

質における単位放射能濃度当たりの平均実効線量係数

fd	[-] 希釈係数
te	[h/y] 被ばく時間
λ	[1/y] 放射性核種依存壊変定数
t_1	[y] シナリオ開始前の減衰時間
t_2	[y] シナリオ中の減衰時間

(2) 吸入

吸入による被ばくは、汚染粉塵の吸入を考え、被ばく対象は処分場の作業員、一般公衆の被ばくとして乳児（年齢グループ0-1歳）のシナリオとする。

吸入被ばく線量は、以下の式に従って算出される。

$$H_{inh,c} = h_{inh} \cdot te \cdot fd \cdot C_{dust} \cdot V \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (2)$$

$H_{inh,c}$	[(μ Sv/y) / (Bq/g)]	解放された物質における単位放射能濃度当たりの吸入からの年間個人実効線量
h_{inh}	[μ Sv/Bq]	吸入の実効線量係数
te	[h/y]	被ばく時間
fd	[-]	希釈係数
fc	[-]	吸入される粉塵中の放射線の濃縮係数
C_{dust}	[g/m ³]	空気中の実効粉塵濃度
V	[m ³ /h]	呼吸率
λ	[1/y]	放射性核種依存壊変定数
t_1	[y]	シナリオ開始前の減衰時間
t_2	[y]	シナリオ中の減衰時間

(3) 経口摂取

経口摂取は、汚染物質を不注意により経口摂取する時を考え、対象者は処分場の作業員と一般公衆の2つのシナリオである。

経口摂取による線量は以下の式（3）を使用して算出される。

$$H_{ing,c} = h_{ing} \cdot q \cdot fd \cdot fc \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (3)$$

$H_{ing,c}$	[(μ Sv/y) / (Bq/g)]	解放された物質における単位放射能濃度当たりの経口摂取からの年間個人実効線量
h_{ing}	[μ Sv/Bq]	経口摂取の実効線量係数
q	[g/y]	年間での経口摂取量
f_d	[-]	希釈係数
f_c	[-]	経口摂取物質中の放射線の濃縮係数
λ	[1/y]	放射性核種依存壊変定数
t_1	[y]	シナリオ開始前の減衰時間

t_2 [y] シナリオ中の減衰時間

(4) 皮膚汚染

皮膚汚染は放射性核種を含む粉塵によるもの処分場の作業者のシナリオとする。

皮膚汚染から生じる個人の実効線量は (4) に従って計算される。

$$H_{\text{skin,C}} = H_{\text{skin}} \cdot w_{\text{skin}} \cdot f_{\text{skin}} \cdot t_e \cdot L_{\text{dust}} \cdot f_d \cdot f_c \cdot p \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (4)$$

$H_{\text{skin,C}}$ [(μ Sv/y) (Bq/g)] 解放された物質における単位放射能濃度当たりのベータ及びガンマを放出する皮膚の汚染から生じた個人の年間実効線量

H_{skin} [(μ Sv/h) (Bq/cm²)] 表面積単位放射能あたりのベータ放出体 (4mg/cm²の皮膚の濃度) とガンマ放出体 [KOC87]⁴⁾の皮膚の実効線量係数の合計

w_{skin} [-] ICRP 60 に準じた皮膚の荷重係数

f_{skin} [-] 汚染した体の表面の割合

t_e [h/y] 被ばく時間 (皮膚が汚染される時間)

L_{dust} [cm] 皮膚における粉塵の層の厚さ

f_d [-] 希釈係数

f_c [-] 汚染における放射能の濃縮係数

p [g/cm³] 表面層の密度

λ [1/y] 放射性核種依存壊変定数

t_1 [y] シナリオ開始前の減衰時間

t_2 [y] シナリオ中の減衰時間

10 μ Sv/y に相当する放射能濃度を生じる個々の線量を10乗に丸める。これは、IAEA Draft Annex の計算結果でも行われており、計算した値が 3×10^x と $3 \times 10^{x+1}$ にあれば、丸めた値は 10^{x+1} である。

2. 金属

金属に使用される包括シナリオは処理または再使用の作業場、埋立地での廃棄作業場、一般公衆への被ばくを考える。被ばく経路は、金属の再利用と廃棄作業場での γ 線放出体からの外部被ばく、放射能を含む粉塵の吸入、放射能を含む物質の経口摂取と β 放射線からの皮膚への線量を考慮する。

A) シナリオ

(1) 外部被ばく

外部被ばくは以下の3つのシナリオで表される：

M-EXT-A：解放された物質の大量に希釈され物質を取り扱う作業員、例：埋立地。

M-EXT-B：金属の輸送による被ばくでトラックの運転手。

M-EXT-C：解放された物質が建材として床や天井に使用されてきた家に住んでいる人

(2) 粉塵の吸入

吸入経路は、以下の2つのシナリオによって表される。

M-INH-A：粉塵の吸入は、金属や副産物が取り扱われる作業場で起こる。金属を処理する作業場を考察し、粉塵が希釈されていない汚染物質からのみ発生すると想定するアプローチである。

M-INH-B：粉塵の吸入は、金属が処理され、投棄される場所付近に住んでいる人。1年中粉塵を吸入するだろう乳児（0-1歳）に当てはめる。

(3) 物質の直接の経口摂取

経口摂取経路以下の2つのシナリオによって表示されうる。

M-ING-A：粉塵の多い環境での作業中、物質を不注意に経口摂取する人。

M-ING-B：解放された物質を直接経口摂取する一般公衆に当てはめる。そこで解放された物質を使用して舗装された区域で遊ぶ小さな子供（1-2歳）を考察する。

(4) 皮膚汚染

皮膚汚染は、以下のシナリオで表される。

M-SKIN：皮膚の汚染は、粉塵の多い環境下での作業場を考える。手と前腕の両方が作業中に汚染され、体の残りの部分が服で保護されていると想定する。

B) 金属のシナリオとパラメータ

(1) 外部被ばくシナリオ

外部被ばくシナリオでは、3つシナリオに以下のパラメータが使用された。

M-EXT-A：埋立地の作業者は、解放された物質を捨てる埋立地で全作業時間（1800h/y）働いていると考察される。埋立地の最大収容量が年間で100,000Mgが適量なので、解放された物質の10,000Mg/yは、年間総収容量の約10%に当たる。年間収容量が少ない埋立地では、廃棄物が通常20-50Mg/hの割合で蓄積されるので、金属に従事する時間が比較的少ない。シナリオ開始日の1日前の減衰（クリアランスサイトと埋立地の輸送時間）が想定されるが、埋立地故に、シナリオ実施間の減衰時間はなく、作業者が扱う廃棄物は、常に最近の解放された物質を含むと仮定する。均一に広がった線源は、 $2\text{g}/\text{cm}^3$ の密度に圧縮されると想定して算出する。線量は、地上1mの高さの被ばくジオメトリに対して計算する。

M-EXT-B：解放された金属のみを輸送するトラック運転手の被ばく時間は、1台当たりの積載量を20Mgとし、年間の総積載量10,000Mg、一回当たりの運転時間を2時間とすると年間で900時間となる。輸送の間、非汚染物質との混合は想定しない。平均密度が $2\text{g}/\text{cm}^3$ である $5 \times 2 \times 1\text{m}^3$ 積載量のトラックと追加の遮へい無しで積載物の端から運転手までの距離を1mとする被ばくジオメトリである。常に最近解放された物質が輸送されるので、シナリオの前と実施期間中は、減衰は考慮しない。このシナリオは、更にその他の多くの被ばくジオメトリを網羅するものである。

M-EXT-C：解放された物質が建設に使用され、建物の金属の2%をそれが占める家で

人が年間 7000 時間過ごすとして想定する。被ばくジオメトリは、 $3 \times 4\text{m}^2$ で床からの高さが 2.5m、壁と天井は 20cm の厚さの部屋が想定される。線量は、部屋の中央で高さ 1m のジオメトリで算出される。窓や家具による遮へいと床（天井を含むため 2 倍計算される）や 2 つの壁 ($4 \times 2.5\text{m}^2$) からの影響が加算される。シナリオ開始 100 日前とシナリオ実施中の 1 年間の減衰を想定する。

表 1. 金属 外部被ばくのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ M-EXT-A	シナリオ M-EXT-B	シナリオ M-EXT-C
被ばく時間 t_e	h/y	1800	900	7000
希釈係数 f_d		0.1	1	0.02
シナリオ前の減衰時間 t_1	d	1	0	100
シナリオ実施中の減衰時間 t_2	d	0	0	365
物質の密度	g/cm ³	2	2	7.6
ジオメトリ		地上 1m の半無限線源	$5 \times 2 \times 1\text{m}^3$ の積載量から 1m、遮へい無し	床、天井、 $3 \times 4\text{m}^2$ 、高さ 2.5m で 1cm の壁の厚さ
実効線量係数 h_{ext}	($\mu\text{Sv/h}$) /(Bq/g)	放射性核種とジオメトリに依存する。		

(2) 吸入シナリオのパラメータ

吸入シナリオでは、以下のパラメータが使用された。

M-INH-A：この作業場でのシナリオでは、 $1\text{mg}/\text{m}^3$ の空気中当たりの粉塵濃度と $1.2\text{m}^3/\text{h}$ の呼吸率（中程度の作業を計算）が想定される。線量係数は、 $5\mu\text{m}$ AMAD（Activity Median Aerodynamic Diameter）を BSS³⁾ から引用した。粉塵は、常に最近解放された物質から発生するので、実施前と実施中には減衰は想定されない。希釈と濃縮は想定されない。

M-INH-B：このシナリオでは、年間（8760h/y）で、解放された金属（例：埋立地またはスクラップ置き場付近の粉塵）から生じるうちの 10% の粉塵を乳児が吸入すると考える。空気中の粉塵濃度は、 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ で、呼吸率は $0.12\text{m}^3/\text{h}$ となる。規定値肺保持率のクラスで年齢グループ 0-1y の線量係数は、BSS³⁾ から引用される。1 日の減衰がシナリオ前に想定され、シナリオの実施前と実施中は、粉塵が常に、最近解放された物質から発生するので、減衰は想定されない。

表 2. 金属 吸入シナリオのパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ M-INH-A	シナリオ M-INH-B
被ばく時間 t_e	h/y	1800	8760
希釈係数 f_d		1	0.1
濃縮係数 f_c		1	1

呼吸率 Vにおける粉塵濃度	m ³ /h	1.2	0.12
空気C dust	g/m ³	1.00E-03	1.00E-04
シナリオ t ₁ 前の減衰期間	d	0	1 注 0として計算
シナリオ t ₂ 中の減衰期間	d	0	0
実効線量係数 h inh	μ Sv/Bq	5 μ m、作業者	1 μ m、 0-1y、

(3) 経口摂取シナリオのパラメータ

経口摂取シナリオでは、以下のパラメータが使用された。

M-ING-A：作業者が、20g/yの解放された物質を不注意に経口摂取すると想定する。作業者は最近解放された物質をいつも取り扱うので、シナリオ前と実施中の減衰は想定されない。

M-ING-B：経口摂取量は、希釈または濃縮過程なしに100g/yであると仮定された。子供が遊び又は滞在する物質は交換できないので、シナリオ開始日1日目の減衰とシナリオ期間中の1年間が想定される。経口摂取線量係数は、年齢グループ1-2yをBSS³⁾から引用する。

表3 金属経口摂取シナリオのパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ M-ING-A	シナリオ M-ING-B
年間経口摂取量 q	g/y	20	100
希釈係数 fd		1	1
濃縮係数 fc		1	1
シナリオ前の減衰期間 t ₁	d	0	1
シナリオ中の減衰期間 t ₂	d	0	365
実効線量係数 h inh	μ Sv/Bq	作業者	1-2y

(4) 皮膚汚染シナリオのパラメータ

皮膚汚染のシナリオでは、以下のパラメータが使用された。

M-SKIN：全労働時間(1800h/y)前腕と手の両方は100 μ m (0.01cm)の厚みの粉塵の層で覆われていると想定する。粉塵は、解放された物質と同じ放射エネルギーをもつと想定される。皮膚上の物質は常に新鮮なので、シナリオ実施前と実施中の減衰は想定しない。皮膚上の粉塵の密度は1.5g/cm³に設定された。実効線量を算出するためにKOC87⁴⁾からの線量係数に、皮膚荷重係数0.01を掛けること。

表4. 金属 皮膚汚染シナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	M-SKIN
被ばく時間 te	h/y	1800
皮膚表面上の粉塵の厚み Ldust	cm	0.01
粉塵の密度 ρ	g/cm ³	1.5
希釈係数 fd		1

濃縮係数 f_c		1
皮膚荷重係数 W_{skin}		0.01
体表面率 f_{skin}		0.1 (eq. ca. 2000cm ³)
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0
シナリオ実施期間の減衰期間 t_2	d	0
実効線量係数 h_{skin}	(μ Sv/h) / (Bq/cm ²)	放射性核種に依存する

3. コンクリート

原子力施設や他の規制されている行為より生じる解放された割りぐりの再利用やコンクリートの処分を考える。

被ばく経路は、建材の再利用と処分に関わる； γ 放出体の外部被ばく、放射線を含む粉塵の吸入、経口摂取と皮膚への β 線照射である。

A) シナリオ

(1) 外部被ばく

外部被ばくでは、以下の3つのシナリオで表示される。

R-EXT-A：このシナリオは、道路工事に携わる作業員、市場の商人、駐車場の作業員、埋立地の労働者のような、人が長時間、再利用建材で覆われた区域で過ごす人を想定する。

R-EXT-B：このシナリオは中間サイズの建材の山積み付近で働く人の被ばくと輸送状況について扱う。トラックの積載量は、被ばくジオメトリとして選択される。

R-EXT-C：このシナリオは、解放された建物の隔壁が、建築材料の新たな骨材として使用された家に住む人について扱う。非汚染物質と解放された建物の割りぐりとの混合を想定する。

(2) 粉塵の吸入

吸入は、以下の2つのシナリオで表示される。

R-INH-A：作業員による粉塵の吸入。汚染物質のみから発生すると想定する。

R-INH-B：一般公衆による粉塵の吸入。年間で0-1歳の乳児が、粉塵を吸入し続けると想定する。

(3) 物質の直接経口摂取

経口摂取は、以下の2つのシナリオで表示される。

R-ING-A：作業員による経口摂取。

R-ING-B：一般公衆による経口摂取。希釈無しに解放した物質を使用して覆われているような区域で遊ぶ小さな子供（1-2歳）を想定する。

(4) 皮膚汚染

皮膚汚染は以下のシナリオで表示される。

R-SKIN：作業員の汚染。このシナリオは、建物の割りぐりの再利用中の粉砕または分別場、作業員が廃棄物質に接触するような埋立地の作業場を示す。人体の他の部分が服で防護されてる間、両手と両前腕が作業中に汚染されると想定する。

B) コンクリートのシナリオとパラメータ

(1) 外部被ばくのシナリオ

外部被ばくの3つのシナリオは以下のパラメータが使用された。

R-EXT-A：埋立地での作業者は解放された建物から生じた割ぐりを処分する埋め立地上でフルタイム働いていると考察する。埋立地の最大収容能力量が年間100,000Mgとする。10,000Mg/yの解放された建物の割ぐりが年間総収容可能量の10%に当たる。年間収容量が少ない埋立地では、廃棄物が通常20~50Mg/hで積み込まれるので、割ぐりを扱うのに従事する時間が比較的少ない。シナリオ実施1日前（クリアランスサイトと埋立地）の減衰が想定されるが、埋立地については、作業者が取り扱う廃棄物が常に最近解放された物質を含むので、シナリオ中には減衰時間がない。廃棄物中に均一に広がった線源に2g/cm³の密度が安全則にたつて、線量計算に使用される。地上1m被ばくジオメトリに対して線量が算出される。

R-EXT-B：解放された建物の割ぐりのみを輸送するトラック運転手の被ばく時間は、トラック1台当たり20Mgの積載量と想定され、運転時間2時間は（建物の割ぐりは、短距離を輸送するとする）年間で900時間になる。輸送中は、非汚染物質との混合は想定しない。平均密度が2g/m³である5×2×1m³のトラックの積載量と追加の遮へい無しに積載物の端から運転手まで1m距離が被ばくジオメトリとして考察される。線量は前後ジオメトリで算出される。常に、最近解放された物質が輸送されるので、シナリオ前と実施中には減衰は想定されない。

R-EXT-C：解放された建物の割ぐりが家に使用され、居住する被ばく時間は7,000h/y、解放された物質が全建築の塊の2%に当たる。被ばくジオメトリは3×4m²の部屋と床から天井までの高さが2.5m、床と天井が20cmの厚みと選択される。線量が1mの高さの部屋中央というジオメトリに対して算出される。家具などで遮へいされる窓を説明するのに、床（天井までの距離の2倍を含む）と2つの壁（4×2.5m²）の影響を足す。シナリオ開始100日前の減衰とシナリオ実施中、1年間の減衰が想定される。

表5. コンクリート 外部被ばくシナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ R-EXT-A	シナリオ R-EXT-B	シナリオ R-EXT-C
被ばく時間 t_e	h/y	1800	900	7000
希釈係数 f_d		0.1	1	0.02
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	1	0	100
シナリオ実施期間の減衰期間 t_2	d	0	0	365
物質の密度	g/cm ³	2	2	2
ジオメトリ		地上1m、半無限量	積載量5×2×1m ³ から1m、遮へい無し	床、天井、2つの壁、3×4m ² 、高さ2.5m、20cmの壁の厚さ

実効線量係数 h_{ext}	$(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/g})$	放射性核種とジオメトリによる
------------------	----------------------------------	----------------

(2) 吸入シナリオのパラメータ

2つの吸入シナリオは、以下のパラメータが使用された。

R-INH-A：この作業場所のシナリオでは、 $1\text{mg}/\text{m}^3$ の空气中的粉塵濃度と $1.2\text{m}^3/\text{h}$ の呼吸率（中程度放射線を考慮）が想定される。線量係数は $5\mu\text{mAMAD}$ 値が BSS³⁾ から引用された。シナリオ開始前と実施中は、粉塵が解放された物質からのみ発生するので減衰は想定されない。希釈と濃縮は想定されない。従ってこのシナリオは希釈と濃縮が、解放された物質の処理中の異なる段階で起こるその他のシナリオを含む。

R-INH-B：このシナリオでは、乳児が1年間（8760時間）に解放された建物の割ぐり（埋立地付近の粉塵）から発生する粉塵の10%を吸入すると想定する。空气中粉塵の濃度は $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ で、呼吸率は $0.12\text{m}^3/\text{h}$ に設定される。線量係数は、規定値肺の保持クラスと年齢0-1歳のグループに関しては、BSS³⁾から引用する。シナリオ実施前と実施中は、粉塵が常に最近解放された物質のみから発生するので減衰は想定しない。

表6. コンクリート 吸入シナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ R-INH-A	シナリオ R-INH-B
被ばく時間 t_e	h/y	1800	8760
希釈係数 f_d		1	0.1
濃縮係数 f_c		1	1
呼吸率	m^3/h	1.2	0.12
空気 C_{dust}	g/m^3	$1.00\text{E}-03$	$1.00\text{E}-04$
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0	1 注 0として計算
シナリオ中の減衰期間 t_2	d	0	0
実効線量係数 h_{inh}	$\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	$5\mu\text{m}$ 、操作者	0-1y

(3) 経口摂取のパラメータ

2つの経口摂取シナリオは、以下のパラメータが使用された

R-ING-A：操作者は解放された建物の割ぐりを不注意に $20\text{g}/\text{y}$ 経口摂取すると想定する。作業者は、常に、最近解放された物質を扱うので、シナリオ前とシナリオ中では減衰は想定されない。

R-ING-B：経口摂取量は、希釈、濃縮過程がなく、 $100\text{g}/\text{y}$ と想定される。子供が遊び、滞在する場所の物質の交換は不可能で、シナリオの1日目の減衰とシナリオ実施中の1年間が想定される。経口摂取線量係数は年齢グループ1-2yでBSS³⁾から引用される。

表7. コンクリート 経口摂取シナリオに対するシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ R-ING-A	シナリオ R-ING-B
年間摂取量 q	g/y	20	100
希釈係数 f_d		1	1
濃縮係数 f_c		1	1
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0	1
シナリオ中の減衰期間 t_2	d	0	365
実効線量係数 h_{inh}	$\mu\text{Sv/Bq}$	作業者	1-2y

(4) 皮膚汚染シナリオのパラメータ

皮膚汚染シナリオには、以下のパラメータが使用される。

R-SKIN：年間の全作業（1800h/y）に、前腕と両手が $100\mu\text{m}$ （0.01cm）の厚さの粉塵の層で覆われると想定する。粉塵は解放された物質と同じ放射線濃度をもつとされる。皮膚上の物質はいつも新しく、シナリオ実施前と実施中は、減衰は想定しない。皮膚に付着した粉塵の密度は、 1.5g/cm^3 と設定される。実効線量を算出するため [KOC87]⁴⁾からの線量係数は皮膚荷重係数 0.01 を掛けなければならない。希釈と濃縮は想定されず、このシナリオは希釈と濃縮が、基準値以下だが、解放された物質の過程中的異なる段階で起こるシナリオを含む。

表 8 コンクリート 皮膚汚染シナリオに対するシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ R-SKIN
被ばく時間 t_e	h/y	1800
皮膚表面上の粉塵の厚み L_{dust}	cm	0.01
粉塵の密度 ρ	g/cm^3	1.5
希釈係数 f_d		1
濃縮係数 f_c		1
皮膚荷重係数 W_{skin}		0.01
体表面率 f_{skin}		0.1 (eq. ca. 2000cm^2)
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0
シナリオ実施期間の減衰期間 t_2	d	0
実効線量係数 h_{skin}	$(\mu\text{Sv/h}) / (\text{Bq/cm}^2)$	放射性核種に依存する

4. 全ての物質

全ての物質の一般的なクリアランスレベルの導出を考察する。全ての物質とは、金属、コンクリート、土壌、プラスチック、木材と紙を含む固形状物質の範囲を網羅する。有機土壌と影響を受けない汚染土壌は含まれていない。

極低レベルに汚染された土壌は、庭園の表土として直接使用され、従って菜園で育つ食材は、解放された土壌で育つ。解放された廃棄物を含む再開発埋立地の場合と比較し、放射性核種の摂取量は、約 2~100 倍となる。同様にして、農業作業者の労働時間の一部を解放された土壌上

で費やす。その他の土壌と堆肥との混合を考慮すると2倍に希釈されると想定するのが適切である。

木材やプラスチック、紙のような物質は、焼却され、これは焼却炉の作業者と煙から一般公衆への被ばくを導く。しかしながら、これらの状況の多くは金属の再利用の検討で考えられる熔融シナリオに含まれる。木材のような汚染物質は更に囲いや建設に使用される。

A) 全ての物質のシナリオとパラメータ

(1) 外部被ばく

全ての物質外部被ばく経路は、以下の2つのシナリオで表示されうる。

A-EXT-A：庭師は、解放された土壌でフルタイム(1800/y)働いているとする。堆肥や他の土壌との希釈係数を2とする。シナリオ実施の1日前の減衰は(クリアランス場所と表土交換の間の輸送時間)、いったん定着すると、土壌は最近解放された物質に交換不可能なので、シナリオ実施中の減衰時間と共に考察される。廃棄物中に均一に拡がった線源で、安全則にたった密度 1.5g/cm^3 が線量計算に使用される。地上1mの高さを被ばくジオメトリとした場合の線量が算出される。このシナリオは、庭師が1年間に従事する全領域を含む十分な解放された土壌があると想定するので、かなり安全則に立っている。

A-EXT-B：解放された物質から作られた部屋や囲い、例えば、木製の小屋またはビニールテントの中で人が過ごす想定する。被ばく時間は、3000h/yとする。被ばくジオメトリには、 $3\times 4\text{m}^2$ 、高さ2.5mで、壁と天井の厚さ2cmの部屋を選択した。部屋の中央で、高さが1mの回転ジオメトリに対して線量が算出された。天井や2つの壁($4\times 2.5\text{m}^2$)からの影響が加算される。シナリオ開始100日前とシナリオ実施年間中の減衰が想定される。

表9. 全ての物質 外部被ばくシナリオにおけるシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ A-EXT-A	シナリオ A-EXT-B
被ばく時間 t_e	h/y	1800	3000
希釈係数 f_d		0.5	1
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	1	100
シナリオ実施期間の減衰期間 t_2	d	365	365
物質の密度	g/cm^3	1.5	1.5
ジオメトリ		地上1m、半無限量	天井、2つの壁、 $3\times 4\text{m}^2$ 、高さ2.5m、2cmの壁の厚み
実効線量係数 h_{ext}	$(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/g})$	放射性核種とジオメトリによる	

(2) 全ての物質吸入シナリオパラメータ

吸入経路は、以下の2つのシナリオで表示されうる。

A-INH-A：この作業場所のシナリオでは、空気中の 1mg/m^3 の粉塵濃度と $1.2\text{m}^3/\text{h}$ (中程度の活動として)の呼吸率が想定される。線量係数として $5\mu\text{mAMAD}$ 値が³、BSS³⁾

から引用された。シナリオ開始前と実施中は、常に、最近解放された物質からのみ発生するので減衰は想定しない。希釈と濃縮は想定されない。従ってこのシナリオは、希釈と濃縮が、解放された物質処理過程中の各段階で起こるその他のシナリオを含む。

A-INH-B: このシナリオでは、乳児が1年間(8760時間)に解放された物質(例: 土壌)から発生する粉塵の10%を吸入すると想定する。空気中の粉塵濃度は $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ で、呼吸率は $0.12\text{m}^3/\text{h}$ に設定される。線量係数は、規定値肺の保持クラスと年齢0-1歳のグループのものは、BSS³⁾から引用する。シナリオ実施前と実施中は、粉塵が常に、最近解放された物質からのみ発生するので減衰は想定しない。

表 10. 全ての物質 吸入シナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ A-INH-A	シナリオ A-INH-B
被ばく時間 t_e	h/y	1800	8760
希釈係数 f_d		1	0.1
濃縮係数 f_c		1	1
呼吸率 V	m^3/h	1.2	0.12
空気中の粉塵濃度 C_{dust}	g/m^3	$1.00\text{E}-03$	$1.00\text{E}-04$
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0	0
シナリオ中の減衰期間 t_2	d	0	0
実効線量係数 h_{inh}	$\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	$5\mu\text{m}$ 、作業員、	0-1y

(3) 全ての物質経口摂取シナリオのパラメータ

経口摂取経路は以下の2つのシナリオで表示される。

A-ING-A: 作業員は解放された物質を不注意に $20\text{g}/\text{y}$ 経口摂取するとする。作業員は、常に最近解放された物質を扱うので、シナリオ前と実施中では減衰は想定しない。

A-ING-B: 経口摂取量は、希釈と濃縮過程はなく、 $100\text{g}/\text{y}$ と想定される。子供が遊び、滞在する場所の土壌は交換不可能なので、シナリオの1日目の減衰とシナリオ実施の1年間が想定される。経口摂取線量係数は年齢グループ1-2yでBSS³⁾から引用される。

庭師は、年間作業時間、不注意に $20\text{g}/\text{y}$ の物質を経口摂取する(シナリオA-ING-A)一方で、子供の経口摂取の値、 $100\text{g}/\text{y}$ は、希釈と濃縮過程に関わる、その他の経口摂取経路(水の経路、野菜の消費など)を含むように選択されてきた。

表 11. 経口摂取シナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ A-ING-A	シナリオ A-ING-B
年間経口摂取量 q	g/y	20	100

希釈係数 f_d		1	1
濃縮係数 f_c		1	1
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0	1
シナリオ中の減衰期間 t_2	d	0	365
実効線量係数 h_{inh}	$\mu\text{ Sv/Bq}$	作業者	1-2y

(4) 全ての物質皮膚汚染シナリオのパラメータ

皮膚汚染シナリオには、以下のパラメータが使用される。

A-SKIN：年間の全作業（1800h/y）に、前腕と両手が厚さ $100\mu\text{m}$ （0.01cm）の粉塵の層で覆われると想定する。粉塵は解放された物質と同じ放射性同位元素の濃度とされる。皮膚上の物質はいつも新しく、シナリオ実施前と実施中は、減衰は想定しない。皮膚上の粉塵密度は 1.5g/cm^3 と設定される。実効線量を算出するため[KOC87]⁴⁾からの線量係数に皮膚荷重係数0.01を掛けなければならない。希釈と濃縮は想定されず、このシナリオは、希釈と濃縮が解放された物質の過程中の各段階で起こるシナリオを含む。

表 12. 全物質の皮膚汚染シナリオのシナリオパラメータ

パラメータ	単位	シナリオ A-SKIN
被ばく時間 t_e	h/y	1800
皮膚表面上の粉塵の厚み L_{dust}	cm	0.01
粉塵の密度 ρ	g/cm^3	1.5
希釈係数 f_d		1
濃縮係数 f_c		1
皮膚荷重係数 w_{skin}		0.01
体表面率 f_{skin}		0.1 (eq. ca. 2,000 cm^2)
シナリオ前の減衰期間 t_1	d	0
シナリオ実施期間の減衰期間 t_2	d	0
実効線量係数 h_{skin}	$(\mu\text{ Sv/h}) / (\text{Bq/cm}^2)$	放射性核種に依存する

5. 計算に使用した線量係数

表 13. 金属 線量係数 単位： $(\mu\text{ Sv/h}) / (\text{Bq/g})$

表 14. コンクリート 線量係数 単位： $(\mu\text{ Sv/h}) / (\text{Bq/g})$

表 15. 全ての物質 線量係数 単位： $(\mu\text{ Sv/h}) / (\text{Bq/g})$

D. 結果

1. 金属クリアランスレベル計算結果

シナリオ毎に比較した実効線量は M-EXT-A と M-EXT-B が他のシナリオに比べて高く、最大値線量では M-EXT-B が多かった。低エネルギーの β 線を放出する核種の H-3、C-14 と低エネルギー γ 線を放出する核種 I-125 では経口摂取の M-ING-B が多かった。また高エネルギー β 線放出する核種では皮膚 M-SKIN が多かった。核種で比較した場合、線量係数の高い O-15、F-18、Fe-59、Co-60、Mo-99、In-111、Sn-117m、I-131、Au-198 は外部被ばくが高値であった。

次に、IAEA Draft Annex の算出値(表 17)と計算結果を比較し、両者の比を表 18 に示した。大きな違いは Tc-99m の EXT-C であった。この場合、実効線量は極めて微小であるため誤差が生じたと考える。Tc-99m の EXT-C はゼロとしても差し支えない値である。RP-122 の報告では、極めて微小な Mo-99、In-111、I-123、SM-153、Au-198、Tl-201 等の実効線量をゼロとしている。皮膚 M-SKIN では、比率が 1.5 の値が存在している。実効線量計算結果表の右列に示してある RP-122 の報告値と比較すると同程度の違いが見られた。

クリアランスレベルを比較すると、0.1Bq/g から 1000Bq/g が得られた。これは IAEA Draft Annex のクリアランスレベルと一致した値が得られた。ただし、Rb-81 は外部被ばく線量係数が示されていないため除外した。

表 16. 金属実効線量計算結果 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

図 1. 金属 実効線量計算結果のグラフ Co-60 の表示は除外

表 17. IAEA の計算値 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

表 18. IAEA 計算との比較

2. コンクリートクリアランスレベル算出結果

金属の実効線量計算結果(表 19)と異なるシナリオの M-EXT-C と R-EXT-C 以外は全く一致していた。これは、他が全て同じ線量係数とパラメータが利用されているため一致していた。R-EXT-B と R-EXT-C を比較すると全ての核種で R-EXT-C の実効線量が低くなっていた。すなわち R-EXT-C は半減期に依存していることが分る。

次に、IAEA Draft Annex の算出値(表 20)と計算結果を比較し、両者の値の比を表 21 に示した。両者の差異は金属の結果で述べたと同様であった。

クリアランスレベルを比較すると、0.1Bq/g から 1000Bq/g が得られた。これは IAEA のクリアランスレベルと一致した。

表 19. コンクリート 実効線量計算結果 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

図 2. コンクリート 実効線量計算結果のグラフ Co-60 の表示は除外

表 20. コンクリート IAEA の計算結果 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

表 21. コンクリート IAEA の結果との比較

3. 全ての固体状物質のクリアランスレベル算出結果

実効線量計算結果(表 22)でシナリオからの A-EXT-A(庭に開放された場合の作業員)は A-EXT-B(開放された物質で作られた部屋に住んでいる人)より高い実効線量であった。高い核種は Fe-59、Co-57、Sn-113 で半減期の長さに依存していることが分る。実効線量で金属と比較した場合に Fe-59 の A-EXT-A と M-EXT-A はほぼ同じ値であるが、半減期の長い Co-60 では高く、半減期の短い O-15、F-18、Tc-99m、In-111、I-123、I-131、Au-198、Tl-201 では小さかった。クリアランスレベルも半減期に依存した傾向となっていた。これは全ての固体状物質の外部被ばくは庭に開放された場合の作業員と開放された物質で作られた部屋に住んでいる人を想定している。そのため、開放されてから人体が被ばくをうけるまでの時間、つまりシナリオ前の減衰期間は庭に開放される前は 1 日、開放された物質で部屋が作られるまでは 100 日を想定しているため短半減核種の影響が低いと考えられる。

最大の実効線量を与えるシナリオで核種 Tc-99m と I-123 で RP-122 が求まっているがこれは R-SKIN と同じレベルの値であるから、R-SKIN と考えてもよい。

IAEA Draft Annex のクリアランス値と比較した結果、全て一致した値が得られた。

表 22. 全ての固体状物質の実効線量計算結果 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

図 3. 全ての物質 実効線量計算結果のグラフ Co-60 の表示は除外

表 23. 全ての固体状物質 IAEA Draft Annex の結果 単位: (μ Sv/y)/(Bq/g)

表 24. 全ての固体状物質 IAEA Draft Annex の結果との比較

E. 考察

IAEA Draft Annex の計算で外部被ばく線量計算用のシナリオ EXT-A で使われている金属、コンクリート、全ての物質の線量係数は地表から 1m、半無限線源とした同じ値が用いられている。そのため計算した金属とコンクリートの実効線量は同じような傾向を示した。使用されている物質密度コンクリートでは 2g/cm^3 、土壌 1.5g/cm^3 、鉄 7.6g/cm^3 と定義されているが、この値は計算に直接使われていない。ただし、地表から 1m、半無限線源からの線量係数の算出には、金属とコンクリートでは 2g/cm^3 の密度が、全ての物質ではこの土壌密度 1.5g/cm^3 が吸収係数として使われている。また、コンクリートの建物内の線量係数算出に 2g/cm^3 の密度が使われている。

表 25. の金属、コンクリート、全ての物質のクリアランス比較表から金属とコンクリートのクリアランス値は全て一致した。全ての物質のクリアランスは半減期に最も依存していて、長半減期でクリアランス値は小さく、短半減期で大きい。Ga-67 は本研究会で算出した金属とコンクリートの外部被ばくでは 10 Bq/g が得られたが全ての物質では最大シナリオが経口摂取 A-ING-A で 1000 Bq/g と高い。そこで Ga-67 は安全側を考えて金属とコンクリートの外部被ばく 10 Bq/g を採用したほうが適切である。

免除レベルについては、本研究会による平成 14 年度報告参考資料 1 IAEA BSS No.115、参考資料 2 Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 に述べられている。医療放射性核種の免除レベルについて、同報告 「医療における放射線の利用状況調査」で参考になっている NRPB (英国放射線防護庁)-R306 Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not include in the European Basic Safety Standards Directive⁵⁾ の Table A から抜粋した数値を表 25. の右欄に示した。同表に各シナリオのクリアランス最小値と免除レベルとの比を示した。クリアランスレベルが免除レベルより高い値を示した核種は Rb-81、Sn-117m であった。核種 Rb-81 と Sn-117m については IAEA Draft Annex で外部被ばく値は計算されていないため吸入被ばくの高い数値によりクリアランスレベルの方が高くなったと考える。クリアランスレベルが免除レベルの 1/10 の核種は P-32、Ga-67、Y-90、Tc-99m、I-123、Sm-153、Tl-201 であった。同じく 1/100 の核種は C-14、F-18、Cr-51、Fe-59、Co-57、Sr-89、Mo-99、In-111、I-125、I-131、Au-198 であった。同じく 1/1000 の核種は H-3、O-15、Co-60、Tc-99、Sn-113 であった。以上よりクリアランスレベルは免除レベルの 1/10 から 1/1000 である。半減期が長く実効線量率も高い Co-60 の免除レベルが 10 Bq/g であることから NRPB の報告を調べると 1Bq/g の免除レベルとされている核種は Cf-254、Pu-239 が見られる。すなわち医療で使われている免除レベルの最小値は 10Bq/g でこれより高い数値であると考えて良い。

IAEA Draft Annex の金属とコンクリートシナリオでは、原子力施設や規制を受けた施設から排出される金属とコンクリートの再利用や処分について述べられている。全ての物質は、その他固体状物質であり、医療から排出される固体状廃棄物に近いと考える。この IAEA の報告では短半減核種については考察を加えていないが、同じ IAEA の報告 TECDOC1000 で短寿命も含めて、全核種を同じシナリオで計算したと述べられている。これまで、単一核種について述べたが、複数の放射性核種が含まれる場合には、各々の割合から求める。IAEA Draft Annex では次のように定義をしている。

<放射性核種混合物の考察>

放射性核種混合物が、クリアランス基準を満たすかどうか、決定するために、単純な比率式が使用される。それは以下の通り：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{Li}} \leq 1$$

C_i = 廃棄物中の放射性核種の濃度 Bq/g ; C_{Li} = 物質中の放射性核種の年間放射線量 Bq/y または混合物中の核種の放射性同位元素濃度 Bq/g のクリアランスレベル; n=混合物中の放射性核種の数

上記の表示では、クリアランスレベルに対する各放射性核種の濃度比が、混合液の全核種について合計されている。この合計が1以下なら、混合液の提示された濃度は基準を満たすものとして見なされる。このような核種混合物からクリアランスを求める方法は、空气中濃度および排水中濃度を規制する等で用いられている。

実際に医療用固体状廃棄物のクリアランスを考えると短半減期核種を無視することはできない。各シナリオで輸送中の実効線量が高いことから、直接身体の近くで放射性廃棄物運搬に従事する作業者のジオメトリも想定することも必要である。IAEA Draft Annex では吸入、経口、皮膚の実効線量について求めているが決定経路となる核種は少ない。

ここで作成したプログラムから IAEA Draft Annex で報告されているクリアランス計算値と同様な結果が得られたことで、本研究グループのジオメトリで作成した線量係数と医療廃棄物フロチャートに基づいたパラメータで計算する基本が揃ったと考える。

表 25. 金属、コンクリート、全ての物質のクリアランス比較と NRPB-R306 の免除レベル 単位 Bq/g (表 25 以外は、本報告の表参照)

F. 参考文献

- 1) IAEA: Draft Annex to Safety Guide Clearance Levels for Solid Materials 2000.1
- 2) European Commission: Practical Use of the Concepts of Clearance And Exemption- Part 1 Guidance on General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection 122, 2000
- 3) Council of The European Union: Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation, OJ no. L 159, 29. 6. 96, p. 1-114.
- 4) Kocher, D. C., Eckermann, K. F.: Electron Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure of the Skin from Uniformly Deposited Activity on the Body Surface, Health Physics, Vol. 53, No. 2, 1987, S. 135-141.
- 5) NRPB : Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not include in the European Basic Safety Standards Directive National Radiological Protection Board -1999

表25(山本報告)

Nuclide	T1/2(y)	金属 Bq/g		コンクリート Bq/g		全ての物質 Bq/g		*NRPB-R306 免除レベル Bq/g	クリアランス 最小値/免除 レベル	比率	コメント
		Max Scenario	クリアランス	Max Scenario	クリアランス	Max Scenario	クリアランス				
H-3	12	M-ING-B	1000	R-ING-B	1000	A-ING-B	1000	1000000	0.001		
C-14	5700	M-ING-B	100	R-ING-B	100	A-ING-B	100	10000	0.01		
O-15	3.9E-06	M-EXT-B	0.1	R-EXT-B	0.1	A-EXT-A	0	100	0.001		IAEAで未計算
F-18	0.0021	M-EXT-B	0.1	R-EXT-B	0.1	A-SKIN	100	10	0.01		
P-32	0.039	M-SKIN	100	R-SKIN	100	A-SKIN	100	1000	0.1		
CR-51	0.076	M-EXT-B	10	R-EXT-B	10	A-EXT-A	10	1000	0.01		
FE-59	0.12	M-EXT-B	0.1	R-EXT-B	0.1	A-EXT-A	0.1	10	0.01		
Co-57	0.74	M-EXT-A	10	R-EXT-A	10	A-EXT-B	1	100	0.01		
Co-60	5.3	M-EXT-C	0.1	R-EXT-B	0.1	A-EXT-A	0.01	10	0.001		
Ga-67	0.00893	M-EXT-A	10	R-EXT-A	10	A-ING-A	1000	100	0.1		IAEAで未計算
Rb-81	0.000523	M-ING-A	10000	R-ING-A	10000	A-ING-A	10000	10	1000		IAEAで未計算
Sr-89	0.14	M-ING-B	10	R-ING-B	10	A-ING-B	10	1000	0.01		
Y-90	0.0073	M-SKIN	100	R-SKIN	100	A-SKIN	100	1000	0.1		
Mo-99	0.0075	M-EXT-B	1	R-EXT-B	1	A-EXT-A	100	100	0.01		
Tc-99	210000	M-ING-B	10	R-ING-B	10	A-ING-B	10	10000	0.001		
Tc-99m	0.00069	M-EXT-B	10	R-EXT-B	10	RP-122	1000	100	0.1		
In-111	0.0077	M-EXT-A	1	R-EXT-A	1	A-EXT-A	10	100	0.01		
Sn-113	0.31	M-EXT-B	1	R-EXT-B	1	A-EXT-A	1	1000	0.001		
Sn-117m	0.03726	M-EXT-B	1000	R-EXT-B	1000	A-ING-B	1000	100	10		IAEAで未計算
I-123	0.0015	M-EXT-B	10	R-EXT-B	10	RP-122	1000	100	0.1		
I-125	0.17	M-ING-B	10	R-ING-B	10	A-ING-B	10	1000	0.01		
I-131	0.022	M-EXT-B	1	R-EXT-B	1	A-EXT-A	10	100	0.01		
SM-153	0.0053	M-EXT-A	10	R-EXT-A	10	A-SKIN	100	100	0.1		
Au-198	0.0074	M-EXT-B	1	R-EXT-B	1	A-EXT-A	10	100	0.01		
Tl-201	0.0083	M-EXT-A	10	R-EXT-A	10	A-EXT-A	100	100	0.1		

*NRPB-R306

Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not include
in the European Basic Safety Standards Directive

S F Mobbs and M P Harvey National Radiological Protection Board -1999

平成 15 年度厚生労働科学研究費補助金（医薬安全総合研究事業）

「医療行為に伴い排出される放射性廃棄物の適正管理に関する研究」

(WG1-4) 医療行為に伴う固体状放射性廃棄物のクリアランスレベル導入の検討

外部被ばく線量係数の算定

主任研究者	日下部きよ子	東京女子医科大学 放射線科
分担研究者	木下富士美	千葉県がんセンター 核医学診療部
	細野 眞	近畿大学 放射線科
研究協力者	<u>成田雄一郎</u>	<u>千葉県がんセンター 放射線治療部物理室</u> (報告者)
	池淵 秀治	社団法人日本アイソトープ協会
	岩永 哲雄	社団法人日本アイソトープ協会
	小野寺 敦	船橋市立医療センター 放射線科
	金谷 信一	東京女子医科大学 放射線科
	金谷 和子	東京女子医科大学 放射線科
	草間 経二	社団法人日本アイソトープ協会
	清水 透	三協興産株式会社
	渡辺 浩	横浜労災病院
	並木 宣雄	日本メジフィジックス株式会社
	新尾 泰男	帝京大学市原病院 中央放射線部
	柳沢 正道	千葉県循環器センター 放射線科
	山本 哲夫	柏戸記念財団 情報管理指導役
	堀越亜希子	日本メジフィジックス株式会社
	藤村 洋子	日本メジフィジックス株式会社
	濱田 達二	社団法人日本アイソトープ協会

研究要旨

我が国において医療放射性廃棄物に対するクリアランスレベルを導入するにあたり、クリアランスレベル算出に必要な比放射能当たりの年間実効線量（線量係数）のうち、外部被ばくに関する線量係数を我が国の放射性廃棄物の廃棄経路を考慮して算出した。線量係数の算出式は、簡便なモンテカルロ法と point-kernel 法を融合した方法で行った。本方法論の評価は IAEA が発表した「固体状放射性物質のクリアランス」で用いた評価体系（以下、ジオメトリ）と同様の計算を行い、結果を比較した。

A. 研究目的

IAEA が 2000 年に医療放射性廃棄物に対する安全ガイドの草案として「固体状放射性物質のクリアランス」を公表した。この安全ガイドを我が国に導入するにあたり、医療放射性廃棄物の廃棄後の経路を検討し、廃棄物からの被ばくを受ける可能性のある全てのシナリオを見直しクリアランスレベルを算出する必要がある。クリアランスレベル算出には比放射能当たりの年間実効線量：線量係数を合理的に導出していなければならないが、特に外部

被ばくに関わる線量係数は、シナリオにおける放射性廃棄物の形状、廃棄物と評価対象者との位置関係などのジオメトリに大きく依存する。

本研究では、IAEAの安全ガイドで示されている一般的なシナリオ（包括シナリオ）で仮定しているジオメトリに対する外部被ばく線量係数を計算し、線量係数算出法を第一に評価した。また、より合理的なクリアランスレベル導出を目的としたシナリオ（個別シナリオ）に対し、国内の廃棄物処理業者等の施設調査で得たジオメトリをもとに放射性廃棄物輸送に関わる外部被ばく線量係数を、段ボールの積み下ろし、トラックによる段ボールの輸送の場合について導出することを目的とする。

B. 研究方法

1. 放射性廃棄物による外部照射の年間個人実効線量

外部照射からの線量は、以下の式により算出される。

$$H_{ext,C} = h_{ext} \cdot t_e \cdot f_d \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (1)$$

ここで、 $H_{ext,C}$ [(μSv/a)/(Bq/g)] 解放された物質中の単位放射能濃度当たりの外部照射からの年間個人実効線量

h_{ext} [(μSv/a)/(Bq/g)] (外部照射線量係数) ジオメトリ、距離、遮へいに依存する、解放された物質中の単位放射能濃度当たりの平均実効線量

f_d 希釈係数

t_e [h/a] 被ばく時間

λ [1/a] 放射性核種の壊変定数

t_1 [a] シナリオ開始前の減衰時間

t_2 [a] シナリオ中の減衰時間

である。 h_{ext} は「外部照射線量係数」といい、シナリオのジオメトリ、評価点距離、遮へいおよび放射性核種に依存する。

2. 外部照射線量係数の算定式

外部照射による線量係数[(μSv/h)/(Bq/g)]の計算は、ジオメトリ及び評価点間距離、放射性核種（γ線および特性X線を対象とし、そのエネルギー及び放出割合）から導き出される。ジオメトリに関しては後述する。ただし、ジオメトリの構造体の無い空間は、空気と

仮定する。安全側の評価のためには、一切の散乱体および吸収体がない真空体であることが望まれるが、合理的考えのもとあえて空気と仮定する。しかし、評価体系中のジオメトリ以外は真空と仮定する。

ジオメトリの構造体が無い場合の実効線量は

$$\text{実効線量} = \sum_i \{ (\text{評価点での光子 } i \text{ のフルエンス}) \times (\text{空気カマ換算係数}) \times (\text{実効線量換算係数}) \} \quad (2)$$

により計算する。ここで i は、光子エネルギーの種類である。

ジオメトリの構造体がある場合の実効線量は、ジオメトリ内での光子の減衰および散乱線に対するビルドアップ効果を考慮する。つまり、

$$\text{実効線量} = \sum_i \{ (\text{遮へいの無いフルエンス}) \times (\text{透過率}) \times (\text{ビルドアップ係数}) \times (\text{空気カマ換算係数}) \times (\text{実効線量換算係数}) \} \quad (3)$$

として計算する。

点線源に対する線量係数 h_{ext}^p は、(3)を基本として次式で記述される。

$$h_{ext}^p = \sum_i \left\{ \frac{1 \cdot (P_i/100) \cdot 3600}{4\pi \cdot r_G^2} \cdot e^{-mfp_i} \cdot B(mfp_i) \cdot f_i \cdot g_i \right\} \cdot 10^6 \quad (4)$$

ここで、 h_{ext}^p $[(\mu\text{Sv/h})/\text{Bq}]$ 点線源に対する外部照射線量係数

P_i $[\%]$ 光子 i の放出率

mfp_i $[-]$ 光子 i の平均自由行程：遮へい体物質の線減弱係数 (μ) と光子通過遮へい体厚 (d) の積。 $mfp = \mu \cdot d = (\mu/\rho) \cdot \rho \cdot d$ 。ここで (μ/ρ) は質量減弱係数、 ρ は物質密度である。

$B(mfp_i)$ $[-]$ Berger のビルドアップ係数、平均自由行程の関数

f_i $[\text{pGy} \cdot \text{cm}^2]$ 単位フルエンス当たり空気カマに対する換算係数 (ICRP Pub. 74 Table A. 1.)

g_i $[\text{Sv/Gy}]$ 自由空气中単位空気カマ当たりの実効線量換算係数 (ICRP Pub. 74 Table A. 17.)

r_G $[\text{cm}]$ 線源-評価点間距離

点線源に対するエネルギー E_i (MeV) の光子 (X線) に対するフルエンス

ジオメトリを考慮する場合には、ジオメトリ全体が線源となるため、その線量係数 (h_{ext}) は