

日本放射線安全管理学会
第10回学術大会
2011年12月01日、横浜

内部被ばくにおける防護量と その評価方法

名古屋大学・医・保健
石樽信人

防護量

防護量は、

- 障害を**防止**するための方策を、**計画、実行、評価**するために
- 認知された**科学的基盤**に立ち
- **確率的影響**の発生確率と関連付けて
- **実用主義的**な手法により確立された

放射線に関わる量

内部被ばくと外部被ばくとで共通の防護量

ところが内部被ばくでは;

- ◆感受性部位が臓器内で偏在している場合が問題
対処:呼吸器、骨、消化管は感受性部位の吸収線量を計算
- ◆短飛程(組織中で数10ミクロン)の α 線も問題
対処:線質効果は放射線加重係数により補正
(光子と電子は1、陽子は2、 α 粒子は20)
- ◆臓器間で吸収線量が不均等となる場合が問題
対処:不均等照射は組織加重係数で補正
(骨髄、肺は0.12、生殖腺は0.08、肝臓、甲状腺は0.04)
- ◆体内に長く残り、被ばくし続ける場合が問題
対処:乳幼児、児童は70歳までの総線量を計算
成人は一律に50年間の総線量を計算

ルーティンとしての内部被ばく線量評価

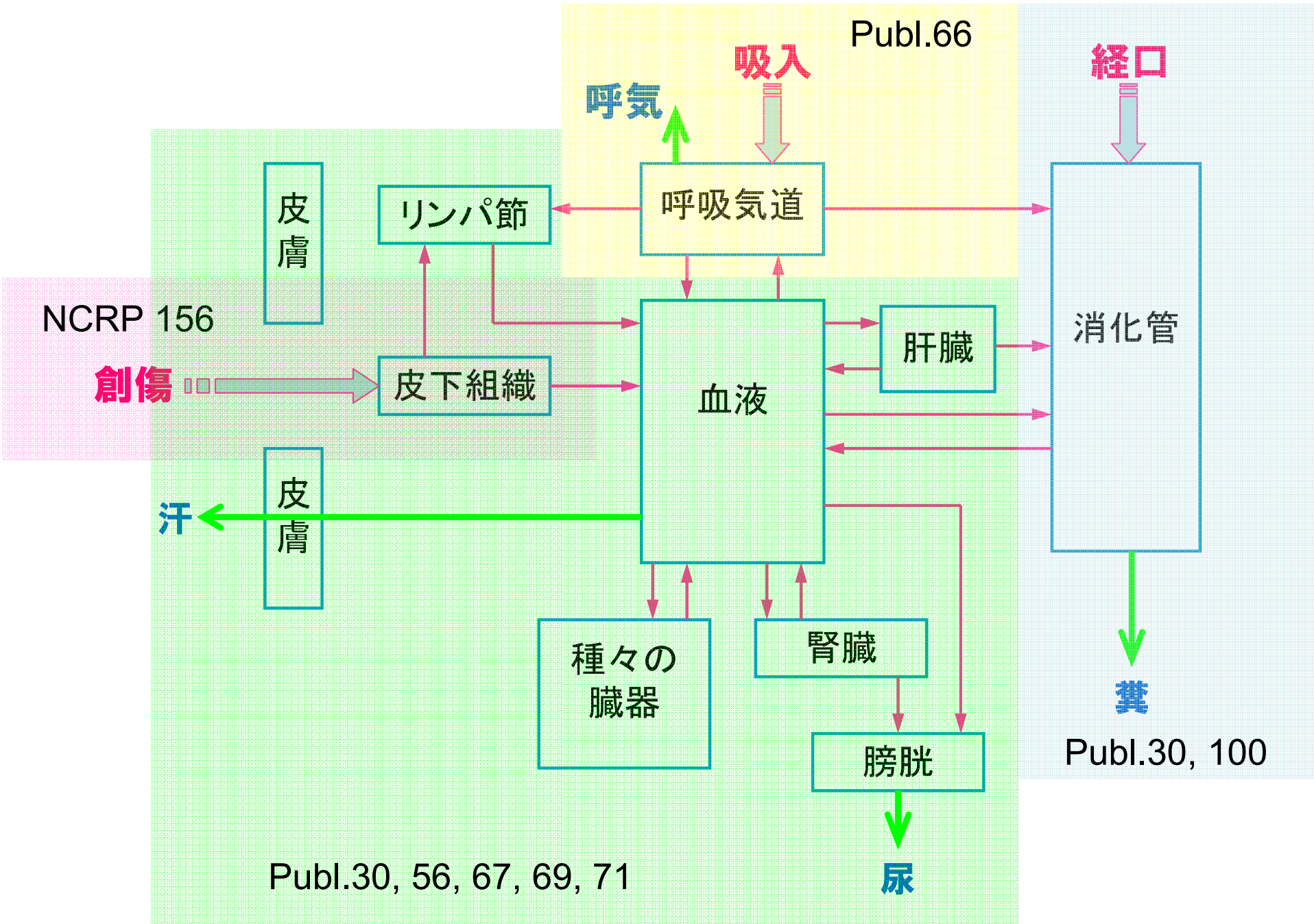
$$\begin{array}{l} \text{空气中濃度} \times \text{呼吸量} \times \text{ICRP} \\ \text{Bq/cm}^3 \quad \text{cm}^3 \quad \text{線量係数} = \text{実効線量} \\ \text{mSv/Bq} \quad \text{mSv} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{食品中濃度} \times \text{摂取量} \times \text{ICRP} \\ \text{Bq/kg} \quad \text{kg} \quad \text{線量係数} = \text{実効線量} \\ \text{mSv/Bq} \quad \text{mSv} \end{array}$$

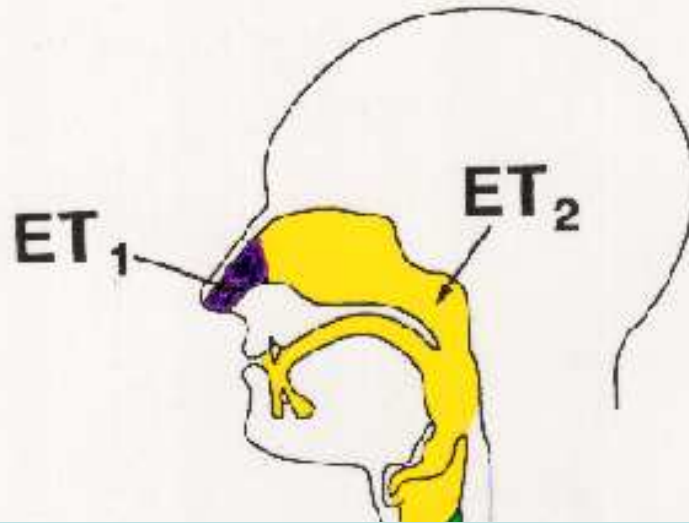
$$\begin{array}{l} \text{体内放射能} \div \text{ICRP} \times \text{ICRP} \\ \text{Bq} \quad \text{残留率} \quad \text{線量係数} = \text{実効線量} \\ \text{mSv/Bq} \quad \text{mSv} \end{array}$$

本講演の主たる話題

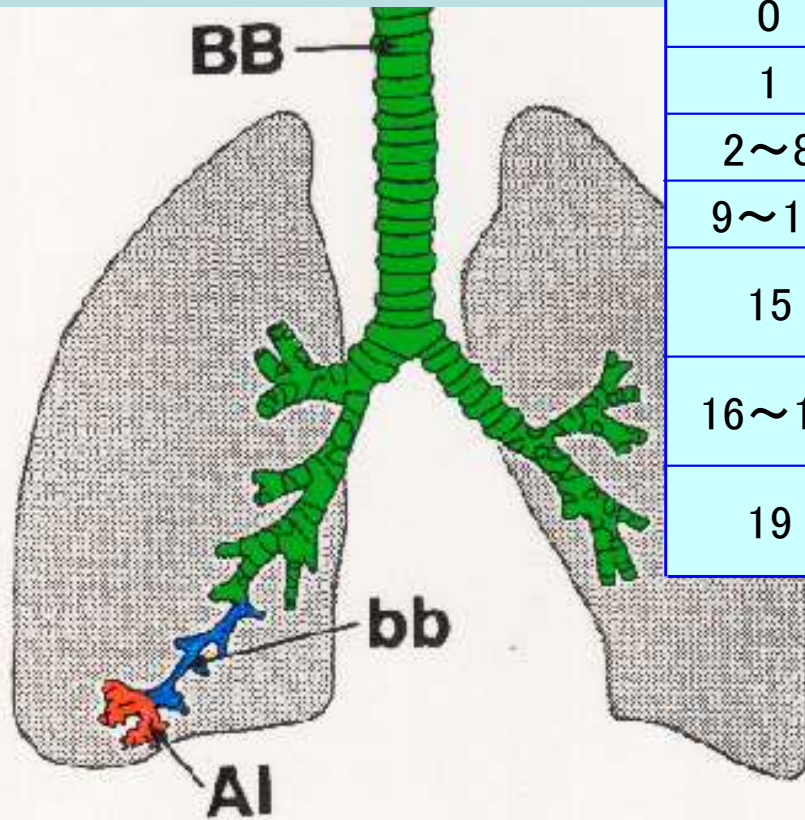
放射性物質の体内摂取、移行、排泄の経路

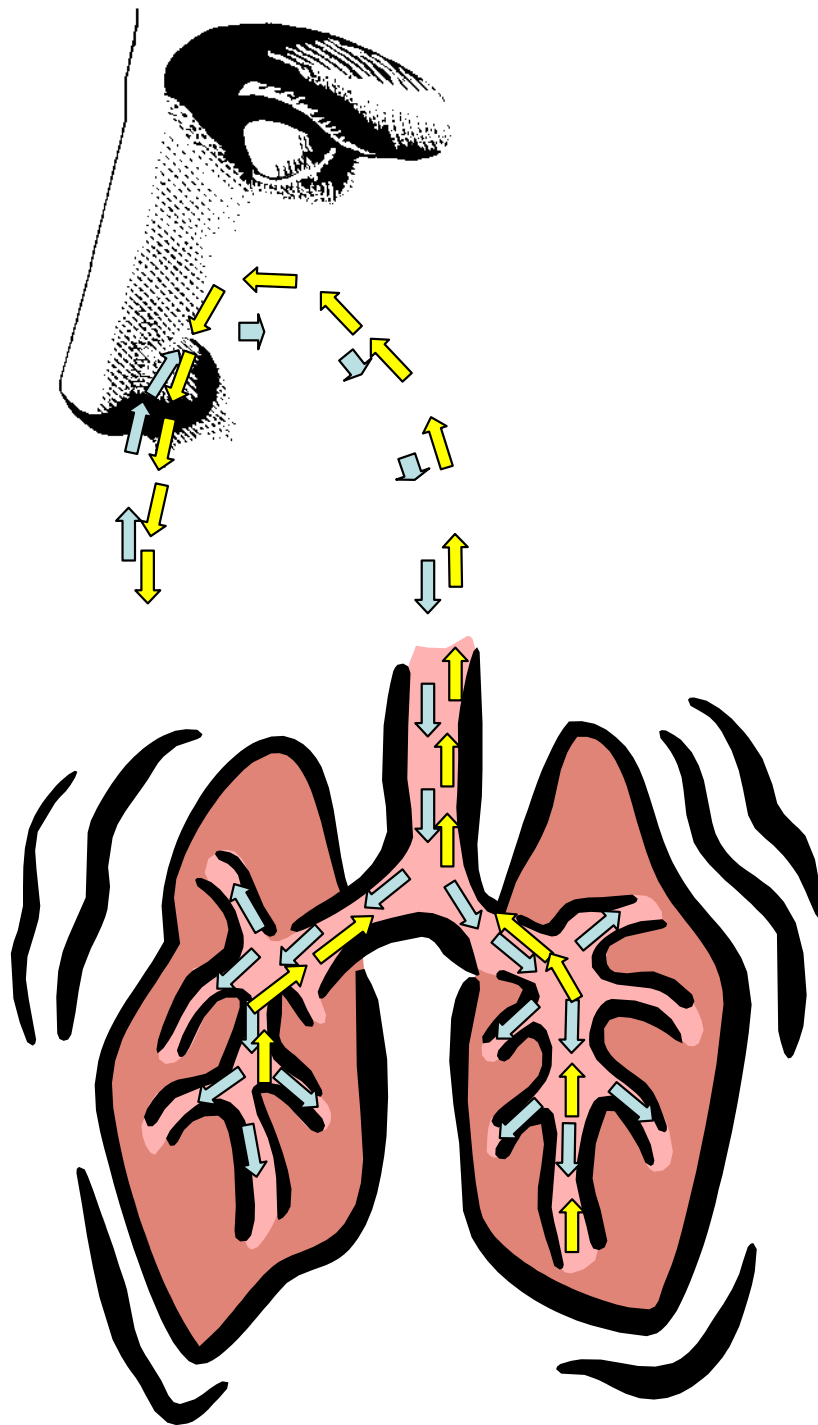


呼吸気道の区分



分枝次数	解剖学的部位	呼吸気道領域	リンパ節	
/	前鼻道	ET ₁	LN _{ET}	胸郭外
	後鼻腔	ET ₂		
	咽頭			
	喉頭			
0	気管	BB	LN _{TH}	胸郭内領域
1	主気管支			
2~8	気管支			
9~14	細気管支	bb		
15	終末細気管支			
16~18	呼吸細気管支	AI		
19	肺胞管+肺胞			





各領域への沈着率は

◆エアロゾルパラメータ

粒子径
粒子密度
粒子形状

◆呼吸気道寸法パラメータ

機能的残気量
死腔容積
気管等直径

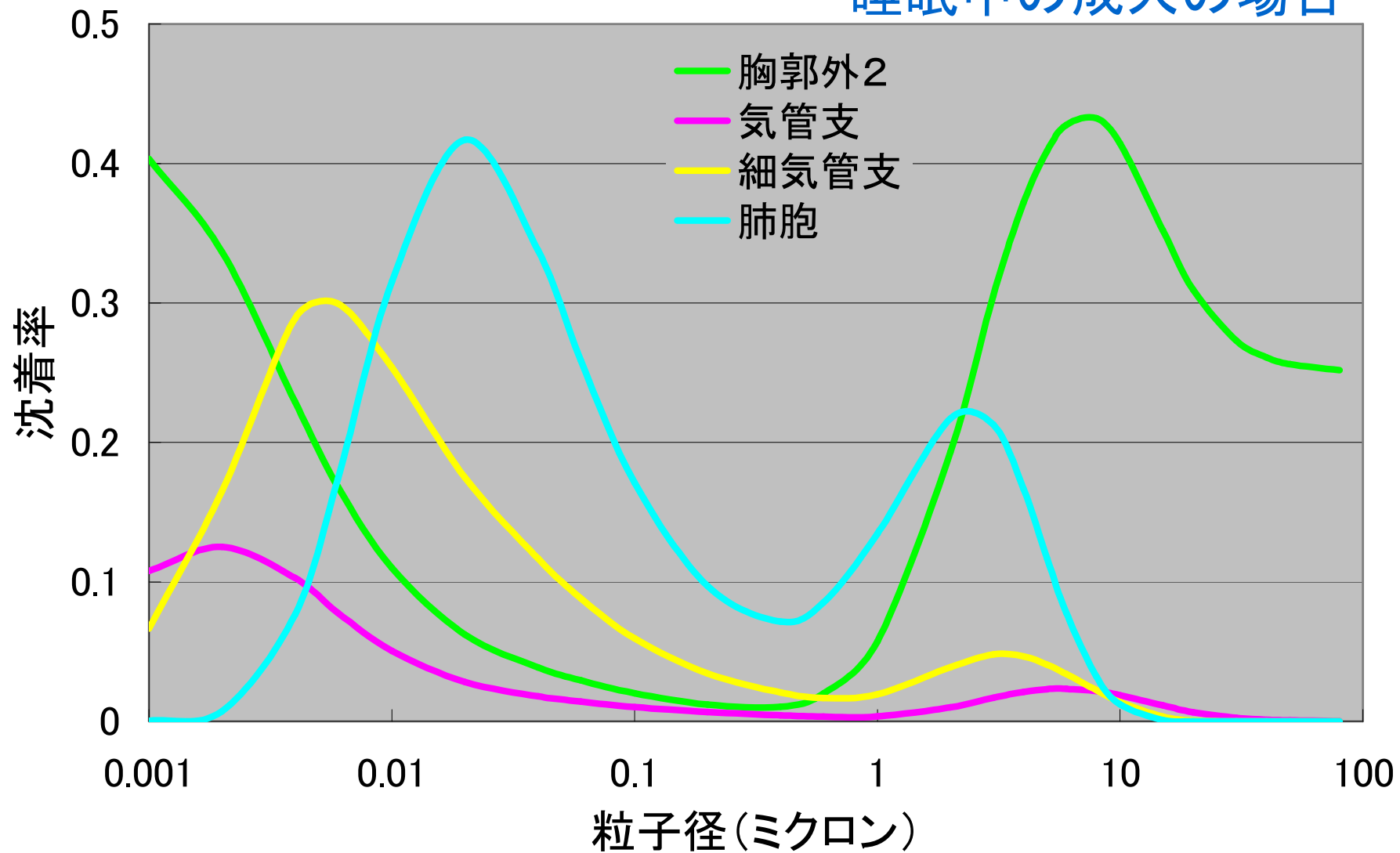
◆呼吸生理パラメータ

一回換気量
呼吸流量率

に依存して変化する。

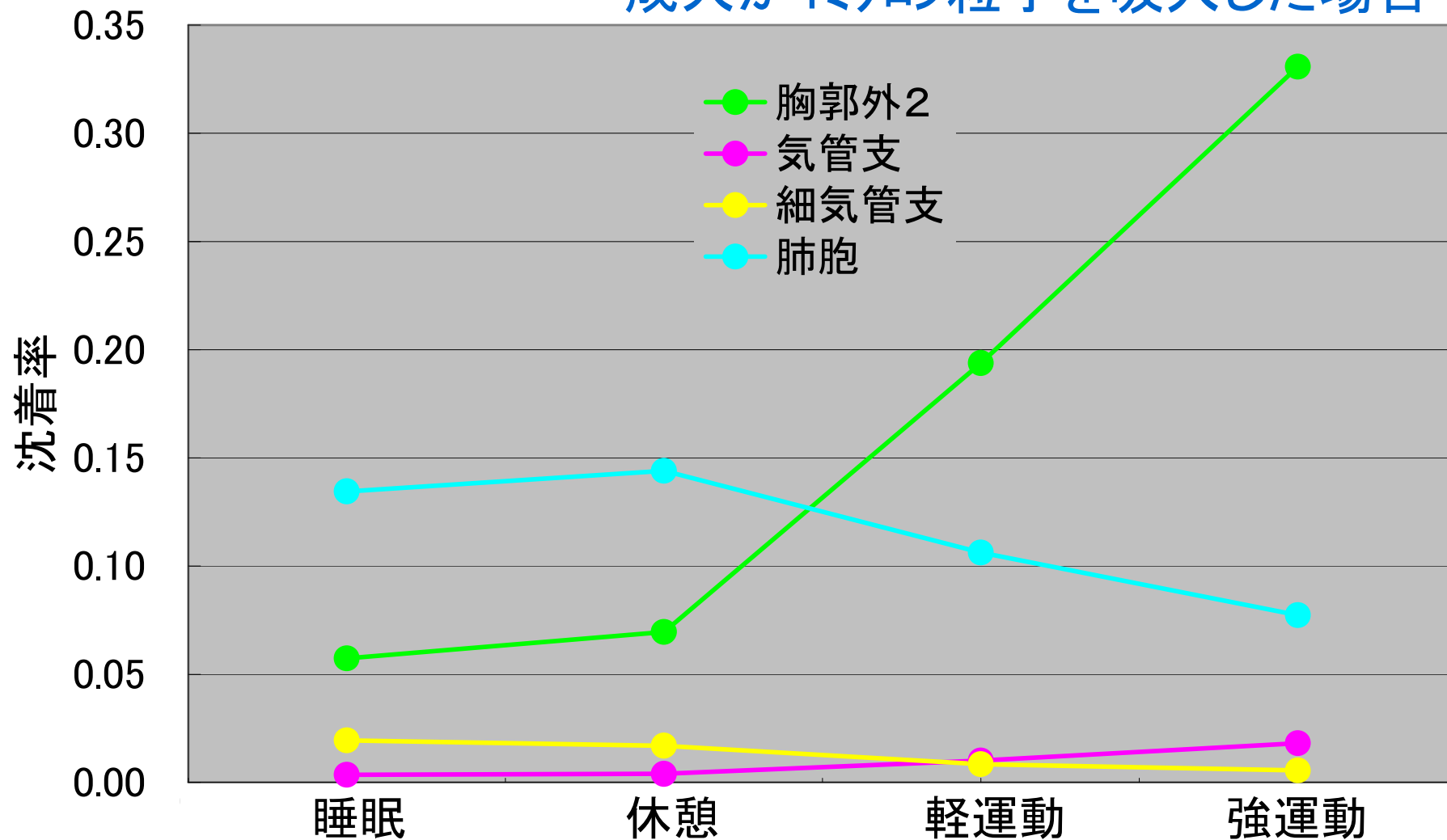
粒子径による沈着率の変化

睡眠中の成人の場合



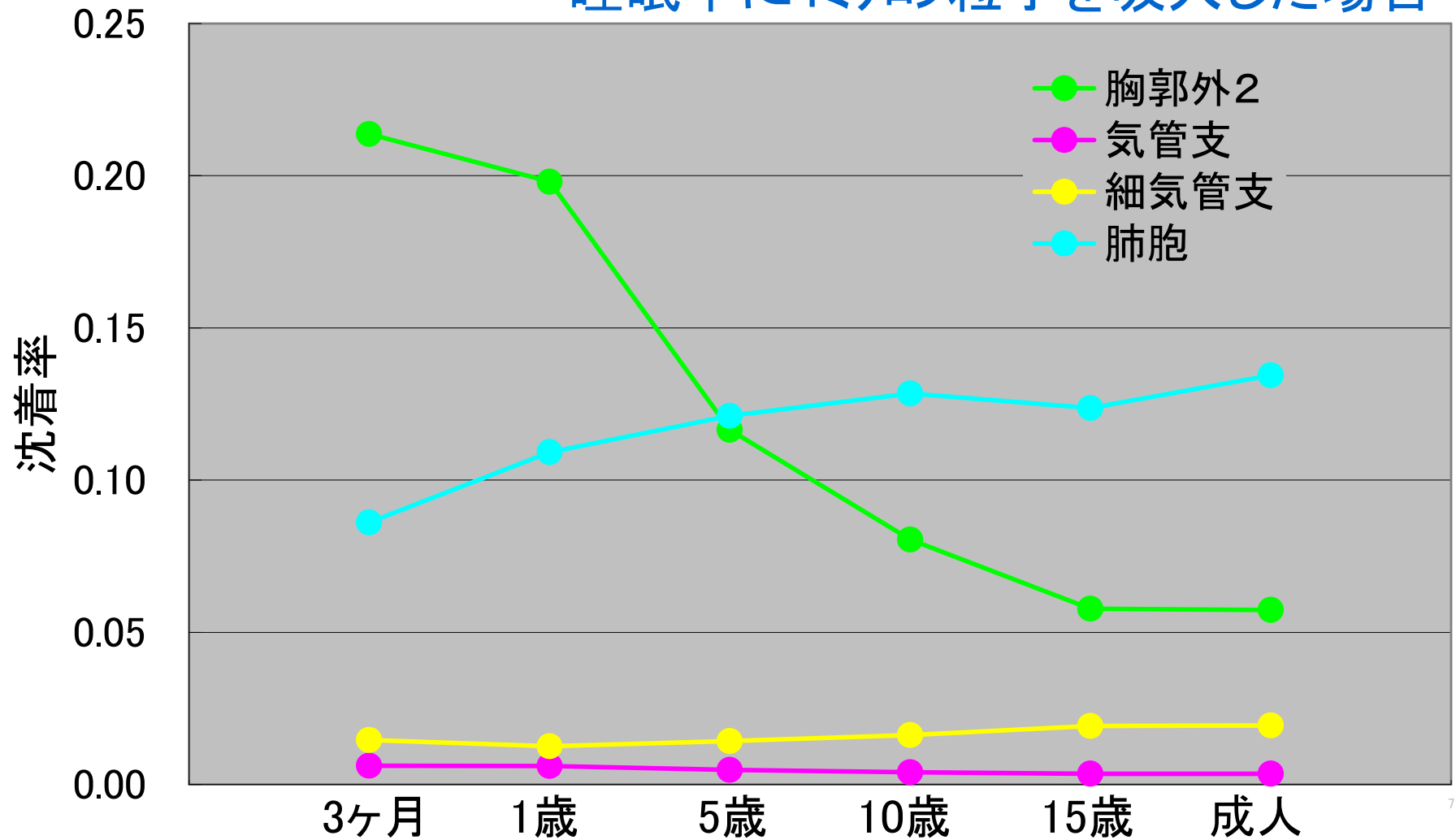
身体活動による沈着率の変化

成人が1ミクロン粒子を吸入した場合

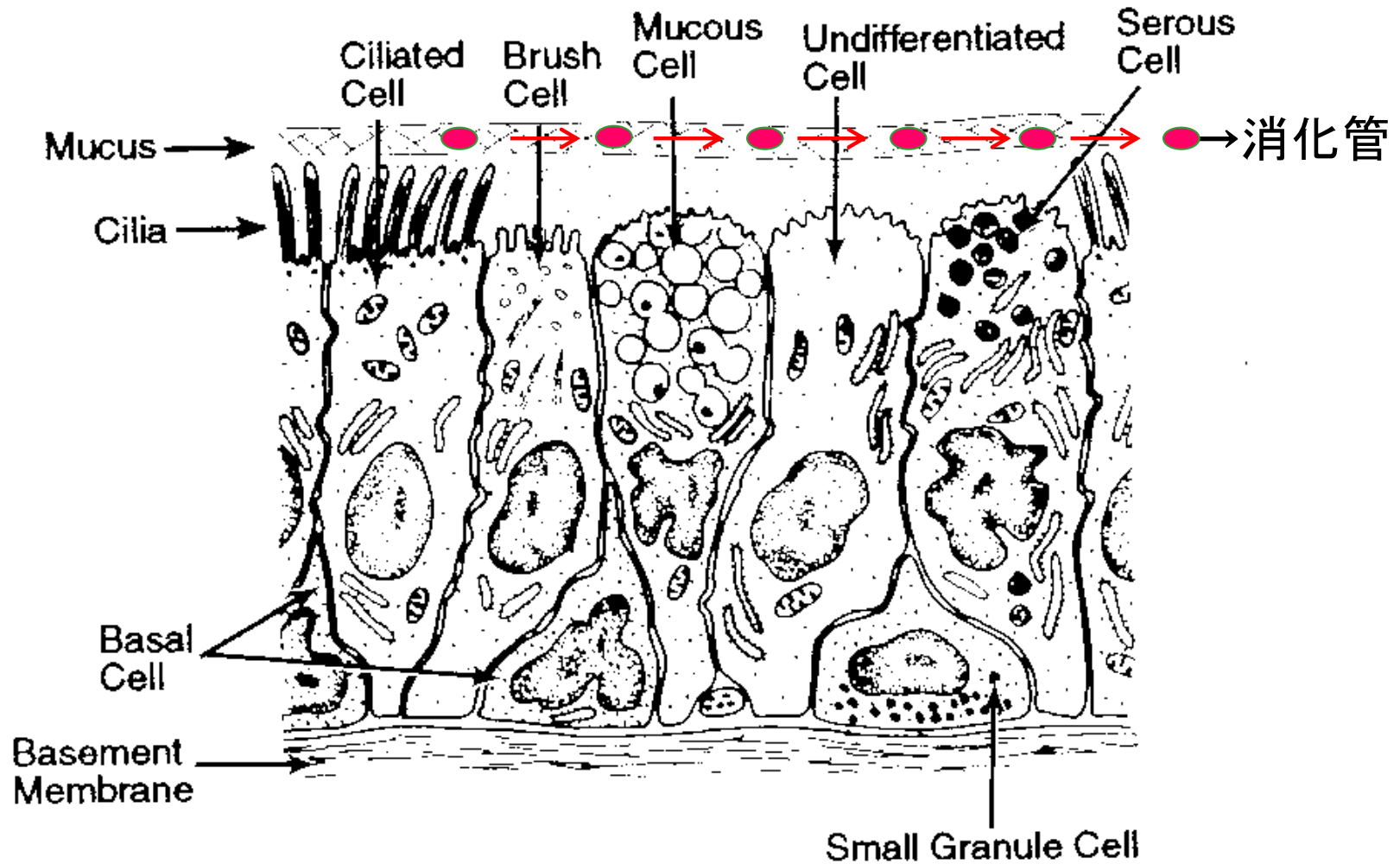


年齢による沈着率の変化

睡眠中に1ミクロン粒子を吸入した場合

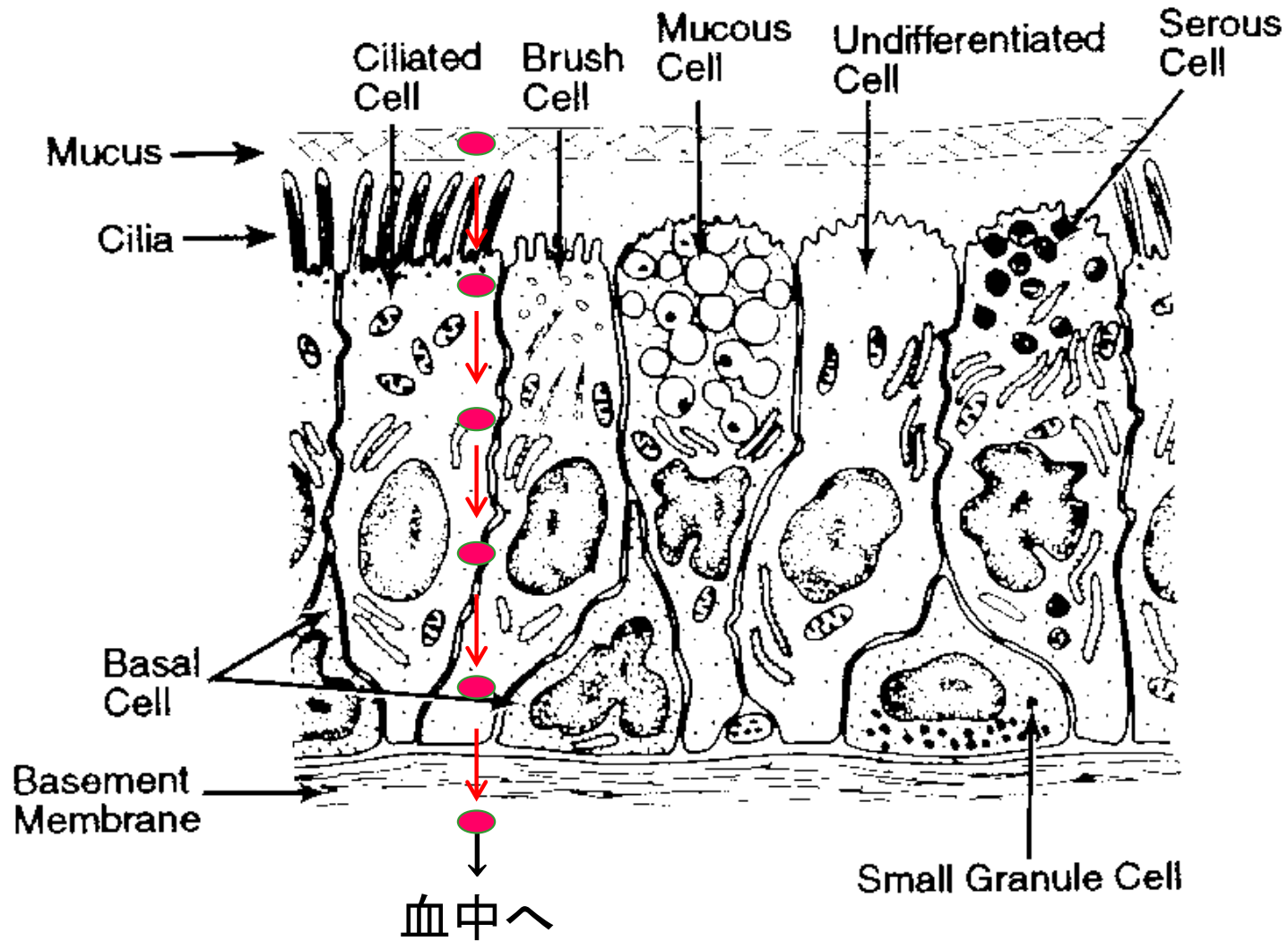


粘液纖毛運動による消化管へのクリアランス

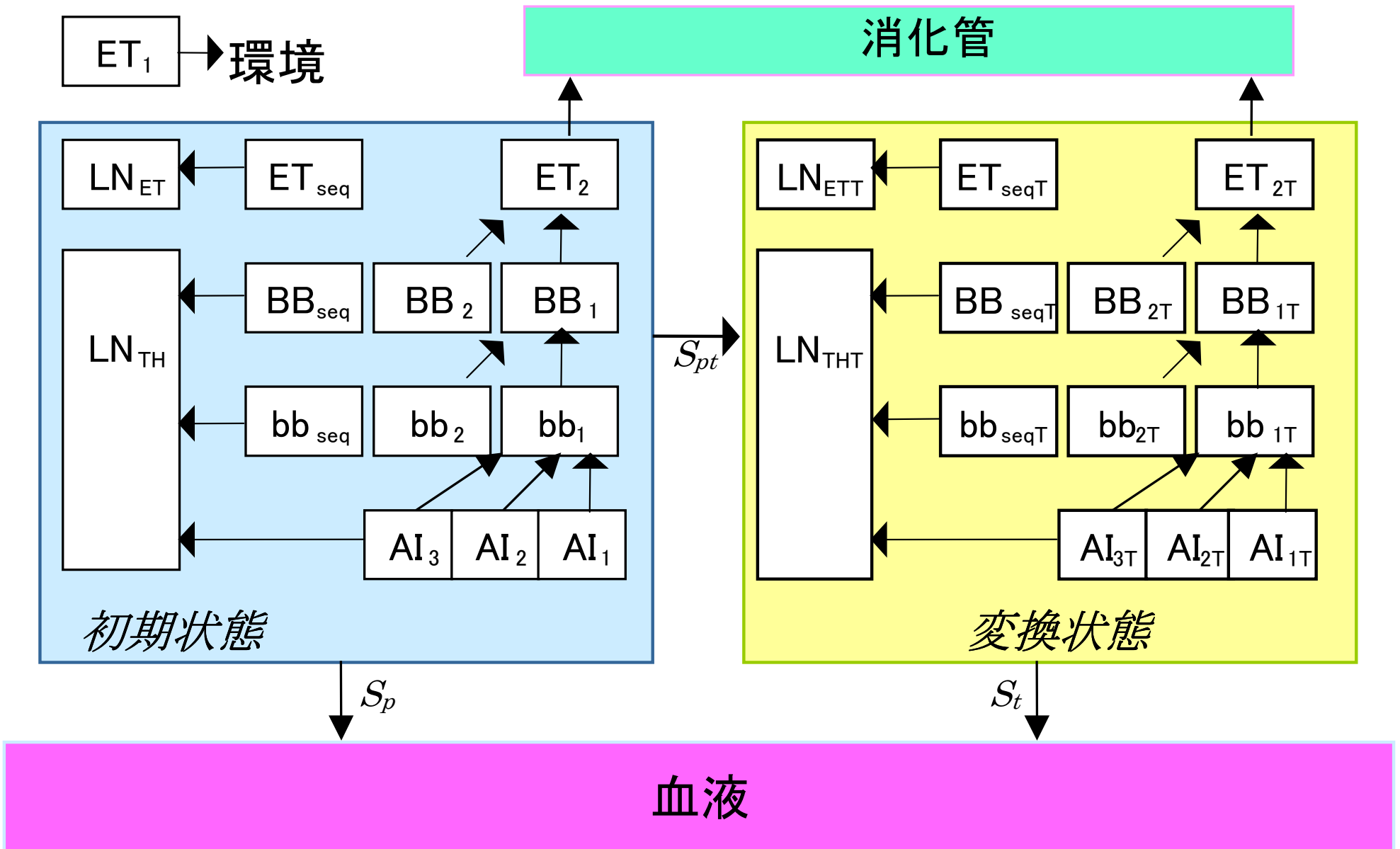


気管および気管支の上皮組織

粘液に溶解し血中へのクリアランス

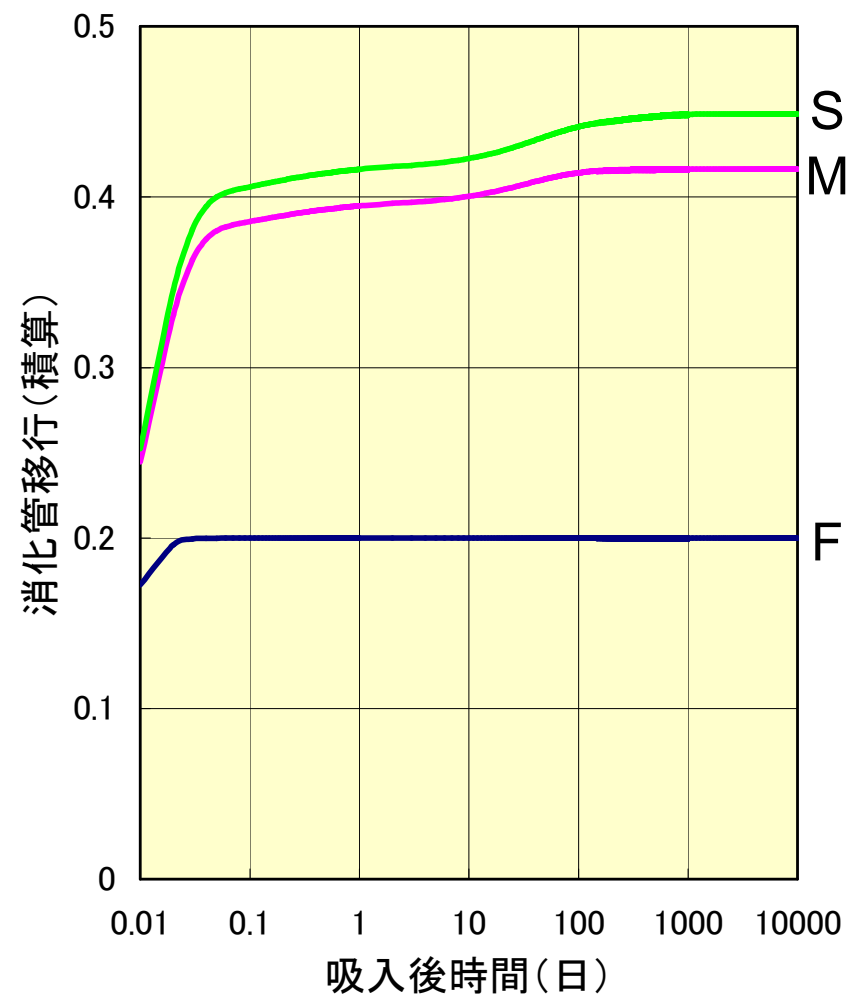
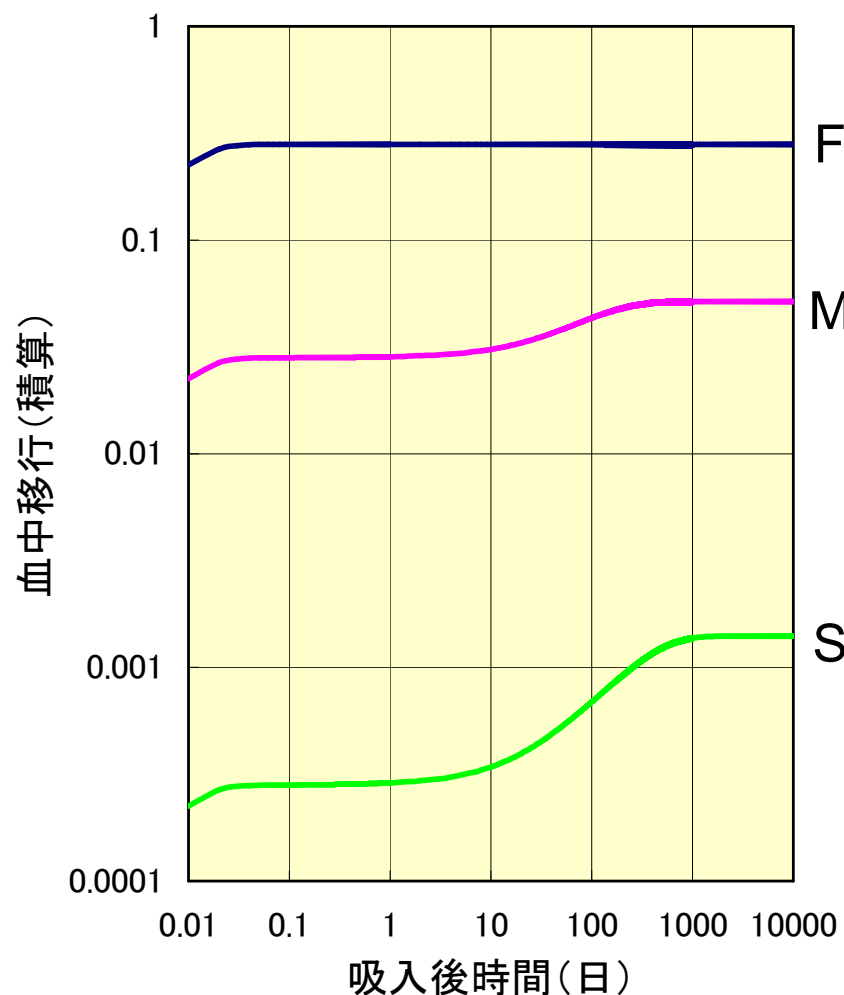


気管および気管支の上皮組織

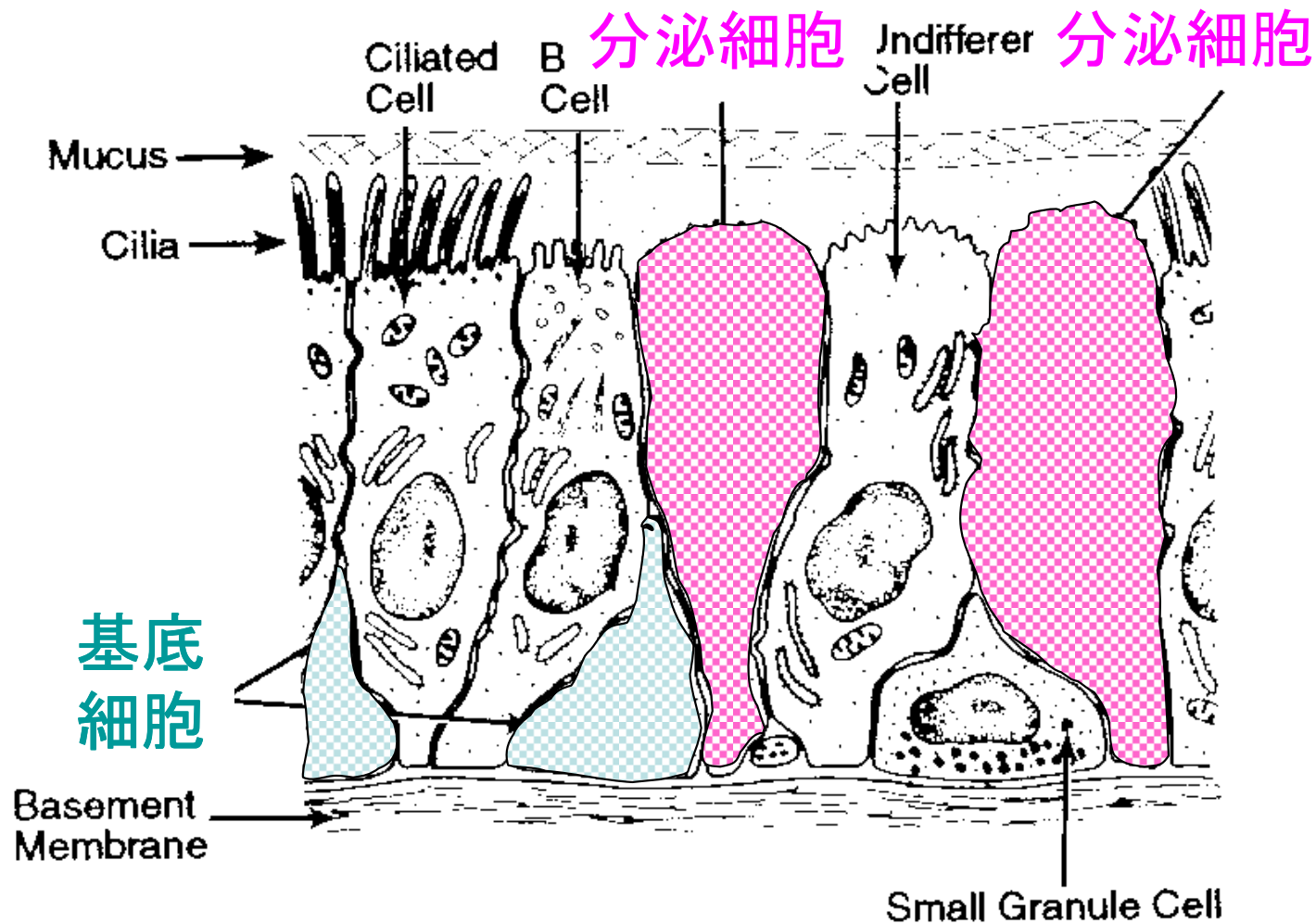


クリアランスに関するコンパートメントモデル

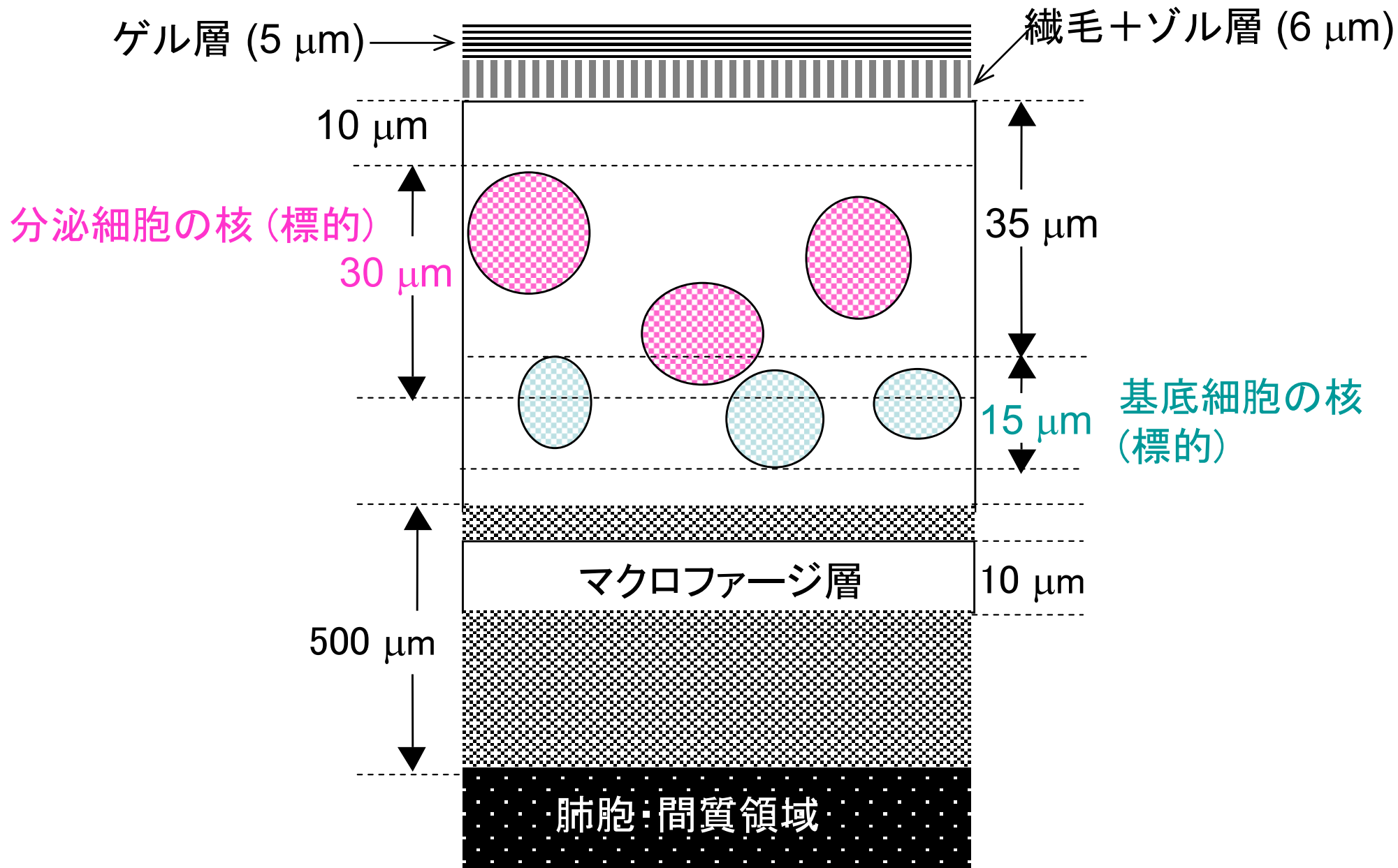
化学形による血中や消化管移行率の変化



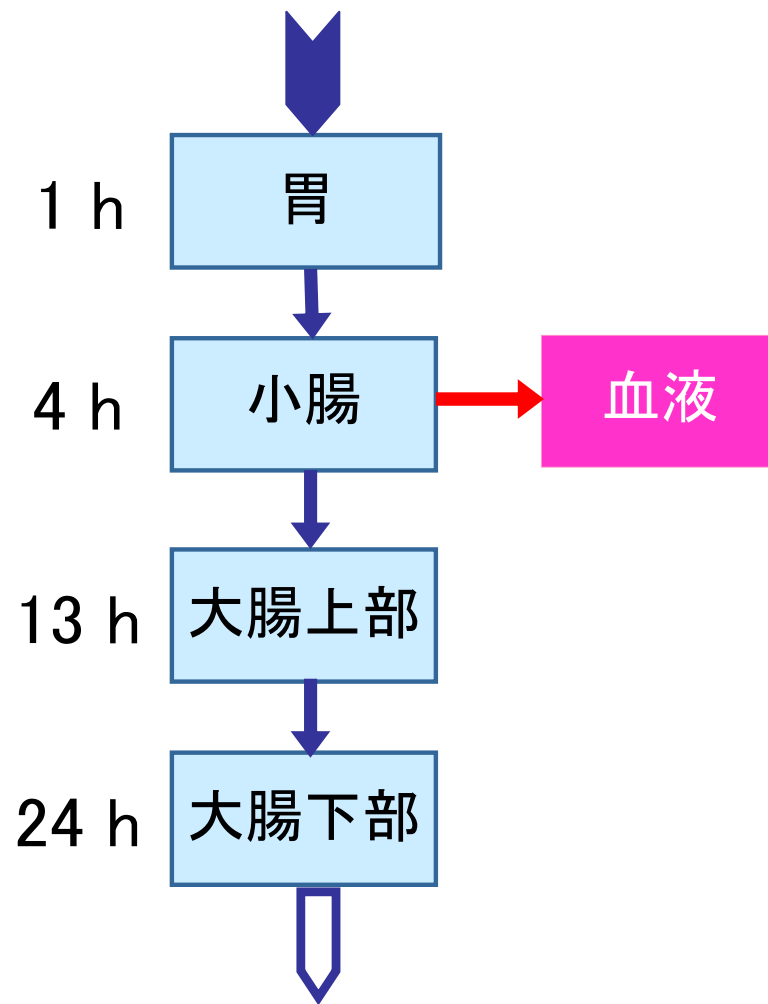
血中吸収が、F (Fast): 速い、M (Moderate): 中程度、S (Slow): 遅い



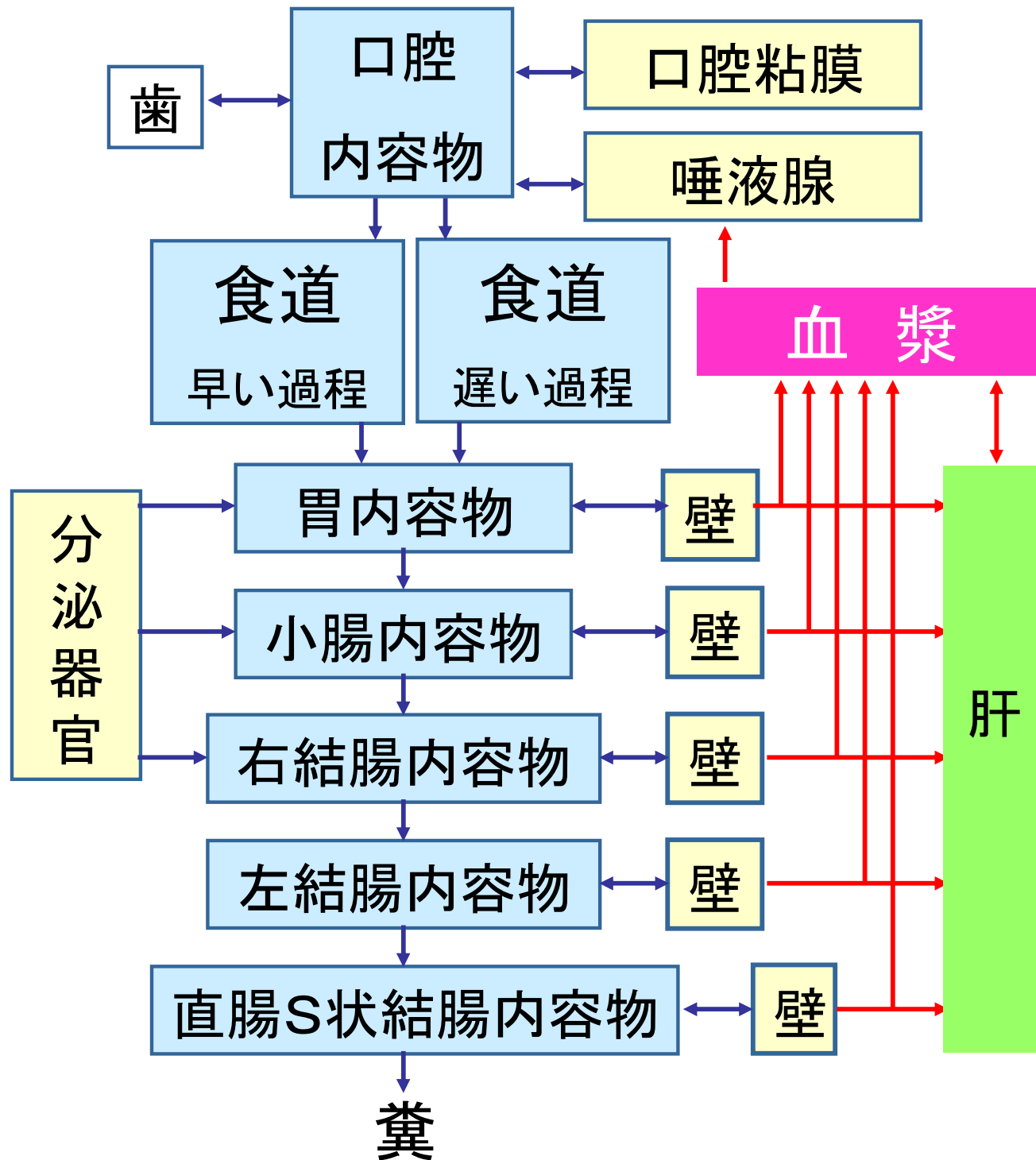
気管および気管支の標的細胞



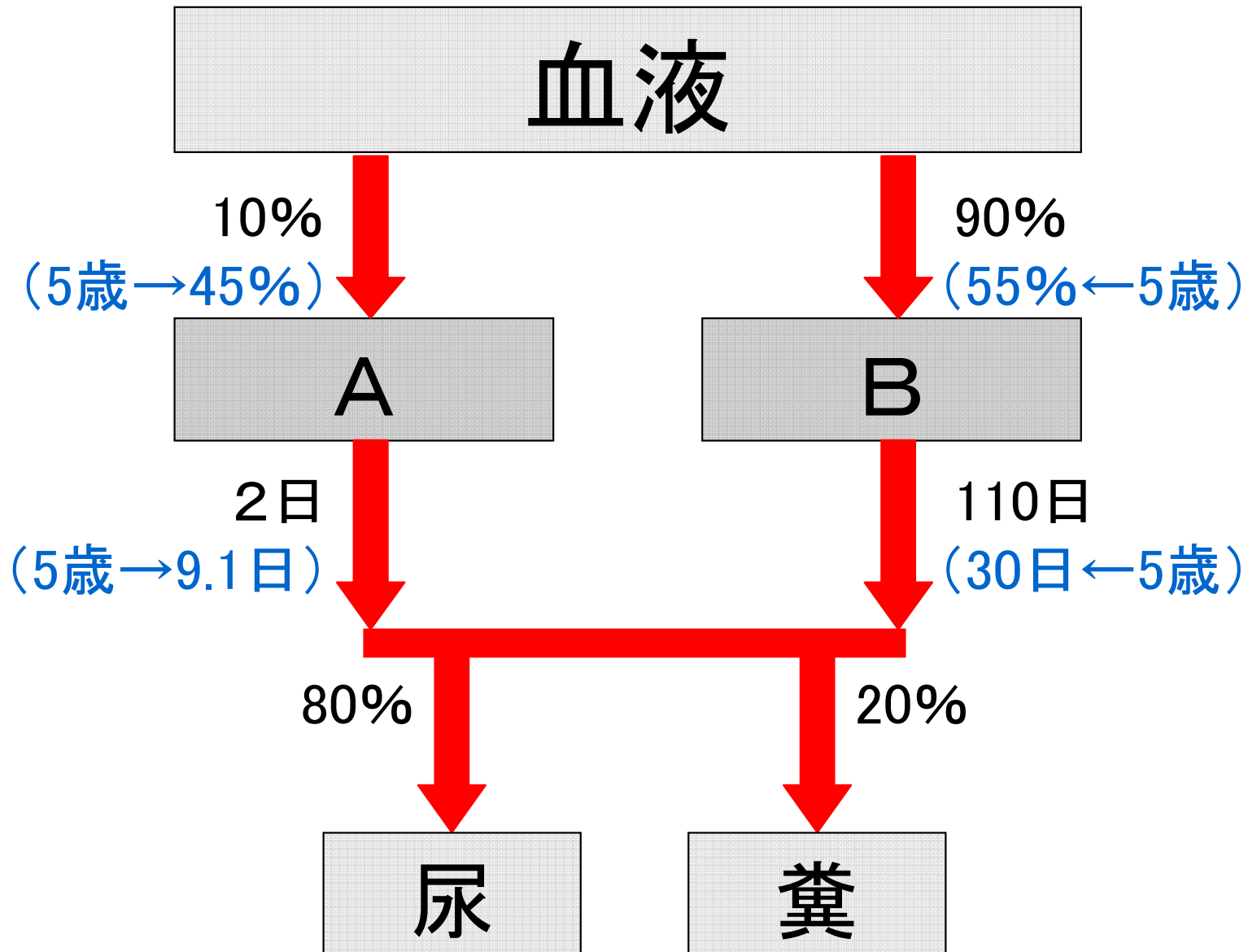
気管および気管支の上皮組織の幾何学モデル



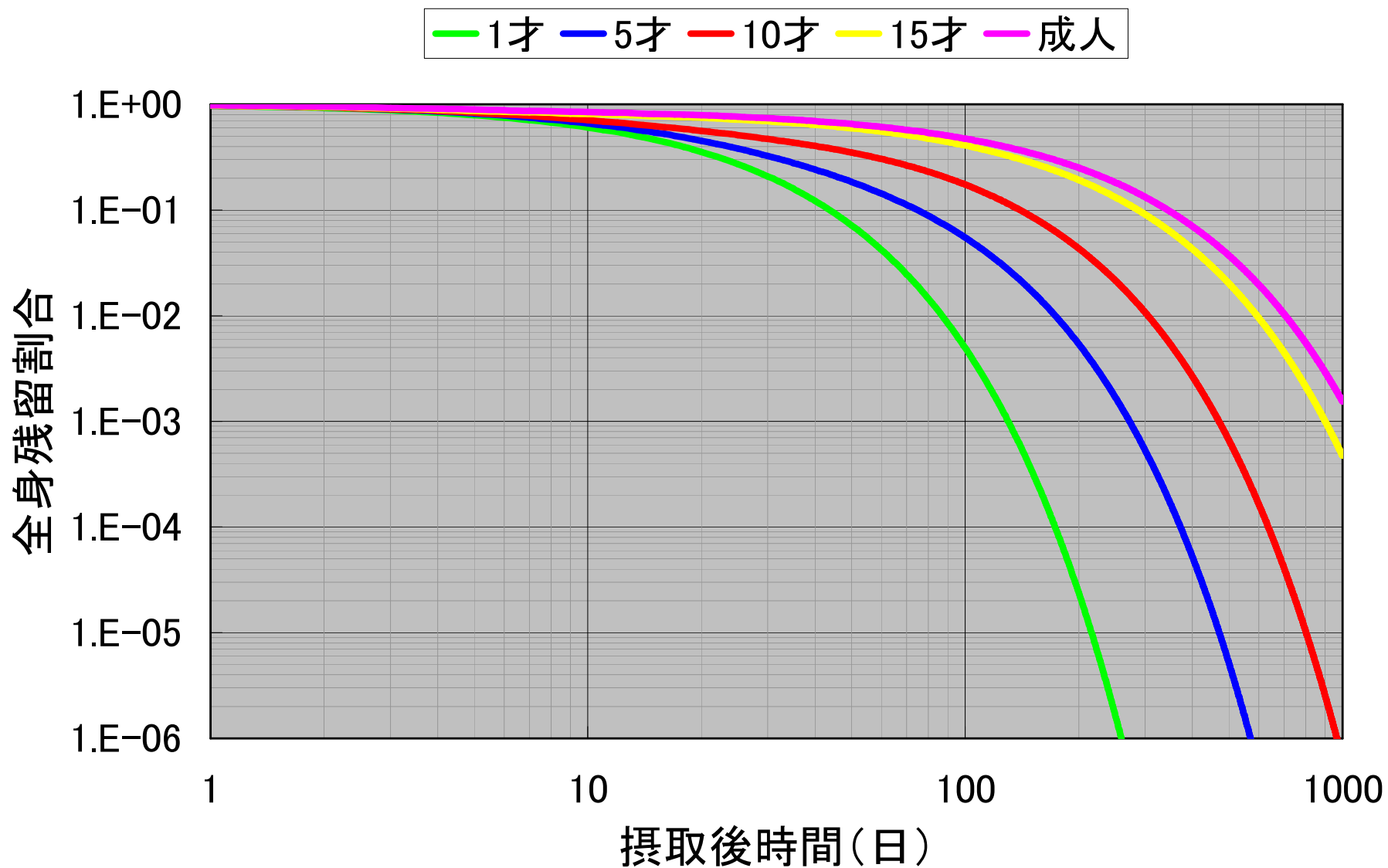
現在使われているICRPの胃腸管モデル



現在使われているCsの組織系動態モデル

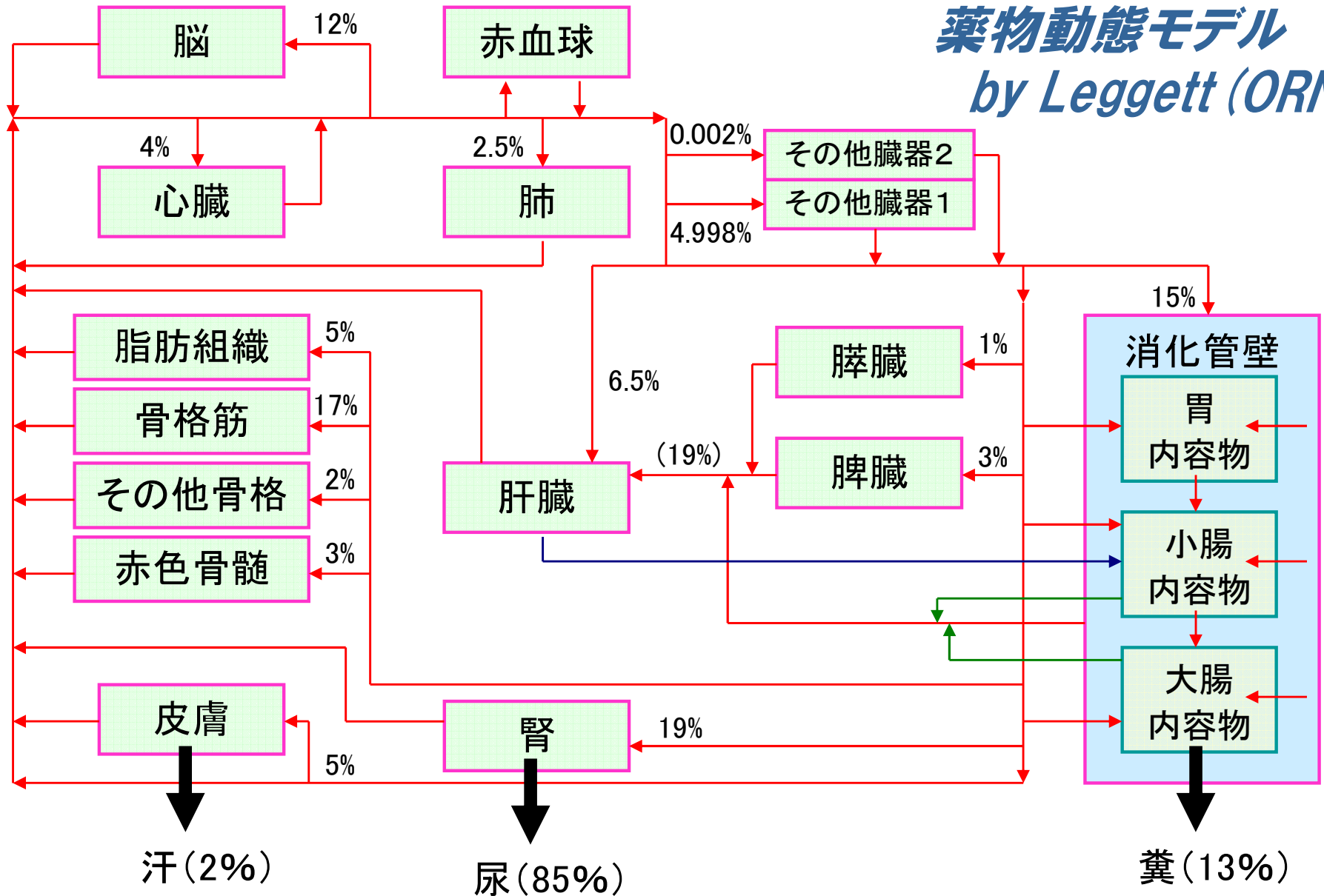


経口摂取されたCs-137の全身残留率



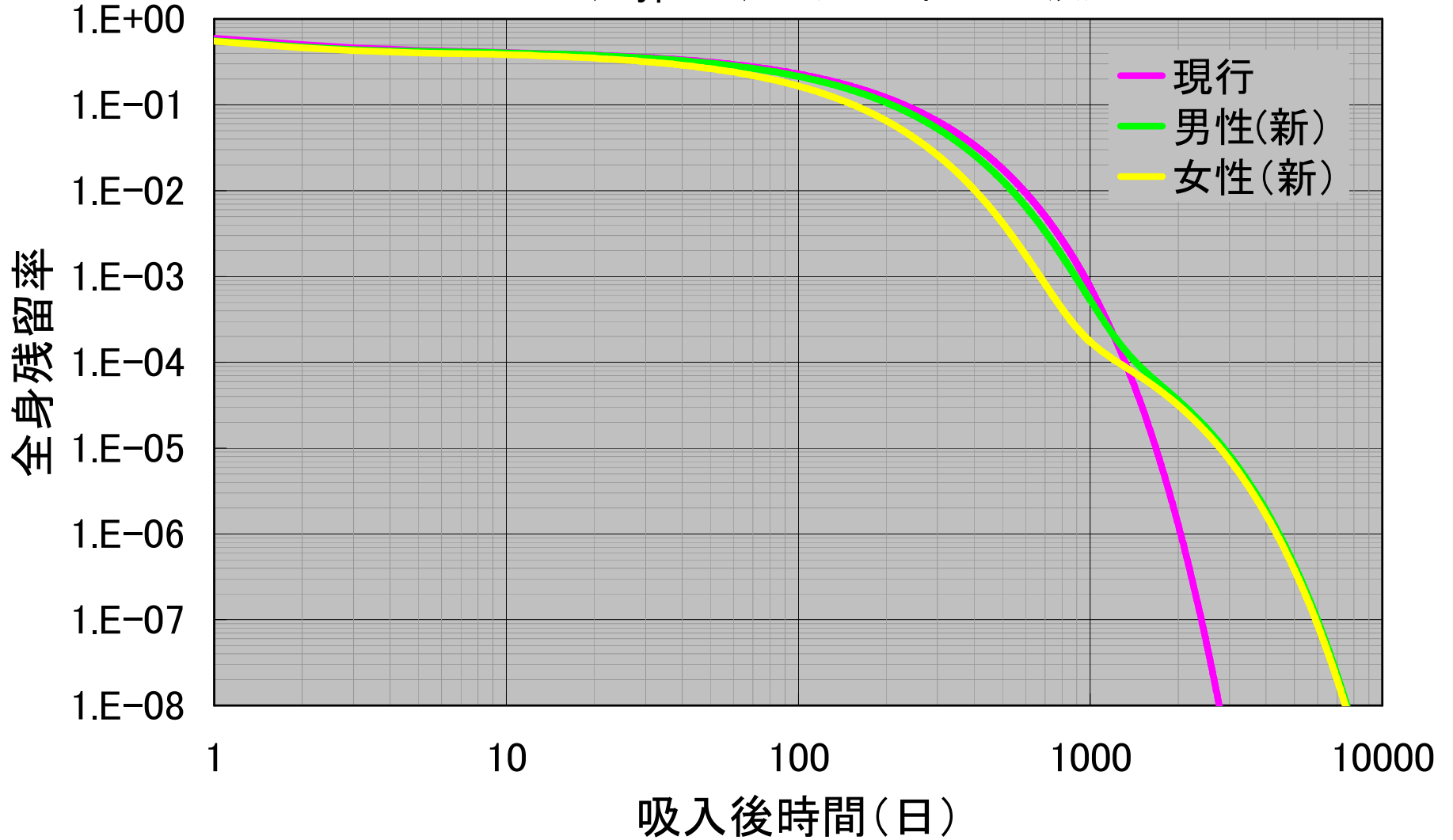
組織系動態モデルの高度化

Csの生理学的
薬物動態モデル
by Leggett (ORNL)

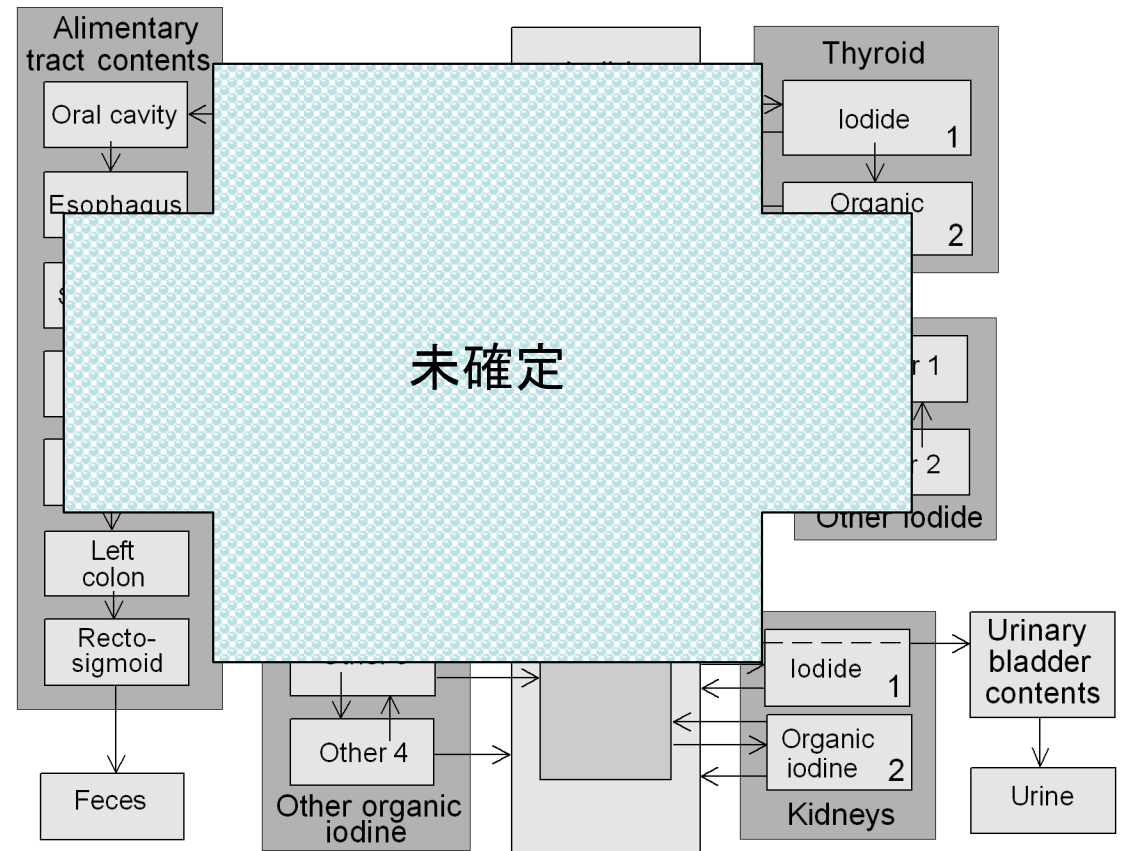
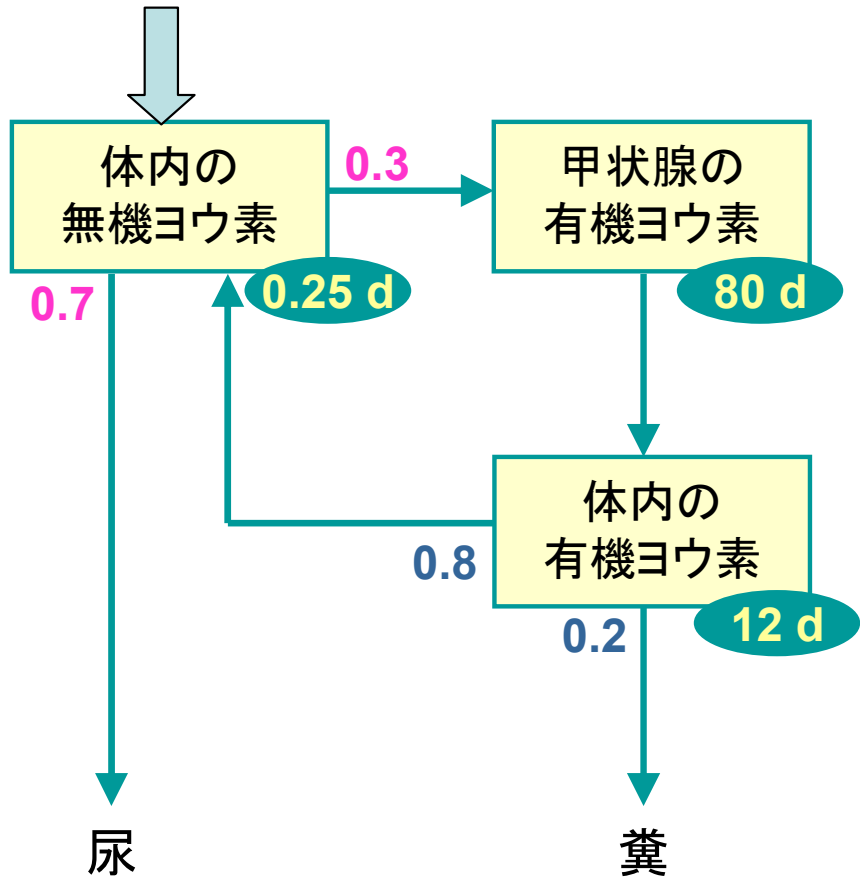
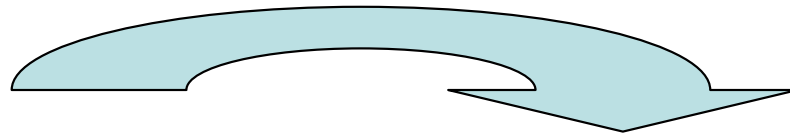


全身残留率のモデルによる変化

Cs-137、Type F、5ミクロン粒子の吸入



ヨウ素の組織系動態モデル

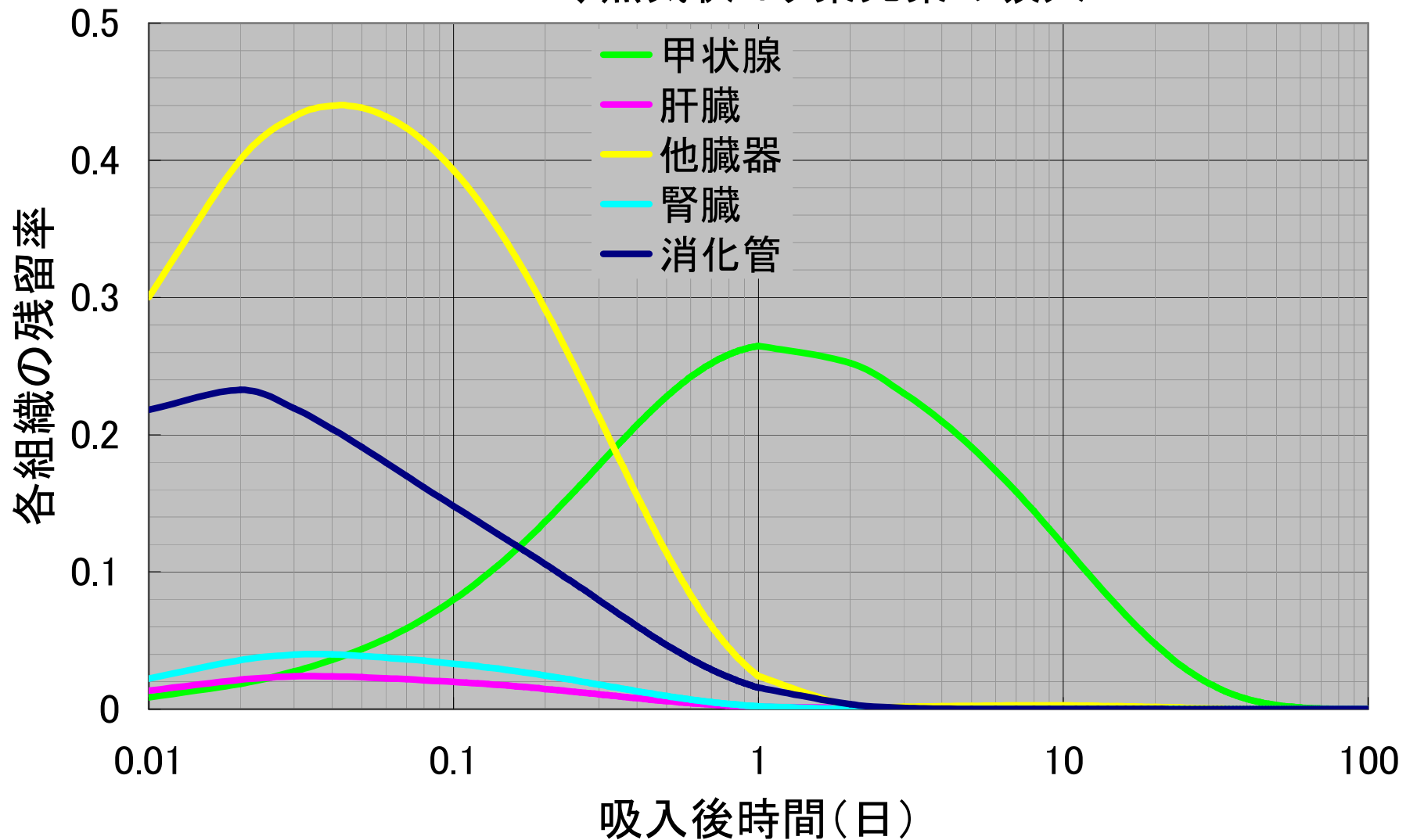


現在使われているモデル

検討中のモデル

検討中の動態モデルによるヨウ素の残留率の計算

I-131、蒸気状ヨウ素元素の吸入



呼吸気道、消化管、組織系動態モデル

- 甲状腺内での50年間の総壊変数
- 唾液腺内での50年間の総壊変数
- 肺内での50年間の総壊変数
- 肝臓内での50年間の総壊変数
- 腎臓内での50年間の総壊変数
-



甲状腺に吸収された全エネルギー

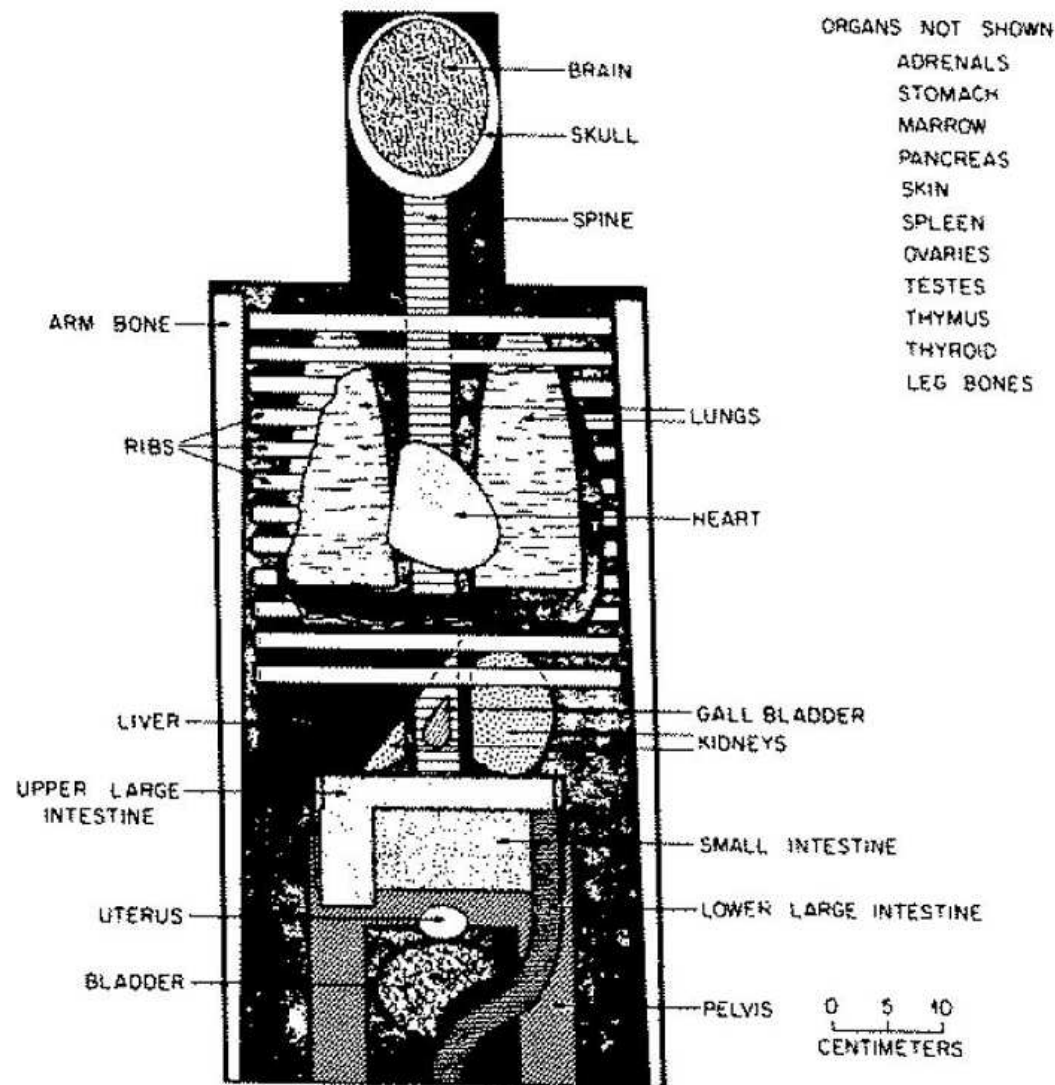
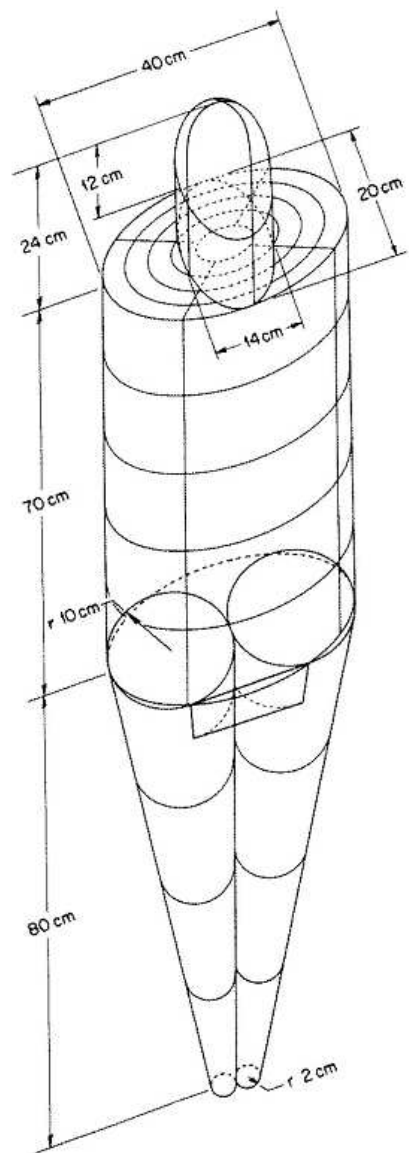


- 甲状腺内からの放射線が**甲状腺**に吸収される割合
- 唾液腺内からの放射線が**甲状腺**に吸収される割合
- 肺内からの放射線が**甲状腺**に吸収される割合
- 肝臓内からの放射線が**甲状腺**に吸収される割合
- 腎臓内からの放射線が**甲状腺**に吸収される割合
-

放射線加重係数

人体数学ファントム

現在使われている人体数学ファントム



W S Snyder, et al.

J. Nucl. Med. Vol. 10, Suppl. No.3, 1969より

計算例(Cs-137)

線源組織での1壊変が各標的組織へ与える等価線量(Sv): 抜粋

線源組織→ ↓ 標的組織	Adrenals	Brain	Breasts	Gall bl cont	LLI cont	SI cont	ST cont	ULI cont	Heart cont
Adrenals	3.0E-12	7.8E-18	2.6E-16	1.1E-15	1.2E-16	3.2E-16	1.1E-15	3.6E-16	9.6E-16
Brain	7.8E-18	3.9E-14	2.5E-17	4.2E-18	7.4E-19	1.3E-18	6.8E-18	1.6E-18	3.1E-17
Breasts	2.6E-16	2.5E-17	1.3E-13	1.7E-16	2.7E-17	5.8E-17	2.9E-16	6.7E-17	1.1E-15
Gall bl wall	1.2E-15	3.5E-18	1.8E-16	4.0E-12	2.6E-16	1.6E-15	1.1E-15	2.7E-15	4.0E-16
LLI wall	1.2E-16	6.3E-19	2.6E-17	2.4E-16	1.6E-13	2.3E-15	3.7E-16	9.7E-16	3.4E-17
SI wall	3.2E-16	1.3E-18	5.8E-17	1.6E-15	2.6E-15	5.5E-14	7.5E-16	4.8E-15	9.3E-17
ST wall	9.9E-16	6.4E-18	3.0E-16	1.1E-15	5.3E-16	8.4E-16	9.5E-14	1.1E-15	6.5E-16
ULI wall	3.9E-16	1.6E-18	5.7E-17	2.9E-15	1.2E-15	5.4E-15	9.9E-16	1.0E-13	1.2E-16
Heart wall	1.1E-15	2.9E-17	1.2E-15	4.1E-16	4.6E-17	1.2E-16	9.6E-16	1.4E-16	1.3E-13
Kidneys	2.9E-15	3.5E-18	1.3E-16	1.4E-15	3.2E-16	8.5E-16	9.9E-16	8.2E-16	3.1E-16
Liver	1.7E-15	1.1E-17	3.3E-16	3.1E-15	1.0E-16	4.7E-16	5.9E-16	7.7E-16	8.1E-16
Lung	9.5E-16	5.8E-17	9.7E-16	2.8E-16	3.8E-17	8.6E-17	4.5E-16	9.9E-17	1.8E-15
Muscle	4.8E-16	1.1E-16	2.1E-16	4.7E-16	5.0E-16	4.6E-16	4.1E-16	4.3E-16	3.6E-16
Ovaries	1.5E-16	7.5E-19	2.8E-17	4.3E-16	5.1E-15	3.4E-15	2.7E-16	2.9E-15	4.8E-17
Pancreas	3.9E-15	9.1E-18	3.0E-16	2.5E-15	2.1E-16	5.6E-16	4.6E-15	6.3E-16	9.6E-16
Bone marrow	1.1E-15	3.9E-16	2.8E-16	4.4E-16	8.7E-16	7.3E-16	3.5E-16	6.1E-16	4.9E-16
Bone surface	5.9E-16	6.8E-16	2.0E-16	2.2E-16	3.8E-16	2.9E-16	2.1E-16	2.5E-16	3.2E-16

ICRPによるボクセルファントムの定義

男性

176 cm

76 kg



女性

163 cm

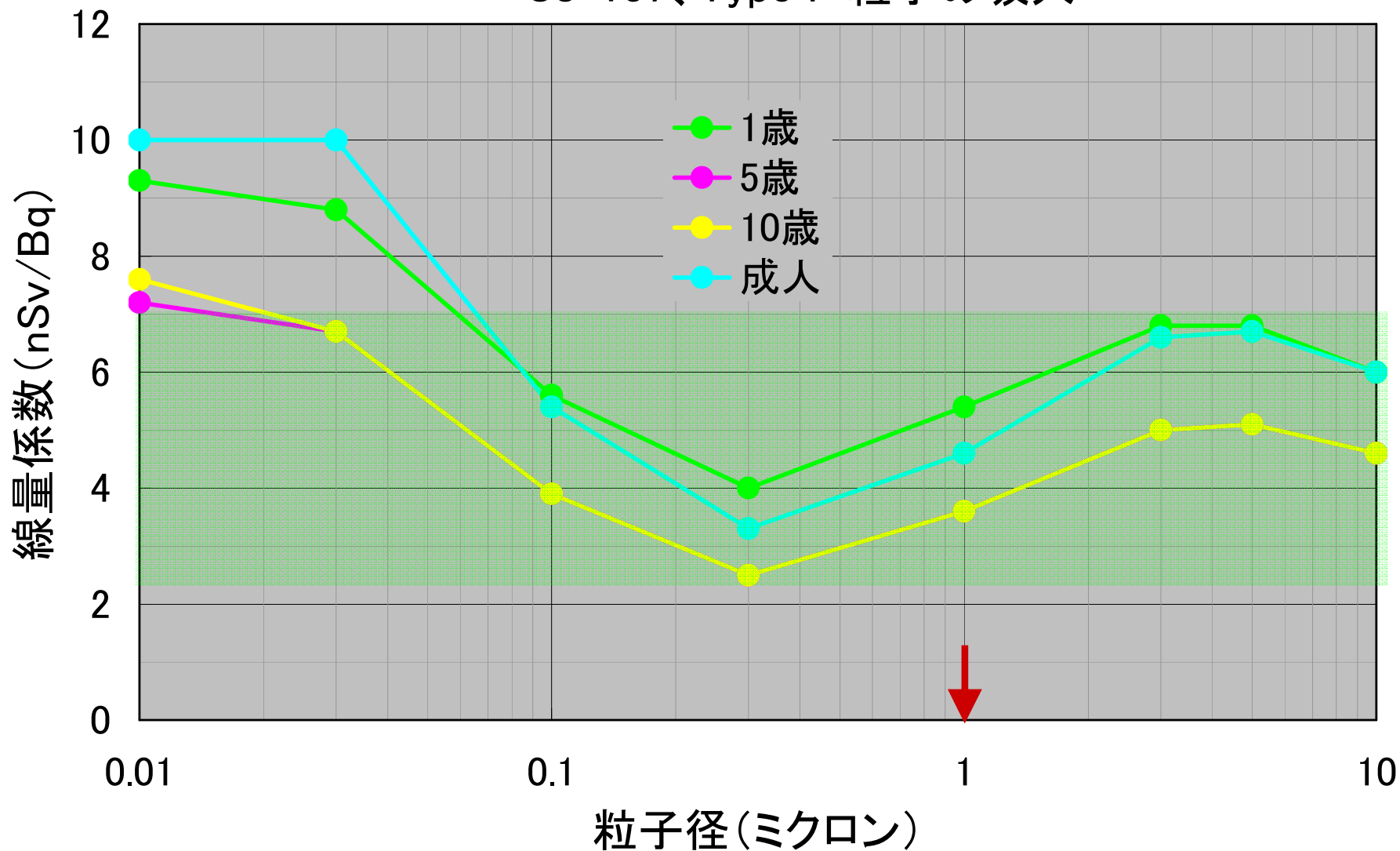
60 kg



H Schlattl, et al.
Phys. Med. Biol., 55 (2010) 6243より

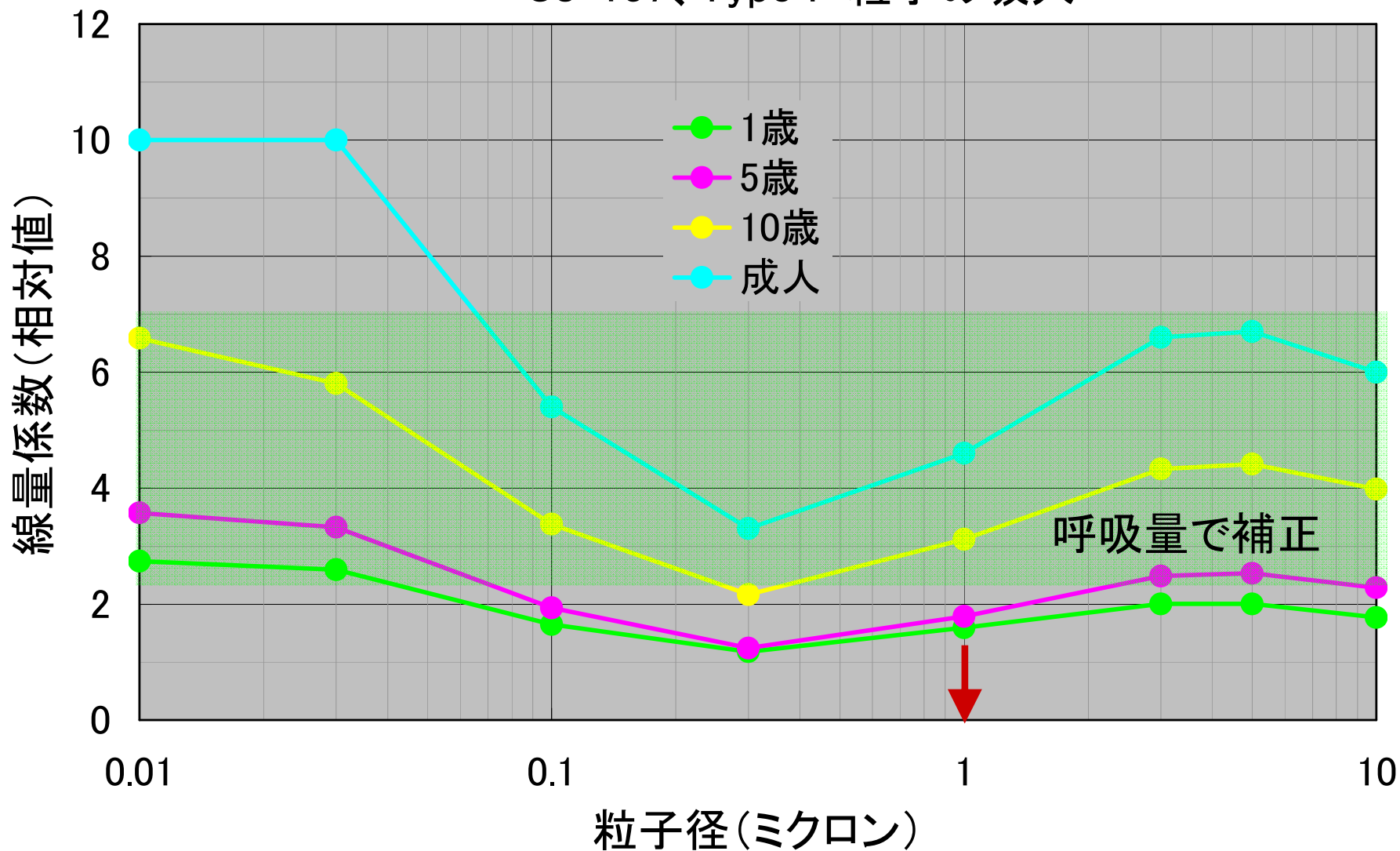
現在使われているCs-137の線量係数

Cs-137、Type F 粒子の吸入

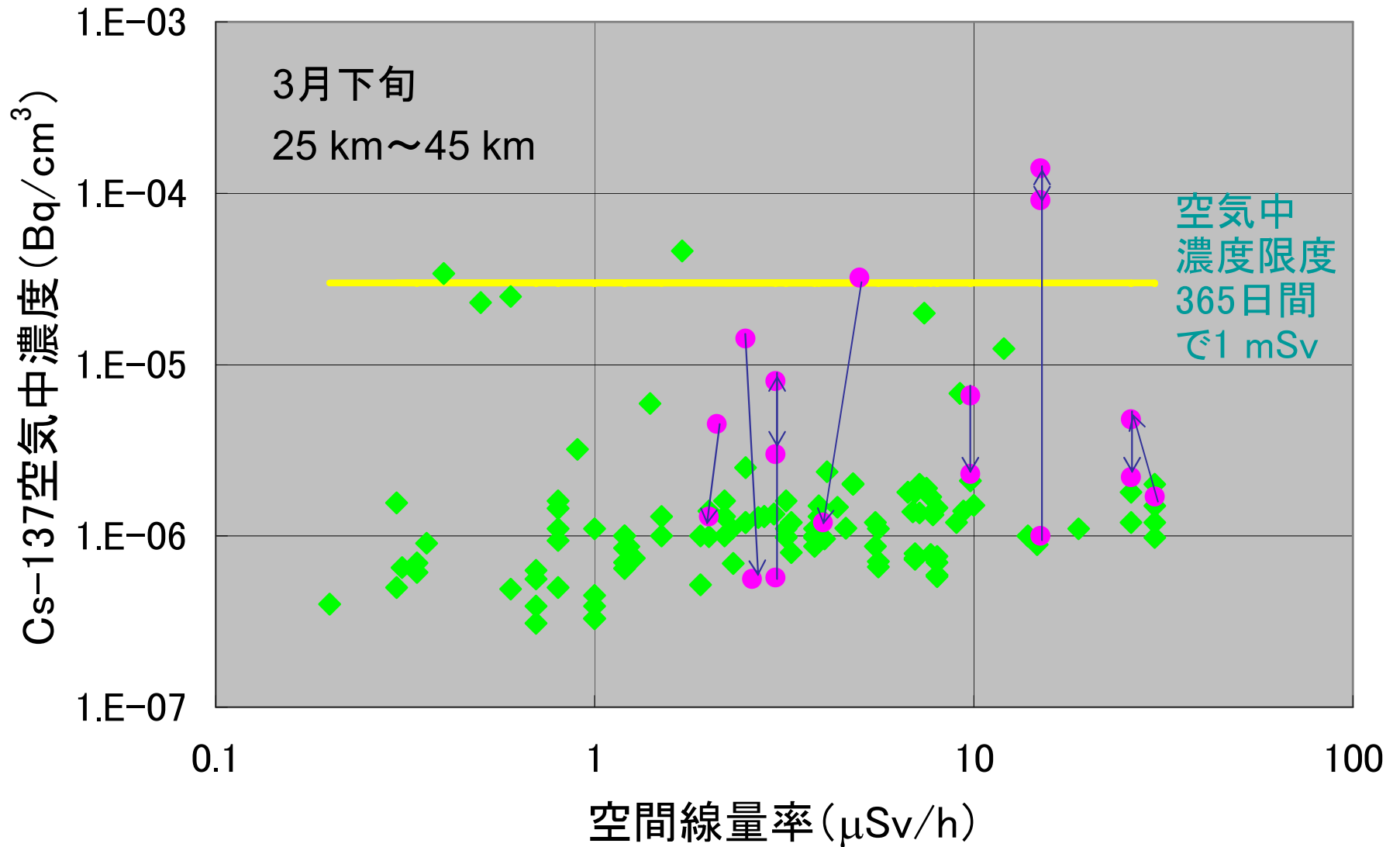


現在使われているCs-137の線量係数

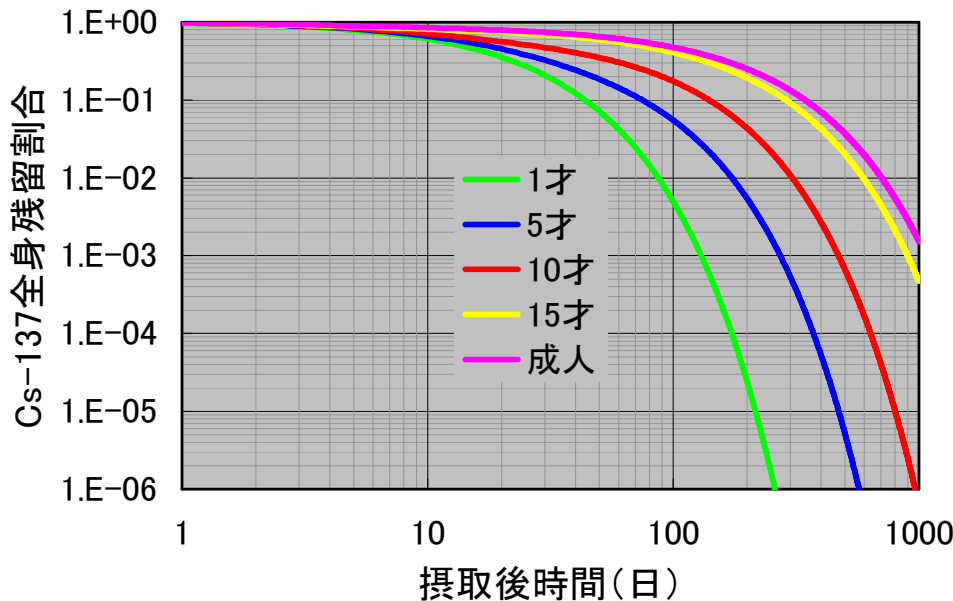
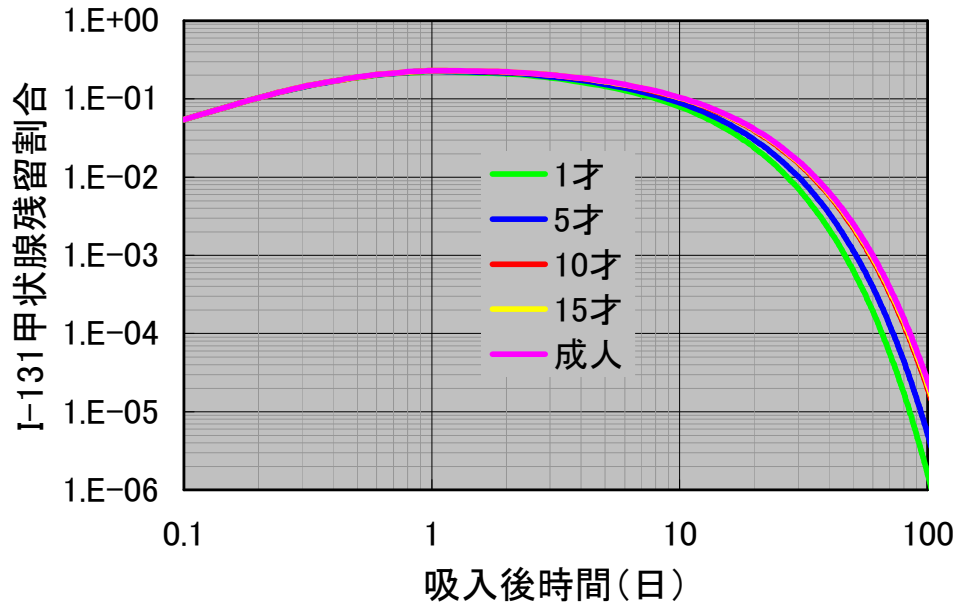
Cs-137、Type F 粒子の吸入



線源情報の推定の重要性



体内放射能の測定値からの線量の評価



$M(t)$: 摂取 t 日後の体内放射能測定値

$m(t)$: 摂取 t 日後の体内残留率計算値

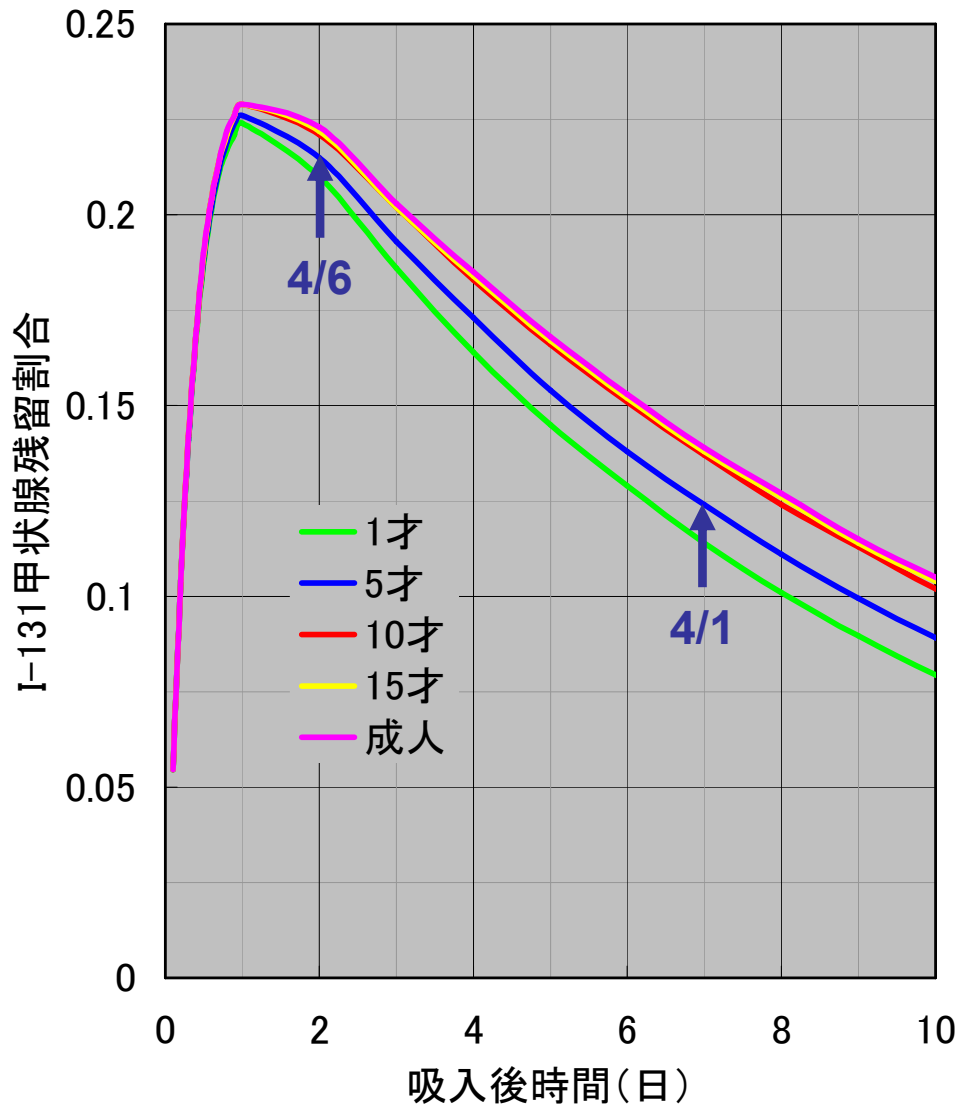
C : 線量係数 (Sv/Bq)



摂取放射能 $I = \frac{M(t)}{m(t)}$ (Bq)

実効線量 $E = C \times I$ (Sv)

摂取シナリオ推定の重要性



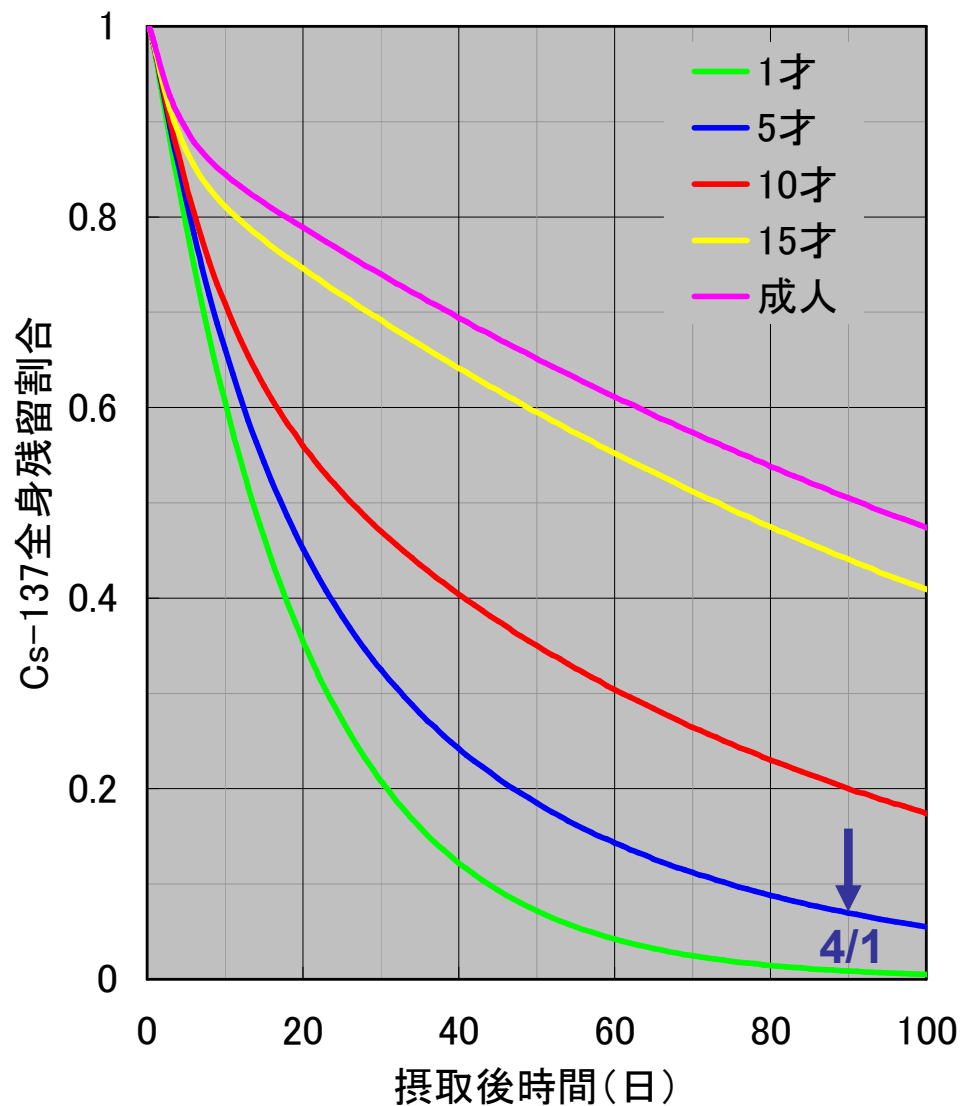
例題(1)

- ◆ 4月1日～6日に断続的にI-131の放出
- ◆ 4月8日に7才の子供の甲状腺計測で1500Bqが検出
- ◆ 実効線量係数 = 9.4×10^{-5} mSv/Bq (5才児の蒸気状ヨウ素元素の吸入)

- ◆ 摂取シナリオ1: 4月1日に吸入摂取
残留率(7日) = 0.124
摂取量 = $1500 / 0.124 = 12100$ Bq
預託実効線量 = 1.1 mSv

- ◆ 摂取シナリオ2: 4月6日に吸入摂取
残留率(2日) = 0.215
摂取量 = $1500 / 0.215 = 6980$ Bq
預託実効線量 = 0.66 mSv

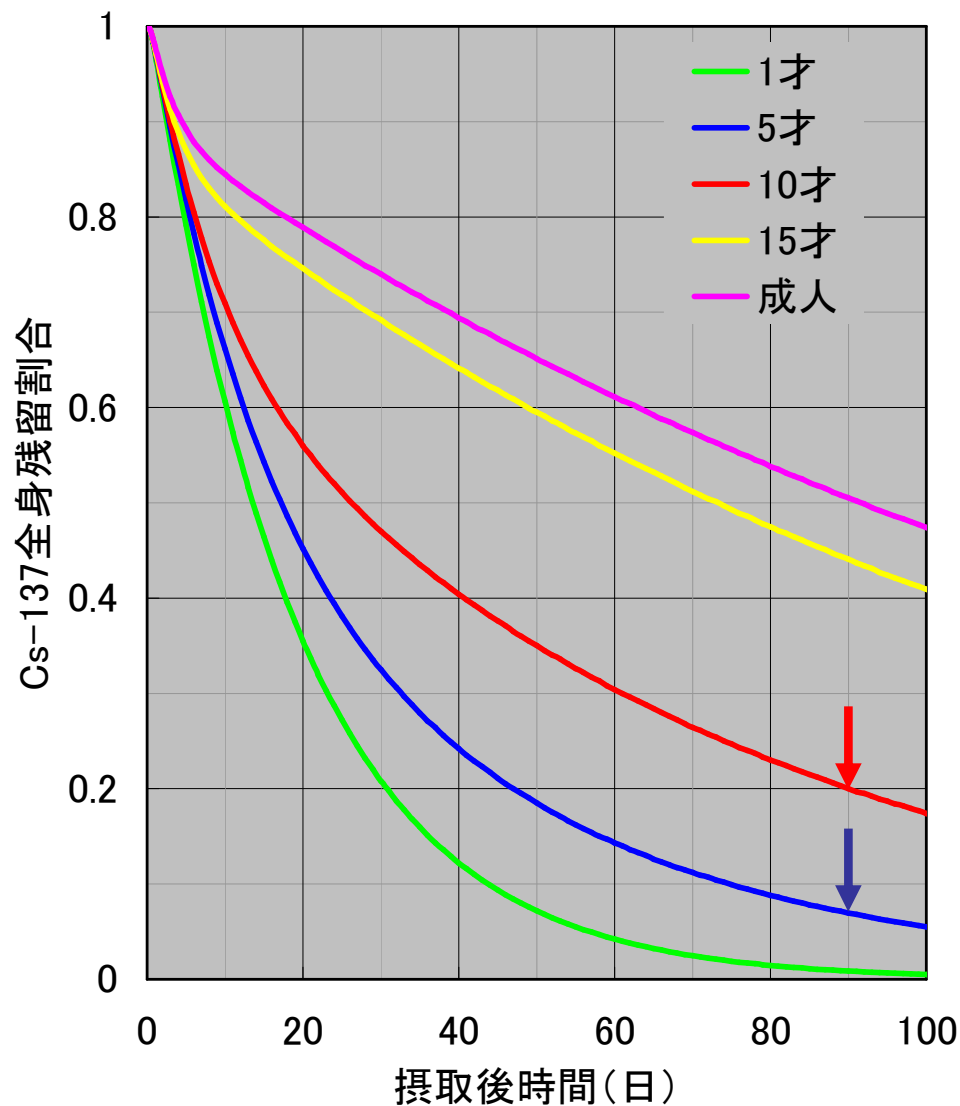
摂取シナリオ推定の重要性



例題(2)

- ◆ 4月1日にCs-137の放出があり、一帯が汚染。
 - ◆ 6月30日にその地域の7才の子供の全身計測で10000Bqが検出
 - ◆ 実効線量係数 = 9.6×10^{-6} mSv/Bq (5才児の経口摂取)
-
- ◆ 摂取シナリオ1: 4月1日に摂取
残留率(90日) = 0.0695
摂取量 = $10000 / 0.0695 = 144000$ Bq
預託実効線量 = 1.4 mSv
 - ◆ 摂取シナリオ2: 4月1日～6月29日に一様に慢性摂取
預託実効線量 = 0.32 mSv

適用モデルの重要性



例題(2)と同じ

- ◆4月1日にCs-137の放出があり、一帯が汚染。
- ◆6月30日にその地域の7才の子供の全身計測で10000Bqが検出

◆5才児(3,4,5,6,7才)のモデルを適用

残留率(90日) = 0.0695

摂取量 = $10000 / 0.0695 = 144000$ Bq

実効線量係数 = 9.6×10^{-6} mSv/Bq

預託実効線量 = 1.4 mSv

◆10才児(8,9,10,11,12才)のモデルを適用

残留率(90日) = 0.200

摂取量 = $10000 / 0.200 = 50000$ Bq

実効線量係数 = 1.0×10^{-5} mSv/Bq

預託実効線量 = 0.5 mSv

サマリー

1. 内部被ばくと外部被ばくとで共通の防護量

感受性部位の吸収線量、放射線加重係数、組織加重係数
70歳まで、あるいは50年間の総線量

2. 線量係数の開発 ← 研究の進展により改定

呼吸気道、消化管、組織系動態、人体数学ファントム

3. 内部被ばく線量評価の信頼性を左右するポイント

線源情報の推定

摂取シナリオの推定

モデルの適用



専門的で注意深い調査・考察が必要。
時間が経つにつれ困難となり、不確か
さが増大。