

2015年に刊行されたICRP Publication 130「放射性核種の職業上の摂取：第1部(Occupational Intakes of Radionuclides: Part1)」に基づいて「コラム IV-2 放射性同位元素の摂取、輸送（移行）および排出を定量的にとらえるヒト身体モデル」（P154～163）を以下のようにアップデートします。

コラム IV-2 放射性同位元素の摂取、輸送（移行）および排出を定量的にとらえるヒト身体モデル

2015年に刊行されたICRP Publication 130「放射性核種の職業上の摂取：第1部(Occupational Intakes of Radionuclides: Part1)」は、吸入摂取と経口摂取による放射性核種の職業上の摂取に対応する改訂された線量係数(Dose Coefficients)*を提示するための、Publication 30シリーズ(ICRP、1979a、1980、1981、1988b)およびPublication 68(ICRP、1994b)に置き換わるものである。これらの改訂された線量係数は、ヒト消化管モデル(ICRP、2006)と最新のデータを考慮に入れたヒト呼吸気道モデル(ICRP、1994a)の改訂版を用いて計算されている。さらに、様々な化学形の元素とそれらの放射性同位体の吸入摂取および経口摂取の後の血液への吸収に関する情報が提供される。血液へ吸収される放射性核種の全身体内動態を記述するモデルの多くが改訂され、それらのモデルを、臓器・組織における取り込みと残留ならびに排出を生理学的にいつそう現実的に表現するものとしている。

*線量係数とは、内部被ばくの線量評価における、1ベクレル(Bq)を摂取したときの預託等価線量(Committed Equivalent Dose)又は預託実効線量(Committed Effective Dose)をいう。ICRPによって、核種、化学形、摂取経路(経口あるいは吸入)、年齢ごとに具体的な値が与えられている。内部被ばくの線量評価では、核種・化学形ごとに摂取量(Bq)を推定し、それに線量係数を乗じて線量を計算する。預託の期間、すなわち線量の積算期間は、成人で50年、子供では摂取した年齢から70歳までである。

作業場における放射性核種への曝露は、いくつかの経路による摂取が考えられ、吸入摂取、経口摂取、そして無傷の皮膚および創傷を通じた侵入がある。図1は、摂取経路、体内移行および排出経路を要約したものである。

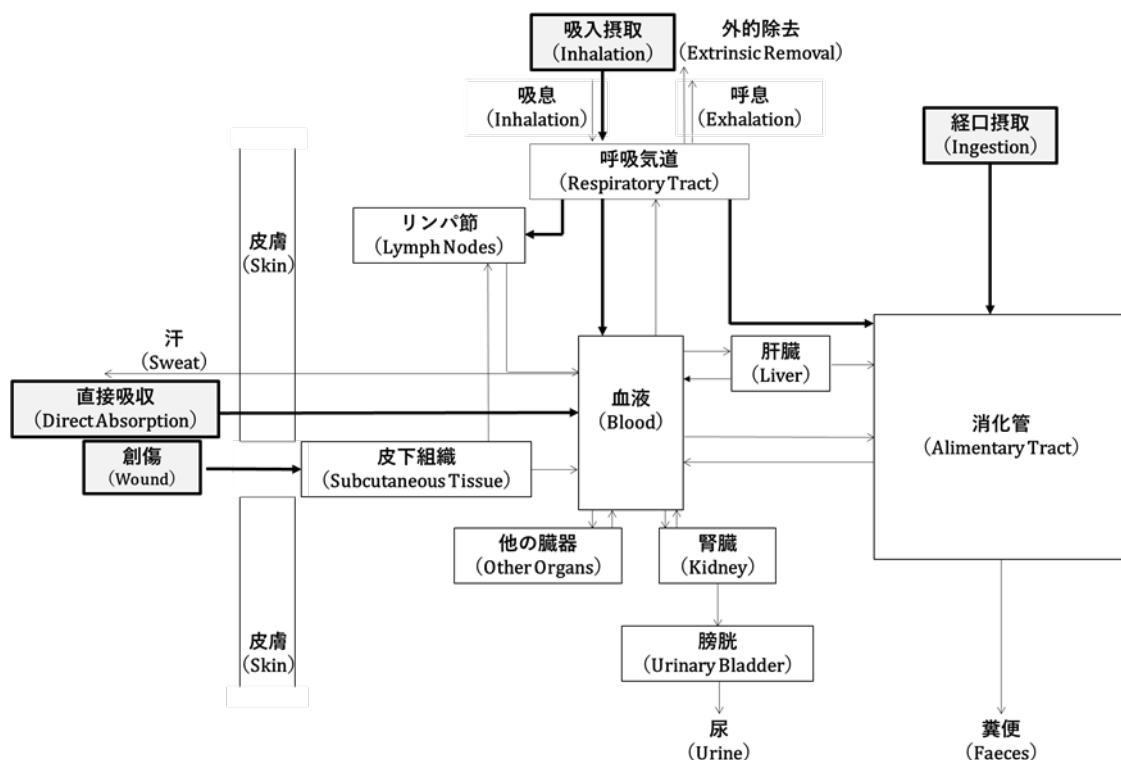


図 1 放射性核種の摂取と体内動態の概要

放射性核種の吸入、経口および皮膚からの摂取とそれらの体内動態について、ヒト呼吸気道モデル、ヒト消化管モデルおよび皮膚に基づき概説する。

① ヒト呼吸気道モデル

Publication 66 (ICRP、1994a) に述べられているヒト呼吸気道モデル (Human Respiratory Tract Model、HRTM) (図 2) は、それ以後に蓄積されたデータを考慮に入れ更新されているが、このモデルの基本的な特質は変わっていない。放射性核種を含んだ吸入粒子は、胸郭外 (ET) 気道 (鼻、喉頭など)、肺の気管支 (BB) および細気管支 (bb) 気道、そして肺胞一 間質 (AI) 領域に沈着し、それぞれの部位における沈着は主として粒径に依存する (ICRP、1994a、2002b)。呼吸気道からの移行は、主として血液への溶解と吸収、ならびに咽喉への 粒子の輸送と、その後の消化管への侵入という競合プロセスによって起こる。血液に吸収さ れるかもしれない粒子輸送によって移行する割合は、放射性核種の化学種と可溶性、また放射 性核種の放射性半減期に左右される。この HRTM は、放射性核種のガスと蒸気の吸入摂取 にも適用される。

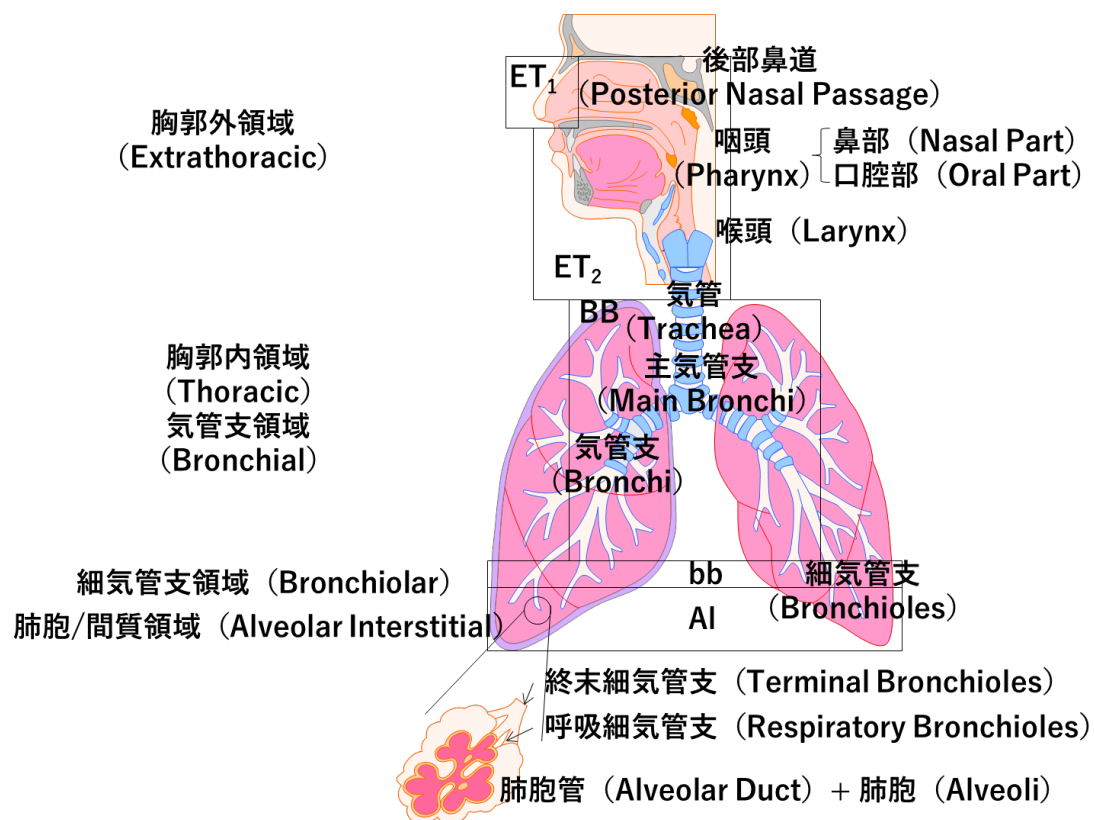


図 2 ヒト呼吸気道モデル

呼吸気道は2つの組織として扱われる。すなわち、胸郭外 (ET) 気道と胸郭内 (TH) 気道である。これらの組織の領域への細分は、主として放射線に対する感受性の違いに基づくものであった。TH 領域は、気管支領域 (BB : 気管、気道分岐 0 ; 気管支、気道分岐 1~8)、細気管支領域 (bb : 気道分岐 9~15)、AI 領域 (ガス交換領域、気道分岐 (16)、そして TH リンパ節 (LN_{TH}) である。ET 領域は、前部鼻腔 (ET₁) ; 後部鼻腔、咽頭および喉頭 (ET₂) ; そして ET リンパ節 (LN_{ET}) である。ヒト消化管モデルとの一貫性のために、口腔はもはや、Publication 66 (ICRP, 1994a) においてそうであったように領域 ET₂ に含まれない。このことは、このモデルを用いて得られる結果に影響を及ぼさない。なぜなら口に入る空気による ET における沈着は、喉頭においてのみ起こるとみなされたためである。

はじめにエアロゾルの状態である放射性核種のヒト呼吸気道モデルに基づく体内動態について説明する。

①-1 粒子状物質のエアロゾルの沈着

エアロゾルとして吸入摂取される放射性核種の場合、HRTM では、呼吸気道における総沈着量と領域別沈着量は吸入された粒子の粒径分布によってのみ決定されると仮定する。Publication 66 (ICRP, 1994a) に述べられている沈着モデルは、実際上関心のあるすべてのエアロゾルサイズ (0.6 nm~100 μm) について、各領域におけるエアロゾルの沈着割合を評価するものである。胸郭外領域については、測定された沈着効率が粒径および気流の特性

パラメータと関連づけられ、他の条件（年齢や性別など）に基づいて沈着を予測するために、解剖学的寸法によってそのスケーリングが行われた。胸郭内気道については、BB、bb および AI 領域それぞれにおける粒子沈着を計算するために、また、対象者の肺の大きさと呼吸率の影響を定量化するために、ガス輸送と粒子沈着の理論的モデルが用いられた。粒子沈着をモデル化するために、これらの領域は、吸気時と呼気時の両方における一連のフィルタとして扱われた。それぞれの効率は、競合的に作用する空気力学的過程（重力沈降、慣性衝突）と熱力学的過程（拡散）を考慮することによって評価された。各領域への沈着割合は、粒子中央径の関数であるとみなされる幾何標準偏差（0.6 nm における 1.0 の値からおよそ 1 μm 超では 2.5 の値へと増加する）をもつ対数正規粒径分布のエアロゾルについて計算された。表 1 は、軽作業下で鼻呼吸をしている成人男性を標準作業者として、空気力学的放射能中央径（Activity Median Aerodynamics Diameter、AMAD）が 1 または 5 μm のエアロゾルの放射性同位元素を吸入摂取した場合の呼吸気道の各領域の沈着率がまとめられている。職業被ばくの場合、AMAD として一般に勧告されるデフォルト値は 5 μm である（ICRP、1994b）。

表 1 標準作業者*における吸入エアロゾルの領域毎の沈着率**

| 領域 | AMAD 1 μm の沈着率 | AMAD 5 μm の沈着率 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| ET ₁ | 24.5 % | 48.0 % |
| ET ₂ | 13.2 % | 25.8 % |
| BB | 1.24 % | 1.78 % |
| bb | 1.65 % | 1.10 % |
| AI | 1.07 % | 5.32 % |
| 合計 | 51.2 % | 82.0 % |

*標準作業者には、軽い作業に従事する健康で非喫煙の鼻呼吸者である男性の沈着とクリアランスのパラメータ値が割り当てられた。軽い作業は、次を根拠に定義される：2.5 h の着座（この間の吸入量は $0.54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ）および 5.5 h の軽い運動（この間の吸入量は $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ）と定義される。両方のレベルの活動について、吸入空気はすべて鼻を通して入るとして、沈着割合は、この活動の 2 つのレベルについての体積加重平均値である。

**吸入エアロゾル放射能に対する領域に沈着する放射能の割合（%）。計算の目的のために十分な精度で与えられる標準値であり、各パラメータの平均値について知られている確からしさを反映して選ばれるであろう精度よりも高い精度で与えられている。これらの粒子は、密度が $3.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、形状係数が 1.5 であると仮定される。空気力学的直径は、幾何標準偏差 σ_g がおよそ 2.50 の対数正規分布であると仮定される [σ_g の値は標準値ではなく、対応する熱力学的放射能中央径（Activity Median Thermodynamic Diameter、AMTD）から導き出される（ICRP、1994a）]。

エアロゾル中の放射能の半分は、対象粒子と同じ空気中拡散係数を有する球状粒子の直径である熱力学的直径（Thermodynamic Diameter、 d_{th} ）が熱力学的放射能中央径（AMTD）

を上回る粒子による。それは、沈着が主に拡散に依存する場合であり、通常は空気力学的放射能中央径 (Activity Median aerodynamic Diameter、AMAD) が約 $0.3 \mu m$ を下回る際に使用される。一方、エアロゾル中の放射能の半分は、対象粒子と同じ空气中終末沈降速度を有する、単位密度 ($1 g/cm^3$) の球の直径である空気力学的直径 (Aerodynamic Diameter、 d_{ae}) が AMAD を上回る粒子による。それは、沈着が主に慣性衝突と沈降に依存する場合であり、通常は AMAD が約 $0.3 \mu m$ を上回る際に使用される。

一般的に、沈着率は吸入粒子の物理学的なパラメータであり、空気力学的等価直径 (Aerodynamic Equivalent Diameter、AED)に関する質量分布の中央値である空気力学的質量中央径 (Mass Median Aerodynamic Diameter、MMAD)にのみ依存する。質量と放射能が比例するとすれば、空気力学的質量中央径は、空気力学的放射能中央径 (AMAD) に等しい。

①-2 粒子輸送 (クリアランス)

呼吸気道からの複数のクリアランス経路が図 3 に示されている。ET₁に沈着した何らかの物質は、鼻をかむなどの外的手段によって取り除かれる。他の領域では、クリアランスは、消化管とリンパ節への粒子の移動 (粒子輸送) と、呼吸気道における粒子からの物質の血液への吸収の間で競合的に起こる。粒子輸送による除去速度と血液への吸収による除去速度は、互いに無関係であるとみなされる。さらに、クリアランス速度は、すべて、年齢と性別とは無関係であると仮定される。

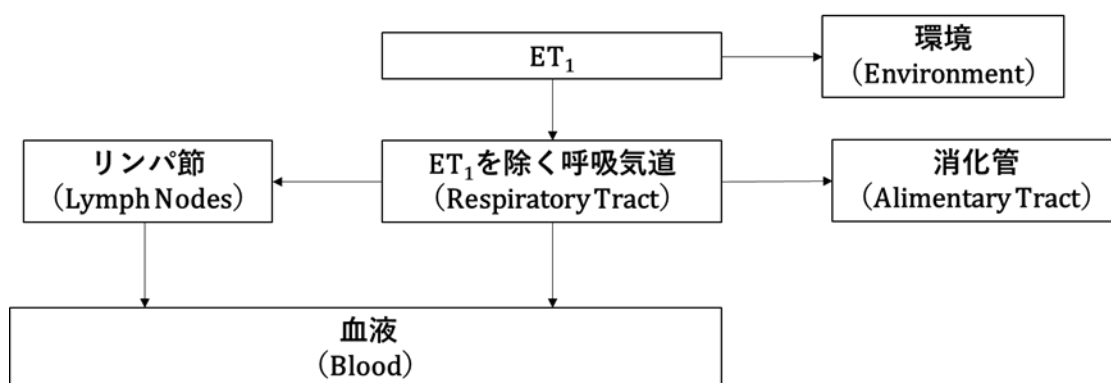


図 3 呼吸気道からのクリアランス経路

呼吸気道 (ET₁、ET₂、BB および bb 領域) に沈着した物質のほとんどにおけるクリアランス速度は、ヒトのボランティア実験の結果に基づいている。鼻呼吸においては、胸郭外気道における沈着物のおよそ 65%が ET₁に沈着し、約 8 時間の半減期 ($2.1 d^{-1}$ の速度) で、除かれる。その 1/3 は鼻をかむことにより、2/3 は ET₂ への移行による。これは、コンパートメント ET₁ から環境へは $0.6 d^{-1}$ 、ET₁ からコンパートメント ET'₂ へは $1.5 d^{-1}$ の粒子輸送速度で実現される (図 4)。ET₂ に沈着したもしくは他の領域 (ET₁ と BB) から ET₂ へと移

行したほとんどの粒子は、粘膜線毛運動によって咽喉へと急速に除かれ、およそ 10 分程度で飲み込まれる。これは、 100 d^{-1} の速度でのコンパートメント ET'_2 から食道へのクリアランスによって表される。

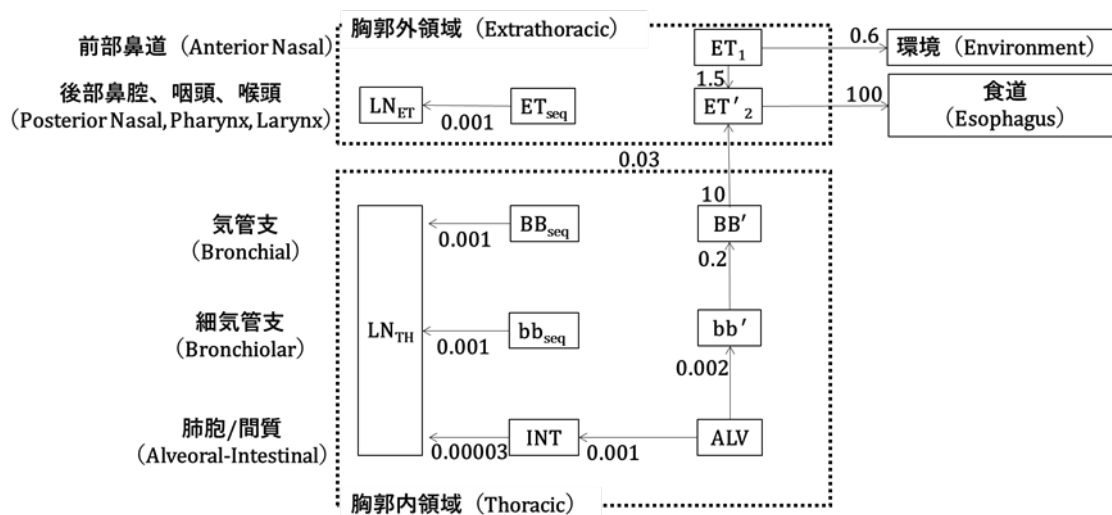


図 4 ヒト呼吸気道モデルにおける、各呼吸気道領域からの時間に依存する粒子輸送を表すコンパートメントモデル

速度を矢印の横に示す。速度は標準値である (単位は d^{-1})。後部鼻腔、咽頭および喉頭 (ET_2)、気管支 (BB) ならびに細気管支 (bb) に沈着した物質の 0.2% は気道壁において保持される (それぞれ ET_{seq} 、 BB_{seq} および bb_{seq}) と仮定される。

ET_1 : 前部鼻腔 (細分されない領域 ET_1) に沈着した物質の残留

ET_{seq} : 鼻腔に沈着した粒子のうち、ごく一部の割合の気道組織における長期残留 (半減期 約 700 日)

LN_{ET} : ET 領域から排出するリンパ管とリンパ節

LN_{TH} : TH 領域から排出するリンパ管とリンパ節

ET'_2 : ET_{seq} に保持されるごく一部の割合 (0.002 とみなされる) を除いた、後部鼻腔、咽頭および喉頭 (ET_2 領域) に沈着した物質の短期残留 (半減期 約 10 分)

BB' : ET'_2 への粒子輸送を伴う、 BB における粒子の残留 (半減期 約 100 分)

bb' : BB' への粒子輸送を伴う、 bb における粒子の残留 (半減期 約 3.5 日)

BB_{seq} : 気管支領域に沈着した粒子のうち、ごく一部の割合の気道壁における長期残留 (半減期 約 700 日)

bb_{seq} : 細気管支領域に沈着した粒子のうち、ごく一部の割合の気道壁における長期残留 (半減期 約 700 日)

ALV : 肺胞に沈着した粒子の残留 (半減期 約 250 日)。沈着物の一部 (0.67) は粒子輸送によって線毛気道 (bb') へと除かれるが、残りは間質 (INT) へと浸透する。

INT : 肺胞に沈着した、間質へと浸透する粒子の超長期残留 (半減期 約 60 年)。これらの

粒子はリンパ節へとゆっくり除かれる。

BB と bb 領域のいたるところにおいて、粘液速度は一般に気管に向かって増大するため、滞留時間は、最小で最遠位の細気管支における数日から、気管と主気管支における 1 時間未満の範囲である。これは、コンパートメント bb' からコンパートメント BB' への 0.2 d^{-1} のクリアランス速度（約 3.5 日の半減期）および BB' から ET'₂ への 10 d^{-1} のクリアランス速度（約 2 時間の半減期）によって表される。

複数の動物種における実験では、誘導気道に沈着した粒子のうち気道壁において保持される割合は極めて小さいことが示されている。このことを考慮に入れるために、領域 ET₂、BB と bb に沈着した粒子の 0.2% が気道壁において保持される（それぞれコンパートメント ET_{seq}、BB_{seq} および bb_{seq}）と仮定する。物質は、 0.001 d^{-1} の速度（約 700 日の半減期）でこれらのコンパートメントから領域リンパ節へと除かれる。

ヒトの肺クリアランスは、吸入摂取後およそ 1 年までの期間にわたる複数の実験的研究において定量化されており、AI 領域における沈着物のおよそ 50% がその期間中この領域にとどまった。職業被ばく後の胸部中放射能の測定および解剖時の肺中放射能の測定は、一部の物質は数十年にわたって肺内に保持されうること示している（ICRP、1994a）。肺泡コンパートメント（ALV）における沈着によって表される。その除去の全体の速度は 0.003 d^{-1} （約 250 日の半減期）であり、このうち bb' コンパートメントへは 0.002 d^{-1} の速度で、間質（INT）コンパートメントへは 0.001 d^{-1} の速度で除去される。INT コンパートメントからは領域リンパ節へと、 0.00003 d^{-1} の速度で、極めてゆっくり除去される。したがって、AI 領域における沈着物のおよそ 33% は間質において保持される。また、一般的に同時に血液への吸収が存在していることに留意する。

①-3 血液への吸収（クリアランス）

血液への吸収は、沈着した物質の物理的・化学的形態に依存する。HRTM においても、いかなる吸収も起こらないと仮定される ET₁ を除いて、吸収はあらゆる領域（リンパ節を含む）において同じ速度で起こると（デフォルトの設定として）仮定している。吸収は、ET、BB および bb 領域より空気血液関門が薄い AI 領域において、より速くなりそうであると認められている。しかし、異なる領域に対して異なる速度を与えるスケーリング係数のような、領域による吸収速度の違いを考慮するための一般的で系統的な設定をするには、利用可能な情報が不十分である。

HRTM では、吸収は 2 段階のプロセスとして扱われる。すなわち、血液に吸収されうる物質への粒子の解離（溶解）と、可溶性物質および粒子から解離した物質の血液への吸収（取り込み）である。いずれの段階についても、関連するクリアランス速度は時間に依存しうる。

HRTM において、時間依存の溶解を表現するために同じ単純なコンパートメントモデルを用いる。図 5 では、沈着物のある割合 f_r は速度 s_r で比較的速やかに溶解し、残りの割合 $(1 - f_r)$ は速度 s_s でより遅く溶解すると仮定される。

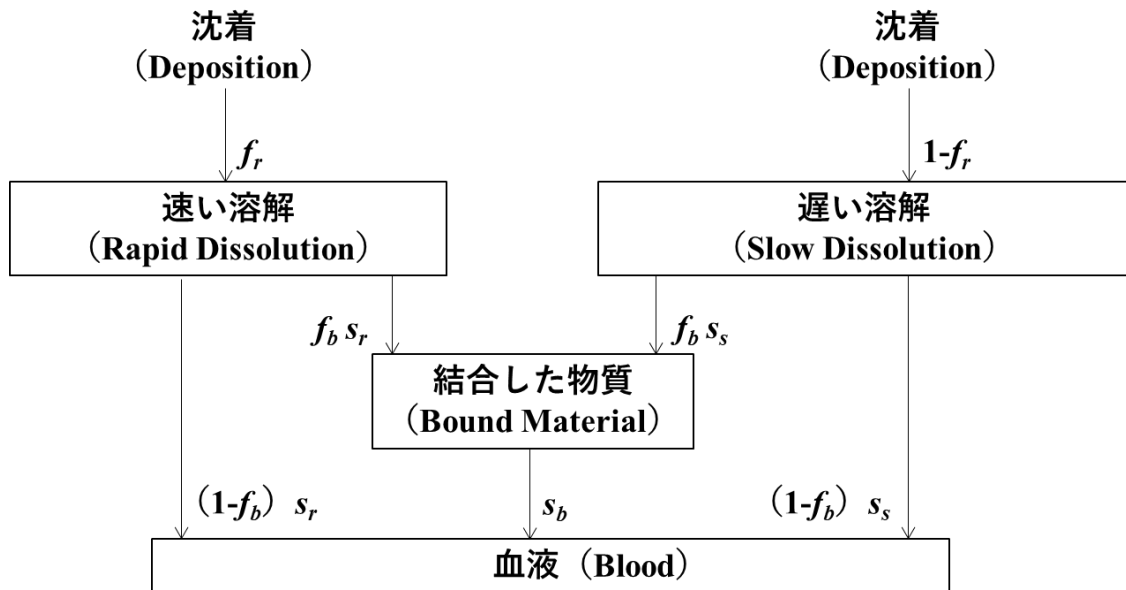


図 5 血液への時間依存の吸収を表現するコンパートメントモデル

沈着物のある割合 f_r が最初に「速い溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、残りの沈着物 $(1-f_r)$ が最初に「遅い溶解」と名づけられたコンパートメントに割り当てられる。

f_r : 速度 s_r で速やかに溶解する沈着物の割合

$(1 - f_r)$: 速度 s_s でより遅く溶解する沈着物の割合

f_b : 結合状態で保持され、そこから速度 s_b で血液へと向かう溶解物質の割合

s_r : 速い溶解の速度

s_s : 遅い溶解の速度

s_b : 結合状態から血液への移行速度

このモデルの限界は、全体の溶解速度が時間とともに減少することを表現できるに過ぎないことである。これを克服するために、Publication 66 (ICRP、1994a) は、図 6 に示す、より柔軟な体系も記述している。このモデルでは、呼吸気道に沈着した物質は「初期状態にある粒子」と名づけたコンパートメントに割り当てられ、そこでは一定速度 s_p で溶解する。物質は同時に、「変換された状態にある粒子」と名づけられた同様のコンパートメントへ（一定速度 s_{pt} で）移行し、そこでは異なる溶解速度 s_t を有する。このモデルを用いると、初期溶解速度はおおよそ s_p であり、最終溶解速度はおおよそ s_t である。したがって、 $s_t > s_p$ を含めて適切なパラメータ選択を伴うならば、増大する溶解速度を表現することができる。 s_{pt} に対する s_p の比率は、速やかに溶解する割合に近似する。

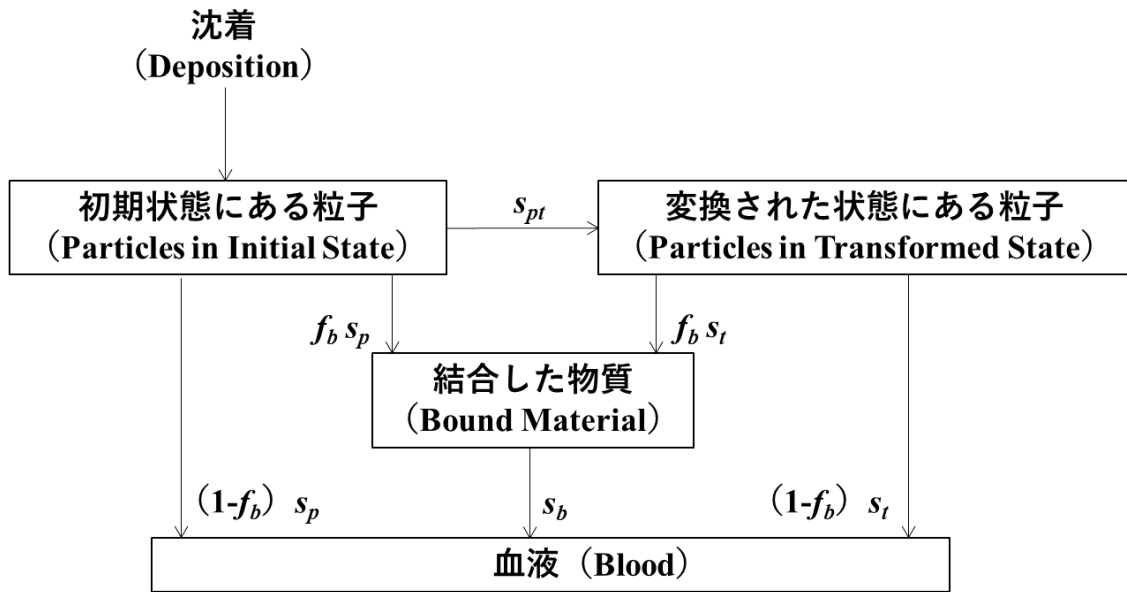


図 6 血液への時間依存の吸収を別表現するコンパートメントモデル

すべての沈着物が最初に「初期状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントに割り当てられ、「変換された状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質は、「初期状態にある粒子」と名づけられたコンパートメントにおける物質と同じ速度で粒子輸送に従う。「結合した物質」と名づけられたコンパートメントにおける物質は粒子輸送に従わず、血液への取り込みによってのみ除かれる。

s_{pt} : コンパートメント「初期状態にある粒子」からコンパートメント「変換された状態にある粒子」への物質の移行速度

s_p : コンパートメント「初期状態にある粒子」からの物質の溶解速度

s_t : コンパートメント「変換された状態にある粒子」からの物質の溶解速度

図 5 のモデルを用いて表現することができるいかなる時間依存の溶解挙動も、パラメータ値の適切な選択によって図 6 のモデルを用いることによっても表現できる。したがって、通常はそうであるように、溶解速度が時間とともに減少する場合には、いずれのモデルも用いることが可能であり、以下の値を用いれば同じ結果を示すであろう。しかし、上述のように、その逆は真ではない。

$$s_p = s_s + f_r(s_r - s_s)$$

$$s_{pt} = (1 - f_r)(s_r - s_s)$$

$$s_t = s_s$$

図 6 に示す体系は、以前の刊行物 (ICRP, 1994b, 1995c, 1997b) ではデフォルトの設定として適用された。しかし、この体系が持つさらなる柔軟性が実際に必要とされることは

まれであり、表現するのが複雑である（かつ、直観的なわかりやすさに劣る）。したがって、図 5 に示されているより単純なアプローチが現在はデフォルト設定として採用され、より柔軟なアプローチは選択肢として残されている。

溶解物質の血液への取り込みは、通常、瞬時に起こると仮定される。しかし、いくつかの元素では、溶解物質の一部は速く血液に吸収されるが、呼吸気道の成分との結合のために、かなりの割合がよりゆっくりと吸収される。時間依存の取り込みを表現するために、溶解物質のある割合（ f_b ）は結合状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合（ $1-f_b$ ）は瞬時に血液に入ると仮定される（図 5、6）。このモデルでは、結合状態の物質は、粒子輸送プロセスによってではなく、血液への取り込みによってのみ除かれる。したがって、いかなる吸収も起こらない ET_1 を除いて、それぞれの領域について結合コンパートメントが 1 つのみ必要とされる。

図 5 と 6 に示すモデルは、図 4 に示した粒子輸送モデルにおけるコンパートメントのそれぞれにあてはまる。 ET_1 からはいかなる吸収も起こらないと仮定されるが、図 5 のモデルが用いられる場合には、 ET_1 沈着物がそれでもなお、速い吸収のコンパートメントと遅い吸収のコンパートメントに分割されなければならない。なぜなら、物質が ET_1 から ET_2 へと除かれ、そこから吸収が起こるためである。

どの元素についても、パラメータのデフォルト値は、吸収速度が速い（タイプ F）、中位である（タイプ M）、または遅い（タイプ S）のいずれかであるとみなされるかに従って勧告される。ガスまたは蒸気については、血液へ瞬時に取り込まれるとして勧告されるであろう [タイプ V（非常に速い）]。

タイプ F、M および S の当初のデフォルト値 [Publication 66 (ICRP, 1994a) に示されている] は、実験データのレビューに基づくものではなく、粒子輸送速度との比較に基づくものであった。例えば、速い溶解速度 s_r に対する 100 d^{-1} という値は、鼻（ ET_2 ）から咽喉への粒子クリアランス速度に等しくするために選択された。

一部の元素の可溶性形態の場合、溶解した物質の一部は速やかに血液に吸収されるが、かなりの割合がよりゆっくりと吸収される。場合によっては、これは（粒子輸送によるクリアランスの支配下にある）粒子状物質の形成によって表現することができる。しかしながら、一部の溶解物質が肺の構成成分に付着し、血液への吸収によってのみ除かれるように見える場合もある。後者のタイプの時間依存取り込みを表現するために、溶解物質のある割合（ f_b ）は結合状態で保持され、そこから速度 s_b で血液に入るが、残りの割合（ $1-f_b$ ）は瞬時に血液に入ると仮定される（図 5、6）。粒子状物質への変換による残留よりもむしろ結合状態での保持である証拠は、1 つ以上の形をとるかもしれない（例えば、保持された物質の糞中クリアランスよりもむしろ全身への取り込み、呼吸気道の同じ領域に沈着した不溶性粒子の場合よりも遅いクリアランス、または放射能の局所的な残留ではなく拡散を示すオートラジオグラフィ）。

結合状態は主として、肺胞領域からの可溶性物質の遅いクリアランスを考慮に入れるた

めにこのモデルに含められたが、デフォルト設定では、すべての領域に同じ結合状態パラメータ値を適用すると仮定する。場合によっては（例えば、長寿命 α 放出体の長期的な結合状態）、このことははからずも、BB および bb 領域に対する高い線量計算値をもたらであろう。そして、これらの組織に大きな加重（按分係数）が与えられているため、肺に対する高い等価線量計算値をもたらすであろう。したがって、Publication 130 では、結合状態が採用される（ $f_b > 0$ ）元素については、実験的証拠があるならば、それを誘導気道（ET₂、BB および bb 領域）に適用すると仮定する。

呼吸気道からの吸収に関する実験データが、ほとんど、またはまったく存在しない一部の元素については、元素固有の吸収パラメータ値（ s_r 、 f_b および s_b ）は化学的類推に基づく。

実験データ（インビボ研究とインビトロ研究の両方による）から導き出された固有のパラメータ値は、一般的に「速い」、「中位の」または「遅い」速度で除かれるとみなされる物質の代表値を選択するためのガイダンスを提供するデータベースとなった。このやり方は、客観的な統計手法によって中央値を導出する代表的な調査ではなかったことを強調しておく。むしろ、情報を判断するための基礎である。改訂された HRTM に対応して更新され、Publication 130 で適用されるデフォルト設定値を表 2 に示す。

表 2 吸収速度の標準値

| | タイプ F | タイプ M | タイプ S |
|-----------------------------|-------|-------|--------|
| 早く溶解する割合 f_r | 1 | 0.2 | 0.01 |
| 溶解速度 | | | |
| 速い (d ⁻¹) s_r | 30* | 3** | 3** |
| 遅い (d ⁻¹) s_s | | 0.005 | 0.0001 |

計算の目的のために十分な精度で与えられる標準値であり、各パラメータの平均値について知られている確からしさを反映して選ばれるであろう精度より高い精度で与えられている。結合状態は、一部の元素のデフォルト設定タイプについても用いられる。

*元素固有の速い溶解速度は、多くの元素のタイプ F 形態について採用される。

**タイプ F に対応する元素固有の値は、それが 3 d⁻¹ を下回るならばタイプ M と S についても用いられる。

近似的半減期として表されるデフォルト設定の吸収速度、および、各領域に沈着した物質のうち（呼吸気道から）血液に到達する量は、以下のように要約することができる。

- ・ タイプ V：100%が瞬時に吸収される。このような物質の場合、領域別の沈着を評価する必要はない。なぜならば、線量計算において、あたかも血液に直接注入されたかのように扱うことができるからである。
- ・ タイプ F：30 d⁻¹ という s_r の一般的なデフォルト値において、約 30 分の半減期で 100%が吸収される。bb と AI に沈着したほとんどすべての物質、BB に沈着した物質

のおよそ 80%、ET₂に沈着した物質のおよそ 25%、そして ET₁に沈着した物質のおよそ 20%が速い吸収である。BB と ET₂に沈着した残りの物質は、粒子輸送によって消化管へと除かれる。

- ・ タイプ M : 3 d⁻¹ という s_r の一般的なデフォルト値において、約 6 時間の半減期で 20%が吸収され、約 140 日の半減期で 80%が吸収される。bb、BB、ET₂ および ET₁ に沈着した物質のそれぞれおよそ 20%、5%、0.5% および 0.4% が速い吸収である。AI における沈着物のおよそ 80% が最終的に血液に到達する。
- ・ タイプ S : 3 d⁻¹ という s_r の一般的な既定値において、約 6 時間の半減期で 1% が吸収され、約 7,000 日の半減期で 99% が吸収される。bb、BB、ET₂ および ET₁ に沈着した物質のそれぞれおよそ 1%、0.25%、0.03% および 0.02% が速い吸収である。AI における沈着物のおよそ 30% が最終的に血液に到達する。

タイプ F、M および S の場合、ET₁ に沈着した物質の一部は外的手段によって除かれる。呼吸気道に沈着した物質であって吸収されないものはほとんど、粒子輸送によって消化管へと除かれる。リンパ節へと移行した少量は、呼吸気道における場合と同じ速度で引き続き血液に吸収される。

呼吸気道から消化管へと除かれた物質に対し、消化管における吸収割合は f_r と f_a の積であるというのがデフォルト設定の仮定である。ここで f_a は、その元素の比較的溶解性の形態について消化管における吸収割合である。このアプローチは、 f_r は消化管における吸収として有効となる物質の可溶性割合を意味し、 f_a は可溶性割合の消化管吸収を意味するという考察に基づくものであった。このアプローチの採用にあたっては、消化管における吸収を大きく過大評価しないことが重要であると認識された。なぜならば、この消化管吸収の過大評価は尿中排出の予測を過大に評価し、それゆえ尿のバイオアッセイ測定による摂取量の過小評価をもたらさうからである。

次に、吸入摂取したガスまたは蒸気の状態である放射性核種のヒト呼吸気道モデルに基づく体内動態について説明する。

①-4 ガスと蒸気の場合

放射性核種がガスと蒸気の場合には、呼吸気道における沈着は完全に化学形に依存する。これに関して、沈着とは、「吸入空気中の物質のどのくらいの量が呼気後に体内に留まるのか」をいう。

吸入されたガス分子はほとんどすべて気道表面に接触するが、それらが表面被膜に溶解または反応しない限り、通常は空気中へと戻る。したがって、吸入されたガスまたは蒸気のうち、それぞれの領域に沈着する割合は、その可溶性と反応性に依存する。

ガスと蒸気の場合の一般的なデフォルト設定値は、呼吸気道における 100% の総沈着であり（領域別沈着割合：ET₂ 20%、BB 10%、bb 20%、そして AI 50%）、タイプ F の吸収を伴

う。この分類は Publication 66 (ICRP、1994a) に勧告されているものとは少し異なるが、適用するのはより容易となった。特に、ET₁には沈着がないことがデフォルト設定により仮定される。Publication 66 (ICRP、1994a) に述べられていた SR-0、SR-1、SR-2 の分類は有用ではないので、Publication130 では用いられていない。

② ヒト消化管モデル

Publication 30 (ICRP、1979a) の胃腸管モデルは、Publication 100 (ICRP、2006) に述べられているヒト消化管モデル (Human Alimentary Tract Model、HATM) によって置き換えられた。この置き換えは、物質の消化管通過に関する新しい情報が利用可能になったこと、感受性が高い細胞の位置に関する理解が向上したことなど、いくつかの進展によって動機づけられたものであった。このモデル構造を図 7 に、パラメータ値を表 3 に示す。HRTM との関係として、HATM の重要な特徴は、がん誘発の感受性が高い細胞を含む標的領域に対する線量の詳細な計算と、利用可能な情報がある場合における、固有の吸収値か残留値、またはその両方の考慮である。HATM と HRTM は、図 7 に示されているように、両立しうるものであり相互に関連するものである。

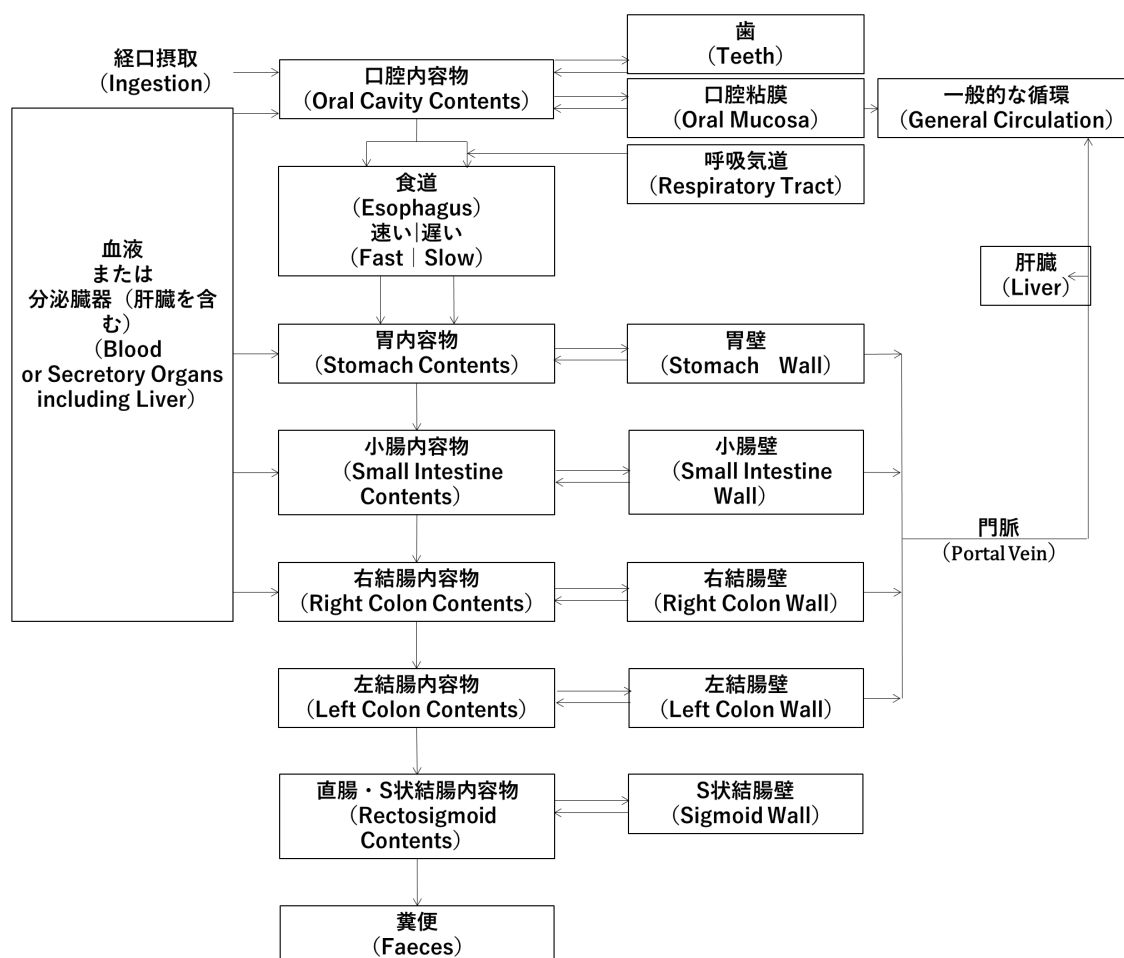


図 7 ヒト消化管モデル

表 3 標準作業者の前食事に対応するヒト消化管モデルにおけるデフォルト設定の、1 日あたりの移行係数

| 移行元 | 移行先 | 移行係数 (d ⁻¹) * |
|-------------|-------------|---------------------------|
| 口腔内容物 | 食道、速い | 6,480 |
| 口腔内容物 | 食道、遅い | 720 |
| 食道、速い | 胃内容物 | 12,343 |
| 食道、遅い | 胃内容物 | 2,160 |
| 胃内容物 | 小腸内容物 | 20.57 |
| 小腸内容物 | 右結腸内容物 | 6 |
| 右結腸内容物 | 左結腸内容物 | 2 |
| 左結腸内容物 | 直腸・S 状結腸内容物 | 2 |
| 直腸・S 状結腸内容物 | 糞便 | 2 |

Publication 100 (ICRP, 2006) の成人男性に対応する移行速度が標準作業者に対応すると仮定されている。ここに示されていない他の移行係数は、他に明示されていない限り、ゼロと仮定される。ほとんどの場合、消化管から血液への取り込みは、小腸壁における残留を伴わずに小腸内容物から起こるとみなされる。対応する移行係数は $f_A \cdot \lambda_{SI,RC} / (1 - f_A)$ であり、ここで $\lambda_{SI,RC}$ は、小腸 (SI) 内容物から右結腸 (RC) 内容物への移行係数である。

*示されている値の精度は計算を目的とするためのものであり、それらの中央値に伴っている既知の確からしさを反映していない。

HATM は、経口摂取により口腔へ、もしくは呼吸気道から粒子輸送を経て食道へ放射性核種が入っていくことを表現するものである。このモデルは、口腔、食道、胃、小腸および結腸の各部分、それに続く糞中排泄を含めたあらゆる消化管領域における連続的な移行を記述する。線量は、これらの領域すべてについて計算される。結腸は、線量計算の目的のために、利用可能な通過時間データに基づいて、右結腸、左結腸および直腸・S 状結腸 (S 状結腸および直腸) に分割される。直腸は、通過時間を個別に決定するのが難しく、また固有の W_T 値を持たないため、S 状結腸とともに直腸・S 状結腸に含まれる。総結腸線量、右結腸、左結腸および直腸・S 状結腸を含むために質量加重平均として結合される。

HATM は、口腔、食道および胃における固体の食物、液体および全食事についてそれぞれ異なる通過時間を提示する。一次反応速度式が仮定される。これは、消化管の管腔を通じた物質の移行に関係する複雑なプロセスをかなり単純化してはいるが、消化管のそれぞれの部分における放射性核種の平均滞留時間について合理的な正確さを持って再現することが見込まれている。

HATM に示されるデフォルト設定の領域別通過時間は、所定の性別、年齢グループおよび

物質のタイプ（例えば、固体、液体、カロリーのある液体やノンカロリーの液体）について収集されたデータに基づく中心推定値である。Publication 100 (ICRP、2006) で詳しく説明されているように、消化管の各主要部分の物質の通過は、通常の条件下でさえ、被験者間および被験者内でかなりの変動を示す。例えば、便秘、下痢、通常でない食事、医薬品や、神経系に影響を及ぼすもしくはエネルギー消費を増大させる種々の疾患によって、標準から著しく外れる場合がある。

HATM は、寸法ならびに各領域の内容物の通過時間について、成人の場合の性固有パラメータ値を提示する。胃と腸のサイズは一般に男性よりも女性の方が小さいが、これらの領域の通過時間の中央推定値は男性よりも女性の方がおよそ 1/3（約 1.3 倍）大きい。しかし、男性と女性の両方においてすべての消化管領域の通過時間に大きな変動があることを考慮に入れ、標準作業者には成人男性の標準通過時間が割り当てられる。

②-1 呼吸気道または唾液中からの移行、および経口摂取

呼吸気道から除かれる粘液と付随物質は、口腔咽頭を経て食道に入る。経口摂取された食物と液体については、HATM は、食道通過の 2 つの成分を明示している。それは、飲み込まれた物質の 90% の比較的速い移行（全食事の場合で 7 秒の平均通過時間）および残りの 10% の比較的遅い通過（全食事の場合で 40 秒）を表す。呼吸気道から除かれるすべての物質については、遅い方の食道通過時間が当てはまると仮定する。唾液によって消化管に入る放射能についても同じ仮定をする。

②-2 消化管からの吸収

放射性核種は次のように消化管に入りうる。すなわち、経口摂取の結果としての直接的な侵入、吸入摂取後に呼吸気道から粒子の粘膜線毛運動による口腔咽頭および食道への間接的な侵入、あるいは唾液、胆汁や胃液などの分泌による侵入である。また、放射性核種は、親核種の壊変によって消化管内で生成されることもある。HATM では、放射性核種の血液への吸収は消化管に入る量に対するある一定の割合として与えられ、総吸収は f_A と表される (ICRP、2006)。モデル構造は、吸収に関して利用可能な情報がある領域すべてについてそのデータを使用できるようになっている。ほとんどの場合、放射性核種の領域別の吸収に関する情報は利用できず、デフォルト設定では吸収はすべて小腸において起こることが仮定される（すなわち、 $f_{SI} = f_A$ ）。デフォルト設定として、消化管壁から内容物へ再循環しないことも仮定されている。一部の f_A 値は、値の改訂を正当化するのに十分な新情報がないため、以前に Publication 30 のモデル (ICRP、1979a、1980、1981、1988b) で用いられていた f_I 値と同じである。他の領域からの吸収に関する特定のデータが利用可能な少数のケースにおいては、そのデータが考慮されているが、一部の例では（例えば、比較的長寿命のヨウ素同位体）、消化管領域と他の組織に対する線量は吸収の部位に関する仮定に影響を受けない (ICRP、2006)。

放射性核種の吸収の程度は、元素とその化学形に依存する。化学的形態の変化は、口腔内から始まる消化プロセスの間に起こりうるが、主として胃と小腸において起こる。これらの

化学的形態の変化または種分化によって、放射性核種の吸収の効率が決まり、それによって腸上皮を通じた血流への取り込み量を決定する（ICRP、2006）。

経口摂取された親核種 Y の壊変によって消化管内で生成される放射性核種 X のデフォルト設定の吸収割合 f_A は、親核種としての X に対応する標準の f_A である。 X が異なる化学的または物理的形態に対応する複数の標準値を有する場合、デフォルト設定の f_A は、 X について提示される標準値の最も大きな値である。

吸入摂取され呼吸気道からのクリアランス後に消化管に達する粒子の場合、 f_A 値を特定する際には肺における可溶性を考慮に入れることが適切である。その物理化学的形態に従って様々な可溶性を示す一部の元素について、タイプ M または S の物質の可溶性の低下と腸における吸収の低下は関連しているという証拠がある。呼吸気道から消化管へと移行する放射性核種の場合、デフォルト設定の f_A 値は、その吸収タイプに対応する f_r とその元素の可溶性形態に対応する f_A 値の積として決定される。吸入摂取された親核種 Y の壊変によって呼吸気道または消化管において生成される放射性核種 X のデフォルト設定の吸収割合 f_A は、その吸収タイプに対応する f_r と親核種として経口摂取される X に対応する標準の f_A の積である。 X が異なる化学的または物理的形態に対応する複数の標準の吸収割合 f_A を有する場合、呼吸気道または消化管において生成される X のデフォルト設定の吸収割合 f_A は、その吸収タイプに対応する f_r と X について提示される標準値の最も大きな値との積である。

放射性核種の全身にわたる挙動を予測するために Publication 130 で用いる体内動態モデルの一部は、全身コンパートメントから消化管内容物への分泌を表現する。全身コンパートメントから小腸またはそれより上部の消化管部分へと移行する放射能は、血液への再吸収の対象となると仮定される。そのような場合、分泌された放射能のデフォルト設定の吸収割合 f_A は、その放射性核種の経口摂取に対応する標準の f_A である。経口摂取された放射性核種の異なる形態に対応して複数の標準の f_A 値が与えられる場合、分泌された放射能のデフォルト設定の f_A は、 X について提示される標準値の最も大きな値である。

②-3 消化管領域における残留

このモデル構造では、情報が利用可能な場合、様々のコンパートメントにおける放射性核種の残留に関するデータを利用可能している。経口摂取された放射性核種が歯または小腸を主とする消化管領域の壁の粘膜組織に残留することを示唆あるいは示しているヒトと動物のデータは、消化管の線量計算を精緻化するために利用できる。カドミウムについて Publication 100（ICRP、2006）に示されている例は、歯における ^{115}Cd の残留が、口腔粘膜の推定線量を、Publication 30 のモデル（ICRP、1979a、1980）を用いた計算と比べてほぼ 2 桁増大させることを示している。同様に、小腸壁における ^{59}Fe の残留は、小腸壁の等価線量を、Publication 30 のモデル（ICRP、1979a、1980）を用いた計算と比べてほぼ 2 倍に増大させる。しかしいずれの事例においても、これらの臓器線量の増大は、他の組織からの寄与が支配的なので、預託実効線量の大きな変化にはつながらない（ICRP、2006）。

③ 皮膚

はじめに、傷のない皮膚は、ほとんどの物質の体内侵入に対する有効な障壁であり、この障壁を越える放射性核種はほとんどない。実際上の重要な例外は、液体または蒸気状態のトリチウム水、有機炭素化合物、そして蒸気状態または溶液中のヨウ素である。考えうる被ばくシナリオが広範にわたるため、皮膚を通じた放射性核種の吸収について、一般モデルは存在しない。例えばエアロゾル、液体、汚染された表面や汚染された衣類との接触によって、皮膚は汚染される可能性がある。汚染物質の物理的および化学的形態（pHを含む）ならびに皮膚の生理学的状態は、いかなる線量評価においても重要な因子である。汚染された皮膚領域の線量と、吸収の結果としての全身の線量は、いずれも考慮されるべきである。ICRP（1991、2007）は、次のように勧告している。局所皮膚線量は、70 μm の深さにあると仮定される感受性の高い細胞に対して計算、もしくは、皮膚表面下 50～100 μm の組織層にわたって平均されるべきであり、皮膚組織の最も被ばくする 1 cm^2 にわたって平均されるべきである。この勧告は、皮膚表面に分布する放射能にも、粒子中に凝集した放射能にもあてはまる。皮膚に沈着した放射性核種による線量の計算については、ICRP はいかなる線量評価モデルも勧告せず、いかなる線量係数も示していない。

ICRP は概して、皮膚の創傷部位から血液とその他の臓器・組織へと移行する放射性核種の摂取による線量の評価に関する助言は提供してこなかった。創傷に起因する内部被ばくは、ほぼ常に、通常管理された作業環境下にある日常作業の結果としてよりも、むしろ作業場における事故のために起こる。創傷からの取り込みはそれぞれの事象の状況次第で大きく変化する可能性があり、実際には、内部汚染の評価はケースバイケースで扱われる。結果として、標準的な線量係数またはバイオアッセイ関数を提示しても、価値が限られたものとなるであろう。しかし、創傷部位からの放射性核種の移行に関する情報は、米国放射線防護測定審議会（NCRP）の科学委員会によって精査されており、これらのデータは、異なる物理化学的形態に対して、摂取後の創傷からの物質の移行を記述するモデルを開発するために利用されている（NCRP、2006）。この情報は、創傷汚染の個々のケースに対応するバイオアッセイデータの解釈において有用かもしれないため以下に、この NCRP モデルの主な特徴を概説する。

③-1 創傷

放射性核種は、汚染された創傷部位から血液へ入り、他の臓器・組織へと移行する場合がある。NCRP は、異なる物理化学的状態の物質に対応するこの移行を記述するためのモデルを開発している（図 8）。十分なヒトのデータがないため、このモデルのパラメータ値は動物実験データに基づくものであった。元素固有の全身体内動態モデルと結合すれば、このモデルは、尿中および糞便中排出を予測するためだけでなく、臓器・組織に対する預託等価線量、ならびに放射性核種が血液と全身性循環に移行した後の預託実効線量を計算するためにも用いることができる。

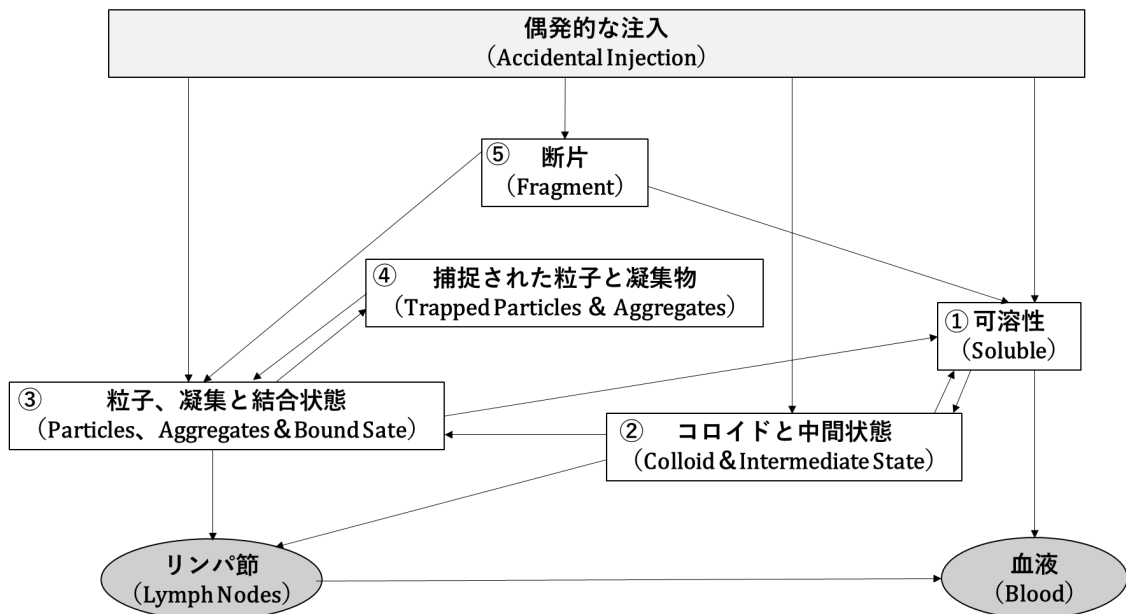


図 8 創傷モデル (NCRP Report No. 156、2006、Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment から)

このモデルは、創傷から注入または浸透した後の、可溶性と不溶性の両方の放射性核種に適用できるように設計された。創傷部位内にある放射性核種の物理的または化学的状态を記述するために、5つのコンパートメントが用いられる。これらは、

- ①可溶性物質、
- ②コロイド状態および中間状態の物質、
- ③粒子状態、凝集状態および結合状態、
- ④捕捉された粒子と凝集物、
- ⑤破片、

からなる。場合によっては、これらのコンパートメントは、その当初の物理化学的状态の放射性核種を含む。また、当初沈着した物質が状態を変化させ、1つのコンパートメントから別のコンパートメントへと時間とともに移行する場合もある。ほとんどの場合、このモデルは、指定された放射性核種の物理的および化学的形態に依存して2つまたは3つのコンパートメントへと単純化される。

最初に可溶性の形態で創傷中に存在する放射性核種について、4つの残留カテゴリーが定義される。すなわち、弱い、中位の、強い、そして非常に強い、である。これらは一般的に、創傷部位における残留の持続性の度合を表している。分類の判断基準は次にに基づく：

- (a) ラットについて、筋内に注入された放射性核種のうち沈着後1日間留まる割合
- (b) 最初保持された割合が除かれる速度

創傷部位からの放射性核種の放出は、それが可溶性物質の場合は血液を経由して、粒子の

場合はリンパ節を経由して起こる。リンパ節において粒子がさらに溶解すると、放射性核種の血液への移行も生じる。血液は、この創傷モデルをそれぞれの放射性元素に固有の全身体内動態モデルへと結びつける中心となるコンパートメントである。放射性核種はひとたび血液に到達すると、可溶性の状態で血液に直接注入されたかのような挙動をとる。これは、HRTM と HATM において採用されているのと同じアプローチである。

モデルをバイオアッセイの解釈のために適用した例を示すために、この創傷モデルは ^{137}Cs に対応する全身体内動態モデル(ICRP、1979a、1989、1997b)と統合された。創傷モデルにおけるCsの主たるデフォルト値は、弱いカテゴリーである。これに従って、このカテゴリーのパラメータが創傷モデルに適用され、尿中および糞便中排出パターンが予測され、 ^{137}Cs の排出がピークになるのが、尿中では摂取後2～3日、糞便中ではおよそ5日であることを示している。いずれのパターンも、創傷部位からの ^{137}Cs の速い移動、そして全身臓器部位における分布とそこからの排出を反映する。

創傷、擦傷、火傷またはその他の病的な皮膚損傷が存在すると、放射性核種が皮下組織に達し、その後に全身性循環に移行する能力を大幅に増大させる場合がある。創傷部位に沈着した物質の多くはその部位に保持され、外科的に切除することが可能かもしれないが、可溶性物質の場合は血液へと移行し、さらに、人体の他の部分へと輸送されうる。創傷に起因する内部汚染の評価は、実際には、専門家の判断に基づきケースバイケースで扱われる。多くの場合、創傷部位から血液に移行する放射性核種の量は、尿のバイオアッセイデータから直接評価されるであろう。創傷部位から血液ならびに他の臓器・組織へと移行する放射性核種による線量の計算については、ICRPはいかなる線量評価モデルも勧告していない。しかしながら、そのようなモデルはNCRP(2006)によって発表されているため、摂取経路としての注入に対応する線量係数は創傷汚染後の線量の評価に利用できるであろう。

参考文献

ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).