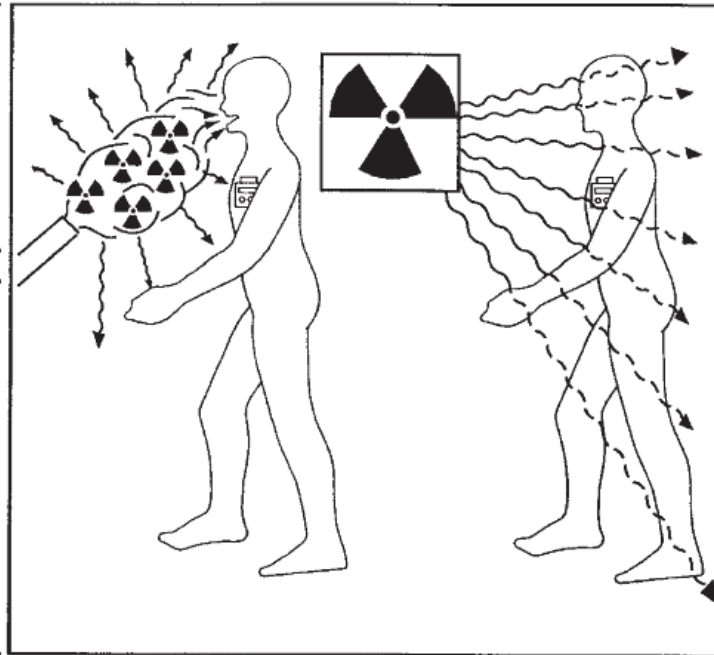


# 国際放射線防護委員会(ICRP)の 放射性核種の体内摂取に伴う線量評価モデル について

- (1) 内部被ばく線量評価モデルの概要
- (2) セシウム, ヨウ素, ストロンチウムの体内動態モデル
- (3) 胎児の放射線防護

(独) 日本原子力研究開発機構  
東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所  
栗原 治

# 外部被ばくと内部被ばく



*Dosimetry for external and internal exposure.*

Dosimeters are used to monitor external exposure.

Workers who are exposed to contamination may require dosimeters and monitoring for internal exposure.

内部被ばくとは、放射性物質が  
**吸入、経口、経皮(創傷)**を介して  
 体内に取り込まれることにより受ける被ばく  
 (職業被ばくでは吸入摂取が主)

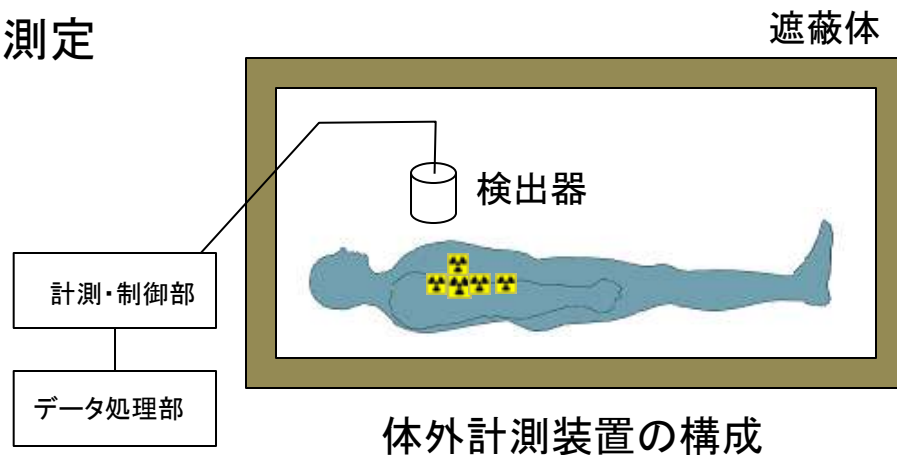
## 個人被ばく線量の評価

- 外部被ばく線量 ← **個人線量計**
- 内部被ばく線量 ← **放射性核種の  
 摂取量を評価  
 預託線量として  
 評価**

# 内部被ばく線量評価のための個人モニタリング

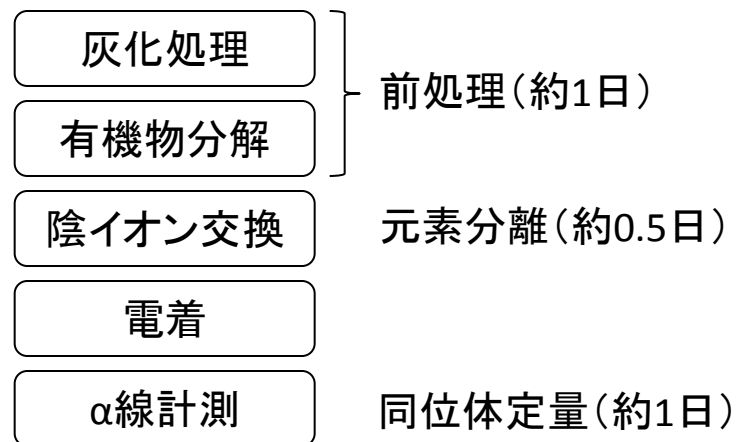
## 体外計測法(直接法)

- 全身または特定器官中の残留放射能を測定
- 長所: 被検者への負担少ない
- 短所: 検出線種は $\gamma$  (X)線のみ



## バイオアッセイ法(間接法)

- 便や尿などの生体試料を測定
- 長所: 線種を問わない( $\alpha$ ,  $\beta$  放射体)
- 短所: 測定に時間を要する



バイオアッセイ(Pu, Am)

# 職業被ばくと公衆被ばく－内部被ばくの場合



職業被ばく



公衆被ばく

外部被ばくは計画的に管理されるのに対し、内部被ばくは全てが想定外事象(事故)。  
ほとんどが人為的作業ミス、設備の不具合に起因。

原子力施設からの異常漏えい  
〔放射性プルームの吸入  
〔汚染飲食物の経口

# 線量評価モデルの開発(1)

ICRP Publication 2

- 職業人, 公衆に対する空气中/水中放射性物質濃度限度
- 決定臓器 (Critical Organ) の概念  
(最大許容身体負荷量, 有効エネルギー)

ICRP Publication 23/26/30

- 標準人 (Reference Man, Publ.23)
- 組織線量当量, 実効線量当量  $\sum w_T H_{50,T}$   
(比実効エネルギー, マルチコンパートメントモデル)
- 誘導限度 (DAC, ALI)

ICRP Publication 60/61

- 等価線量, 実効線量  
(組織荷重係数, 放射線荷重係数の見直し)

ICRP Publication  
60/66/56/67/69/70/72/68

- Publ.30体内動態モデルの改訂 (Publ. 66, 56, 67, 69, 70, 72)
  - ヒト呼吸気道モデル (Publ.66): 吸収タイプ, 組織感受性の違いを考慮, 公衆にも適用可能
  - 全身モデル (Publ.56, 67, 69, 70, 72): 主要元素の幾つかにリサイクルモデルを導入



ICRP Publication 89, 100, 103 & NCRP Report 156 (傷モデル)

# 線量評価モデルの開発(2)

Publ.2, 1 page

IONIZING RADIATION

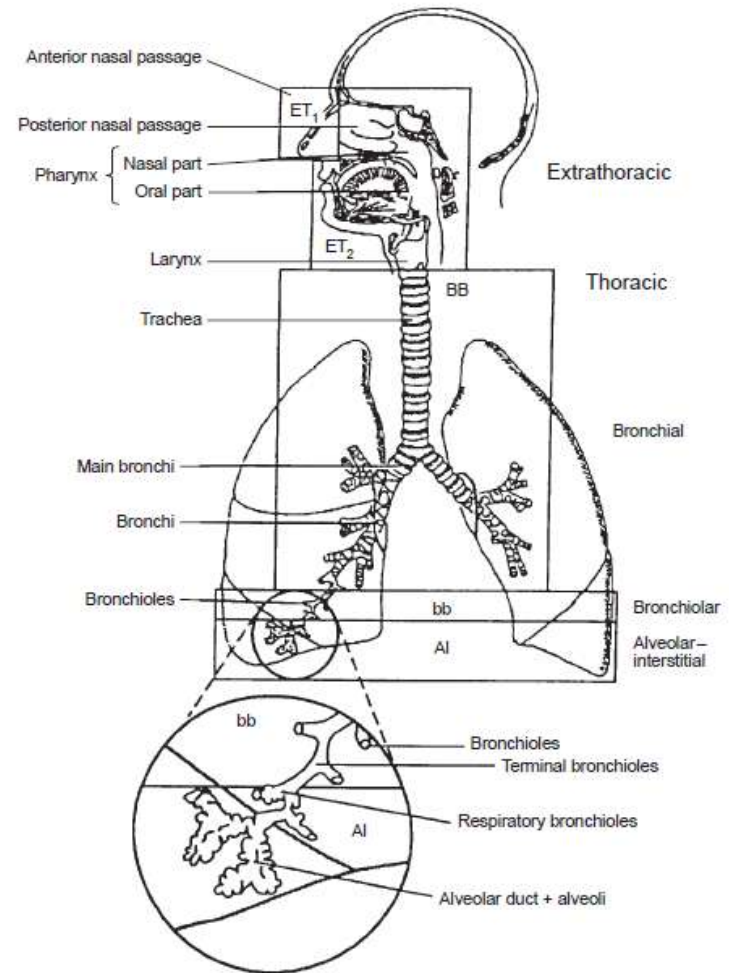
153

Publ.66, 600 pages, 1200 ref

Table 10. Particulates in respiratory tract of the standard man

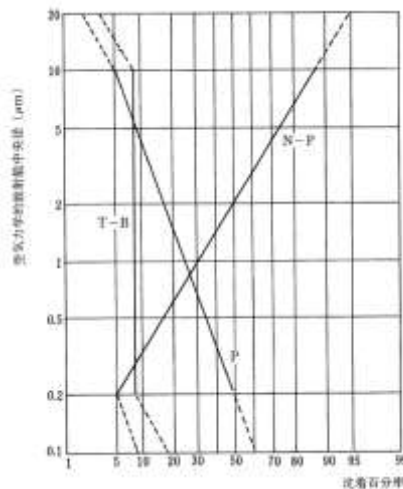
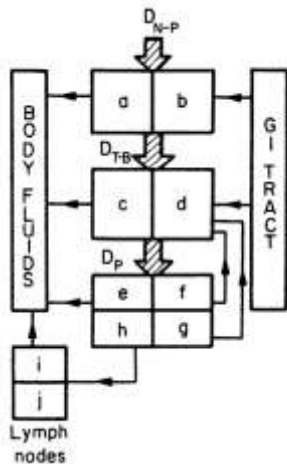
Retention of particulate matter in the lungs depends on many factors, such as the size, shape and density of the particles, the chemical form and whether or not the person is a mouth breather; however, when specific data are lacking it is assumed the distribution is as shown below.

Distribution	Readily soluble compounds (%)	Other compounds (%)
Exhaled	25	25
Deposited in upper respiratory passages and subsequently swallowed	50	50
Deposited in the lungs (lower respiratory passages)	25 (this is taken up into the body)	25*



Publ.30, 34 pages, 250 ref

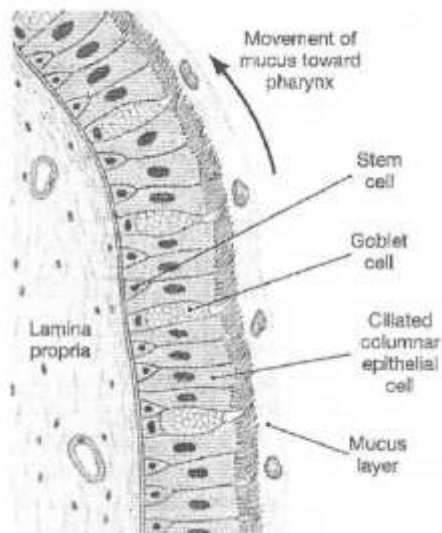
... 24 hrs, making a total of 62% per cent ... half-life of 120 days, it being assumed



最新の科学的知見(論文)を参考に改訂作業が継続(呼吸気道モデル)

# 線量評価モデルの開発(3)

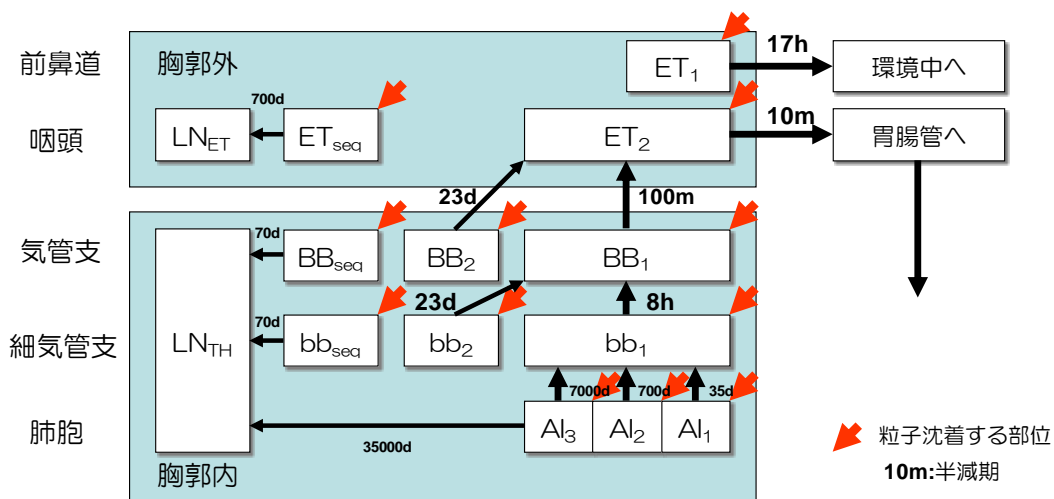
## 気管支上皮における粘膜輸送



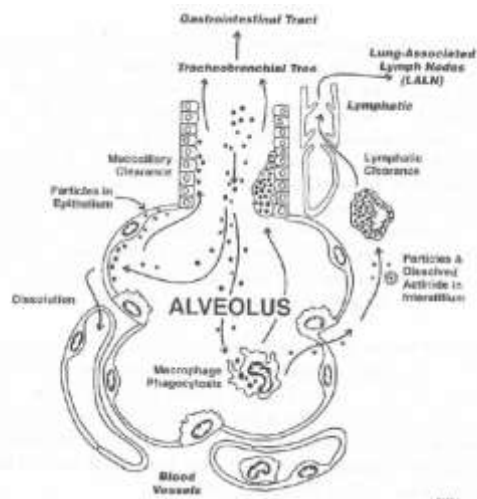
モデル化



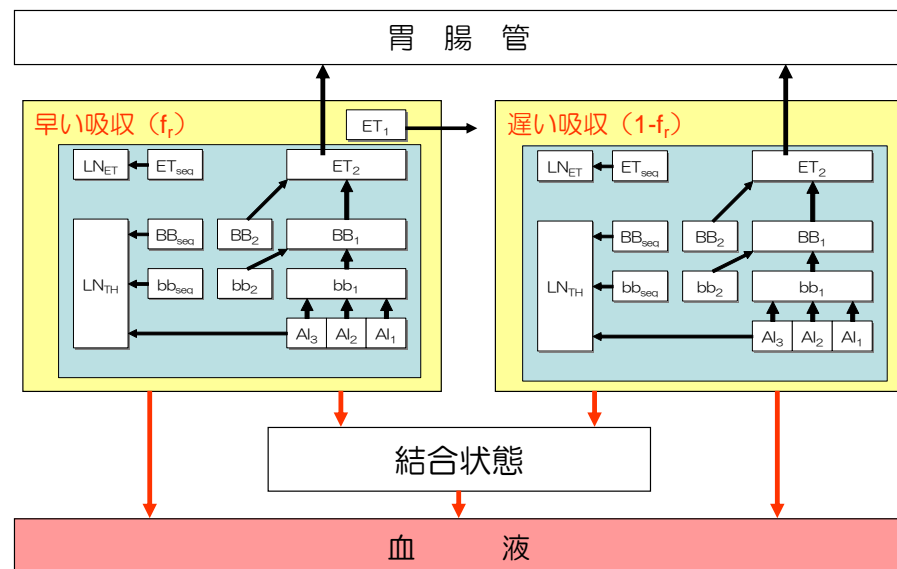
## ヒト呼吸気道モデル(ICRP Publ.66)



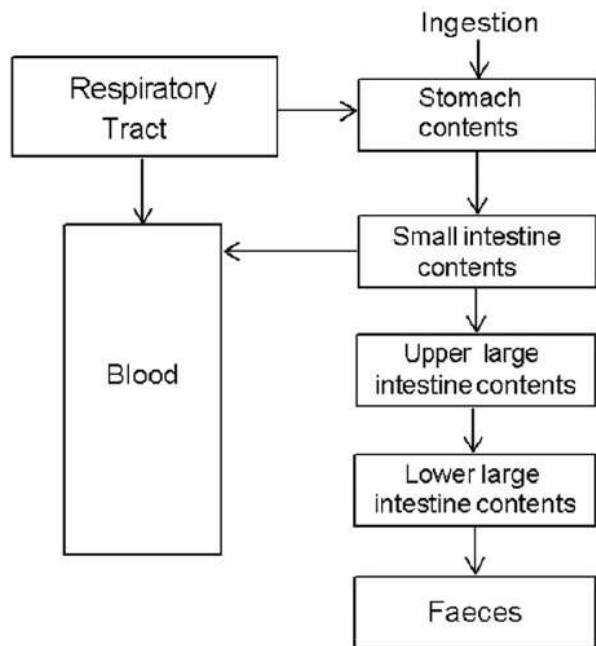
## 肺胞内部での吸収



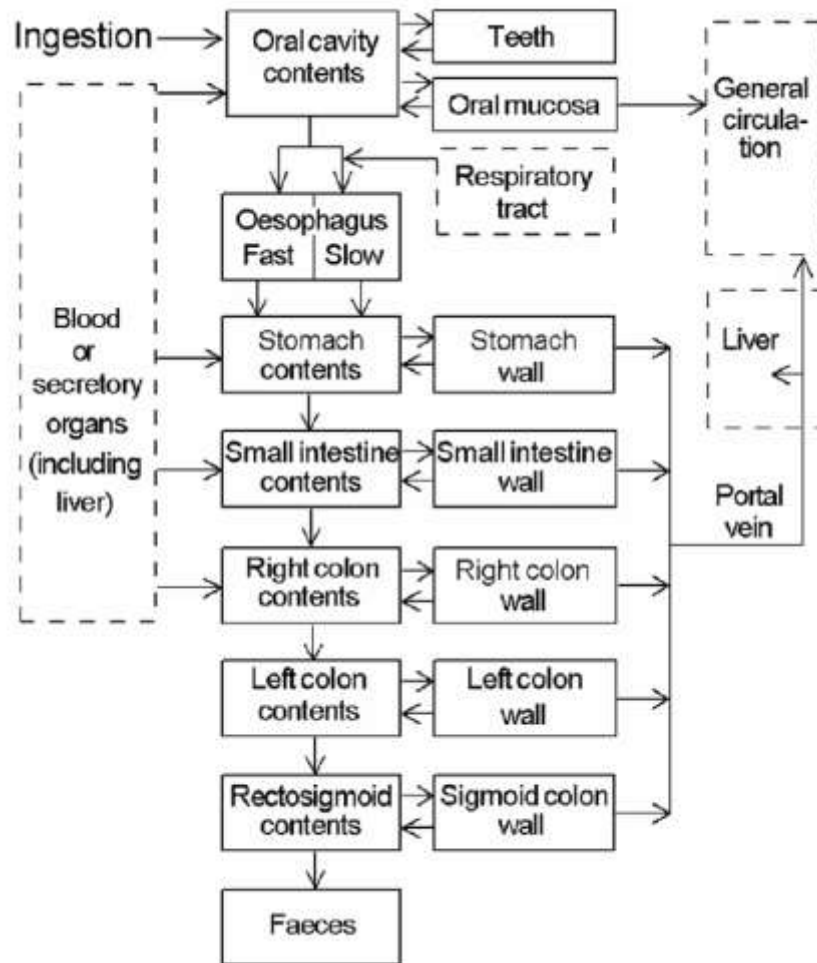
モデル化



# 線量評価モデルの開発(4)



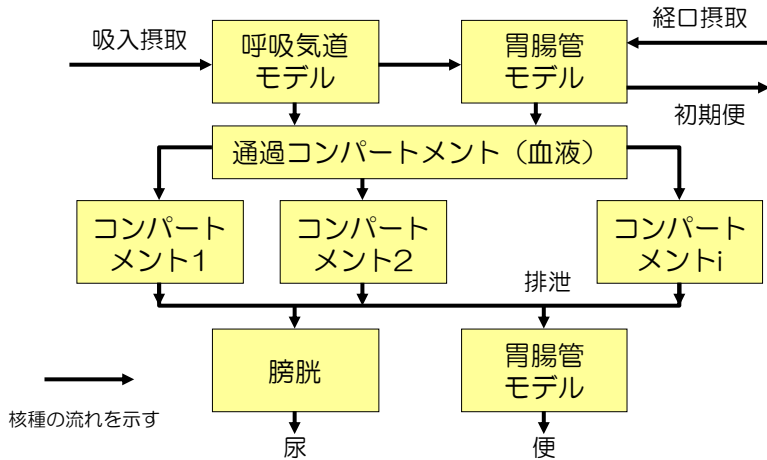
胃腸管モデル  
ICRP Publication 30 (1979)



ヒト消化管モデル  
ICRP Publication 100 (2006)



# コンパートメントモデル



非リサイクルモデル

## コンパートメントモデルとは...

- ◆ 外と物質の出入を行っている系(例えば生物)において、ある特定物質の量的行動のみに着目し、系を、それぞれが均一な動態に従ういくつかの箱(コンパートメント)に連結とみなして、箱の流れの断面(フラックス)で連結し、系の物質移動を数学的に記述する模型。必ずしも解剖学的な区画と対応するものではない。

松原, 保健物理, 12, 1-11 (1977) から

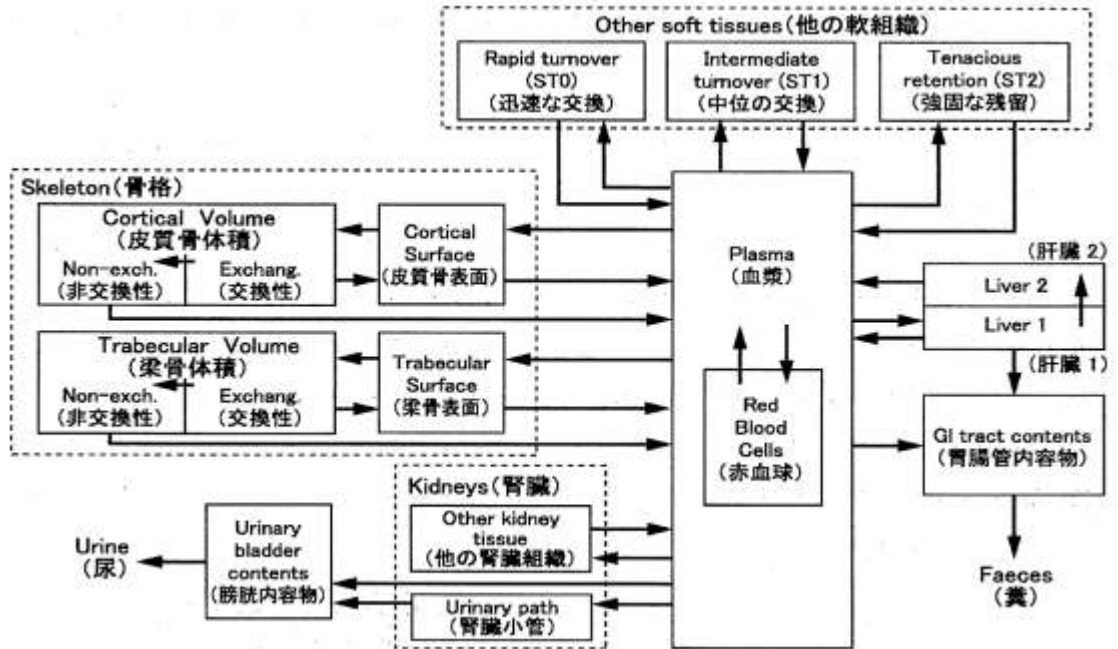
## 1次反応とは...

- ◆ あるコンパートメントからの流出量はそのコンパートメント内の物質に比例

$$C \text{ (Bq)} \longrightarrow \frac{dC}{dt} = -\lambda C$$

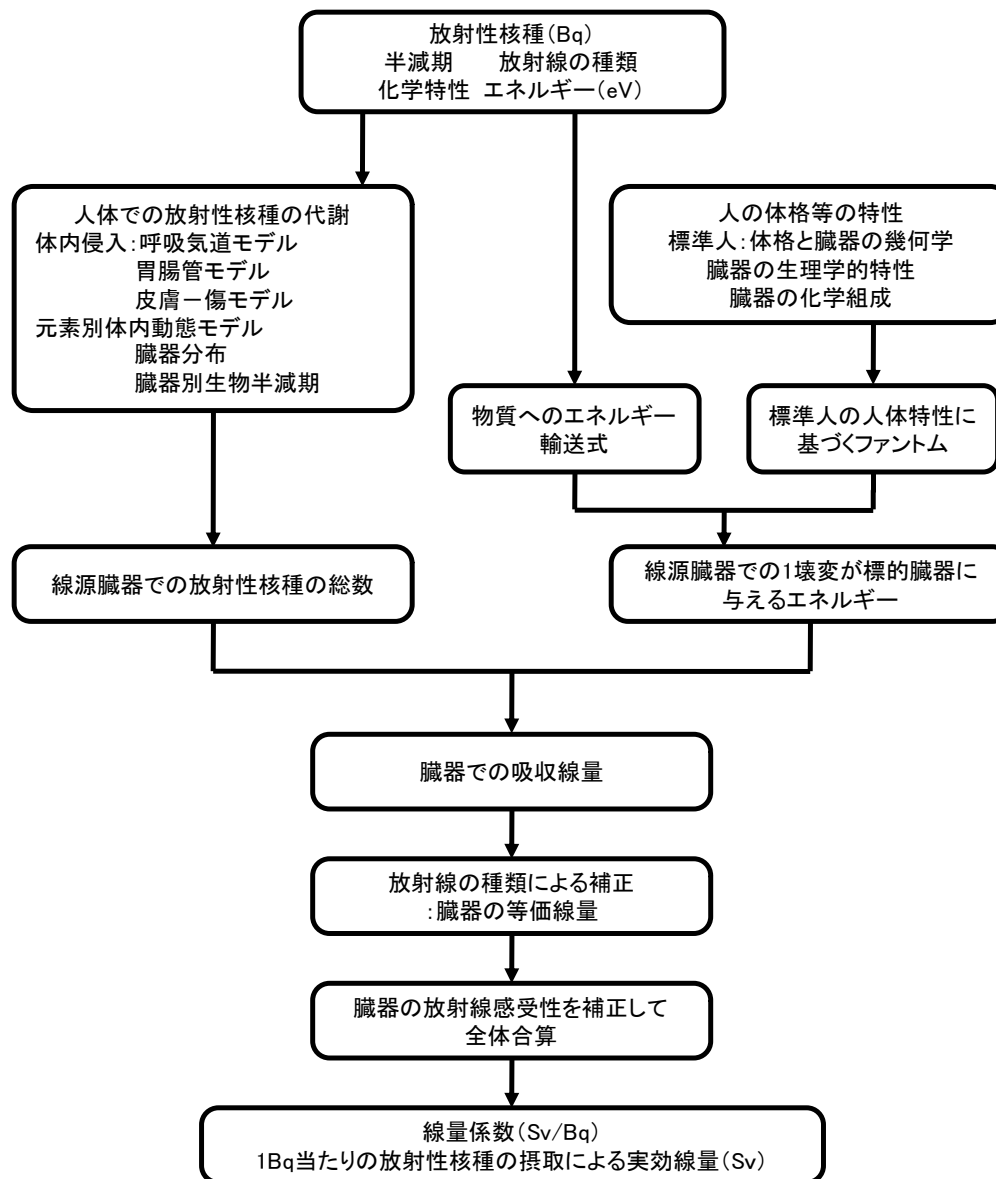
$$\lambda = \ln(2)/T$$

(Tはコンパートメントの生物半減期)



リサイクルモデル

# 内部被ばく線量の計算手順



# 内部被ばく線量係数等の導出

Output

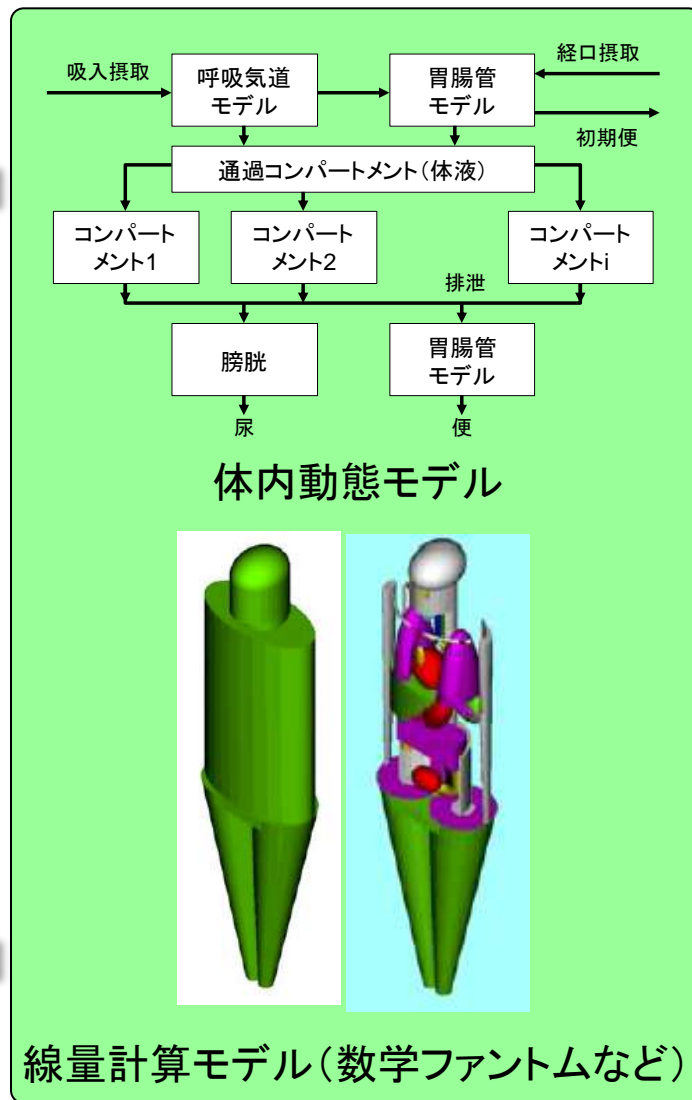
残留率/排泄率  
(Bq/Bq Intake)

IRF : Intake Retention Function



Input

摂取量  
1 Bq



線量評価モデル

Output

実効線量係数  
(Sv/Bq)

DPUI : Dose Per Unit Intake



# (内部被ばく)線量係数に関するICRP刊行物

Table I.1. Summary of reports on dose coefficients for workers and members of the public from intakes of radionuclides

ICRP Publication No. (year)	Application	Contents
56 (1989)	Public*	Inhalation and ingestion Age-dependent biokinetic models with effective dose coefficients and tissue equivalent dose coefficients for selected radioisotopes of H, C, Sr, Zr, Nb, Ru, I, Cs, Ce, Pu, Am, and Np. Predates <i>Publication 60</i> (ICRP, 1991) hence used tissue weighting factors from <i>Publication 26</i> (ICRP, 1977). Predates <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994b), hence used lung model from <i>Publication 30</i> (ICRP, 1979). The dose coefficients given in <i>Publication 56</i> were superseded by those in <i>Publications 67</i> and <i>71</i> .
67 (1993)	Public*	Ingestion Age-dependent biokinetic models with effective dose coefficients and tissue equivalent dose coefficients for ingestion of selected radioisotopes of S, Co, Ni, Zn, Mo, Tc, Ag, Te, Ba, Pb, Po, and Ra. Updated biokinetic models are given for Sr, Pu, Am, and Np. Updated dose coefficients are given for H, C, Sr, Zr, Nb, Ru, I, Cs, Ce, Pu, Am, and Np using tissue weighting factors from <i>Publication 60</i> (ICRP, 1991)
68 (1994)	Workers	Inhalation and ingestion Effective dose coefficients for workers for about 800 radionuclides: selected radioisotopes of the 91 elements covered in <i>Publication 30, Parts 1–4</i> (ICRP, 1979, 1980, 1981, 1988b). Intakes by both ingestion and inhalation. The inhalation dose coefficients for workers exposed to <sup>226</sup> Ra given in <i>Publication 68</i> were revised in Annex B of <i>Publication 72</i> . Human respiratory tract model (HRTM) applied for inhalation intakes [ <i>Publication 66</i> (ICRP, 1994a)].
69 (1995)	Public*	Ingestion Age-dependent biokinetic models with effective dose coefficients and tissue equivalent dose coefficients for ingestion of selected radioisotopes for Fe, Sb, Se, Th, and U.
71 (1995)	Public*	Inhalation Effective dose coefficients and tissue equivalent dose coefficients for inhalation of the radioisotopes of elements covered in <i>Publications 56, 67, and 69</i> , plus isotopes of Ca and Cm for which age-dependent biokinetic models are also given. HRTM applied.
72 (1996)	Public*	Inhalation and ingestion Effective dose coefficients for radioisotopes of the 31 elements covered in <i>Publications 56, 67, 69, and 71</i> , plus radioisotopes of the further 60 elements covered in <i>Publications 30 and 68</i> . Intakes by both ingestion and inhalation. HRTM applied.
CD1 (1999)	Public* and workers	Inhalation and ingestion A database of effective and tissue equivalent dose coefficients for 10 aerosol particle sizes and 10 times after intake. All radionuclides covered in <i>Publications 68 and 72</i> . Consistent with the dose coefficients in <i>Publications 68 and 72</i> . Extensive help files also provided.
88 (2001)	Public and workers	Inhalation and ingestion Fetal dose coefficients for intakes before and during pregnancy of the 31 elements covered in <i>Publications 56, 67, 69, and 71</i> , including doses to the embryo and fetus and to the child from activity retained at birth.
CD2 (2002)	Public and workers	Inhalation and ingestion A database of effective and tissue equivalent fetal dose coefficients for 10 aerosol particle sizes and five times after birth. All radionuclides covered in <i>Publication 88</i> . Consistent with the dose coefficients in <i>Publication 88</i> . Extensive help files also provided.

\* Age-dependent dose coefficients (3 months, 1, 5, 10, and 15 years, and adult).

# 胎児の線量係数

➤ **ICRP Publication 88 (2002):**

**Doses to Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother.**

➤ **ICRP Publication 95 (2004):**

**Doses to Infants from Ingestion of Radionuclides in Mothers' Milk.**

ICRP Doses from breast milk CD-ROM

File General information ICRP 95 Help

### Nuclides

List	Selected
P-33	25.4 d
S-35	87.4 d
K-42	12.4 h
K-43	22.6 h
Ca-45	163 d
Ca-47	4.53 d
Fe-55	2.70 y
Fe-59	44.5 d
Co-57	271 d
Co-58	70.8 d
Co-60	5.27 y
Ni-59	7.50E+04 y
Ni-63	96.0 y
Zn-65	244 d
Se-75	120 d
Se-79	6.50E+04 y
Sr-89	50.5 d
<b>Sr-90</b>	<b>29.1 y</b>
Zr-95	64.0 d

Input:

### Maternal exposure

Public  
 Occupational

### Intake routes

All routes  
 Ingestion  
 Inhalation - particulates  
 Inhalation - vapours

### Aerosol AMAD (um)

All AMADs

0.001  
 0.003  
 0.01  
 0.03  
 0.1  
 0.3  
 1.0  
 3.0  
 5.0  
 10.0

### Maternal intake scenarios

#### Acute intakes

All acute scenarios

2.5 years prior to conception  
 6 months prior to conception  
 At conception  
 5 weeks after conception  
 10 weeks after conception  
 15 weeks after conception  
 25 weeks after conception  
 35 weeks after conception  
 At birth  
 1 week after birth  
 5 weeks after birth  
 10 weeks after birth  
 15 weeks after birth  
 20 weeks after birth

#### Chronic intakes

All chronic scenarios

5 years before until conception  
 1 year before until conception  
 from conception to birth  
 from birth for 6 months

### Integration to age

All ages

1 year  
 5 years  
 10 years  
 20 years  
 70 years

### Organs or Tissues

All organs

Adrenals  
 Bladder wall  
 Bone Surface  
 Brain  
 Breast  
 GI Tract - Oesophagus

### Options

### Dose coefficients (Sv/Bq)

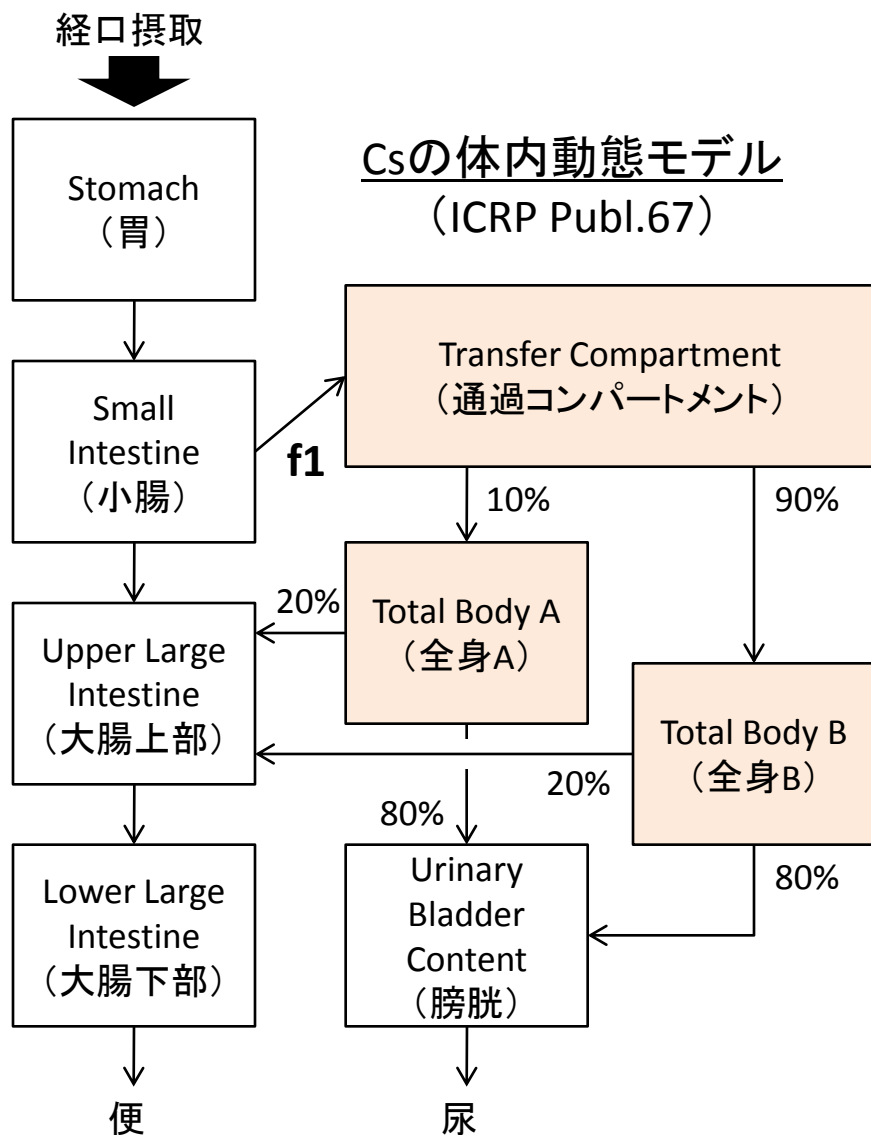
Sr-90, half-life is 29.1 y  
Acute intake (1Bq) at conception  
Ingestion: f1 = 0.6  
Public

Tissue/Organ	Dose coefficients (Sv/Bq)
	70y
ET Airways	1.4E-11
Lungs	1.4E-11
Skin	1.4E-11
Spleen	1.4E-11
Testes	1.4E-11
Thymus	1.4E-11
Thyroid	1.4E-11
Uterus	1.4E-11
Remainder	1.5E-11
Effective dose	3.1E-10

Table 3 of 14

ICRP CD3: Database of Infant Doses from Breast Milk

# セシウム体内動態モデル



(図中のパラメータ値は成人に対するもの)

ICRP Publ.67 Table C-8.1

Age	f1	Distribution(%)		Biological half-time (d)	
		Total Body A	Total Body B	Total Body A	Total Body B
3 mo	1	---	100	---	16
1-y	1	---	100	---	13
5-y	1	45	55	9.1	30
10-y	1	30	70	5.8	50
15-y	1	13	87	2.2	93
Adult	1*	10*	90*	2*	110*

\* ICRP Publ.30からの引用。男性に対しては適当であるが、女性に対する線量係数を計算するには保守的(過大)となる。

## 線量評価モデル上の取り扱い

- ①セシウムは全ての器官、全身にわたって均一に分布すると仮定。比実効エネルギー(SEE)は全身を線源として計算
- ②通過コンパートメントからの直接排泄はない。

# $^{137}\text{Cs}$ の年齢別線量係数(経口摂取)

$^{137}\text{Cs}$ の経口摂取における線量係数( $\text{Sv Bq}^{-1}$ : 70歳に到達するまでに受ける線量)

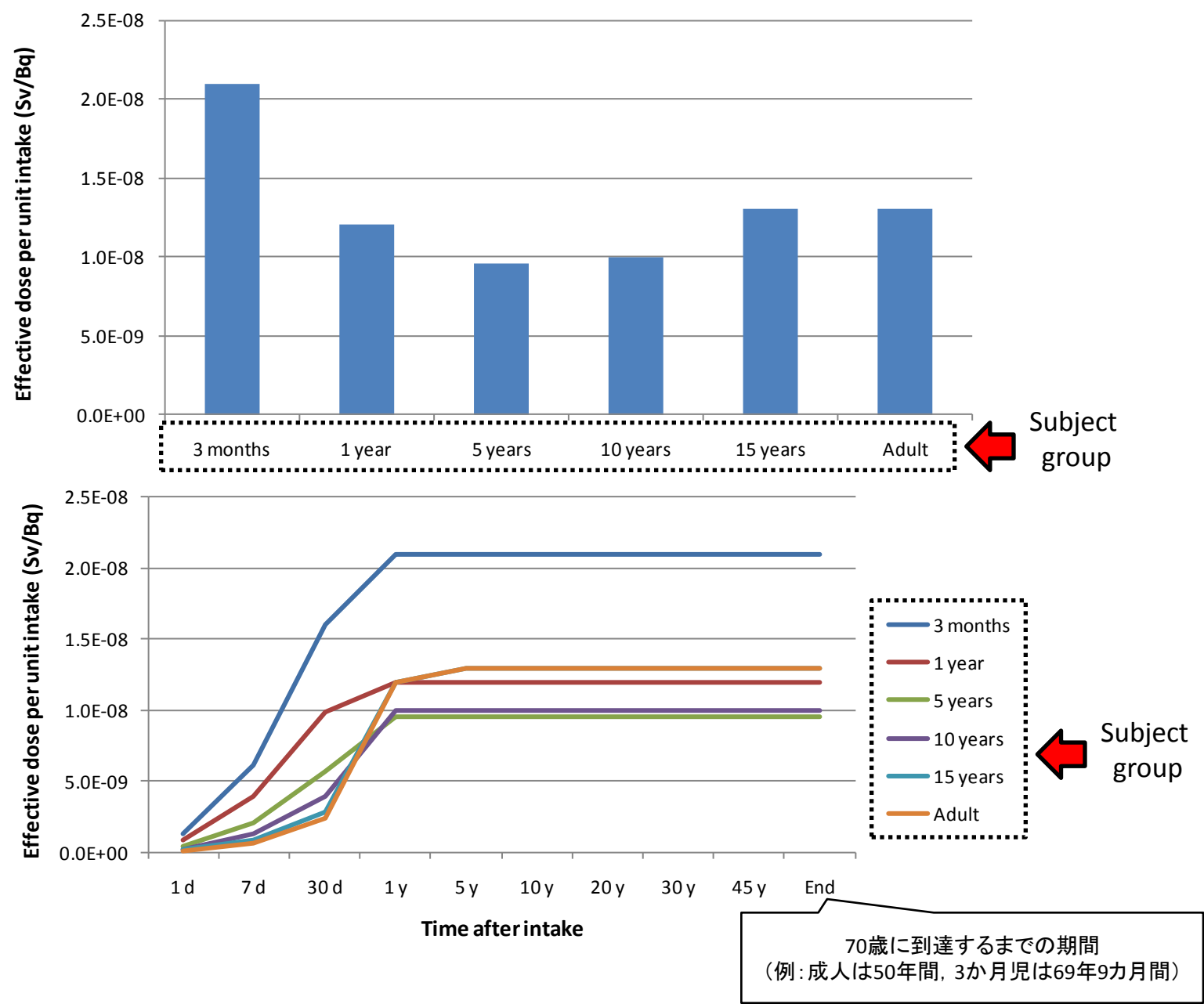
Age at Intake	3 months	1 year	5 years	10 years	15 years	Adult
Adrenals	1.9E-08	1.1E-08	9.0E-09	1.0E-08	1.4E-08	1.4E-08
Bladder Wall	2.0E-08	1.2E-08	1.1E-08	1.1E-08	1.4E-08	1.4E-08
Bone Surface	1.9E-08	1.1E-08	8.7E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.4E-08
Brain	1.8E-08	1.0E-08	8.2E-09	8.8E-09	1.2E-08	1.2E-08
Breast	1.6E-08	9.1E-09	7.3E-09	8.0E-09	1.1E-08	1.1E-08
Oesophagus	1.8E-08	1.0E-08	8.5E-09	9.4E-09	1.3E-08	1.3E-08
St Wall	2.2E-08	1.2E-08	9.5E-09	9.6E-09	1.3E-08	1.3E-08
SI Wall	2.0E-08	1.1E-08	9.3E-09	1.0E-08	1.4E-08	1.4E-08
ULI Wall	2.9E-08	1.8E-08	1.2E-08	1.2E-08	1.4E-08	1.4E-08
LLI Wall	4.9E-08	3.1E-08	1.9E-08	1.6E-08	1.6E-08	1.7E-08
Colon	3.8E-08	2.3E-08	1.5E-08	1.3E-08	1.5E-08	1.5E-08
Kidneys	1.9E-08	1.1E-08	8.8E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.3E-08
Liver	1.9E-08	1.1E-08	8.8E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.3E-08
Muscle	1.8E-08	1.0E-08	8.2E-09	9.0E-09	1.2E-08	1.2E-08
Ovaries	2.0E-08	1.1E-08	9.4E-09	1.0E-08	1.4E-08	1.4E-08
Pancreas	1.9E-08	1.1E-08	9.2E-09	1.0E-08	1.4E-08	1.4E-08
Red Marrow	1.7E-08	9.9E-09	8.3E-09	9.3E-09	1.3E-08	1.3E-08
ET Airways	1.9E-08	1.1E-08	9.0E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.3E-08
Lungs	1.8E-08	1.0E-08	8.3E-09	9.2E-09	1.3E-08	1.3E-08
Skin	1.6E-08	9.0E-09	7.2E-09	7.8E-09	1.0E-08	1.1E-08
Spleen	1.9E-08	1.1E-08	8.8E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.3E-08
Testes	1.8E-08	1.0E-08	8.2E-09	8.9E-09	1.2E-08	1.2E-08
Thymus	1.8E-08	1.0E-08	8.5E-09	9.4E-09	1.3E-08	1.3E-08
Thyroid	1.9E-08	1.1E-08	9.0E-09	9.7E-09	1.3E-08	1.3E-08
Uterus	1.9E-08	1.1E-08	9.3E-09	1.0E-08	1.4E-08	1.4E-08
Remainder	1.8E-08	1.0E-08	8.2E-09	9.1E-09	1.2E-08	1.2E-08
Effective dose	<b>2.1E-08</b>	<b>1.2E-08</b>	<b>9.6E-09</b>	<b>1.0E-08</b>	<b>1.3E-08</b>	<b>1.3E-08</b>

※線量係数の年齢区分  
 3か月児: 生後から12カ月まで,  
 1歳児: 1歳から2歳まで,  
 5歳児: 2歳から7歳まで,  
 10歳児: 7歳から12歳まで,  
 15歳児: 12歳から17歳まで,  
 成人: 17歳以上

Data taken from ICRP Database of dose coefficients: Workers and Members of the Public (CD-ROM).



# 一般公衆に対する<sup>137</sup>Csの実効線量係数(経口摂取)



# セシウム体内動態モデルの根拠(1)

- 血中への取り込み: ヒト及び動物実験のデータから、可溶性Csの胃腸管から血液中への吸収は急速であり、ほぼ完全に吸収される。一方、食物中のCsについては、吸収が必ずしも完全でないことを示すデータもある。しかし、情報が十分ではないため、モデルの胃腸管吸収割合( $f_1$ )値は、全ての年齢に対し1(100%)とする。
- 分布と残留: セシウムの体内動態はカリウムと類似しており、血中に取り込まれた後、全身に分布する。筋肉は他の部位に比べセシウム濃度が高くなる報告があるものの、その差は小さい。したがって、線量評価の目的においてはセシウムは全身均一分布と仮定する。
- 職業被ばくした作業員について、セシウムの残留率関数として次の近似式がある。

$$R(t) = 0.1e^{-0.693/T_1} + 0.9e^{-0.693/T_2} \quad (T_1=2 \text{ days}, T_2=110 \text{ days})$$

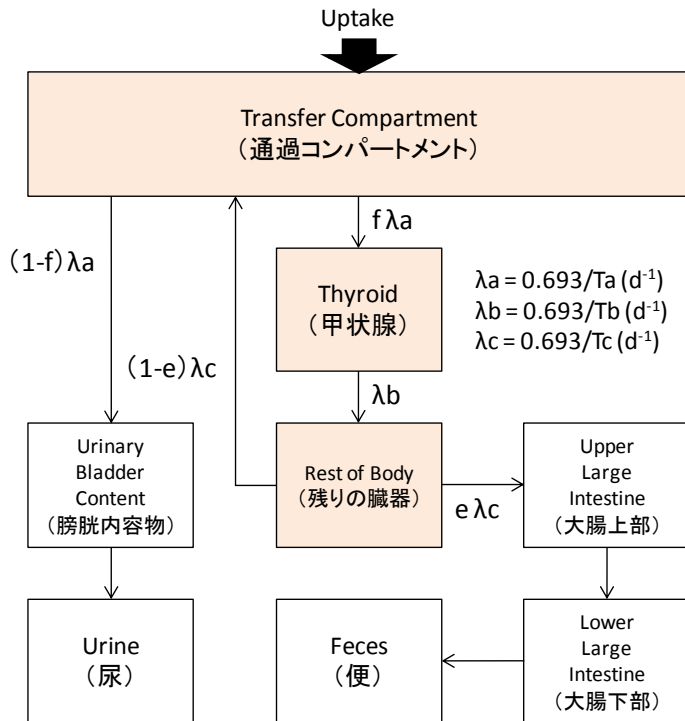
- 早いクリアランス成分は血中から数時間内に腎臓に排泄される結果であり、遅いクリアランス成分は筋肉や他の部位に蓄積されたセシウムが主に尿中に排泄される結果として現れる。
- 遅いクリアランス成分の半減期は50日から150日の範囲であり、平均値として概ね100日である。

## セシウム体内動態モデルの根拠(2)

- **女性**: 遅いクリアランス成分の割合が男性に比べて少ない報告がある。しがたって、ICRPが推奨する残留パラメータは、女性の被ばく線量を計算する際に、保守的(過大)になる可能性がある。
- **子供**: (新生児を除く)子供は成人と比べて体からのCsの排泄率が増加する。体内残留率の年齢差は、体重の変化や体内のカリウム量に関連。ICRPは最も包括的なLeggett(1986)のモデルを採用。
- **乳児**: 動物実験の結果から、全身からのセシウムの損失は、食物中のカリウム濃度に影響を受けることが示唆されている。カリウムの摂取が多いとセシウムの排泄が増加。乳児の排泄関数は、1つのクリアランス成分で表わされる。カリウムの損失が遅いのは、腎機能の発達が未熟であるため。

(ICRP Publ.56の本文を意識)

# ヨウ素体内動態モデル



ICRP Publ.56 Table 7.1

Age	f1	甲状腺 吸収 (%)	便排泄 (%)	血液 Ta (d)	甲状腺 Tb (d)	残り臓器 Tc (d)
3 mo	1	30	20	0.25	11.2	1.12
1-y	1	30	20	0.25	15	1.5
5-y	1	30	20	0.25	23	2.3
10-y	1	30	20	0.25	58	5.8
15-y	1	30	20	0.25	67	6.7
Adult	1*	30*	20	0.25*	80*	12*

\* ICRP Publ.30からの引用。

## Iの体内動態モデル (ICRP Publ.56)

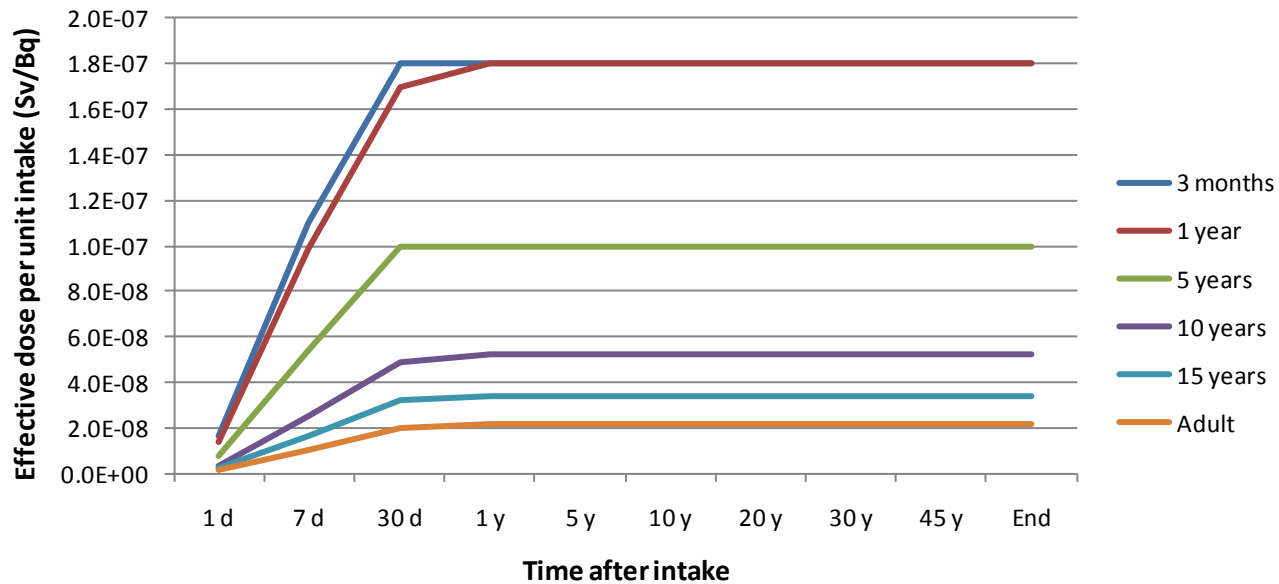
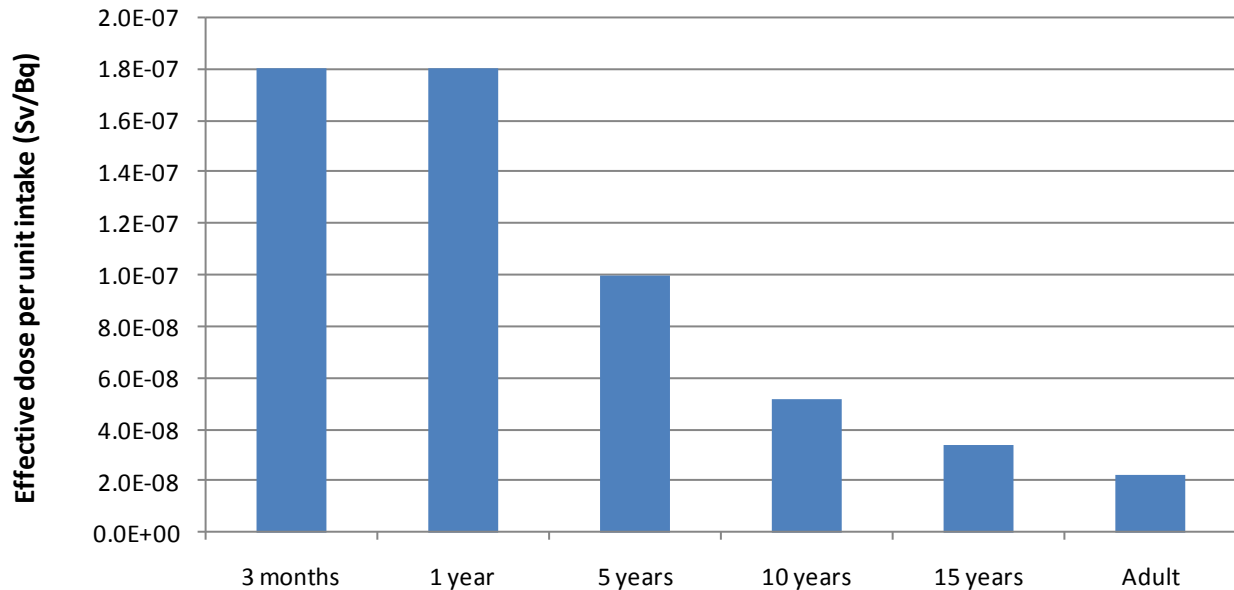
# $^{131}\text{I}$ の年齢別線量係数(経口摂取)

$^{131}\text{I}$ の経口摂取における線量係数( $\text{Sv Bq}^{-1}$ :70歳に到達するまでに受ける線量)

Age at Intake	3 months	1 year	5 years	10 years	15 years	Adult
Adrenals	4.8E-10	3.4E-10	1.8E-10	1.1E-10	6.2E-11	5.1E-11
Bladder Wall	1.9E-09	1.5E-09	1.4E-09	1.2E-09	1.0E-09	7.6E-10
Bone Surface	6.1E-10	4.4E-10	2.8E-10	1.9E-10	1.4E-10	1.3E-10
Brain	5.3E-10	3.8E-10	2.5E-10	2.0E-10	1.5E-10	1.4E-10
Breast	5.7E-10	4.2E-10	2.3E-10	1.5E-10	7.4E-11	6.0E-11
Oesophagus	2.3E-09	1.7E-09	8.5E-10	4.6E-10	2.2E-10	1.5E-10
St Wall	3.5E-09	2.0E-09	9.8E-10	5.6E-10	3.8E-10	3.0E-10
SI Wall	5.4E-10	3.6E-10	1.8E-10	1.1E-10	6.5E-11	5.4E-11
ULI Wall	1.7E-09	1.0E-09	4.5E-10	2.0E-10	1.1E-10	8.8E-11
LLI Wall	3.8E-09	2.2E-09	9.1E-10	3.8E-10	2.1E-10	1.6E-10
Colon	2.6E-09	1.5E-09	6.5E-10	2.8E-10	1.5E-10	1.2E-10
Kidneys	4.3E-10	2.9E-10	1.6E-10	8.9E-11	5.5E-11	4.6E-11
Liver	4.8E-10	3.3E-10	1.7E-10	1.0E-10	6.0E-11	4.9E-11
Muscle	8.7E-10	6.6E-10	3.8E-10	2.5E-10	1.6E-10	1.3E-10
Ovaries	4.9E-10	3.3E-10	1.8E-10	1.0E-10	6.3E-11	5.2E-11
Pancreas	5.3E-10	3.7E-10	2.0E-10	1.2E-10	7.2E-11	6.1E-11
Red Marrow	5.2E-10	3.7E-10	2.2E-10	1.6E-10	1.2E-10	1.0E-10
ET Airways	5.6E-10	4.0E-10	2.6E-10	2.0E-10	1.6E-10	1.5E-10
Lungs	7.2E-10	5.4E-10	3.3E-10	2.1E-10	1.3E-10	1.0E-10
Skin	4.8E-10	3.4E-10	1.8E-10	1.2E-10	8.2E-11	6.9E-11
Spleen	4.8E-10	3.3E-10	1.8E-10	1.1E-10	6.6E-11	5.4E-11
Testes	3.8E-10	2.5E-10	1.4E-10	8.1E-11	4.8E-11	4.0E-11
Thymus	2.3E-09	1.7E-09	8.5E-10	4.6E-10	2.2E-10	1.5E-10
<b>Thyroid</b>	<b>3.7E-06</b>	<b>3.6E-06</b>	<b>2.1E-06</b>	<b>1.0E-06</b>	<b>6.8E-07</b>	<b>4.3E-07</b>
Uterus	4.7E-10	3.2E-10	2.0E-10	1.1E-10	6.9E-11	5.9E-11
Remainder	7.9E-10	6.0E-10	3.6E-10	2.4E-10	1.5E-10	1.2E-10
Effective dose	<b>1.8E-07</b>	<b>1.8E-07</b>	<b>1.0E-07</b>	<b>5.2E-08</b>	<b>3.4E-08</b>	<b>2.2E-08</b>

Data taken from ICRP Database of dose coefficients: Workers and Members of the Public (CD-ROM).

## 一般公衆に対する<sup>131</sup>Iの実効線量係数(経口摂取)



# ヨウ素体内動態モデルの根拠(1)

- 血中への取り込み: 動物とヒトでは、水溶液中のヨウ素は投与後ほぼ全量が吸収される。子供についても同様。水溶液中とミルク中のヨウ素では、吸収に差異はない。したがって、全ての年齢層に対し、モデルの胃腸管吸収割合( $f_1$ )値は1を仮定する。
- 分布と残留: 甲状腺に再び戻る経路をモデル(Publ.56)に追加。この扱いは半減期の長いヨウ素核種のみ適用。
- 成人: 線量モデル上は、平均的な成人の甲状腺は生物半減期80日で安定ヨウ素 $10000\mu\text{g}$ を含むと仮定される。ヨウ素が血中に移行した後、甲状腺へのヨウ素の取込み割合は0.3とされる。安定ヨウ素の食物からの摂取が少ない国々では、放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みが増加する。しかし、安定ヨウ素の少ない食事では甲状腺質量が補償的に増加するため、放射性ヨウ素の濃度としては標準的なモデルを用いて得られた計算値と類似した結果になると予想される。
- 甲状腺から血中に入る有機ヨウ素のほとんどは組織内で代謝され、無機ヨウ素として血漿プールに戻される。体内の有機ヨウ素のレベルは $500\mu\text{g}$ から $1200\mu\text{g}$ の間で報告がある(ICRPでは $1000\mu\text{g}$ をモデルで採用)。
- ヨウ素のターンオーバー率は12日とされ、甲状腺ホルモンの半減期と概ね一致。

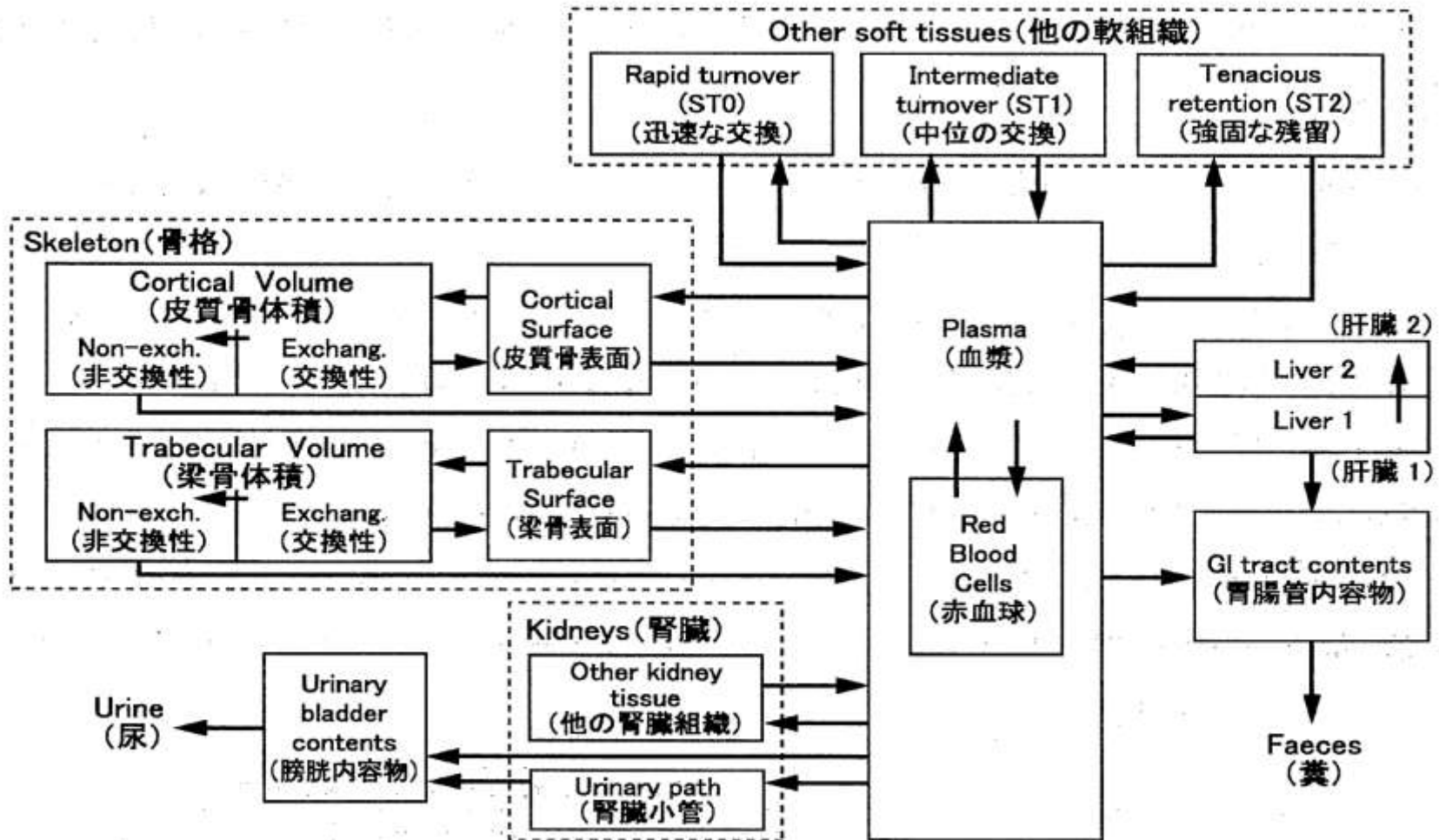
## ヨウ素体内動態モデルの根拠(2)

- 子供：甲状腺による放射性ヨウ素の取り込みは新生児で増加。血液注入された新生児に対し、放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$ )の甲状腺への取り込みが70%になるという報告がある。一方で、生後数日間はヨウ素の取り込みが増加し、その後は減少し、成人と同程度となるという報告もある。生後数週間以降は、ヨウ素の取り込みは大きく変化しない。
- 得られた知見から、3か月児及び子供の甲状腺への取込み割合は、成人と同じ0.3とする。ただし、生後数日間は、取り込み割合が倍程度になることが見込まれる。

(ICRP Publ.56の本文を意識)



# ストロンチウム体内動態モデル(1)



アルカリ土類元素の汎用モデル  
(ICRP Publ.67)

# ストロンチウム体内動態モデル(2)

Table A-3 Age-specific transfer rates ( $d^{-1}$ ) for strontium model

	A g e					
	3 mo	1 y	5 y	10 y	15 y	Adult
plasma to urinary bladder contents	0.577	1.27	1.38	1.02	0.600	1.73
plasma to ULI contents	0.175	0.385	0.42	0.308	0.182	0.525
plasma to trabecular bone surface	2.25	1.35	1.33	2.12	3.10	2.08
plasma to cortical bone surface	9.00	5.40	4.67	6.28	8.00	1.67
plasma to ST0	2.50	5.50	6.00	4.40	2.60	7.50
plasma to ST1	0.50	1.10	1.20	0.880	0.52	1.50
plasma to ST2	0.0010	0.0022	0.0024	0.0018	0.0010	0.0030
bone surface to plasma	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601	0.578
bone surface to exch <sup>a</sup> bone volume	0.0924	0.0924	0.0924	0.0924	0.0924	0.116
exch bone volume to bone surface	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
exch bone volume to nonexch <sup>a</sup> volume	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
nonexch trabecular volume to plasma	0.00822	0.00288	0.00181	0.00132	0.000959	0.000493
nonexch cortical volume to plasma	0.00822	0.00288	0.00153	0.000904	0.000521	0.0000821
ST0 to plasma	0.833	1.83	2.00	1.47	0.867	2.50
ST1 to plasma	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
ST2 to plasma	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038	0.00038
$f_1$	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3

<sup>a</sup>exch = exchangeable, nonexch = nonexchangeable

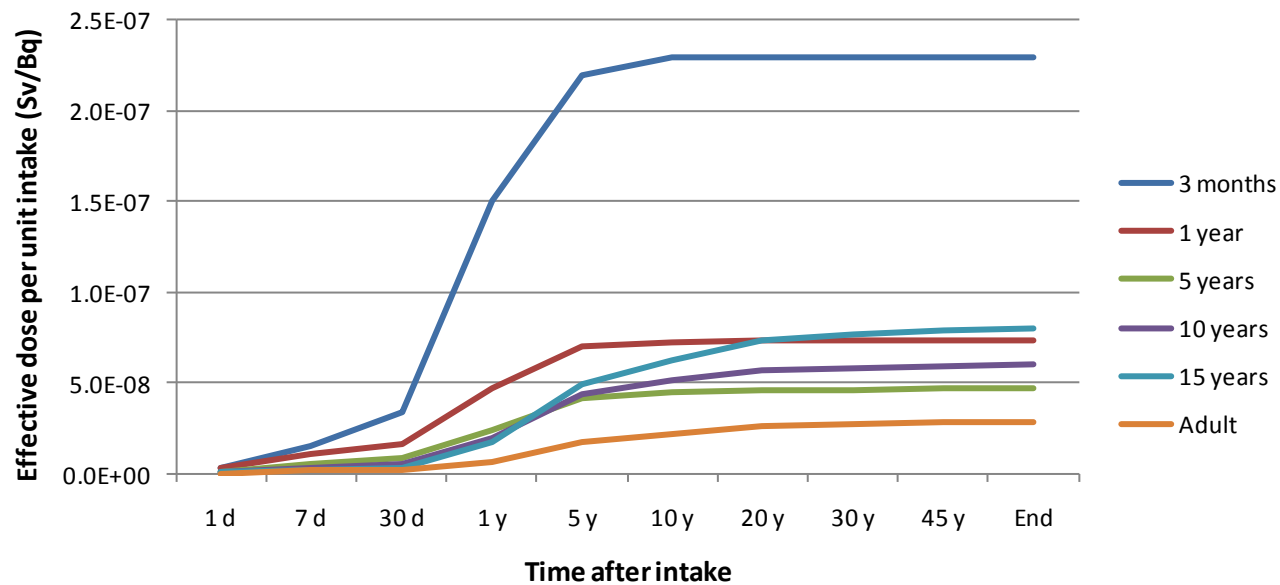
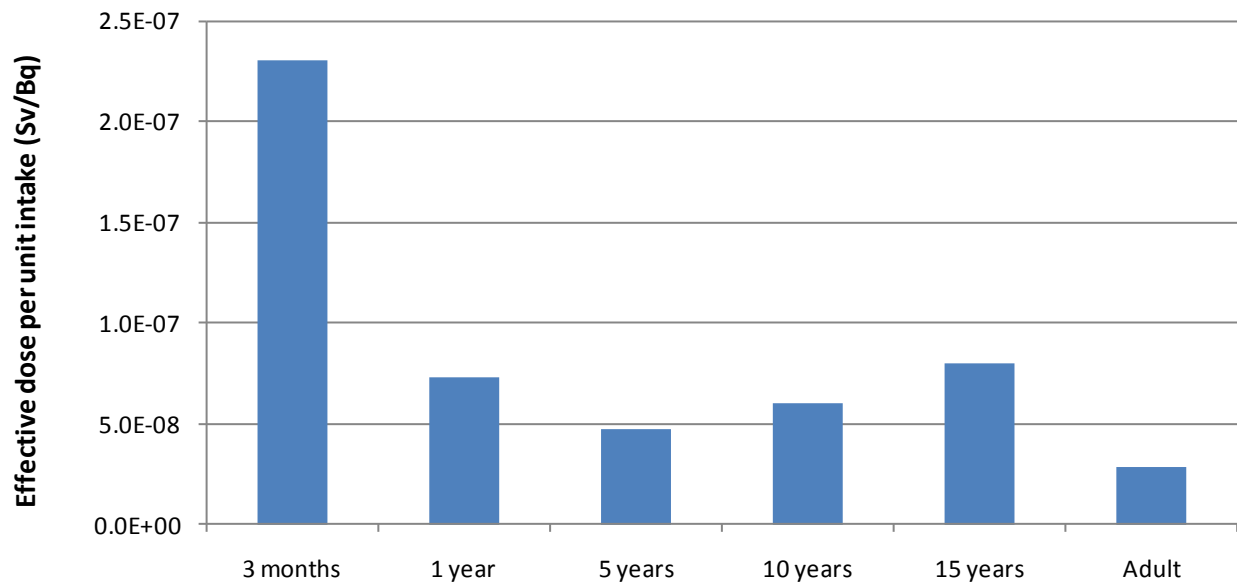
# $^{90}\text{Sr}$ の年齢別線量係数(経口摂取)

$^{90}\text{Sr}$ の経口摂取における線量係数(Sv Bq<sup>-1</sup>:70歳に到達するまでに受ける線量)

Age at Intake	3 months	1 year	5 years	10 years	15 years	Adult
Adrenals	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Bladder Wall	1.6E-08	7.6E-09	5.0E-09	3.6E-09	2.7E-09	1.5E-09
Bone Surface	2.3E-06	7.3E-07	6.3E-07	1.0E-06	1.8E-06	4.1E-07
Brain	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Breast	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Oesophagus	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
St Wall	1.5E-08	7.1E-09	3.6E-09	2.2E-09	1.4E-09	9.0E-10
SI Wall	1.5E-08	8.4E-09	4.4E-09	2.6E-09	1.6E-09	1.1E-09
ULI Wall	6.0E-08	4.3E-08	2.2E-08	1.3E-08	7.2E-09	5.8E-09
LLI Wall	1.9E-07	1.5E-07	7.6E-08	4.4E-08	2.5E-08	2.2E-08
Colon	1.2E-07	8.9E-08	4.5E-08	2.6E-08	1.5E-08	1.3E-08
Kidneys	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Liver	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Muscle	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Ovaries	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Pancreas	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Red Marrow	1.5E-06	4.2E-07	2.7E-07	3.7E-07	4.9E-07	1.8E-07
ET Airways	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Lungs	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Skin	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Spleen	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Testes	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Thymus	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Thyroid	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Uterus	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.6E-10
Remainder	1.2E-08	5.5E-09	2.9E-09	1.8E-09	1.1E-09	6.7E-10
Effective dose	<b>2.3E-07</b>	<b>7.3E-08</b>	<b>4.7E-08</b>	<b>6.0E-08</b>	<b>8.0E-08</b>	<b>2.8E-08</b>

Data taken from ICRP Database of dose coefficients: Workers and Members of the Public (CD-ROM).

## 一般公衆に対する<sup>90</sup>Srの実効線量係数(経口摂取)



# ストロンチウム体内動態モデルの根拠(1)

- 血中への取り込み(成人): 食物中のSr及び可溶性Srの吸収は15%から45%の間。絶食や食物からのカルシウムの摂取が少ないとSrの吸収が増加する。乳飼料やビタミンDもSrの吸収を増加させる。食物からのカルシウム摂取量を30-40 mg/dayから0-10mg/dayに減らした場合, ヒトのストロンチウム吸収割合は20%から40%に増加。入手可能な情報に基づき, モデルの胃腸管吸収割合( $f_1$ )値は, 全ての可溶性Srについて成人で0.3に設定。
- 血中への取り込み(子供): 牛乳を与えられた乳幼児ではSrの吸収は73%以上となる結果がある。5歳から15歳の子供の吸収は成人と同レベルとする報告がある。動物実験では, 年齢が若い個体ほど, Srの吸収が高いことが示されている。ICRPモデルでは, 乳幼児の $f_1$ 値を0.6, 1歳から15歳までの $f_1$ 値を0.4, 成人の $f_1$ 値を0.3に設定。
- 分布と残留: Srの年齢依存モデルは, フォールアウト<sup>90</sup>Srの人骨測定の結果, 骨格中カルシウムの年齢変化及びカルシウム/ストロンチウムの年齢特有の弁別性の考察から導出された。ICRPはLegettら(1982)のモデルを一部変更して採用。

## ストロンチウム体内動態モデルの根拠(2)

- アルカリ土類元素であるストロンチウム、バリウム、ラジウムは体内のカルシウムの動態に追従するものの、生体膜や骨ミネラルによる弁別のため、カルシウムとは異なる体内分布となる。
- 一般的に、バリウムやラジウムに比べて、ストロンチウムはカルシウムの良いトレーサとなる。しかしながら、ストロンチウムはカルシウムに比べると、胃腸管からの吸収率が低く、腎臓から効率的に排泄されるため、カルシウムよりは骨に沈着する割合が小さくなることが実験データによって示唆されている。
- カルシウムとストロンチウムは主に尿中に、一方でバリウムとラジウムは主に便中に排泄される。4元素の骨沈着及び骨内分布は類似。血中投与の数カ月以内で、全身残留量のほとんどが骨沈着量となる。

(ICRP Publ.67の本文を意識)

# 胎児の放射線防護

- 妊娠期間中または妊娠前に、母親が放射性核種を取り込むことにより胎児が受ける被ばく(ICRP Publ.88)

胎児に対する線源 {

- 胎盤を通じて胎児に移行する核種(内部被ばく)
- 母体の組織に沈着した核種(外部被ばく)

- 線量評価モデル

- **Embryo**: 子宮壁(Uterus Wall)と同じ線量と仮定
- **Fetus**: 体内動態モデル or 妊娠期間中の $C_F:C_M$ (胎児/母体の体内濃度比)
- **線量係数**: 母体が核種を1Bq摂取(吸入, 経口)したときに胎児が受ける線量(Sv/Bq)

$$e_{\text{offspring}} = e_{\text{in utero}} + e_{\text{postnatal}}$$

母体内で  
受ける線量

生後  
受ける線量  
(70歳まで)

Table 3.2. Concentration ratios for elements in the fetus and mother ( $C_F:C_M$ ) following intakes by the mother before or during pregnancy and for the placenta relative to maternal tissues ( $C_{PI}:C_M$ )

Element	$C_F:C_M$		$C_{PI}:C_M$
	Intakes prior to pregnancy	Intakes during pregnancy	
H in HTO	1.6 <sup>s</sup>	1.6 <sup>s</sup>	1
H in OBT	1.6 <sup>s</sup>	1.6 <sup>s</sup>	1
H in CH <sub>4</sub> <sup>c</sup>	1.6 <sup>s</sup>	1.6 <sup>s</sup>	1
C in CO and CO <sub>2</sub>	1	1	1
C in CH <sub>4</sub> <sup>d</sup>	1.5	1.5	1.5
Organic carbon	1.5	1.5	1.5
Sulphur	1	2	2
Calcium	s	s	1
Iron	1	1	1
Cobalt	0.2	1	2
Nickel	2	2	1
Zinc	2	2	1
Selenium	2	2	2
Strontium	s	s	1
Zirconium	0.2	0.2	1
Niobium	0.2	0.2	1.5
Molybdeum	1	1	1
Technetium	1	1	1
Ruthenium	0.01	0.2	0.1;2 <sup>b</sup>
Silver	1	1	2
Antimony	1	1	2
Tellurium	1	1	1
Iodine	s	s	1
Caesium	1 <sup>s</sup>	1 <sup>s</sup>	1
Barium	s	s	1
Cerium	0.01	0.05	0.1;1 <sup>c</sup>
Lead	1	1	0.1;1 <sup>c</sup>
Polonium	0.1	0.1	5
Radium	s	s	1 <sup>c</sup>
Thorium	0.03	0.1;0.3;1 <sup>a</sup>	0.1;2 <sup>b</sup>
Uranium	0.1	1	0.1;1 <sup>b</sup>
Neptunium	0.03	0.1;0.3;1 <sup>a</sup>	0.1;1 <sup>b</sup>
Plutonium	0.03	0.1;0.3;1 <sup>a</sup>	0.1;5 <sup>b</sup>
Americium	0.01	0.1	0.1;2 <sup>b</sup>
Curium	0.01	0.1	0.1;2 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> 0.1;0.3;1 intakes in 1st, 2nd and 3rd trimester (see Fig. 3.1).

<sup>b</sup> Intakes before; during pregnancy

<sup>c</sup> Assumed that 1% of CH<sub>4</sub> that is metabolised is converted to HTO (see 4.1)

<sup>d</sup> Assumed that 1% of CH<sub>4</sub> that is metabolised ends up as CO<sub>2</sub> or organic forms (see 4.2)

<sup>s</sup> Specific model, based mainly on human data. Models of alkaline earths are given in Annex A and for iodine in Annex B.



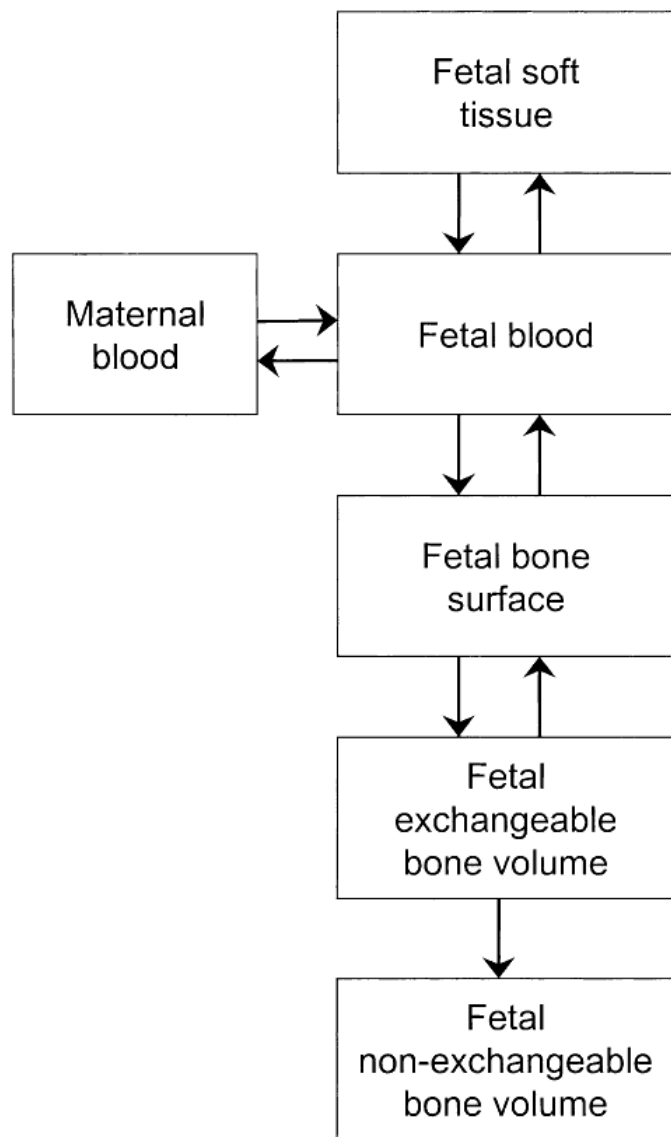


Fig. A.1. Biokinetic model for alkaline earth elements in the fetus.

Table A.1. Kinetics of transfer of alkaline earth elements to and within the fetus<sup>a</sup>

Day of pregnancy	Transfer rate d <sup>-1</sup>			
	Maternal blood → fetal blood <sup>b</sup>	Fetal blood → maternal blood	Fetal blood → bone surface	Fetal blood → soft tissues <sup>c</sup>
0	0	0	0	0
56	0.02433	176.6	0	38
63	0.08732	337.6	142	0.5
70	0.1877	348.9	166	0.5
77	0.313	325.5	163	0.5
84	0.4591	300.9	164	0.5
91	0.6232	279.5	159	0.5
98	0.8033	261.6	153	0.5
105	0.9981	246.6	147	0.5
112	1.240	238.7	145	0.5
119	1.517	233.4	137	0.5
126	1.835	229.7	137	0.5
133	2.168	224	133	0.5
140	2.506	217.1	131	0.5
147	2.844	209.4	127	0.5
154	3.182	201.7	124	0.5
161	3.523	194.3	119	0.5
168	3.873	187.8	116	0.5
175	4.242	182.3	113	0.5
182	4.639	178	111	0.5
189	5.074	174.7	112	0.5
196	5.557	172.6	111	0.5
203	6.098	171.5	114	0.5
210	6.706	171.2	116	0.5
217	7.39	171.7	119	0.5
224	8.16	172.9	124	0.5
231	9.026	174.7	129	0.5
238	9.999	177	137	0.5
245	11.09	179.7	145	0.5
252	12.32	182.7	157	0.5
259	13.69	186.1	170	0.5
266	15.22	189.7	189	0.5

<sup>a</sup> Transfer rates shown are those for Ca.

<sup>b</sup> Multiplied by placental discrimination factors of 0.6 for Sr, 0.4 for Ba and Ra.

<sup>c</sup> Values used from 63 days are 0.5 for Ca and Sr, 2.33 for Ba and Ra (as in the 3 month-old infant).

Table A.3. Intakes of Sr either prior to conception or during pregnancy

Time of intake	Retention at term % to maternal blood		
	Fetus	Mother	C <sub>F</sub> :C <sub>M</sub> <sup>a</sup>
-26	0.1	12	0.2
0 <sup>b</sup>	0.2	12	0.3
10	0.4	9	0.7
15	1	11	2
25	4	17	4
35	12	23	8
0-38 (chronic)	4	15	4

<sup>a</sup> Fetus:Mother whole-body concentration ratio at term.

<sup>b</sup> At conception.

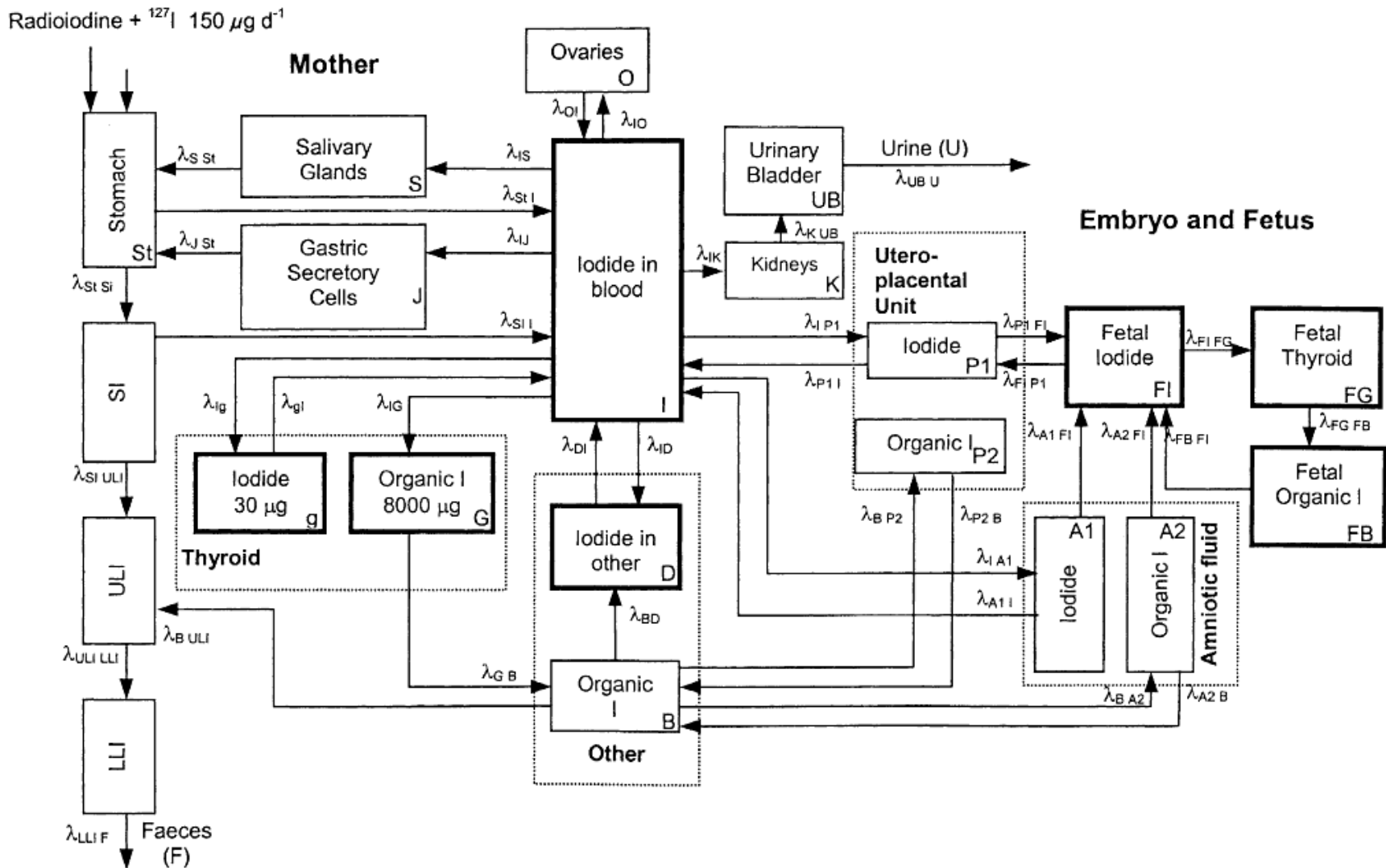


Fig. B.1. Biokinetic model for I during pregnancy.

## Acute intakes of Sr-90

Dose coefficients (Sv/Bq) for the offspring of female members of the public from acute intake of Sr-90 ( $T_{1/2} = 29.1$  y) for different exposure scenarios

Time (weeks)*	Highest organ dose $h_T$ (in utero)	$h_{Brain}$	$e_{in\ utero}$	$e_{postnatal}$	$e_{offspring}$	
<b>Inhalation: Absorption Type F, 1 <math>\mu</math>m AMAD, <math>f_1</math> - see section 4.10.2</b>						
-130 <sup>†</sup>	Red Marrow+	1.2E-09	4.1E-12	1.8E-10	8.8E-11	2.7E-10
-26	Red Marrow+	3.9E-09	2.1E-11	5.8E-10	2.0E-10	7.8E-10
c <sup>‡</sup>	Red Marrow+	1.1E-08	1.1E-10	1.9E-09	4.1E-10	2.3E-09
5	Red Marrow+	1.6E-08	7.9E-10	3.1E-09	4.2E-10	3.5E-09
10	Red Marrow+	9.5E-08	2.1E-09	1.5E-08	7.2E-10	1.6E-08
15	Red Marrow+	1.5E-07	NA	2.3E-08	2.0E-09	2.5E-08
25	Red Marrow+	1.7E-07	NA	2.4E-08	7.4E-09	3.1E-08
35	Red Marrow+	8.5E-08	NA	1.1E-08	2.4E-08	3.5E-08
<b>Inhalation: Absorption Type M, 1 <math>\mu</math>m AMAD, <math>f_1</math> - see section 4.10.2</b>						
-130 <sup>†</sup>	Red Marrow+	6.3E-10	2.5E-12	9.3E-11	4.3E-11	1.4E-10
-26	Red Marrow+	6.9E-09	4.5E-11	1.0E-09	3.2E-10	1.3E-09
c <sup>‡</sup>	Red Marrow+	1.9E-08	1.6E-10	2.9E-09	8.1E-10	3.7E-09
5	Red Marrow+	2.5E-08	3.2E-10	3.8E-09	9.9E-10	4.8E-09
10	Red Marrow+	4.4E-08	4.8E-10	6.7E-09	1.3E-09	8.0E-09
15	Red Marrow+	5.6E-08	NA	8.3E-09	1.8E-09	1.0E-08
25	Red Marrow+	5.4E-08	NA	7.5E-09	3.6E-09	1.1E-08
35	Red Marrow+	2.0E-08	NA	2.7E-09	6.5E-09	9.2E-09
<b>Inhalation: Absorption Type S, 1 <math>\mu</math>m AMAD, <math>f_1</math> - see section 4.10.2</b>						
-130 <sup>†</sup>	Red Marrow+	3.6E-10	1.6E-12	5.3E-11	2.3E-11	7.6E-11
-26	Red Marrow+	7.1E-10	3.3E-12	1.0E-10	4.4E-11	1.4E-10
c <sup>‡</sup>	Red Marrow+	1.0E-09	6.7E-12	1.5E-10	5.5E-11	2.1E-10
5	Red Marrow+	1.2E-09	1.5E-11	1.9E-10	6.0E-11	2.5E-10
10	Red Marrow+	2.3E-09	2.6E-11	3.4E-10	7.0E-11	4.1E-10
15	Red Marrow+	3.1E-09	NA	4.5E-10	9.6E-11	5.5E-10
25	Red Marrow+	3.4E-09	NA	4.7E-10	2.0E-10	6.7E-10
35	Red Marrow+	1.3E-09	NA	1.8E-10	4.2E-10	6.0E-10
<b>Ingestion: <math>f_1</math> - see section 4.10.2</b>						
-130 <sup>†</sup>	Red Marrow+	1.3E-09	4.5E-12	1.9E-10	9.6E-11	2.9E-10
-26	Red Marrow+	4.3E-09	2.3E-11	6.4E-10	2.2E-10	8.6E-10
c <sup>‡</sup>	Red Marrow+	1.2E-08	1.3E-10	2.1E-09	4.5E-10	2.5E-09
5	Red Marrow+	2.0E-08	9.9E-10	3.8E-09	5.2E-10	4.3E-09
10	Red Marrow+	1.3E-07	2.9E-09	2.0E-08	9.8E-10	2.1E-08
15	Red Marrow+	2.4E-07	NA	3.6E-08	3.1E-09	3.9E-08
25	Red Marrow+	3.4E-07	NA	4.8E-08	1.5E-08	6.3E-08
35	Red Marrow+	1.7E-07	NA	2.3E-08	4.7E-08	7.0E-08

母親が経口摂取した場合の胎児の線量係数



参考)3か月児の線量係数  
: 2.3E-07 Sv/Bq(経口)

\* Intake at the indicated time (weeks); negative times are prior to pregnancy.

<sup>†</sup> -130 weeks = acute intake 2.5 years before conception.

<sup>‡</sup> c = acute intake at time of conception.

Notes:

Dose coefficients less than 1E-15 Sv/Bq are shown as \* <1E-15'.

+ At least one other tissue receives the same dose as that listed, see § 135.

# 線量係数の適用範囲

## ICRP Publ.71 par 81

- ✓ In ICRP Publ. 30 and Publ. 68 it was pointed out that if the behaviour of any specific material is expected to differ significantly from that of the biokinetic model employed, the model parameters should be modified to take account of the data available. (中略) The advice to use material- and subject-specific parameter values for absorption rates from both the respiratory tract model and the GI tract is reinforced here, since the default values chosen were selected to be representative, rather than conservative. (以下, 省略)

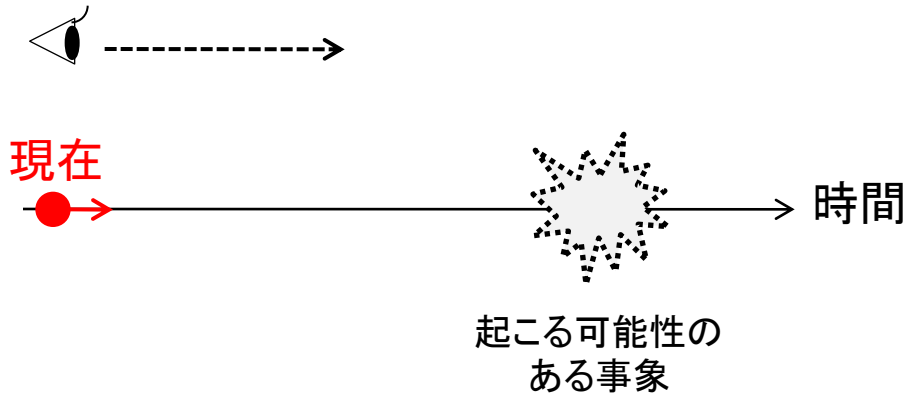
## ICRP Publ.78 par 92

- ✓ (中略) Use of a standard biokinetic model may lead to a certain error in interpretation (on dose assessment from monitoring data), but use of a specific model is not justified for small intakes and doses. An individual-specific analysis based on the biokinetic parameter values for that individual can be justified for intakes giving doses approaching the annual dose limit. One situation where the standard models cannot be used is when therapeutic action has been taken to enhance elimination of the radionuclides from the body.

- 線量限度に比べて十分に低い線量域での線量評価に用いる  
(事前の放射線防護対策の検討材料としても利用)

# 2種類の線量評価

## Prospective dosimetry

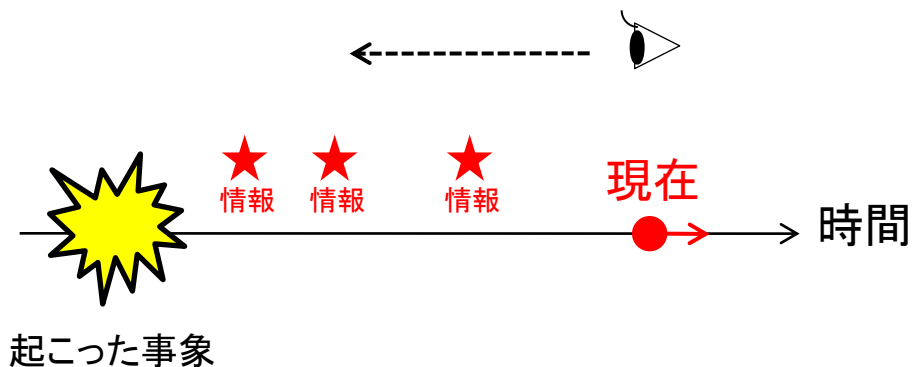


- 放射線作業者の防護計画の立案
- 発電所周辺住民のリスク評価



線量係数(デフォルト)

## Retrospective dosimetry



- 放射線作業者の取り込み事象



線量係数(デフォルト)

# 特殊な線量評価

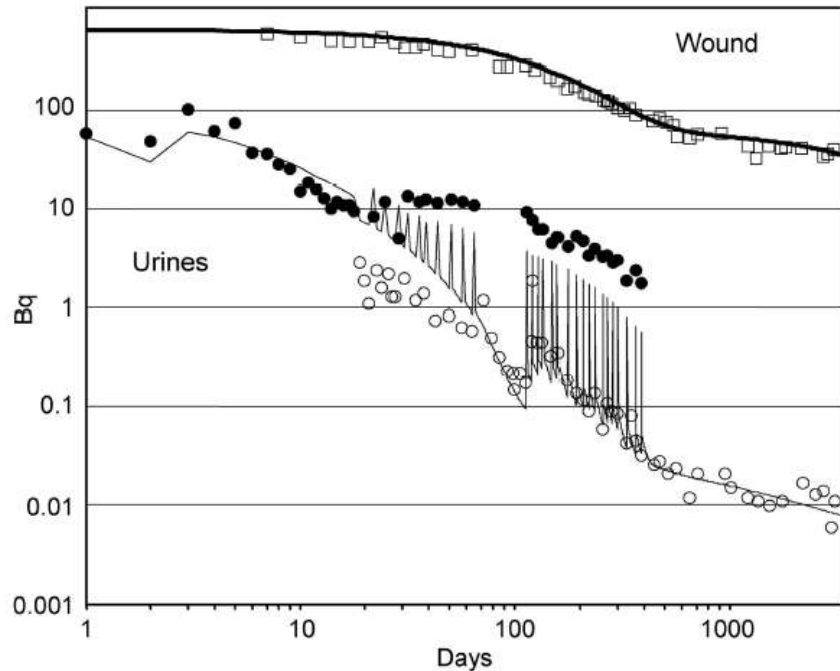


Figure 4. Best fit of simulations to biological data after application of ICRP 67 model assuming the presence of two DTPA compartments. Squares, wound retention; closed circles, urine samples collected for the first 24 h after DTPA treatments; open circles, urine samples collected later on; bolt line, simulation for Pu retention in the wound; normal line, simulation of daily urinary excretion of Pu.

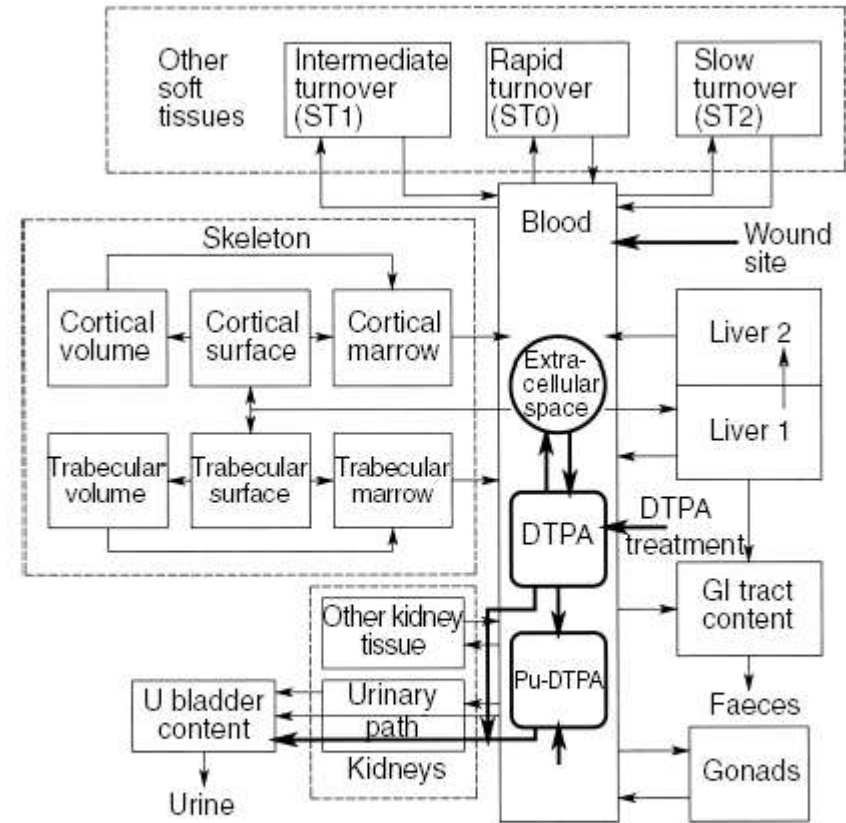


Figure 4. The ICRP 67<sup>(5)</sup> Pu systemic model applied to DTPA decorporation therapy. The additional compartments representing the kinetics of DTPA and Pu bound to DTPA are shown in bold.