

微量放射性ヨウ素の急性とりこみ時における甲状腺
線量簡易評価法を検討するための試算（その1）

Preliminary Study on the Practical Estimation Method of
the Thyroidal Dose for the Acute Intake of Radioiodine Isotopes (I)

1976年12月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

この資料は，社内における検討，周知を目的とする社内資料です。

1976年12月23日

N843-76-10

微量放射性よう素の急性とりこみ時における甲状腺 線量簡易評価法を検討するための試算（その1）

実施責任者 木 下 睦[※]
報 告 者 岸 本 洋一郎[※]
篠 原 邦 彦[※]

期 間 1976年11月24日～1976年12月15日

要 旨 甲状腺中よう素の代謝を表わす1区画モデルは、急性とりこみ時の初期のとりこみの様子を正しく表現しない。この点を3区画モデルを用いて明らかにするとともに、今後放射線管理現場での線量評価法を検討するための基礎となるデータをとりまとめた。

目 次

1. 計 算 方 法	1
1) 1区画モデル	1
2) 3区画モデル	3
2. 結 果	7
1) 3区画モデルについての計算結果	7
2) 1区画モデルと3区画モデルの比較	8
3. 考 察	21
参 考 文 献	23

1 計 算 方 法

次の2つのモデルを用いて、放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みと残留量および積算吸収線量の計算を行った。

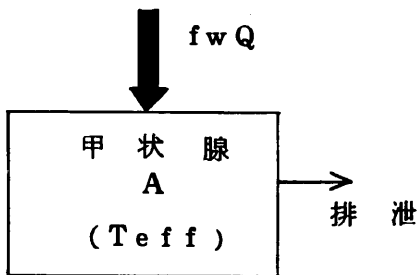
- a) 1区画モデル (Single compartment model)
- b) 3区画モデル (Three compartment model)

計算結果の評価においては、3区画モデルが正当であると仮定し、すべての議論はその仮定のもとに行なった。

1) 1区画モデル

ICRP Publication 2¹⁾で記述されているデータは生物学的半減期を考慮した各臓器についての1区画モデルをもとに与えられている。このモデルは長期間の取り込み(50年間の一定レベルでの被曝)を考慮して作成されたものであり短時間の1回摂取に対し直接適用することは困難である。

1区画モデルは、図-1のように表現される。



ここで fw は、経口摂取した放射性核種の関連臓器に達する割合であり、 Q は摂取した量、そして T_{eff} は実効半減期である。

このモデルは、式(1-1)のように簡単な線形1次の微分方程式により表わすことができる。

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda_{eff} A \quad (1-1)$$

図-1 1区画モデル

ここで、 $\lambda_{eff} = \ln 2 / T_{eff}$ である。初期条件を、 $t=0$ で、 $A(0) = fwQ$ とすると、

$$A(t) = fwQ \cdot \exp(-\lambda_{eff} \cdot t) \quad (1-2)$$

となる。ICRP Pub. 2では、 $fw = f_1 \cdot f'_2$

と与えられている。ここで

f_1 = 摂取された放射性核種の血液に達する割合。

f'_2 = 血液中の核種の関連臓器に達する割合。

ヨウ素について、 $f_1 = 1.0$ 、 $f'_2 = 0.3$ と与えられており、よって $fw = 0.3$ となる。ところで、 fw の値は次のような前提を持って決定されていることがわかる。図-1で甲状腺への連続的な安定ヨウ素の摂取を考えると、式(1-3)が成り立つ。

$$\frac{dS}{dt} = f_1 \cdot f'_2 \cdot Q_s - \lambda_b S \quad (1-3)$$

S = 甲状腺中安定ヨウ素量 ($m\mu$)

Q_s = 安定ヨウ素の日摂取量 ($m\mu/\text{日}$)

λ_b = 生物学的除去係数 ($1/\text{日}$)

定常状態 (静的平衡状態), すなわち $\frac{dS}{dt} = 0$ では,

$$f_1 \cdot f'_2 \cdot Q_s = \lambda_b S$$

$$S = \frac{f_1 \cdot f'_2}{\lambda_b} Q_s$$

$$= \frac{f_w}{\lambda_b} Q_s \quad (f_w = f_1 \cdot f'_2)$$

ここで, 生物学的半減期 $T_b = 138$ 日, $Q_s = 0.2m\mu/\text{日}$ (以上, ICRP Pub. 2 の標準人のデータ) および $f_w = 0.3$ から, $S = 12m\mu$ となる。

したがって, 式 (1-2) により算出される値 ($f_w = 0.3$) は, 標準人について,

$$T_b = 138 \text{ 日}$$

$$Q_s = 0.2m\mu/\text{日}$$

$$S = 12m\mu$$

であることを前提としている。

換言すると, 甲状腺ヨウ素の代謝を 1 区画モデルにより近似するさいに必要な λ_b (または T_b) および f_w という 2 つの生物学的パラメータは, 甲状腺中の安定ヨウ素量 S および安定ヨウ素の日摂取量 Q_s と

$$\frac{f_w}{\lambda_b} = \frac{S}{Q_s} \quad (1-4)$$

なる関係にあり, ICRP で用いられている $f_w = 0.3$, $T_b = 138$ 日, $S = 12m\mu$, $Q_s = 200\mu\mu/\text{日}$ なる 4 つの値は (1-4) の関係を満足する値の組合せである。

なお, 吸入による急性とりこみの場合は, 図-1 の経口摂取による甲状腺のとりこみ (uptake) 率である $f_w Q$ を $f_a Q$ におきかえればよく, ICRP Pub. 2 では, 可溶性物質に対し

$$f_a = (0.25 + 0.5 f_1) f'_2$$

とし, 甲状腺ヨウ素について $f_1 = 1.0$ および $f'_2 = 0.3$ としているから, 結局 $f_a = 0.75 f_w$ であると考えればよい。すなわち, ヨウ素の吸入による甲状腺とりこみは, 経口摂取による甲状腺とりこみの 75% である, もしくは, 同じ甲状腺とりこみを与える吸入量は, 経口摂取量の 1.33 倍であると考えればよい。本試算において吸入と経口摂取の違いはこの点だけであるから, 以下の経口摂取に対する議論は, この差を考慮すれば吸入についてもあてはまる。

吸収線量率は次の式 (1-5) で与えられる。

$$D_r(t) = \frac{3.7 \times 10^4 \cdot 1.6 \times 10^{-6}}{100m} \cdot A(t) \cdot \epsilon \text{ (rad/sec)} \quad (1-5)$$

m = 甲状腺質量 (20.0g …… 標準人)

ϵ = 実効エネルギー (MeV/dis)

積算吸収線量は式(1-6)で与えられる。

$$D(\text{rad}) = \int_0^T D_r(t) dt$$

$$= \frac{3.7 \times 10^4 \cdot 1.6 \times 10^{-6}}{100m} \cdot f_w \cdot Q \cdot \epsilon \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{eff}} \cdot T)}{\lambda_{\text{eff}}} \quad (1-6)$$

表-1に計算で使用したパラメータを示す。

表-1 計算で使用した核種別のパラメータ¹⁾

核種 パラメータ	¹³¹ I	¹³² I	¹³³ I	¹³⁴ I	¹³⁵ I
T_r (hr)	193.2	233	2088	0.86	6.72
T_{eff} (hr)	18255	233	2075	0.86	6.71
λ_{eff} (1/hr)	3.797×10^{-3}	0.298	0.0334	0.804	0.103
ϵ (MeV/dis)	0.23	0.65	0.54	0.82	0.52

2) 3区画モデル

ヨウ素の人体中代謝モデルとして、Breuer⁵⁾らはBrownell⁴⁾およびRamsden⁶⁾らの4区画モデルを折衷した3区画モデルを与えている。3区画モデルは図-2のように表わされる。

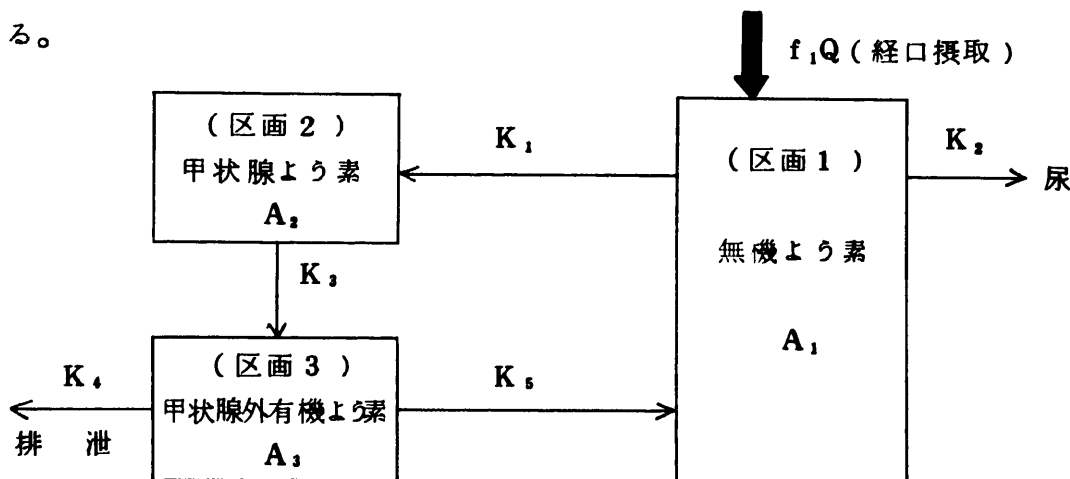


図-2 3区画モデル

区画1は、摂取したよう素 ($f_1 Q$) が無機よう素として存在する区画で、よう化物が plasma および body fluid 中に存在する (よう化物空間⁶⁾とも呼ばれる)。区画1のよう素は、移行割合 K_1, K_2 をもつ それぞれ尿と甲状腺に移行する。この時、よう素は有機よう素 (thyroglobulin) となって甲状腺中 (区画2) に存在する。⁶⁾ 区画2からは、 K_3 の移行割合で、thyroxine または triiodothyronine として、甲状腺外 (区画3) へ移行する。⁶⁾ 区画3では、有機よう素の一部が無機よう素に変わり区画1へ移行割合 K_4 で移行し、残りは有機よう素として移行割合 K_5 で排泄される。⁶⁾

移行割合 $K_1 \sim K_5$ は、このモデルでの、よう素体謝の解析をする際に最も重要なものである。 $K_2 \sim K_5$ については、文献調査によると大差はないが、 K_1 の値は、表-2のようにさまざまである。

表-2 K_1 値

文 献	K_1 (1/日)
1. Colard ⁴⁾	$\frac{134.5}{X}$
2. Ramsden ⁵⁾	$\frac{154}{X+6.6}$
3. Breuer ⁵⁾	$\frac{144}{X+6.2}$
4. Johnson ²⁾	0.93
5. Ramsden ⁶⁾	0.72~2.16 (平均1.2)

(注) X は安定よう素摂取率 (μg /日)

本試算では、1区画モデルと比較するため $X = 200 \mu g$ /日 としたが、この条件で甲状腺中安定よう素量が $12 m\mu g$ に近い値となる K_1 値とし、文献5)の $K_1 = 1.2$ (1/日) が最もよい値で甲状腺中安定よう素量は $13.1 m\mu g$ となる。しかしながら、本試算では、1区画モデルの $fw = 0.3$ との整合性を考慮し、 $K_1 = \frac{216}{X+6.2}$ を採用した。このとき $K_1 = 1.05$ となり、甲状腺中安定よう素量は $11.42 m\mu g$ となる。($K_2 \sim K_5$ として表-3の値を使用。)

本試算に用いた移行割合 $K_1 \sim K_5$ を表-3に示す。

表-3 3区画モデルの移行割合

	1/日	1/時
K_1	1.05	0.044
K_2	1.92	0.08
K_3	0.0096	4.0×10^{-4}
K_4	4.8×10^{-4}	2.0×10^{-4}
K_5	0.048	2.0×10^{-3}

(注) $K_2 \sim K_5$ の値は、文献6の値を使用

図-2に示した3区画モデルは、次の3元連立1次線形微分方程式で解くことができる。

$$\frac{dA_1}{dt} = -(K_1 + K_2 + \lambda r) \cdot A_1 + K_5 \cdot A_2 + f_1 Q \quad (1-7)$$

$$\frac{dA_2}{dt} = K_1 \cdot A_1 - (K_3 + \lambda r) \cdot A_2 \quad (1-8)$$

$$\frac{dA_3}{dt} = K_3 \cdot A_2 - (K_4 + K_5 + \lambda r) \cdot A_3 \quad (1-9)$$

ここで、 λr = 物理的崩壊定数 (1/日) で、

$$\lambda r = \frac{\ell n 2}{T r}$$

より求められる。 $T r$ は物理的半減期で表-1に示した値を使用した。

安定より素の場合は、 $\lambda r = 0$ とすればよく、この場合、定常状態の安定より素量は、式(1-10)で表わされる。

$$A_2 = \frac{K_1}{K_3 \left(K_1 + K_2 - \frac{K_1 K_5}{K_4 + K_5} \right)} f_1 Q s \quad (1-10)$$

$K_4 \ll K_5$ ならば

$$A_2 = \frac{K_1}{K_2 K_3} Q s \quad (f_1 = 1.0)$$

これを、1区画モデルと比較すると、

$$\frac{f w}{\lambda b} = \frac{K_1}{K_2 K_3}$$

$$f w = \frac{K_1}{K_2 K_3} \lambda b \quad (1-11)$$

$\lambda b = \frac{\ell n 2}{138(\text{日})}$ として、式(1-11)に、表-3の値を代入すると、

$$f w = 0.29$$

となり、1区画モデルで使用した $f w$ は、3区画モデルと式(1-11)の関係を持っていることがわかる。

3区画モデルの解析のためには計算コード IODIDE を作成³⁾した。IODIDE では尿に排泄される放射性ヨウ素量を求めるために、式(1-7)、(1-8)および(1-9)の他に次の式(1-12)を加え、4元連立線形1次微分方程式を解いている。

$$\frac{dA_4}{dt} = K_2 \cdot A_1 - \lambda r \cdot A_4 \quad (1-12)$$

また、吸収線量率 $D(t)$ および積算吸収線量 D の計算は、式(1-13)および(1-14)で行なった。

$$D(t) = \frac{3.7 \times 10^4 \cdot 1.6 \times 10^{-6}}{100\text{m}} \cdot A_3(t) \cdot \epsilon (\text{rad/sec}) \quad (1-13)$$

$$D = \int_0^T D(t) dt \quad (\text{rad}) \quad (1-14)$$

2 結 果

1区画モデル，3区画モデルともに，全経口摂取量を $1\mu\text{Ci}$ とし3区画モデルは $1\mu\text{Ci}$ 全量を1分間，10分間または100分間に経口摂取する3ケースについて計算を行なった。

1) 3区画モデルについての計算結果

図-3～図-8に，放射性ヨウ素5核種についての計算結果として甲状腺中への取りこみと残留曲線および甲状腺積算吸収線量曲線を示す。

これらから明らかなように，100分間までの短時間摂取では，摂取後甲状腺中より素量が最大となったあとの残留曲線は摂取時間に関係なく ^{134}I 以外の核種について大差はない。 ^{134}I については半減期が0.86時間と短かく，100分間にわたっての取り込みにおいては，半減期よりも摂取時間が長くなるため，残留曲線は摂取時間により，やや異なる。摂取中および摂取後甲状腺中のより素量が最大となるまでの曲線は，予想される通りに摂取時間が長くなればなるほど増加率は大きくなっている。それぞれの核種について甲状腺中の放射性ヨウ素量が摂取開始後最大となる時間および最大値は，表-4の通りである。

表-4 図-3～図-5より求めた甲状腺中の放射性ヨウ素量の最大となる
摂取開始後の時間と最大値($1\mu\text{Ci}$ 経口摂取した場合)

核 種		^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I
1分間 摂 取	時 間	25～30時間	2.7～3時間	～12.5時間	～1時間	～6時間
	最大値	$0.31\mu\text{Ci}$	$0.045\mu\text{Ci}$	$0.18\mu\text{Ci}$	$0.0185\mu\text{Ci}$	$0.098\mu\text{Ci}$
10分間 摂 取	時 間	25～30時間	～3時間	～12.5時間	～1.2時間	6～7時間
	最大値	$0.32\mu\text{Ci}$	$0.044\mu\text{Ci}$	$0.18\mu\text{Ci}$	$0.0185\mu\text{Ci}$	$0.098\mu\text{Ci}$
100分 間摂取	時 間	～30時間	～3.8時間	～12.5時間	～2.2時間	6～7時間
	最大値	$0.32\mu\text{Ci}$	$0.045\mu\text{Ci}$	$0.18\mu\text{Ci}$	$0.017\mu\text{Ci}$	$0.098\mu\text{Ci}$

また，図-6～図-8より積算吸収線量は一定時間経過後は平衡に達することがわかる。

表-5に，積算吸収線量が平衡に達するまでの摂取開始後の経過時間と積算吸収線量を示す。

表-5 図-6～図-8より求めた積算吸収線量が平衡に達するまでの経過
時間と積算吸収線量

核種		^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I
1分間 摂取	時間	>1000時間	~30時間	~250時間	~10時間	~90時間
	平衡値	$\geq 22 \text{ rad}$	0.024 rad	0.48 rad	0.0034 rad	0.10 rad
10分間 摂取	時間	>1000時間	~35時間	~250時間	~10時間	~90時間
	平衡値	$\geq 22 \text{ rad}$	0.024 rad	0.48 rad	0.0033 rad	0.10 rad
100分 間摂取	時間	>1000時間	~30時間	~250時間	~10時間	~90時間
	平衡値	$\geq 22 \text{ rad}$	0.024 rad	0.48 rad	0.0034 rad	0.10 rad

表-4および表-5から、甲状腺中の放射性ヨウ素量の最大値と積算吸収線量は、摂取時間が1、10または100分間と変わっても、摂取全量が同じである場合ほぼ同じ値を取ることがわかる。

2) 1区画モデルと3区画モデルの比較

手軽に計算を実行することのできる1区画モデルの適用限界を知るため3区画モデルとの比較を試みた。

図-9～図-13に、1区画モデルによる計算結果と3区画モデルによる計算結果を併記した。これらにより、甲状腺の積算吸収線量については両モデルに何らかの補正因子を導入することで1区画モデルを用いて3区画モデルの近似をすることができそうであると推量できる。この因子を f_d と書き、遅延補正因子と呼ぶことにする。(遅延とは1区画モデルと3区画モデルを比較した場合に甲状腺へ到達し、かつそこから排泄される時間の遅れを意味する。) f_d を式2-1で定義する。

$$f_d = \frac{D_3}{D_1} \quad (2-1)$$

D_1 は、1区画モデルでの、そして D_3 は3区画モデルでの全吸収線量(積算吸収線量の最終値)である。

表-6に図-9～図-13より求めた f_d 値を示す。

表-6 核種別のfd値

項目 核種	fd	¹³¹ Iのfd値を1と した際の相対値	文献7)のf ^(注) 値
¹³¹ I	1.11	1.0	1.0
¹³² I	0.35	0.32	0.35
¹³³ I	0.90	0.81	0.80
¹³⁴ I	0.11	0.10	0.15
¹³⁵ I	0.64	0.58	0.50

(注) 放射性ヨウ素の実際の甲状腺とりこみ量を評価するための補正因子で
事故放出時の吸入摂取による甲状腺被曝量算出に用いている。

表-6には、また文献7)に記されている事故吸入時の線量算出における因子を併記したが、この値と本レポートで求めたfd値を1.0として比較すると表-6のように、非常に良い一致を見出した。

しかしながら、図-9～図-13からもわかるように、fd値による補正により1区画モデルが3区画の近似として使用できるのは、摂取後数時間ないし100時間余りを経過してからであることは注意しなければならず、この辺が1区画モデルの短時間1回摂取の評価における適用限界であるように思われる。

(補 足)

本試算の完了後に、次の事がわかった。

すなわち、 $K_1 \sim K_5$ として、表-3の値にかえて次の値を使用すれば、安定ヨウ素摂取率が $200\mu\text{g}/\text{日}$ の場合、甲状腺中安定ヨウ素は $1206\text{m}\mu\text{g}$ となることがわかった。

$$K_1 = \frac{216}{X + 6.2} \quad (1/\text{日})$$

$$K_2 = 1.92 \quad (1/\text{日})$$

$$K_3 = 0.009 \quad (1/\text{日})$$

$$K_4 = 5 \times 10^{-4} \quad (1/\text{日})$$

$$K_5 = 0.05 \quad (1/\text{日})$$

また、式(1-11)により、 $fw = 0.305$ となる。よって、1区画モデルとの比較のためには、表-3の値よりもこれらの値を使用するほうが良いのかもしれない。(本試算(その2)で検討する。)

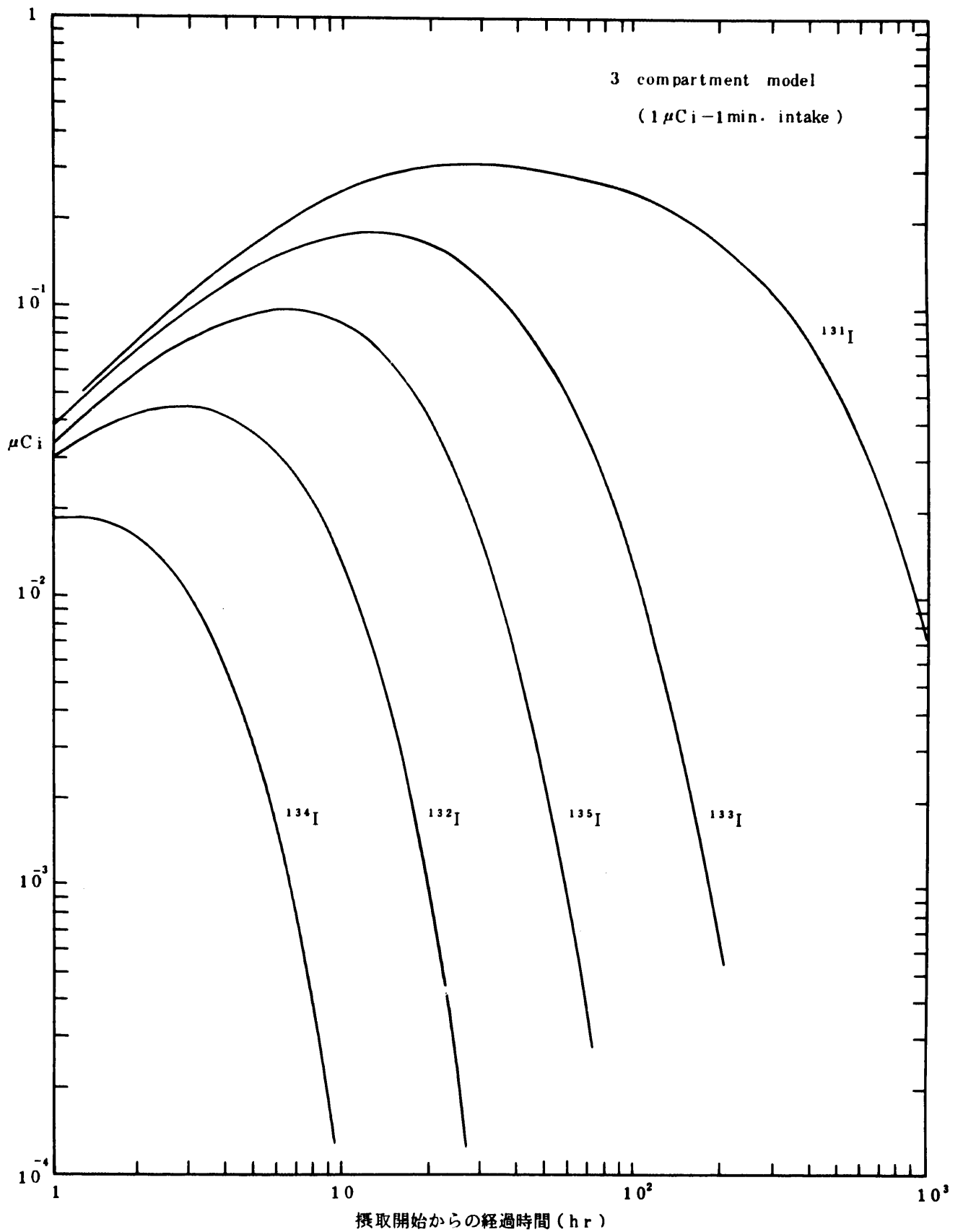


図-3 1回急性摂取時の甲状腺中放射性ヨウ素量

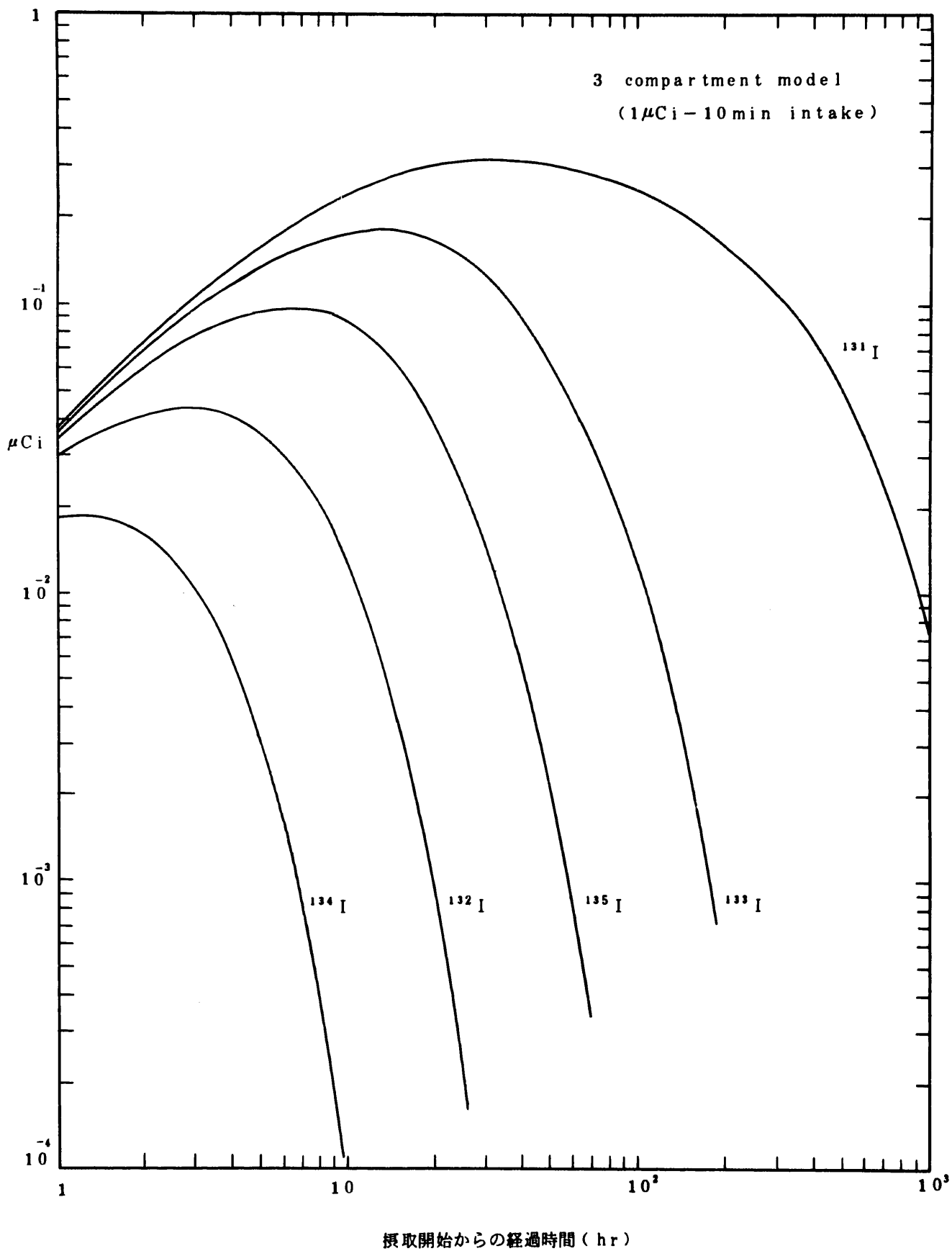


図-4 1回急性摂取時の甲状腺中放射性より素量

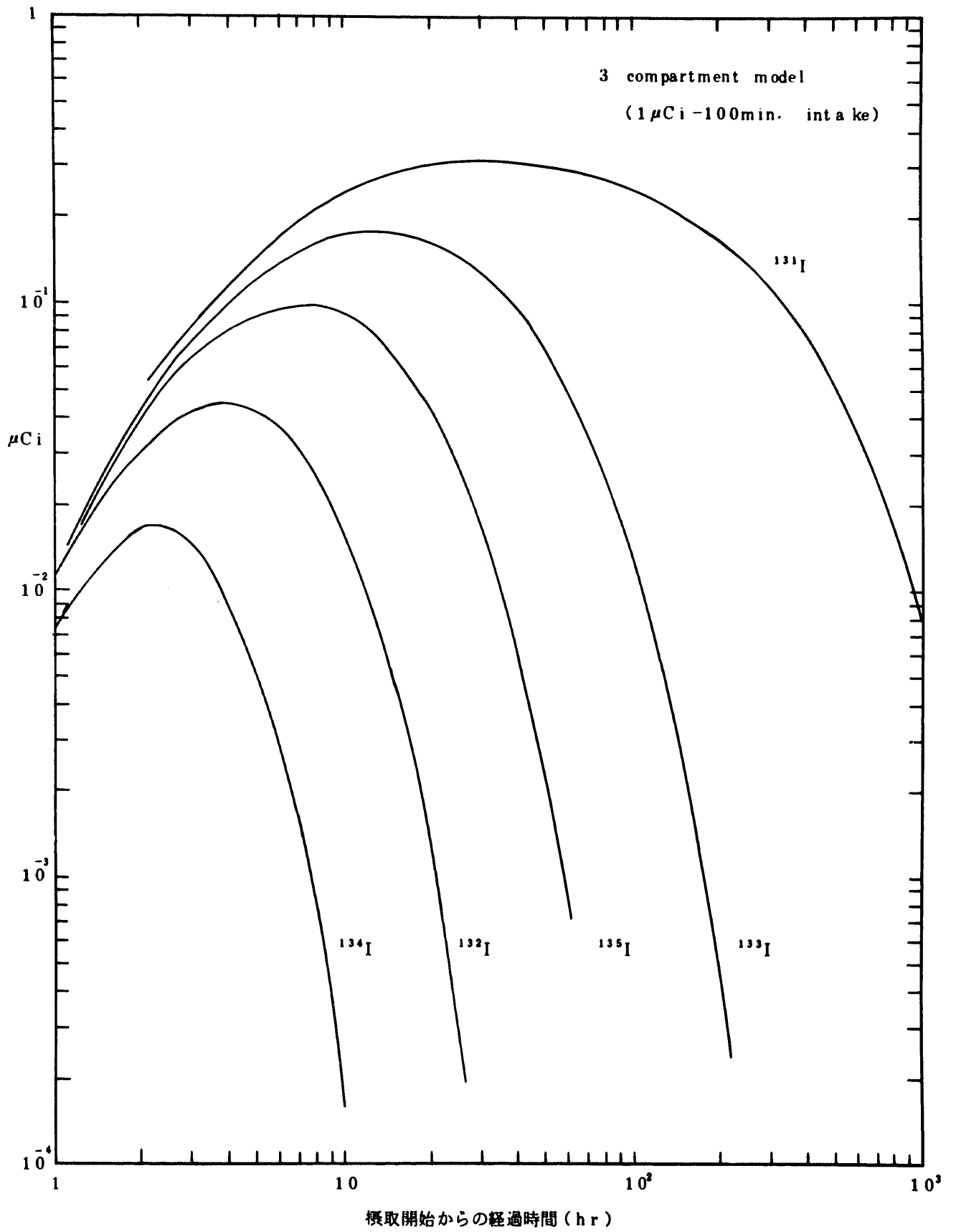


図-5 1回急性摂取時の甲状腺中放射性ヨウ素量

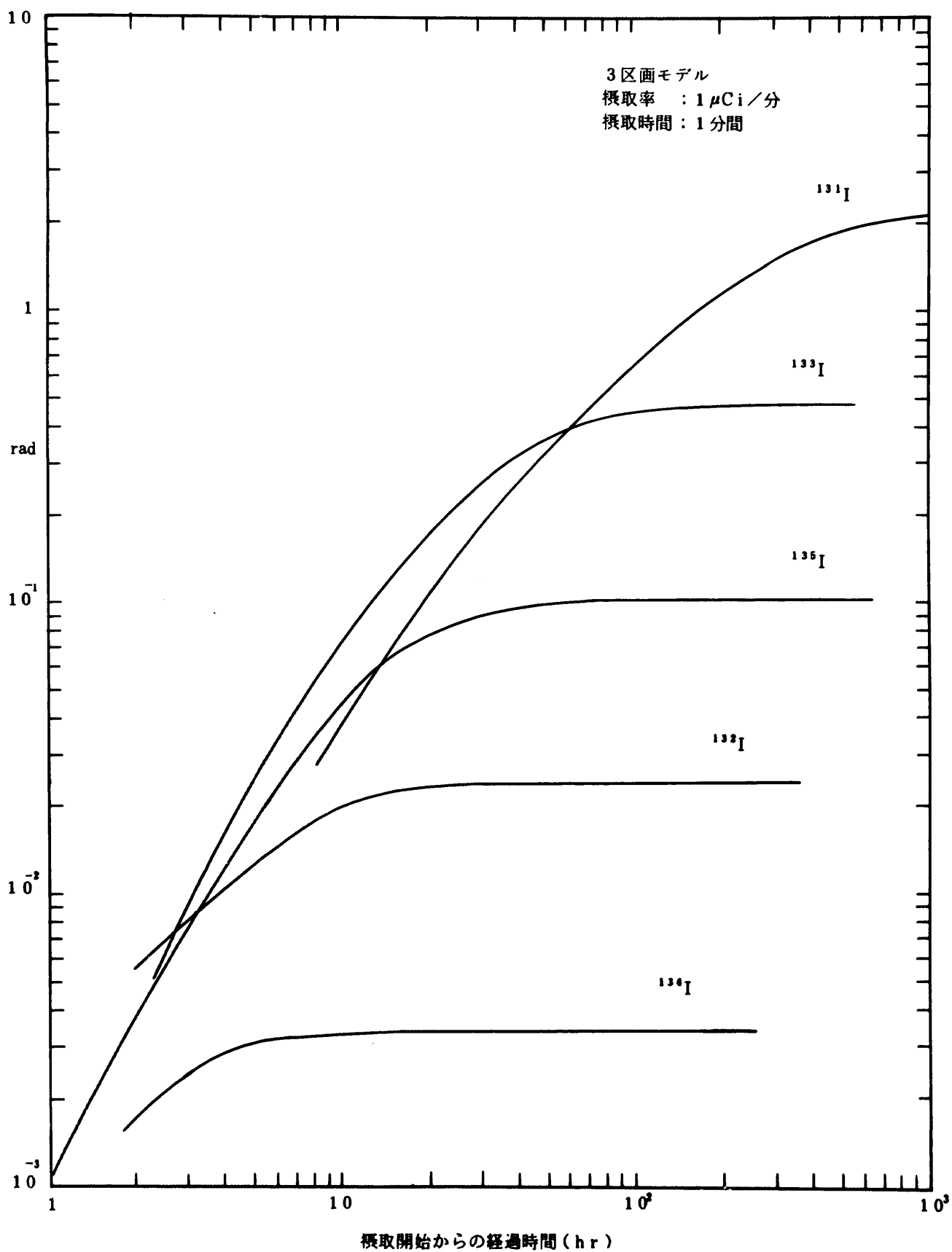


図-6 1回急性摂取時の甲状腺積算吸収線量

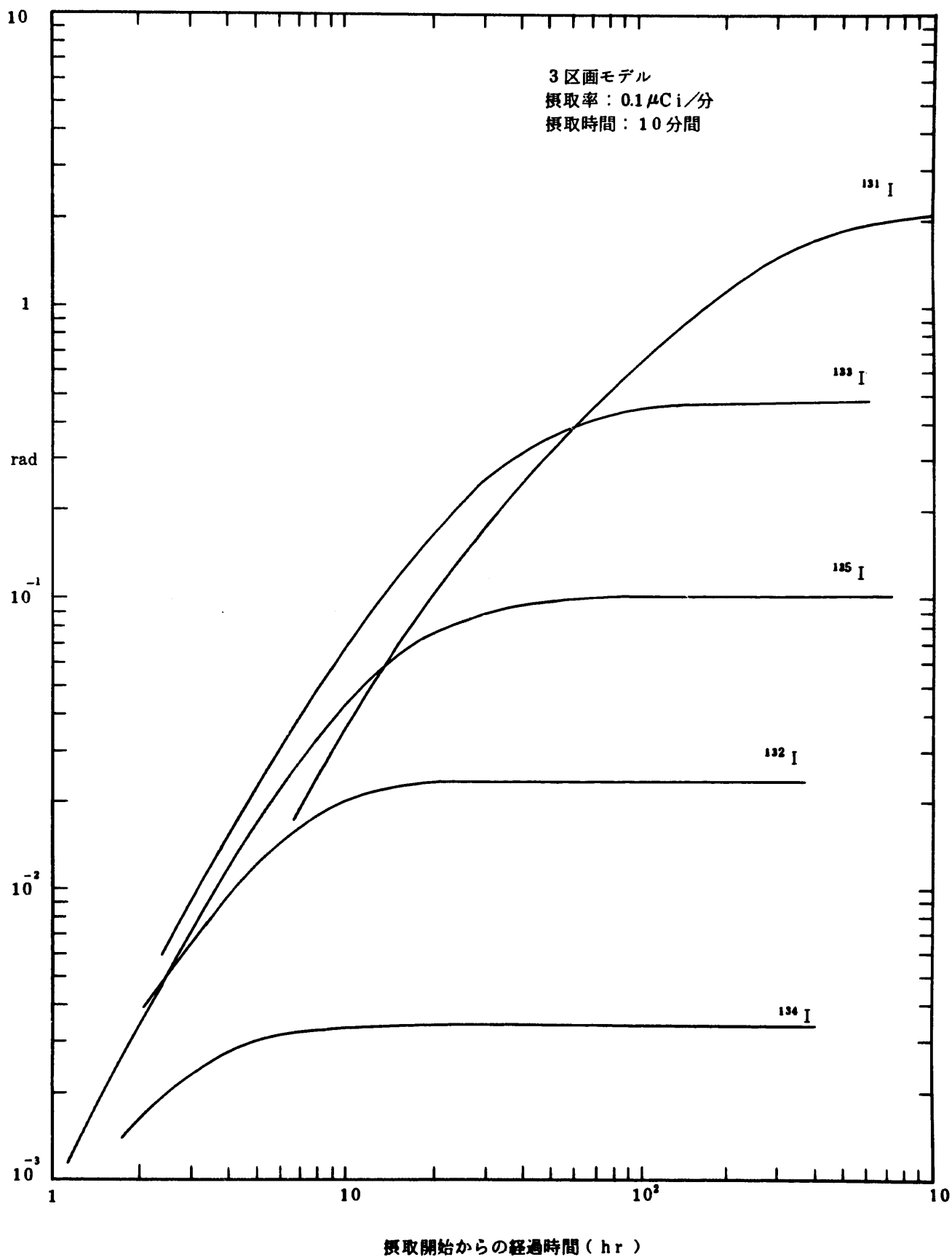


図-7 1回急性摂取時の甲状腺積算吸収線量

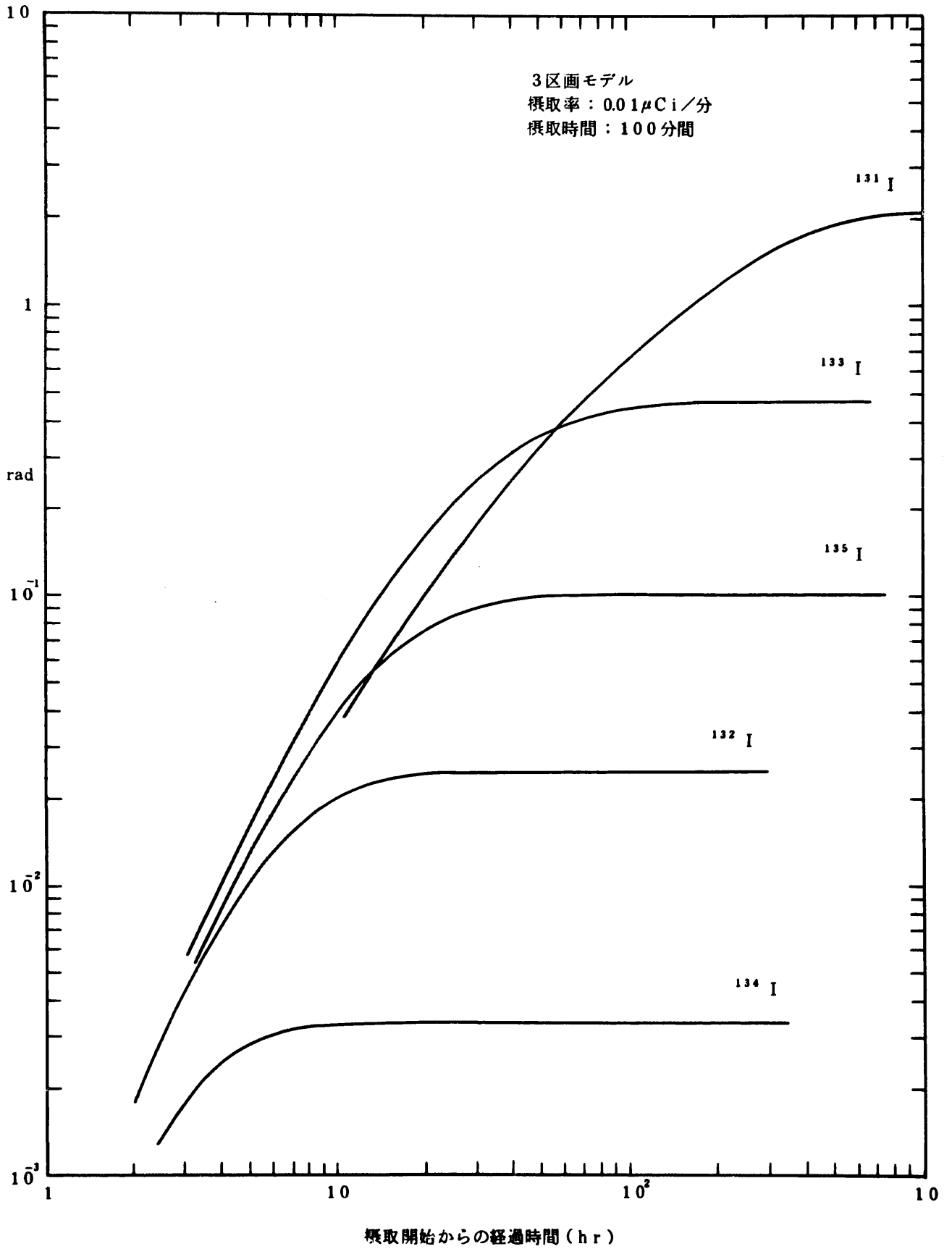


図-8 1回急性摂取時の甲状腺積算吸収線量

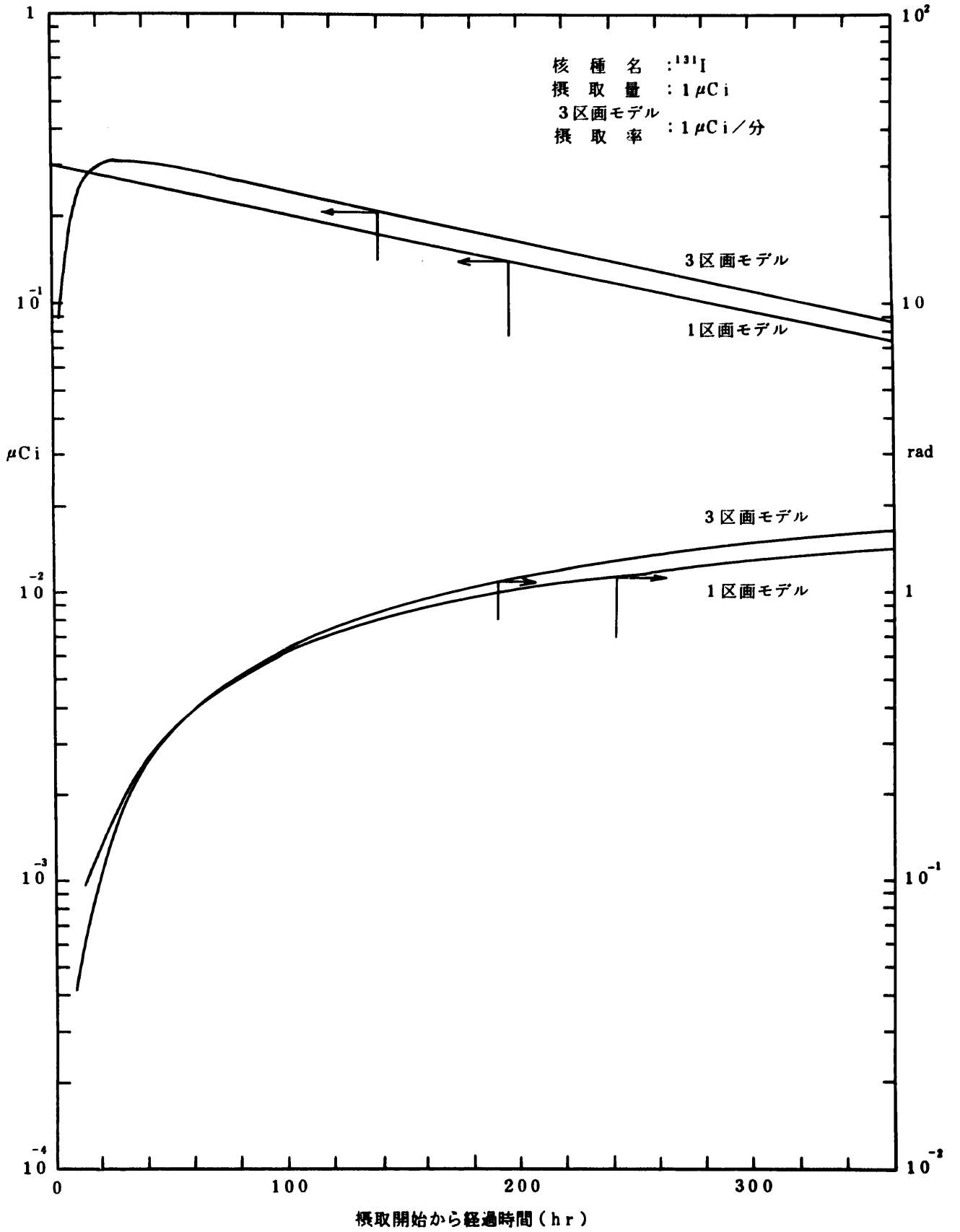


図-9 1区画モデルと3区画モデルの比較

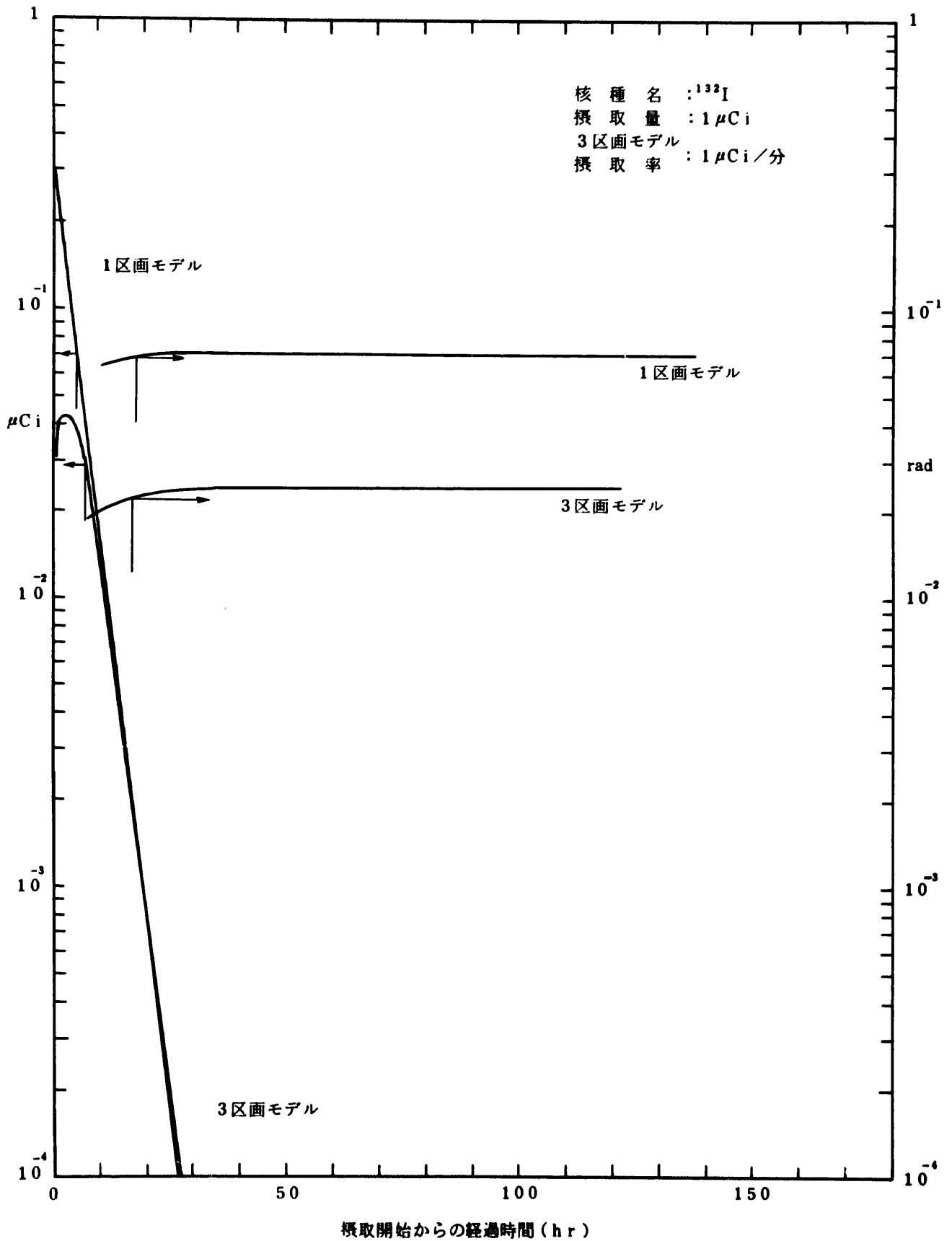


図-10 1区画モデルと3区画モデルの比較

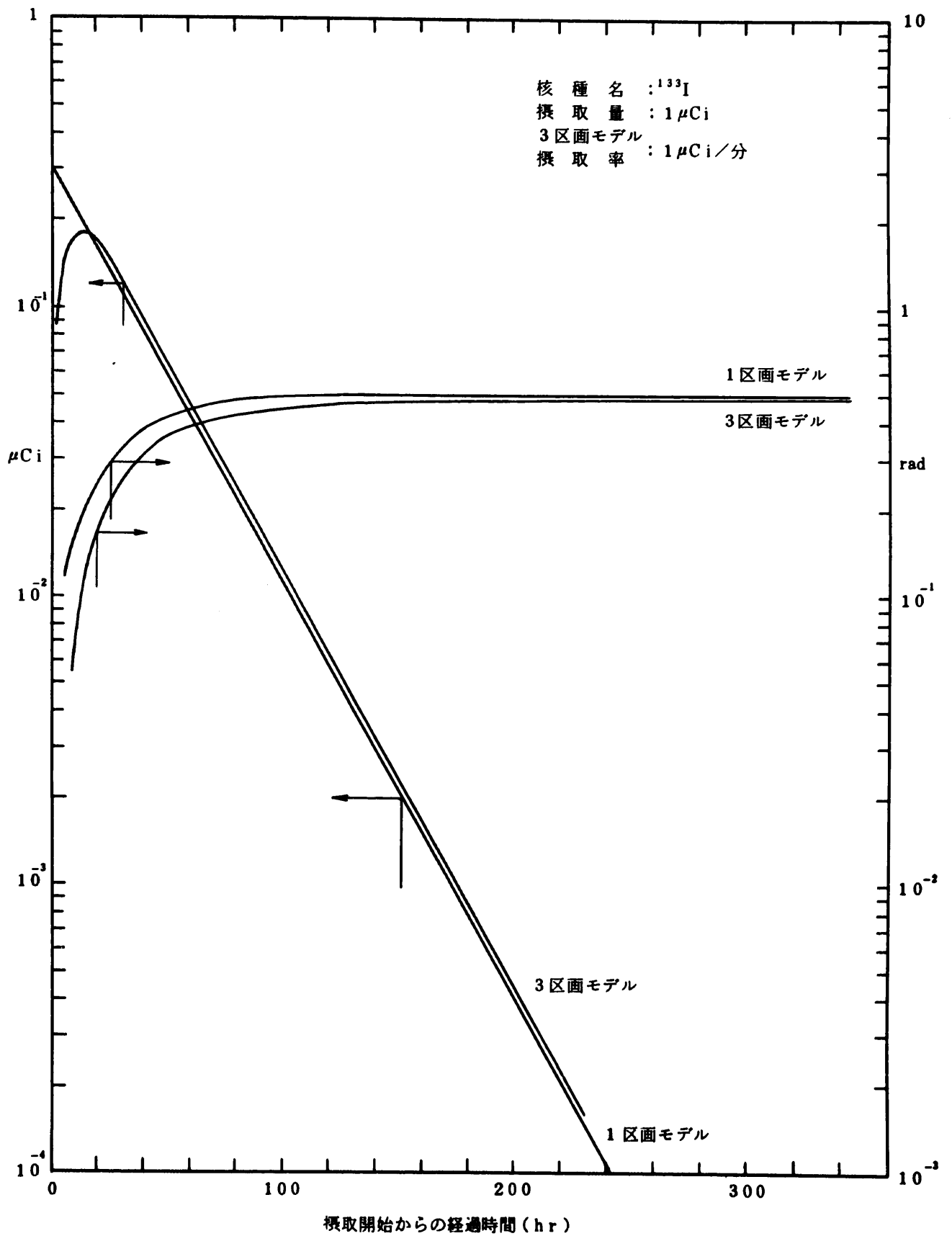


図-11 1区画モデルと3区画モデルの比較

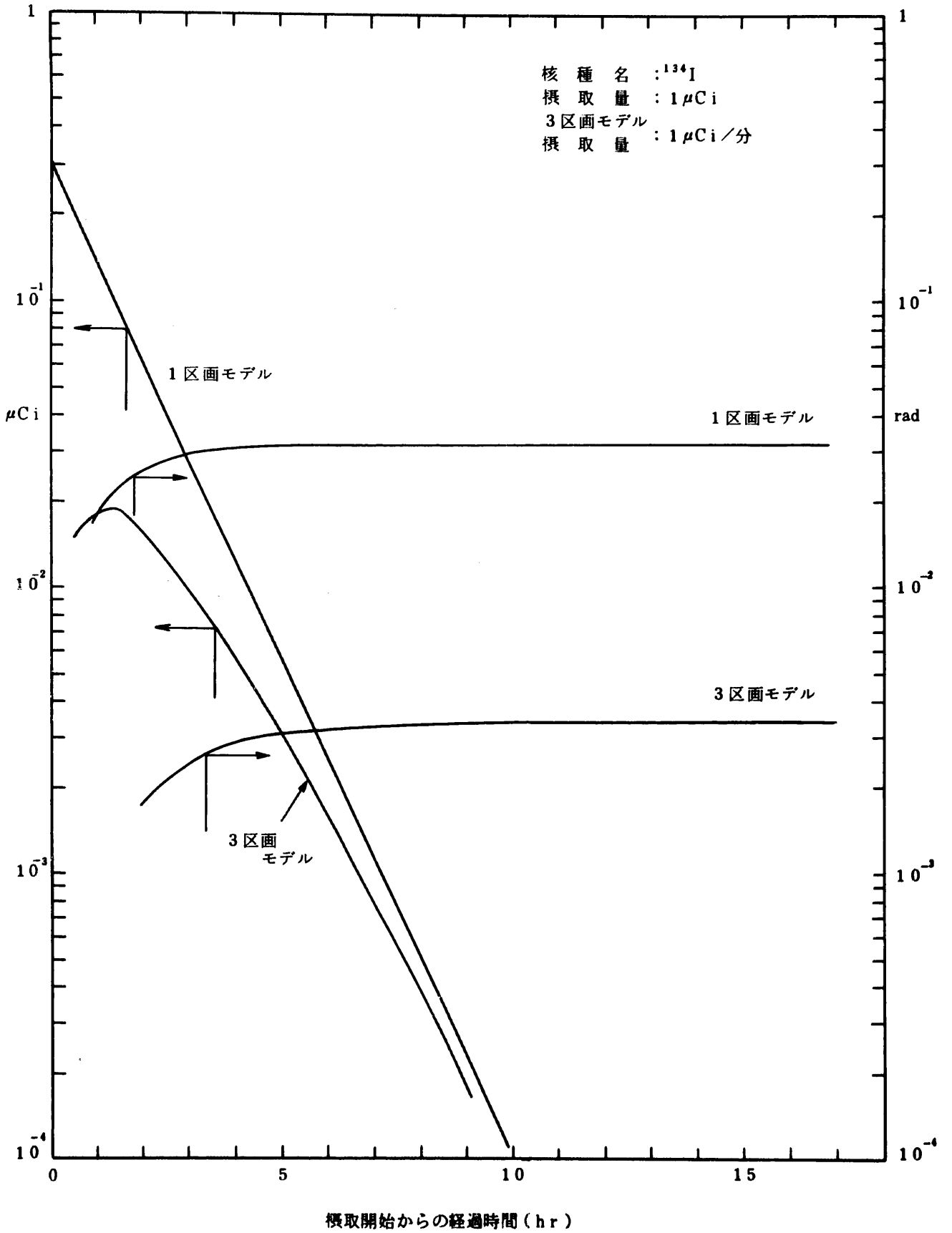


図-12 1区画モデルと3区画モデルの比較

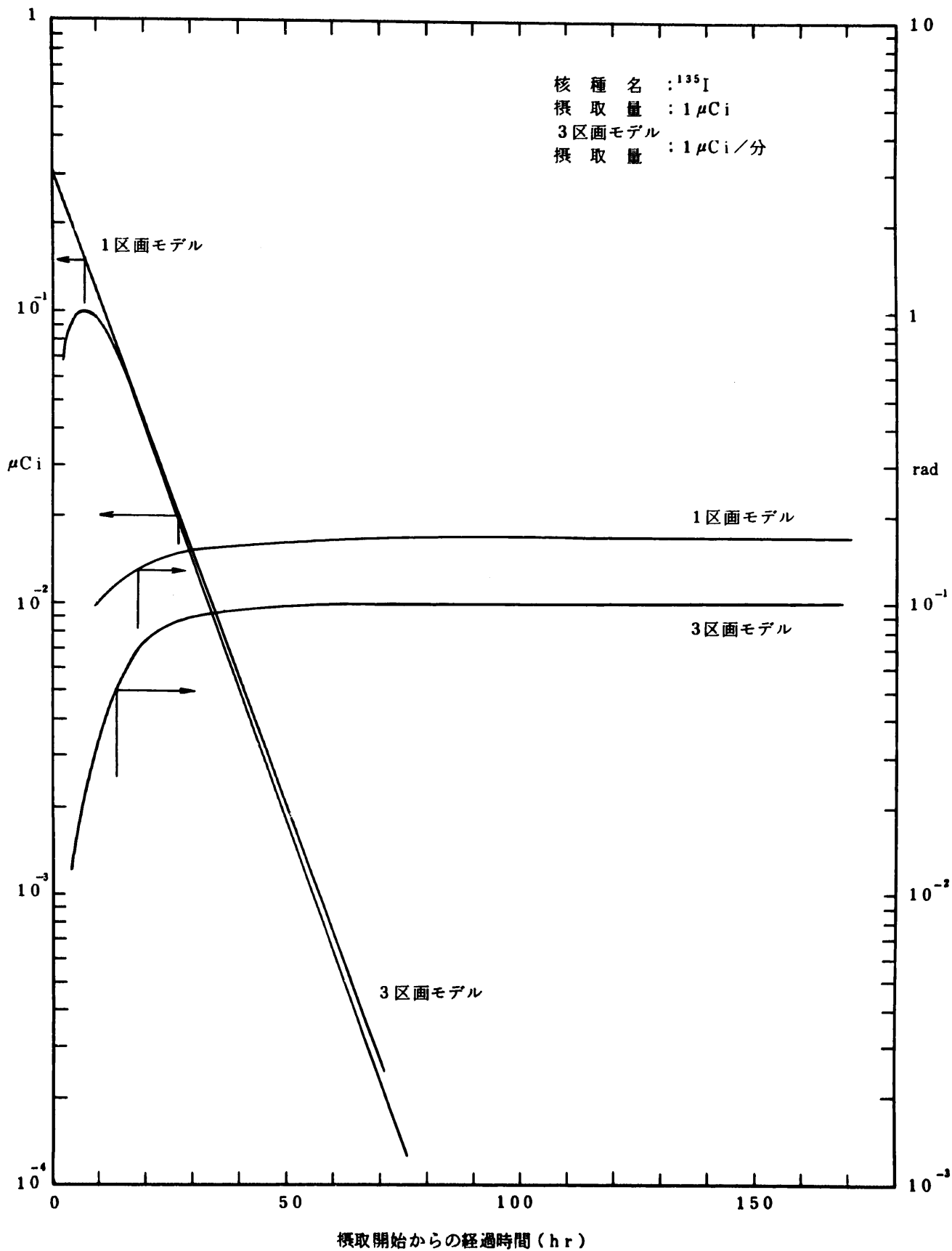


図-13 1区画モデルと3区画モデルの比較

3 考 察

1区画モデルと3区画モデルの計算結果については前述した通りであるが、非常に簡便な1区画モデルも一定の制限を導入すれば短時間1回摂取の場合の線量評価にも適用しうることがわかる。しかしながら本試算で導いたfd値等は、ICRP Publication 2¹⁾の標準人を基本としており、甲状腺中安定ヨウ素量12m μ g、安定ヨウ素摂取率200 μ g/日および生物学的半減期138日が大前提となっていることに注意する必要がある。ICRPでもPublication 10¹⁰⁾では生物学的半減期として100日を採用しており、他の数値もより新しい研究によって変わりつつあるものである。また、日本人の場合には西欧人と比較して安定ヨウ素摂取率は数倍高く300~1000 μ g/日であると言われている。⁹⁾図-14に、安定ヨウ素摂取率1000 μ g/日、甲状腺中安定ヨウ素量20m μ gとした場合の甲状腺中¹³¹I残留曲線を示すが、図-3と比較した場合、最大負荷量は約47%となっており、日本人の場合に特有のパラメータを選択する必要があることを示唆している。文献9)では、日本人のfw値として0.2を与えている。fw=0.2とした場合、移行割合K₁は、式(1-11)より、K₂、K₃が変わらないものとして、K₁=0.69(1/日)となる。また、式K₁= $\frac{216}{X+6.2}$ では、X=300 μ g/日で、K₁=0.70(1/日)となる。しかしながら、これらの値も、移行割合K₂~K₃が変化しないと仮定した場合で、日本人特有の移行割合をK₁~K₃について求める必要があるかもしれない。

本試算で使った3区画モデルの移行割合K₁~K₃は、ICRP Publication 2および10の1区画モデルとの比較には適した値であると思われる。表-4で¹³¹Iの甲状腺中ヨウ素の最大量は、約0.3 μ Ci/1 μ Ci摂取であり、これはICRP Publication 10の次の記述と比較できる。

「……，放射性ヨウ素が血中に入ると、それは甲状腺に取り込まれ、¹³¹Iの1回摂取後約24時間で最大濃度に達する。……」

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

$$R(t) = K_1 \exp\left(-\frac{0.693}{Tb_1} t\right) + K_2 \exp\left(-\frac{0.693}{Tb_2} t\right)$$

K₁ + K₂ = 1であり、また第2項が甲状腺中の残留をあらわすと、一般に認められているようである。……。K₂は放射性ヨウ素の1回投与量のうち沈着する割合と同じで、……。… K₂の値が21%から60%までの範囲にあることを示している。」

なお、本試算は、経口摂取による場合を扱ったが、吸入摂取の場合は、本試算で得られた数値(甲状腺中ヨウ素量および吸収線量)に0.75を掛ければよい。

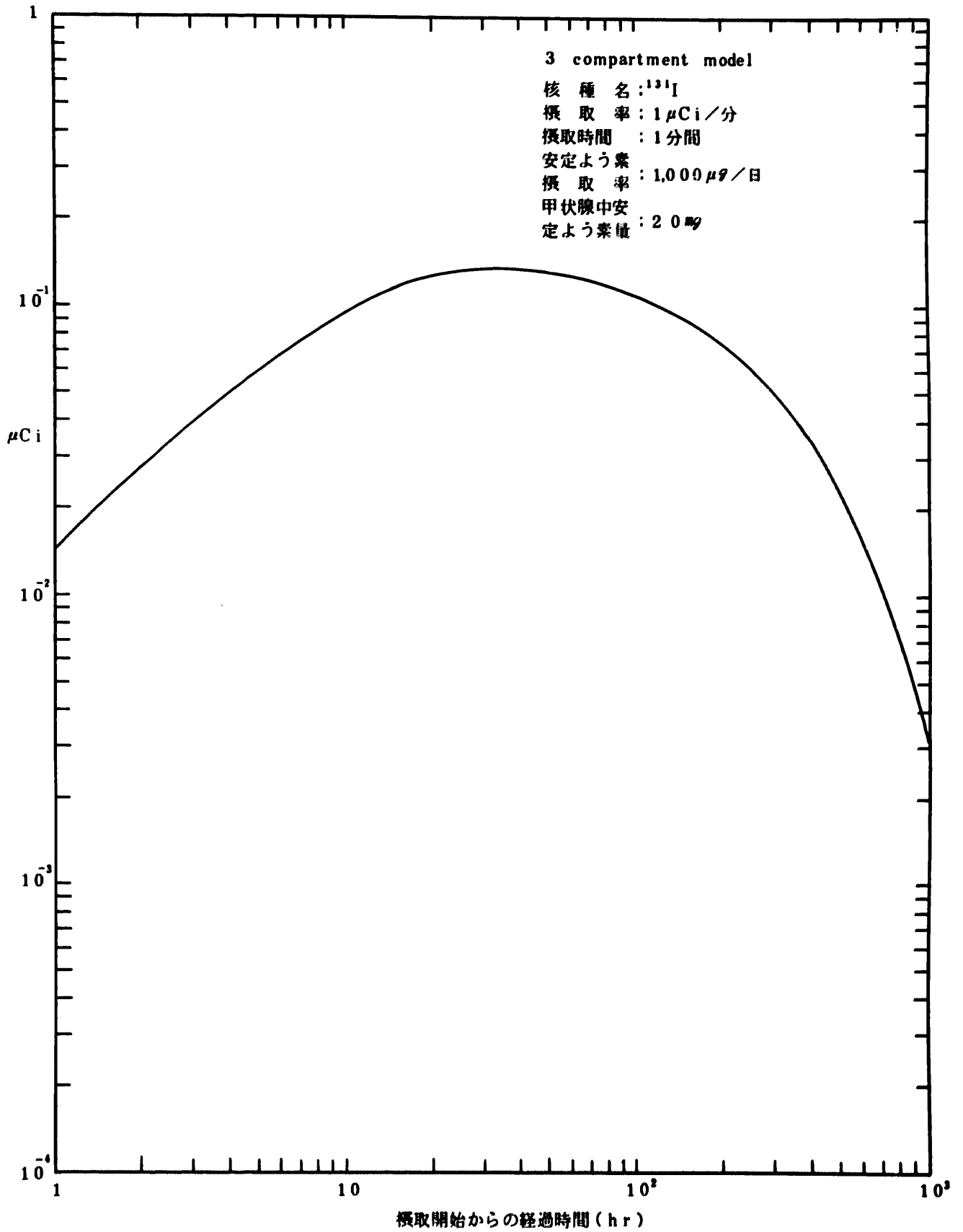


図-14 1回急性摂取時の甲状腺中 ^{131}I 量
 (日本人モデルへのアプローチ)

参 考 文 献

- 1) ICRP Publication 2, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, 1959.
- 2) AECL-5244, Compartment models of radioiodine in man, T.R.Johnson, 1975, Chalk River Nuclear Laboratories, Ontario.
- 3) System/360 Scientific Subroutine Package (360A-CM-03X) Version III Programmer's Manual, IBM corporation.
- 4) Fate of the iodine radioisotopes in the human and estimation of the radiation exposure, J.F.Colard et. al., 1965, Health Physics vol. 11.
- 5) RT/PROT (73) 13, Behavior of radioiodine in the environment and in man, F.Breuer and M.de Bortoli, 1973, Comitato Nazionale Energia Nucleare.
- 6) Radioiodine uptakes in the thyroid studies of the blocking and subsequent recovery of the gland following the administration for stable iodine, D.Ramsden et. al., 1967, Health Physics vol. 13.
- 7) AHSB(S)R 64, An assessment of environmental hazard from fission product release, J.R.Beattie, (Safegurds Division, Authority Health and Safety Branch, Risley), 1963, United Kingdom Atomic Energy Authority.
- 8) 「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」, 原子力委員会原子炉安全技术専門部会, 昭和51年3月。
- 9) 「放射性よう素の甲状腺への移行割合について」放射線審議会資料, 昭和51年6月。
- 10) ICRP Publication 10, Report of Committee IV on Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure, Pergamon Press.