - 06
Stomach wall	1.20E - 05	1.16E - 05	1.07E - 05	1.07E - 06	1.92E - 06
Small intestine plus contents	1.02E - 05	9.42E - 06	9.02E - 06	8.91E - 06	8.14E - 06
Upper large intestine wall	1.03E - 05	9.90E - 06	9.20E - 06	9.23E - 06	6.66E - 06
Lower large intestine wall	3.05E - 06	3.03E - 06	2.84E - 06	3.39E - 06	6.25E - 06
Kidneys	2.39E - 04	2.52E - 04	2.26E - 04	2.14E - 04	2.52E - 06
Liver	1.36E - 05	1.38E - 05	1.22E - 05	1.15E - 05	1.63E - 04
Lungs	2.99E - 06	3.38E - 06	3.30E - 06	2.96E - 06	2.80E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.95E - 06	4.93E - 06	4.71E - 06	4.47E - 06	3.55E - 06
Ovaries	4.44E - 06	3.96E - 06	5.43E - 06	3.81E - 06	3.59E - 06†
Pancreas	2.28E - 05	2.25E - 05	2.24E - 05	1.96E - 05	1.50E - 05
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	4.06E - 06	3.39E - 06	3.10E - 06	2.99E - 06	2.76E - 06
Red marrow	1.05E - 05	8.59E - 06	7.77E - 06	7.43E - 06	6.81E - 06
Skin	2.06E - 06	2.29E - 06	2.24E - 06	2.13E - 06	2.15E - 06
Spleen	3.11E - 05	2.85E - 05	2.70E - 05	2.41E - 05	2.20E - 05
Testes	4.73E - 07†	5.18E - 07†	5.77E - 07†	5.93E - 07†	5.98E - 07†
Thymus	6.92E - 07	1.41E - 06	2.72E - 07	1.13E - 06†	4.67E - 07
Thyroid	2.42E - 07†	3.27E - 07†	3.86E - 07†	4.11E - 07†	4.24E - 07†
Uterus	3.91E - 06	2.87E - 06	2.77E - 06	3.66E - 06	1.95E - 06
Total body	5.90E - 06	5.84E - 06	5.48E - 06	5.21E - 06	4.87E - 06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 Source in Liver Energy (MeV)

† Build-up factor method. ③ Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. + Calculated by difference.

Target	0.010	0.015	0.020	Energy (MeV)	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	5.75E - 19*	8.62E - 19†	3.52E - 12†	1.33E - 08+	2.04E - 07	6.16E - 07	
Stomach wall	3.85E - 07*	5.78E - 07*	7.71E - 07	4.08E - 06	8.90E - 06	7.07E - 06	
Small intestine plus contents	1.62E - 07*	2.43E - 07	7.70E - 07	7.95E - 06	6.39E - 06	6.32E - 06	
Upper large intestine wall	1.89E - 07*	2.84E - 07	1.71E - 06	8.56E - 06	1.18E - 05	1.01E - 05	
Lower large intestine wall	2.73E - 17*	4.10E - 17†	2.02E - 11†	2.65E - 08+	1.34E - 07	8.76E - 07	
Kidneys	8.39E - 07*	1.26E - 06	4.50E - 06	1.57E - 05	1.95E - 05	1.58E - 05	
Liver	5.36E - 04	4.96E - 04	4.34E - 04	2.97E - 04	1.52E - 04	9.14E - 05	
Lungs	7.76E - 08	3.19E - 06	9.46E - 06	1.64E - 05	1.45E - 05	9.92E - 06	
"Other tissues" (suggested for muscle)	6.16E - 07	1.92E - 06	3.55E - 06	5.52E - 06	5.25E - 06	4.09E - 06	
Ovaries	9.82E - 15*	1.47E - 14†	5.55E - 10†	1.63E - 07†	1.51E - 06†	1.63E - 06	
Pancreas	1.47E - 06*	2.21E - 06*	2.94E - 06	1.67E - 05	2.18E - 05	1.77E - 05	
Skeleton (suggested for total chondrostelial cells)	5.83E - 08	5.37E - 07	2.08E - 06	5.80E - 06	7.80E - 06	4.93E - 06	
Red marrow	6.03E - 08	5.27E - 07	1.96E - 06	5.68E - 06	9.33E - 06	7.14E - 06	
Skin	5.76E - 08*	8.64E - 08	4.77E - 07	1.64E - 06	1.89E - 06	1.81E - 06	
Spleen	7.27E - 13*	1.09E - 12†	4.57E - 09†	8.07E - 07	2.93E - 06	3.56E - 06	
Testes	2.17E - 26*	3.26E - 26†	9.37E - 16†	3.77E - 10†	3.42E - 08†	1.90E - 07†	
Thymus	6.31E - 16*	9.47E - 16†	1.39E - 10†	1.20E - 07†	1.67E - 06	2.50E - 06	
Thyroid	1.29E - 24*	1.94E - 24†	1.12E - 14†	1.21E - 09†	8.81E - 08†	3.80E - 07†	
Uterus	1.75E - 16*	2.62E - 16†	8.22E - 11†	8.39E - 08†	9.07E - 07	1.51E - 06	
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.42E - 05	1.29E - 05	9.48E - 06	6.54E - 06	
Target	0.200	0.500	1.000	Energy (MeV)	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	5.60E - 07	1.21E - 06	5.80E - 07	8.48E - 07	9.02E - 07	9.93E - 07	
Stomach wall	6.96E - 06	6.50E - 06	6.44E - 06	6.00E - 06	6.11E - 06	5.17E - 06	
Small intestine plus contents	6.01E - 06	5.44E - 06	5.16E - 06	5.07E - 06	4.64E - 06	4.16E - 06	
Upper large intestine wall	8.71E - 06	8.84E - 06	7.71E - 06	6.52E - 06	6.96E - 06	5.21E - 06	
Lower large intestine wall	8.55E - 07	1.12E - 06	8.88E - 07	1.24E - 06	9.53E - 07	1.40E - 06	
Kidneys	1.36E - 05	1.29E - 05	1.18E - 05	1.14E - 05	1.10E - 05	8.21E - 06	
Liver	8.83E - 05	8.85E - 05	8.07E - 05	7.48E - 05	6.86E - 05	6.58E - 05	
Lungs	8.84E - 06	8.23E - 06	7.90E - 06	7.72E - 06	6.96E - 06	5.60E - 06	
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.82E - 06	3.85E - 06	3.69E - 06	3.46E - 06	3.30E - 06	2.80E - 06	
Ovaries	1.80E - 06	6.53E - 07	2.49E - 06†	3.44E - 06	2.22E - 06†	1.92E - 06†	
Pancreas	1.35E - 05	1.66E - 05	1.36E - 05	1.21E - 05	9.99E - 06	8.75E - 06	
Skeleton (suggested for total chondrostelial cells)	3.17E - 06	2.51E - 06	2.30E - 06	2.26E - 06	2.20E - 06	1.85E - 06	
Red marrow	4.64E - 06	3.72E - 06	3.21E - 06	3.26E - 06	3.17E - 06	2.62E - 06	
Skin	1.89E - 06	2.08E - 06	2.08E - 06	2.02E - 06	2.10E - 06	1.75E - 06	
Spleen	3.34E - 06	3.44E - 06	3.81E - 06	3.95E - 06	3.14E - 06	2.14E - 06	
Testes	3.05E - 07†	3.92E - 07†	8.76E - 07	4.70E - 07†	4.79E - 07†	4.62E - 07†	
Thymus	2.27E - 06	4.64E - 06	2.54E - 06	2.17E - 06	2.65E - 06	3.92E - 06	
Thyroid	8.23E - 07	6.32E - 07†	6.81E - 07†	6.87E - 07†	6.90E - 07†	6.40E - 07†	
Uterus	1.30E - 06	1.52E - 06	1.28E - 06	2.07E - 06	1.81E - 06	1.38E - 06	
Total body	5.94E - 06	5.86E - 06	5.49E - 06	5.16E - 06	4.86E - 06	4.06E - 06	

[†] Build-up factor method. [‡] Adjustment on density or composition. ^{*} Extrapolation from higher energy. [○] Calculated by difference.

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)

Target	Source in <i>Lungs</i>					Energy (MeV)
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	
Bladder wall	1.33E-28*	5.00E-28○	2.65E-16○	2.75E-10○	5.21E-08○	1.05E-07†
Stomach wall	5.37E-07*	8.05E-07	3.45E-06	8.04E-06	9.44E-06	7.19E-06
Small intestine plus contents	1.65E-17*	4.67E-17○	2.92E-11○	7.70E-08	7.11E-07	8.35E-07
Upper large intestine wall	2.51E-17*	3.80E-17○	4.52E-11○	7.29E-08	5.12E-07	8.35E-07
Lower large intestine wall	6.26E-20*	9.39E-20○	1.13E-12○	8.32E-09○	8.32E-08	1.78E-07
Kidneys	6.42E-11*	9.64E-11○	5.81E-08○	1.24E-06	2.97E-06	3.25E-06
Liver	7.16E-08	2.28E-06	7.25E-06	1.40E-05	9.52E-05	9.52E-06
Lungs	8.17E-04	6.58E-04	4.71E-04	2.30E-04	8.99E-05	5.05E-05
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.89E-06○	6.82E-06○	9.44E-06○	1.00E-05○	4.87E-06○	4.87E-06○
Ovaries	5.25E-24*	7.88E-24○	3.48E-14○	3.13E-09○	2.30E-07○	3.02E-07†
Pancreas	8.53E-09*	1.28E-08○	6.38E-07○	9.00E-06○	1.27E-05○	1.04E-05○
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.71E-08	7.11E-07	3.56E-06	1.04E-05	1.20E-05	6.56E-06
Red marrow	2.81E-08	7.53E-07	3.97E-06	1.20E-05	1.46E-05	8.36E-06
Skin	4.70E-08*	7.05E-08	6.44E-07	1.94E-06	2.19E-06	1.92E-06
Spleen	6.63E-07*	9.95E-07	4.70E-06	1.27E-05	1.10E-05	9.05E-06
Testes	8.51E-36*	1.28E-35○	5.76E-30○	5.56E-12○	5.03E-09○	1.92E-08†
Thymus	2.22E-07*	3.33E-07○	3.35E-06	1.78E-05	2.09E-05	1.79E-05
Thyroid	4.05E-12*	6.07E-12○	2.29E-08○	8.09E-07○	2.30E-06	3.85E-06
Uterus	3.81E-25*	5.72E-25○	1.11E-14○	2.07E-09○	1.86E-07○	2.80E-07
Total body	1.43E-05	1.43E-05	1.41E-05	1.26E-05	8.78E-06	5.70E-06
Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	1.83E-07†	2.55E-07†	3.09E-07†	3.32E-07†	3.43E-07†	3.43E-07†
Stomach wall	6.61E-06	6.32E-06	6.34E-06	6.14E-06	6.45E-06	3.05E-06
Small intestine plus contents	7.14E-07	9.57E-07	1.08E-06	1.04E-06	1.16E-06	1.11E-06
Upper large intestine wall	8.57E-07	1.32E-06	1.38E-06	1.45E-06	1.37E-06	1.75E-06
Lower large intestine wall	4.05E-07	2.69E-07	3.21E-07	2.13E-07	2.34E-07	2.69E-07
Kidneys	3.14E-06	3.61E-06	3.22E-06	3.61E-06	2.31E-06	2.82E-06
Liver	8.81E-06	8.18E-06	7.72E-06	7.20E-06	6.53E-06	5.78E-06
Lungs	5.00E-05	5.01E-05	4.55E-05	4.32E-05	3.92E-05	3.08E-05
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.61E-06○	4.62E-06○	4.31E-06○	4.04E-06○	3.81E-06○	3.17E-06○
Ovaries	4.41E-07†	5.28E-07†	5.74E-07†	5.87E-07†	5.94E-07†	5.58E-07†
Pancreas	8.94E-06	9.63E-06	7.11E-06	7.54E-06	5.86E-06	6.10E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	4.08E-06	3.45E-06	3.17E-06	2.87E-06	2.93E-06	2.40E-06
Red marrow	5.21E-06	4.35E-06	4.02E-06	3.69E-06	3.70E-06	3.02E-06
Skin	2.10E-06	2.34E-06	2.40E-06	2.25E-06	2.16E-06	1.73E-06
Spleen	8.18E-06	7.31E-06	7.18E-06	5.31E-06	6.23E-06	5.61E-06
Testes	4.62E-08†	8.43E-08†	1.22E-07†	1.41E-07†	1.58E-07†	1.74E-07†
Thymus	1.42E-05	1.26E-05	1.37E-05	1.35E-05	1.17E-05	8.45E-06
Thyroid	2.97E-06	4.15E-06	4.66E-06	2.75E-06	3.00E-06	2.64E-06
Uterus	3.53E-07	3.29E-07	4.05E-07	9.28E-07	5.55E-07†	9.39E-07†
Total body	5.11E-06	4.99E-06	4.66E-06	4.36E-06	4.12E-06	3.41E-06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)

\dagger Build-up factor method. \ddagger Adjustment on density or composition. \bullet Extrapolation from higher energy. \circ Calculated by difference.

Target	Source in Muscle	Energy (MeV)				
		0.010	0.015	0.020	0.030	0.100
Bladder wall		2.00E-07	2.02E-06	5.42E-06	9.69E-06	9.26E-06
Stomach wall		3.98E-08	1.15E-06	3.92E-06	7.64E-06	7.31E-06
Small intestine plus contents		6.96E-07	2.14E-06	4.24E-06	7.31E-06	7.49E-06
Upper large intestine wall		4.38E-06	4.81E-06	6.20E-06	8.22E-06	7.74E-06
Lower large intestine wall		6.79E-08	1.35E-06	4.12E-06	7.92E-06	8.26E-06
Kidneys		1.42E-06	4.42E-06	7.39E-06	8.82E-06	6.51E-06
Liver		6.16E-07	1.92E-06	3.55E-06	5.52E-06	5.25E-06
Lungs		3.89E-06	6.82E-06	9.44E-06	1.00E-05	7.05E-06
"Other tissues" (suggested for muscle)		1.81E-05	1.70E-05	1.52E-05	1.15E-05	7.13E-06
Ovaries		4.11E-06	9.31E-06	1.19E-05	1.23E-05	1.00E-05
Pancreas		2.41E-06	6.73E-06	1.04E-05	1.21E-05	9.45E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)		3.85E-07	9.43E-07	1.63E-06	3.06E-06	3.82E-06
Red marrow		2.01E-06	4.60E-06	8.73E-06	1.59E-05	1.56E-05
Skin		4.00E-06	6.06E-06	6.46E-06	5.41E-06	3.48E-06
Spleen		1.18E-06	3.78E-06	6.79E-06	7.62E-06	2.60E-06
Testes		4.99E-08	7.21E-07	2.66E-06	5.71E-06	5.52E-06
Thymus		1.74E-05	2.52E-05	2.39E-05	1.31E-05	1.23E-05
Thyroid		3.35E-06	8.66E-06	1.19E-05	1.16E-05	5.93E-06
Uterus		2.02E-05	1.76E-05	1.80E-05	4.71E-05	4.81E-06
Total body		1.43E-05	1.37E-05	1.25E-05	9.93E-06	6.60E-06
Target		0.200	0.500	1.000	1.500	4.000
Bladder wall		6.28E-06	6.11E-06	5.71E-06	5.42E-06	5.11E-06
Stomach wall		4.96E-06	4.84E-06	4.60E-06	4.38E-06	4.10E-06
Small intestine plus contents		5.51E-06	5.33E-06	5.00E-06	4.73E-06	4.43E-06
Upper large intestine wall		5.73E-06	5.61E-06	5.31E-06	5.00E-06	4.68E-06
Lower large intestine wall		6.01E-06	5.88E-06	5.38E-06	5.18E-06	4.89E-06
Kidneys		4.95E-06	4.91E-06	4.71E-06	4.47E-06	4.22E-06
Liver		3.82E-06	3.85E-06	3.69E-06	3.46E-06	3.30E-06
Lungs		4.61E-06	4.63E-06	4.31E-06	4.04E-06	3.81E-06
"Other tissues" (suggested for muscle)		5.03E-06	5.22E-06	4.99E-06	4.65E-06	4.36E-06
Ovaries		7.02E-06	6.84E-06	6.46E-06	6.00E-06	5.65E-06
Pancreas		6.32E-06	6.20E-06	5.71E-06	5.43E-06	5.17E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)		3.74E-06	3.82E-06	3.67E-06	3.54E-06	3.33E-06
Red marrow		5.58E-06	4.75E-06	4.26E-06	3.85E-06	3.95E-06
Skin		2.74E-06	3.14E-06	3.15E-06	2.96E-06	2.81E-06
Spleen		5.14E-06	5.07E-06	4.79E-06	4.55E-06	4.23E-06
Testes		4.14E-06	4.27E-06	4.08E-06	3.97E-06	4.59E-06
Thymus		1.03E-05	5.77E-06	4.35E-06	7.16E-06	5.70E-06
Thyroid		4.63E-06	4.76E-06	4.35E-06	4.19E-06	3.94E-06
Uterus		8.30E-06	6.46E-06	8.93E-06	5.29E-06	7.01E-06
Total body		4.82E-06	4.97E-06	4.75E-06	4.45E-06	4.18E-06

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. ◊ Adjustment on density or composition. • Extrapolation from higher energy. ○ Calculated by difference.

		Source in Ovaries						
	Target	0.010	0.015	0.020	Energy (MeV)	0.030	0.050	0.100
Bladder wall		1.79E - 08*	2.69E - 08†	3.42E - 06	2.65E - 05	3.90E - 05	2.91E - 05	
Stomach wall		8.09E - 14*	1.21E - 13†	2.07E - 09†	5.22E - 07	2.40E - 06	3.24E - 06	
Small intestine plus contents		2.81E - 06	2.23E - 05	5.91E - 05	9.45E - 05	7.22E - 05	4.80E - 05	
Upper large intestine wall		8.94E - 06	6.76E - 05	1.08E - 04	1.03E - 04	6.38E - 05	4.16E - 05	
Lower large intestine wall		9.94E - 06	8.15E - 05	1.46E - 04	1.45E - 04	8.86E - 05	5.62E - 05	
Kidneys		3.71E - 14*	5.56E - 14†	1.90E - 09†	5.45E - 07	2.64E - 06	3.53E - 06	
Liver		1.05E - 14*	1.58E - 14†	5.74E - 10†	2.42E - 07	1.34E - 06	2.00E - 06	
Lungs		5.12E - 26*	7.68E - 26†	1.02E - 14†	9.26E - 10†	8.58E - 08	2.06E - 07	
"Other tissues" (suggested for muscle)		4.11E - 06	9.31E - 06○	1.19E - 05○	1.23E - 05○	1.00E - 05○	7.57E - 06○	
Ovaries		9.68E - 02	5.91E - 02	3.26E - 02	1.15E - 02	3.58E - 03	2.22E - 03	
Pancreas		4.74E - 18*	7.10E - 18†	3.03E - 11†	7.93E - 08†	8.55E - 07	1.99E - 06	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)		2.70E - 08*	4.06E - 08	1.39E - 06	7.90E - 06	1.14E - 05	6.94E - 06	
Red marrow		1.14E - 07*	1.71E - 07	3.85E - 06	3.28E - 05	4.51E - 05	2.50E - 05	
Skin		8.61E - 12*	1.29E - 11†	1.85E - 08	5.06E - 07	1.35E - 06	1.51E - 06	
Spleen		1.02E - 16*	1.53E - 16†	7.80E - 11†	9.57E - 08	1.03E - 06	1.77E - 06	
Thymus		3.01E - 33*	4.51E - 33†	1.05E - 18†	1.81E - 11†	8.00E - 09†	7.15E - 08†	
Thyroid		3.30E - 23*	3.45E - 23*	4.61E - 23†	2.50E - 13†	5.98E - 10†	1.09E - 08†	
Uterus		1.82E - 06*	2.74E - 06	5.12E - 05	1.44E - 04	1.26E - 04	8.03E - 05	
Total body		1.43E - 05	1.43E - 05	1.43E - 05	1.39E - 05	1.13E - 05	8.10E - 06	
		Source in Ovaries						
	Target	0.200	0.500	1.000	Energy (MeV)	1.500	2.000	4.000
Bladder wall		2.45E - 05	2.29E - 05	2.28E - 05	2.04E - 05	1.72E - 05	1.47E - 05	
Stomach wall		2.82E - 06	2.90E - 06	2.48E - 06	2.25E - 06	3.12E - 06	3.13E - 06	
Small intestine plus contents		4.19E - 05	4.07E - 05	3.57E - 05	3.34E - 05	3.15E - 05	2.51E - 05	
Upper large intestine wall		3.99E - 05	3.82E - 05	3.36E - 05	3.19E - 05	2.97E - 05	2.21E - 05	
Lower large intestine wall		5.07E - 05	4.88E - 05	4.25E - 05	4.02E - 05	3.84E - 05	3.37E - 05	
Kidneys		3.92E - 06	3.92E - 06	3.63E - 06	3.32E - 06	3.62E - 06	2.98E - 06	
Liver		2.11E - 06	2.11E - 06	2.17E - 06	2.14E - 06	2.30E - 06	1.76E - 06	
Lungs		2.56E - 07	3.88E - 07	5.40E - 07	5.62E - 07	5.86E - 07	7.01E - 07	
"Other tissues" (suggested for muscle)		7.02E - 06○	6.84E - 06○	6.40E - 06○	6.00E - 06○	5.65E - 06○	4.75E - 06○	
Ovaries		2.48E - 03	2.62E - 03	2.42E - 03	2.28E - 03	2.12E - 03	1.72E - 03	
Pancreas		1.77E - 06	1.90E - 06	3.18E - 06	1.76E - 06	9.78E - 07	2.66E - 06	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)		4.18E - 06	3.18E - 06	2.88E - 06	2.69E - 06	2.60E - 06	2.16E - 06	
Red marrow		1.43E - 05	1.06E - 05	9.34E - 06	8.52E - 06	8.06E - 06	6.32E - 06	
Skin		1.63E - 06	1.81E - 06	1.90E - 06	1.75E - 06	1.56E - 06	1.52E - 06	
Spleen		1.99E - 06	2.40E - 06	2.05E - 06	1.62E - 06	2.52E - 06	1.98E - 06	
Thymus		1.40E - 07†	2.11E - 07†	2.66E - 07†	2.92E - 07†	3.08E - 07†	3.13E - 07†	
Thyroid		3.01E - 08†	6.22E - 08†	9.61E - 08†	1.17E - 07†	1.31E - 07†	1.51E - 07†	
Uterus		7.51E - 05	6.18E - 05	5.32E - 05	4.86E - 05	4.77E - 05	3.91E - 05	
Total body		7.16E - 06	6.88E - 06	6.38E - 06	5.97E - 06	5.65E - 06	4.70E - 06	

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. ② Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. ③ Calculated by difference.
Source of Pancreas

Target	0.010	0.015	0.020	Energy (MeV)			0.100
				0.030	0.050	0.070	
Bladder wall	9.31E - 22*	1.40E - 21†	3.01E - 13†	7.08E - 09†	1.68E - 07	5.22E - 07	
Stomach wall	2.26E - 06	3.91E - 05	1.10E - 04	1.57E - 04	1.13E - 04	6.73E - 05	
Small intestine plus contents	2.39E - 11*	3.89E - 11†	4.01E - 08†	1.87E - 06	6.39E - 06	7.11E - 06	
Upper large intestine wall	3.88E - 11*	5.82E - 11†	6.06E - 08†	2.79E - 06	8.27E - 06	8.32E - 06	
Lower large intestine wall	1.41E - 14*	2.12E - 14†	8.81E - 10†	3.08E - 07	1.73E - 06	2.22E - 06	
Kidneys	2.26E - 08*	3.39E - 08†	3.23E - 06	2.50E - 05	3.37E - 05	2.65E - 05	
Liver	1.54E - 07*	2.30E - 07	3.61E - 06	1.64E - 05	2.24E - 05	1.76E - 05	
Lungs	2.75E - 09*	4.12E - 09†	1.16E - 06	8.87E - 06	1.29E - 05	1.02E - 05	
"Other tissues" (suggested for muscle)	2.41E - 06 ②	6.73E - 06 ③	1.04E - 05 ②	1.21E - 05 ②	9.43E - 06 ③	6.87E - 06 ②	
Ovaries	5.28E - 18*	7.92E - 18†	3.07E - 11†	7.99E - 08†	1.29E - 06†	1.82E - 06†	
Pancreas	1.47E - 02	1.09E - 02	7.14E - 03	3.16E - 03	1.10E - 03	6.51E - 04	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.77E - 08*	5.66E - 08	7.68E - 07	5.03E - 06	9.38E - 06	6.58E - 06	
Red marrow	7.85E - 08*	1.18E - 07	1.46E - 06	9.19E - 06	1.78E - 05	1.27E - 05	
Skin	7.33E - 09*	-1.10E - 08*	1.47E - 08	5.52E - 07	1.39E - 06	1.50E - 06	
Spleen	1.45E - 06	4.48E - 05	1.31E - 04	1.79E - 04	7.62E - 04	4.02E - 05	
Testes	9.66E - 30*	1.45E - 29†	4.87E - 17†	1.17E - 10†	2.90E - 08†	1.64E - 07†	
Thymus	1.99E - 18*	2.98E - 18†	1.78E - 11†	5.77E - 08†	1.70E - 06	1.73E - 06	
Thyroid	1.21E - 26*	1.81E - 26†	2.08E - 15†	7.82E - 10†	7.99E - 08†	3.78E - 07†	
Uterus	1.65E - 18*	2.48E - 18†	1.75E - 11†	1.10E - 07	1.01E - 06	1.79E - 06	
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.43E - 05	1.39E - 05	1.11E - 05	7.92E - 06	
Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000	
Bladder wall	5.61E - 07	6.82E - 07	4.03E - 07	1.02E - 06	1.51E - 06	1.19E - 06	
Stomach wall	6.54E - 05	5.84E - 05	5.40E - 05	4.96E - 05	4.54E - 05	4.02E - 05	
Small intestine plus contents	6.67E - 06	6.06E - 06	5.90E - 06	5.62E - 06	5.27E - 06	4.52E - 06	
Upper large intestine wall	7.94E - 06	7.43E - 06	7.18E - 06	6.76E - 06	5.91E - 06	5.04E - 06	
Lower large intestine wall	2.06E - 06	1.84E - 06	1.83E - 06	2.13E - 06	1.54E - 06	1.91E - 06	
Kidneys	2.27E - 05	2.13E - 05	1.94E - 05	1.82E - 05	1.63E - 05	1.47E - 05	
Liver	1.56E - 05	1.41E - 05	1.29E - 05	1.21E - 05	1.08E - 05	9.50E - 06	
Lungs	8.92E - 06	8.21E - 06	7.43E - 06	6.77E - 06	6.54E - 06	5.20E - 06	
"Other tissues" (suggested for muscle)	6.32E - 06 ②	6.20E - 06 ③	5.71E - 06 ②	5.43E - 06 ③	5.17E - 06 ②	4.20E - 06	
Ovaries	1.14E - 06	1.28E - 06	3.50E - 06	2.37E - 06†	2.25E - 06†	1.94E - 06†	
Pancreas	6.88E - 04	7.29E - 04	6.74E - 04	6.33E - 04	5.72E - 04	4.58E - 04	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	4.00E - 06	3.17E - 06	2.86E - 06	2.79E - 06	2.60E - 06	2.14E - 06	
Red marrow	7.70E - 06	5.97E - 06	5.34E - 06	5.14E - 06	4.76E - 06	3.87E - 06	
Skin	1.57E - 06	1.74E - 06	1.90E - 06	1.77E - 06	1.69E - 06	1.58E - 06	
Spleen	6.70E - 05	6.59E - 05	5.78E - 05	5.34E - 05	5.07E - 05	3.75E - 05	
Testes	2.76E - 07†	2.15E - 07	4.28E - 07†	4.50E - 07†	4.61E - 07†	4.48E - 07†	
Thymus	3.07E - 06	1.83E - 06	1.75E - 06	2.15E - 06	2.05E - 06	1.77E - 06	
Thyroid	5.52E - 07†	6.49E - 07†	9.16E - 08	7.11E - 07†	7.11E - 07†	6.61E - 07†	
Uterus	2.32E - 06	2.17E - 06	2.01E - 06	1.87E - 06	2.05E - 06	1.42E - 06	
Total body	6.99E - 06	6.74E - 06	6.22E - 06	5.90E - 06	5.55E - 06	4.53E - 06	

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)

[†] Build-up factor method. ^① Adjustment on density or composition. ^{*} Extrapolation from higher energy. ^② Calculated by difference.

Source in Skeleton (suggested for Cancellous Bone, Cortical Bone, Red Marrow, and Yellow Marrow)

Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	2.27E-11*	3.40E-11†	2.00E-08†	2.06E-07	1.51E-06	2.12E-06
Stomach wall	1.45E-07*	2.18E-07*	2.90E-07	1.06E-06	1.73E-06	2.11E-06
Small intestine plus contents	1.52E-07*	2.28E-07	5.01E-07	1.69E-06	3.09E-06	2.81E-06
Upper large intestine wall	2.12E-07*	3.17E-07	6.44E-07	1.38E-06	2.57E-06	2.56E-06
Lower large intestine wall	6.48E-07*	9.71E-07	1.84E-06	3.46E-06	4.10E-06	3.97E-06
Kidneys	3.02E-07*	4.54E-07*	6.03E-07	1.81E-06	3.01E-06	3.01E-06
Liver	1.24E-07*	1.87E-07	4.79E-07	1.67E-06	2.37E-06	2.55E-06
Lungs	1.69E-07*	2.54E-07	1.04E-06	3.20E-06	4.42E-06	3.63E-06
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.85E-07②	9.43E-07②	1.63E-06②	3.06E-06②	3.82E-06②	3.66E-06②
Ovaries	2.12E-08*	3.18E-08†	9.03E-07†	3.85E-06†	3.20E-06	2.81E-06
Pancreas	3.91E-07*	5.87E-07*	7.83E-07†	1.39E-06	3.22E-06	2.78E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	9.34E-05	8.97E-05	8.43E-05	6.84E-05	4.10E-05	1.81E-05
Red marrow	9.42E-05	8.85E-05	8.31E-05	6.45E-05	3.77E-05	1.65E-05
Skin	4.95E-07	1.18E-06	1.83E-06	2.27E-06	2.40E-06	2.35E-06
Spleen	6.52E-07*	9.78E-07*	1.30E-06*	1.96E-06	2.76E-06	2.09E-06
Testes	1.81E-11*	2.71E-11†	2.22E-08†	8.29E-07†	1.73E-06	2.59E-06
Thymus	2.85E-07*	4.27E-07*	5.69E-07†	7.64E-07	1.87E-06	2.19E-06
Thyroid	1.32E-07*	1.98E-07*	2.64E-07†	1.94E-06†	2.91E-06	2.76E-06
Uterus	9.28E-11*	1.39E-10†	4.96E-08†	1.23E-06	1.63E-06	2.11E-06
Total body	1.43E-05	1.42E-05	1.40E-05	1.28E-05	9.31E-06	5.73E-06
Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	1.68E-06	2.28E-06	1.37E-06	2.56E-06	1.87E-06	1.94E-06
Stomach wall	2.73E-06	2.07E-06	1.76E-06	1.90E-06	1.72E-06	1.48E-06
Small intestine plus contents	2.67E-06	2.77E-06	2.79E-06	2.36E-06	2.35E-06	1.98E-06
Upper large intestine wall	2.40E-06	2.40E-06	2.61E-06	2.33E-06	2.32E-06	1.77E-06
Lower large intestine wall	3.82E-06	3.24E-06	3.58E-06	3.03E-06	2.72E-06	2.54E-06
Kidneys	3.29E-06	3.12E-06	4.03E-06	3.16E-06	2.43E-06	2.32E-06
Liver	2.39E-06	2.44E-06	2.41E-06	2.30E-06	2.50E-06	2.05E-06
Lungs	3.50E-06	3.38E-06	3.29E-06	3.03E-06	3.09E-06	2.30E-06
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.74E-06②	3.82E-06②	3.67E-06②	3.54E-06②	3.33E-06②	2.83E-06②
Ovaries	2.46E-06	3.75E-06	3.16E-06†	2.79E-06†	2.75E-06†	2.22E-06†
Pancreas	3.90E-06	3.11E-06	3.29E-06	3.71E-06	3.50E-06	1.59E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	1.29E-05	1.19E-05	1.11E-05	1.01E-05	9.39E-06	7.79E-06
Red marrow	1.15E-05	1.06E-05	1.01E-05	9.19E-06	8.37E-06	7.06E-06
Skin	2.63E-06	3.00E-06	2.87E-06	2.85E-06	2.62E-06	2.46E-06
Spleen	2.32E-06	2.90E-06	2.96E-06	2.02E-06	2.17E-06	1.23E-06
Testes	2.23E-06	1.98E-06	2.24E-06	2.37E-06	3.88E-06	2.13E-06
Thymus	1.65E-06	2.64E-06	2.84E-06	1.41E-06	2.17E-06	2.78E-06
Thyroid	3.31E-06	3.86E-06	1.60E-06	3.82E-06	1.82E-07	1.91E-06†
Uterus	2.24E-06	1.97E-06	3.15E-06	1.98E-06	1.57E-06	1.65E-06
Total body	5.01E-06	4.93E-06	4.70E-06	4.43E-06	4.16E-06	3.50E-06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

STRUCTURE ABSORBED FRACTION OF PHOTON SURGERY (cont.)

† Built-up factor method	Target	Adjustment on density or composition.		Source in Skin	Energy (MeV)		0.050	0.100	Calculated by difference.
		0.010	0.015		0.020	0.030			
Bladder wall	2.14E-07*	3.20E-07*	4.27E-07	1.94E-06	1.94E-06	1.94E-06	1.79E-06	1.79E-06	
Stomach wall	2.74E-07*	4.11E-07*	5.48E-07	2.02E-06	2.02E-06	2.02E-06	2.06E-06	2.06E-06	
Small intestine plus contents	6.45E-08*	9.68E-08*	1.29E-07	8.64E-07	8.64E-07	8.64E-07	1.69E-06	1.69E-06	
Upper large intestine wall	1.26E-07*	1.89E-07*	2.52E-07	1.19E-06	1.19E-06	1.19E-06	1.83E-06	1.83E-06	
Lower large intestine wall	5.72E-08*	8.59E-08*	1.14E-07	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07	1.84E-06	1.84E-06	
Kidneys	1.82E-07*	2.72E-07	1.18E-06	2.81E-06	2.81E-06	2.81E-06	2.08E-06	2.08E-06	
Liver	4.77E-08*	7.15E-08	4.88E-07	1.78E-06	1.78E-06	1.78E-06	2.01E-06	2.01E-06	
Lungs	8.04E-08*	1.21E-08	7.45E-07	2.54E-06	2.54E-06	2.54E-06	2.17E-06	2.17E-06	
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.00E-06	6.06E-06	6.46E-06	5.41E-06	5.41E-06	5.41E-06	2.60E-06	2.60E-06	
Ovaries	8.61E-12*	1.29E-11*	1.93E-08*	7.68E-07*	7.68E-07*	7.68E-07*	1.22E-06	1.22E-06	
Pancreas	1.41E-08*	2.12E-08*	2.83E-08*	9.01E-07	9.01E-07	9.01E-07	1.39E-06	1.39E-06	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	1.85E-06	4.30E-06	6.58E-06	8.90E-06	8.90E-06	8.90E-06	4.19E-06	4.19E-06	
Red marrow	1.61E-06	3.90E-06	5.97E-06	7.98E-06	7.98E-06	7.98E-06	4.02E-06	4.02E-06	
Skin	2.05E-04	1.03E-04	5.57E-05	2.34E-05	8.07E-06	8.07E-06	5.31E-06	5.31E-06	
Spleen	1.67E-07*	2.50E-07*	3.34E-07	1.57E-06	2.49E-06	2.49E-06	2.03E-06	2.03E-06	
Testes	8.27E-07	5.82E-06	8.59E-06	9.45E-06	4.83E-06	4.83E-06	3.04E-06	3.04E-06	
Thymus	1.88E-08*	2.82E-08*	5.47E-07	1.56E-06	2.27E-06	2.27E-06	2.22E-06	2.22E-06	
Thyroid	1.25E-06*	1.88E-06*	2.50E-06	5.24E-06	5.33E-06	5.33E-06	2.50E-06	2.50E-06	
Uterus	5.17E-08*	7.75E-08*	1.03E-07	6.49E-07	1.84E-06	1.84E-06	1.61E-06	1.61E-06	
Total body	1.13E-05	9.06E-06	7.77E-06	6.17E-06	4.21E-06	4.21E-06	2.87E-06	2.87E-06	
Target	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	2.000	4.000		
Bladder wall	1.91E-06	2.16E-06	2.63E-06	2.69E-06	2.69E-06	2.69E-06	2.23E-06	2.23E-06	
Stomach wall	1.97E-06	2.24E-06	2.23E-06	1.94E-06	1.94E-06	1.94E-06	1.50E-06	1.50E-06	
Small intestine plus contents	1.73E-06	1.90E-06	2.01E-06	1.91E-06	1.91E-06	1.91E-06	1.56E-06	1.56E-06	
Upper large intestine wall	1.66E-06	2.00E-06	2.25E-06	1.78E-06	1.86E-06	1.86E-06	1.44E-06	1.44E-06	
Lower large intestine wall	1.78E-06	2.08E-06	2.25E-06	1.91E-06	2.08E-06	2.08E-06	1.45E-06	1.45E-06	
Kidneys	2.29E-06	2.59E-06	2.60E-06	2.38E-06	2.21E-06	2.21E-06	1.98E-06	1.98E-06	
Liver	2.02E-06	2.34E-06	2.25E-06	2.20E-06	2.21E-06	2.21E-06	1.73E-06	1.73E-06	
Lungs	2.27E-06	2.34E-06	2.37E-06	2.33E-06	2.23E-06	2.23E-06	1.84E-06	1.84E-06	
"Other tissues" (suggested for muscle)	2.74E-06*	3.14E-06*	3.15E-06*	2.96E-06	2.81E-06	2.81E-06	2.37E-06	2.37E-06	
Ovaries	1.77E-06	1.02E-06	1.11E-06	1.75E-06	1.07E-06	1.07E-06	1.22E-06	1.22E-06	
Pancreas	2.07E-06	2.02E-06	1.63E-06	1.78E-06	1.87E-06	1.87E-06	1.35E-06	1.35E-06	
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.99E-06	2.93E-06	2.85E-06	2.74E-06	2.51E-06	2.51E-06	2.18E-06	2.18E-06	
Red marrow	2.85E-06	2.72E-06	2.63E-06	2.59E-06	2.32E-06	2.32E-06	2.06E-06	2.06E-06	
Skin	6.05E-06	6.99E-06	6.93E-06	6.38E-06	6.01E-06	6.01E-06	4.78E-06	4.78E-06	
Spleen	2.06E-06	2.27E-06	2.67E-06	1.87E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.76E-06	1.76E-06	
Testes	3.82E-06	2.86E-06	3.10E-06	3.06E-06	2.97E-06	2.97E-06	3.20E-06	3.20E-06	
Thymus	2.49E-06	2.99E-06	2.41E-06	1.94E-06	2.72E-06	2.72E-06	2.13E-06	2.13E-06	
Thyroid	2.73E-06	2.89E-06	2.40E-06	2.31E-06	2.82E-06	2.82E-06	2.18E-06	2.18E-06	
Uterus	1.39E-06	1.96E-06	2.38E-06	2.11E-06	1.74E-06	1.74E-06	2.19E-06	2.19E-06	
Total body	2.81E-06	3.15E-06	2.97E-06	2.97E-06	2.81E-06	2.81E-06	2.35E-06	2.35E-06	

[†] Build-up factor method. ^① Adjustment on density or composition. ^{*} Extrapolation from higher energy. ^② Calculated by difference.

Source in System

Target	Energy (MeV)				
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050
Bladder wall	6.70E - 22*	1.00E - 21†	2.23E - 13†	5.34E - 09†	2.23E - 07†
Stomach wall	8.63E - 07*	1.39E - 06	1.34E - 05	5.86E - 05	3.15E - 05
Small intestine plus contents	2.65E - 10*	2.65E - 10†	9.39E - 08	1.49E - 06	4.09E - 05
Upper large intestine wall	1.18E - 10*	1.77E - 10†	6.70E - 08†	2.18E - 06	5.60E - 06
Lower large intestine wall	1.82E - 12*	2.73E - 12†	5.78E - 09†	4.55E - 07	2.35E - 06
Kidneys	7.02E - 06*	1.05E - 05	3.63E - 05	6.65E - 05	3.61E - 05
Liver	7.30E - 13*	1.08E - 12†	4.25E - 09†	5.99E - 07	2.93E - 06
Lungs	6.50E - 07*	9.76E - 07	4.97E - 06	1.25E - 05	3.78E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	1.18E - 06*	3.78E - 06	6.79E - 06	9.42E - 06 ^③	5.48E - 06 ^③
Ovaries	9.42E - 17*	1.47E - 16†	7.94E - 11†	8.80E - 08†	1.19E - 06†
Pancreas	1.56E - 06	4.29E - 05	1.26E - 04	1.87E - 04	1.23E - 04
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	6.83E - 09	2.92E - 07	1.70E - 06	5.79E - 06	8.30E - 06
Red marrow	7.07E - 09	3.02E - 07	1.74E - 06	6.07E - 06	1.05E - 05
Skin	7.80E - 09*	1.17E - 08	3.10E - 07	1.54E - 06	1.74E - 06
Spleen	5.44E - 03	4.66E - 03	3.59E - 03	1.86E - 03	7.24E - 04
Testes	1.22E - 29*	1.83E - 29†	4.62E - 17†	9.74E - 11†	1.42E - 07†
Thymus	5.50E - 20*	8.25E - 20†	2.18E - 12†	1.83E - 08†	9.39E - 07
Thyroid	6.30E - 27*	9.45E - 27†	9.31E - 16†	4.27E - 10†	2.70E - 07†
Uterus	7.54E - 19*	1.13E - 18†	9.33E - 12†	4.07E - 08†	6.87E - 07
Total body	1.43E - 05	1.43E - 05	1.42E - 05	1.30E - 05	9.47E - 06
Target	Energy (MeV)				
	0.300	0.500	1.000	1.500	2.000
Bladder wall	6.27E - 07	4.52E - 07	1.25E - 06	8.91E - 07	9.65E - 07
Stomach wall	3.36E - 05	3.39E - 05	2.93E - 05	3.14E - 05	2.65E - 05
Small intestine plus contents	5.08E - 06	4.77E - 06	4.57E - 06	4.67E - 06	3.55E - 06
Upper large intestine wall	4.36E - 06	4.81E - 06	4.58E - 06	4.63E - 06	3.01E - 06
Lower large intestine wall	2.22E - 06	2.41E - 06	2.06E - 06	2.11E - 06	2.22E - 06
Kidneys	3.14E - 05	2.93E - 05	2.59E - 05	2.55E - 05	2.33E - 05
Liver	3.67E - 06	3.69E - 06	3.53E - 06	3.45E - 06	3.27E - 06
Lungs	7.91E - 06	7.56E - 06	6.87E - 06	6.21E - 06	6.38E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	5.14E - 06 ^①	5.07E - 06 ^②	4.79E - 06 ^③	4.55E - 06 ^③	3.60E - 06 ^③
Ovaries	2.05E - 06	3.70E - 06	1.70E - 06	2.17E - 06†	3.46E - 07
Pancreas	6.58E - 05	6.70E - 05	5.80E - 05	5.13E - 05	4.94E - 05
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.25E - 06	2.65E - 06	2.48E - 06	2.36E - 06	2.18E - 06
Red marrow	5.04E - 06	3.90E - 06	3.64E - 06	3.35E - 06	3.19E - 06
Skin	1.81E - 06	2.18E - 06	2.16E - 06	2.05E - 06	1.66E - 06
Spleen	4.12E - 04	4.49E - 04	4.10E - 04	3.77E - 04	3.55E - 04
Testes	2.45E - 07†	3.30E - 07†	3.88E - 07†	4.14E - 07†	4.26E - 07†
Thymus	1.33E - 06	1.63E - 06	2.42E - 06	4.14E - 07	4.17E - 07†
Thyroid	4.16E - 07†	5.10E - 07†	5.68E - 07†	5.83E - 07†	5.58E - 07†
Uterus	1.42E - 06	1.61E - 06	2.11E - 06	6.25E - 07	1.76E - 06
Total body	5.93E - 06	5.82E - 06	5.46E - 06	5.16E - 06	4.81E - 06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

† Build-up factor method. \oplus Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. \odot Calculated by difference.
 Specific absorbed fraction of photon energy (rate.)

Target	Energy (MeV)	Source in Tissue		
		0.010	0.015	0.020
Bladder wall	5.00E - 09*	7.50E - 09†	2.26E - 06	1.74E - 05
Stomach wall	1.39E - 25*	2.08E - 25†	3.73E - 15†	6.66E - 10†
Small intestine plus contents	2.67E - 18*	4.01E - 18†	1.62E - 11†	4.66E - 08
Upper large intestine wall	1.35E - 17*	2.03E - 17†	2.75E - 11†	4.78E - 08†
Lower large intestine wall	1.30E - 09*	1.95E - 09†	7.90E - 07	6.85E - 06
Kidneys	4.67E - 27*	7.01E - 27†	9.01E - 16†	4.33E - 10†
Liver	2.58E - 26*	3.87E - 26†	9.61E - 16†	2.74E - 10†
Lungs	2.24E - 36*	3.36E - 36†	1.83E - 20†	1.65E - 12†
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.99E - 08*	7.21E - 07 \odot	2.66E - 06 \odot	5.71E - 06 \odot
Pancreas	9.64E - 30*	1.45E - 29†	4.97E - 17†	1.17E - 10†
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	7.33E - 11*	1.10E - 10 \oplus	2.40E - 08	1.15E - 06
Red marrow	3.24E - 09*	4.86E - 09*	6.49E - 09	6.46E - 07
Skin	9.47E - 06	9.12E - 06	1.53E - 05	1.39E - 05
Spleen	1.31E - 29*	1.97E - 29†	4.57E - 17†	9.84E - 11†
Testes	2.43E - 02	1.86E - 02	1.23E - 02	5.34E - 03
Thymus	2.20E - 24*	3.30E - 24*	4.40E - 24†	5.01E - 14†
Thyroid	2.50E - 28*	3.75E - 28*	5.00E - 28†	7.32E - 16†
Total body	1.43E - 05	1.38E - 05	1.26E - 05	1.00E - 05
Target	Energy (MeV)	Source in Tissue		
		0.200	0.300	1.000
Bladder wall	1.70E - 05	1.75E - 05	1.74E - 05	1.38E - 05
Stomach wall	1.71E - 07	4.07E - 07	2.71E - 07	4.06E - 07
Small intestine plus contents	1.50E - 06	1.85E - 06	1.78E - 06	1.86E - 06
Upper large intestine wall	1.33E - 06	1.10E - 06	1.40E - 06	1.16E - 06
Lower large intestine wall	9.91E - 06	9.83E - 05	7.24E - 06	7.98E - 06
Kidneys	2.04E - 07	3.51E - 07	5.07E - 07	5.63E - 07
Liver	1.48E - 07	1.77E - 07	3.61E - 07	4.16E - 07
Lungs	4.38E - 08	4.94E - 08	1.01E - 07	1.60E - 07
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.14E - 06 \odot	4.27E - 06 \odot	4.08E - 06 \odot	3.97E - 06 \odot
Pancreas	2.76E - 07†	1.28E - 07	3.61E - 07	4.50E - 07†
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.73E - 06	2.28E - 06	2.15E - 06	2.00E - 06
Red marrow	2.22E - 06	1.81E - 06	1.69E - 06	1.51E - 06
Skin	5.13E - 06	5.48E - 06	5.15E - 06	5.11E - 06
Spleen	7.38E - 08	4.55E - 07	2.12E - 07	2.38E - 07
Testes	1.17E - 03	1.23E - 03	1.16E - 03	1.04E - 03
Thymus	1.62E - 08†	3.82E - 08†	6.43E - 08†	8.18E - 08†
Thyroid	3.51E - 09†	1.17E - 08†	2.46E - 08†	3.51E - 08†
Total body	4.83E - 06	4.91E - 06	4.69E - 06	4.47E - 06

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. ① Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. ○ Calculated by difference.
Source in Thyroid

Target	Energy (MeV)				
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050
Bladder wall	8.78E - 25*	1.32E - 24*	1.76E - 24†	3.15E - 14†	1.61E - 10†
Stomach wall	2.70E - 25*	3.11E - 25†	4.50E - 15†	7.26E - 10†	2.01E - 07
Small intestine plus contents	4.58E - 35*	6.87E - 35†	1.08E - 19†	5.26E - 12†	3.49E - 09†
Upper large intestine wall	9.33E - 35*	1.40E - 34†	1.88E - 19†	7.08E - 12†	4.20E - 09†
Lower large intestine wall	8.33E - 38*	1.25E - 37†	2.75E - 21†	5.66E - 13†	6.64E - 10†
Kidneys	8.87E - 30*	1.33E - 29†	3.98E - 17†	9.31E - 11†	2.06E - 08†
Liver	1.26E - 24*	1.90E - 24†	1.16E - 14†	1.19E - 09†	1.93E - 07
Lungs	1.52E - 13*	2.28E - 12†	3.30E - 08	1.23E - 06	3.89E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.35E - 06	8.66E - 06	1.19E - 05	1.16E - 05	4.81E - 06
Ovaries	2.33E - 23*	3.50E - 23*	4.66E - 23†	2.50E - 13†	5.97E - 10†
Pancreas	1.24E - 26*	1.86E - 26†	2.08E - 15†	7.89E - 10†	1.91E - 07
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	1.79E - 09*	2.69E - 09	2.84E - 07	2.99E - 06	4.45E - 06
Red marrow	2.68E - 09*	4.02E - 09	3.14E - 07	2.74E - 06	6.44E - 06
Skin	5.06E - 07*	7.59E - 07	3.26E - 06	5.35E - 06	3.66E - 06
Spleen	6.81E - 27*	1.02E - 26†	9.64E - 16†	4.29E - 10†	1.16E - 07
Testes	2.48E - 28*	3.72E - 28*	4.96E - 28†	7.32E - 16†	1.67E - 11†
Thymus	1.23E - 09*	1.84E - 09†	2.53E - 07	1.13E - 05	2.28E - 05
Thyroid	4.29E - 02	2.93E - 02	1.81E - 02	7.41E - 03	2.42E - 03
Uterus	5.98E - 24*	8.97E - 24*	1.20E - 23†	2.03E - 13†	5.28E - 10†
Total body	1.43E - 05	1.42E - 05	1.35E - 05	1.08E - 05	6.93E - 06
Target	Energy (MeV)				
	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000
Bladder wall	1.35E - 08†	3.30E - 08†	5.71E - 08†	7.36E - 08†	8.56E - 08†
Stomach wall	1.45E - 07	4.44E - 07	4.62E - 07	6.42E - 07	3.70E - 07
Small intestine plus contents	5.80E - 08	2.47E - 08	1.38E - 07	1.91E - 07	1.92E - 07
Upper large intestine wall	4.03E - 08	3.63E - 08	1.51E - 07	2.29E - 07	1.85E - 07
Lower large intestine wall	2.59E - 08†	5.22E - 08†	8.09E - 08†	9.91E - 08†	1.11E - 07†
Kidneys	1.40E - 07	1.69E - 07	4.12E - 07	5.96E - 07	4.35E - 07
Liver	4.28E - 07	5.49E - 07	6.54E - 07	7.28E - 07	8.78E - 07
Lungs	3.38E - 06	3.67E - 06	3.83E - 06	3.35E - 06	3.17E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.63E - 06○	4.76E - 06○	4.45E - 06○	4.19E - 06○	3.94E - 06○
Ovaries	3.00E - 08†	6.21E - 08†	9.62E - 08†	1.17E - 07†	1.31E - 07†
Pancreas	3.98E - 07	2.34E - 07	1.88E - 07	1.49E - 06	7.11E - 07
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	2.98E - 06	2.61E - 06	2.39E - 06	2.33E - 06	2.23E - 06
Red marrow	3.27E - 06	2.89E - 06	2.57E - 06	2.56E - 06	2.47E - 06
Skin	2.87E - 06	2.97E - 06	3.07E - 06	2.96E - 06	2.76E - 06
Spleen	4.36E - 07	4.40E - 07	7.21E - 07	6.30E - 07	4.40E - 07
Testes	3.52E - 09†	1.17E - 08†	2.46E - 08†	3.51E - 08†	4.36E - 08†
Thymus	1.52E - 05	1.52E - 05	1.23E - 05	1.32E - 05	1.46E - 05
Thyroid	1.55E - 03	1.66E - 03	1.54E - 03	1.45E - 03	1.31E - 03
Uterus	2.80E - 08†	5.89E - 08†	9.19E - 08†	1.12E - 07†	1.27E - 07†
Total body	4.42E - 06	4.50E - 06	4.26E - 06	4.03E - 06	3.78E - 06

REPORT OF THE TASK GROUP ON REFERENCE MAN

SPECIFIC ABSORBED FRACTION OF PHOTON ENERGY (cont.)
 † Build-up factor method. \supset Adjustment on density or composition. * Extrapolation from higher energy. \downarrow Calculated by difference.
Source in Total Body

Target	0.010	0.015	0.020	Energy (MeV)	0.030	0.050	0.100
Bladder wall	1.16E - 05	1.43E - 05	1.84E - 05	1.09E - 05	1.04E - 05	6.41E - 06	6.41E - 06
Stomach wall	1.38E - 05	1.41E - 05	1.46E - 05	1.14E - 05	8.61E - 06	5.76E - 06	5.76E - 06
Small intestine plus contents	1.44E - 05	1.45E - 05	1.39E - 05	1.34E - 05	9.92E - 06	7.56E - 06	7.56E - 06
Upper large intestine wall	1.47E - 05	1.51E - 05	1.34E - 05	1.37E - 05	9.72E - 06	7.39E - 06	7.39E - 06
Lower large intestine wall	1.46E - 05	1.21E - 05	1.37E - 05	1.26E - 05	1.04E - 05	6.69E - 06	6.69E - 06
Kidneys	1.40E - 05	1.45E - 05	1.28E - 05	1.06E - 05	8.19E - 06	6.00E - 06	6.00E - 06
Liver	1.44E - 05	1.42E - 05	1.42E - 05	1.23E - 05	8.99E - 06	6.23E - 06	6.23E - 06
Lungs	1.32E - 05	1.34E - 05	1.43E - 05	1.26E - 05	8.40E - 06	5.41E - 06	5.41E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	1.43E - 05	1.37E - 05	1.25E - 05	9.93E - 05	6.60E - 06	4.86E - 06	4.86E - 06
Ovaries	1.66E - 05	2.47E - 05	1.42E - 05	1.23E - 05	8.16E - 06	7.01E - 06	7.01E - 06
Pancreas	1.49E - 05	1.43E - 05	1.68E - 05	1.24E - 05	1.09E - 05	6.65E - 06	6.65E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	1.51E - 06	1.61E - 05	1.82E - 05	2.01E - 05	1.64E - 05	8.44E - 06	8.44E - 06
Red marrow	1.56E - 05	1.69E - 05	1.95E - 05	2.29E - 05	1.90E - 05	1.01E - 05	1.01E - 05
Skin	1.14E - 05	9.15E - 06	7.62E - 06	5.38E - 06	3.49E - 06	2.66E - 06	2.66E - 06
Spleen	1.70E - 05	1.20E - 05	1.34E - 05	1.26E - 05	8.43E - 06	6.16E - 06	6.16E - 06
Testes	1.55E - 05	1.27E - 05	9.36E - 06	8.90E - 06	6.16E - 06	4.36E - 06	4.36E - 06
Thymus	1.37E - 05	1.97E - 05	2.03E - 05	1.06E - 05	1.02E - 05	5.29E - 06	5.29E - 06
Thyroid	1.97E - 05	1.30E - 05	1.54E - 05	8.65E - 06	7.45E - 06	3.06E - 06	3.06E - 06
Uterus	1.58E - 05	1.37E - 05	1.44E - 05	1.23E - 05	1.04E - 05	7.93E - 06	7.93E - 06
Total body	1.42E - 05	1.38E - 05	1.32E - 05	1.14E - 05	8.13E - 06	5.41E - 06	5.41E - 06
Target	0.200	0.500	1.000	Energy (MeV)	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	6.16E - 06	6.24E - 06	6.78E - 06	5.62E - 06	4.76E - 06	5.41E - 06	5.41E - 06
Stomach wall	6.74E - 06	6.14E - 06	5.48E - 06	4.09E - 06	4.60E - 06	3.98E - 06	3.98E - 06
Small intestine plus contents	7.01E - 06	6.81E - 06	6.31E - 06	5.85E - 06	5.40E - 06	4.82E - 06	4.82E - 06
Upper large intestine wall	6.51E - 06	6.75E - 06	6.02E - 06	5.24E - 06	5.15E - 06	4.23E - 06	4.23E - 06
Lower large intestine wall	5.92E - 06	6.83E - 06	6.38E - 06	5.89E - 06	7.11E - 06	4.03E - 06	4.03E - 06
Kidneys	6.10E - 06	6.06E - 06	5.92E - 06	4.88E - 06	4.70E - 06	3.94E - 06	3.94E - 06
Liver	5.78E - 06	5.39E - 06	5.92E - 06	5.02E - 06	4.74E - 06	4.28E - 06	4.28E - 06
Lungs	4.97E - 06	5.36E - 06	4.58E - 06	4.05E - 06	3.85E - 06	3.45E - 06	3.45E - 06
"Other tissues" (suggested for muscle)	4.82E - 06	4.97E - 06	4.75E - 06	4.45E - 06	4.18E - 06	3.51E - 06	3.51E - 06
Ovaries	6.51E - 06	5.84E - 06	4.20E - 06	6.57E - 06	6.14E - 06	6.47E - 06	6.47E - 06
Pancreas	7.65E - 06	5.95E - 06	5.30E - 06	4.90E - 06	8.38E - 06	3.84E - 06	3.84E - 06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	5.75E - 06	5.16E - 06	4.69E - 06	4.31E - 06	4.22E - 06	3.37E - 06	3.37E - 06
Red marrow	6.57E - 06	5.68E - 06	5.17E - 06	4.71E - 06	4.65E - 06	3.64E - 06	3.64E - 06
Skin	2.81E - 06	3.09E - 06	3.15E - 06	3.14E - 06	2.81E - 06	2.42E - 06	2.42E - 06
Spleen	6.25E - 06	6.16E - 06	5.74E - 06	4.66E - 06	4.24E - 06	3.59E - 06	3.59E - 06
Testes	3.82E - 06	6.49E - 06	5.71E - 06	4.90E - 06	4.58E - 06	4.31E - 06	4.31E - 06
Thymus	8.53E - 06	5.22E - 06	4.11E - 06	6.07E - 06	5.03E - 06	5.34E - 06	5.34E - 06
Thyroid	4.35E - 06	4.79E - 06	5.20E - 06	4.03E - 06	4.12E - 06	4.91E - 06	4.91E - 06
Uterus	7.52E - 06	5.59E - 06	8.02E - 06	4.98E - 06	6.21E - 06	5.48E - 06	5.48E - 06
Total body	4.95E - 06	4.97E - 06	4.72E - 06	4.10E - 06	4.16E - 06	3.48E - 06	3.48E - 06

8-3. ウインズケール再処理工場における肺中酸化¹⁰⁶Ru の in vivo 計測と線量評価

In vivo measurement and dosimetry of Ru-106 oxide in the lung

IAEA-SM-215/54. (1977)

「Handling of radiation accidents 1977」 IAEA

British Nuclear Fuel Limited, Windscale & Calder Warks, UK.

H. HOWELLS, F.A. WARD, D. J. COULSTON, J. A. WOODHOUSE

(1) 事故発生当時の概要

1973年9月26日ウインズケール再処理工場の "Head End Treatment Plant"において feed vessel 内の (Ru と TBP の爆発反応により) 内圧が上り、セル内からワーキングエリアに空気が逆流し空気汚染が広がった。

事故当時その建屋内には 35人が居たが 10 ~ 15 分以内に別の建屋に避難。皮ふと衣服が汚染し、直ちに除染が行なわれた。表面汚染は簡単なシャワーで除去できた。その後ホールボディモニタリングの為の施設に送られた 人を除いて残りの者の表面汚染はその日のうちに許容できるレベル以下になり、残存汚染はそれほど重大でないとの判断で、35人はその日の終りには帰宅を許された。

外部被曝は、フィルムバッチの測定により、最も高い者で 0.3 rem (全身 γ) 0.5 rem (body surface dose), 全員の平均線量は 0.12 rem (全身 γ), (0.03 ~ 0.30 rem) であった。

エアーサンプリングフィルタの γ 線スペクトロメトリから核種は殆んど Ru-106 であることがわかった。(このデータはホールボディの結果と完全に一致した) その後 plant のサンプルの化学分析から Ru は酸化物であることが明らかになり、それ故 non-trans-potable と見なしうることがわかった。

初期の肺の Dose commitment の評価は事故数日後に行われ、最初は ICRP-2 の 90 日の有効半減期が、次には文献調査による 132 日と 141 日のデータが利用された。

しかし、この段階で、最も最悪のケースとして、生物学的な移行がないとして、物理半減期の 369 日を有効半減期として計算することが決められた。

将来の雇用の初期決定は、体外計測に基づく実際の有効半減が明らかとなるまで、この最悪のケースを基にする。

Windscale のホールボディカウンター (図 (8-3-1) 参照)

鉄 室 : 鉄 14 cm, 鉛, 3 mm, 仕上げステンレススティール

検出器 : NaI (Tl) 12 cm ϕ × 10 cm コリメータ付

7 cm ϕ × 13 cm

スキャニング機構付

測定方法 ① Single-crystal detector measurement

スキャニング可能 測定 約4分 (MPLBの1%検出可)

② Double (opposed)-crystal geometry

depth の検出が可能

③ Six-crystal geometry

体軸方向の核種の分布が把握できる

体軸方向の分布について 10% 以下の感度化

1974 年から使用

人体等価ファントムを用いて NRPB (National Radiological Protection Board) と Windscale の WBC を比較実験し検討している。

(2) 結 果

35人中11人について約3年間ホールボディカウンタによる追跡が行われ肺からのクリアランスパターンが全ケースについて解析され最小二乗法によるフィッティングを行れ、3年後においても、単一指数関数が当てはまることがわかった。図(8-3-2) (8-3-3) (8-3-4) にその結果を示す。これから求めた 11 名の有効半減期と生物学的半減期を表(8-3-1)に示す。2名(この2名は、有効半減期が物理半減期を越え、これは、測定のポジショニングエラーによるものと考えられるので除外した)を除く 9名について得られた有効半減期は 308 ± 36 日、生物学的半減期 1863 日(約5年)であった。

Ru-106 日、スキャニングデータから肺に局存していることがわかった。図(8-3-5) 図(8-3-6) mediastinal lymph を含む他の臓器には移行は認められなかった。

表(8-3-1)のSubject 1 と 2 の初期糞を分析したが。そのうち1名のみが意味のあるサンプリングができた。その結果初期糞排泄量は $88.2 \mu\text{Ci}$ で、これが GI tract を通過した量である。(表(8-3-2)参照) この値は GI tract の年間許容線量のオーダーで残り 10 名は年間許容線量の 1/4 以下であった。

肺の線量評価は次項(1)式を用いて行った。

$$\begin{aligned} \text{Dose} &= 3.2 \times 10^9 \times \epsilon \times 1.6 \times 10^6 \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{m} \times R_0 \int_{t_1}^{t_2} e \times P(\lambda t) dt (\text{rem}) \\ &= 0.103 \times R_0 \times \text{Teff} (\text{rem}) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ϵ : 肺の Ru-106 に対する有効エネルギー 1.4 MeV

m : 肺の質量

R_0 : 肺に長期残留分として留っている Ru-106 の初期値 (μCi)

(1)式で計算した 11 名の Dose commitment を表(8-3-3) に示す。

Subject 1 を除く 10 名の肺の線量は、肺の年間許容被曝線量 15 rem／年以下であった。今回のケースでは、肺が最も高いリスクを受ける臓器であることは明らかである。その他の臓器の線量は Subject 1 の GI tract を除いて放射線生物学的に insignificant であった。

(3) 検 討

今回の事故から明らかなように、個人の受けた摂取の重大さを出来る限り早く評価するため以下の情報が役立つ

(a) 最も高い被曝を受けた個人を同定する

ある状況下で、ある核種について、医療処置は可能か？

(b) 重大な被曝を受けていない人を安心させること

このことは将来の intensive な study からの人を解放し、モニタリングをより高被曝のグループに集中させることを可能にする。

(c) 摂取が生じたプラントから環境モニタリングの結果を補足する

バックアップデータを準備すること。

(4) 結 論

- ホールボディモニタリング施設は常に準備された状態に維持され定常的な校正が、施設で予想される全ての核種について行われていること。

- 悲観的ではあるが、しかし信用できる有効半減期が、radiological status を決定するのに使用する初期の線量預託の計算に用いられるべきである。

- 公にされている有効半減期は注意深く用いられるべきで、in vivo 計測の代用として使用できるものではない。

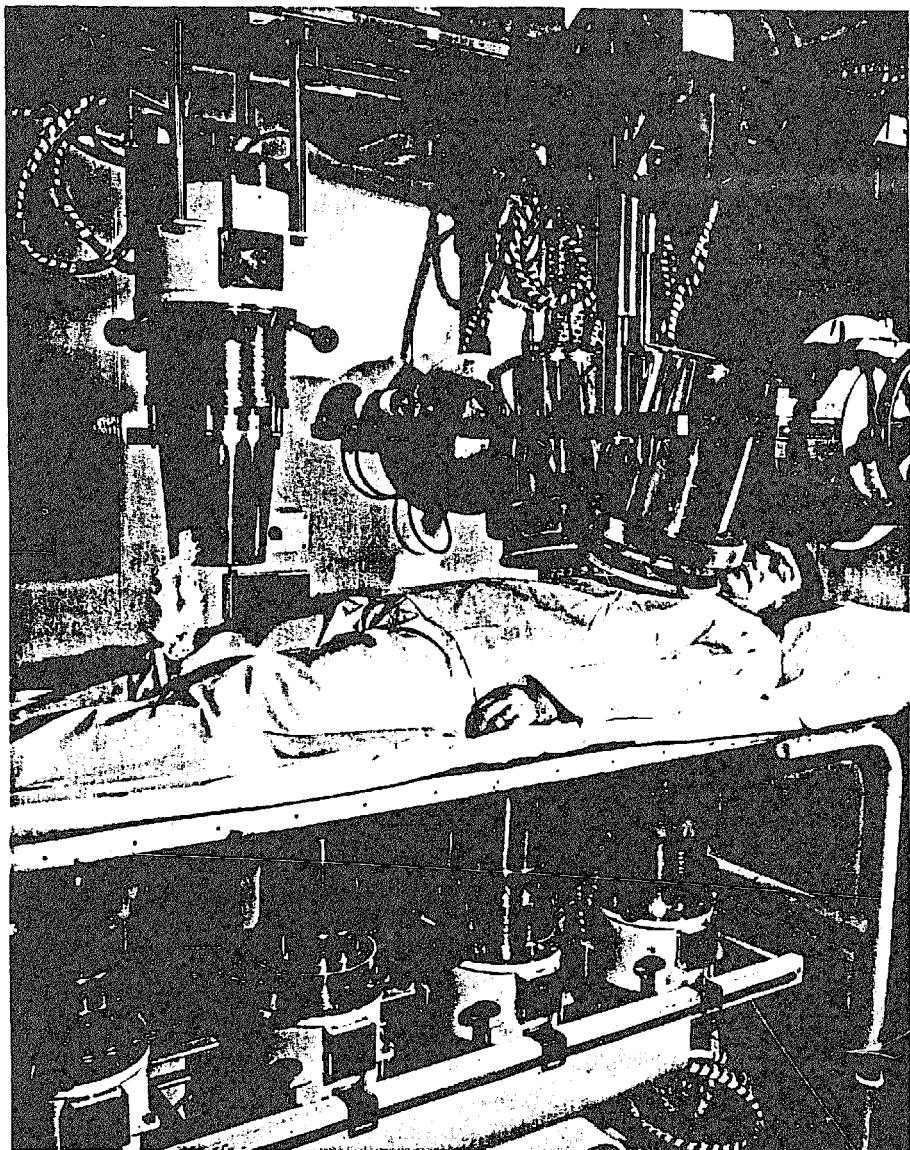
- 初期の in vivo 評価に引き続いて、継続的な注意が測定技術の改良に注がるべきである。

- 今回の場合 in vivo 計測と評価技術が、その system の信頼を増すのに役立った。

肺の Ru - 106 酸化物に対する平均有効半減期は 308 ± 36 日で公表されているデータよりもかなり長い。

- 少数の糞分析データでは全員の GI tract の直接的な評価に役立たない。完全な糞の排泄データは、将来の肺からの移行に関する情報を入手する上で有用である。

以上



図(8-3-1) The Windscale whole-body counter low background room. (Uranium system to lower right.)

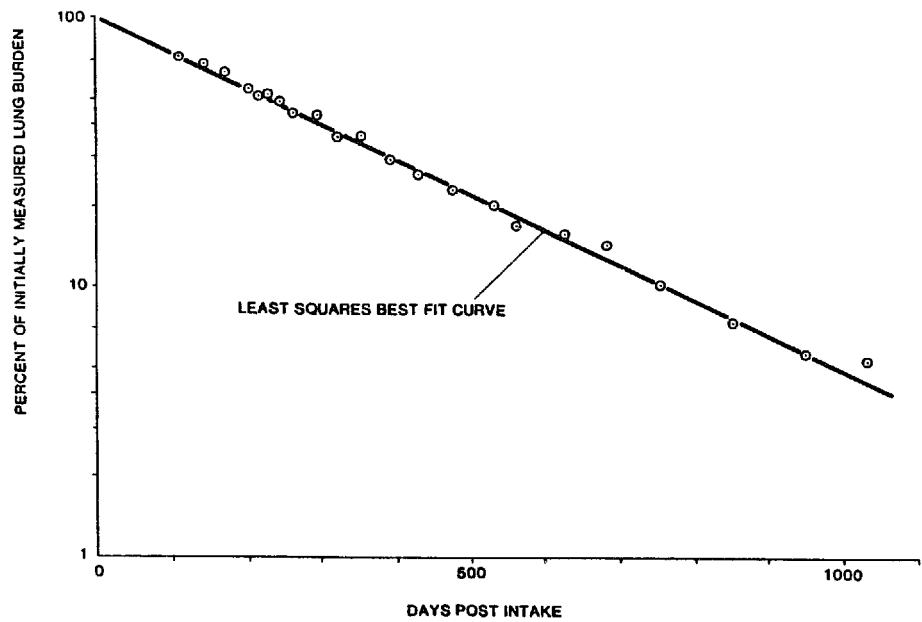


図 (8-3-2) *In-vivo measurement data, subject number 1, six-crystal geometry, $T_{\frac{1}{2} \text{eff.}} = 232 \text{ days.}$*

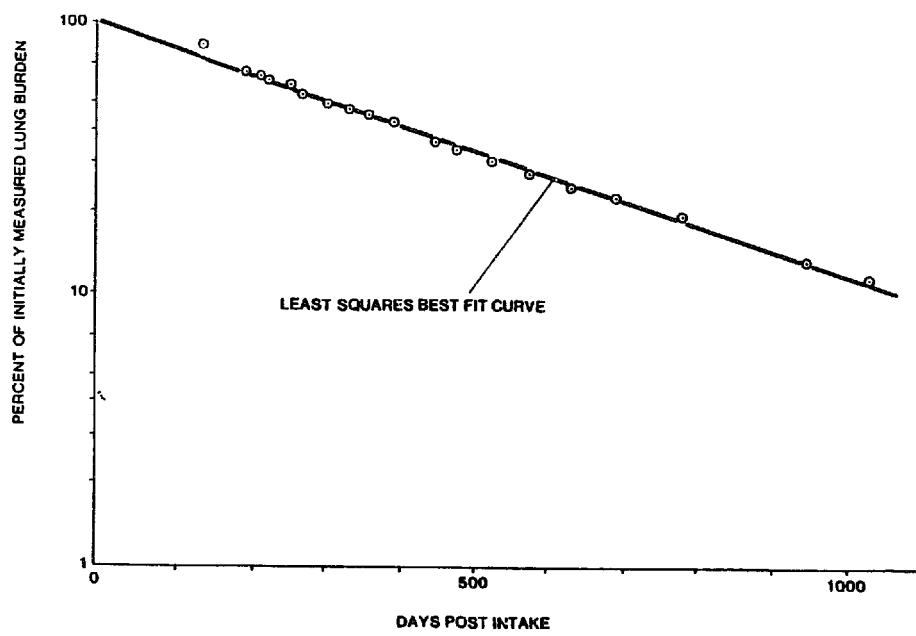


図 (8-3-3) *In-vivo measurement data, subject number 2, six-crystal geometry, $T_{\frac{1}{2} \text{eff.}} = 318 \text{ days.}$*

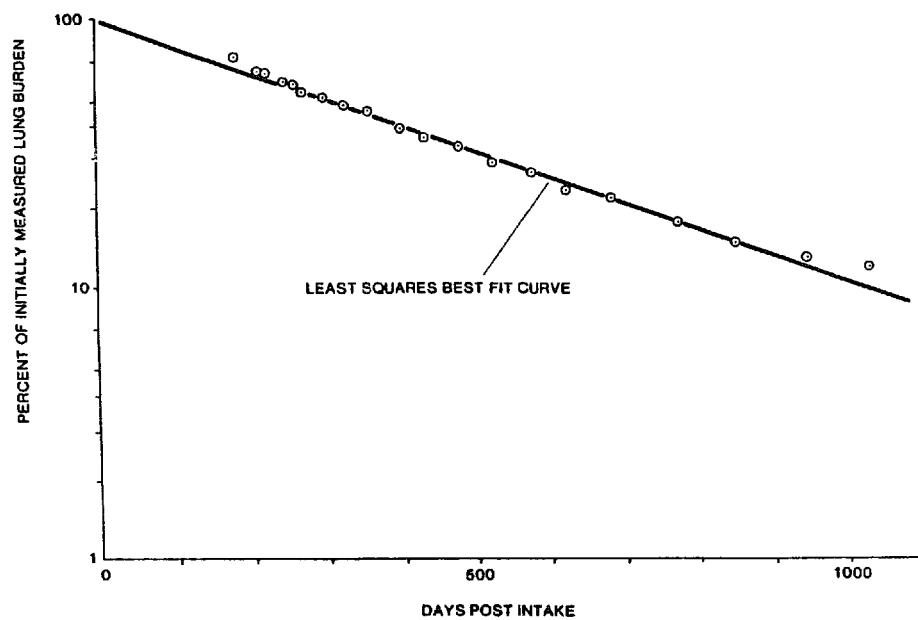


図 (8-3-4) *In-vivo measurement data, subject number 11, six-crystal geometry, $T_{\frac{1}{2}} \text{eff.} = 314 \text{ days}$.*

表 (8-3-1) INITIALLY RETAINED LUNG BURDENS AND HALF-LIVES IN CHEST

Subject number	Initially retained lung burden (μCi)	Effective half-life (d)	Biological half-life (d)
1 ^a	42.8	232	625
2 ^a	4.72	318	2301
3	4.08	334	3521
4	3.16	314	2107
5	2.39	300	1604
6	2.35	272	1035
7	1.58	365	—
8	1.33	422	—
9	1.26	327	2873
10	1.19	393	—
11 ^a	1.11	314	2107

^a Subjects illustrated in 図 (8-3-2) to 図 (8-3-4)

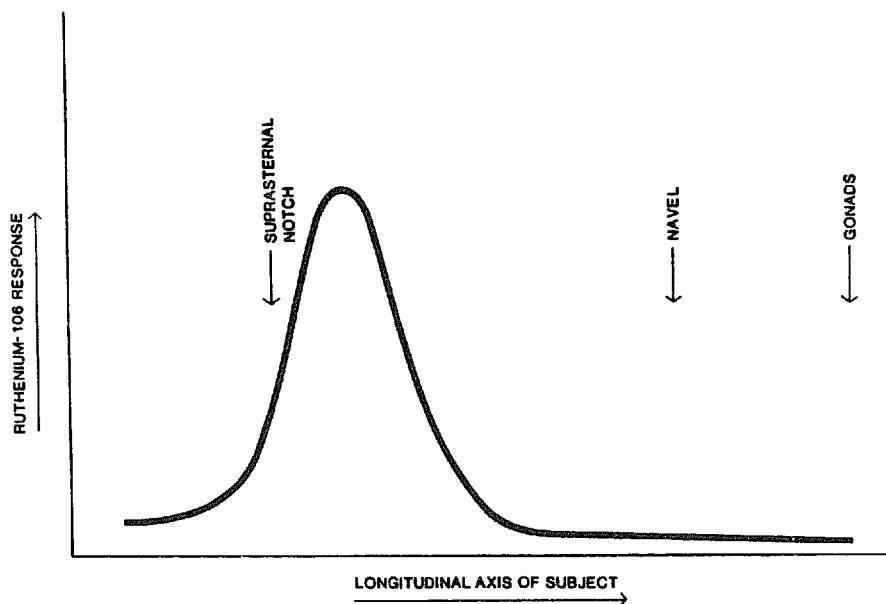


図 (8-3-5) Typical in-vivo longitudinal scan (mid line scan) (10 mm X 70 mm slit collimator).

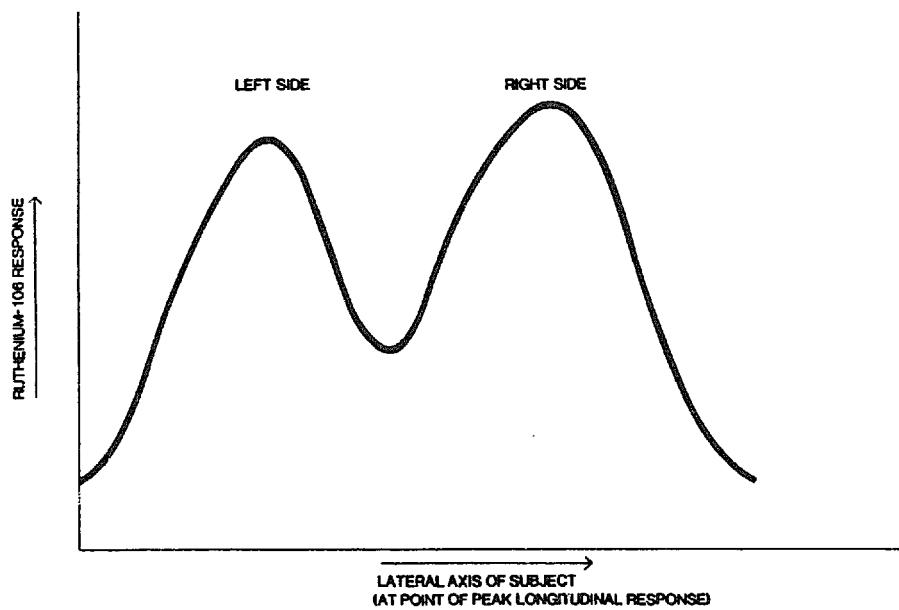


図 (8-3-6) Typical in-vivo lateral scan (at point of peak longitudinal response) (10 mm X 70 mm slit collimator).

表 (8-3-2) SUBJECT 1 - FAECAL EXCRETION

Day post intake	Wt of sample (g)	$\mu\text{Ci}^{106}\text{Ru}$ per sample
1	198	20.0
3	135	51.0
4	160	14.2
5	129	3.0

表 (8-3-3) LUNG DOSE COMMITMENTS

Subject No.	Dose commitment (rem)
1	1023
2	155
3	140
4	102
5	74
6	66
7	59
8	51
9	42
10	45
11	36