

Cs-137 から生ずるガンマ線に対する各種建築材料の遮蔽データベース

名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻

丸山研究室修士1年

別府克俊

指導・監修 丸山一平 准教授

1. 福島事故と建築物と放射線	3
1.1. はじめに	3
1.2. 原発事故対処における背景	3
1.3. 放射能汚染を受けた状況での建築材料的見地における遮蔽評価の必要性.....	4
(1) 除染処理の合理性の判断	4
(2) 汚染された材料の再利用	4
(3) 建築物の自己遮蔽効果とデータベース.....	4
2. ガンマ線源と物質の相互作用	5
2.1. セシウムと主な放射性核種	5
2.2. ガンマ線	5
2.3. ガンマ線の減衰	5
(1) コリメートされたガンマ線	5
(2) 等方散乱のガンマ線	6
3. ガンマ線の遮蔽に関する予測手法について.....	8
3.1. 詳細計算法	8
(1) ボルツマン輸送方程式	8
(2) モンテカルロ法	8
3.2. 簡易計算法と点減衰核法	8
3.3. 評価線量	9
(1) 等価線量	9
(2) 実効線量	9
4. 建材の密度、化学組成、モンテカルロ計算による遮蔽計算.....	11
4.1. 実効線量透過率	11
4.2. 解析手法	12
(1) PHITS における Cs-137 の定義.....	12
(2) 減衰係数	12
(3) 実効線量透過率	13
4.3. データベース	14
5. データベースの活用方法	20
6. まとめ	23

1. 福島事故と建築物と放射線

1.1. はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心に東北から関東圏域などに及ぶ広域な放射性物質汚染が生じた。今回の事故の結果生じた放射能汚染は、目に見えない放射性物質が広範囲を汚染し、長期に渡る事故となった。これは、公的機関と学識経験者があらかじめ予測をしていた地理的、時間的規模を超えたものとなっている。特に放射能は目に見えず、微量の放射能の場合にはその影響もすぐに顕在化するわけでもなく、また、その影響に関する定量的評価は学術的にもまだ定まっていないこともあり、放射能に関わる理解の促進が求められることとなっている。建築分野においては、建築学会材料施工委員会を中心として、「都市・建築・材料に関わる放射能汚染の現状とその対応に関する報告書」をとりまとめた。本報告書は、その流れをくむものであり、微量ながら残留する放射能を考慮して、建築が放射線を遮蔽する能力を評価し、健康に及ぼす影響を定量的に、かつ、簡易に評価できることが求められている中で、各種建材の放射線遮蔽能力についてとりまとめたものである。

1.2. 原発事故対処における背景

放射能汚染は東日本一帯に広く広がった。その定量的情報は文部科学省の航空機モニタリングの結果により理解できる¹⁾。また、その汚染の状況は日本原子力研究開発機構により実施された除染モデル実証事業によっても確認できる²⁾。ここで得られた知見を下記にとりまとめる。

- ・航空機モニタリングでごく低レベルとなっても、事故後の放射性物質の漏洩シミュレーションによると、東日本一帯は程度の違いこそあれ、放射能汚染があると考えられる。
- ・放射能汚染は、可溶性の放射性セシウム（Cs-137 および Cs-134）としてもたらされ、放射性セシウムを吸着する物質により現在も環境に多くが捕捉されている。
- ・環境中の放射性セシウムは主には土壌中の特定の粘土鉱物と植物の中に存在する。ゆえに粘土がたまっている樋の下部や周辺、および側溝には放射性セシウムが濃縮している可能性がある。一般に、道路路面よりは周辺の植生部分で汚染度が高い。
- ・人間活動以外にも、降雨による土壌の移動、生物による土壌の擾乱などにより、現在も放射性セシウムは移動濃縮を起こしている。
- ・人間活動では、除染、下水、廃棄物処分(特に剪定枝などの草木類の焼却)により、放射性セシウムは濃縮している。
- ・既存建築物への汚染は、放射性セシウムが吸着しにくい塗料・外装材ではすでに洗い流されているが、コンクリート表面、舗装表面、骨材(もしくは採石山)表面など、非常に小さい空隙を有し、吸着しやすい材料を有した建材中には、現在も残存している。なお、内部への浸透は限定的と考えられる。

以上の放射能汚染状況の事実を受け入れると、建築に関わるすべての建築物と建築材料について放射能汚染を疑うことが必要となることがわかる。

¹ <http://ramap.jaea.go.jp/map/> (2012年11月24日確認)

² <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siry02012/siry012/siry01-2.pdf> 及び

http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyooanzen/d-model_report/app_1.pdf (2012年11月24日確認)

1.3. 放射能汚染を受けた状況での建築材料的見地における遮蔽評価の必要性

(1) 除染処理の合理性の判断

建築物や建築材料の汚染レベルが分かった場合には、除染（例えばウォータージェットによる汚染部除去、汚染濃度が高い骨材の細粒部分の除去）や遮蔽（例えば駐車場の天地返し）といった作業が行われる。その際には、原発から放出された放射性セシウムがエアロゾルとして拡散し、主に降雨により地上にもたらされた過程と各種素材表面へ固定化されている状況を考慮し、合理的な除染、及び遮蔽を行う必要がある。そして除染の結果、汚染レベルが許容できると判断された建築物や建築材料については、利用継続や再利用について検討されることになる。

(2) 汚染された材料の再利用

原子力発電所内部では、放射能汚染の有無、汚染レベルの程度を判断し、許容できる汚染材料を再利用する制度が存在する。例えばある明らかに放射能で汚染されていないと考えられるコンクリートは、N.R. (Not Radiated) と区別され、自由に原子力発電所施設の外部でも再利用される。また、放射線遮蔽に用いられるコンクリートについては、放射化したり、汚染したりしたコンクリートの再利用のシナリオが考えられる。現状では 100Bq/kg 未満の放射性物質含有量であれば問題は無いと判断され、今回の福島第一原子力発電所の事故により汚染された材料に対してもこの基準が適用される。しかし住居などの滞在時間が長い建築物にも汚染建材が利用されるとすると、何らかの放射能汚染の可能性が考えられ、放射能による被曝のリスク評価が必要であると考えられる。ゆえに放射能含有量としての 100Bq/kg だから安全というのではなく、社会的に合意できる数字、0.01mSv/y（無視しえるレベル）や 1mSv/y（公衆被ばくの線量限度）を基準としたリスク評価が安全性評価の原則となる³⁾。

以上の事から、同じ放射能濃度でも使用方法により被曝リスクは異なるため、汚染材料が建材に再利用された場合の被曝評価手法が整備される必要がある。

(3) 建築物の自己遮蔽効果とデータベース

建築物には遮蔽性能が求められることもあり、標準的なコンクリートであれば、厚さ 15cm でおおよそ 90%の Cs-137 からのガンマ線を遮蔽できる。厚さを 2 倍の 30cm にすれば、99%の遮蔽効果を持つ。Cs-137 のガンマ線に対する遮蔽効果は遮蔽物の密度に単純に比例すると考えて大きな誤りはない。密度 2.3g/cm³ のコンクリートに対し、密度 11.3g/cm³ の鉛は、約 5 倍弱の遮蔽性能を持つ。逆に言えば、1/5 の厚さで同等の遮蔽性能が得られる。しかし鉛を使ったからといって特に軽量になるわけではなく、遮蔽の効果を建築部材に求めるときには、荷重、強度について総合的に判断する必要がある。

コンクリートや鉛などの以前からガンマ線の遮蔽に用いられている材料については、病院などの医療設備に関する遮蔽も必要なこともあり、X 線等の放射線遮蔽に関する解析は十分行われており、遮蔽マニュアルとしてとりまとめられている。しかし、今回の事故を考えた場合に必要となる外装材、内装材断熱材、躯体などの各建材についての遮蔽性能については、十分な解析が行われていない。もし、これらの各建材の遮蔽性能がデータベースとしてとりまとめられた暁には、住宅に用いられた汚染材料の外壁内の位置に応じて、材料内部の放射能に対する被曝評価が可能となる。そのため、本報告書では、建築物に用いられる主要な建材については、遮蔽性能と密度のデータベースが作成することを試みた。

³ ICRP: 原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用, Publication 111、日本アイソトープ協会、(2012)

2. ガンマ線源と物質の相互作用

2.1. セシウムと主な放射性核種

放射性セシウムは、ガンマ線を発生させる放射性核種の代表種として考えられている。セシウムには複数の同位体が存在するが、地上に存在する安定同位体（放射能が無い）はCs-133のみであり、ウランの核分裂生成物としてCs-135、Cs-137が、原子炉内の反応によってCs-134が生成される。そしてこれらの放射性セシウムの中でも特に問題視されているのがCs-137、Cs-134であり、Cs-137はBa-137mと永続平衡(放射平衡)の関係にあることから、Ba-137mからの核異性体転移によって、662keVの強いガンマ線を空気中に放出する⁴⁾。また、Cs-134からは一回の崩壊で605keVと796keVのガンマ線が一個ずつ放出される⁵⁾。

以上の事からCs-137、Cs-134は、原子炉内部の物質が空気中に放出されたとき、I-131（ヨウ素131）、Sr-90（ストロンチウム90）、Pu（プルトニウム）と共に、人体への影響が非常に大きい放射性同位体の一つであると考えられている。しかし、福島第一原子力発電所事故ではチェルノブイリ原子力発電所事故のような全ての放射性物質が飛散するような大爆発は起きておらず、注意すべき放射性物質は、気体になりやすく体内に集積しやすいもの、つまりCs-137（30.07年）、Cs-134（2.06年）、I-131（8.02日）の3つであると考えられている。今、（ ）内は半減期を示しており、Cs-137の半減期は極端に長い⁶⁾。ゆえに今後、建築業界における放射能としては、半減期の長いCs-137の影響を重点的に評価すべきであると考えられる⁷⁾。そのため、3章以降の検討は、放射性セシウムを念頭において記載したものとなっているので、その点、留意されたい。

2.2. ガンマ線

ガンマ線とは放射線の一種であり、エネルギーが非常に高く、主に放射性核種の崩壊によって生成される。原子核は崩壊によって質量や陽子・中性子の比率を変化させ、その原子核に残存した過剰なエネルギーをガンマ線として放出することで、原子核は安定に向かう。この現象をガンマ崩壊と呼び、放出するガンマ線のエネルギー領域は核種によって様々であり、一般的には複数領域のガンマ線を放出する。また、ガンマ線は透過性質を持つため、アルファ線やベータ線のように紙やアルミニウム版などの軽い物質で遮蔽することはできず、密度の大きい鉛や厚い鉄板でしか遮蔽することができない。以上のことから、ガンマ線からの防護は他の放射線と比較して難しいと考えられている⁸⁾。

2.3. ガンマ線の減衰

(1) コリメートされたガンマ線

図2.1で示す厚さ t の物質を、入口と出口の中央の一部だけが開いた遮蔽体ではさんだ場合のガンマ線の挙動を考える。ガンマ線は途中の物質が無ければ入口に入ったものが出口から出る体系である。途中

⁴ Radioisotope Brief: Cesium-137, Centers for Disease Control and Prevention

<http://www.bt.cdc.gov/radiation/isotopes/cesium.asp>（更新日：2004.8.18）

⁵ 放射線と原子力発電所事故についてのできるだけ短くてわかりやすく正確な解説

<http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/housha/index.html>（2013年5月26日確認）

⁶ 原子炉内で生成される放射性物質の種類

http://enmt.umin.jp/public/earthquake/product_ri.pdf（2013年10月8日確認）

⁷ 東京電力(株), 福島第一原子力発電所事故 環境への影響 <http://www.jaero.or.jp/data/02topic/fukushima/effect/index.html>（2012年11月24日確認）

⁸ <http://www.rikuden.co.jp/genshiryoku/index.html>（更新日：2012, 2.10）、原子力情報、北陸電力

に入れた物質中で、一部のガンマ線は吸収され、一部のガンマ線は散乱を受け方向とエネルギーが変わり、入射したガンマ線の全てが出口に到達することはない。多数回の散乱を受けたのち出口に到達することはあっても、その時点でのエネルギーは入口に入った時のエネルギーとは異なる。出口で方向とエネルギーが変わらないガンマ線は、物質中で一度も散乱・衝突を受けないものである。

微小の厚さ dt の間を一度も衝突せずに通過する光子量の変化量は、その光子の数に比例して減少の方向に向かう。この際の比例係数が長さの次元を持つ線減衰（減弱）係数 μ である。

$$\frac{dI}{dt} = -\mu I$$

物質が均質な単一物質であれば、光子の数は次の指数関数式で表示できる。

$$I = I_0 \exp(-\mu t)$$

ここで、 I_0 は入口での光子の数である。多くの文献では、線減衰係数 μ を密度 ρ で割った質量減衰係数 μ/ρ が掲載されている。質量減衰係数の表示であれば、同じガンマ線エネルギーの場合、元素によらずほぼ同じ値のオーダーとなる。

また後述するビルドアップ係数を用いる際に必要となる平均自由行程（mean free path） λ は、ガンマ線が物質中で一度も衝突をせずに進む距離の平均値として定義され、線減衰係数の逆数に相当する。

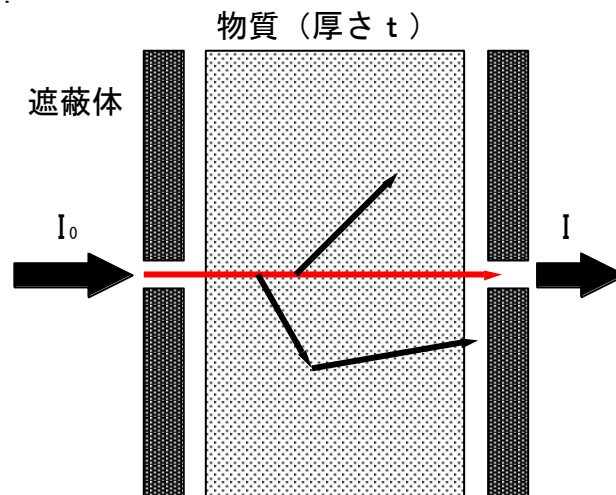


図 2.1 コリメートされたガンマ線

(2) 等方散乱のガンマ線

図 2.2 の左図(a)のように物質の前後に入口と出口のついた遮蔽体がなく、 4π 状に放射線が放出される場合には、直接線以外に物質内で散乱を繰り返したガンマ線も評価点に達することができる。この場合、ガンマ線のエネルギーは入射したときのエネルギーと異なる。点等方線源における評価点での積分された線量は、図 2.2 の右図(b)に示すように、一度も衝突せずに到達する非衝突ガンマ線と、散乱してエネルギーが変化したガンマ線の合算した積分量になる。同図(b)は、横軸がリニアスケールでの物質厚さ、縦軸が積分量に $4\pi^2$ を乗じたものを対数表示したものである。非衝突線による積分量は指数関数で表せることから、片対数プロット上で直線となる。散乱線を含めた全積分量は、非衝突線の積分量に比べて大きくなり、同じ物質の厚さでの全積分量を非衝突線の積分量で割ったものを「ビルドアップ係数」と

呼ぶ。積分量としては、各種の線量（レントゲンの単位で示される照射線量、空気のエネルギー吸収線量、空気カーマ、吸収線量、実効線量、周辺線量当量）の他に粒子の数（線束）がある。これらに対応して、各々ビルドアップ係数が存在する⁹⁾。

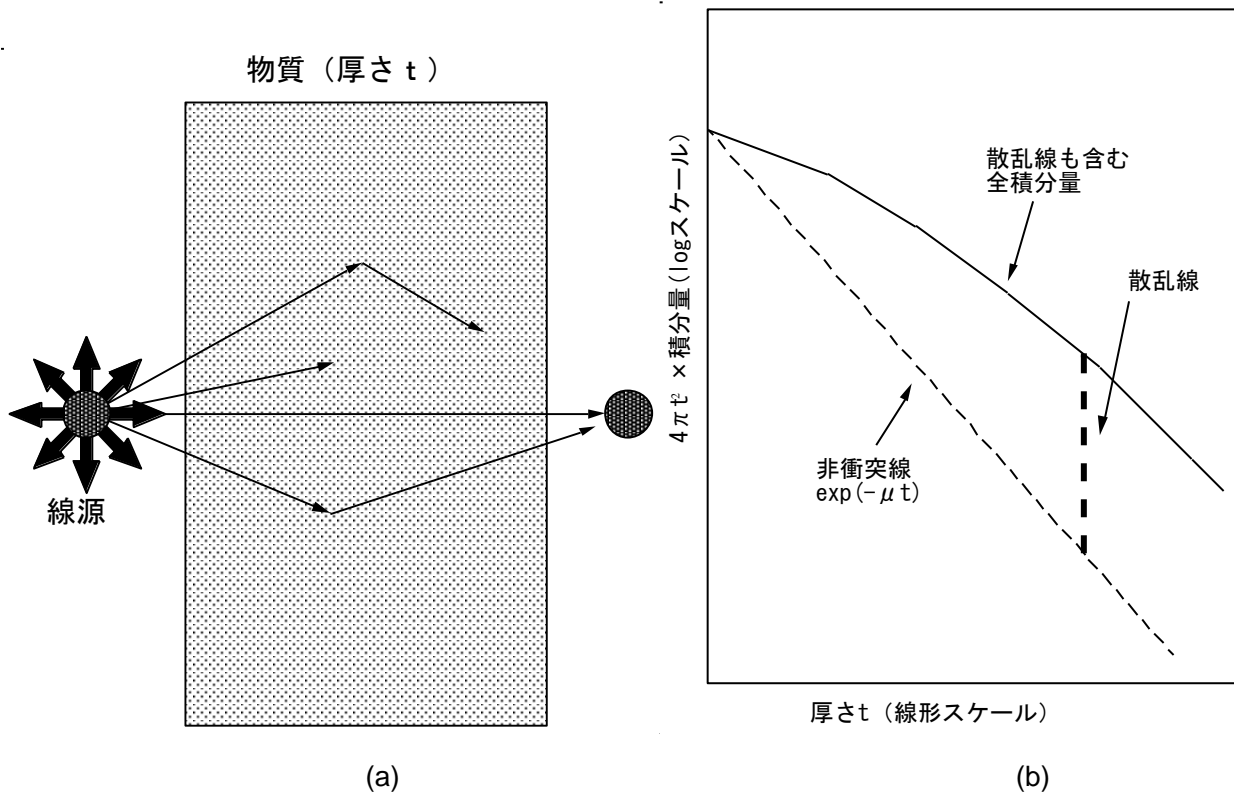


図 2.2 等方散乱のガンマ線

⁹⁾ 原子力教科書「放射線遮蔽」、小佐古敏荘、笹本宣雄

3. ガンマ線の遮蔽に関する予測手法について

3.1. 詳細計算法

放射線と物質との相互作用および輸送現象にかかる全ての物理過程を正確に取り扱う事の出来る計算法を詳細計算法と呼び、詳細計算法に属する遮蔽計算法には、ボルツマン輸送方程式を数値解法によって解く離散座標 S_N 法、直接積分法、モンテカルロ法、モーメント法、球面調和関数法などがある。本報告書ではモンテカルロ法を用いて解析を行ったため、モンテカルロ法に関する説明のみ行う。

(1) ボルツマン輸送方程式

ボルツマン輸送方程式とは、放射線のエネルギー及び空間（位置、方向）に関する輸送現象を記述する方程式のことをいう。この方程式を解くということは、六次元位相空間（空間変数三次元、角度変数二次元、エネルギー一次元）における放射線束 $\Phi(r, \Omega, E)$ を算出することになる。通常、遮蔽計算では定常状態のみを取り扱うため、時間変数は位相空間に含めない。

輸送方程式は、エネルギー、空間、角度からなる位相空間における放射線の粒子バランスの関係から算出される。すなわち微小位相空間セル $dVd\Omega dE$ を考え、このセル内への粒子の流入及びセルからの流出のバランスをとることを意味する。

また、ボルツマン方程式はさらに微積分型方程式と積分型輸送方程式に分類されるが、モンテカルロ法で用いるのは積分型輸送方程式となる。

(2) モンテカルロ法

積分型輸送方程式を基本方程式として、衝突カーネル $C(r, \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E)$ と輸送カーネル $T(r' \rightarrow r, \Omega', E')$ を新たに導入すると、モンテカルロ法計算で使用される以下の方程式が導出される。

$$X(r, \Omega, E) = S(r, \Omega, E) + \int C(r, \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E) \cdot T(r' \rightarrow r, \Omega', E') \cdot X(r', \Omega', E') d\Omega' dr' dE'$$

ここで $X(r, \Omega, E)$ 、 $S(r, \Omega, E)$ はそれぞれ放射線粒子密度と放射線源である。モンテカルロ法を用いたこの方程式の解法は次の4ステップにより行われる。

- ①線源条件により線源粒子を発生させる。
- ②輸送カーネルにより、次の衝突点の粒子の空間位置を計算する。
- ③衝突カーネルにより、衝突後の粒子のエネルギーと飛行方向を計算する。
- ④得られた物理量 $X(r, \Omega)$ から放射線束を算出する。

以上のステップにより、モンテカルロ法ではコード内で発生させた乱数列を用いて確率分布に従って線源から放射線を発生し、輸送カーネルおよび衝突カーネルの計算を行う。

3.2. 簡易計算法と点減衰核法

簡易計算法はガンマ線用と中性子用とで別々の手法が開発され、それぞれ独自の開発の途をたどってきた。ガンマ線用計算法である点減衰核法は、詳細計算法で評価した遮蔽パラメータを組み込むことにより、近似解法ながら高精度の解が得られる手法となる。

点減衰核法とは、点減衰核を用いて非散乱線を計算し、それにビルドアップ係数を乗ずることにより、評価点におけるガンマ線線量を評価する方法のことをいう。ここで点減衰核とは点状線源からの非散乱ガンマ線の減衰を記述する式であり、距離の逆2乗則による項と指数関数減衰による項の積として以下の式で与えられる。

$$\Phi(r) = \frac{S}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\mu r)$$

通常、線源(S)項はエネルギー(E)および位置(r)の関数として与えられる。そこで評価点におけるガンマ線線量 $D(r)$ は、式(3.2)により、点減衰核にビルドアップ係数 $B(E, r)$ と線量換算係数 $R(E)$ を乗じたものをエネルギー及び空間に関して積分して計算することができる。

$$D(r) = \int_0^\infty dE \int_0^\infty dr' \frac{S(r', E) \cdot R(E) \cdot B(E, r')}{4\pi r'^2} \cdot \exp(-\mu r')$$

点減衰核法は点状線源を前提とした計算式であるので、この手法で体積線源問題を取り扱うためには、有限の体積線源を微小な堆積要素に分割し、それぞれの要素を点線源とみなして点減衰核法により評価点での線量を各々計算し、最後に全ての線源体積要素による線量を加え合わせることで、体積線源に対する評価点における線量としている。

本手法において必要な遮蔽パラメータは、線減衰係数 μ とビルドアップ係数 B である。 μ はあらゆる元素についてすでに十分な精度で評価がなされており、 B は詳細計算コードで評価した高精度データを適用できるので、式(3.2)はこれらのパラメータを用いれば高精度の解を算出することができる。

3.3. 評価線量

放射線が生体を与える生物学的影響を考えると、それぞれの放射線の特性により同一の吸収線量(エネルギー量)でも影響が異なる。このことから生物学的影響を共通の尺度で評価するために考案されたのが線量当量 H であり、単位はシーベルト(Sv)が使用される。線量当量 H は吸収線量 D に線質係数 Q を掛けることで求められ、線量当量には局所臓器を対象とする等価線量と、全身を対象とする実効線量がある¹⁰⁾。以下にこれらの説明を行う。

(1) 等価線量

等価線量 H_T は、国際放射線防護委員会(ICRP)の1990年勧告において組織の線量当量 H に代わるものとして新たに導入されたもので、各臓器への個々の生物学的影響をはかるために用いられる。つまり、 H が組織内の微小体積(大きさの指定は特でない)に対して定義されているのに対し、この H_T は人体の組織または臓器を対象としている。 R を放射線の種類、 w_R を放射線荷重係数とすると、等価線量は以下の式で示される¹¹⁾。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

放射線荷重係数 w_R は、X線、ガンマ線、ベータ線は1、陽子線は5、アルファ線は20、中性子線はエネルギーにより5から20までの値をとる。

(2) 実効線量

実効線量とは、各組織・臓器ごとの等価線量に組織荷重係数を乗じて合計したものであり、体全体への生物学的影響をはかるために用いられる。組織荷重係数とは、各組織・臓器における放射線の影響度(放射線感受性)の指標となる係数であり、各組織・臓器がどれだけ放射線の影響を受けやすいかという度合いである¹²⁾。組織荷重係数を w_T 、 H_T を組織 T における等価線量とすると、実効線量は以下の式で

¹⁰ 1992年(平成4年)11月18日政令第357号「計量単位令」

¹¹ 財団法人原子力安全技術センター、放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル、2007

¹² 日本分析センター 放射線用語の説明 閲覧2011-7-11

示される。

$$E = \sum_T w_T H_T$$

4. 建材の密度、化学組成、モンテカルロ計算による遮蔽計算

本報告書では日本原子力研究開発機構が開発した PHITS¹³⁾を用い、モンテカルロ計算により各建材の減衰係数、及び実効線量透過率を算出した。減衰係数に関しては2.3(1)で先述しているため説明は省略し、実効線量透過率のみ詳細を記載し、その後、解析内容について記載する。

4.1. 実効線量透過率

光子の実効線量透過率 F_a は、遮蔽体が無い場合の実効線量 E_0 に対する遮蔽体がある場合の実効線量 E の比： $F_a = E/E_0$ として表され、実効線量透過率を用いれば建材外部表面の線量当量を用いて、内部表面の線量当量を容易に求めることが可能となる。

一方で、実効線量透過率はジオメトリによって差が生じ、無限厚点線源ジオメトリ、有限厚点線源ジオメトリ (図 4.1(a))、垂直入射ジオメトリ (図 4.1(b)) の順に、透過率は低くなることが確認されている。

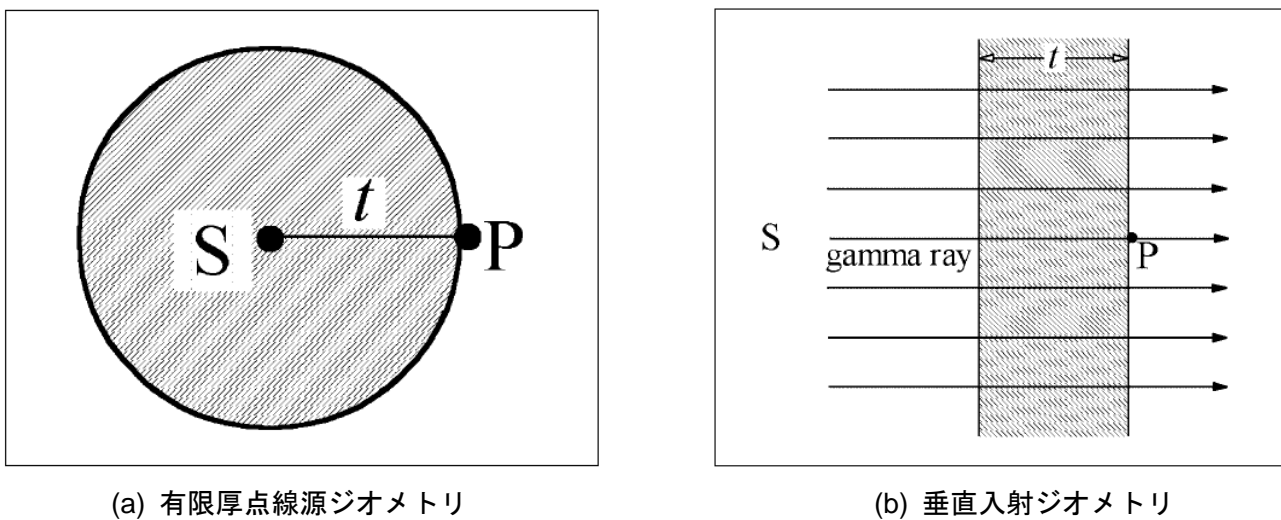


図 4.1 ジオメトリの図

これらの差異は主に遮蔽体中で発生する散乱線の多寡に依存しており、実際の放射線施設における遮蔽形態を考えると、線源貯蔵容器は有限点線源ジオメトリに近く、部屋の隔壁や放射線防護衝立などは垂直入射ジオメトリに近いものであると考えられている¹⁴⁾。ゆえに、本報告書の解析で対象としている住宅の外壁については、本来であれば垂直入射ジオメトリにて解析を行う方がより正しい値を評価できると考えられる。しかし、解析の参考とした(財)原子力安全技術センターが発行している「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル」¹⁵⁾(以下、マニュアルと記す)では、実効線量透過率を無限厚点線源ジオメトリで得られたビルドアップ係数に基づいて計算しており、実効線量透過率を安全側に過大評価している。ゆえに本報告書における解析でも、無限点線源ジオメトリにおいて線量当量評価を行い、各建材

¹³ K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)

¹⁴ 加藤秀起、土屋卓義、内藤敦：放射線遮蔽材に対する消滅 γ 線の実効線量透過率、日本放射線安全管理学会誌第 3 巻第 1 号 (15-20)

¹⁵ (財)原子力安全技術センター：放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2000, (財)原子力安全技術センター (東京) 2000.

の実効線量透過率を安全側に評価して求めた。解析の詳細は 4.2 に後述する。

4.2. 解析手法

(1) PHITS における Cs-137 の定義

日本原子力研究開発機構が開発したプログラム PHITS では、線源の種類、体系、物質、評価対象などをインプットファイルで定義することにより線量評価を行うことができる。定義できる線源には、ガンマ線はもちろんのこと、アルファ線、ベータ線、中性子などがあり、他にも複数存在する。しかし PHITS には Cs-137 が Ba-137m と永続平衡(放射平衡)の関係にあり、Ba-137m からの核異性体転移によって強いガンマ線を放出するというメカニズムはプログラムに組み込まれていない。ゆえにインプットファイルにおいて線源に Cs-137 を用いることはできない。そのため本報告書の解析では、1Bq の Cs-137 が崩壊した場合、85.1%の割合で 662keV のガンマ線を放出するというメカニズムを利用して、ガンマ線を線源に置き、1秒間に 1×0.851 個のガンマ線が放出されると仮定し、Cs-137 を模擬した。

(2) 減衰係数

減衰係数を算出する解析では、図 4.2(a)のような垂直入射ジオメトリを考え、Cs-137 を模擬した点線源から放出されるガンマ線について評価を行った。PHITS では線源から放出される放射線をビームとして飛ばす場合、そのビームは Z 軸の正方向に対して飛ばされるため、本解析では xy 方向に対して解析対象の建材で無限壁をつくり、点 P から点 Q まで 1mm 間隔で分割し (点 P~点 Q は 20cm)、各節点の線量当量率を評価した。また本解析では図 2.1 のような状況を想定しているため、散乱線は考慮せず、物質内で散乱することのない非衝突線のみを評価した。その結果、点 P から点 Q までの線量当量率の解析結果をプロットすると、図 4.2(b)のような指数曲線が得られ、この曲線から減衰係数を算出した。2.3 項(1)にて先述しているが、算出した減衰係数を各建材の質量で割った質量減衰係数は、同じエネルギーのガンマ線で解析を行っているため、当然、同様の値を示すようになる。しかし本報告書では各建材の遮蔽能力を示すことが目的なので、質量減衰係数ではなく、減衰係数として表 4.3 にまとめた。

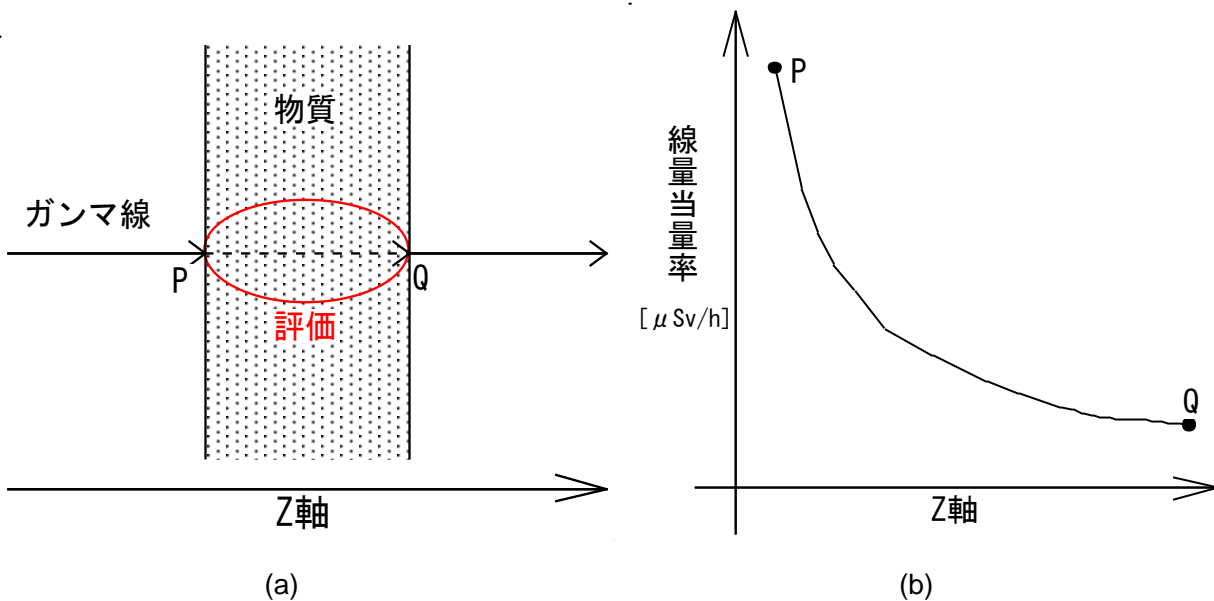


図 4.2 垂直入射ジオメトリにおける減衰係数の算出

(3) 実効線量透過率

実効線量透過率の解析は、4.1 項で先述したが、無限点線源ジオメトリにおいて評価を行った。つまり Cs-137 を模擬したガンマ線の点線源の周りが無限に解析対象の建材で満たされている状況となり、線源からは等方散乱でガンマ線が放出されている。実効線量透過率の算出は遮蔽体は何も無い場合との比較となるが、図 4.3 (有限点線源ジオメトリの図となっているが、無限点線源ジオメトリとする) を用い、コンクリートを例として算出方法を説明する。図 4.3 の遮蔽体がない空間 (左図) では、原点に点線源を置くと、点 P での線量当量は線源からの距離の逆 2 乗則に応じて減衰する。一方、コンクリートで満たされた空間 (右図) では、ガンマ線は距離による減衰だけでなくコンクリートの遮蔽によって減衰されていく。実効線量透過率 F_a は両者の点 P での線量当量率の比を表すことになり、遮蔽体が無い時の点 P での線量当量率を E_0 、コンクリートで満たされた時の線量当量率を E とすると、4.1 項で先述したように、 $F_a = E/E_0$ と表される。以上の方法にて各建材に対して実効線量透過率を算出し、その結果を表 4.3 にまとめた。また原点から点 P までの距離は、各建材の実際に住宅に用いられる厚さに応じて変化させた。

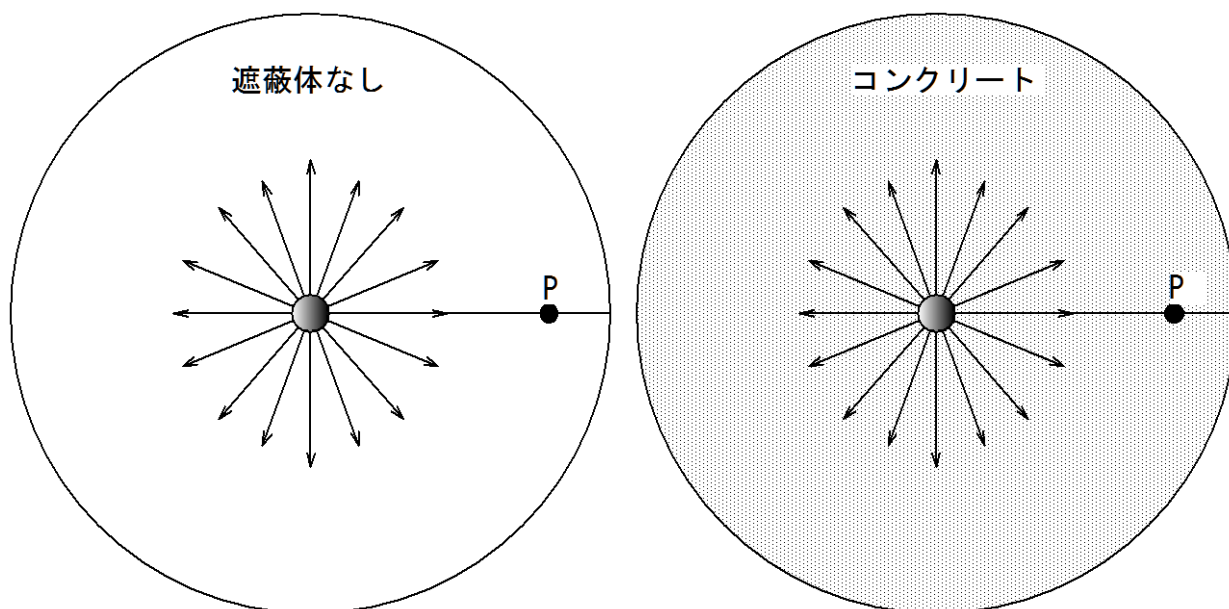


図 4.3 実効線量透過率算出の概略図

4.3. データベース

先述した各建材に対する減衰係数、及び実効線量透過率のデータベースを表 4.3.1～4.3.6 に示す。またデータベースには同時に、解析に用いた各建材の密度、住宅に用いられるときの厚さ、及び元素組成を示した。また、表 4.3.6 の金属系の材料は鋼材を除くと住宅に用いられることはほとんどないが、鉛や銅などの金属は遮蔽材として用いられることが多いため、参考として他の金属についても解析を行った。

また Cs-137 との比較として、異なるエネルギーレベルの I-131 によるガンマ線についても解析を行い、コンクリートに関してのみ、減衰定数、及び実効線量透過率を示した。I-131 は崩壊した場合、81.7%の割合で 364keV のガンマ線を放出するものとし、PHITS では Cs-137 と同様の手法で模擬した。

表 4.3.1 断熱材データベース

断熱材	組成	割合 (%)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
グラスウール	SiO ₂	100	0.032	0.002	50	1.00E+00
					75	1.00E+00
					100	1.00E+00
			0.024	0.002	50	1.00E+00
					75	1.00E+00
					100	1.00E+00
			0.016	0.001	50	1.00E+00
					75	1.00E+00
					100	1.00E+00
			0.010	0.0008	50	1.00E+00
					75	1.00E+00
					100	1.00E+00
ロックウール	SiO ₂	40	0.030	0.002	84	1.00E+00
	CaO	40				
	Al ₂ O ₃	20				
	SiO ₂	40	0.050	0.004		9.99E-01
	CaO	40				
	Al ₂ O ₃	20				
SiO ₂	40	0.100	0.008	9.97E-01		
CaO	40					
Al ₂ O ₃	20					
セルロースファイバー	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	80	0.060	0.005	90	1.00E+00
	B(OH) ₃	20				

表 4.3.2 外装材データベース

外装材	組成	割合 (%)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
窯業系サイディング	セメント系材料 * ¹⁾		1.050	0.081	18	9.91E-01
金属系サイディング	ガルバリウム* ²⁾		0.330	0.024	15	9.98E-01
樹脂系サイディング	石油(炭化水素)		0.110	0.009	18	9.99E-01
漆喰	Ca(OH) ₂		2.270	0.18	5	9.94E-01
					10	9.87E-01
花崗岩(天然石)	SiO ₂	77	2.750	0.211	20	9.66E-01
	Al ₂ O ₃	13			25	9.51E-01
	Na ₂ O	5			30	9.32E-01
	K ₂ O	5				
安山岩(天然石)	花崗岩* ³⁾		2.500	0.192	20	9.71E-01
					25	9.58E-01
					30	9.43E-01
砂岩(天然石)	SiO ₂	81.5	2.000	0.154	20	9.80E-01
	Al ₂ O ₃	12.2			25	9.72E-01
	CaO	1.4			30	9.63E-01
	K ₂ O	1.4				
	Na ₂ O	3.5				
凝灰岩(天然石)	SiO ₂	72	1.500	0.115	20	9.86E-01
	Al ₂ O ₃	14.3			25	9.80E-01
	CaO	1.9			30	9.74E-01
	K ₂ O	3.1				
	Fe ₂ O ₃	4				
	Na ₂ O	4.7				
ケイ石質レンガ	SiO ₂	100	2.000	0.154	60	8.67E-01
			1.500	0.116		9.20E-01
粘土質レンガ	カオリナイト* ⁴⁾		2.000	0.155	60	8.70E-01
			1.500	0.116		9.23E-01
ALC (気泡コンクリート)	コンクリート* ⁵⁾		0.500	0.039	65	9.84E-01
					70	9.82E-01
					75	9.82E-01
モルタル	コンクリート* ⁵⁾		2.000	0.155	15	9.86E-01
					20	9.78E-01
					25	9.70E-01

土壁	Al ₂ O ₃	25	1.280	0.098	45	9.58E-01
	CaO	25			50	9.50E-01
	SiO ₂	25			55	9.39E-01
	CaCO ₃	25			60	9.28E-01

表 4.3.3 内装下地材データベース

内装下地材	組成	割合 (%)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
プラスターボード	CaSO ₄ ・2H ₂ O	100	0.650	0.051	10	9.98E-01
					13	9.97E-01
板ガラス	SiO ₂	73	2.500	0.192	6	9.94E-01
	CaO	12			8	9.92E-01
	MgO	2			10	9.89E-01
	Na ₂ O	13				
大理石(天然石)	CaCO ₃	100	2.700	0.208	10	9.85E-01
					12	9.81E-01
					15	9.73E-01
パーティクル ボード	木材* ⁶⁾		0.550	0.045	15	9.98E-01
					18	9.97E-01
					20	9.97E-01

表 4.3.4 木質系データベース

木質系	組成	割合 (%)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
硬質木片セメント版	セメント系材料 * ¹⁾		1.000	0.077	10	9.96E-01
					15	9.93E-01
					18	9.91E-01
木片セメント版	セメント系材料 * ¹⁾		0.750	0.058	10	9.97E-01
					15	9.96E-01
					20	9.93E-01
					25	9.91E-01
					30	9.88E-01
普通木毛セメント版	セメント系材料 * ¹⁾		0.700	0.054	10	9.97E-01
					15	9.96E-01
					20	9.94E-01
					25	9.92E-01
					30	9.90E-01

表 4.3.5 躯体データベース

躯体	種類		密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
木材* ⁷⁾	すぎ	胴縁	0.390	0.032	18	9.98E-01
					21	9.98E-01
		27			9.97E-01	
		90			9.90E-01	
		105			9.87E-01	
	けやき	胴縁	0.680	0.055	18	9.97E-01
					21	9.96E-01
		27			9.94E-01	
		90			9.75E-01	
		105			9.62E-01	
	べいすぎ	胴縁	0.330	0.027	18	9.98E-01
					21	9.98E-01
		27			9.97E-01	
		90			9.91E-01	
		105			9.88E-01	
コンクリート* ⁸⁾	RH11%		2.262	0.176	120	5.19E-01
					150	3.91E-01
					180	2.81E-01
					200	2.21E-01
	RH60%		2.293	0.178	120	5.07E-01
					150	3.79E-01
					180	2.76E-01
					200	2.18E-01
	RH100%		2.352	0.183	120	4.94E-01
					150	3.63E-01
					180	2.62E-01
					200	2.07E-01

表 4.3.6 金属系データベース

金属系	組成	割合 (%)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
銅	Cu		8.300	0.578	3	9.63E-01
					5	9.39E-01
					10	8.60E-01
アルミニウム合金	Al		2.700	0.2	3	9.96E-01
					5	9.95E-01
					10	9.88E-01
鋼材	Fe+C* ⁹⁾		7.830	0.565	3	9.69E-01
					5	9.49E-01
					10	8.78E-01
鉛	Pb		11.400	1.174	3	7.29E-01
					5	6.24E-01
					10	4.05E-01
					20	1.53E-01
ステンレス鋼	Fe+Ni+Cr+Mn* ¹⁰⁾		7.400	0.534	3	9.72E-01
					5	9.53E-01
					10	8.89E-01

表 4.3.7 I-131 によるガンマ線の実効線量透過率

躯体	種類		密度 (g/cm ³)	減衰定数	住宅用厚さ (mm)	実効線量透過率
コンクリート* ⁸⁾	RH11%		2.262	0.226	120	4.82E-01
					150	3.26E-01
					180	2.10E-01
					200	1.55E-01
	RH60%		2.293	0.229	120	4.70E-01
					150	3.18E-01
					180	2.00E-01
					200	1.51E-01
	RH100%		2.352	0.236	120	4.51E-01
					150	2.98E-01
					180	1.91E-01
					200	1.39E-01

- *¹⁾ セメント系材料はコンクリートと同様の組成で解析を行った。
- *²⁾ 元素組成 Al : 55%、Zn : 43.4%、Si : 1.6%
- *³⁾ 安山岩は火山岩、花崗岩は深成岩であるが、本解析では同様の組成と考えた。
- *⁴⁾ カオリナイト化学組成 : $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
元素組成 O : 55.4%、Si : 21.5%、Al : 20.8%、H : 2.3%
- *⁵⁾ コンクリートと同様の組成と仮定。
コンクリート元素組成 Si : 38.4%、O : 52.9%、Ca : 7.3%、H : 0.64%、Fe : 0.23%、Al : 0.16%、S : 0.15%、
Mg : 0.10%、K : 0.08%、Cl : 0.0013%
- *⁶⁾ 躯体データベースの木材参考
- *⁷⁾ 元素組成 C : 50%、O : 44%、H : 6%
- *⁸⁾ RH11%とは平衡湿度 11%時のコンクリートのことを示す。RH60%、RH100%も同様。
- *⁹⁾ 元素組成 Fe : 99.5%、C : 0.5%
- *¹⁰⁾ 元素組成 Fe : 72%、Cr : 17%、Mn : 6%、Ni : 5%

5. データベースの活用方法

除染技術に関しては、JAEA 及び環境省によりモデル実証試験が実施されており、詳細に報告がなされている¹⁶⁾、¹⁷⁾。また、除染に関する方法については、環境省から除染関係ガイドラインとして詳細に纏められている¹⁸⁾。しかし、除染を完全に実施することは難しいというのが現状であり、また一部の地域では、微量ではあるが汚染した材料を用いて建築物を建築する必要が生ずる。こうした場合、安全評価が必要となり、現状では専門家によってしか判断ができない。微量の汚染が生じた建築物や建設物の付近に滞在する時間と距離を設定して、簡易に安全評価ができるツールの構築が復興上重要である。

また、汚染した材料を用いる場合、あるいは故意ではなく使用されてしまった場合にも、自己遮蔽効果を考慮した簡易な線量予測手法の提案が必要であり、この予測手法と上述の安全評価の連携により継続利用可否判断が可能となると考えられる。

簡易な線量予測手法においては、特にガンマ線の遮蔽効果を定量評価する場合には物質の密度、元素構成比のデータが必要となる。そのため、代表的な建築外皮、躯体、その他、建築物内の人体に放射線が届く経路にありうる建材については、見掛け密度、真密度、元素構成比のデータベース構築を行うべきであり、本報告書ではそれらのデータを示すことができた。加えてモンテカルロ法の解析によって代表的な建材のガンマ線の非衝突線に関する減衰係数を整理し、それによってガンマ線の定量評価を点減衰核法を用いることで可能とした。しかし点減衰核法が対象とするのは非衝突線の定量評価であり、散乱線を含めた評価を行うためには随時ビルドアップ係数を乗じる必要がある。このビルドアップ係数のデータベースは放射線遮蔽マニュアルにて既にまとめられているが、減衰係数の逆数である平均自由行程に応じてその値は変化する。ゆえに減衰係数に応じて線量を評価する場合、各建材の平均自由行程ごとにビルドアップ係数を内挿計算する必要はあるが、簡易な線量評価手法である点減衰核法を用いれば、多孔材料に吸着された放射性セシウムの物質内移動と連成し、吸着した放射性セシウムの再溶出シナリオ、及び移動シナリオを含めた線量評価予測を行うことが可能となる。

また、単純に住宅の外壁表面の線量から住宅内部の線量を予測評価する際には、減衰係数ではなく実効線量透過率を用いて評価する事ができる。実効線量透過率には非衝突線だけでなく散乱線の影響も含まれているため、ビルドアップ係数を乗じる必要もない。さらに、本報告書がデータベースで示した実効線量透過率は、各建材が住宅で用いられる代表的な厚さに応じたものであるため、コンクリート造、木造、鉄骨造に対して外装材、断熱材、躯体、内挿下地材を組み合わせ、それらのデータベースの値を乗じることにより、住宅外壁の線量透過率を容易に評価することができる。以下に外壁の線量透過率を算出する例を示す。

図 5.1 はコンクリート造住宅の外壁概略図を示しており、図 5.2 は木造住宅の外壁概略図を示している（鉄骨造住宅は木造住宅のたて枠材、及び胴縁材が C チャンと呼ばれる 3.2mm 厚または 2.3mm 厚の軽量鉄骨に代わる）。図 5.1 及び図 5.2 を参考にし、コンクリート造、木造住宅の外壁（図 5.3）について線量透過率を評価する。

¹⁶⁾ JAEA 福島第一原子力発電所事故にかかる避難区域等における除染実証業務報告書
http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report.html（2012 年 11 月 24 日確認）

¹⁷⁾ 環境省警戒区域及び計画的避難区域等における除染モデル実証事業報告の概要（最終版）
<http://josen.env.go.jp/material/download/pdf/model004.pdf>（2012 年 11 月 24 日確認）

¹⁸⁾ 環境省：除染関係ガイドライン <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14582>

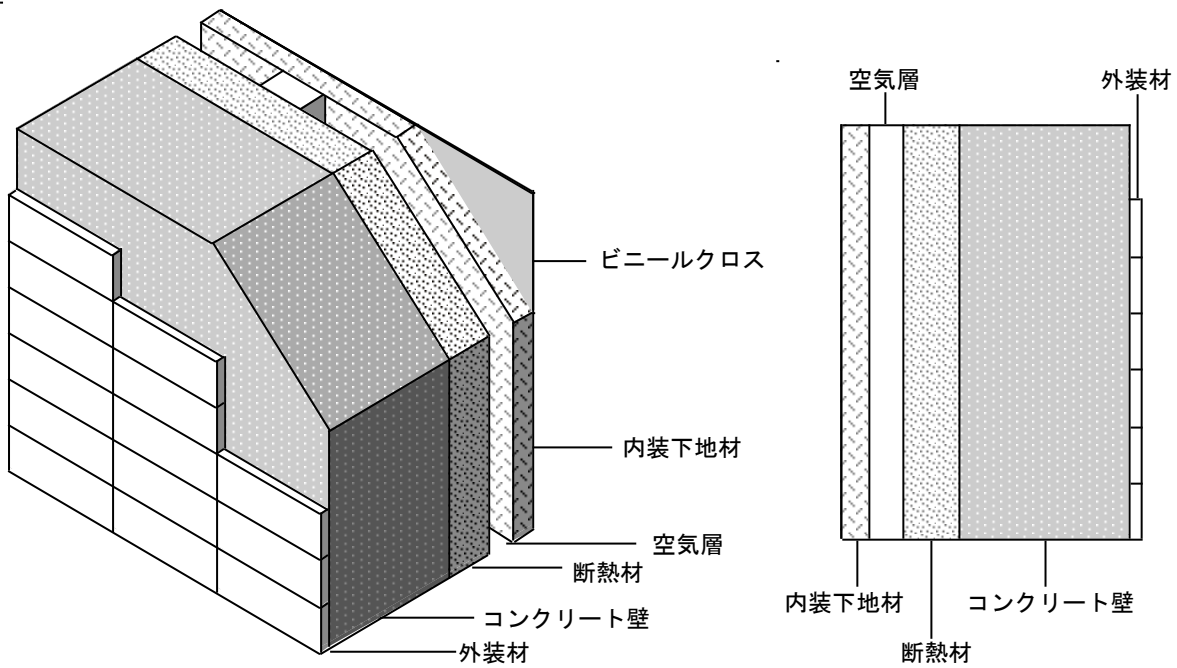


図 5.1 コンクリート造外壁の概略図

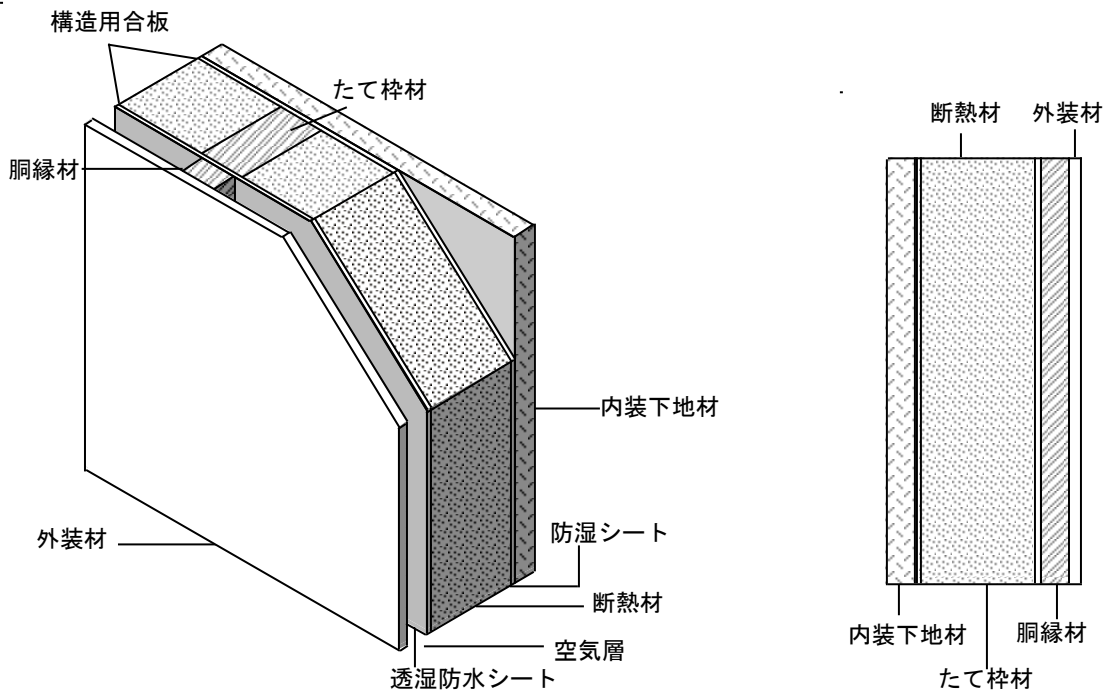


図 5.2 木造外壁の概略図

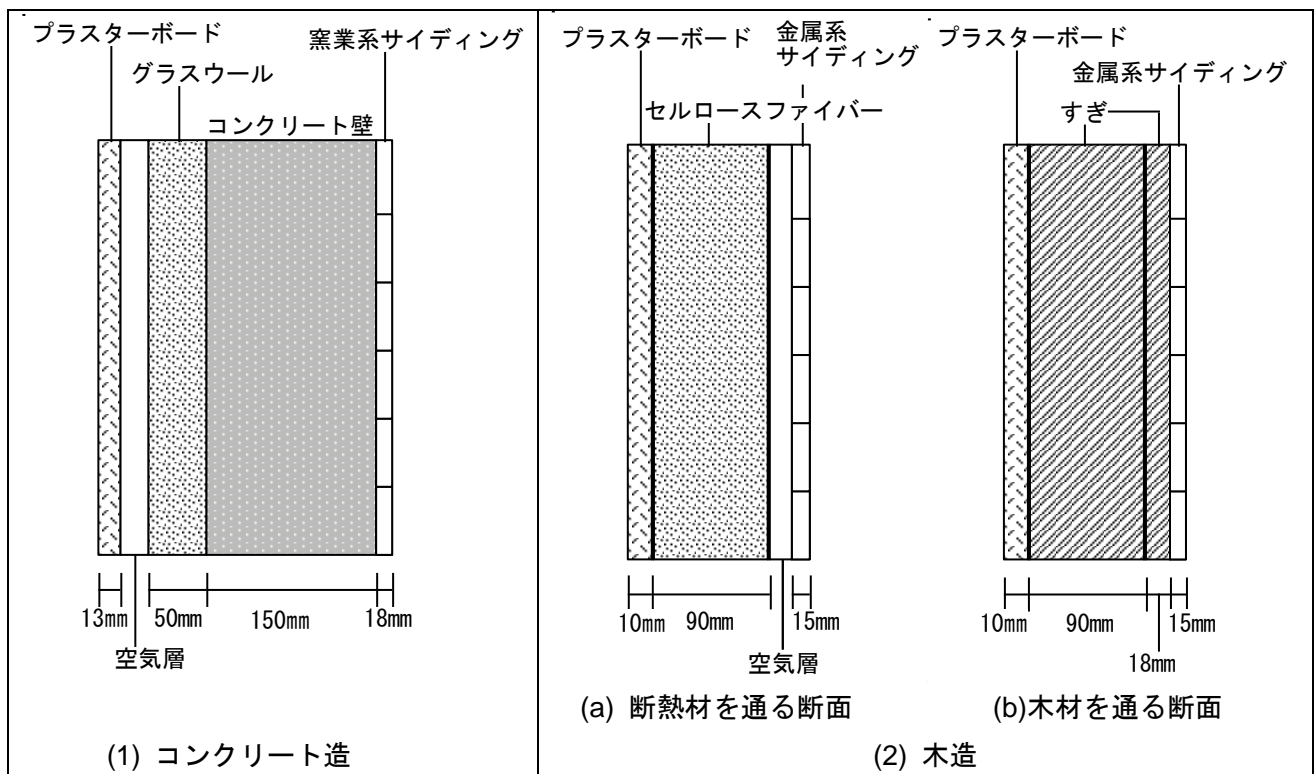


図 5.3 コンクリート造、及び木造住宅の外壁例

(1)コンクリート造住宅の線量透過率

$$0.997 (\text{ plasterboard } 13\text{mm}) \times 1.00 (\text{ glass wool } 50\text{mm}) \\ \times 0.379 (\text{ RH60\% concrete } 150\text{mm}) \times 0.991 (\text{ ceramic siding } 18\text{mm}) = 0.375$$

(2)木造住宅の線量透過率

(a)断熱材を通る断面

$$0.997 (\text{ plasterboard } 13\text{mm}) \times 1.00 (\text{ cellulose fiber } 90\text{mm}) \\ \times 0.998 (\text{ metal siding } 18\text{mm}) = 0.996$$

(b)木材を通る断面

$$0.997 (\text{ plasterboard } 13\text{mm}) \times 0.990 (\text{ wood } 90\text{mm}) \\ \times 0.998 (\text{ wood } 18\text{mm}) \times 0.998 (\text{ metal siding } 18\text{mm}) = 0.984$$

計算結果は全て小数点第4位以下を切り上げとしており、空気層では線量は減衰しないものとした（空気の密度： $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ）。またデータベースにおいて、実効線量透過率が $1.00\text{E}+00$ となっている建材（断熱材など）については、住宅厚さがさらに小さい場合、透過率は $1.00\text{E}+00$ と見なすことができる。以上の算出例のように、データベースを用いれば外壁の実効線量透過率を容易に求めることができ、汚染材料が建材に使用された場合の外壁表面に透過する線量当量の予測評価、つまり被曝リスクを考慮した再利用の検討が可能になると考えられる。

6. まとめ

本報告書のデータベースは微量に汚染した材料を住宅に再利用する際、安全評価を行う際の判断材料になりうるものであり、今後、一般的な建築物のあり方を想定した、放射エネルギーの許容値、設計値、及び建築設計手法を検討することの一助となれば幸いである。