

平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費  
(防護措置の実効性向上に関する調査研究) 事業

## 報告書

日本原子力研究開発機構

2020 年 3 月

## 正誤表

令和4年11月

日本原子力研究開発機構

平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（防護措置の実効性向上に関する調査研究）事業報告書において、誤記がありましたので、下記の通り訂正いたします。

正誤箇所	誤	正
P2-8 13行目	沈着率はカーペット、畳、フローリング材、 床材無し（ステンレス）の順に <u>小さかった</u> 。	沈着率はカーペット、畳、フローリング材、 床材無し（ステンレス）の順に <u>大きかった</u> 。

以上

## 目次

1. 実施計画.....	1-1
1.1 事業名 .....	1-1
1.2 事業の目的 .....	1-1
1.3 事業の内容 .....	1-1
1.3.1 吸入被ばくの低減効果の評価.....	1-1
1.3.2 外部被ばくの低減効果の評価.....	1-1
1.3.3 課題の整理.....	1-1
1.4 実施方法 .....	1-1

## 1. 実施計画

### 1.1 事業名

平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費（防護措置の実効性向上に関する調査研究）事業

### 1.2 事業の目的

原子力災害時には、原子力施設から異常な水準で放射線または放射性物質が放出される前に屋内退避を実施することにより、被ばく線量を低減することができる。

この屋内退避の実効性を向上させるため、屋内退避による被ばく線量の低減効果に関する技術的知見をより詳しく整備する必要がある。屋内退避時の被ばく経路には、屋外からもたらされる外部被ばくと、屋内に侵入した放射性物質によりもたらされる吸入被ばくがあり、本事業では、この双方における被ばく線量の低減効果に関する技術的知見を整備する。

### 1.3 事業の内容

本委託事業は、平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（防護措置の実効性向上に関する調査研究）事業（以下「平成 30 年度事業」という。）において得られた成果等を踏まえ、屋内退避による吸入被ばく及び外部被ばくの低減効果に係る知見を整理する。

#### 1.3.1 吸入被ばくの低減効果の評価

これまでに得られた実家屋実験及びラボ実験の結果を踏まえ、吸入被ばくの低減効果に影響を与えるエアロゾル及びヨウ素（ガス状、元素状、粒子状）の沈着率、浸透率、自然換気率等による低減効果への感度解析等を実施する。なお、必要に応じて、実家屋で使用されている床材と隙間を模擬した場合のヨウ素（ガス状、元素状、粒子状）の沈着率及び浸透率を算出するためのラボ実験を実施する。

また、平成 30 年度事業で得られたマスク、空気清浄機等の使用による吸入被ばくの低減効果に係る調査等の結果を踏まえ、口及び鼻をタオル等で保護した場合のエアロゾルの除去効率を実験により算出し、家庭内及び個人が利用可能なものによる吸入被ばくの低減効果に係る知見を整理する。

#### 1.3.2 外部被ばくの低減効果の評価

平成 30 年度事業で得られた基礎実験の結果を踏まえ、代表的な屋根材及び壁材に対して、エアロゾルが地表沈着した後の短期間における沈着割合及びウェザリングによる影響を実験等により確認するとともに、外部被ばくの低減効果に影響する寄与の程度を解析により把握する。

#### 1.3.3 課題の整理

屋内退避による吸入被ばく及び外部被ばくの低減効果に係る知見を整理するうえで、更なる検討を要する事項について整理を行う。

### 1.4 実施方法

#### 1) 計画書の策定

受注者は、「1.3 事業の内容」を具体的に進めるにあたっての計画書（作業体制、実施スケジュール、管理方法等）を作成し、事前に原子力規制庁担当者の了解を得る。

2) 事業の進捗報告

委託事業の進捗について、原子力規制庁担当者に定期的に報告を行う（報告の頻度は、2ヶ月に1回程度）。報告方法については、原子力規制庁担当者と調整する。

3) 事業成果報告書の作成

上記「1.3 事業の内容」の結果を事業成果報告書としてまとめる。

## 目次

2. 吸入被ばくの低減効果の評価 .....	2-1
2.1 ラボ実験 .....	2-1
2.1.1 実験系、実験方法.....	2-1
2.1.2 実験結果.....	2-7
2.2 口及び鼻を保護した場合の除去効果.....	2-13
2.2.1 実験方法.....	2-13
2.2.2 実験結果.....	2-22
2.2.3 除去効果.....	2-27
2.3 家屋調査 .....	2-28
2.3.1 調査方法.....	2-28
2.3.2 測定結果.....	2-33
2.4 屋内退避による吸入被ばく低減効果の解析方法 .....	2-38
2.4.1 解析方法の概要.....	2-38
2.4.2 入力値.....	2-46
2.4.3 吸入被ばく低減係数の解析 .....	2-60
2.5 第2章の参考文献.....	2-72

## 2. 吸入被ばくの低減効果の評価

第2章では、平成30年度事業で指摘されたラボ実験の問題点に対して、実験系及び実験手順の改良を行い、新たにヨウ素の沈着率と浸透率を評価した。口及び鼻を保護した場合の粒子等の除去効果を求めるための実験を行い、家庭内及び個人が利用可能なものによる吸入被ばくの低減効果に係る知見を整理した。また、福島県内の家屋において、ダストサンプリング及び家材中放射能濃度の測定を行い、放射能分布の把握及び沈着率の材質依存性を確認した。

さらに今までの実家屋実験及びラボ実験の結果と今年度実施した実験結果を踏まえ、吸入被ばくの低減効果に影響を与える自然換気率、エアロゾルとヨウ素（ガス状、元素状、粒子状）の沈着率、浸透率等による吸入被ばくの低減効果への感度解析及び低減効果を再評価した。

### 2.1 ラボ実験

ラボ実験では、 $I_2$ の沈着率と浸透率を求めた。また、ラボ実験で求めた値の実家屋への適用可能性を検討するため、同チャンバーで粒子状物質に対する沈着率と浸透率も求めた。

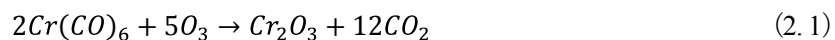
#### 2.1.1 実験系、実験方法

粒子状物質と $I_2$ の浸透率と沈着率を求めるための実験系を図2.1に示す。本実験で使用したチャンバーはステンレス材で作成されている。チャンバーの真ん中に隙間を模擬した試験体を設置することができる。試験体から粒子源または $I_2$ 源側は実家屋の屋外側を模擬しており、排気側は実家屋の屋内側を模擬している。仮想屋内チャンバーと屋外チャンバーの体積はともに $0.0429\text{ m}^3$  ( $35\text{ cm}\times 35\text{ cm}\times 35\text{ cm}$ )であり、表面積は $0.735\text{ m}^2$ である。沈着率試験では、仮想屋外チャンバーのみを利用した。仮想屋外チャンバーの床面全体を対象とした床材を敷いて実験を実施した。浸透率試験では、チャンバー床面には何も置かず、換気口を模擬した試験体を用いた（図2.2）。事故時には屋内への放射性物質の侵入量を下げることが想定し、換気口を閉じた条件で実験を実施した。チャンバー通過後の空気は活性炭フィルターを通して排気した。

粒子状物質を対象とした実験では、平成30年度事業までの実験と同様に、6-jet エアロゾルアトマイザー (Model9306、TSI) を用いてNaCl粒子を発生させた。NaCl粒子（粒径 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ）の個数濃度の測定には高濃度対応パーティクルカウンター (OPS、model3330、TSI) を使用した。

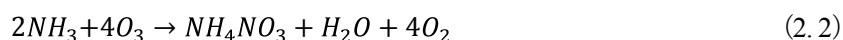
$I_2$ 源は図2.2に示されている円筒形の容器の中に固体ヨウ素が入っており、ヨウ素の揮発性を利用し、 $I_2$ が発生するようになっている。 $I_2$ 濃度の測定には、ICP-MS (iCAP Q、Thermo scientific) を使用した。平成30年度事業では、チャンバー内に設置した床材中の $I_2$ 濃度を測定、またはチャンバー内の空気をシリンジで吸い取り、その空気中の $I_2$ 濃度を測定した。そのため、空気中のヨウ素濃度を連続的に測定できなかった。本年度の実験では、ガス微粒子化装置 (GPD: Gas to Particle Device、J-science) により、ガス状ヨウ素を微粒子化し、アルゴンガス置換を行う気体試料導入装置 (GED: Gas Exchange Device、J-science) を用いてアルゴン置換し、その空気中に含まれるヨウ素元素をICP-MSで測定した（図2.3）。この測定法は、ガス状ヨウ素の捕集などの前処理を必要とせず、リアルタイム測定によるヨウ素元素の検出が可能である。また、測定に関する問題の一つであった、測定系中の $I_2$ 汚染を最小限にすることができる。

GPDはガスの粒子への吸着を用いて、金属カルボニルガスをGED-ICP-MSで測定可能な酸化物微粒子に変換する装置である (Nishiguchi et al., 2014)。ガスから粒子への変換は $O_3$ による金属カルボニルガスの酸化や $O_3$ と $NH_3$ の反応によって生成される $NH_4NO_3$ による金属酸化物の凝集によって行われる。 $O_3$ による金属カルボニルガスの酸化反応の例を式(2.1)に示す。



式 (2.1) に示されるようにクロムのカルボニルガスは  $O_3$  によって酸化クロム (□) の粒子に酸化される。

次に  $O_3$  と  $NH_3$  の反応式を式 (2.2) に示す。



オゾンによる酸化によって生成された金属酸化物は  $NH_4NO_3$  と凝集し、GED の多孔質膜を通過できない大きさまで成長し ICP-MS に導入される。キャリアとして機能する  $NH_4NO_3$  粒子は硝酸ブランク溶液によって導入した場合と比較して、追加の分光干渉を必要とすることなく、ICP-MS のイオン源内で容易に分解される。また、残りの  $O_3$  と  $NH_3$  は GED によって分離され、Ar ガス中で検体粒子は安定した状態で ICP-MS に導入される。粒子状物質の拡散速度は気体分子の拡散速度よりかなり低く、気体試料中の粒子状物質はそのまま ICP-MS へと導入される。この装置を用いた実験では、周囲空気中のガス状水銀を硝酸アンモニウムで凝集させ、ガス置換装置と誘導結合プラズマ質量分析を組み合わせた装置である GED-ICP-MS を用いて直接的な分析が行われている。その実験の先行事例では、ガス状水銀を導入する前に前濃縮や空気からのガス状水銀の分離などのサンプル前処理手順は必要なく、ガス状水銀の高感度かつ簡易なリアルタイムモニタリングを実現した (Nishiguchi et al., 2008; Ohata and Nishiguchi, 2017)。

また、ヨウ素測定中の ICP-MS の検出強度の安定性を確認するために、金属標準エアロゾル発生ユニット (MSAG、イアス) を用いて標準溶液 (TUNE-B) を  $1.0 \mu L \min^{-1}$  で導入し、In、U などの元素の検出強度の変動をモニタリングした。MSAG は ICP-MS の検出強度の安定性を確認するだけでなく、標準溶液の導入速度を  $0.1 \mu L \min^{-1} \sim 99.99 \mu L \min^{-1}$  の間で変化させて ICP-MS へと導入し、検量線を引くことも可能である。本実験では ICP-MS の検出強度の安定性の確認のみに使用した。

GED から ICP-MS への流量を約  $0.25 L \min^{-1}$  に調整し、ICP-MS の検出感度の最適化を行った。また、ポンプの押し出す流量を調整することにより、チャンバー内の自然換気率を決定した。その際に排気側の流量を調整することで ICP-MS へ導入されるガス状ヨウ素の流量を制御した。本報告では ICP-MS の検出強度を一定にするため、ICP-MS への流量はチャンバー内の自然換気率によらず、 $0.25 L \min^{-1}$  となるように調整した。



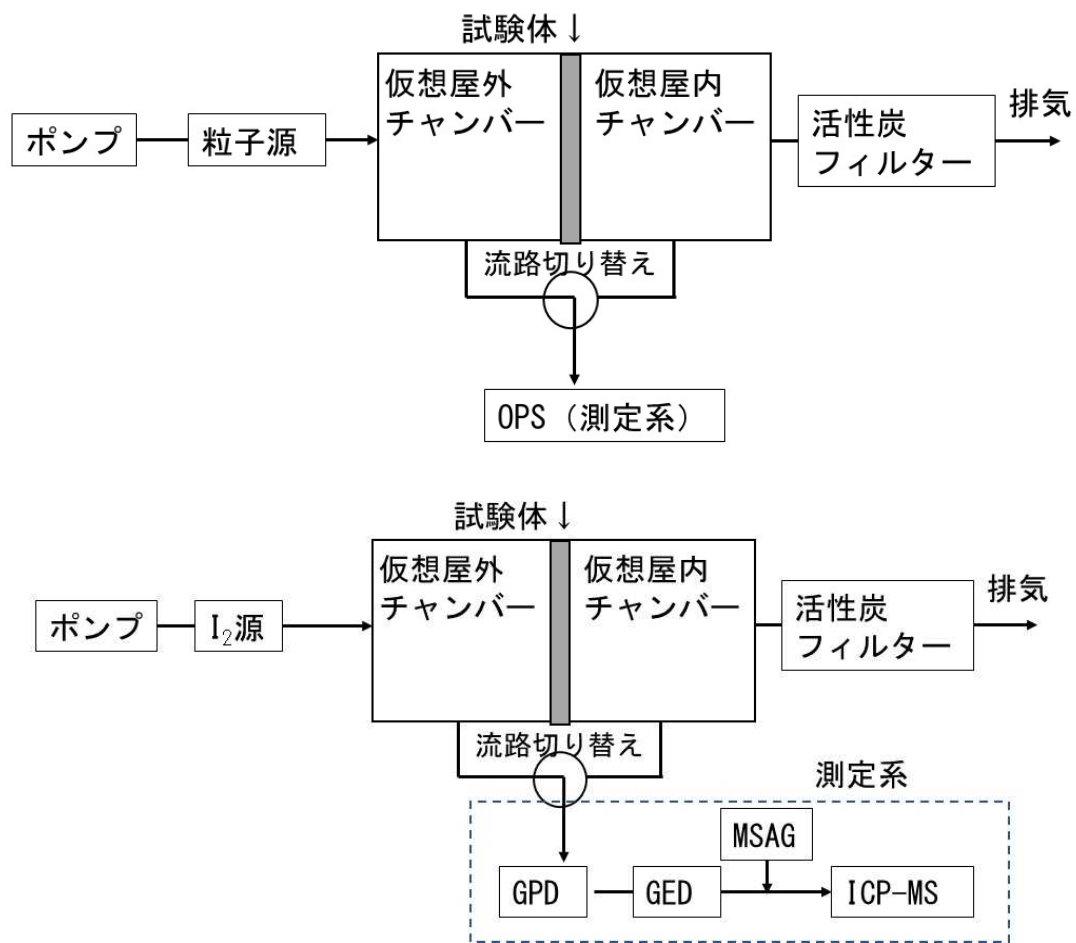


図 2.1 粒子状物質 (上) と  $I_2$  (下) の沈着率と浸透率に関する実験系



図 2.2 実験チャンバー (左) と試験体 (右) の写真

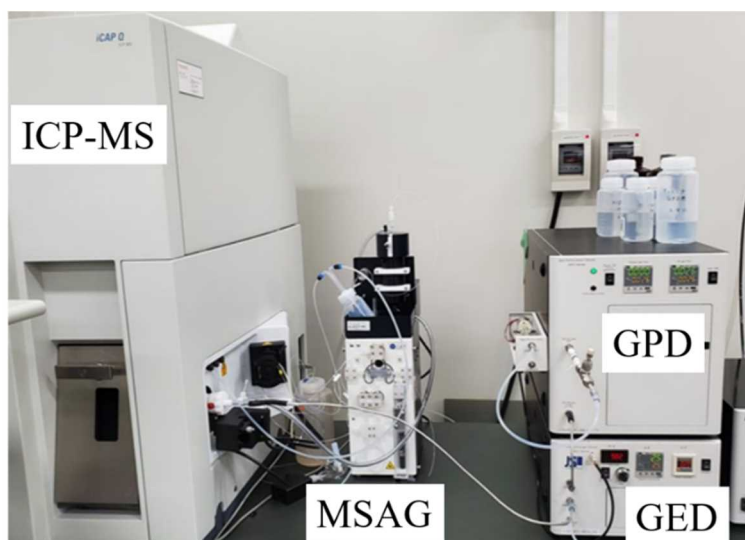


図 2.3 I<sub>2</sub>に関する測定系の写真

#### (1) 沈着率

沈着率試験では、先に記したように、仮想屋外チャンバーのみを利用した。本事業では、実家屋でよく使用される畳、カーペット、フローリング材を対象床材（図 2.4）とし、さらに床材を何も敷かない場合（床材無し）の沈着率も求めた。仮想屋外チャンバーの床面全体を対象床材を敷き、実験を実施した。仮想屋外チャンバーに粒子または I<sub>2</sub> を注入しながら、仮想屋外チャンバー内の粒子濃度またはヨウ素濃度を測定し続けた。濃度が一定値に達したところで、粒子または I<sub>2</sub> の供給を止めた。供給を止めた後、フィルターを通した粒子・ヨウ素フリーの空気を同じ流量で流し続けながら<sup>1</sup>、仮想屋外チャンバー内の粒子濃度またはヨウ素濃度を測定した。

粒子・I<sub>2</sub>供給をやめた後のチャンバー内の濃度の時間変化は以下の式で表される。

$$\frac{dC_{外}}{dt} = -(\lambda_e + \lambda_d)C_{外} \quad (2.3)$$

$C_{外}$  : 仮想屋外チャンバー内の粒子またはヨウ素濃度 (m<sup>-3</sup>)

$\lambda_e$  : 粒子・ヨウ素フリーの空気を供給する際の流量にチャンバーの体積を除した値 (h<sup>-1</sup>)

$\lambda_d$  : 粒子状物質または I<sub>2</sub> の沈着率 (h<sup>-1</sup>)

測定結果からバックグラウンド値を引き、粒子またはヨウ素濃度の時間変化と式 (2.3) の計算値の差の二乗和が最小になるように沈着率  $\lambda_d$  を決定した。

<sup>1</sup> GPD に空気を供給するためのポンプは付属しているものの、付属のポンプを通して測定した場合、ポンプ内に I<sub>2</sub> が付着し、ヨウ素が検出されなかった。ポンプ内での I<sub>2</sub> の付着を除くため、ポンプを使用せずに、仮想屋外チャンバーに空気を供給し続けることで、GPD にチャンバー内の空気を送るようにした。



図 2.4 対象床材の写真 (左：フローリング、中央：カーペット、右：畳)

## (2) 浸透率

浸透率試験では、床材を何も敷かずに行った。仮想屋外チャンバーに粒子または $I_2$ を注入しながら、仮想屋内チャンバー内の粒子またはヨウ素濃度を測定し続けた。粒子またはヨウ素濃度が5分間以上一定になったところで、流路を切り替えて仮想屋外チャンバー内の粒子またはヨウ素濃度を測定した。ここで、切り替える前5分間の仮想屋内チャンバー内の濃度の平均値を $C_{内,ave}$ とする。切り替えた後、仮想屋外チャンバー内の濃度が5分間以上一定になったところで、流路を切り替えて仮想屋内チャンバー内の濃度を測定した。ここで、切り替える前5分間の仮想屋外チャンバー内の濃度の平均値を $C_{外,ave}$ とする。この切り替え作業を3回以上繰り返した。その後、床材を何も置いてない場合の沈着率及びバックグラウンド値を求めるために、粒子または $I_2$ の供給を止め、沈着率試験と同様に、フィルターを通した粒子・ヨウ素フリーの空気を同じ流量で流し続けながら、仮想屋外チャンバーの濃度を測定し続けた。

粒子または $I_2$ を供給している間のチャンバー内の濃度は以下の式で表される。

$$\frac{dC_{外}}{dt} = A - (\lambda_e + \lambda_d)C_{外} \quad (2.4)$$

$$\frac{dC_{内}}{dt} = P\lambda_e C_{外} - (\lambda_e + \lambda_d)C_{内} \quad (2.5)$$

- $A$  : 粒子源または $I_2$ 源からの供給量 ( $m^3 h^{-1}$ )
- $C_{外}$  : 仮想屋外チャンバー内の粒子またはヨウ素濃度 ( $m^{-3}$ )
- $C_{内}$  : 仮想屋内チャンバー内の粒子またはヨウ素濃度 ( $m^{-3}$ )
- $\lambda_e$  : 粒子または $I_2$ が試験体を通過する流量にチャンバーの体積を除した値 ( $h^{-1}$ )
- $\lambda_d$  : 粒子状物質または $I_2$ の沈着率 ( $h^{-1}$ )
- $P$  : 粒子状物質または $I_2$ の浸透率 (-)

仮想屋内チャンバー内の濃度が定常状態になった場合、式 (2.5) は、

$$P\lambda_e C_{外} - (\lambda_e + \lambda_d)C_{内} = 0 \quad (2.6)$$

$$P = \frac{(\lambda_e + \lambda_d)C_{内}}{\lambda_e C_{外}} \quad (2.7)$$

となる。本事業では、定常状態時の濃度として、測定系を切り替える前5分間の濃度の平均値  $C_{内,ave}$  と  $C_{外,ave}$  を利用した。また、沈着率  $\lambda_d$  は同時に試験した床材無し時の沈着率を利用した。

### (3) 実験系の漏れに関する扱い<sup>2</sup>

$I_2$  を供給する前に、チャンバーに空気を供給する流量、測定系への流量、及び排気される流量を測定した。しかしながら、測定系への流量と排気量の和は供給量と等値ではなかった。この原因として、チャンバーからの空気の漏れであると考え、その漏れを考慮して浸透率の解析を行った。漏れも含めた空気の流れの模式図を図2.5に示す。漏れの箇所を特定することはできなかったため、空気の漏れは一樣であると仮定し、仮想屋外チャンバーと仮想屋内チャンバーから同量の漏れ(図2.5のZ)があるとした。仮想屋外チャンバーのヨウ素濃度を測定している場合の、空気の収支は以下の式で表される。

$$X = Z + T + L \quad (2.8)$$

$$T = Z + Y \quad (2.9)$$

- X : 供給流量 (L min<sup>-1</sup>)
- Y : 排気流量 (L min<sup>-1</sup>)
- Z : 漏れ流量 (L min<sup>-1</sup>)
- T : 隙間を通る流量 (L min<sup>-1</sup>)
- L : 測定系への流量 (L min<sup>-1</sup>)

この時の隙間を通る流量は、式(2.8)と式(2.9)より、

$$T = \frac{1}{2}(X + Y - L) \quad (2.10)$$

となる。一方で、仮想屋内チャンバーのヨウ素濃度を測定している場合の、空気の収支は以下の式で表される。

$$X = Z + T \quad (2.11)$$

$$T = Z + Y + L \quad (2.12)$$

この時の隙間を通る流量は、式(2.11)と式(2.12)より、

<sup>2</sup> 粒子状物質の測定時には、流入流量と排気流量が等価であったため、漏れは無しとして扱った。粒子状物質を測定する際には、測定器のポンプを使用して、チャンバー内の空気を常に吸引しており、チャンバー内が過度に加圧状態にならなかったためであると考えられる。

$$T = \frac{1}{2}(X + Y - L) \quad (2.13)$$

となる。浸透率を求める際の試験体を通る流量は式 (2.13) の  $T$  を用い、チャンバーの体積で割ることで式 (2.7) の  $\lambda_e$  とした。

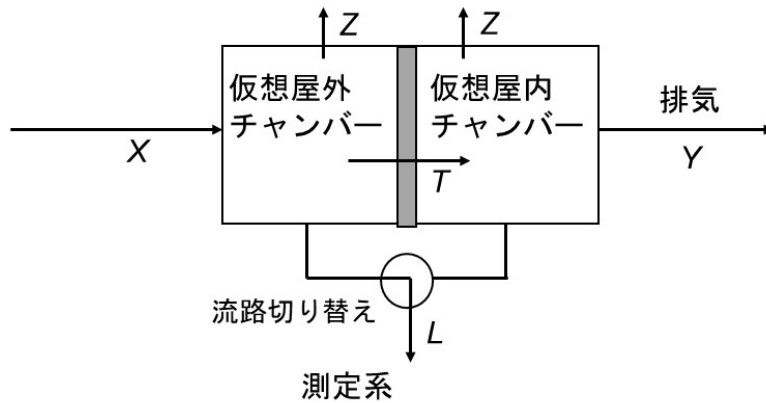


図 2.5 チャンバー内外の空気の流れの模式図

## 2.1.2 実験結果

### (1) 粒子状物質の沈着率

粒子状物質の沈着率試験時の測定結果例を図 2.6 に示す。指数関数の傾きは排気、測定系への流入、及び沈着による減少が含まれている。排気と測定系への流入による減少率は設定した流量と測定器の流量により  $0.55 \text{ h}^{-1}$  であったため、指数関数の傾きから  $0.55$  を引いた値を沈着率とした。沈着率試験を 3 回実施した結果、床材無し時の沈着率の平均は  $0.091 \pm 0.003 \text{ h}^{-1}$  であった。平成 30 年度事業では、体積表面積比の違いにより、チャンバー実験で得られた沈着率をそのまま実家屋に適用できないことを示した。本実験で使用したチャンバーの体積表面積比は  $17.1 \text{ m}^{-1}$ 、一般的な部屋の体積表面積比は  $2.1 \text{ m}^{-1}$  であり、体積表面積比は約 8.2 倍異なる。沈着率を 8.2 で割ることで実家屋相当の沈着率に補正した結果、沈着率は約  $0.01 \text{ h}^{-1}$  であり、平成 30 年度事業までの沈着率の範囲 ( $0.01 \sim 0.2 \text{ h}^{-1}$ ) と同等であった。従来通り、チャンバー実験で得られた値に体積表面積比で補正することで、実家屋相当の沈着率を得られると考えられる。

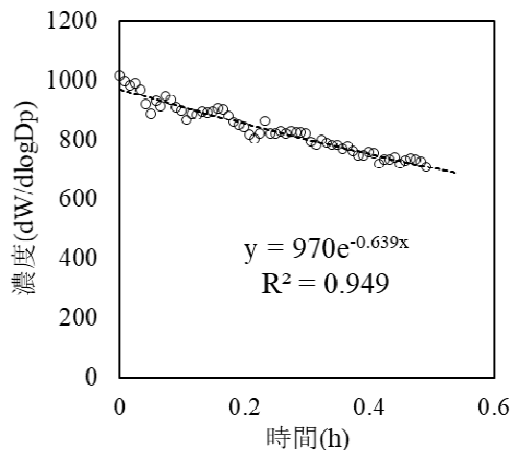


図 2.6 粒子状物質の沈着率試験時の測定結果例（床材無し）

## (2) I<sub>2</sub>の沈着率

I<sub>2</sub>の沈着率試験時の測定結果例を図 2.7 に示す。平成 30 年度事業の試験では、離散的または床材上の濃度<sup>3</sup>しか測定できなかった。本年度の試験では、連続的にチャンバー内の I<sub>2</sub>濃度を測定することができ、式 (2.3) を用いて沈着率を求めることが可能である。I<sub>2</sub>濃度は時間とともに指数関数的に減少し、ある一定濃度に収束した。この一定濃度をバックグラウンド値 (BG 値)<sup>4</sup>として扱い、全測定値から BG 値を引いたのち、最小二乗法で沈着率を求めた。I<sub>2</sub>源の供給を止めた直後、及び BG 値に近い値では測定値のばらつきが大きく、その期間の測定値を含めて解析した場合、沈着率の精度が悪くなる恐れがある。そこで、I<sub>2</sub>供給を止めてから 5 分後から 10 分間のデータを利用して沈着率を求めた。

沈着率の結果を表 2.1 に示す。I<sub>2</sub>はガス状物質であるため、粒子状物質とは異なり重力沈降の影響はない。そこで、面の向きによる沈着量の違いはないと仮定し、床面のみへの沈着率もあわせて表 2.1 に示す<sup>5</sup>。沈着率はカーペット、畳、フローリング材、床材無し（ステンレス）の順に小さかった。床面のみへの沈着率では、カーペット：畳：フローリングの沈着率の比は約 2.5 : 1.4 : 1 であり、全体の沈着率では、約 1.3 : 1.1 : 1 であった。粒子状物質の沈着率は材質の表面が粗いほど大きいと報告されており（伊藤他, 2011）、I<sub>2</sub>の沈着率も同様の傾向であった。

沈着率と換気率の関係を図 2.8 に示す。ここで、換気率は式 (2.3) の  $\lambda_e$  と同じである。粒子状物質では沈着率と換気率には相関が見られなかったものの、I<sub>2</sub>では換気率が大きくなるほど沈着率が大きくなる傾向が見られた。I<sub>2</sub>はガス状であり、粒子状物質のように重力沈降の影響を受けず、対流によってチャンバー内での動きが支配される。換気率が大きくなるほどチャンバー内の強制滞留が大きくなる。強制滞留が大きいくほど、物質の壁面への輸送が大きくなるため、沈着量が増加する（伊藤他, 2011）。粒子状物質では重力沈降などの他の因子が沈着率に大きな影響を及

<sup>3</sup> ICP-MS の出力値はヨウ素に対するカウント数である。カウント数は濃度と線形関係であるため、本報告書ではカウント数と濃度は同義として扱っている。

<sup>4</sup> BG には、ICP-MS 特有のバックグラウンド（ノイズ）、チャンバーと経路内に付着したヨウ素の脱離により測定されるものが含まれる。

<sup>5</sup> 実験系は立方体であり、各面の面積は同じであるため、沈着量は面によらず同じと仮定した。カーペット、フローリング、畳を床面のみ敷いたため、床材無しでの全体の沈着率の 5/6 (5.2\*5/6 ≒ 4.3) は他の材質でも同じと仮定し、各床材の全体の沈着率から 4.3 を引いた値が床面のみへの沈着率となる。

ぼしたのに対し、 $I_2$ では強制滞留が沈着率に大きな影響を及ぼしたため、粒子状物質と $I_2$ で換気率による沈着率への影響が異なると考えられる。

粒子状物質の沈着率の部分で述べたように、チャンバー実験で得られた値をそのまま実家屋に適用することはできない。そこで、全体の沈着率を体積表面積比の 8.2 で割ることで実家屋相当の沈着率に補正した (図 2.9)。換気率が  $1\text{ h}^{-1}$  の時、 $I_2$  の沈着率はカーペットで約  $0.7\text{ h}^{-1}$ 、フローリングで約  $0.5\text{ h}^{-1}$  であった。平成 30 年度事業の実験結果によると、粒子状物質の沈着率は約  $0.01\sim 0.2\text{ h}^{-1}$  であり、沈着率は  $I_2$  のほうが大きかった。また、換気率が大きくなるほど、 $I_2$  の沈着率は大きくなり、換気率が  $3\text{ h}^{-1}$  の時、 $I_2$  の沈着率はカーペットで約  $2.0\text{ h}^{-1}$ 、フローリングで約  $1.5\text{ h}^{-1}$  であった。本実験では、換気率  $1\text{ h}^{-1}$  以下の  $I_2$  の沈着率が得られておらず、 $I_2$  の沈着率は換気率とともに直線的に減少するか、またはある一定値に収束するかを確認できておらず、今後の課題である。

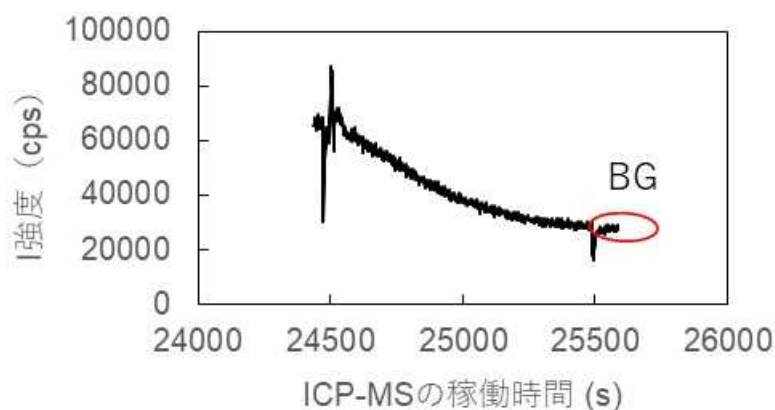


図 2.7  $I_2$  の沈着率試験時の測定結果例

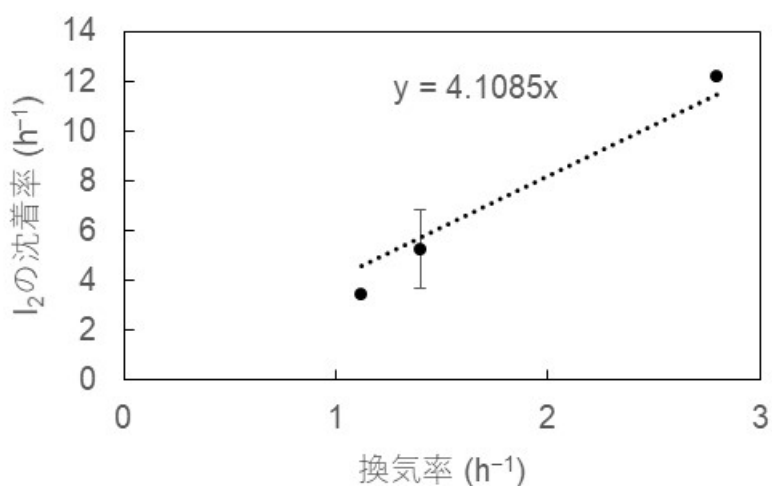


図 2.8  $I_2$  の沈着率と換気率の関係 (床材無し)。プロットは各換気率条件下での実験値の平均値。誤差棒は標準偏差。誤差棒が無いデータは試験回数 3 回未満。

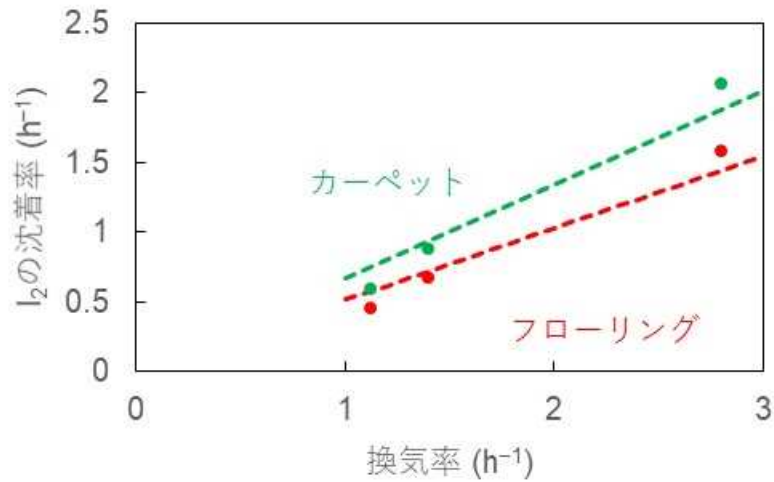


図 2.9 実家屋相当に補正した  $I_2$  の沈着率。各プロットは図 2.8 のプロットを体積表面積比で補正し (8.2 で割り)、表 2.1 の床材無しと各床材の沈着率 (全面) との比を掛けて、各床材の沈着率に補正した値である。

表 2.1  $I_2$  の沈着率の結果

床材	沈着率 (換気率 1.4 h <sup>-1</sup> 時)	
	全面	床面のみ
カーペット	7.3 h <sup>-1</sup>	2.9 h <sup>-1</sup>
フローリング	5.6 h <sup>-1</sup>	1.2 h <sup>-1</sup>
畳	6.0 h <sup>-1</sup>	1.7 h <sup>-1</sup>
床材無し	5.2 h <sup>-1</sup>	0.87 h <sup>-1</sup>

### (3) 粒子状物質の浸透率

粒子状物質の浸透率と換気率の関係を図 2.10 に示す。チャンバー実験で得られた浸透率と自然換気率の関係は実家屋実験で得られた浸透率と換気率の関係と同様であった。浸透率に関しては、補正をせずにそのまま実家屋に適用できると考えられる。

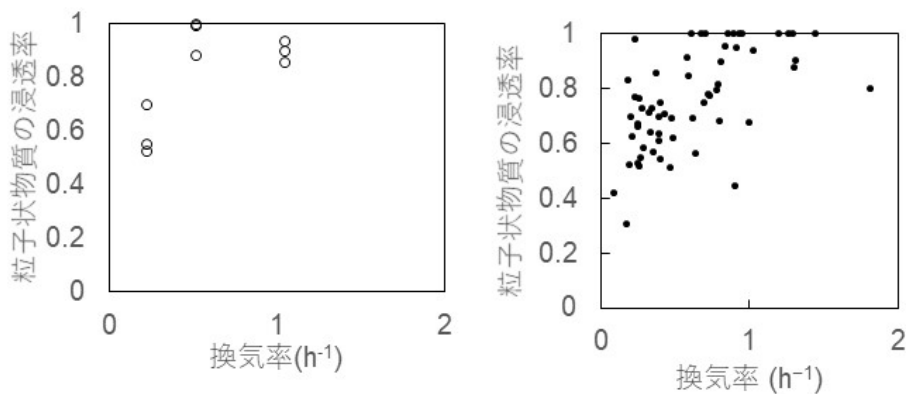


図 2.10 粒子状物質の浸透率と換気率の関係 (左: 本実験、右: 平成 30 年度事業の結果)



#### (4) I<sub>2</sub>の浸透率

I<sub>2</sub>の浸透率試験時の測定結果例を図 2.11 に示す。測定系を切り替えるたびに、振動等により ICP-MS の感度が少し変化するため、測定系を切り替えた直後の濃度は安定しなかった。式 (2.7) は仮想屋内チャンパー内のヨウ素濃度が定常状態であることが条件であるため、ヨウ素の指示値が 5 分間以上ほぼ一定になったことを確認した後、測定系を切り替えることとした。I<sub>2</sub>源の供給を止めた後、沈着率試験と同様にヨウ素濃度は時間とともに指数関数的に減少し、ある一定濃度に収束した。この一定濃度を BG 値として扱い、全測定値から BG 値を引いた後、浸透率と沈着率を求めた。粒子状物質の浸透率は換気率依存性が見られたことから、I<sub>2</sub>の浸透率も同様の傾向が見られると考え、換気率依存性も調査した。換気率は I<sub>2</sub>源の供給量を変えることにより調整した。本実験では、0.8h<sup>-1</sup>、1h<sup>-1</sup>、2h<sup>-1</sup>の 3 パターンの換気率について実験した。換気率は式 (2.7) の  $\lambda_e$  である。しかしながら、換気率 0.8h<sup>-1</sup> の時、チャンパー内の流量が安定せず、仮想屋外中の I<sub>2</sub>濃度は流路を切り替えるたびに大きく異なり、精度よく浸透率を推定できなかった。

I<sub>2</sub>の浸透率と換気率の関係を図 2.12 に示す。2 点しかないものの、粒子状物質と同様に換気率が高いほど浸透率が大きくなる傾向が見られた。平成 30 年度事業で報告した I<sub>2</sub>の浸透率と比較すると、今回調査した換気率の範囲では、浸透率は半分程度小さかった。本実験では、換気率が 1 h<sup>-1</sup>以下の I<sub>2</sub>の浸透率及び 2 h<sup>-1</sup>以上の I<sub>2</sub>の浸透率が得られていない。I<sub>2</sub>の浸透率は換気率とともに直線的に減少するか、またはある一定値に収束するかを確認できていない。また、換気率が大きい場合に、I<sub>2</sub>の浸透率は 1 に収束するか、または 1 以下で収束するかも確認できておらず、今後の課題である。

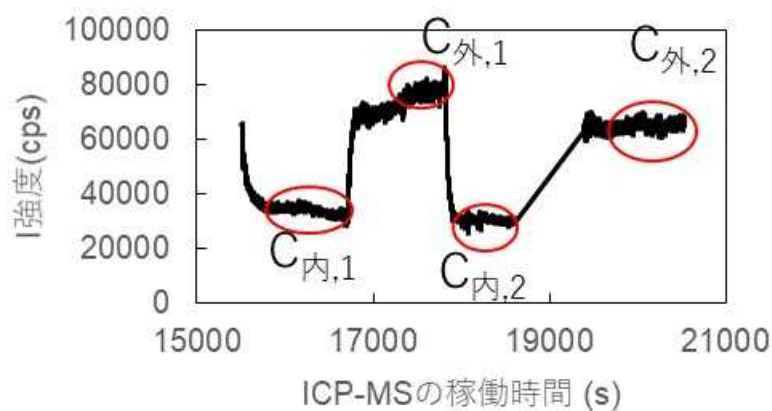


図 2.11 I<sub>2</sub>の浸透率試験時の測定結果例

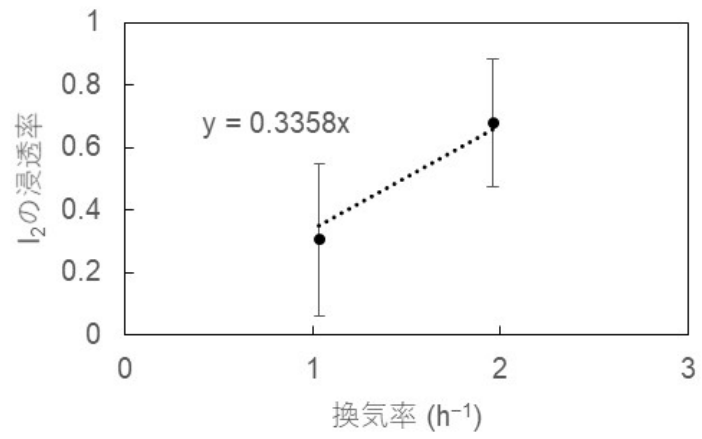


図 2.12 I<sub>2</sub>の浸透率と換気率の関係。プロットは各換気率条件下での実験値の平均値。誤差棒は標準偏差。

## 2.2 口及び鼻を保護した場合の除去効果

口及び鼻を保護した場合の物質移行の概略図を図 2.13 に示す。口及び鼻を保護した場合の除去効果  $P_m$  (保護具未着用時と着用時の吸入量の比) は下記の式で表されるように、保護具を通らずに呼気に直接吸入する割合を表す「漏れ率」と、物質が保護具を透過する(または保護具に吸着する)割合を表す「透過率」(または「捕集効率」)を用いて求められる。

$$P_m = X + F_m - XF_m \quad (2.14)$$

$P_m$  : 除去効果  
 $X$  : 漏れ率  
 $F_m$  : 透過率

漏れ率  $X$  が 1 の場合、物質が全て保護具を通らずにそのまま吸入することを意味する。透過率  $F_m$  は保護具を通過する前と通過した後の濃度比で表される。マスクメーカーなどで提示されているマスクによる粒子の捕集効率は  $(1-F_m) \times 100$  (%) で表される。

本事業では、上記 2 つのパラメータを実験的に求め、保護具の除去効果を求めた。また、除去効果を高めるための注意点も合わせて示す。

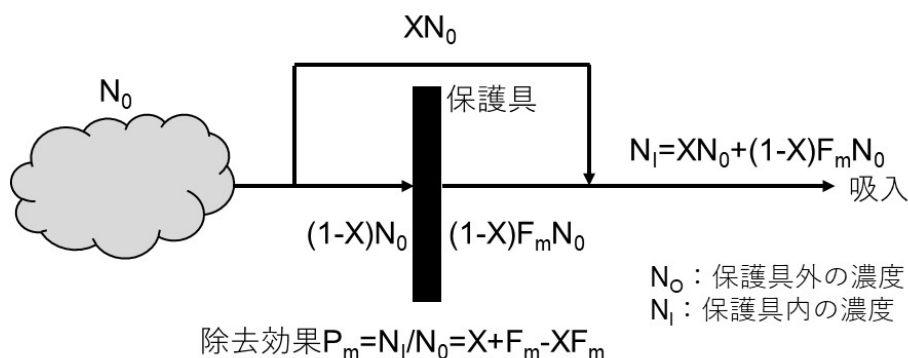


図 2.13 保護具着用時の吸入までの物質移行の概要図

### 2.2.1 実験方法

本実験では、表 2.2 に示した 4 種のマスクを対象とした (図 2.14)。マスク選定の基準として、安価であること、サブミクロン粒子 (粒径  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ) を捕集できること、ガス状ヨウ素を捕集できること、漏れ率が小さい構造であることとした。サブミクロン粒子の捕集について、DS1、DS2、DS3、N95<sup>6</sup> の表記があれば、サブミクロン粒子を捕集できる保護具とみなした。一般的なマスクなどに使用されるフィルターについて、ヨウ素捕集に関する知見はほとんどない。エアフィルターなどでは、ヨウ素を捕集する際に活性炭フィルターなどが使われる (武田, 2011; 三菱重工業株式会社, 2011; 野川と古川, 2008; 村田, 1971)。そこで、活性炭フィルターが付属している場合には、ガス状ヨウ素を捕集できる可能性のある保護具とみなした。漏れ率に関して、「隙間を作りにく

<sup>6</sup> マスクの捕集効率を表す規格。DS1、2、3 は  $0.06 \sim 0.1 \mu\text{m}$  の粒子に対してそれぞれ 80% 以上捕集、95% 以上捕集、99% 以上捕集した場合に認定され、N95 は  $0.075 \mu\text{m}$  粒子に対して 95% 以上捕集した場合に認定される。

い、「漏れにくい」、「顔にフィット」などの表記があるものを、漏れ率が小さい保護具とみなした。

表 2.2 対象マスクの特徴一覧

マスク No.	マスク型 (単価)	製品名	活性炭フィルター	メーカー記載の粒子捕集	漏れに関する記載
1	ブリーツ型 (単価：14 円)	活性炭入り 4 層ブリーツマスク	あり	粒子捕集効率 95%以上、細菌濾過効率 95%以上	なし
2	立体型 (単価：167 円)	ピッタマスク	なし	花粉 99%捕集	隙間を作りにくい構造
3	カップ型 (単価：189 円)	使い捨て式防塵マスク	なし	DS2 (粒子捕集効率 95%)	なし
4	カップ型 (単価：431 円)	活性炭入り防塵マスク	あり	DS2 (粒子捕集効率 95%)	なし

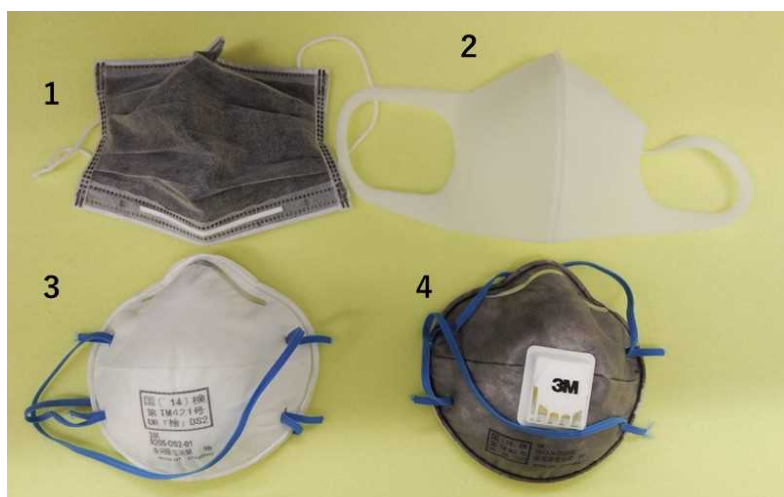


図 2.14 対象としたマスクの写真

### (1) 透過率

実験系を図 2.15 に示す。粒子状物質と  $I_2$  は別々に実験を行ったが、使用したフィルターホルダー (図 2.16) は同じである。フィルターホルダー (直径 47 mm) は、マスクなどのフィルターをホルダーに挟み込むことが可能である。粒子状物質の透過率に関する実験系は平成 30 年度事業の実験系と同じである。粒子発生器には 6-Jet Atomizer (TSI 社製 Model 9306) を用い、NaCl (粒子密度  $2,164 \text{ kg m}^{-3}$ ) の質量濃度 0.7% 水溶液を入れ、粒子を発生させた。発生した粒子を中和器<sup>7</sup>に通し、実環境と同じ条件とした。粒子濃度測定器には SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI

<sup>7</sup> 内蔵された Am-241 から  $\alpha$  線が放出され、導入されたガスを電離することで正および負のイオンが同濃度で発生し、発生した両極イオンが粒子と付着することで安定して既知の帯電量分布を与える。

社製 Model3910) を用いた。I<sub>2</sub>源、I<sub>2</sub>濃度測定器は沈着率・浸透率試験 (2.1.1 項) と同じものである。流路を切り替えることで、フィルターを通過する前と後の対象物質の濃度を測定することが可能である。また、フィルターホルダーに送り込む流量を調整することで、フィルターホルダーを通過する空気の流量を調整することが可能である。

フィルターホルダーに対象のマスクをセットし、粒子または I<sub>2</sub> を発生し続けた。本実験では、フィルターホルダーを通る流速を 0.2 m s<sup>-1</sup> (フィルターホルダーの断面積を掛けた値は 1.2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) とした。この流量は、放射線医学総合研究所 (1998) が示した日本人の呼吸率 (「家事の身体活動」 1.17 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) に相当する。それぞれのマスクに対して、マスクを通過する前後の粒子または I<sub>2</sub> 濃度を測定した。

マスクの透過率  $F_m$  はマスクを通過する前と後の濃度の比であるため、以下の式で表される。

$$F_m = \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (2.15)$$

$C_{out}$  : マスクを通過した後の粒子または I<sub>2</sub> 濃度 (m<sup>-3</sup>)

$C_{in}$  : マスクを通過する前の粒子または I<sub>2</sub> 濃度 (m<sup>-3</sup>)

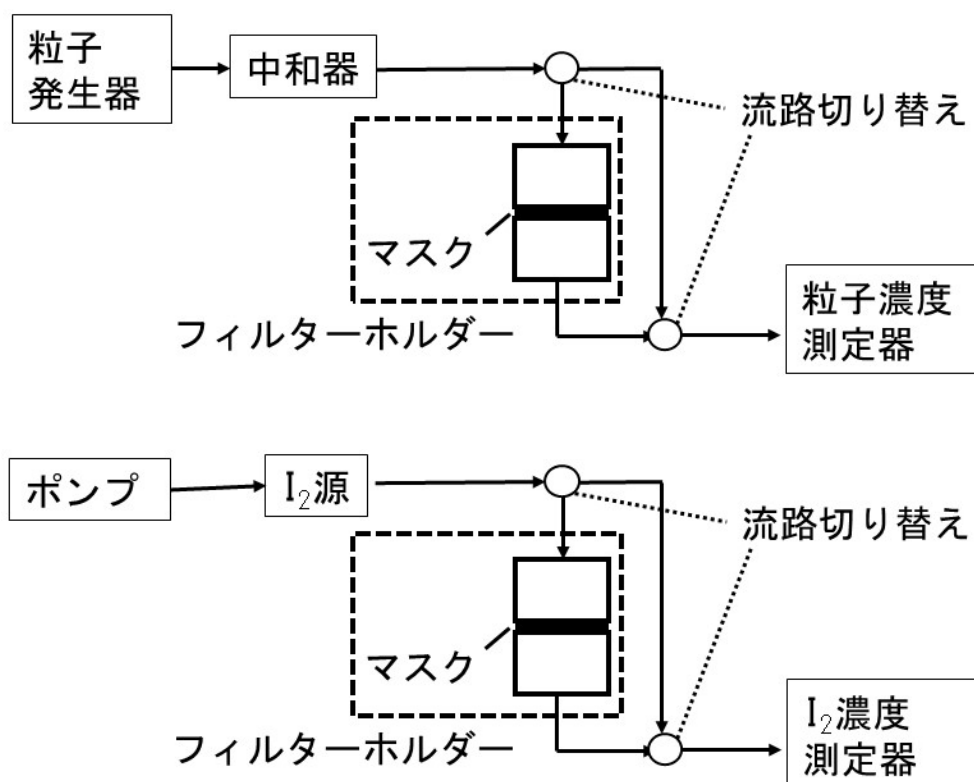


図 2.15 マスクの透過率に関する実験系 (上: 粒子状物質、下: I<sub>2</sub>)

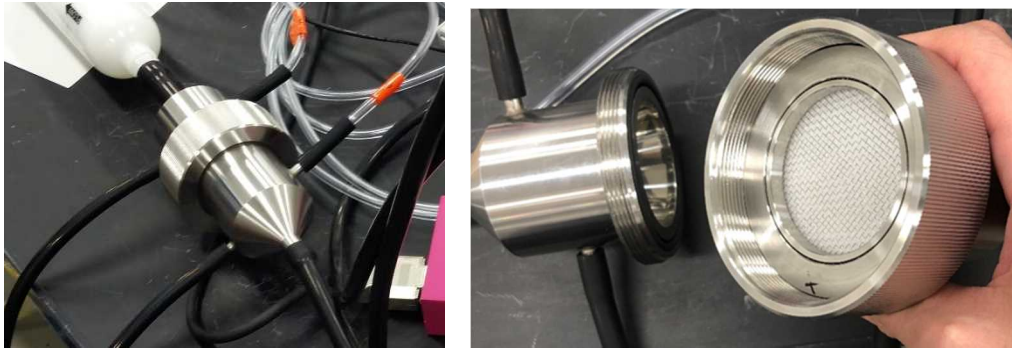


図 2.16 フィルターホルダーの写真

## (2) 漏れ率

漏れ率に関する実験は、粒子状物質のみを対象とした。漏れ率は労研式マスクフィッティングテスター（柴田科学製, MT-05U 型）を利用して求めた。マスクフィッティングテスターはマスク着用時のマスク内外の粒子濃度比を測定している。すなわち、式(2.14)の除去効果  $P_m$  を求めている。そこで、マスクフィッティングテスターの指示値  $P_m$  と透過率試験で求めた  $F_m$  を式(2.14)に代入して、漏れ率  $X$  を評価した。

マスクフィッティングテスターの初期設定として、粒子径範囲を  $0.3 \mu\text{m}$  以上、測定時間を 10 秒、パージ時間を 10 秒として実験を行った。

実験の流れは、以下のとおりである。

1. 普段通りにマスクを着用している<sup>8</sup>時の漏れ率を測定。
2. 測定後に、鼻、頬、あご部とマスクの境界部の写真を撮影。
3. 4 種全てのマスクについて、1. と 2. を実施。
4. より漏れ率が低くなると考えられる着用方法時の漏れ率を測定。
5. 測定後、鼻、頬、あご部とマスクの境界部の写真を撮影。
6. 4 種全てのマスクについて、5. と 6. を実施。

また、本測定器はたばこの煙中に含まれる粒子も周囲の粒子と区別せずに感知する。たばこの影響を除くため、喫煙者に対しては、実験前に「たばこを吸ってから 1 時間以上経過していること」の確認を行った。

漏れ率の測定には、付属の試験ガイドを用いた。試験ガイドの片方で外側の粒子濃度を測定し、もう片方でマスク内の粒子濃度を測定した（図 2.17）。片方の試験ガイドを顔面とマスクの間に挿入し、試験ガイドによってマスクと顔の間の隙間が広がらない、かつ流路をふさがないように、手で軽く抑えた。結露した水滴も本測定器の誤差要因として挙げられる。それを防ぐために、付属のヒーターで測定のたびに流路を暖めた。

より漏れ率が低くなると考えられるマスクの着用方法は、プリーツ型と立体型に対しては明星（2013）の論文を参考に、カップ型に対しては医療機関の HP（公立陶生病院）を参考に以下の

<sup>8</sup> カップ型のマスクを着用したことがある人はほとんどおらず、着用方法を知らない人がいた。その場合は、普段通りの着用方法として、「カップを口の部分に当て、ゴムひもを後ろにかけるように」としか助言をしなかった。鼻付近の金属部を調整するかしないか、ゴムひもをかける位置は対象者に一任した。

着用方法を考案した。

(プリーツ型と立体型)

1. マスクを中心で二つ折りにし、上下を引いて扇のように広げる (図 2.18)。
2. 上部の金属を折り、鼻頭に合うように曲げる (図 2.19)。
3. 顎の隙間が埋まるように指で押さえ、その部分をホチキス留めする (図 2.20)。
4. マスクの片方の紐を玉結びする (図 2.21)。
5. ティッシュペーパーを半分に折り、片側から幅 2cm くらいで、約 3 回折り込む (図 2.22)。
6. 5. で作成したティッシュペーパーを折り目の部分を鼻頭に当て、その上からマスクを着用する (図 2.23)。
7. なるべく目付近の高さで、頭の後ろでもう片方の紐を玉結びした部分に引っ掛ける (図 2.24)。
8. マスク着用後に呼吸をし、空気が鼻付近で漏れる場合は、ティッシュの折り目回数を調整する、頬付近から漏れる場合は紐のかける高さを高くする、または玉結びの位置を変えて紐の引っ張り具合を調整する、顎付近から漏れる場合はマスクを首元まで引っ張る、またはホチキス留めをする場所を変える。

(カップ型)

1. 鼻当てを上にして、マスクが顎を包むようにかぶせる (図 2.25)。
2. 上部の金属を折り、鼻頭に合うように曲げる (図 2.26)。
3. 上側のゴムバンドを頭頂部近くにかける (図 2.27)。
4. 下側のゴムバンドを首の後ろにかける (図 2.28)。
5. マスク着用後に呼吸をし、空気が漏れていないかを確認する。



図 2.17 漏れ率の測定状況



図 2.18 漏れ率が低くなる着用方法。手順1（プリーツ型、立体型）。



図 2.19 漏れ率が低くなる着用方法。手順2（プリーツ型、立体型）。

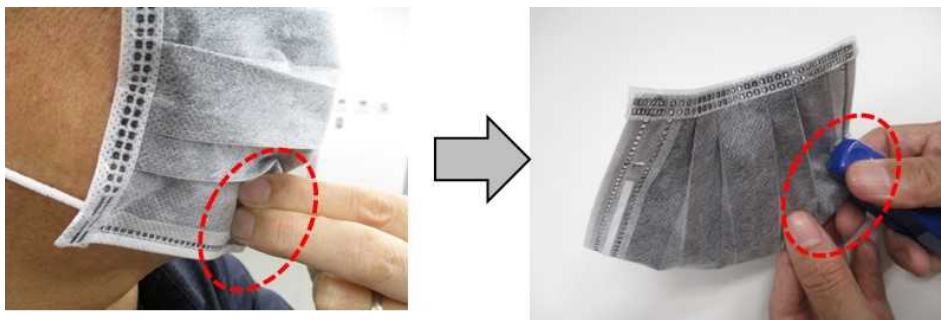


図 2.20 漏れ率が低くなる着用方法。手順3（プリーツ型、立体型）。



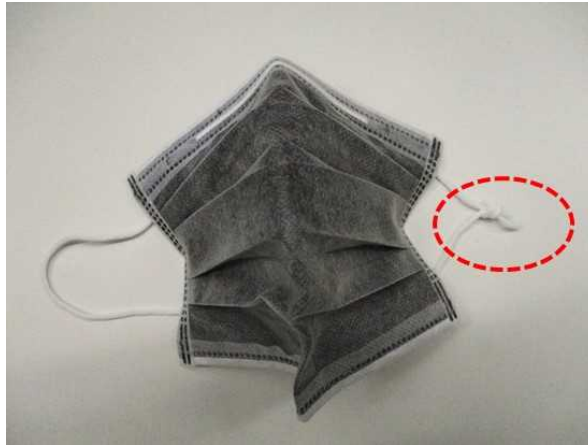


図 2.21 漏れ率が低くなる着用方法。手順 4 (プリーツ型、立体型)。

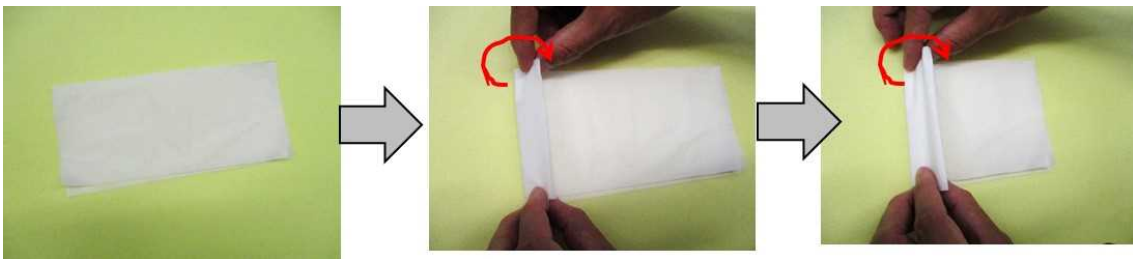


図 2.22 漏れ率が低くなる着用方法。手順 5 (プリーツ型、立体型)。



図 2.23 漏れ率が低くなる着用方法。手順 6 (プリーツ型、立体型)。



図 2.24 漏れ率が低くなる着用方法。手順7 (プリーツ型、立体型)。

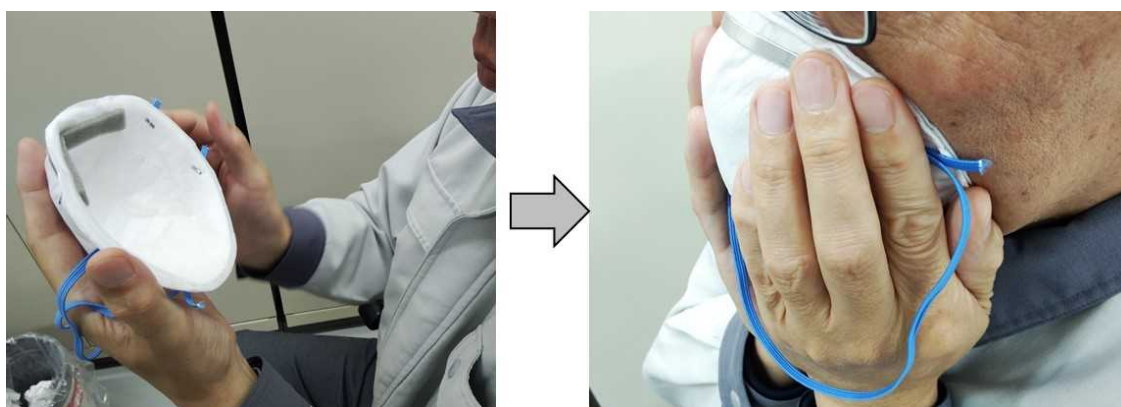


図 2.25 漏れ率が低くなる着用方法。手順1 (カップ型)。



図 2.26 漏れ率が低くなる着用方法。手順2 (カップ型)。



図 2.27 漏れ率が低くなる着用方法。手順3 (カップ型)。



図 2.28 漏れ率が低くなる着用方法。手順4 (カップ型)。

## 2.2.2 実験結果

### (1) 透過率

図 2. 29 に粒子状物質に対するマスクの透過率を示す。マスク No.2 の透過率は約 80%であり、それ以外は約 5%であった。粒径 0.1~0.5  $\mu\text{m}$  の範囲では、透過率の粒径依存性は見られなかった。同じフィルターであれば、透過率は粒径が大きいほど小さくなり、粒径 0.1~1  $\mu\text{m}$  では捕集効率が最も小さくなると報告されている (NUREG/CR-6410, 1998)。マスク No.2 に記載してあった捕集効率は花粉に対して 99% (透過率 1%) であった。花粉の粒径は約 30  $\mu\text{m}$  であり、今回対象とした粒径よりも 100 倍程度大きい。フィルターの捕集対象が粒径 0.1~1  $\mu\text{m}$  ではなかったため、透過率が高い (捕集効率が低い) 結果となったと考えられる。一方で他のマスクの性能試験で対象とされた粒径は約 0.1  $\mu\text{m}$  であり、今回対象とした粒径とほぼ同じである。これらの結果を踏まえると、原子力発電所事故時に放出される粒子状物質に適切な保護具は、N95、DS1、DS2、DS3 を認定する際に使用される粒径 0.1  $\mu\text{m}$  程度の試験粒子で、捕集効率試験が行われているものである。

図 2. 30 に  $\text{I}_2$  に対するマスクの透過率を示す。透過率はマスク No.1 で約 20%、マスク No.2 で約 5%、マスク No.3 で約 55%、マスク No.4 で約 2%であった。マスク No.3 と No.4 の違いは活性炭フィルターの有無だけであり、この二つを比較すると、活性炭フィルターが付属することで  $\text{I}_2$  の透過率が低くなることが示されている。マスク No.1 も活性炭フィルターが付属しており、透過率が No.3 よりも低くなったと考えられる。No.2 は活性炭フィルターが付属していないものの、透過率が No.1 の次に低い値であった。この原因は不明であるが、マスクフィルターの素材に関係している可能性がある。No.2 のフィルター素材はポリウレタン素材であり、他のマスクは不織布である (原料の記載は無し)。今回の結果からは、少なくとも活性炭フィルターを付属することで  $\text{I}_2$  による吸入を低減できることが示された。

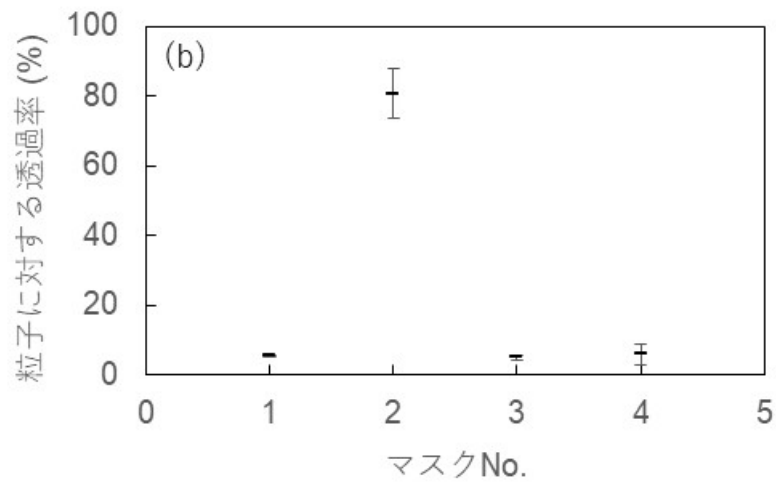
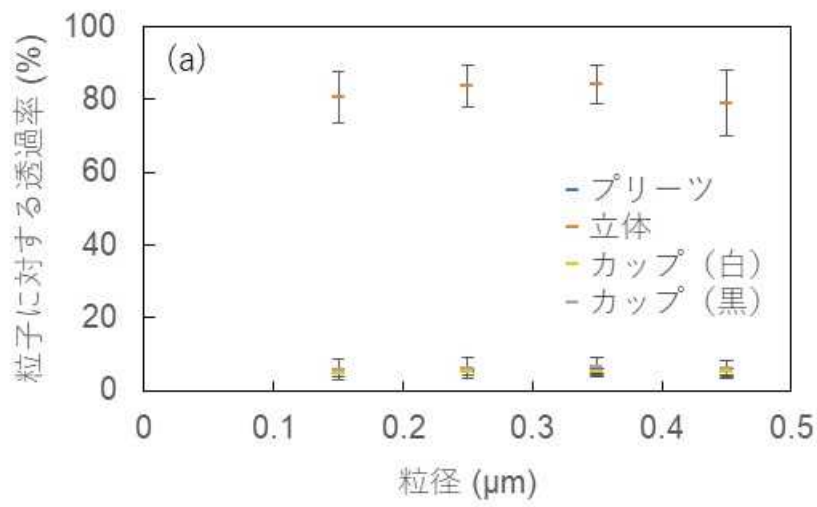


図 2. 29 粒子状物質に対するマスクの透過率。(a)は粒径と透過率の関係、(b)は粒径 0.3~0.4 μm の粒子状物質の透過率。各プロットは実験値の平均値、誤差棒は標準偏差。

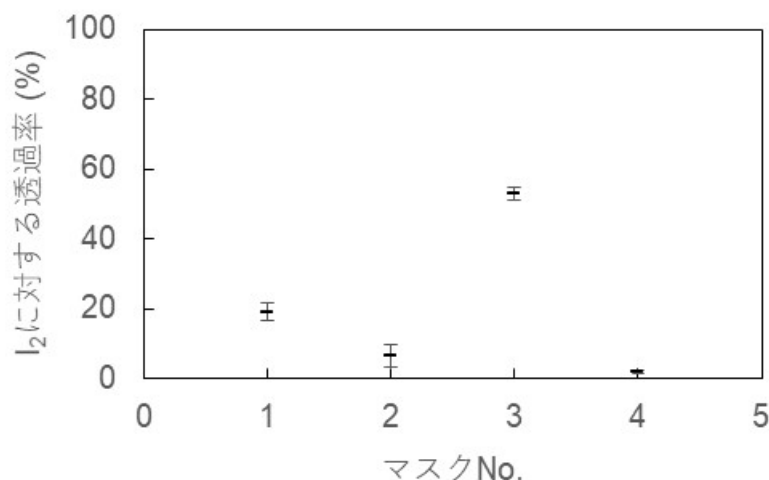


図 2.30 I<sub>2</sub>に対するマスクの透過率。各プロットは実験値の平均値、誤差棒は標準偏差。

## (2) 漏れ率

図 2.31 に各マスクの漏れ率を示す。なお、漏れ率の全測定データを付録 1 に示す。普段通りに着用した場合、一般的なマスクであるマスク No.1 と 2 の漏れ率は 90%を超えていた。比較的漏れ率が低くなる構造であるカップ型のマスク No.3 と 4 の漏れ率は約 30%であった。漏れ率が低くなる方法で着用した場合、平均値で見ると全てのマスクの漏れ率は低くなった。マスク No.1 の漏れ率は約 60%、No.2 は約 50%、No.3 と 4 は約 20%であった。

普段通りにマスクを着用した時の写真を見ると、一般的によく使われるマスク形状であるプリーツ型と立体型では、特に鼻付近、頬付近、顎付近に隙間が空いていた (図 2.32 と図 2.33)。立体型はプリーツ型に比べて隙間の大きさは小さかったものの、プリーツ型との漏れ率の違いは見られなかった。カップ型マスクの普段通りの着用では、写真では隙間をほとんど見ることができなかったものの、ほとんどの人がゴムひもの片方を頭頂部付近にかけていなかった。そのため、ゴムひもの引っ張りが弱く、頬付近に隙間が生じたため、漏れが生じたと考えられる。また、マスクが鼻にフィットしていなかったことも原因の一つとして考えられ、この 2 点を注意するだけで、約 10%の漏れ率の改善できる。

今回の実験では、漏れ率が低くなる方法で着用した後に、空気の漏れの有無を確認するユーザーシールチェック (フィットチェック、プリーツ型及び立体型では手順 8、カップ型では手順 5) を行う人はほとんどいなかった。漏れ率は、適切な着用方法を知っている状態で、その着用方法で着用する頻度が高くなるほど改善するといわれている (飯田と吉川, 2014)。また、正しい着用方法をした場合であっても、マスクと顔の形状がうまく合っていない場合には、漏れ率の改善は小さいといわれている (飯田と吉川, 2014)。写真のみの判断ではあるが、写真上で隙間がほとんど見えず、正しく着用できていると思われる人のみを抜き出した場合の漏れ率を図 2.34 に示す。正しい着用方法をしたにもかかわらず、図 2.33 のように鼻付近に隙間が生じている人を対象から外した。全員を対象とした図 2.31 と比較して、漏れ率は低くなった。

以上を踏まえると、漏れ率が低くなる着用方法を記載する際、ユーザーシールチェックの必要性を明記すること、漏れの改善が感じられない場合にはマスクの大きさを変えるなどの処置の必要性を明記することが重要であると考えられる。

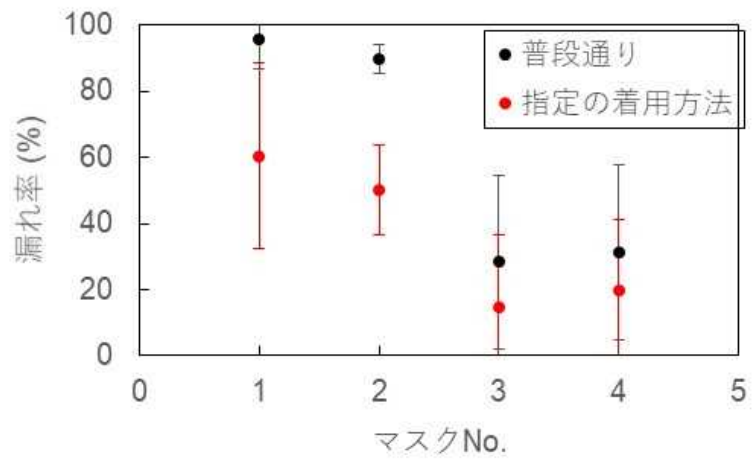


図 2.31 マスクの漏れ率。漏れ率は対象者全員の平均値と標準偏差を示す。

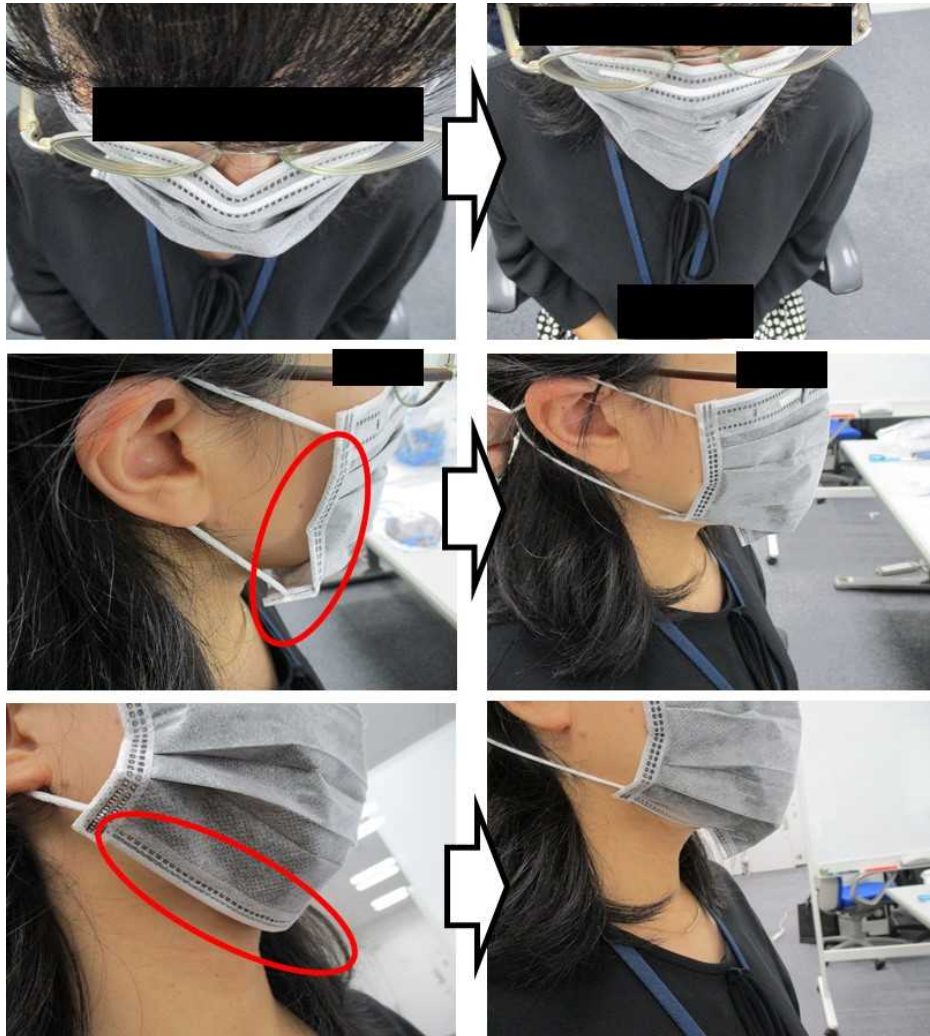


図 2.32 普段通りの着用方法（左）と指定の着用方法（右）の写真例。

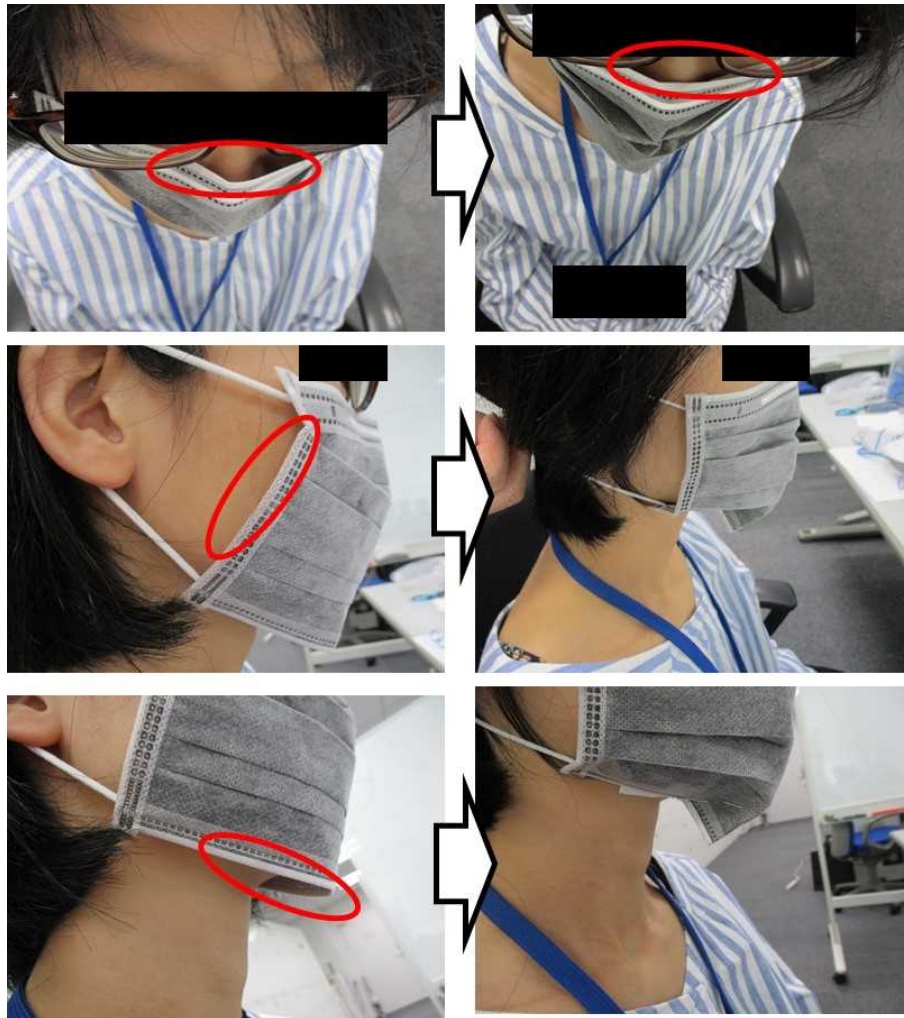


図 2.33 普段通りの着用方法（左）と指定の着用方法（右）の写真例。この写真は指定の着用方法でも鼻付近に隙間が空いている例。



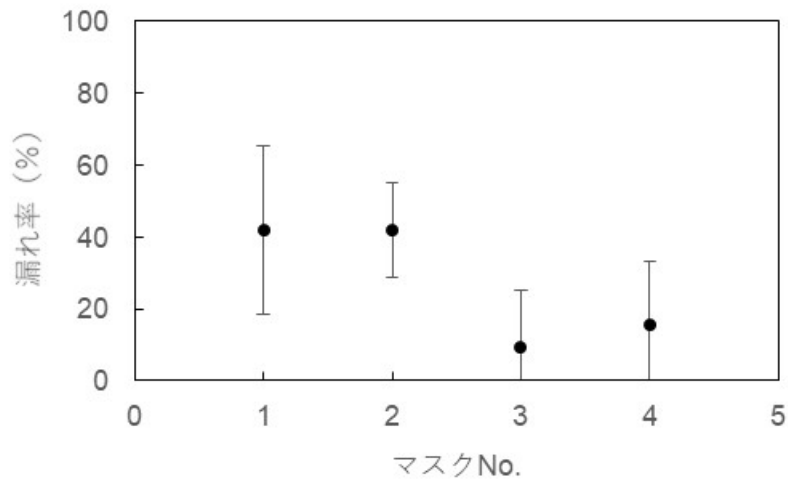


図 2.34 マスクの漏れ率。漏れ率は、写真によりマスクを正しく着用したと考えられる人の平均値と標準偏差を示す。

### 2.2.3 除去効果

表 2.3 に今回対象としたマスクの除去効果  $P_m$  を示す。透過率は実験結果の平均値（図 2.29 と図 2.30）を、漏れ率は実験結果の平均値（図 2.31 と図 2.34）を使用した。0.3  $\mu\text{m}$  程度の粒子の挙動は気体とほぼ同じであると考え、 $\text{I}_2$  の漏れ率は粒子状物質の漏れ率と同じであると仮定した。普段通りにマスクを着用した場合、マスク No.1 と 2 の除去効果は粒子状物質と  $\text{I}_2$  ともに 10%以下であった。カップ型のマスク No.3 と 4 の除去効果は粒子状物質で約 65%、 $\text{I}_2$  で約 34% (No.3) と約 67% (No.4) であった。着用方法を改善した場合、マスク No.1 は粒子状物質と  $\text{I}_2$  ともに改善がみられ、除去率は粒子状物質で約 55%、 $\text{I}_2$  で約 47%であった。マスク No.2 では粒子状物質の透過率が大きいとため、粒子状物質の除去効果は約 11%と小さいものの、 $\text{I}_2$  に対しては約 54%であった。マスク No.3 と 4 では着用方法の改善によって除去率は 15%程度の改善であった。

本結果から、一般的なマスクでは正しく着用しないと除去効果がほとんど見込まれないこと、また、活性炭フィルターを付属しているマスクのほうが  $\text{I}_2$  の除去効果が高いことが示された。今回対象としたマスクでは、No.4 のマスクが最も除去効果が高いが、一般的なマスクの No.1 でも正しい着用方法をすることで、半分程度の除去効果が見込まれることが示された。

表 2.3 対象としたマスクの除去効果

マスク No.	粒子の除去率 (普段通り)	粒子の除去率 (指定着用方法)	$\text{I}_2$ の除去率 (普段通り)	$\text{I}_2$ の除去率 (指定着用方法)
1	4%	38% (55%)	4%	32% (47%)
2	2%	10% (11%)	10%	47% (54%)
3	67%	80% (83%)	34%	40% (43%)
4	65%	76% (80%)	67%	78% (83%)

\*指定着用方法の ( ) 内の数字は正しく着用されたと考えられる人のみの漏れ率を使用した場合。

## 2.3 家屋調査

平成 30 年度事業までの実家屋実験では、空気中の物質量の減衰から、沈着率を算出した。この手法の場合、天井面、壁面、床面への沈着率の平均として沈着率が算出される。実際の天井材、壁面材、床面材の放射能濃度を測定することにより、面の向きによる沈着率の違いを把握できる。さらに他の面への沈着の影響を除くことができるため、平成 30 年度事業で実施した実験よりも、材質依存性についてより確からしい結果を得ることができる。ダストサンプリング調査では、空気中の放射性エアロゾルを捕集して直接測定するため、平成 30 年度事業で実施した実験よりも沈着の影響を除くことができ、より精度の高い結果が得られること、実家屋実験の結果（非放射性エアロゾル）を放射性エアロゾルにも適用できることを確認することができる。

### 2.3.1 調査方法

本調査は、帰還困難区域内の家屋で家材採取（2 軒）と屋内外のダストサンプリング（3 軒）を行った。家屋の特徴を表 2.4 に示す。

表 2.4 対象家屋の特徴と調査内容

	構造	建築年	家屋内除染	家材採取	ダストサンプリング
家屋 A	木造	2004 年	×	○	○
家屋 B	木造	2009 年	×	○	○
家屋 C	木造	1984 年	○	×	○

#### (1) 家材採取

採取した家材は床材、内・外壁材、天井材、屋根裏材、及び屋根材である。加えて周辺土壌の採取も行った。採取した家材の一覧を表 2.5 に示す。採取した家材の大きさは特に断りがない限り 50 cm×50 cm である。床材について、材質による違い（畳、フローリング材（木材）、カーペット）、および 1 階と 2 階の違いによる沈着量の違いを調査するために各床材を採取した。内壁材について、材質による違い（壁紙、土壁）、及び 1 階と 2 階の違いによる沈着量の違いを調査するために各内壁材を採取した。天井材について、1 階と 2 階の違いによる沈着量の違いを調査するために各天井材を調査した。屋根材について、材質の違い及び位置の違いを調査するために各屋根材を採取した。また、1 階屋根材は 2 階の屋根から流れてきたものによる影響を除くため、直接雨が当たる位置の屋根材を採取した。

#### (2) 屋内外のダストサンプリング

屋内外のダストサンプリングにはハイボリュームエアサンプラー（柴田科学社製 HV-RW（粉塵用））を用いた。屋内のダストサンプリングは 1 階部屋の中央部、屋外のダストサンプリングは屋内ダストサンプリング部屋に面する場所で行った（図 2.35）。稼働時間は平日の概ね午前 9 時～15 時 30 分である。吸入流量は 1000 L min<sup>-1</sup>とした。稼働時間と吸入量を表 2.6 に示す。

表 2.5 採取した家材一覧 (家屋 A)

家屋	分類	材質	採取条件
A	土 (表層)	土	採取エリア 20 cm×50 cm
A	土 (表層～5cm)	土	U-8 容器サイズ
A	土 (5cm～10cm)	土	U-8 容器サイズ
A	土 (10cm～15cm)	土	U-8 容器サイズ
A	土 (15m～20cm)	土	U-8 容器サイズ
A	床材	畳	
A	床材 (1F)	木材	
A	床材 (2F)	木材	
A	内壁材 (1F)	紙	
A	内壁材 (1F)	土壁	
A	内壁材 (2F)	紙	
A	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
A	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
A	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
A	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
A	天井材 (1F)	紙	
A	天井材 (2F)	紙	
A	天井裏	グラスウール	採取エリア 50 cm×120 cm
A	屋根材 (上方) (1F)	瓦	瓦 1 枚分
A	屋根材 (下方) (1F)	瓦	瓦 1 枚分
A	エアコンフィルター (1F)	エアコンフィルター	そのままの形状で採取
A	エアコンフィルター (2F)	エアコンフィルター	そのままの形状で採取

表 2.5 採取した家材一覧 (家屋 B)

家屋	分類	材質	採取条件
B	土 (表層)	砂利	採取エリア 20 cm×50 cm
B	土 (表層～5cm)	土	U-8 容器サイズ
B	土 (5cm～10cm)	土	U-8 容器サイズ
B	土 (10cm～15cm)	土	U-8 容器サイズ
B	床材	畳	
B	床材 (1F)	木材	
B	床材	カーペット	
B	床材 (2F)	木材	
B	内壁材 (1F)	紙	
B	内壁材 (2F)	紙	
B	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
B	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
B	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
B	外壁材	石膏ボード	採取エリア 30 cm×50 cm
B	天井材 (1F)	紙	
B	天井材 (2F)	紙	
B	天井裏	グラスウール	採取エリア 50 cm×170 cm
B	屋根材 (上方) (2F)	瓦	瓦 1 枚分
B	屋根材 (下方) (2F)	瓦	瓦 1 枚分
B	屋根材 (上方) (2F)	スレート材	採取エリア 20 cm×65 cm
B	屋根材 (下方) (2F)	スレート材	採取エリア 20 cm×65 cm
B	エアコンフィルター (1F)	エアコンフィルター	



図 2.35 ダストサンプリングの様子 (左：屋内、右：屋外)

表 2.6 ダストサンプリングの稼働時間 (家屋 A)

日	屋外				屋内			
	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )
2019/10/30	13:01	15:32	2:31	150.9	13:04	15:32	2:28	147.6
2019/10/31	9:27	15:33	6:06	365.3	9:28	15:33	6:05	364.6
2019/11/1	9:20	15:35	6:15	374.9	9:21	15:35	6:14	374.3
2019/11/5	9:21	15:33	6:12	371.8	9:22	15:33	6:11	371.2
2019/11/6	9:21	15:32	6:11	370.5	9:22	15:32	6:10	369.9
2019/11/7	9:19	15:32	6:13	372.2	9:20	15:32	6:12	371.2
2019/11/8	9:23	15:32	6:09	368.1	9:24	15:32	6:08	367.4
2019/11/11	9:21	15:33	6:12	371.0	9:22	15:33	6:11	370.3
2019/11/12	9:16	15:32	6:16	376.0	9:17	15:32	6:15	375.1
2019/11/13	9:27	15:32	6:05	364.3	9:28	15:32	6:04	363.5
2019/11/14	9:23	15:32	6:09	369.0	9:24	15:32	6:08	368.4
2019/11/15	9:28	14:01	4:33	273.0	9:29	14:05	4:36	276.4
	合計		68:52	4,127.0	合計		68:42	4,119.9

表 2.6 ダストサンプリングの稼働時間 (家屋 B)

日	屋外				屋内			
	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )
2019/11/18	9:14	15:35	6:21	380.3	9:16	15:36	6:20	379.8
2019/11/19	9:11	15:33	6:22	381.7	9:12	15:33	6:21	381.3
2019/11/20	9:15	15:32	6:17	376.7	9:16	15:32	6:16	375.9
2019/11/21	9:14	15:36	6:22	381.9	9:15	15:36	6:21	381.3
2019/11/22	9:11	15:34	6:23	383.3	9:12	15:34	6:22	382.6
2019/11/25	9:13	15:38	6:25	385.7	9:14	15:39	6:25	384.8
2019/11/26	9:09	15:34	6:25	385.1	9:10	15:34	6:24	384.4
2019/11/27	9:14	15:36	6:22	382.1	9:15	15:36	6:21	381.5
2019/11/28	9:11	15:32	6:21	381.3	9:12	15:33	6:21	380.6
2019/11/29	9:11	15:38	6:27	387.3	9:12	15:39	6:27	386.8
2019/12/2	9:13	15:33	6:20	380.2	9:14	15:34	6:20	379.9
2019/12/3	9:13	15:33	6:20	380.3	9:14	15:33	6:19	379.5
2019/12/4	9:13	15:33	6:20	379.9	9:14	15:34	6:20	379.0
2019/12/5	9:19	15:40	6:21	380.9	9:20	15:40	6:20	380.3
2019/12/6	9:14	15:41	6:27	386.6	9:15	15:41	6:26	386.3
2019/12/9	9:13	15:34	6:21	380.9	9:14	15:34	6:20	379.9
2019/12/10	9:19	15:34	6:15	375.3	9:20	15:35	6:15	375.0
	合計		108:09	6,489.5	合計		108:09	6,478.9

表 2.6 ダストサンプリングの稼働時間 (家屋 C)

日	屋外				屋内			
	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )	開始時刻	停止時刻	運転時間	合計流量 (m <sup>3</sup> )
2019/12/11	10:21	15:36	5:15	314.8	10:22	15:36	5:14	314.1
2019/12/12	9:13	15:40	6:27	387	9:14	15:40	6:26	386.4
2019/12/13	9:16	15:41	6:25	384.9	9:16	15:41	6:25	384.8
2019/12/16	9:17	15:34	6:17	376.1	9:18	15:34	6:16	375.3
2019/12/17	9:14	15:35	6:21	380.7	9:15	15:35	6:20	380.3
2019/12/18	9:11	15:35	6:24	384.1	9:12	15:36	6:24	383.7
2019/12/19	9:11	15:40	6:29	388.9	9:12	15:41	6:29	388.8
2019/12/20	9:13	15:42	6:29	388.3	9:14	15:42	6:28	387.8
2019/12/23	9:13	15:35	6:22	381.4	9:15	15:35	6:20	380.4
2019/12/24	9:14	15:34	6:20	379.7	9:15	15:35	6:20	379.5
2019/12/25	9:15	15:30	6:15	374.9	9:16	15:30	6:14	374.2
	合計		69:04	4,140.8	合計		68:56	4,135.3

### (3) 放射能濃度測定

放射能濃度測定には HPGe 検出器を利用した。採取した家材を粉碎または裁断し、U8 容器に入れ、放射能濃度を測定した。エアコンフィルターはフィルターの枠を加えずにフィルター部分のみを測定し、屋根材は他の屋根材と重なっていない部分（雨水が直接当たる部分）を測定した。Ge 検出器で測定する前に U8 容器に入れた家材の面積と重さを測定した。処理前後の写真及び詳しい処理については付録 2 に示す。

#### 2.3.2 測定結果

放射能濃度の測定結果を表 2.7 に示す。放射能濃度  $C$  から面濃度  $A$  への換算は次の式を用いて行った。

$$A = \frac{CW_{\text{測定}}}{S_{\text{測定}}} \quad (2.16)$$

$A$  : 家材中の面濃度 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )

$C$  : 家材中の放射能濃度 ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )

$W_{\text{測定}}$  : U8 容器に入れた家材の重さ (kg)

$S_{\text{測定}}$  : U8 容器に入れた家材の面積 ( $\text{m}^2$ )

ここで、 $A$  は家材表面上に存在する放射能だけではなく、家材中に侵入した放射能も考慮されている。

家屋の放射能分布を図 2.36 に示す。エアコンフィルターを除けば、家屋内では床面の面濃度が最も大きかった。壁面と天井面の面濃度は同程度であった。家屋 A では 1 階と 2 階で面濃度に差は見られなかったものの、家屋 B では 1 階の面濃度は 2 階よりも大きかった。床面と壁面・天井面の面濃度の比は約 100 : 1 であった。Lai and Nazaroff (2000) によると、粒径  $0.2 \mu\text{m}$  以上の粒子は重力沈降の影響が大きくなり、粒径が大きいほど床面への沈着速度が大きくなるのに対し、壁面と天井面への沈着速度は小さくなる。福島第一原子力発電所事故時に放出された粒径は  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  であるため、重力沈降が沈着速度に影響し、面濃度は面の向きによって異なると考えられる。床材間で面濃度を比較すると、カーペット、畳、フローリングの順に面濃度が低くなる傾向であり、この傾向はラボ実験での  $\text{I}_2$  の実験結果と同じであった。また、面濃度の比はカーペット : 畳 : フローリング = 3 : 1.1 : 1 であり、濃度比もラボ実験での  $\text{I}_2$  の床面のみの沈着量の比と近い値であった。

屋内では、エアコンフィルターの面濃度が大きく、床面と同程度であった。天井裏のグラスウール中の放射能は、床面の半分から同程度の値であり、天井裏も部屋と同様の沈着量であったことが示されている。

屋根材の面濃度は、屋根材と位置によっても異なるが、床材と同様の値もしくは 5 倍程度高い値であった。瓦よりもスレート材の沈着量は 5 倍程度大きい傾向であった。また、瓦とスレート材で屋根材の位置による傾向は異なっており、瓦では屋根の上部（高い位置）の面濃度が高く、スレート材では屋根の下部（低い位置）の放射能濃度が低い結果であった。外壁材と屋根材を比較すると、外壁材は屋根材の面濃度は 5 分の 1 程度であった。外壁材は下部に行くほど面濃度が高い傾向が見られた。

ダストサンプリングの結果は、家屋内を除染していない家屋 A と B では家屋内の濃度が高く、

家屋を除染している家屋 C では家屋外の濃度が高かった。当初は、再浮遊物質による家屋外の濃度が家屋内の濃度よりも高いことを想定していた。しかし、家屋 A と B では家屋内の再浮遊の影響により家屋内の濃度が家屋外よりも大きくなったため、予想とは異なった結果が得られたと考えられる。そこで家屋 C のみで、平成 30 年度事業までの粒子状物質の浸透率の妥当性を検討した。測定期間中の家屋 C の自然換気率を測定していないため、赤林の関係図を用いて、自然換気率を推定した。測定期間中の風速は約  $2\text{ms}^{-1}$  であり、周囲に建物の少ない環境であり、建築年は 1984 年である。これらの条件では自然換気率は約  $0.2\text{h}^{-1}$  と推定される。ダストサンプリングで得られた屋内外の濃度比は約 0.52 (内/外) であった。沈着率を  $0.05\text{h}^{-1}$  とし、式 (2.7) に代入すると、浸透率は約 0.65 であった。この値は平成 30 年度事業までの結果と同等であり、非放射性エアロゾルでも放射性エアロゾルでも平成 30 年度事業で得られた浸透率と自然換気率の関係を使用できることを示している。

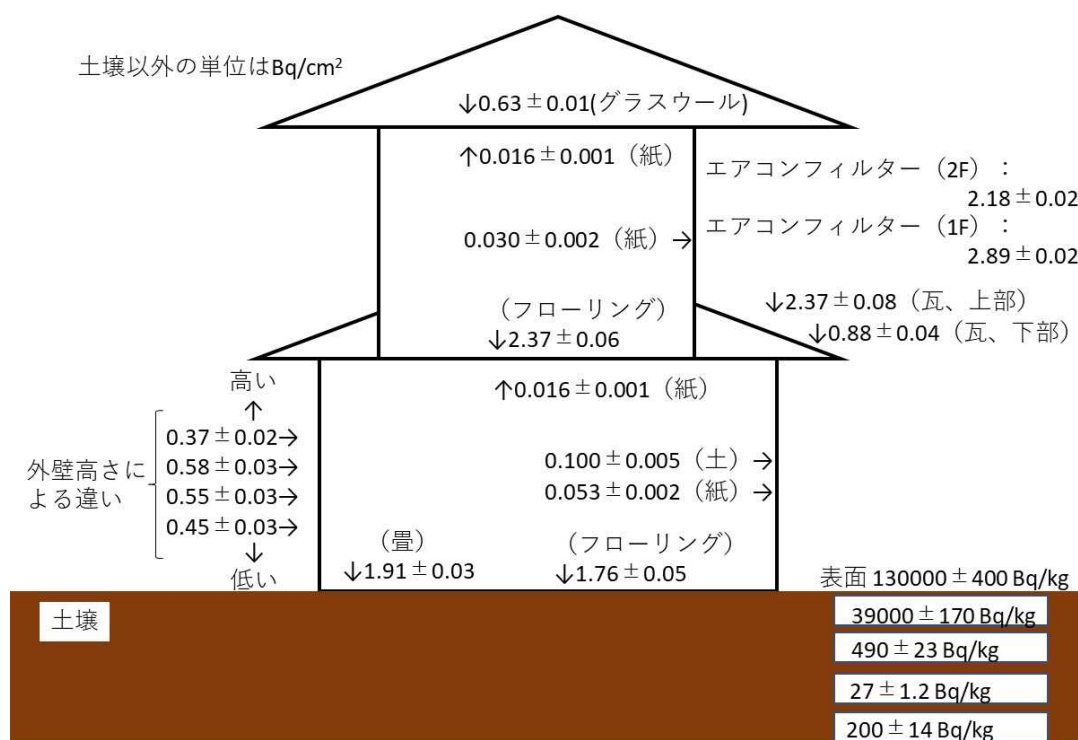


図 2.36 家屋内の放射能濃度の分布 (家屋 A)



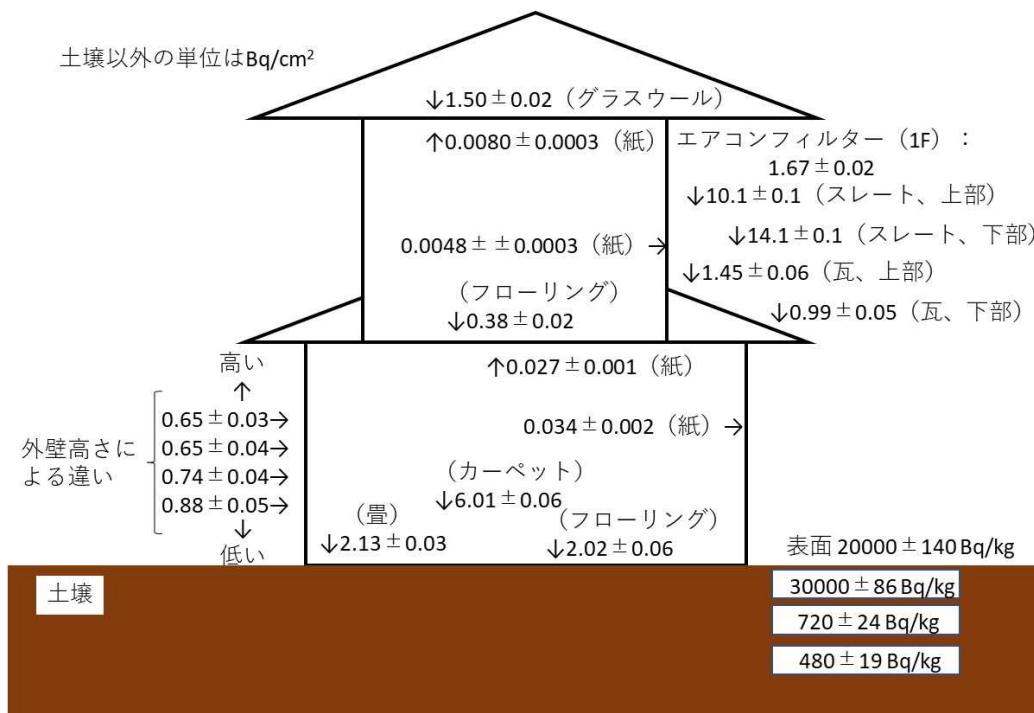


図 2.36 家屋内の放射能濃度の分布 (家屋 B)

表 2.7 各家材の放射能濃度 (家屋 A)

家屋	分類	材質	Cs-134 (Bq kg <sup>-1</sup> )	Cs-137 (Bq kg <sup>-1</sup> )	Cs-137 (Bq m <sup>-2</sup> )
A	土 (表層)	土	9100±120	130000±400	—
A	土 (表層~5cm)	土	2500±48	39000±170	—
A	土 (5cm~10cm)	土	22±6.6	490±23	—
A	土 (10cm~15cm)	土	ND(<1.5)	27±1.2	—
A	土 (15m~20cm)	土	13±13	200±14	—
A	床材	畳	1600±95	24000±350	1.91±0.03
A	床材 (1F)	木材	180±24	2800±86	1.76±0.05
A	床材 (2F)	木材	360±40	6000±150	2.37±0.06
A	内壁材 (1F)	紙	74±14	1200±43	0.053±0.002
A	内壁材 (1F)	土壁	3.0±0.92	48±2.2	0.100±0.005
A	内壁材 (2F)	紙	56±13	820±44	0.030±0.002
A	外壁材	石膏ボード	13±3.8	240±13	0.37±0.02
A	外壁材	石膏ボード	23±5.9	340±18	0.58±0.03
A	外壁材	石膏ボード	22±5.1	250±14	0.55±0.03
A	外壁材	石膏ボード	17±5.4	330±18	0.45±0.03
A	天井材 (1F)	紙	28±7.7	430±23	0.016±0.001
A	天井材 (2F)	紙	43±12	520±31	0.016±0.001
A	天井裏	グラスウール	920±75	14000±280	0.63±0.01
A	屋根材 (上方)	瓦	45±7.4	720±25	2.37±0.08
A	屋根材 (下方)	瓦	26±4.4	310±14	0.88±0.04
A	エアコンフィルター (1F)	エアコンフィルター	24000±540	350000±1900	2.89±0.02
A	エアコンフィルター (2F)	エアコンフィルター	14000±450	200000±1600	2.18±0.02
A	ダストサンプル (内)	フィルター	ND(<0.00018 Bq m <sup>-3</sup> )	0.0027±0.0002 Bq m <sup>-3</sup>	—
A	ダストサンプル (外)	フィルター	ND(<0.00015 Bq m <sup>-3</sup> )	0.00094± 0.00011 Bq m <sup>-3</sup>	—

表 2.7 各家材の放射能濃度 (家屋 B)

家屋	分類	材質	Cs-134 (Bq kg <sup>-1</sup> )	Cs-137 (Bq kg <sup>-1</sup> )	Cs-137 (Bq m <sup>-2</sup> )
B	土 (表層)	砂利	1400±39	20000±140	—
B	土 (表層~5cm)	土	2000±50	30000±170	—
B	土 (5cm~10cm)	土	45±7.9	720±24	—
B	土 (10cm~15cm)	土	29±5.1	480±19	—
B	床材	畳	1700±91	24000±320	2.13±0.03
B	床材 (1F)	木材	160±23	3000±86	2.02±0.06
B	床材	カーペット	4600±200	71000±7750	6.01±0.06
B	床材 (2F)	木材	39±12	560±35	0.38±0.02
B	内壁材 (1F)	紙	58±13	880±44	0.034±0.002
B	内壁材 (2F)	紙	11±3.5	130±8.1	0.0048±0.0003
B	外壁材	石膏ボード	23±5.8	380±17	0.65±0.03
B	外壁材	石膏ボード	21±6.0	370±21	0.65±0.04
B	外壁材	石膏ボード	29±8.2	450±25	0.74±0.04
B	外壁材	石膏ボード	27±8.5	490±25	0.88±0.05
B	天井材 (1F)	紙	42±9.0	730±32	0.027±0.001
B	天井材 (2F)	紙	14±3.2	210±8.3	0.0080±0.0003
B	天井裏	グラスウール	2400±130	39000±500	1.50±0.02
B	屋根材 (上方)	瓦	39±7.2	470±20	1.45±0.06
B	屋根材 (下方)	瓦	19±5.6	320±16	0.98±0.05
B	屋根材 (上方)	スレート材	680±31	9700±110	10.1±0.1
B	屋根材 (下方)	スレート材	820±33	12000±120	14.1±0.1
B	エアコンフィルター (1F)	エアコンフィルター	13000±460	180000±1600	1.67±0.02
B	ダストサンプル (内)	フィルター	ND(<0.00016 Bq m <sup>-3</sup> )	0.0016±0.0001 Bq m <sup>-3</sup>	—
B	ダストサンプル (外)	フィルター	ND(<0.00047 Bq m <sup>-3</sup> )	0.00061± 0.00007 Bq m <sup>-3</sup>	—

表 2.7 各家材の放射能濃度 (家屋 C)

家屋	分類	材質	Cs-134 (Bq m <sup>-3</sup> )	Cs-137 (Bq m <sup>-3</sup> )
C	ダストサンプル (内)	フィルター	ND(<0.00018 Bq m <sup>-3</sup> )	0.00068± 0.00009
C	ダストサンプル (外)	フィルター	ND(<0.00017 Bq m <sup>-3</sup> )	0.0013±0.0001

## 2.4 屋内退避による吸入被ばく低減効果の解析方法

### 2.4.1 解析方法の概要

本事業では屋内退避による吸入被ばくの低減効果を表す尺度として線量比（以下、被ばく低減係数）を用いた。被ばく低減係数の定義は核種  $i$  のプルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの積算吸入量 ( $S_i(t)$ ) に吸入摂取による甲状腺等価線量または実効線量への換算係数 ( $e_i$ ) をかけた値の屋内と屋外の比  $D_{in}(t)/D_{out}(t)$  である。

$$\frac{D_{in}(t)}{D_{out}(t)} = \frac{\sum_i S_{i,in}(t) \cdot e(i)}{\sum_i S_{i,out}(t) \cdot e(i)} \quad (2.17)$$

$D_{in}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までに屋内で受けた吸入摂取による線量の積算値 (Sv)

$D_{out}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までに屋外で受けた吸入摂取による線量の積算値 (Sv)

$S_{i,in}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの核種  $i$  の屋内での積算吸入量（積算空気中放射能濃度に呼吸量を掛けたもの） (Bq)

$S_{i,out}(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの核種  $i$  の屋外での積算吸入量（積算空気中放射能濃度に呼吸量を掛けたもの） (Bq)

$e_i$  : 核種  $i$  の吸入摂取による甲状腺等価線量または実効線量への換算係数 (Sv Bq<sup>-1</sup>)

各核種の  $e_i$  は ICRP Publ. 119 の値を用いた（表 2.8）。

本年度は、平成 30 年度事業と同様の CP モデルを基に作成した評価コードを用いて、屋内退避による吸入被ばく低減効果の解析を行った。評価コードの概略図を図 2.37 に示す。内部被ばく線量評価コードは自然換気率評価コードと屋内放射能濃度計算コードで構成される。

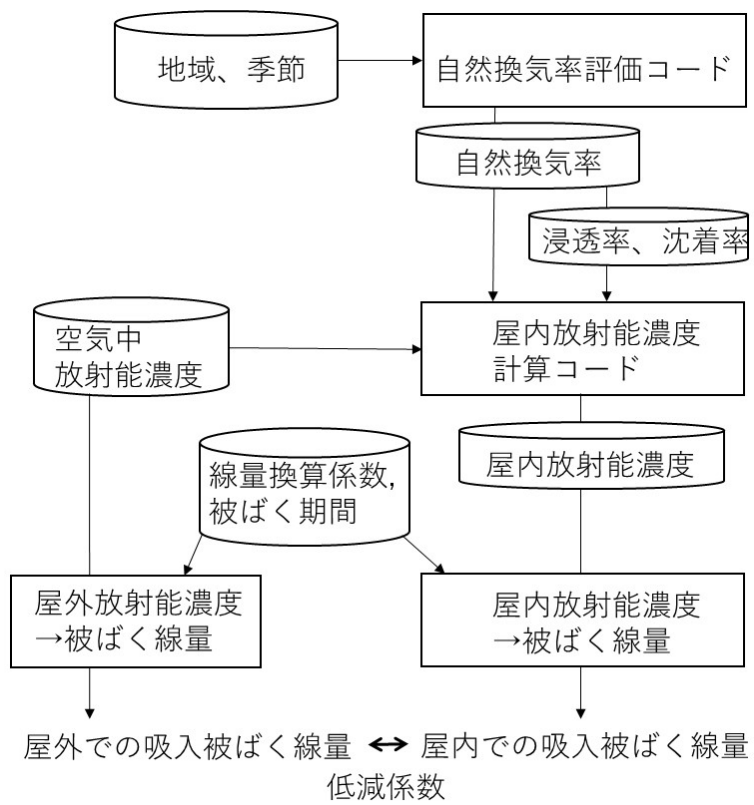


図 2.37 吸入被ばく線量評価コードの概要

表 2.8 各核種の半減期と放射能から吸入摂取による実効線量（大人、粒径 0.3 μm）及び甲状腺等価線量（1 歳児、粒径 0.3 μm）への換算係数（ICRP, 1995, 2012）（1/2）

核種	粒子状のタイプ* または化学形態	壊変定数 (h <sup>-1</sup> )	実効線量 (Sv Bq <sup>-1</sup> )	甲状腺等価線量 (Sv Bq <sup>-1</sup> )
Sr-90	S	2.7 E-06	2.0 E-07	1.8 E-10
Y-90	S	1.1 E-02	1.2 E-09	3.4 E-13
Zr-95	M	4.5 E-04	5.0 E-09	4.2 E-09
Nb-95m	M	8.0 E-03	6.8 E-10	2.0 E-10
Nb-95	M	8.2 E-04	1.6 E-09	1.7 E-09
Mo-99	M	1.1 E-02	7.4 E-10	1.4 E-10
Tc-99m	M	1.2 E-01	1.1 E-11	4.5 E-11
Ru-103	M	7.4 E-04	2.7 E-09	1.4 E-09
Rh-103m	M	7.4 E-01	3.3 E-12	7.8 E-14
Ru-103	RuO <sub>4</sub>	7.4 E-04	1.1 E-09	4.1 E-09
Ru-106	S	7.7 E-05	8.4 E-08	3.8 E-09
Ru-106	RuO <sub>4</sub>	7.7 E-05	1.8 E-08	9.1 E-08
Sb-125	M	2.9 E-05	5.3 E-09	3.9 E-09
Sb-127	M	7.5 E-03	1.4 E-09	2.8 E-10
Te-131	M	1.7 E+00	1.7 E-11	3.7 E-10
Te-132	M	8.9 E-03	1.7 E-09	4.0 E-08
I-129	F	4.5 E-12	2.6 E-08	1.4 E-06
I-129	I <sub>2</sub>	4.5 E-12	9.6 E-08	3.9 E-06
I-129	CH <sub>3</sub> I	4.5 E-12	7.4 E-08	3.0 E-06
I-131	F	3.6 E-03	7.9 E-09	1.1 E-06
I-131	I <sub>2</sub>	3.6 E-03	2.0 E-08	3.2 E-06
I-131	CH <sub>3</sub> I	3.6 E-03	1.5 E-08	2.5 E-06
I-132	F	3.0 E-01	6.6 E-11	1.3 E-08
I-132	I <sub>2</sub>	3.0 E-01	3.1 E-10	3.8 E-08
I-132	CH <sub>3</sub> I	3.0 E-01	1.9 E-10	3.3 E-08
I-133	F	3.3 E-02	1.1 E-09	2.8 E-07
I-133	I <sub>2</sub>	3.3 E-02	4.0 E-09	8.0 E-07
I-133	CH <sub>3</sub> I	3.3 E-02	3.1 E-09	6.3 E-07

\*粒子状の場合、Type F, M, S の 3 タイプに分類されている。本事業では ICRP が推奨しているタイプ、または換算係数が最も大きいタイプを対象とした。

表 2.8 各核種の半減期と放射能から吸入摂取による実効線量（大人、粒径 0.3 μm）及び甲状腺等価線量（1 歳児、粒径 0.3 μm）への換算係数（ICRP, 1995, 2012）（2/2）

核種	粒子状のタイプ* または化学形態	壊変定数 (h <sup>-1</sup> )	実効線量 (Sv Bq <sup>-1</sup> )	甲状腺等価線量 (Sv Bq <sup>-1</sup> )
I-134	F	7.9 E-01	2.4 E-11	2.6 E-09
I-134	I <sub>2</sub>	7.9 E-01	1.5 E-10	7.3 E-09
I-134	CH <sub>3</sub> I	7.9 E-01	2.2 E-09	7.3 E-09
I-135	F	1.0 E-01	2.3 E-10	5.6 E-08
I-135	I <sub>2</sub>	1.0 E-01	9.2 E-10	1.6 E-07
I-135	CH <sub>3</sub> I	1.0 E-01	6.8 E-10	1.3 E-07
Cs-134	F	3.8 E-05	4.7 E-09	4.9 E-09
Cs-136	F	2.2 E-03	8.0 E-10	3.1 E-09
Cs-137	F	2.6 E-06	3.3 E-09	3.4 E-09
Ba-140	M	2.3 E-03	5.0 E-09	2.2 E-09
La-140	M	1.7 E-02	6.9 E-10	3.9 E-10
Ce-144	S	1.0 E-04	6.5 E-08	1.1 E-09
Pr-144	M	2.4 E+00	9.8 E-12	5.5 E-13
Pm-147	M	3.0 E-05	5.6 E-09	3.8 E-12
Eu-154	M	9.2 E-06	6.2 E-08	2.8 E-08
Np-239	M	1.2 E-02	8.3 E-10	5.6 E-11
Pu-238	M	9.0 E-07	5.6 E-05	1.1 E-05
Pu-239	M	3.3 E-09	6.1 E-05	1.2 E-05
Pu-240	M	1.2 E-08	6.1 E-05	1.2 E-05
Pu-241	M	5.5 E-06	1.1 E-06	2.0 E-07
Pu-242	M	2.1 E-10	5.8 E-05	1.2 E-05
Am-241	M	1.8 E-07	5.0 E-05	9.9 E-06
Am-242	M	4.3 E-02	2.0 E-08	8.0 E-10
Am-243	M	1.1 E-08	5.0 E-05	1.0 E-05
Cm-242	M	1.8 E-04	6.1 E-06	2.4 E-07
Cm-243	M	2.7 E-06	3.8 E-05	6.0 E-06
Cm-244	M	4.4 E-06	3.2 E-05	4.7 E-06

\*粒子状の場合、Type F, M, S の 3 タイプに分類されている。本事業では ICRP が推奨しているタイプ、または換算係数が最も大きいタイプを対象とした。

### (1) 自然換気率評価コード

自然換気率は風速、屋内外の温度差、グロス建蔽率<sup>9</sup>（以下、単純に建蔽率と示す）、隙間相当面積に依存する（吉野他, 1984, 1987; 赤林他, 1994）。平成 30 年度事業までは、赤林の関係図（赤林他, 1994）に、風速、温度差、建蔽率、隙間相当面積を入力し、目視で自然換気率を求めている。しかしながら、この方法では感度解析のように、多くのパラメータの組み合わせに対して、一つずつ自然換気率を求める必要があり、多くの時間を要する。そこで、赤林の関係図を数式化した自然換気率評価コード（図 2.38）を作成した。

自然換気率評価コードの入力値は風速、屋内外の温度差、建蔽率、隙間相当面積である。本コードでは、風速と屋外の温度の入力値として、事前に用意したパラメータセット、または実際の気象データからランダムに 1 日間分を抜き出した値を使用できる。冷暖房を稼働させた状態を模擬するため、下記の計算式を用いて屋内外の温度差（ $\Delta T$ ）を評価した。

$$\begin{aligned}\Delta T &= 18^{\circ}\text{C} - \text{屋外温度} \quad (11 \text{ 月} \sim 4 \text{ 月}) \\ \Delta T &= \text{屋外温度} - 26^{\circ}\text{C} \quad (5 \text{ 月} \sim 10 \text{ 月})\end{aligned}\tag{2.18}$$

ただし、 $\Delta T$  が負となった場合は、 $\Delta T=0$  とした。

ここで、屋内温度として使用した  $18^{\circ}\text{C}$  と  $26^{\circ}\text{C}$  は張他（2009）の観測結果である。計算上、屋内外の温度差が負となった場合は、冷暖房を稼働させていないことを想定し、屋内外の温度差が小さいと考え、 $\Delta T=0$  とした。建蔽率と隙間相当面積の入力値として、事前に用意したパラメータセットを利用した。各パラメータの頻度分布と取り得る範囲の情報を 2.4.2 にまとめる。

赤林の関係図を用いて、自然換気率を求める手順は次のとおりである。

1. 赤林の関係図の右半分を用いて、風速、建蔽率、屋内外温度差の交点をプロットする（風速  $4 \text{ m s}^{-1}$ 、建蔽率 0%、温度差  $0^{\circ}\text{C}$  の場合、図 2.39 の青点にプロットする）。
2. そのプロットした点を通る X 軸と平行な線を引き、隙間相当面積との交点にプロットする。（図 2.39 の緑点線を引き、隙間相当面積  $1.7 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  の場合、赤点にプロットする。）
3. 関係図の左側の曲線は自然換気率の等値線を表しているため、プロットした点の自然換気率を読み取る。（図 2.39 の赤線のように左上に線を伸ばし、値を読み取る。今回の例の場合、自然換気率は  $0.3 \text{ h}^{-1}$  となる。）

関係図の数式化にあたり、図の右側と左側で分けて数式化を行った。赤林の関係図では、屋内外の温度差が考慮されていない。温度差を考慮する場合、吉野他（1984）の関係図（図 2.40）を基に考慮しても良いことを赤林より指摘されたため、吉野の関係図を用いて温度差による影響を考慮した。

図の右側の近似式を求めたところ、下記の式で表される。

$$\begin{aligned}Y &= (0.00005K^2 - 0.0037K + 0.079)U^2 + (0.0003K^2 - 0.0218K + 0.6111)U \\ &\quad + \frac{\Delta T(20 - U)}{300}\end{aligned}\tag{2.19}$$

<sup>9</sup> 空き地、道路、公園なども含めたある地域全体の面積に対して、建物の建築面積の総合計が何パーセントを占めているのかを表している建蔽率。



- $Y$  : 赤林の関係図（右側）の  $y$  切片
- $K$  : 建蔽率（%）
- $U$  : 風速（ $\text{m s}^{-1}$ ）
- $\Delta T$  : 屋内外の温度差（ $^{\circ}\text{C}$ ）

図の左側の近似式を求めたところ、下記の式で表される。

$$\lambda_e = \exp(1.083b - 3.2623) \tag{2.20}$$

$$b = \ln Y + 0.94 \ln S$$

- $\lambda_e$  : 自然換気率（ $\text{h}^{-1}$ ）
- $Y$  : 式（2.19）で求めた値
- $S$  : 隙間相当面積（ $\text{cm}^2 \text{m}^{-2}$ ）

これらの式を用いて求めた値と、赤林の関係図を用いて目視で求めた値の比較を表 2.9 と表 2.10 に示す。関係図の両側ともに、ほとんどのケースで差が 10%以内であり、赤林の関係図を良好に再現できていることを確認できた。

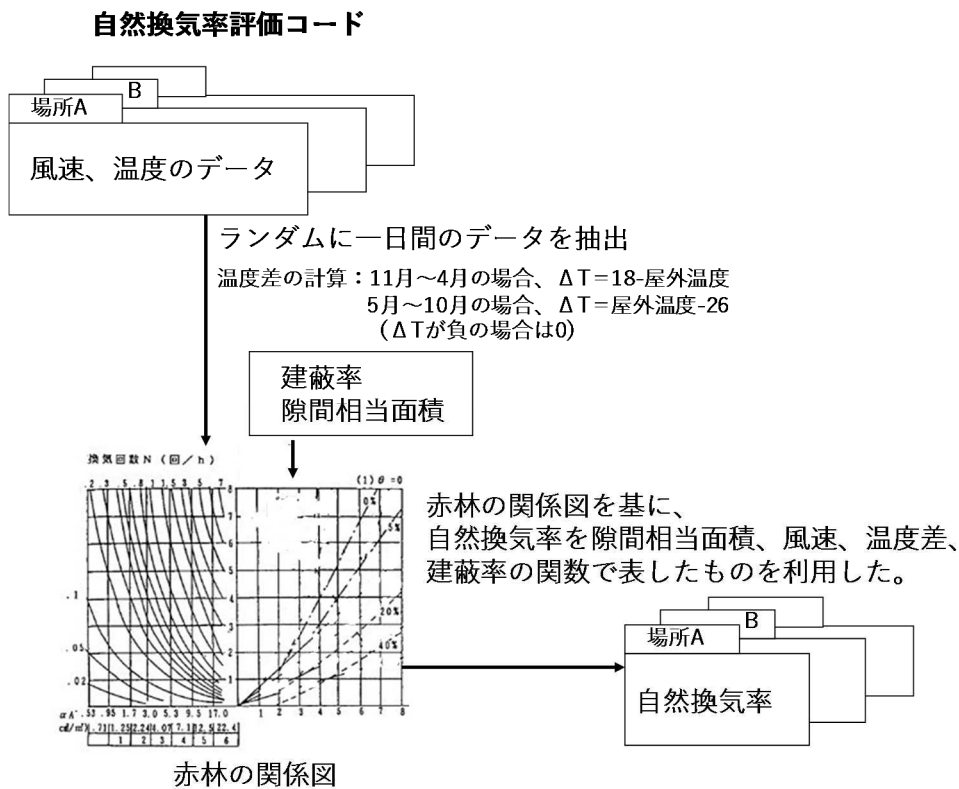


図 2.38 自然換気率評価コードの概要

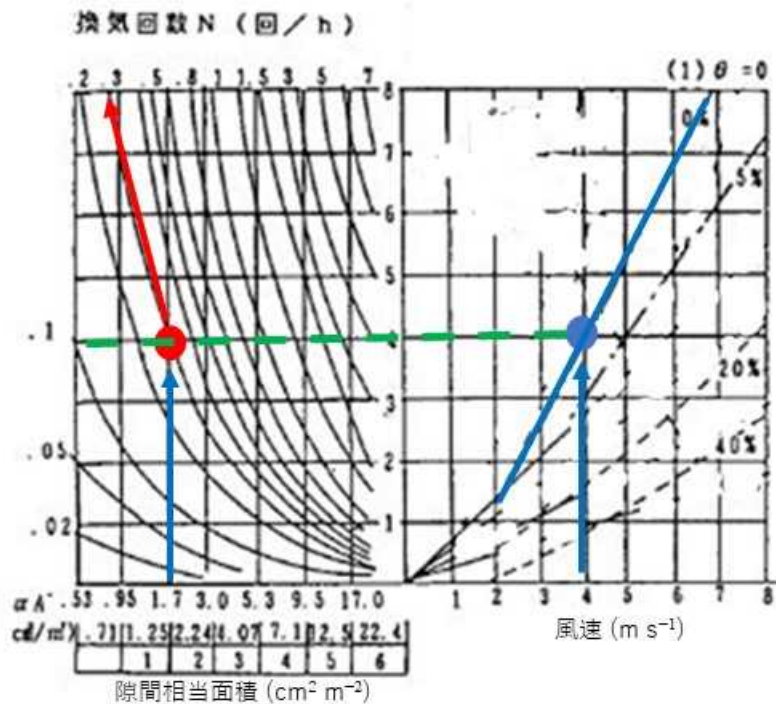


図 2.39 隙間相当面積と自然換気率の関係（本文中では、赤林の関係図と表記）。自然換気率と換気回数は同義。右側の値はグロス建蔽率を表している（引用：赤林他, 1994）。

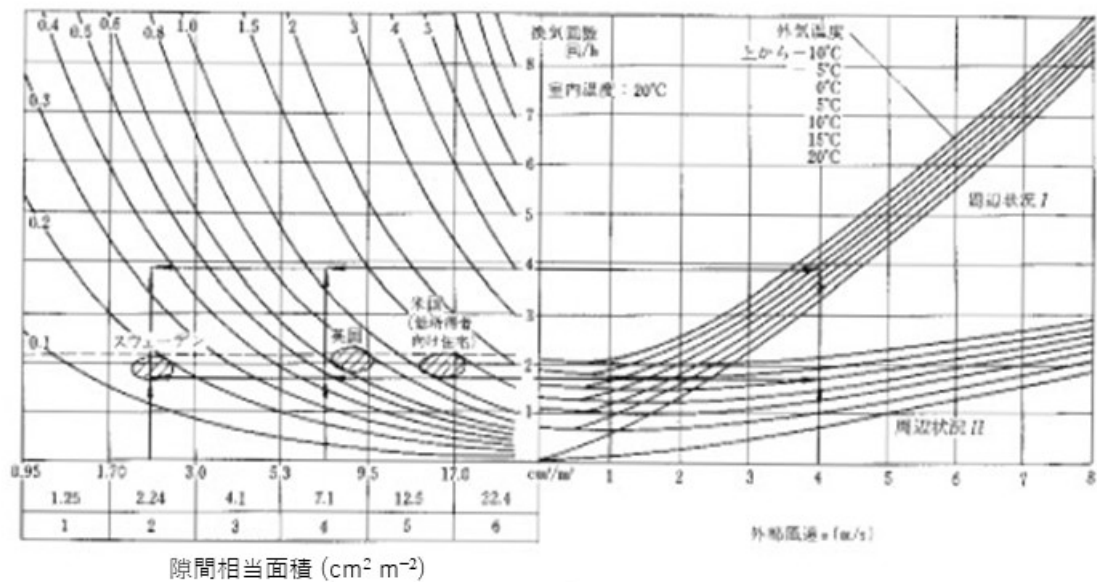


図 2.40 隙間相当面積と自然換気率の関係（本文中では、吉野の関係図と表記）。自然換気率と換気回数は同義。周辺状況 I は風上側に障害物がない場合、周辺状況 II は周囲に建物が立て込んでいる場合（引用：吉野他, 1984）。

表 2.9 赤林関係図（右側）のグラフ読み取り値との比較（近似式 / 読み取り値）

建蔽率 (%)	風速, U (ms <sup>-1</sup> )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1.06	1.14	1.00	0.95	0.98	0.95	0.99	-
5	1.10	1.15	1.06	1.01	1.04	1.05	1.07	1.10
20	0.89	0.92	1.01	0.99	1.00	0.95	0.97	0.94
40	1.10	1.10	1.08	1.14	1.19	1.10	1.12	1.11

表 2.10 赤林関係図（左側）のグラフ読み取り値との比較（近似式 / 読み取り値）

隙間相当面積 (cm <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	Y 軸						
	1	2	3	4	5	6	7
0.95	0.83	0.91	1.09	1.04	0.96	0.99	1.00
1.7	1.06	1.08	1.02	1.02	1.01	0.96	0.96
3	0.85	0.85	0.99	1.14	1.05	0.96	0.88
5.3	0.96	1.02	1.02	0.96	1.05	1.03	1.02
9.5	1.06	1.00	1.00	1.03	0.92	1.14	1.28
17	1.17	1.03	0.89	0.81	1.02	1.05	1.06

## (2) 屋内放射能濃度計算コード

屋内放射能濃度計算コードは平成 30 年度事業のコンパートメントモデルと同様である。屋内放射能濃度計算コードの入力値は自然換気率、浸透率、沈着率、空气中放射能濃度である。なお、空気清浄機等の効果も評価できる。自然換気率は自然換気率評価コードの出力値をそのまま利用した。浸透率と I<sub>2</sub> の沈着率は自然換気率との従属関係が平成 30 年度事業の実験及び今年度の実験（図 2.8 と図 2.12）で見られたため、実験で得られた関係式を利用して、自然換気率から浸透率を求めた。粒子状物質の沈着率は平成 30 年度事業の実験で得られた値を入力した。空气中放射能濃度はプルーム通過時間を 30 分とし、核種組成は平成 29 年度報告書に示した早期大規模放出、後期大規模放出、管理放出、1F1 号機、1F2 号機、1F3 号機の核種組成に加え、I-131 のみを対象とした。

その後、屋内放射能濃度計算コードの出力値（屋内放射能濃度）と屋外放射能濃度を式 (2.17) に入力して、被ばく低減係数を求めた。

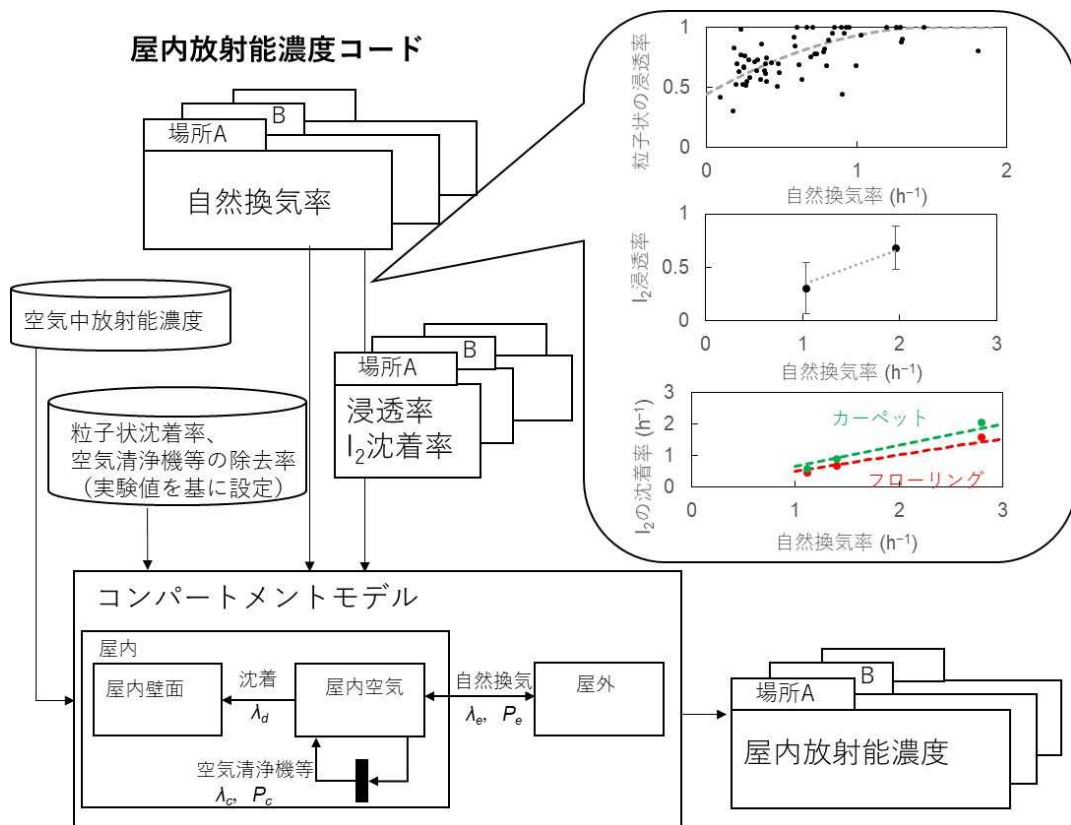


図 2.41 屋内放射能濃度計算コードの概要

## 2.4.2 入力値

### (1) 風速

平成 29 年度事業で、日本の原子力施設周辺の自治体における風速を調査した。使用した風速は、アメダス（地上高さ 10 m<sup>10</sup>）で測定された 1 時間の平均風速で、2011 年～2015 年のデータである。調査の結果、場所によって風速の強弱が異なっており、御前崎と敦賀で風速が強い傾向であり、唐津、浪江、六ヶ所で風速が弱い傾向であった。対象地域全体の風速の中央値は約 2 m s<sup>-1</sup>であり、上記で述べた地域以外での風速の中央値は約 2 m s<sup>-1</sup>、御前崎と敦賀での風速の中央値は約 4 m s<sup>-1</sup>、唐津、浪江、六ヶ所での風速の中央値は約 1 m s<sup>-1</sup>であった。図 2.42 に対象地域全体の風速の頻度分布、風速が強い地域の例として御前崎、弱い地域の例として唐津、平均的な地域の例として日立の風速の頻度分布をそれぞれ示す。

<sup>10</sup> 赤林の関係図の風速は地上高さ 10 m の風速を使用することになっているため、建物窓付近の高さに補正する必要はない。

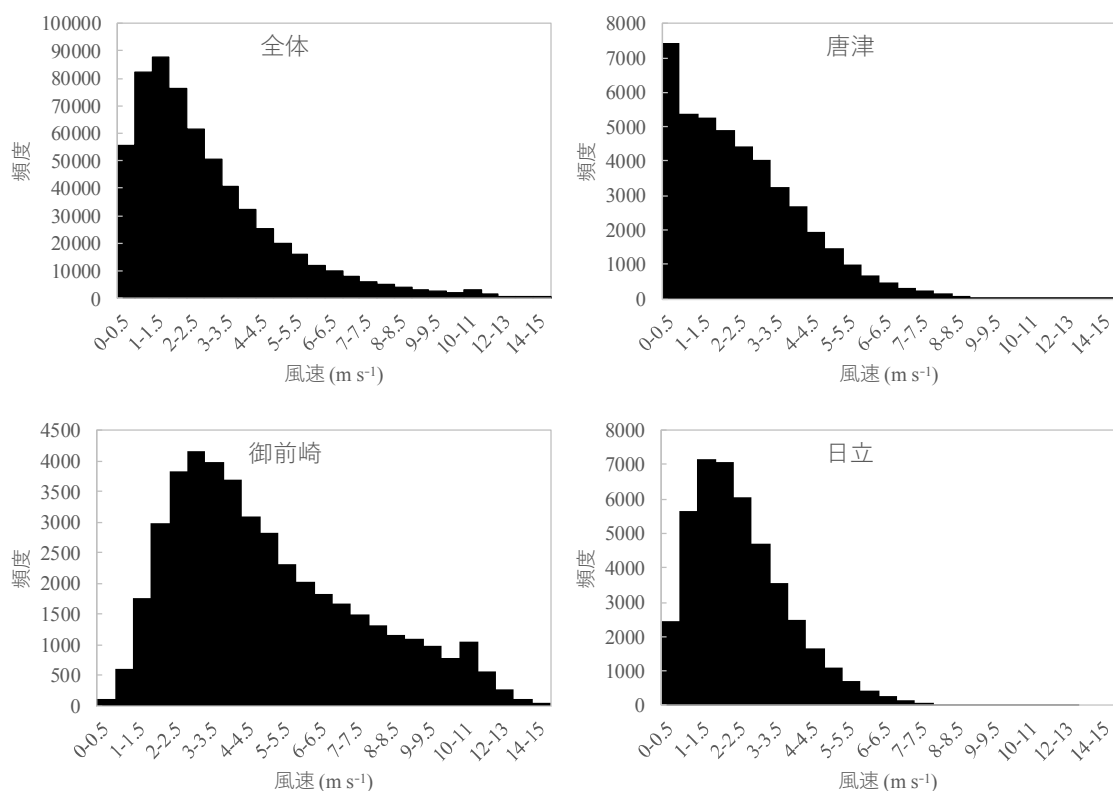


図 2.42 1 時間平均風速の頻度分布

## (2) 屋内外温度差

平成 29 年度事業で、日本の原子力施設周辺の自治体における屋外温度を調査した。使用した屋外温度はアメダスで測定された 1 日間の平均温度である。屋内温度は屋外温度のほかに、冷暖房の使用状況によって大きく異なる。本事業では、張他 (2009) が全国の屋内温度を調査した結果を屋内温度として利用した。張他 (2009) の調査では、夏季 (7、8 月) における屋内温度は北部 (北海道、東北、北陸) で平均 25℃、南部 (北部以外) で平均 27.5℃、冬季 (1、2 月) における屋内温度は北部で平均 20℃、南部で平均 16.5℃であった。評価コードでは、屋内温度は各季節で平均した値を用いた (式 (2.18))。例として、日立での屋内外温度差の頻度分布を図 2.43 に示す。春、秋には冷暖房を使用することはほとんどないため、屋内外の温度差は 0℃に近い値となり、冷暖房を使用する夏と冬に温度差は 5~15℃となった。屋内外の温度差は夏よりも冬に大きくなる傾向があった。温度差の大きさは地域によって異なるものの、温度差の四季の傾向はどの地域でも同じであった。

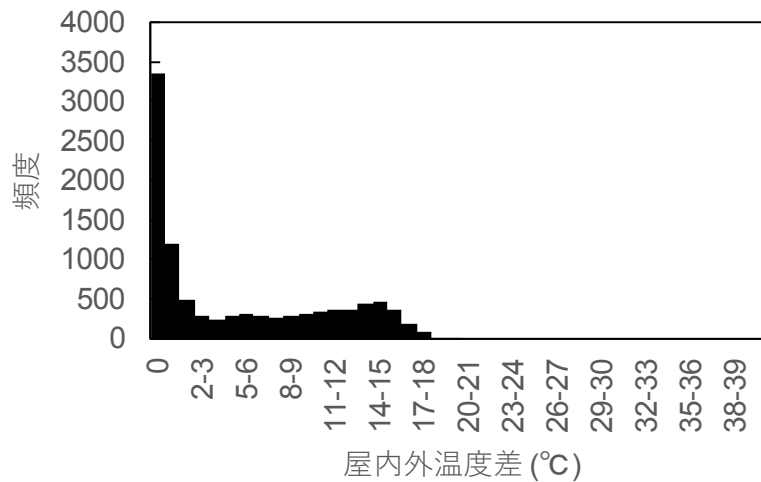


図 2.43 日立での屋内外温度差の頻度分布

### (3) 建蔽率

平成 29 年度事業で、建蔽率を調査したものの、建蔽率の頻度分布を作成できるほどのデータ数が無かったことと、対象家屋の選定が曖昧であり、ランダム性がなかったため、新たに建蔽率を調査した。平成 29 年度事業と同様に、Google map を用いて建蔽率の調査を行った。建蔽率の計算方法は平成 29 年度と同様である。周囲の建物が対象家屋に及ぼす影響の範囲は建物高さの約 3 倍である、と赤林より指摘された。一般家屋の高さは約 6 m であるため、ここでは対象家屋から約 20 m 離れたエリア内に存在する建物の占める割合を求めた。

本事業では、東海村の戸建住宅を対象とした。対象建物の選定及び建蔽率の計算は、以下の手順で行った。

1. 東海村を 1 km 四方のメッシュに区切った (図 2.44)。
  2. 1.で区切ったメッシュの中に東西方向に線を 3 本引いた。線の位置は北から 250 m、500 m、750 m の位置とした。ただし、線上に建物が全くない場合には、線を南北方向に 50 m ずらした。
  3. 2.で引いた線上に 50 m 四方のメッシュを書いた (図 2.45)。メッシュの中心は 2.で引いた線上とした。
  4. 3.で書いたメッシュの中心に一番近い建物を対象家屋<sup>11</sup>とし、対象家屋の中心とメッシュの中心が合うようにメッシュをずらした (例：図 2.45 の青点線)。
  5. 4.でメッシュの位置を調整したのち、式 (2.21) を用いて建蔽率を求めた。
- なお、メッシュ内に対象建屋が一軒もない場合は、評価しなかった。

$$\text{建蔽率} = \frac{\text{エリア内に存在する建物の総建築面積(図 2.46 中の青面積)}}{\text{対象建屋を除いたエリア面積 (図 2.46 中の太線内の面積 - 赤面積)}} \quad (2.21)$$

上記の手順により、対象となった家屋数は 770 であった。求めた建蔽率の頻度分布を図 2.47 に

<sup>11</sup> 戸建住宅を対象家屋としているため、Google map 上で明らかに戸建住宅でない建物 (集合住宅、事業所等) は対象外とした。対象から外す基準として、1 辺が 20 m 以上の建屋、Google map 上で店名、事業所名が書かれている建物である。

示す。建蔽率の頻度分布はガウス分布に近い形をとり、今回対象とした家屋の建蔽率の平均値は約15%であった。

図 2.48 に今回求めた建蔽率と人口密度の関係を示す。各プロットは東海村の地区ごとの値である。地区ごとの人口密度は、2019年1月時点での人口（東海村）を地区の面積で除したものである。ただし、日本原子力研究開発機構のような比較的大きな施設、工業地帯の面積は除いた。図 2.48 を見ると、人口密度が  $1000 \text{ 人 km}^{-2}$  以下では建蔽率の平均値は10%程度、人口密度が  $4000 \text{ 人 km}^{-2}$  以上では建蔽率の平均値は20%程度であり、標準偏差は大きいものの、人口密度が大きくなるにつれて建蔽率が大きくなる傾向が見られた。他のサイトでも人口密度と建蔽率が正の関係であること、同じプロット上にのるかは確認できていない。サイトまたは地区ごとにどの建蔽率を用いるべきかを決定するためにも、他のサイトでも同様の調査をする必要があると考えられる。

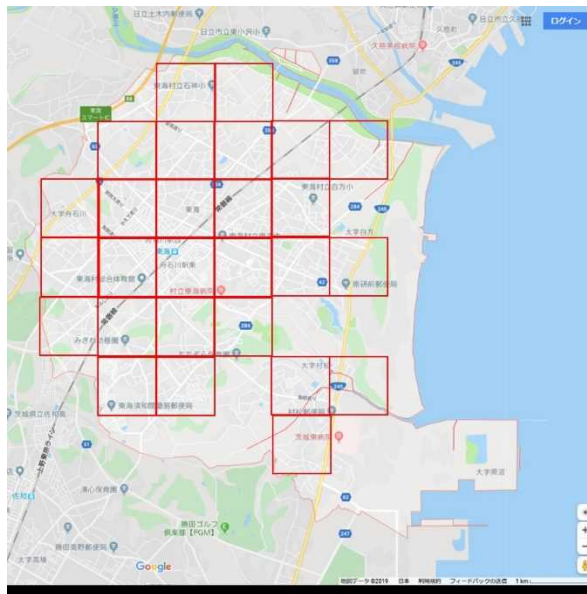


図 2.44 1 km メッシュ区切り

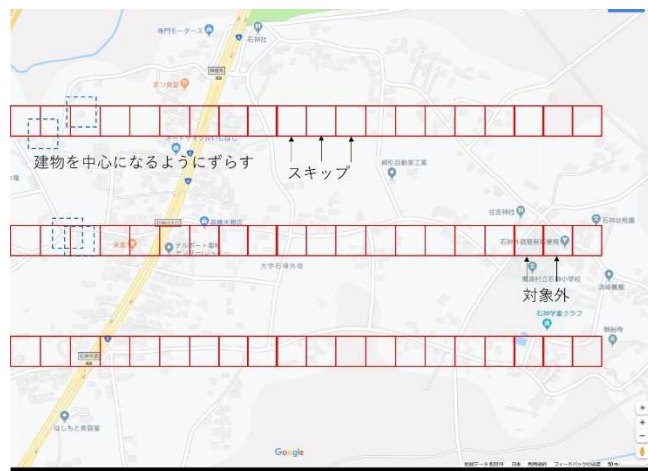


図 2.45 50 m メッシュ区切り

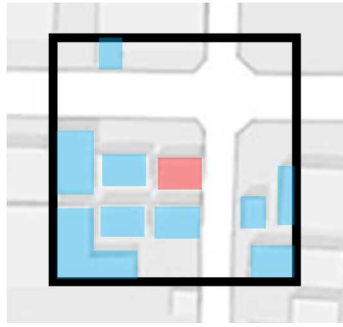


図 2.46 建蔽率算出例。赤は対象建屋、青はエリア内に存在する建物。黒枠は 50 m メッシュ。

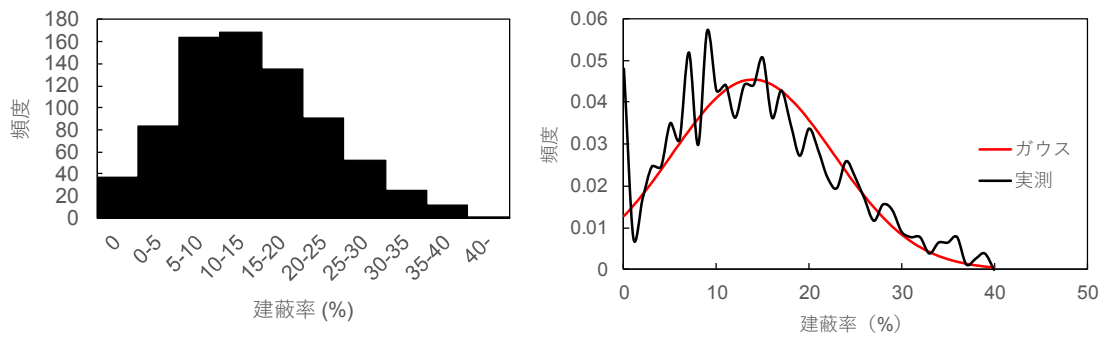


図 2.47 東海村での建蔽率の頻度分布。右図は建蔽率の頻度分布をガウス分布で近似した場合。

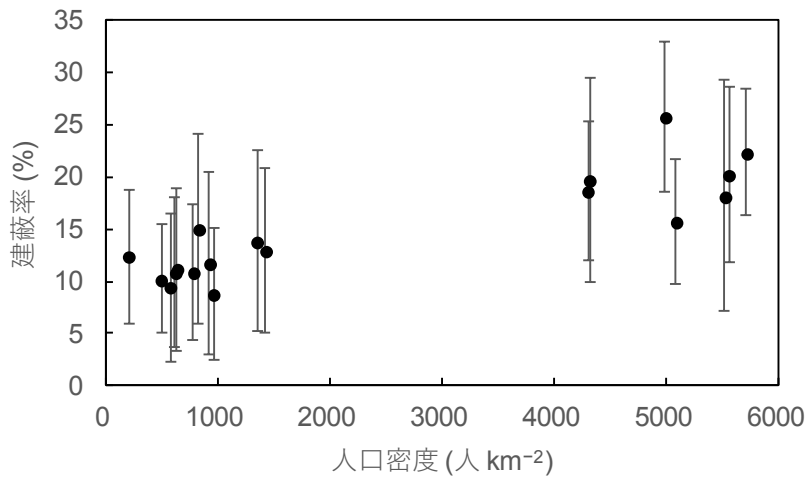


図 2.48 東海村の各地区での建蔽率と人口密度の関係。建蔽率は各地区での平均値と標準偏差を示す。



#### (4) 隙間相当面積

平成 29 年度事業で、文献調査を基に建築年ごとの隙間相当面積をまとめた。建築年ごとの戸建住宅の隙間相当面積を図 2. 49 に示す。隙間相当面積は年々小さくなっており、特に旧省エネルギー基準が告示された 1980 年と新省エネルギー基準が告示された 1992 年の翌年に隙間相当面積が小さくなっており、それ以降はほぼ横ばいである。本事業でも、1980 年以前に建築された建屋、1981 年～1992 年に建築された建屋、1993 年以降に建築された建屋に分けて評価を行う。各建築年帯での隙間相当面積の頻度分布を図 2. 50 に示す。建屋数は少ないものの、1980 年以前に建築された建屋の隙間相当面積の中央値は約  $15 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ 、1981 年～1992 年に建築された建屋の隙間相当面積の中央値は約  $5 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ 、1993 年以降に建築された建屋の隙間相当面積の中央値は約  $2 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  であった。頻度分布をみると、1980 年以降に建築された建屋の隙間相当面積の最頻値が  $1 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  未満であった。

現行の省エネルギー基準では、気密性能に関する事項が削除されているものの、断熱性能に関する事項は残っている。全ての戸建住宅に対して、住宅性能表示の基準があり、等級 1 は 1980 年以前に建築された建屋相当、等級 2 は 1980 年の旧省エネルギー基準を満たすもの、等級 3 は 1992 年の新省エネルギー基準を満たすもの、等級 4 は 2013 年の省エネ基準を満たすものとされている（国土交通省）。住宅メーカーによっては、当時の基準を大きく超える「高气密・高断熱住宅」を建設するところもあるため、1980 年以降の隙間相当面積の頻度分布が単峰形ではなく、二峰形のような分布になった可能性がある。

図 2. 51 に原子力発電所立地県での木造戸建住宅の建築年の割合を示す。1980 年以前に建築された住宅、1981～1990 年に建築された住宅、1991 年以降に建築された住宅が概ね同じ割合であるため、本事業では全ての建築年の建屋を対象とした。

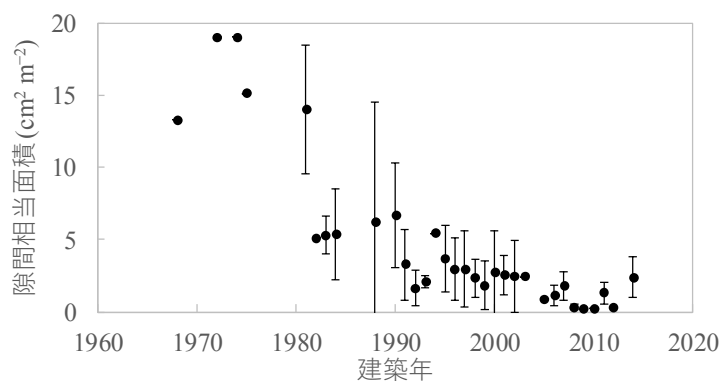


図 2. 49 隙間相当面積の建築年の関係。隙間相当面積は各年の平均値と標準偏差を示す。

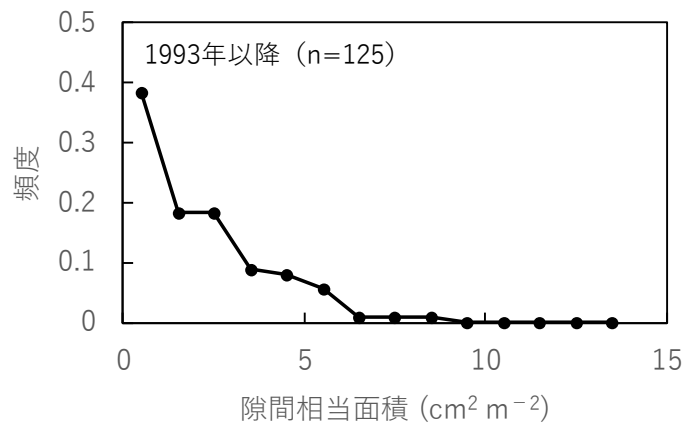
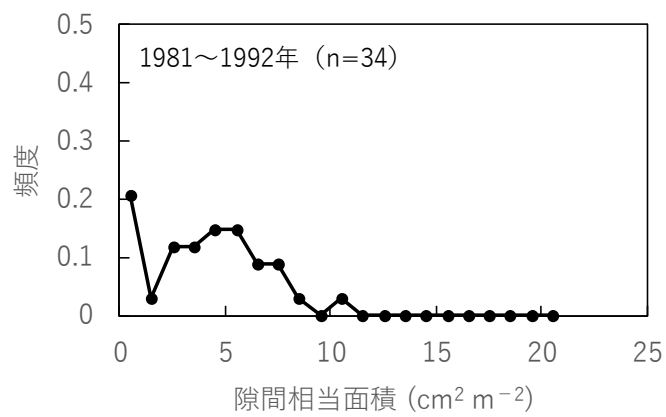
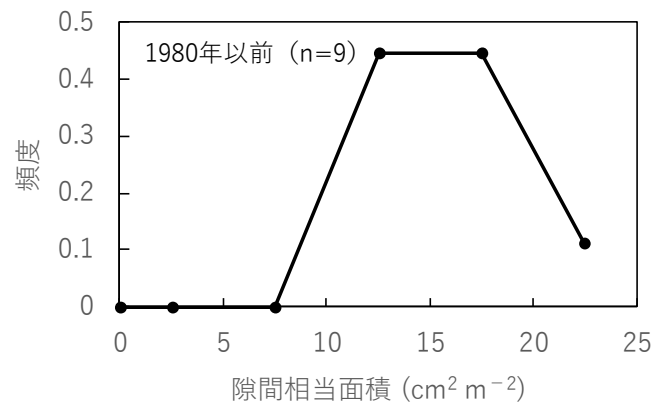


図 2.50 隙間相当面積の頻度分布。n はサンプル数。

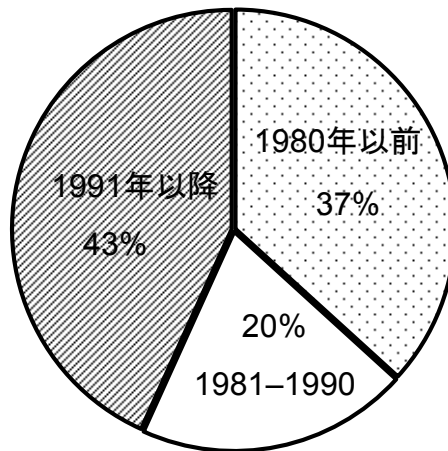


図 2.51 原子力発電所立地県での木造戸建住宅の建築年の割合（統計局, 2013）

#### (5) 屋内での沈着率

平成 30 年度事業では、原子力発電所事故時に放出される核種のうち、甲状腺被ばくに最も寄与するヨウ素の放出形態は元素状ヨウ素 ( $I_2$ )、有機状ヨウ素 ( $CH_3I$  など)、粒子状ヨウ素 ( $CsI$  など) の 3 つに大別される<sup>12</sup>。元素状ヨウ素と有機状ヨウ素はともにガス状であるものの、その反応性の違いによって異なった挙動を示す。元素状ヨウ素は反応性が高く、空気中の水分や粒子、屋内の壁面等に付着しやすく、一方で有機状ヨウ素は反応性が低く、屋内の壁面等に付着しにくく、沈着率は粒子状と元素状ヨウ素に比べて二桁程度低いと報告されている (Bunch, 1968; Sehmel, 1980; Roed, 1988, 1990; EPA, 1978)。平成 30 年度までの事業と今年度事業では、実家屋実験で粒子状物質の屋内での沈着率、ラボ実験で元素状ヨウ素と粒子状物質の沈着率を求めることを目的に実験を行った。

粒子状物質の沈着率と粒径の関係を図 2.52 に、沈着率と自然換気率の関係を図 2.53 に示す。過去の原子力事故時に放出された粒径 (粒径  $0.1 \sim 1 \mu m$  (Kaneyasu et al., 2012)) とほぼ同じである粒子の沈着率は床材の違い、家具の有無によって異なり、 $0.01 \sim 0.2 h^{-1}$  であった。図 2.53 に示されるようにどの条件においても沈着率と自然換気率との依存性は見られなかった。

$I_2$  の沈着率と自然換気率の関係を図 2.54 に示す。実験方法等の詳細は 2.1 節に示す。 $I_2$  の沈着率は床材の違いによって異なり、換気率  $1 h^{-1}$  では  $0.5 \sim 0.7 h^{-1}$  であった。図 2.54 に示されるように、粒子状物質とは異なり、自然換気率が大きいほど沈着率が大きい傾向が見られた。本事業では換気率  $1 \sim 3 h^{-1}$  までの範囲でしか実験しておらず、それ以外の部分は外挿して、 $I_2$  の沈着率は図 2.54 の直線に囲まれた領域内であると仮定して被ばく低減係数の解析を行った。

<sup>12</sup> 文献では  $I_2$  と  $CH_3I$  について複数の記載方法がある。 $I_2$  は Elemental iodine (EPA, 1978; ICRP, 2012)、Inorganic (reactive) gases (Ramsdell et al., 1994)、Reactive gas (IAEA, 2003, 2012) と表記される。 $CH_3I$  は Organic iodide (EPA, 1978)、Methyl iodide (ICRP, 2012)、Organic gases (Ramsdell et al., 1994)、Organic (IAEA, 2003, 2012) と表記される。なお、有機状ヨウ素は複数の化学系 ( $C_2H_5I$  など) も存在しうるが、 $CH_3I$  の発生量が多いため、 $CH_3I$  を有機状ヨウ素の代表的な化学系として使用している。測定においては、 $I_2$  と  $CH_3I$  を区別せずに Gaseous と表記することもある (IAEA, 2003; Lebel et al., 2016)。

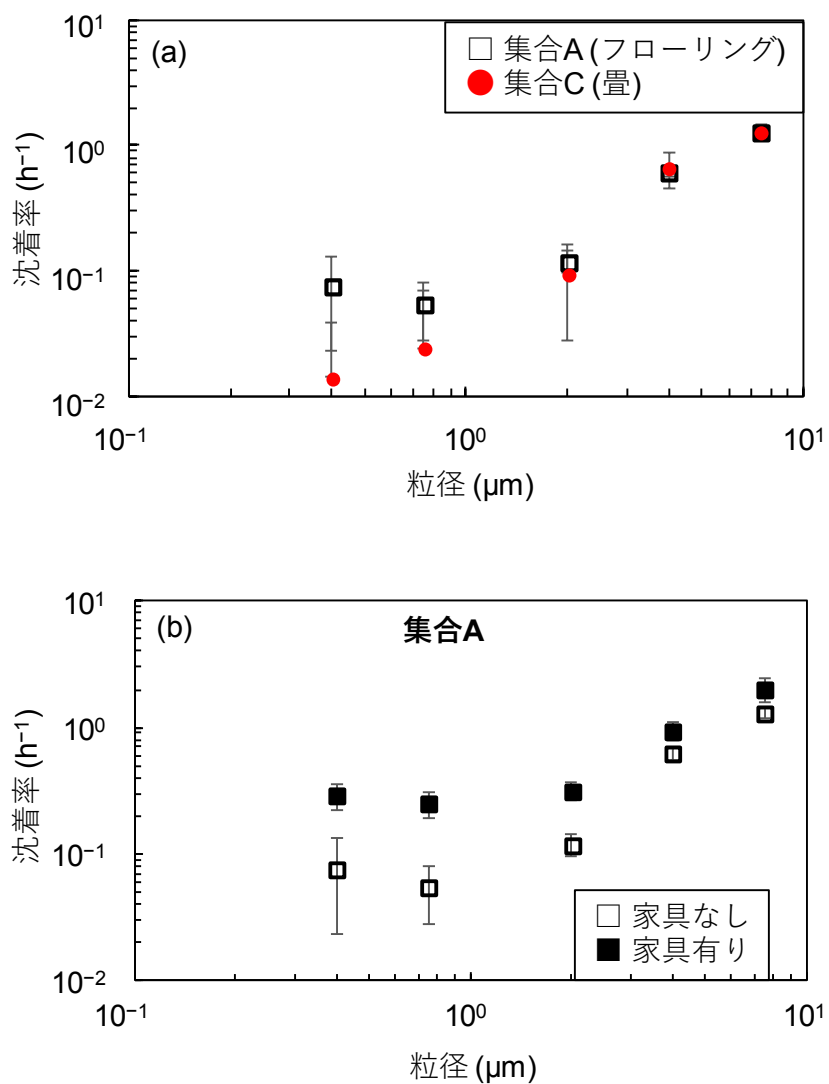


図 2.52 粒子状物質の粒径ごとの沈着率 (1/2)。沈着率は全実験の平均値と標準偏差を示す。(a) 床材の違い、(b) 家具の有無による違い、(c) 部屋の大きさによる違い、(d) 戸建住宅での結果。

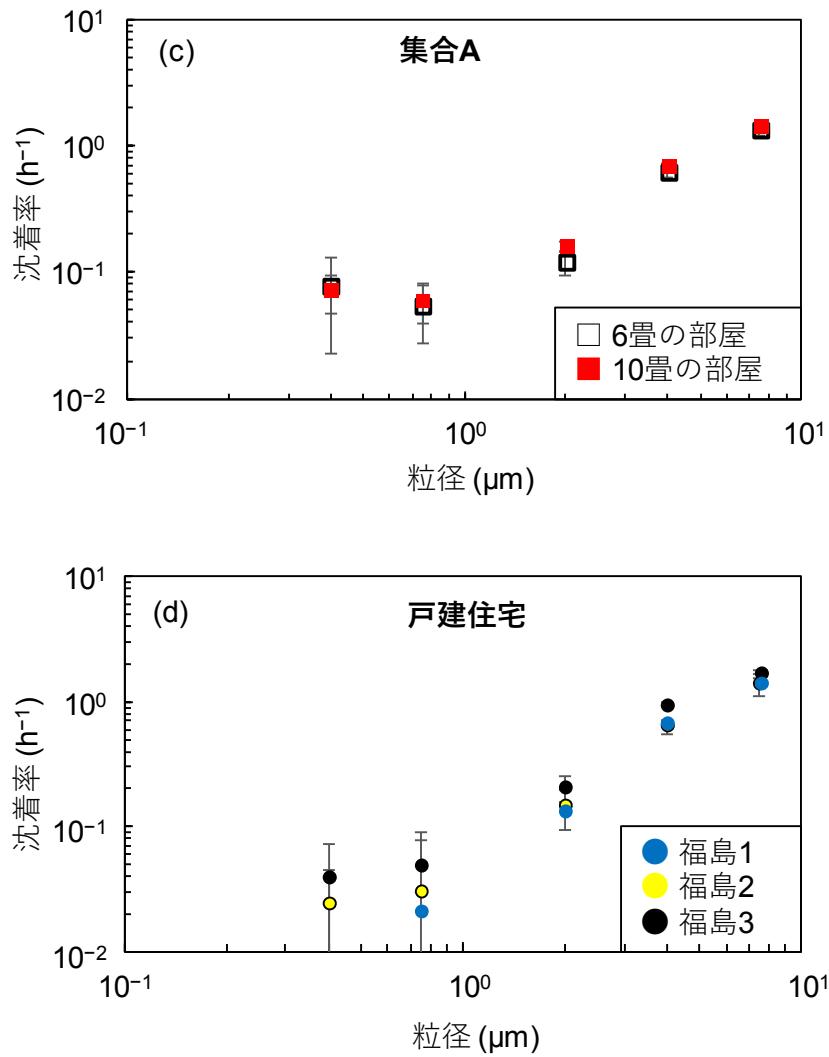


図 2.52 粒子状物質の粒径ごとの沈着率 (2/2)。沈着率は全実験の平均値と標準偏差を示す。(a) 床材の違い、(b) 家具の有無による違い、(c) 部屋の大きさによる違い、(d) 戸建住宅での結果。

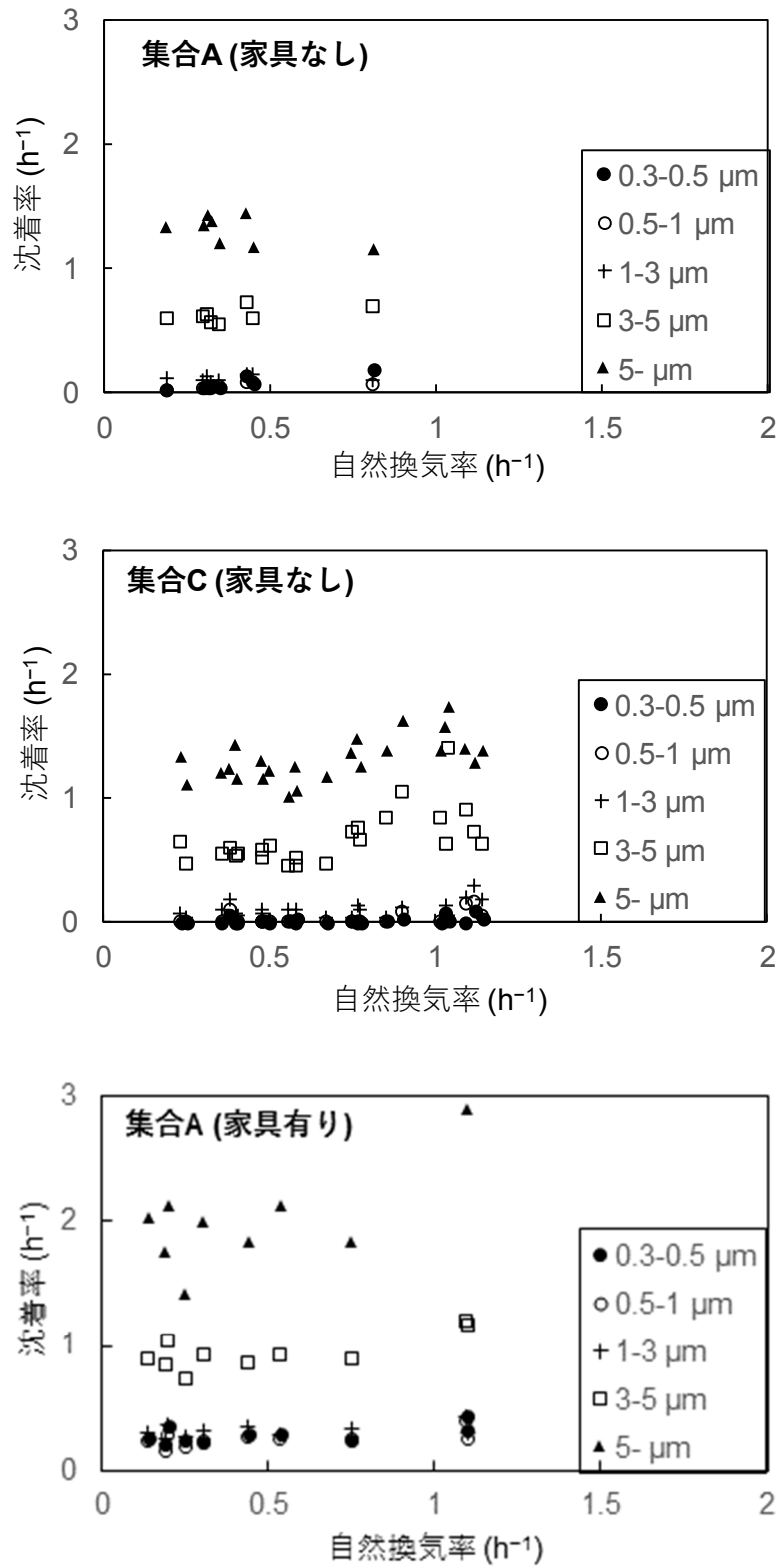


図 2.53 粒子状物質の沈着率と自然換気率の関係。実験毎にプロットしたもの。

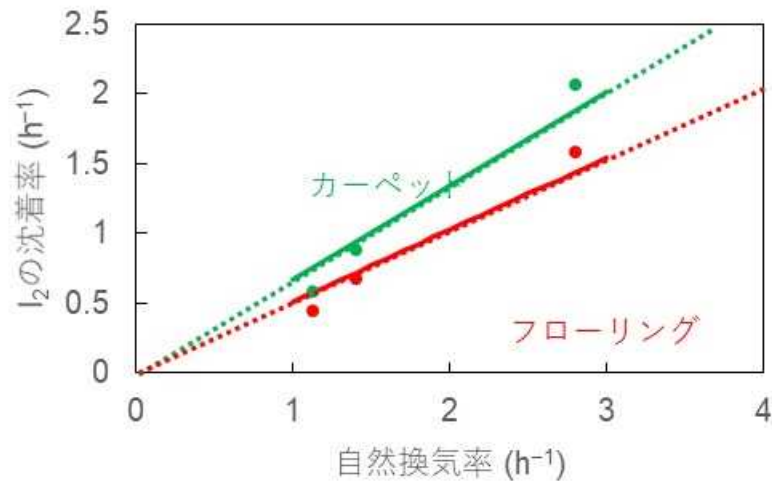


図 2.54 I<sub>2</sub> の沈着率と自然換気率の関係。実線部は本事業で行った範囲。点線は外挿線。

#### (6) 浸透率

平成 30 年度までの事業と今年度の事業では、実家屋実験で粒子状物質の浸透率、ラボ実験で I<sub>2</sub> の浸透率を求めることを目的に実験を行った。

実家屋実験で得られた粒子状物質の浸透率と自然換気率の関係を粒径別に図 2.55 に示す。粒径 0.3~1 μm の粒子では、実家屋での浸透率は自然換気率によって異なり、0.3~1 の値であった。浸透率と自然換気率の関係をみると、自然換気率が 1 h<sup>-1</sup> 以上では浸透率が概ね 1 であり、1 h<sup>-1</sup> 以下では自然換気率が小さくなるにつれ、浸透率も小さかった。集合住宅でも戸建住宅であっても、上述した浸透率と自然換気率の关系到顕著な違いは見られなかった。本事業では、以下の近似曲線を利用して被ばく低減係数の解析を行った。

$$\begin{aligned}
 P &= -0.2277\lambda_e^2 + 0.719\lambda_e + 0.442 \quad (\lambda_e < 1.4) \\
 \lambda_e &= 1 \quad (\lambda_e \geq 1.4)
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

$P$  : 粒子状物質の浸透率  
 $\lambda_e$  : 自然換気率 (h<sup>-1</sup>)

I<sub>2</sub> の浸透率と自然換気率の関係を図 2.56 に示す。実験方法等の詳細は 2.1 節に示す。I<sub>2</sub> の浸透率は粒子状物質と同様に自然換気率と正の相関がみられた。本事業では換気率 1~2 h<sup>-1</sup> までの範囲でしか、実験しておらず、それ以外の部分は外挿して被ばく低減係数の解析を行った。

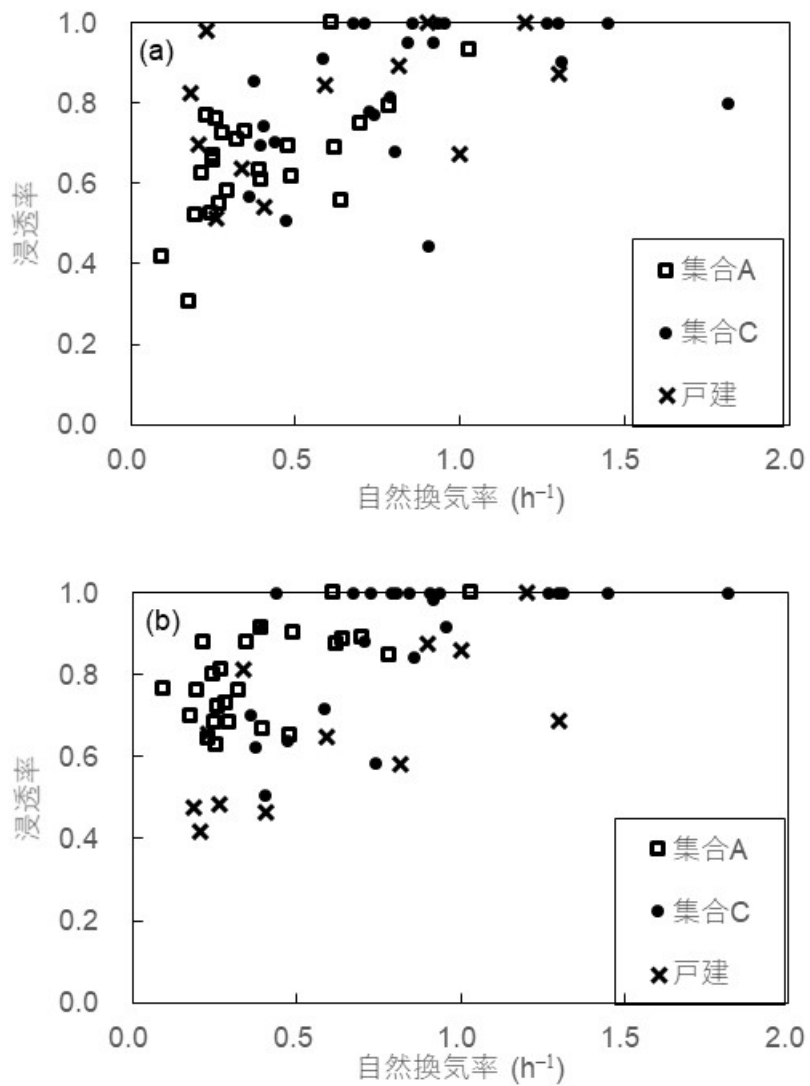


図 2.55 ラボ実験と実家屋実験で得られた粒子状物質の浸透率と自然換気率の関係の比較。(a) 粒径 0.3~0.5 μm、(b) 粒径 0.5~1 μm。



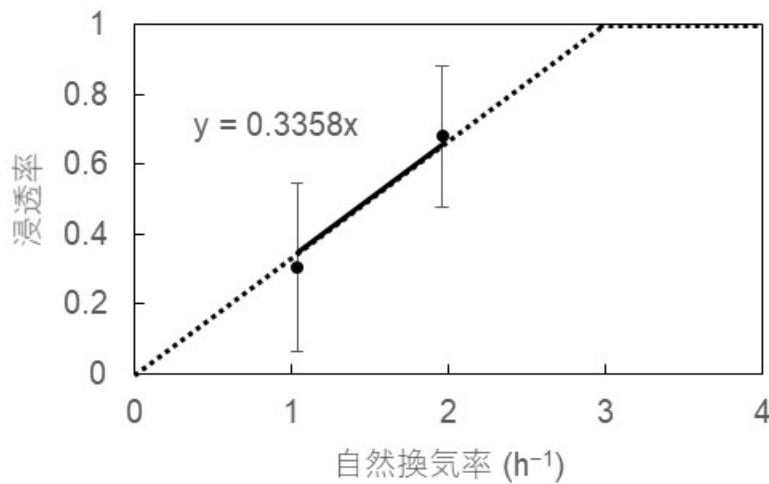


図 2.56 ラボ実験で得られた  $I_2$  の浸透率と自然換気率の関係。実線部は本事業で行った範囲。点線は外挿線。自然換気率  $3 \text{ h}^{-1}$  以上では、浸透率は 1 とした。

#### (7) 化学形態の組成

実験でも示されたように、沈着率と浸透率はヨウ素の化学形態によって異なる。さらに、線量換算係数も化学形態によって異なる。そのため、屋内退避による吸入被ばくの低減係数を求めるためには、ヨウ素の化学形態の情報が必要である。平成 29 年度事業では、過去の原子力発電所事故時とハンフォードでのヨウ素放出を対象に文献調査し、ヨウ素の化学形態の組成をまとめた。その結果、ヨウ素の化学形態の組成は、放出シナリオ及び場所によって異なることが示された。

平成 30 年度事業までは、ヨウ素の化学形態ごとに被ばく低減係数を評価した。本事業では、単体での被ばく低減係数をそれぞれ評価しておき、その低減係数を用いて、混合状態での被ばく低減係数を評価可能であるかを検討した。

単体での吸入被ばく低減係数は、以下の式で表される。

$$R_P(t) = \frac{S_{P,in}(t)}{S_{P,out}(t)} \quad (2.23)$$

$$R_I(t) = \frac{S_{I,in}(t)}{S_{I,out}(t)} \quad (2.24)$$

$$R_G(t) = \frac{S_{G,in}(t)}{S_{G,out}(t)} \quad (2.25)$$

$R(t)$  : 時刻  $t$  における被ばく低減係数 (-)

$S(t)$  : プルーム通過開始時刻から時刻  $t$  までの積算吸入量 (積算空气中放射能濃度に呼吸量を掛けたもの) (Bq)

添え字の  $P$  は粒子状物質、 $I$  は  $I_2$ 、 $G$  は  $CH_3I$ 、 $in$  は屋内、 $out$  は屋外を表す。

ヨウ素のみを考える場合、式 (2.17) は次のように展開できる。

$$R(t) = \frac{D_{in}(t)}{D_{out}(t)} = \frac{e_G S_{G,in}(t) + e_I S_{I,in}(t) + e_P S_{P,in}(t)}{e_G S_{G,out}(t) + e_I S_{I,out}(t) + e_P S_{P,out}(t)} \quad (2.26)$$

$e$  : 吸入摂取による甲状腺等価線量または実効線量への換算係数 (Sv Bq<sup>-1</sup>)

ここで、屋外でのヨウ素の化学形態の組成比を CH<sub>3</sub>I : I<sub>2</sub> : 粒子状物質 = x : y : 1 とし、式 (2.23) ~ 式 (2.25) を式 (2.26) に代入すると、以下のように表される。

$$\begin{aligned} R(t) &= \frac{e_G R_G(t) S_{G,out}(t) + e_I R_I(t) S_{I,out}(t) + e_P R_P(t) S_{P,out}(t)}{e_G S_{G,out}(t) + e_I S_{I,out}(t) + e_P S_{P,out}(t)} \\ &= \frac{x e_G R_G(t) S_{P,out}(t) + y e_I R_I(t) S_{P,out}(t) + e_P R_P(t) S_{P,out}(t)}{x e_G S_{P,out}(t) + y e_I S_{P,out}(t) + e_P S_{P,out}(t)} \\ &= \frac{x e_G R_G(t) + y e_I R_I(t) + e_P R_P(t)}{x e_G + y e_I + e_P} \end{aligned} \quad (2.27)$$

単体での被ばく低減係数をそれぞれ評価しておけば、混合状態時の被ばく低減係数も式 (2.27) を用いて評価できる。上記では、ヨウ素のみを対象として検討を行ったが、セシウムなどの他の核種が混合時にも適用可能である。他の核種も考慮する場合、ルテニウム以外の核種は全て粒子状で放出されるため、他の核種の被ばく低減係数は  $R_P$  を、ガス状ルテニウム (RuO<sub>4</sub>) は不活性なガス状と言われており、その被ばく低減係数は  $R_G$  を使用すればよい。

### 2.4.3 吸入被ばく低減係数の解析

本事業では、吸入被ばく低減係数をまとめるにあたり、

1. 今までの調査で得られた値を用いて、吸入被ばく低減係数の算出
2. 吸入被ばく低減係数の感度解析

を実施した。上述した低減係数に係るパラメータの内、風速、屋内外の温度差、建蔽率、隙間相当面積、及び化学形態の組成比の変動は、場所、季節等のシナリオによって異なり、沈着率と浸透率の変動は実験による不確かさと知識の不足による不確かさが含まれるパラメータであり、両者の変動を混同して評価することは不適切である。そこで、はじめにシナリオ分けを行うにあたり、風速、屋内外の温度差、建蔽率、及び隙間相当面積の自然換気率に対する感度を調査した。その感度解析の結果を基に、シナリオ分けを行い、シナリオ毎に吸入被ばく低減係数を求めた。さらにシナリオ毎に、各パラメータによる吸入被ばく低減係数への感度を調査した。

#### (1) 風速、屋内外の温度差、建蔽率、及び隙間相当面積の自然換気率への影響

シナリオ分けを行うにあたり、風速、屋内外の温度差、建蔽率、及び隙間相当面積の自然換気率に対する感度を調査した。本調査では、風速の頻度分布が異なる日立、唐津、御前崎を対象とした。風速と屋外温度は実際のアメダスのデータを用いた。建蔽率と隙間相当面積は文献調査等で得られた取り得る範囲内で、一様分布と仮定して解析を行った。

感度解析手法として、グローバル感度解析で最もよく使われる手法の一つである Elementary

Effect 法 (Morris, 1991; 以下、EE 法) を用いた。EE 法は、自然換気率と浸透率のようにパラメータ間に従属性がある場合でも感度解析できる。EE 法での感度解析の指標は以下の式で表される。

$$EE_i^j = \frac{E(x_1^j, \dots, x_i^j + \delta, \dots, x_n^j) - E(x_1^j, \dots, x_i^j, \dots, x_n^j)}{\delta} \quad (2.28)$$

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |EE_i^j| \quad (2.29)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (EE_i^j - \mu_i)^2} \quad (2.30)$$

- $E^j$  :  $j$  番目のパラメータセットを使用した時の値 (自然換気率、被ばく低減係数など)  
 $x_i$  : パラメータ (例:  $x_1$  は風速、 $x_2$  は屋内外温度差、 $x_3$  は建蔽率など)  
 $EE$  : あるパラメータのみを  $\delta$  ずらした時の  $E$  の偏差  
 $\mu$  :  $EE$  の平均値  
 $\sigma$  :  $EE$  の標準偏差

$\mu$  と  $\sigma$  が大きいほど、感度が大きいことを示している。本事業では 10000 通りのパラメータセットを用意し、感度解析を実施した。

風速、屋内外の温度差、建蔽率、及び隙間相当面積の自然換気率に対する感度解析結果を図 2.57 に示す。図の右上ほど、自然換気率に大きく影響を及ぼすことを示している。自然換気率への影響は風速が最も大きく、隙間相当面積、建蔽率、屋内外の温度差の順に小さくなった。どのサイトにおいても、自然換気率への影響の大きさはほとんど変わらなかった。建蔽率の範囲は 0~30% 程度であり、15% 付近にピークを持つガウス分布であるのに対し、屋内外の温度差の範囲は 0~15℃ 程度であり、0℃ 付近にピークを持つ分布であり、パラメータの取り得る範囲は建蔽率の方が大きい。建蔽率と屋内外の温度差の自然換気率への影響はほとんど同じであるものの、パラメータの変動幅を考慮すると、屋内外の温度差は他のパラメータに比べて自然換気率への影響は小さい。それ故、本事業では、屋内外の温度差は 0℃ と固定し、解析を進める。

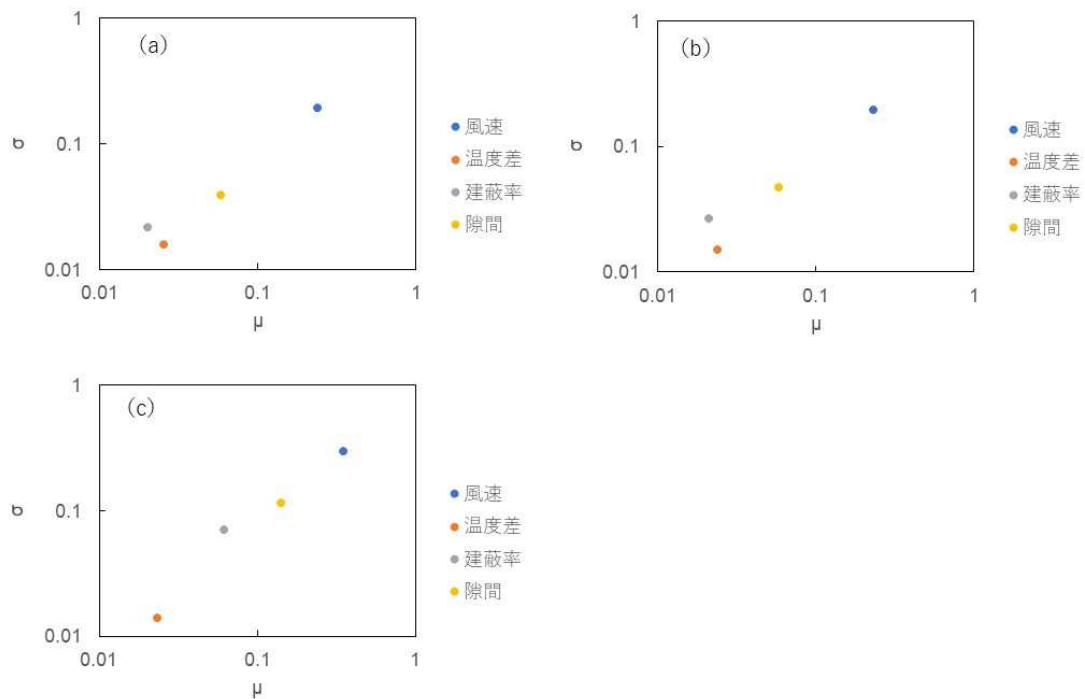


図 2.57 風速、屋内外の温度差、建蔽率、及び隙間相当面積の自然換気率に対する感度解析結果。(a) 日立、(b) 唐津、(c) 御前崎。

## (2) シナリオ分け

本事業では、自然換気率への影響が大きい、風速、建蔽率、及び隙間相当面積を場合分けして解析を行う。影響度の大きさと各パラメータの分布形を考慮して場合分けを行った (表 2.11)。最も影響度の大きい風速は  $1 \sim 10 \text{ m s}^{-1}$  までを  $1 \text{ m s}^{-1}$  ずつに場合分けした。次に影響度の大きい隙間相当面積は、各建築年帯の中央値で場合分けした。1980 年以前に建築された建物は  $15 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ 、1981 年～1992 年に建築された建物は  $5 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ 、1993 年に建築された建物は  $2 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  とした。さらに隙間相当面積の頻度分布は二峰形であり、その原因として高気密住宅の建築と考えられた。高気密住宅の建物の隙間相当面積は  $1 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  未満であると仮定し、 $1 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  未満の隙間相当面積の平均値 (文献調査範囲内) は  $0.6 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  であったため、 $0.6 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$  を高気密住宅の隙間相当面積とした。建蔽率は 0%、15%、30% の 3 つに場合分けした。

表 2.11 シナリオ分け時の各パラメータの入力値

パラメータ	場合分けパターン
風速	$1 \text{ m s}^{-1}, 2 \text{ m s}^{-1}, 3 \text{ m s}^{-1}, 4 \text{ m s}^{-1}, 5 \text{ m s}^{-1}, 6 \text{ m s}^{-1}, 7 \text{ m s}^{-1}, 8 \text{ m s}^{-1}, 9 \text{ m s}^{-1}, 10 \text{ m s}^{-1}$
隙間相当面積	$15 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ (建築年 1980 年以前)、 $5 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ (建築年 1981～1992 年)、 $2 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ (建築年 1993 年以降)、 $0.6 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ (高気密住宅)
建蔽率	0%、15%、30%

### (3) 被ばく低減係数の解析

粒子状物質のみと  $I_2$  のみの被ばく低減係数を表 2.12 と表 2.13 に示す。残りの風速は付録 3 に示す。表に示した変動幅は、沈着率の不確かさによるもののみである。新しい家屋（気密性の高い家屋）ほど、周囲に建物がある家屋ほど、放射性物質の侵入量が小さくなるため、被ばく低減係数は小さい。 $I_2$  は粒子状物質と比較して浸透率が小さいため、 $I_2$  の被ばく低減係数は粒子状物質の半分程度であった。風速が大きくなるほど、被ばく低減係数は大きい。しかしながら、原子力施設からの放出量と同じ場合、風速が強いほど希釈効果により、屋外の放射能濃度が低くなり、吸入量が減少するため、被ばく線量は小さくなる。それ故、屋内退避時の線量評価には、屋内退避のよる被ばく低減効果のみならず希釈効果も含めた評価が必要である。

ヨウ素の各化学形態が混同時の被ばく低減係数を表 2.14～表 2.16 に示す。化学形態の組成比は平成 29 年度事業で調査した、過去の原子力発電所事故時に測定された組成比（粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ ＝1：1：1、5：4：1、1：1：2）を用いた。不活性な  $CH_3I$  が多く含まれる場合には、被ばく低減係数は大きくなり、粒子状物質または  $I_2$  が多く含まれる場合には、被ばく低減係数は小さくなった。

早期大規模放出、後期大規模放出、管理放出、1F1 号機、1F2 号機、1F3 号機の核種組成を利用した場合の被ばく低減係数を表 2.17～表 2.19 に示す。同じヨウ素の化学形態の組成比の場合、ヨウ素のみのシナリオと他の事故シナリオとの被ばく低減係数の差は約 0.05 であった。今回想定した事故シナリオでは、事故シナリオの違いよりもヨウ素の化学形態の組成比の違いの方が被ばく低減係数に大きな影響を与えることを示した。それ故、ヨウ素の化学形態の組成比をどのように設定し、どのような場合にどの組成比を使用すべきかを整理しておく必要がある。

表 2.12 粒子状物質のみの被ばく低減係数(甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後)。上部の数字は中央値、下記の ( ) 内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 0%		風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.60 (0.52–0.65)	0.87 (0.81–0.90)	0.98 (0.96–0.99)
	1981～1992 年	0.35 (0.26–0.43)	0.54 (0.45–0.59)	0.91 (0.86–0.94)
	1993 年以降	0.20 (0.13–0.26)	0.34 (0.25–0.41)	0.63 (0.55–0.67)
高気密住宅		0.19 (0.13–0.25)	0.19 (0.13–0.25)	0.35 (0.26–0.42)
建蔽率 15%		風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.45 (0.36–0.51)	0.66 (0.58–0.70)	0.96 (0.93–0.98)
	1981～1992 年	0.25 (0.16–0.31)	0.40 (0.30–0.46)	0.69 (0.62–0.73)
	1993 年以降	0.19 (0.13–0.25)	0.23 (0.15–0.30)	0.46 (0.36–0.52)
高気密住宅		0.19 (0.13–0.25)	0.19 (0.13–0.25)	0.23 (0.15–0.30)
建蔽率 30%		風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.35 (0.25–0.42)	0.52 (0.43–0.57)	0.85 (0.79–0.88)
	1981～1992 年	0.19 (0.13–0.25)	0.29 (0.20–0.37)	0.52 (0.43–0.58)
	1993 年以降	0.19 (0.13–0.25)	0.19 (0.13–0.25)	0.33 (0.24–0.40)
高気密住宅		0.19 (0.13–0.25)	0.19 (0.13–0.25)	0.19 (0.13–0.25)

表 2.13 I<sub>2</sub> のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、ブルーム通過から 24 時間後）。上部の数字は中央値、下記の ( ) 内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 0%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.08 (0.08-0.09)	0.20 (0.19-0.21)	0.63 (0.6-0.66)
	1981～1992 年	0.03 (0.02-0.03)	0.07 (0.06-0.07)	0.24 (0.23-0.25)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.02 (0.02-0.03)	0.09 (0.09-0.10)
高気密住宅		0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.03 (0.02-0.03)
建蔽率 15%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.04 (0.04-0.05)	0.11 (0.10-0.11)	0.36 (0.35-0.38)
	1981～1992 年	0.01 (0.01-0.01)	0.03 (0.03-0.04)	0.12 (0.11-0.12)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.05 (0.04-0.05)
高気密住宅		0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)
建蔽率 30%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.03 (0.02-0.03)	0.06 (0.06-0.06)	0.19 (0.18-0.20)
	1981～1992 年	0.01 (0-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.06 (0.06-0.07)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.02 (0.02-0.02)
高気密住宅		0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)

表 2.14 混合時（粒子状物質：I<sub>2</sub>：CH<sub>3</sub>I=1：1：1）の被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、ブルーム通過から 24 時間後）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセント値～95 パーセント値を示す。

建蔽率 0%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.50 (0.48-0.51)	0.60 (0.59-0.61)	0.82 (0.81-0.84)
	1981～1992 年	0.41 (0.39-0.43)	0.48 (0.46-0.49)	0.63 (0.61-0.64)
	1993 年以降	0.29 (0.27-0.30)	0.41 (0.39-0.42)	0.51 (0.49-0.52)
	高気密住宅	0.28 (0.27-0.29)	0.28 (0.27-0.29)	0.41 (0.39-0.43)
建蔽率 15%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.45 (0.44-0.47)	0.52 (0.50-0.53)	0.70 (0.68-0.71)
	1981～1992 年	0.33 (0.32-0.35)	0.43 (0.41-0.44)	0.53 (0.52-0.54)
	1993 年以降	0.28 (0.27-0.29)	0.32 (0.31-0.33)	0.45 (0.44-0.47)
	高気密住宅	0.28 (0.27-0.29)	0.28 (0.27-0.29)	0.32 (0.31-0.34)
建蔽率 30%		風速 (m s <sup>-1</sup> )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.41 (0.39-0.42)	0.47 (0.45-0.48)	0.59 (0.58-0.60)
	1981～1992 年	0.28 (0.27-0.29)	0.38 (0.36-0.39)	0.47 (0.46-0.49)
	1993 年以降	0.28 (0.27-0.29)	0.28 (0.27-0.29)	0.40 (0.38-0.41)
	高気密住宅	0.28 (0.27-0.29)	0.28 (0.27-0.29)	0.28 (0.27-0.29)



表 2.15 混合時（粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ =5：4：1）の被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、ブルーム通過から 24 時間後）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセント値～95 パーセント値を示す。

建蔽率 0%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.34 (0.31-0.35)	0.49 (0.46-0.50)	0.77 (0.75-0.79)
	1981～1992 年	0.23 (0.20-0.25)	0.31 (0.28-0.33)	0.52 (0.50-0.54)
	1993 年以降	0.14 (0.12-0.16)	0.22 (0.19-0.24)	0.35 (0.33-0.37)
高気密住宅		0.14 (0.12-0.16)	0.14 (0.12-0.16)	0.23 (0.20-0.25)
建蔽率 15%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.27 (0.24-0.29)	0.37 (0.34-0.38)	0.61 (0.59-0.63)
	1981～1992 年	0.17 (0.14-0.19)	0.25 (0.21-0.27)	0.39 (0.36-0.40)
	1993 年以降	0.14 (0.12-0.16)	0.16 (0.14-0.18)	0.27 (0.24-0.29)
高気密住宅		0.14 (0.12-0.16)	0.14 (0.12-0.16)	0.16 (0.14-0.18)
建蔽率 30%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.22 (0.19-0.25)	0.30 (0.27-0.32)	0.47 (0.45-0.49)
	1981～1992 年	0.14 (0.12-0.16)	0.20 (0.17-0.22)	0.30 (0.27-0.32)
	1993 年以降	0.14 (0.12-0.16)	0.14 (0.12-0.16)	0.22 (0.19-0.24)
高気密住宅		0.14 (0.12-0.16)	0.14 (0.12-0.16)	0.14 (0.12-0.16)

表 2.16 混合時（粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ =1：1：2）の被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、ブルーム通過から 24 時間後）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセント値～95 パーセント値を示す。

建蔽率 0%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.63 (0.62-0.64)	0.71 (0.70-0.71)	0.87 (0.86-0.88)
	1981～1992 年	0.55 (0.54-0.57)	0.61 (0.60-0.62)	0.73 (0.71-0.73)
	1993 年以降	0.40 (0.39-0.41)	0.55 (0.53-0.56)	0.64 (0.62-0.64)
高気密住宅		0.39 (0.38-0.40)	0.39 (0.38-0.40)	0.55 (0.54-0.56)
建蔽率 15%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.60 (0.58-0.60)	0.64 (0.63-0.65)	0.77 (0.76-0.78)
	1981～1992 年	0.46 (0.45-0.47)	0.57 (0.56-0.58)	0.65 (0.64-0.66)
	1993 年以降	0.39 (0.38-0.40)	0.44 (0.43-0.45)	0.60 (0.58-0.61)
高気密住宅		0.39 (0.38-0.40)	0.39 (0.38-0.40)	0.44 (0.43-0.45)
建蔽率 30%		風速 ( $m s^{-1}$ )		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.55 (0.54-0.56)	0.61 (0.6-0.62)	0.70 (0.69-0.71)
	1981～1992 年	0.39 (0.38-0.40)	0.51 (0.50-0.52)	0.61 (0.60-0.62)
	1993 年以降	0.39 (0.38-0.40)	0.39 (0.38-0.40)	0.54 (0.53-0.55)
高気密住宅		0.39 (0.38-0.40)	0.39 (0.38-0.40)	0.39 (0.38-0.40)

表 2.17 事故シナリオを想定した場合の被ばく低減係数（実効線量の比、プルーム通過から 24 時間後）。ヨウ素の組成比は粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ =1：1：1 とした。風速は  $2\text{ms}^{-1}$ 、建蔽率は 15% とした。数字は中央値。

		事故シナリオ						ヨウ素のみ
		早期大規模	後期大規模	管理放出	1F 1号機	1F 2号機	1F 3号機	
建築年	1980 年以前	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.57	0.52
	1981～1992 年	0.47	0.47	0.46	0.46	0.47	0.46	0.43
	1993 年以降	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.34	0.32
	高気密住宅	0.31	0.31	0.30	0.29	0.30	0.29	0.28

表 2.18 事故シナリオを想定した場合の被ばく低減係数（実効線量の比、プルーム通過から 24 時間後）。ヨウ素の組成比は粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ =5：4：1 とした。風速は  $2\text{ms}^{-1}$ 、建蔽率は 15% とした。数字は中央値。

		事故シナリオ						ヨウ素のみ
		早期大規模	後期大規模	管理放出	1F 1号機	1F 2号機	1F 3号機	
建築年	1980 年以前	0.39	0.39	0.40	0.43	0.40	0.43	0.37
	1981～1992 年	0.27	0.26	0.27	0.28	0.27	0.28	0.25
	1993 年以降	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.19	0.16
	高気密住宅	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.14

表 2.19 事故シナリオを想定した場合の被ばく低減係数（実効線量の比、プルーム通過から 24 時間後）。ヨウ素の組成比は粒子状物質： $I_2$ ： $CH_3I$ =1：1：2 とした。風速は  $2\text{ms}^{-1}$ 、建蔽率は 15% とした。数字は中央値。

		事故シナリオ						ヨウ素のみ
		早期大規模	後期大規模	管理放出	1F 1号機	1F 2号機	1F 3号機	
建築年	1980 年以前	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.64
	1981～1992 年	0.60	0.61	0.60	0.58	0.60	0.58	0.57
	1993 年以降	0.46	0.47	0.46	0.44	0.46	0.44	0.44
	高気密住宅	0.41	0.42	0.41	0.39	0.41	0.39	0.39

#### (4) 感度解析

ここでは、ヨウ素のみが放出された場合で、粒子状物質のみまたは $I_2$ のみの被ばく低減係数に対する感度解析を実施した。感度解析手法はEE法である。本事業では各シナリオに対して10000通りのパラメータセットを用意し、感度解析を実施した。

感度解析結果例を図2.58と図2.59に示す。全ての感度解析結果を付録4に示す。感度解析の結果、粒子状物質のみについては、沈着率が最も感度が高く、浸透率、自然換気率、風速、隙間相当面積、建蔽率の順に感度が小さくなった。 $I_2$ のみについては、浸透率が最も感度が高く、自然換気率、沈着率、風速、隙間相当面積、建蔽率の順に感度が小さくなった。気密性能が高く、自然換気率が小さい場合（例えば、高気密住宅）には、風速、隙間相当面積、建蔽率が少し変わっても自然換気率が変わらず、被ばく低減係数への影響はほとんどなかった。

図の横軸( $\mu$ )は、対象のパラメータが1変化した時に、被ばく低減係数がどの程度変化するか（例：風速の $\mu$ を0.1とすると、風速が $1\text{ m s}^{-1}$ 変化した時に被ばく低減係数が0.1大きくなる）と同等である。粒子状物質の浸透率の実験結果（図2.55）によると、近似曲線からの偏差は最大で約0.25であった。粒子状物質の浸透率が0.25変化した場合、被ばく低減係数は約0.2変化する。粒子状物質の沈着率の実験結果（図2.52）によると、標準偏差は最大で約0.1であった。粒子状物質の沈着率が1標準偏差分変化した場合、被ばく低減係数は約0.1変化する。粒子状物質では沈着率の感度が最も大きかったものの、沈着率の変動幅が小さいため、被ばく低減係数への不確かさは浸透率に比べて小さかった。

$I_2$ の浸透率の実験結果（図2.12）によると、標準偏差は約0.3であった。 $I_2$ の浸透率が1標準偏差分変化した場合、被ばく低減係数は約0.2変化する。 $I_2$ の沈着率の実験結果（図2.8）によると、標準偏差は約2であった。 $I_2$ の沈着率が1標準偏差分変化した場合、被ばく低減係数は約0.2変化する。 $I_2$ の浸透率と沈着率の実験誤差は、被ばく低減係数に大きな不確かさを及ぼしていることが示されている。

風速の感度は沈着率と同等であった。今回のシナリオケースでは $1\text{ m s}^{-1}$ 刻みで解析をしており、各シナリオケースの変動幅はその半分の $0.5\text{ m s}^{-1}$ である。風速が $0.5\text{ m s}^{-1}$ 変化した場合、被ばく低減係数は最大で約0.05変化する。今回のシナリオケースで被ばく低減係数を評価すれば、風速の違いによる被ばく低減係数への不確かさは0.1以内に抑えられることが示されている。

隙間相当面積は建築年が新しい家屋ほど、感度が高くなった。変動幅も建築年によって異なっており、建築年1980年以前で約 $5\text{ cm}^2\text{ m}^{-2}$ 、建築年1981～1992年で約 $2.5\text{ cm}^2\text{ m}^{-2}$ 、建築年1993年以降で約 $1\text{ cm}^2\text{ m}^{-2}$ 、高気密住宅で約 $0.5\text{ cm}^2\text{ m}^{-2}$ である。隙間相当面積が各建築年の変動幅で変化した場合、被ばく低減係数は最大で約0.1変化する。今回のシナリオケースで被ばく低減係数を評価すれば、家屋間の隙間相当面積の違いによる被ばく低減係数への不確かさは0.1以内に抑えられることが示されている。

建蔽率は風速が大きいほど、感度が高くなった。今回のシナリオケースでは15%刻みで解析を行い、各シナリオケースの変動幅はその半分の7.5%である。建蔽率が7.5%変化した場合、被ばく低減係数は最大で約0.1変化する。今回のシナリオケースで被ばく低減係数を評価すれば、建蔽率の違いによる被ばく低減係数への不確かさは0.1以内に抑えられることが示されている。

以上より、風速、隙間相当面積、建蔽率のシナリオ依存のパラメータについては、今回示したシナリオで解析すれば、各パラメータの変動による被ばく低減係数への不確かさは0.1以下に抑えられることが示された。粒子状物質の浸透率及び $I_2$ の沈着率と浸透率については、現状の実験誤差では、被ばく低減係数は0.2程度変動する可能性が示され、変動幅を小さくするために実験誤差の低減が求められる。 $I_2$ の浸透率の標準偏差を0.15以下、 $I_2$ の沈着率の標準偏差を1以下にすれば、標準偏差分の変動による被ばく低減係数の変動は0.1以下に抑えられると考えられる。

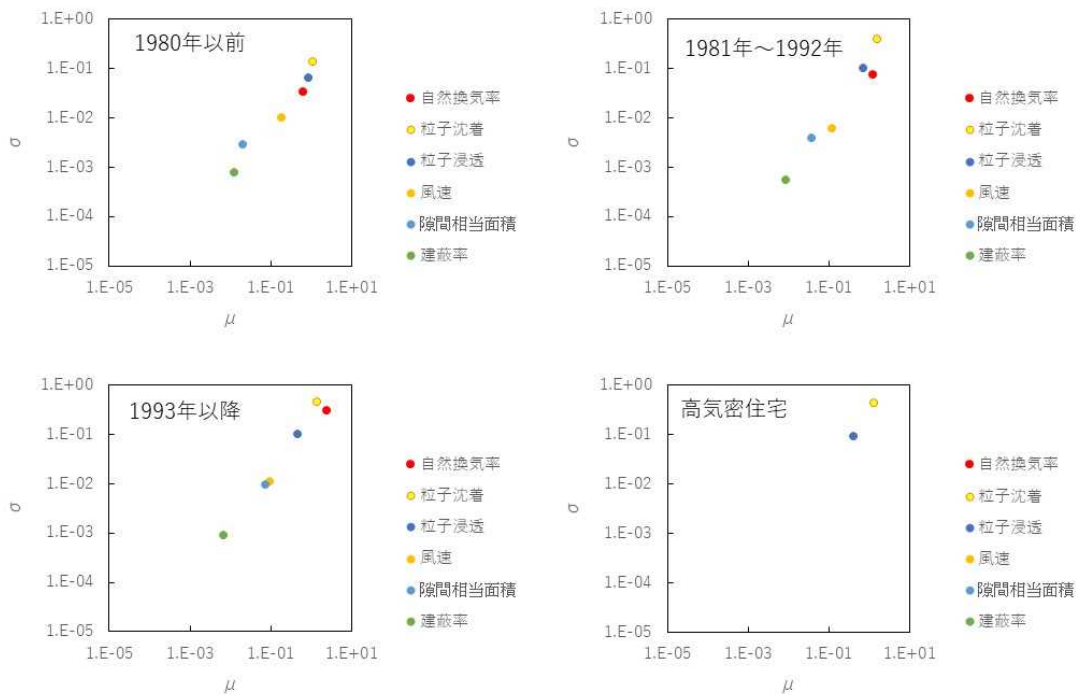


図 2.58 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建蔽率 15%、粒子状物質のみ。

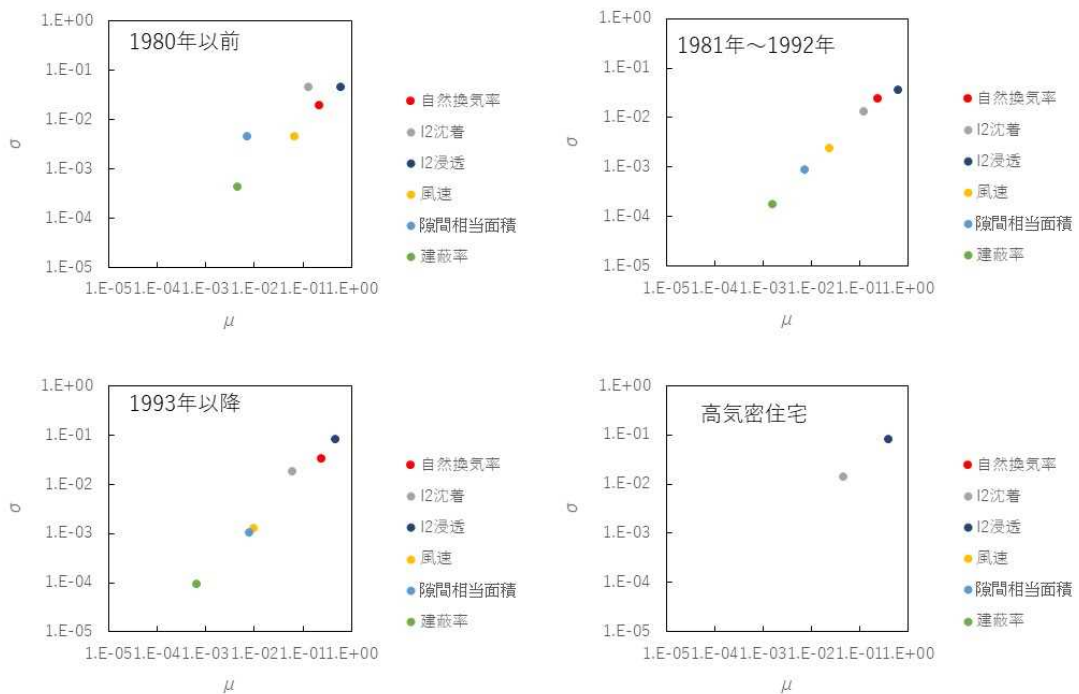


図 2.59 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建蔽率 15%、 $\text{I}_2$ のみ。

## 2.5 第2章の参考文献

- Bunch D.F. (1968): Controlled Environmental Radioiodine Tests, Progress Report 4, Rep. IDO-12063.
- EPA (1978): Protective Action Evaluation Part I, The effective of sheltering as a protective action against nuclear accidents involving gaseous releases, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-520/1-78-001 A.
- IAEA. (2003): Testing of environmental transfer models using data from the atmospheric release of Iodine-131 from the Hanford site, USA, in 1963. Report of the Dose Reconstruction Working Group of the Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) Programme, Theme 2.
- IAEA. (2012): The Chernobyl I-131 release: Model validation and assessment of the countermeasure effectiveness. Report of the Chernobyl <sup>131</sup>I Release Working Group of EMRAS Theme 1.
- ICRP (1995): Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 inhalation dose coefficients, ICRP Publication 71, *Ann. ICRP* **25** (3–4).
- ICRP (2012): Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60, ICRP Publication 119, *Ann. ICRP* **41**.
- Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F., Okuda T. and Ikemori F. (2012): Sulfate aerosol as a potential transport medium of radiocesium from the Fukushima nuclear accident, *Environ. Sci. Technol.*, **46**(11), pp.5720–5726.
- Lai A.C.K. and Nazaroff W.W. (2000): Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *J. Aerosol Sci.*, **31**(4), pp. 463–476.
- Lebel L.S., Dickson R.S. and Glowa G.A. (2016): Radioiodine in the atmosphere after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *J. Environ. Radioact.*, **151**, pp. 82–93.
- Morris M.D. (1991): Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, **33**, pp. 161–174.
- Nishiguchi K., Utani K. and Fujimori E. (2008): Real-time multielement monitoring of airborne particulate matter using ICP-MS instrument equipped with gas converter apparatus, *J. Anal. At. Spectrom.*, **23**, pp. 1125–1129.
- Nishiguchi K., Utani K., Gunther D. and Ohata M. (2014): Gas to particle conversion-gas exchange technique for direct analysis of metal carbonyl gas by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, *Anal. Chem.*, **86**, pp. 10025–10029.
- Ohata M. and Nishiguchi K. (2017): Direct analysis of gaseous mercury in ambient air by gas to particle conversion-gas exchange ICPMS, *J. Anal. At. Spectrom.*, **32**, pp. 717–722.
- Ramsdell J.V., Simonen C.A. and Burk K.W. (1994); Regional atmospheric transport code for Hanford emission tracking (RATCHET). Hanford Environmental Dose Reconstruction Project.
- Roed J. (1988): Parameters used in consequence calculations for an urban area, In Proc. Joint OECD(NEA)/CEC Workshop of Recent Advances in Reactor Accident Consequence Assessment, Rome (Italy), 25-29 January 1988. Report CSNI 145, OECD.
- Roed, J., and Jacob, P. (1990). Deposition on urban surfaces and subsequent weathering, *Proceedings of a seminar on methods and codes for assessing the off-site consequences of nuclear accidents* (vol. 1), Athens, Greece, 1990, EUR13013, pp. 335-356.
- Sehmel G.A. (1980): Particle and dry gas deposition, A review, *Atmos. Environ.*, **14**, pp.983–1011.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1998): Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook, NUREG/CR-6410.
- 赤林伸一, 村上周三, 水谷国男, 高倉秀一 (1994) : 周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関

- する風洞実験および換気量予測その1, 日本建築学会計画系論文集, **456**, pp.17-27.
- 飯田裕貴子, 吉川徹 (2014) : 新規開発された使い捨て呼吸用保護具の装着教育効果に関する研究, 労働科学, **2**, pp.53-64.
- 伊藤一秀, 成川潤, 李坐 (2011) : ナノスケール気中分散粒子の壁面沈着モデルの概要と感度解析  
室内環境中のナノスケール気中分散粒子を対象とした CFD 解析用の壁面沈着モデル第  
1 報, 日本建築学会環境系論文集, **76(669)**, pp.973-979.
- 公立陶生病院 : マスクの適切な使い方  
<http://www.aichi-med-u.ac.jp/aipn/kennkyuu/pdf20131030/20130913sugawa.pdf> (最終閲覧日 :  
2020 年 3 月 3 日) .
- 国土交通省 : 1. 省エネ基準の見直し等に伴う改正  
<https://www.mlit.go.jp/common/001007987.pdf> (最終閲覧日 : 2020 年 3 月 3 日) .
- 張会波, 吉野博, 村上周三, 坊垣和明, 田中俊彦, 赤林伸一, 阿部恵子 (2009) : 全国の住宅におけ  
る室内湿度環境に関する分析, 日本建築学会技術報告集, **15(30)**, pp.453-457.
- 野川憲夫, 古川修 (2008) : チャコールフィルタの現状と今後の課題, *Isotope News*, **645**, pp. 18-23.
- 武田隼人 (2011) : 放射性物質捕集用エアフィルタについて, 空気清浄, **49**, pp.34-37.
- 東海村 : とうかいの統計  
[https://www.vill.tokai.ibaraki.jp/sonseijoho/tokei\\_chosa\\_kansa/tokei/2916.html](https://www.vill.tokai.ibaraki.jp/sonseijoho/tokei_chosa_kansa/tokei/2916.html) (最終閲覧日 :  
2020 年 3 月 3 日)
- 統計局 (2013) : 平成 25 年住宅・土地統計調査, 2013.  
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/NewList.do?tid=000001063455> (最終閲覧日 : 2020 年 3 月 3  
日)
- 放射線医学総合研究所 (1998) : ラドン濃度測定・線量評価最終報告書.
- 明星敏彦 (2013) : PM2.5 とマスク, エアロゾル研究, **28**, pp.287-291.
- 村田寿典 (1971) : 放射性ヨウ素の捕集, 空気清浄, **8**, pp. 41-48.
- 森宜久, 上島直幸 (2011) : 放射性ヨウ素の吸着材及び放射性ヨウ素の除去装置, 三菱重工業株式  
会社, 特許公告番号 WO2011158564A1.
- 吉野博, 長谷川房雄, 内海康雄 (1984) : 住宅における自然換気量の予測に関する研究 その2.単  
室の場合の予測手法の検証及び気密性能と換気量との対応関係について, 日本建築学  
会学術講演梗概集.
- 吉野博, 長谷川房雄, 松本博, 内海康雄, 赤林伸一, 牧田一志 (1987) : 仙台市の枠組み壁工法に  
よる戸建住宅における温度・空気環境およびエネルギー消費量の実態調査, 日本建築学  
会計画論文報告集, **375**, pp.17-27.

## 目次

3. 外部被ばくの低減効果の評価 .....	3-1
3.1 実験概要 .....	3-1
3.2 実験設備 .....	3-1
3.2.1 初期沈着割合 .....	3-1
3.2.2 残存率 .....	3-3
3.3 実験方法 .....	3-5
3.3.1 屋根材 .....	3-5
3.3.2 初期沈着割合 .....	3-5
3.3.3 残存率 .....	3-7
3.4 実験結果 .....	3-9
3.4.1 初期沈着割合 .....	3-9
3.4.2 残存率 .....	3-11
3.5 外部被ばく低減係数への影響 .....	3-11
3.6 第3章の参考文献 .....	3-12



### 3. 外部被ばくの低減効果の評価

第3章では、外部被ばくの低減効果の評価で課題として挙げられている、屋根面汚染の割合及びウェザリングによる沈着量の時間変化を求めるための実験系と実験結果について示す。また、その実験結果を基に、外部被ばく低減効果がどの程度変わりうるかを示す。

#### 3.1 実験概要

平成30年度事業では、外部被ばく低減効果の評価に必要なパラメータを得るために、大きく分けて二つの実験系を構築した。一つは初期の湿性沈着により、放射性物質が屋根面に付着する割合を求めるための実験、もう一つが湿性沈着した後の降雨等による放射性物質の除去割合の時間変化を求めるための実験である。なお、本実験では放射性物質を扱わずに非放射性物質（安定セシウム, CsCl）を使用した。

湿性沈着では、降雨に含まれる放射性物質が全て屋根面に付着せずに、一部が雨水とともに流出する可能性がある。本報告書では、この割合を「初期沈着割合」と呼び、以下のように定義する。

$$\text{初期沈着割合} = \frac{\text{単位面積当たりの屋根面に付着した放射性物質の量 (Bq m}^{-2}\text{)}}{\text{単位面積を通過した放射性物質の全量 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad (4.1)$$

上式の分母は放射性物質の流出及び地中への浸透を考えない場合の地表面上の放射能濃度と等しい。

屋根面に放射性物質が沈着した後、降雨等により放射性物質が洗い流される（ウェザリング効果）。本報告書では、降雨後に放射性物質が屋根面に残った割合を「残存率」と呼び、以下のように定義する。

$$\text{残存率 (t)} = \frac{\text{時刻 t 時点での沈着量 (Bq)}}{\text{初期沈着量 (Bq)}} \quad (4.2)$$

初期沈着割合を求める実験では、湿性沈着を模擬した実験系を作成した。既知濃度のセシウムを含んだ溶液をサンプル上に降らせ、その後のサンプル上のセシウム濃度を測定することにより、初期沈着割合を求めた。

残存率を求める実験では、初期沈着割合を求める実験系でセシウムを付着させたサンプルを使用した。サンプルを実環境に放置したものと、人為的に降水等を発生することができる装置を用いて、経過時間ごとにサンプル上のセシウム濃度を測定することにより、残存率を求めた。

#### 3.2 実験設備

##### 3.2.1 初期沈着割合

初期沈着割合を求めるための実験系の概略図と写真を図3.1に示す。本実験系は上部（吊り下げ降水容器）に安定セシウムを溶かした水（模擬雨水）を入れ、振とう機を用いて模擬雨水をサンプル上に降らせるものである。降水強度はポンプの流量を変えることにより任意に変更でき、降水強度の違いによる初期沈着割合への影響を調査できる。また、上部の振とう機を用いることで、なるべく模擬雨水がサンプル上に一様にあたるようになっている。サンプルを支える台は、サ

サンプルと床面との角度を自由に変更できる設計となっており、屋根の角度の違いによる初期沈着割合への影響を調査できる。また、サンプルから流れ出た模擬雨水中のセシウム濃度を測定するために、すぐに排水しないように降雨水受け台を設置した。

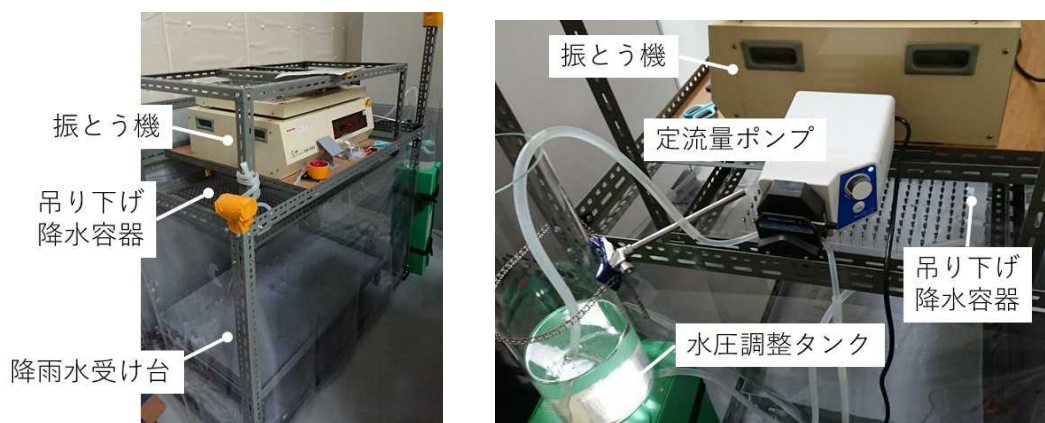
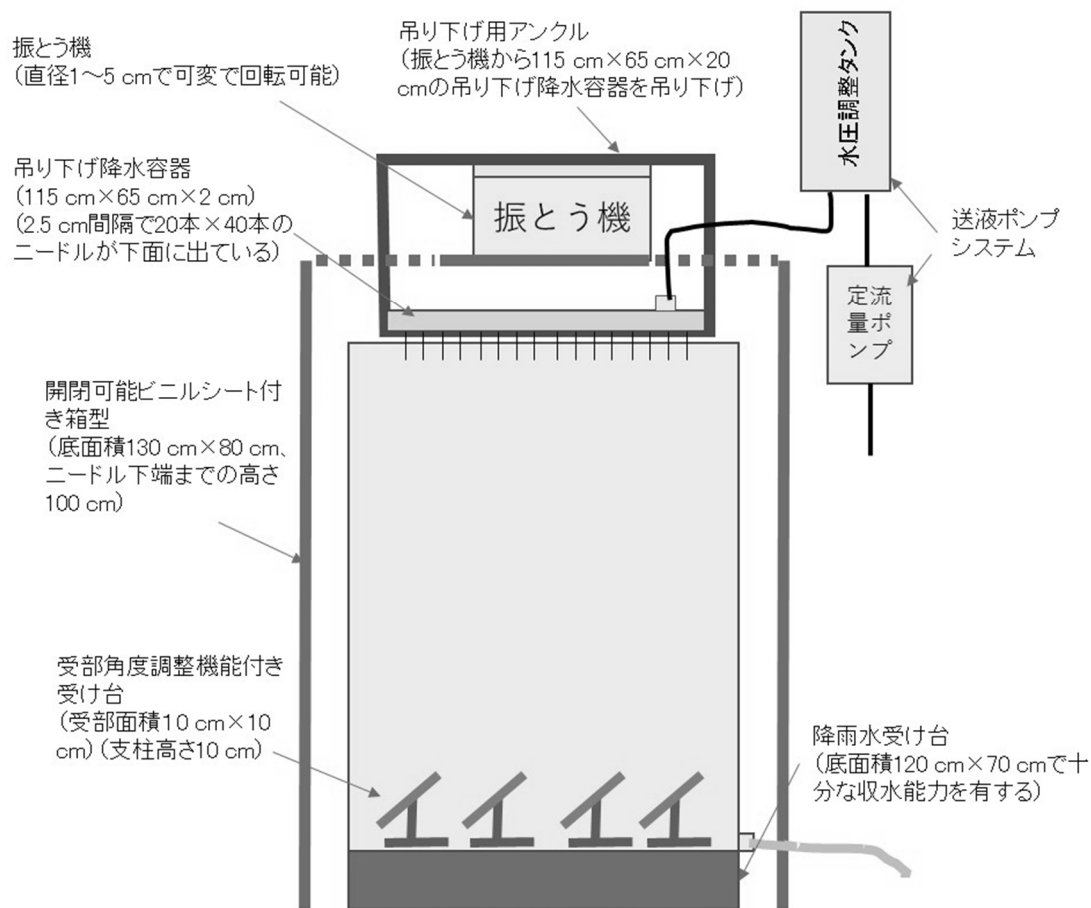


図 3.1 人工降雨装置の概略図と写真

### 3.2.2 残存率

残存率を求めるための実験系を図 3.2 に示す。また、人工的な降雨と実際の降雨による残存率を比較するために、図 3.3 の実験系を外に設置した。本実験では、人工的な降雨を発生させるために、スーパーキセノンウェザーメーター（スガ試験機製、SX75；以下、ウェザーメーターと呼ぶ）を用いた。ウェザーメーターは装置内にキセノンランプとスプレー口があり、キセノンランプで太陽光を模擬、スプレー口から放出される水で降雨を模擬している。一つのサンプルホルダーにつき、3つのサンプル（7 cm×15 cm）を取り付けることが可能であり、このサンプルホルダーをウェザーメーターに 18 個取り付けることができる。実験時は図 3.2 の左上図のようにサンプルホルダーでキセノンランプの周囲を囲んだ状態となる。サンプルをサンプルホルダー全部に取り付けた場合、上部に付着した Cs が洗い流されて、下部のサンプルに再付着する恐れがある。再付着を避けるために、サンプルはウェザーメーターの下側のみに取り付けた。

本実験では、降水条件を変更でき、加速評価もできる点から、ウェザーメーターを使用し、実環境に比べて短い時間で様々な条件下での残存率の変化を調査することを目的としている。ウェザーメーターに装着するサンプルは上記の初期沈着割合の実験で作成したサンプルを使用した。

外に設置した実験系は、EC/PREPARE プロジェクトで行われている実験を参考にした（Brown et al., 2011）。EC/PREPARE プロジェクトでは、英国の建築材に Am-241、Sr-95、Co-60、Cd-109 を塗布し、そのサンプルを屋外に放置し、その後の各放射性物質のサンプル上の濃度が測定された。サンプルのみならず、サンプルを流れた雨水中の放射性物質の濃度も測定された。EC/PREPARE プロジェクトの実験を基に、本実験系は部材毎、屋根材の傾き毎に流れ出た Cs 量を測定できるように、条件毎に雨水を回収するように設計されている（図 3.3 の右側）。また、屋根材の傾きによる残存率の違いを測定できるように設計されている。実際の屋根環境を模擬するために、雨や日光を遮るものが周囲にほとんどない場所に機器を設置した。

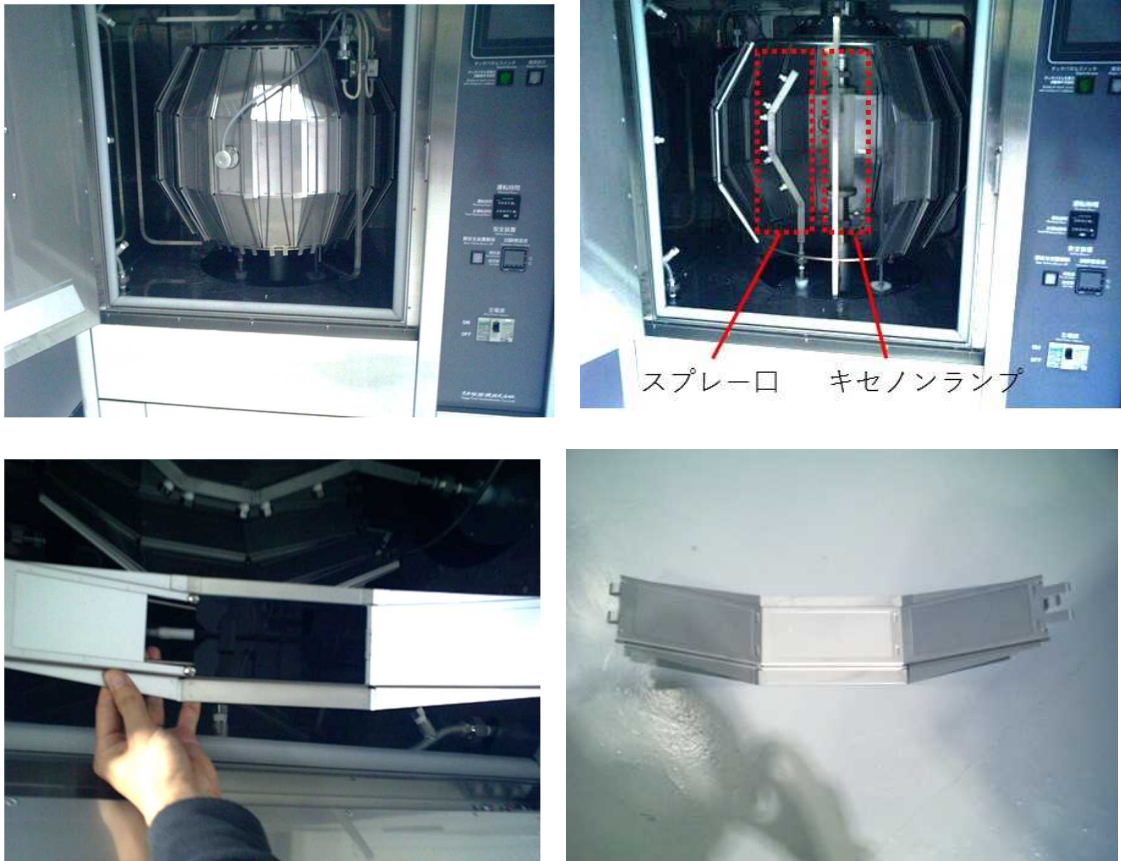


図 3.2 ウェザーメーターの概要図 (左上：サンプルホルダーを全て設置した状態、右上：サンプルホルダーを一部取り外した状態、左下：黒板付きサンプルホルダー、右下：サンプルホルダー)

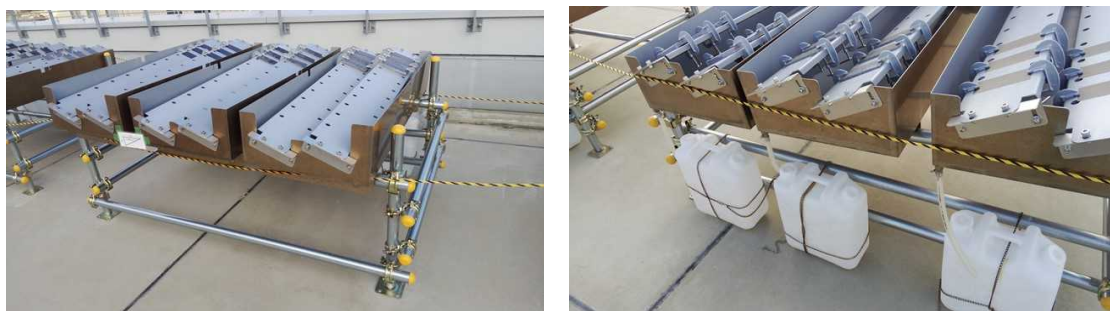


図 3.3 外に設置した曝露試験台

### 3.3 実験方法

#### 3.3.1 屋根材

平成30年度事業で調査したように、木造住宅の屋根葺き材として、粘土瓦、スレート瓦、金属鋼板が全体の9割以上を占めている（住宅金融支援機構）。本実験では、上記に示した屋根材（図3.4）を対象とした。粘土瓦には、多くの種類があり、本事業では日本三大瓦の一つであり、生産量が多い淡路瓦を対象とした。スレート瓦には、石綿の含まれていない平板スレートが戸建て住宅で最も使用されていることから、シェアの高いメーカーの同種のスレートを対象とした。金属鋼板には、ガルバリウム鋼板が一般的に使われているため、本実験も同じ鋼板を対象とした。

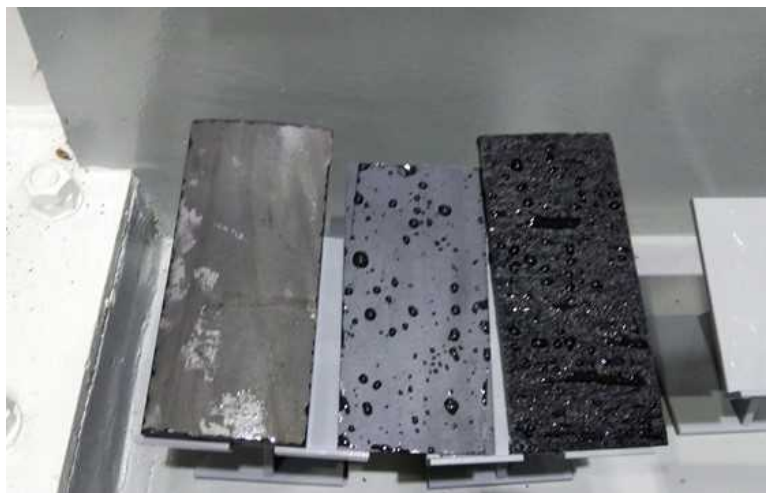


図 3.4 実験対象の屋根材（左から瓦、金属鋼板、スレート）

#### 3.3.2 初期沈着割合

初期沈着割合を求めるための実験手順は以下の通りである。

1. 模擬雨水の作成
2. 降水
3. 濃度測定

##### (1) 模擬雨水の作成

平成30年度事業で、ICP-MSで測定できる模擬雨水中のセシウム濃度を計算し、 $1.5 \text{ g L}^{-1}$ であれば問題なく測定できると試算した。試験的に $1.5 \text{ g L}^{-1}$ の模擬雨水を用いて、サンプルを作成し、そのサンプルを測定した結果、ICP-MSで十分に測定できることを確認した。

##### (2) 降水

事前試験で、人工降雨装置の降水量は装置の真ん中付近で安定し、端の方で安定しないことが示された。本実験では、サンプルを図3.5のように、なるべく装置の真ん中付近に設置した。屋根の傾きは一般的に施工される4寸勾配（ $21.8^\circ$ ）とした。サンプルの中央には積算降水量を測定するための容器を配置した。この容器に溜まった水の量（積算降水量）と雨水曝露時間を用いて、実験時の平均降水強度を算出した。平均降水強度と積算降水量は、平成30年度事業で調査した範囲（積算降水量 $0\sim 10 \text{ mm}$ 、降水強度 $0\sim 10 \text{ mm h}^{-1}$ ）をカバーするようにした。

サンプルを設置し、定流量ポンプを稼働させた後、すぐに降水強度は一定にならない。そこで、

定流量ポンプを稼働させる前にサンプル上にシートを被せ、降水強度が一定になったことを確認した後、シートを外した。シートを外した時間を開始時間とした。また、シートを再度サンプル上に被せた時間を終了時間とした。なお、平均降水強度を求めるために必要な雨水曝露時間は、開始時間から終了時間までの時間である。

降雨後、サンプルを人工降雨装置から取り出し、実験室内で自然乾燥させた（図 3.4）。自然乾燥させるときも、サンプルの傾きを降雨時と同じ勾配（21.8°）とした。

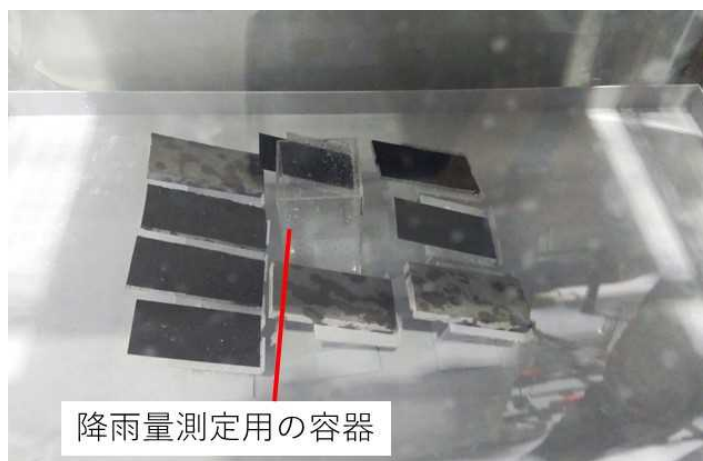


図 3.5 人工降雨装置作動時の状況

### (3) 濃度測定

濃度測定には ICP-MS (Agilent 社製, 7700x) を利用した。濃度測定する箇所を硝酸で洗い流し、その硝酸中に含まれる Cs を ICP-MS で測定し、サンプル上の Cs 濃度を求めた。硝酸で測定する箇所を洗い流す際に、他の箇所からの Cs が含まれることによる誤差を小さくするために、グルーで測定箇所を囲った（図 3.6）。硝酸で洗い流す手法では、屋根材と強く吸着した Cs や、屋根材の中にしみ込んだ Cs を測定できず、実際に存在する Cs 量よりも過小に測定される。実際に存在する Cs 量を評価するためには、硝酸で洗い流した際の Cs 回収率（実際に測定された Cs 量/実際にサンプル上に存在する Cs 量）を事前に求める必要がある。そこで、既知の Cs 量を付着させたサンプルを用意し、実際の測定手法で測定した Cs 量と比較することにより、Cs 回収率を求めた（表 3.1）。回収率は、スレート材と金属鋼板で約 30%、瓦で約 2%であった。

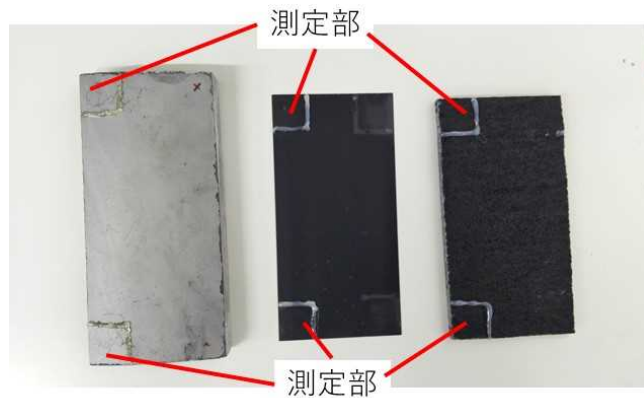


図 3.6 サンプル測定前の状況

表 3.1 各部材の回収率

屋根材	回収率 (%)
瓦	1.7
スレート	31.7
金属鋼板	33.3

### 3.3.3 残存率

残存率を求めるための実験手順は以下の通りである。

1. (実環境試験) 実環境中にサンプルを放置
1. (ウェザーメーター使用試験) 降水と乾燥 (模擬太陽照射) の繰り返し
2. 濃度測定

濃度測定には、初期沈着割合の濃度測定と同様に ICP-MS を用いた。なお、初期沈着割合の試験で作成したサンプルを用いた。

#### (1) 実環境下での実験方法

初期沈着割合で作成したサンプルを図 3.7 のように設置した。サンプルを挟むためのクランプによる Cs の残存率への影響を小さくするため、濃度測定で使用しない箇所 (サンプル中央端付近) で固定するようにした。サンプルの傾きは初期沈着割合と同様に 4 寸勾配とした。設置期間は 2019 年 11 月 28 日～同年 12 月 5 日である。そのうち、降雨の期間は約 6 時間であり、その期間の積算降水量は 15 mm、最大降水強度は  $5 \text{ mm h}^{-1}$ 、平均降水強度は  $2.5 \text{ mm h}^{-1}$  であった。



図 3.7 実環境試験の様子

## (2) ウェザーメーター使用の実験方法

ウェザーメーターを稼働させる際に必要な設定項目は、(1)運転モードの稼働時間、(2)放射照度、(3)黒板温度または槽内温度、(4)湿度である。これらの項目は、平成 30 年度事業で調査した内容を基に、表 3.2 のように設定した。

平成 30 年度事業で、ウェザーメーターの 1 分間の降水では実環境で約 1.7mm の降水量に相当することを示した。サイクル回数は、この値を用いることによって決定した。ここでは、実環境試験と残存率を比較するため、実環境試験時の積算降水量 15mm 相当（サイクル回数 9 回）とした。

表 3.2 ウェザーメーターの設定条件

運転モードの稼働時間	「照射+降雨」 <sup>1</sup> を 1 分間、「照射」を 5 分間のサイクル
放射照度	60 W m <sup>-2</sup>
黒板温度、槽内温度	黒板温度 55℃、槽内温度は 40℃
湿度	65%

## (3) 濃度測定

本実験では、初期沈着割合で作成したサンプルを用いており、一部は初期沈着割合を求めるために硝酸で洗い流されている。また、クランプで固定された部分は雨水が当たらない部分であるため、新たに測定する部分は、初期沈着割合で使用した部分とクランプで固定された部分以外と

<sup>1</sup> 「降雨のみ」の稼働モードも可能であるが、短い間隔でキセノンランプの点灯と消灯を繰り返す行為はキセノンランプの寿命を短くし、装置の負担が大きく、想定以上の電力消費を引き起こす可能性があり、注意が必要である。安全面をとり、実験では「降雨のみ」を行わずに全て「照射+降雨」とした。



した。その部分を硝酸で洗い流し、その硝酸を ICP-MS で測定した。

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 初期沈着割合

実験条件を表 3.3 に示す。表 3.4 に実験毎の付着量を示す。ICP-MS の測定値を回収率で除することで、部材に付着している量に補正した。図 3.8 に初期沈着割合と平均降水強度または積算降水量の関係を示す。

表 3.4 に示されるように、部材の測定位置により、付着量が異なっており、10 倍以上異なるケースも存在した。上部に付着した Cs が水とともに洗い流され、下部に Cs がより多く付着する可能性がある。しかしながら、下部の付着量が多いケースは 27 ケース中 13 ケースであり、付着量の位置依存性は本実験では見られなかった。サンプルの位置によって、降雨が当たる回数（量）が異なったことで、付着量が位置によって異なった可能性が高いと考えられる。

図 3.8 に示されるように、どの部材においても、降水強度と積算降水量が大きいほど、初期沈着割合が小さい傾向であった。また、同じ降水条件でも、金属鋼板の初期沈着割合は他の部材に比べて小さい傾向であった。降水強度と積算降水量が大きくなると、部材上に水滴が形成され、その水滴が流れやすくなる。さらに、雨水として落ちてきた水が、部材上で乾かずにそのまま水滴として流れやすくなる。その結果、雨水として落ちてきた一部の Cs が部材上に移行せずにそのまま雨水中に含まれたまま流れ、初期沈着割合が小さくなったと考えられる。部材上の水滴は部材表面が滑らかなほど、流れやすい傾向である。金属鋼板は他の部材と比べて表面が滑らかであるため、他の部材と比較して初期沈着割合が小さい傾向であったと考えられる。

表 3.3 各実験の平均降水強度と積算降水量

実験 No.	平均降水強度 (mm h <sup>-1</sup> )	積算降水量 (mm)
1	5	5
2	5.2	26
3	10	20
4	15	3
5	7	7
6	2.9	26
7	3	3
8	1	2
9	4.3	15

表 3.4 各部材の Cs 付着量 ( $\mu\text{g}$ )

実験 No.	瓦			スレート			金属鋼板		
	上部	下部	平均	上部	下部	平均	上部	下部	平均
1	4	67	35	19	97	58	5	93	49
2	160	55	107	62	111	87	27	26	26
3	119	71	95	79	45	62	29	4	17
4	13	80	46	5	27	16	38	14	26
5	145	141	143	23	73	48	20	28	24
6	174	2962	1568	106	140	123	50	22	36
7	29	17	23	15	118	67	17	13	15
8	160	81	121	87	65	76	41	26	33
9	276	174	225	51	202	126	28	35	32

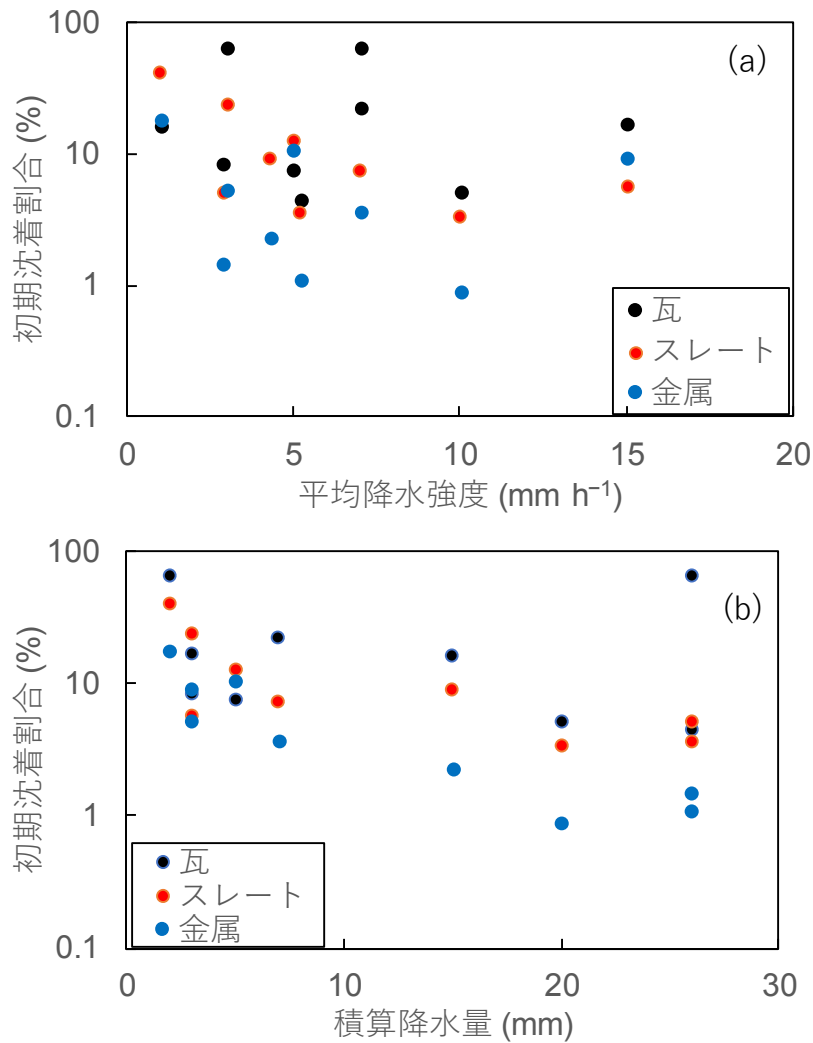


図 3.8 (a) 初期沈着割合と平均降水強度の関係。(b) 初期沈着割合と積算降水量の関係。

### 3.4.2 残存率

実環境試験とウェザーメーター試験の残存率を表 3.5 に示す。実環境試験では、残存率はスレート、瓦、金属鋼板の順に小さくなった。2.3.2 節に示した実家屋での放射能分布測定では、Cs-137 の放射能濃度は瓦よりもスレートの方が約 5 倍大きいことを示した。本実験では、降水期間は短いものの、残存率はスレートの方が大きく、同様の傾向を示した。ウェザーメーター試験では、瓦の残存率を測定できず、スレート、金属鋼板の順に残存率は小さくなった。残存率の大小関係は同じであったものの、値は実環境試験とウェザーメーター試験で差が生じた。この原因の一つとして、Cs 付着量の不均一性が考えられる。表 3.4 に示したように、同じサンプルでも場所により、付着量が 10 倍以上異なっていた。そのため、初期沈着割合を求めるために測定した位置と残存率を求めるために測定した位置で付着量が異なっている可能性が高く、精度よく残存率を求めることができなかつた可能性が高い。

精度よく残存率を求めるための案として、付着量が一定のサンプルを人為的に作成し、それを利用して同様の実験を行うことが挙げられる。また、本事業では Cs の付着量を測定するために、硝酸を利用して、サンプルに付着した Cs を洗い流している。測定した部位には、Cs がほとんど付着しておらず、その後の測定には利用できない。そのため、Cs 付着量の時間変化を求めることは困難である。例えば、蛍光 X 線分析装置を利用するなど、非破壊で Cs 付着量を測定する装置を利用することで、同じ場所の Cs 付着量を測定でき、残存率の時間変化を求めることができる。さらに非破壊の手法では、同じ場所を測定できるため、サンプル上の濃度の不均一性を考慮する必要がない。

表 3.5 各部材の残存率

材質	実環境試験	ウェザーメーター試験
瓦	0.20±0.17	-
スレート	0.71±0.19	0.36
金属鋼板	0.02±0.01	0.05

### 3.5 外部被ばく低減係数への影響

平成 29 年度事業で、各住宅に対する屋根面汚染による被ばく低減係数の影響を調査した (表 3.6)。汚染割合が増加するほど、低減係数は線形に増加することが示され、平成 29 年度事業で示された関係を用いて、屋根面汚染による外部被ばく低減係数への影響を評価した。

福島原子力発電所事故後にアメダスで測定された 2011 年 3 月 15 日と 16 日の降雨は、飯館村で最大降水強度 2.5 mm h<sup>-1</sup>、積算降水量 12 mm、原町で最大降水強度 2.0 mm h<sup>-1</sup>、積算降水量 6.5 mm、船引で最大降水強度 3.0 mm h<sup>-1</sup>、積算降水量 8.0 mm であった。図 3.8 によると、これらの降水では初期沈着割合は 5~20% である。この初期沈着割合の時の低減係数は、1F で 0.49~0.51、2F で 0.49~0.53 である。

表 3.6 2階建て木造住宅（窯業系サイディング材）に対する低減係数のフロア中央付近の値。  
汚染割合は対地表面濃度比である。

	0.66 MeV 核種のグラウンドシャイン			
	汚染無し	屋根：50% 壁：10%	屋根：100% 壁：1%	屋根：100% 壁：10%
1F	0.48	0.56	0.61	0.63
2F	0.48	0.62	0.71	0.73

### 3.6 第3章の参考文献

Brown J., Kibble A., Mitchem L., Hammond D., Ham G., Pritchard R., Eslava-Gomez A. and Smith T. (2011):  
Development of experimental techniques to investigate the behaviour of chemical and radiological  
materials on urban surfaces, *Chemical Hazards and Poisons Report*, **20**, pp.13–16.

独立行政法人住宅金融支援機構: フラット 35 住宅仕様実態調査報告—在来木造工法の戸建て住  
宅—

[http://www.jhf.go.jp/about/research/tech\\_flat35\\_siyou.html](http://www.jhf.go.jp/about/research/tech_flat35_siyou.html) (最終閲覧日：2020年3月3日) .

目次

4. 課題の整理 .....	4-1
4.1 吸入被ばく .....	4-1
4.2 外部被ばく .....	4-1

## 4. 課題の整理

第4章では屋内退避による吸入被ばくと外部被ばくの低減効果に係る知見を整理するうえで、更なる検討を要する事項について整理する。

### 4.1 吸入被ばく

$I_2$  の浸透率と沈着率に換気率依存性は見られたものの、本事業では一部の換気率しか確認できていない。特に、気密性の高い住宅での被ばく評価に必要な範囲（換気率  $1\text{h}^{-1}$  以下）の知見が不足している。

感度解析の結果より、現状の実験誤差では、粒子状物質の浸透率及び  $I_2$  の浸透率と沈着率は被ばく低減係数の大きさ誤差要因となっていることが示された。被ばく低減係数を精緻化するために、これらのパラメータに関して誤差を小さくする必要がある。各パラメータが1標準偏差分変動した時の被ばく低減係数の変動幅を0.1以下に抑えるためには、粒子状物質の浸透率の標準偏差を0.1、 $I_2$  の浸透率の標準偏差を0.15、 $I_2$  の沈着率の標準偏差を1以下にする必要がある。

ヨウ素の化学形態の組成比はシナリオ依存のパラメータである。本事業では実測値を基に設定した3種の組成比について被ばく低減係数を求めた結果、化学形態の組成比が被ばく低減係数に大きな影響を及ぼすことを示した。ヨウ素の化学形態の組成比をシナリオ分けする場合、どのように設定し、どのような場合にどの組成比を使用すべきかを整理する必要がある。

### 4.2 外部被ばく

初期沈着割合と残存率について、サンプル間で沈着量に大きなばらつきが生じ、誤差が大きいままである。蛍光X線分析装置などの非破壊でCs付着量を測定できる装置を利用することで、測定誤差を小さくする必要がある。

平均降水強度と積算降水量が大きいほど、初期沈着割合は小さくなる傾向は見えたものの、どちらのパラメータが初期沈着割合に大きく影響を及ぼしたのかを把握できていない。どちらかのパラメータを固定したうえで、実験することで初期沈着割合に関する知見を拡充する必要がある。

実家屋調査では、残存率が材質によって異なることが示された。ウェザーメーター試験でも残存率の材質依存性が見られたものの、実環境試験と残存率の割合が異なっていた。屋内退避時の線量評価を行う上でも、残存率の材質依存性及び時間変化が必要であり、これらについて知見を拡充する必要がある。

## 目次

付録 1	マスク漏れ率の測定データ.....	1
付録 2	家屋調査で採取した家材.....	5
付録 3	吸入被ばく低減係数の計算結果.....	32
付録 4	吸入被ばく低減係数の感度解析結果.....	35

### 付録1 マスク漏れ率の測定データ

マスク漏れ率の全測定データを付録表 1.1 に示す。

付録表 1.1 マスク漏れ率の測定データ (1/4)

喫煙	性別	年齢	マスク 1 (ブリーツ)		マスク 2 (立体)		マスク 3 (カップ白)		マスク 4 (カップ黒)	
			漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率
			1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
×	女	24	100.00	51.11	100.00	86.46	47.58	8.20	100.00	29.20
×	女	66	100.00	31.88	100.00	90.80	24.40	3.32	18.04	14.80
×	女	61	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	85.04	100.00	100.00
×	女	34	100.00	18.98	90.54	100.00	39.30	27.55	52.55	45.59
×	男	60	100.00	41.59	83.74	100.00	28.85	14.77	17.99	16.30
×	女	41	92.67	33.09	87.93	88.34	57.45	5.81	18.91	45.38
×	女	47	87.62	22.50	100.00	38.79	2.56	16.71	15.06	8.02
×	女	44	86.71	25.06	86.26	83.13	6.98	13.03	8.48	13.22
○	男	58	100.00	68.68	100.00	100.00	41.12	26.92	58.77	15.61
×	男	47	100.00	78.47	100.00	100.00	22.31	57.72	37.41	11.22
×	女	25	100.00	76.42	100.00	97.28	19.51	33.44	20.52	27.34
×	男	36	86.78	43.98	97.37	99.11	16.74	7.93	20.36	40.02
×	男	57	98.09	31.66	95.30	74.64	20.18	29.81	49.23	8.37
×	女	52	83.59	59.48	98.35	74.60	50.39	84.84	77.16	47.96
×	男	48	70.33	64.94	85.14	25.77	21.27	9.71	34.06	41.28
×	男	25	100.00	22.95	100.00	100.00	8.73	5.99	26.05	8.31
×	男	40	95.96	80.37	100.00	90.39	67.88	29.24	50.25	10.34
○	男	50	100.00	21.15	100.00	97.84	17.53	3.68	14.24	24.76
×	男	63	99.35	34.45	100.00	89.55	11.38	8.38	67.39	83.71
×	女	25	91.53	38.73	100.00	90.09	3.80	3.02	18.21	11.00
×	女	61	100.00	35.86	100.00	89.48	19.03	44.77	50.94	45.90
×	男	26	87.11	78.48	99.29	82.36	50.15	58.60	42.47	42.85
×	男	58	100.00	91.40	100.00	100.00	51.95	2.90	30.57	15.97
×	男	44	100.00	80.97	100.00	88.20	6.56	4.98	10.45	5.25
×	女	23	100.00	82.02	100.00	91.38	15.79	10.31	6.55	16.05

1 回目は普段通り着用時、2 回目は指定の着用方法時。



付録表 1.1 マスク漏れ率の測定データ (2/4)

喫煙	性別	年齢	マスク 1 (プリーツ)		マスク 2 (立体)		マスク 3 (カップ白)		マスク 4 (カップ黒)	
			漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率
			1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
×	女	40	100.00	94.66	100.00	92.06	23.67	25.24	19.00	21.71
○	女	47	100.00	69.84	100.00	84.34	20.63	23.07	14.18	15.37
×	女	33	100.00	72.57	100.00	85.63	18.86	31.51	41.30	31.50
×	男	48	100.00	28.15	100.00	100.00	15.17	8.28	12.90	28.12
○	女	52	100.00	74.69	100.00	91.33	32.05	37.59	21.32	20.22
×	男	60	100.00	100.00	100.00	97.59	25.45	5.74	16.00	7.32
○	男	42	91.53	59.98	91.37	86.84	6.33	3.54	16.63	33.63
○	男	44	72.63	67.66	100.00	44.54	22.98	15.99	33.59	14.74
○	男	56	91.84	42.59	86.41	79.95	14.28	2.65	4.75	18.56
×	女	52	71.29	71.04	92.37	74.37	12.44	6.69	24.01	15.77
○	男	24	85.29	33.73	99.95	98.03	32.90	16.04	68.96	70.56
○	男	24	100.00	15.38	100.00	100.00	90.88	2.81	49.08	8.27
○	男	48	93.93	24.41	100.00	91.73	1.16	4.91	14.80	14.47
×	男	54	100.00	24.78	100.00	80.36	2.10	5.98	7.39	20.30
○	女	39	88.96	84.68	98.25	85.62	25.75	4.81	16.67	8.62
×	男	49	86.58	30.49	100.00	88.26	3.46	7.58	16.14	5.81
×	女	24	100.00	26.21	100.00	100.00	37.53	16.94	43.24	38.10
×	女	41	100.00	100.00	100.00	100.00	57.59	58.48	60.78	42.50
○	男	52	100.00	100.00	100.00	100.00	23.93	2.28	30.60	8.42
×	女	30	100.00	100.00	100.00	100.00	10.55	2.65	11.38	5.93
○	男	39	100.00	100.00	100.00	100.00	97.59	4.90	62.75	20.71
×	男	38	100.00	11.41	100.00	86.59	3.08	7.07	5.13	5.03
×	男	59	81.51	18.32	91.89	67.14	3.11	2.64	4.28	3.85
×	女	55	100.00	50.17	94.85	81.97	29.48	38.11	9.23	12.20
×	男	57	75.35	40.79	81.11	77.49	15.83	2.13	15.80	7.22

1 回目は普段通り着用時、2 回目は指定の着用方法時。

付録表 1.1 マスク漏れ率の測定データ (3/4)

喫煙	性別	年齢	マスク 1 (プリーツ)		マスク 2 (立体)		マスク 3 (カップ白)		マスク 4 (カップ黒)	
			漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率
			1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
×	男	60	100.00	82.74	100.00	100.00	4.31	3.05	11.32	12.92
×	男	45	41.80	49.73	100.00	66.52	18.40	25.40	15.44	28.27
○	女	45	100.00	58.52	100.00	95.95	19.80	4.85	28.93	5.16
○	男	45	97.27	78.29	100.00	96.98	19.64	9.86	15.75	6.64
×	男	40	93.08	84.34	100.00	86.07	14.12	1.73	7.59	13.21
×	男	24	84.94	30.06	90.37	88.82	11.07	2.12	8.98	5.75
×	男	54	97.08	90.79	100.00	100.00	27.55	19.99	35.84	60.57
×	男	49	100.00	100.00	100.00	100.00	29.03	6.96	73.87	9.73
×	女	23	100.00	72.62	100.00	100.00	30.26	2.14	15.03	3.25
○	男	52	84.23	69.24	100.00	81.16	11.57	1.62	13.18	7.65
○	男	48	100.00	80.39	100.00	100.00	34.63	14.13	39.27	17.10
×	男	24	100.00	61.39	100.00	97.82	4.47	23.76	27.62	4.06
×	男	56	100.00	98.35	100.00	100.00	76.26	13.59	54.69	18.94
×	女	41	100.00	100.00	100.00	100.00	80.05	3.95	72.28	10.13
×	女	51	100.00	30.15	100.00	86.31	54.73	43.60	42.90	15.73
×	女	52	100.00	97.21	100.00	88.00	35.47	40.65	24.28	25.95
○	男	49	97.79	58.15	92.03	90.75	7.27	3.32	6.80	10.74
×	男	36	98.07	86.94	100.00	100.00	41.78	1.28	16.40	5.64
○	女	41	92.84	52.34	97.70	100.00	40.78	16.92	27.41	14.54
×	男	58	90.53	67.56	100.00	79.52	15.47	6.53	14.32	5.01
×	女	23	100.00	98.43	100.00	92.42	31.61	25.97	29.19	23.07
×	女	51	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	74.74	95.30	97.96
○	女	43	96.96	84.09	100.00	100.00	35.32	10.70	30.32	21.67
○	男	61	100.00	26.34	100.00	79.47	10.96	10.96	16.10	11.40
○	男	49	100.00	26.80	83.46	82.76	61.90	66.45	64.39	28.18

1 回目は普段通り着用時、2 回目は指定の着用方法時。

付録表 1.1 マスク漏れ率の測定データ (4/4)

喫煙	性別	年齢	マスク 1 (プリーツ)		マスク 2 (立体)		マスク 3 (カップ白)		マスク 4 (カップ黒)	
			漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率	漏れ率
			1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
○	男	52	88.82	28.19	88.49	73.38	31.40	13.42	32.96	46.98
×	男	49	100.00	84.67	100.00	100.00	100.00	15.57	100.00	70.89
×	女	40	100.00	44.39	100.00	78.36	100.00	68.60	25.98	59.41
×	男	55	94.55	36.12	100.00	71.24	23.44	10.32	25.08	6.00
×	男	52	100.00	78.11	100.00	92.28	3.07	2.47	4.31	3.72
○	女	29	100.00	55.76	100.00	64.52	7.08	25.50	26.77	17.74
○	男	55	100.00	20.37	100.00	98.58	16.07	3.17	14.37	14.68
×	男	52	100.00	87.57	100.00	98.40	33.60	6.08	92.95	21.68
×	女	49	100.00	74.45	100.00	100.00	18.29	25.86	18.57	9.87
○	男	48	100.00	68.78	100.00	100.00	32.76	3.36	33.33	6.85
×	女	58	99.38	91.73	100.00	82.80	35.38	4.52	7.84	5.46
×	女	48	97.42	28.06	87.63	93.62	21.63	6.84	39.29	9.25
×	女	41	100.00	100.00	100.00	100.00	55.49	69.50	74.56	88.01
×	男	58	100.00	100.00	100.00	100.00	10.01	7.53	27.49	21.01
×	女	36	100.00	93.49	100.00	100.00	75.81	10.74	100.00	30.06
×	女	39	100.00	100.00	100.00	100.00	75.32	85.38	90.36	62.84
×	女	47	100.00	44.56	100.00	100.00	42.01	14.43	37.71	16.45
×	女	48	100.00	100.00	100.00	100.00	24.83	9.26	28.83	13.75
×	女	54	100.00	24.08	100.00	100.00	60.71	4.20	33.77	47.15
×	女	48	100.00	100.00	100.00	100.00	42.97	12.20	19.61	16.55
×	女	47	100.00	68.09	100.00	100.00	72.41	75.44	64.92	24.86
×	女	53	100.00	79.68	100.00	100.00	87.39	12.87	96.19	52.33
○	男	44	100.00	100.00	100.00	100.00	13.43	61.18	41.72	24.52
○	男	51	100.00	45.62	100.00	100.00	68.27	11.32	70.85	36.61
×	女	53	100.00	51.82	100.00	100.00	17.14	46.48	9.53	13.17

1 回目は普段通り着用時、2 回目は指定の着用方法時。

## 付録2 家屋調査で採取した家材

家屋調査で採取した家材、処理後の写真を付録図 2.1～付録図 2.31 に示す。



処理前：

家屋 A  
土壌表面



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.1 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
土壌 0～5 cm



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.2 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

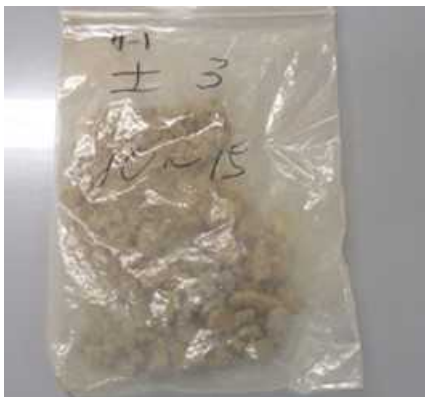
家屋 A  
土壌 5～10 cm



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.3 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
土壌 10～15 cm



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.4 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 A  
土壌 15~20 cm



処理後 :

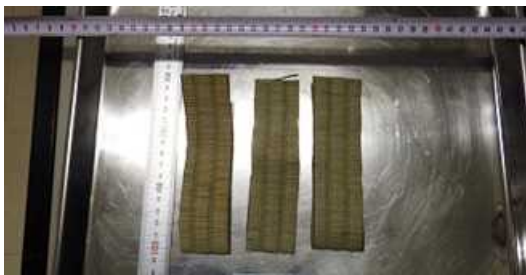
粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.5 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 A  
畳



前処理 :

4cm×15cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 180 cm<sup>2</sup>



処理後 :

細かく裁断し、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.6 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
フローリング



前処理：

3cm×3cm に裁断  
5 枚使用  
測定試料面積：45 cm<sup>2</sup>



処理後：

粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.7 家材の写真、処理方法、処理後の写真





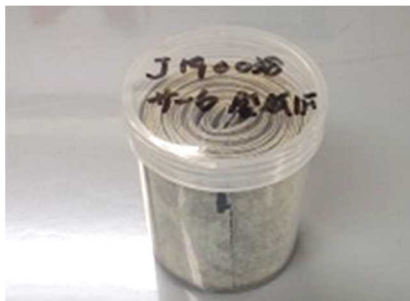
処理前：

家屋 A  
内壁、壁紙



前処理：

5cm×50cm に裁断  
4 枚使用  
測定試料面積：1000 cm<sup>2</sup>



処理後：

U-8 容器へ丸めて充填し測定

付録図 2.8 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
内壁、土壁



前処理：

4cm×4cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積：48 cm<sup>2</sup>



処理後：

粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.9 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 A  
外壁



前処理 :

4cm×4cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 48 cm<sup>2</sup>



処理後 :

粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.10 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 A  
天井材



前処理 :

5cm×50cm に裁断  
3.5 枚使用  
測定試料面積 : 875 cm<sup>2</sup>



処理後 :

U-8 容器へ丸めて充填し測定

付録図 2.11 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
天井裏、グラスウール



前処理：

5cm×5cm に裁断  
12 枚使用  
測定試料面積：300 cm<sup>2</sup>



処理後：

ほぐしてU-8 容器へ充填し測定

付録図 2.12 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 A  
瓦



前処理 :

3cm×3cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 27 cm<sup>2</sup>



処理後 :

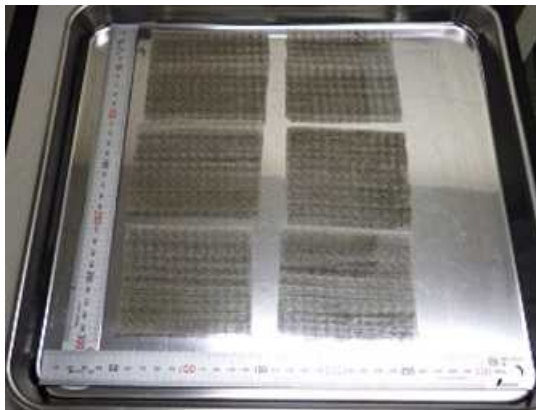
粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.13 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A  
エアコンフィルター



前処理：

10cm×10cm に裁断  
6 枚使用  
測定試料面積：600 cm<sup>2</sup>



処理後：

細かく裁断し、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.14 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 A

ダストサンプリングフィルター



前処理：



処理後：

裁断後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.15 家材の写真、処理方法、処理後の写真





処理前：

家屋 B  
土壌表面



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.16 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B  
土壌 0~5 cm



処理後：

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.17 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
土壌 5~10 cm



処理後 :

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.18 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
土壌 10~15 cm



処理後 :

粉碎後U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.19 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
畳



前処理 :

4cm×15cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 180 cm<sup>2</sup>



処理後 :

細かく裁断し、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.20 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B  
フローリング



前処理：

3cm×3cm に裁断  
5 枚使用  
測定試料面積：45 cm<sup>2</sup>



処理後：

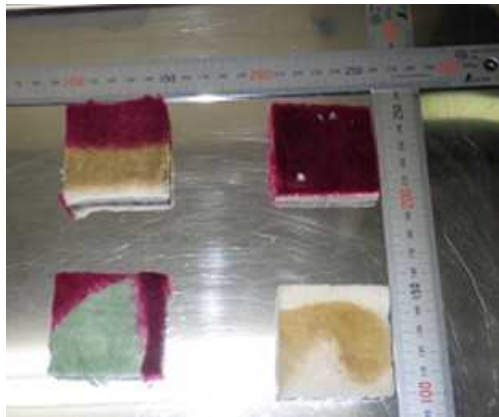
粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.21 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B  
カーペット



前処理：

5cm×5cm に裁断  
4 枚使用  
測定試料面積：100 cm<sup>2</sup>



処理後：

細かく刻み、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.22 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
内壁、壁紙



前処理 :

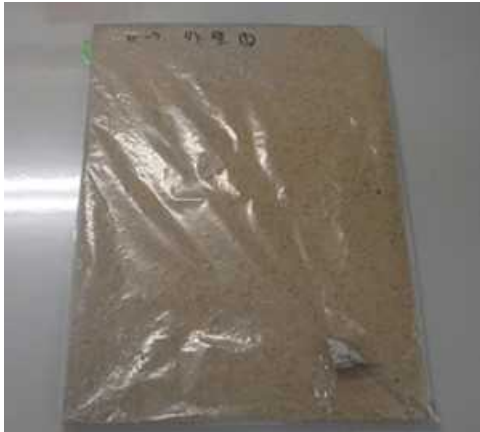
5cm×50cm に裁断  
4 枚使用  
測定試料面積 : 1000 cm<sup>2</sup>



処理後 :

U-8 容器へ丸めて充填し測定

付録図 2.23 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B  
外壁



前処理：

4cm×4cm に裁断  
2 枚使用  
測定試料面積：32 cm<sup>2</sup>



処理後：

粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.24 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
天井材



前処理 :

5cm×50cm に裁断  
6 枚使用  
測定試料面積 : 1500 cm<sup>2</sup>



処理後 :

U-8 容器へ丸めて充填し測定

付録図 2.25 家材の写真、処理方法、処理後の写真





処理前：

家屋 B  
天井裏、グラスウール



前処理：

5cm×5cm に裁断  
12 枚使用  
測定試料面積：300 cm<sup>2</sup>



処理後：

ほぐして、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.26 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
瓦



前処理 :

3cm×3cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 27 cm<sup>2</sup>



処理後 :

粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.27 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前 :

家屋 B  
スレート



前処理 :

4cm×4cm に裁断  
3 枚使用  
測定試料面積 : 48 cm<sup>2</sup>



処理後 :

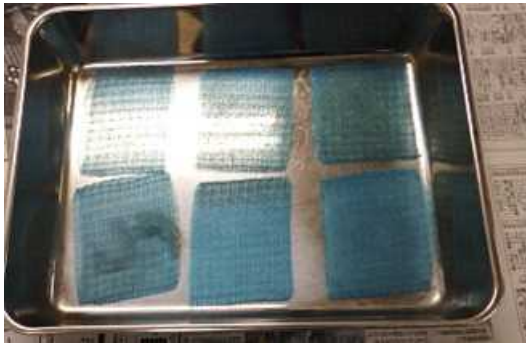
粉碎後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.28 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B  
エアコンフィルター



前処理：

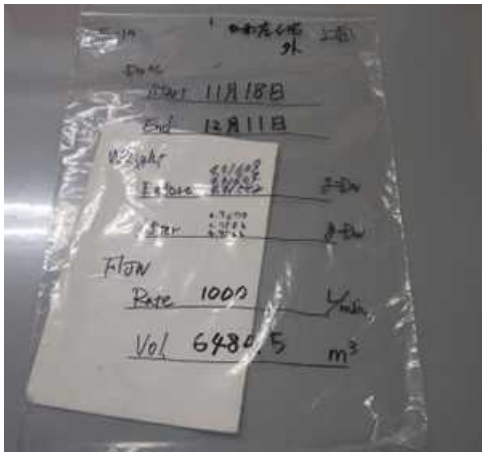
10cm×8cm に裁断  
6 枚使用  
測定試料面積：480 cm<sup>2</sup>



処理後：

細かく裁断し、U-8 容器へ充填し測定

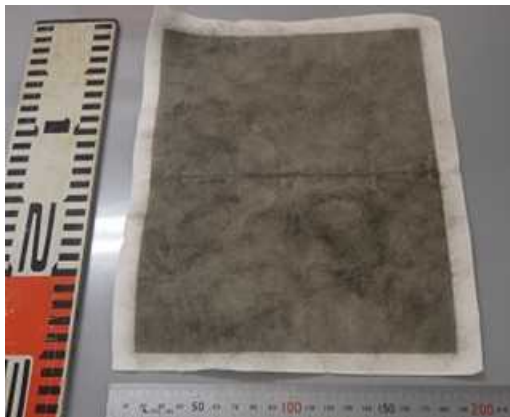
付録図 2.29 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 B

ダストサンプリングフィルター



前処理：



処理後：

裁断後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.30 家材の写真、処理方法、処理後の写真



処理前：

家屋 C

ダストサンプリングフィルター



前処理：



処理後：

裁断後、U-8 容器へ充填し測定

付録図 2.31 家材の写真、処理方法、処理後の写真

### 付録3 吸入被ばく低減係数の計算結果

吸入被ばく低減係数の計算結果を付録表 3.1～付録表 3.6 に示す。

付録表 3.1 粒子状物質のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 0%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 0%		風速 (m s <sup>-1</sup> )											
		0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
建築年	1980 年以前	0.41 (0.32-0.48)	0.60 (0.52-0.65)	0.75 (0.68-0.78)	0.87 (0.81-0.9)	0.96 (0.92-0.98)	0.98 (0.95-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)
	1981～1992 年	0.22 (0.14-0.28)	0.35 (0.26-0.43)	0.45 (0.36-0.52)	0.54 (0.45-0.59)	0.68 (0.61-0.73)	0.81 (0.75-0.85)	0.91 (0.86-0.94)	0.96 (0.92-0.98)	0.97 (0.93-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)
	1993 年以降	0.19 (0.13-0.25)	0.20 (0.13-0.26)	0.28 (0.19-0.35)	0.34 (0.25-0.41)	0.45 (0.35-0.51)	0.54 (0.45-0.59)	0.63 (0.55-0.67)	0.71 (0.64-0.75)	0.79 (0.72-0.82)	0.86 (0.8-0.89)	0.91 (0.86-0.94)	0.95 (0.91-0.98)
	高気密住宅	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.23 (0.15-0.29)	0.29 (0.2-0.37)	0.35 (0.26-0.42)	0.41 (0.31-0.47)	0.46 (0.36-0.52)	0.50 (0.41-0.56)	0.55 (0.46-0.6)	0.60 (0.51-0.64)

付録表 3.2 粒子状物質のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 15%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 15%		風速 (m s <sup>-1</sup> )											
		0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
建築年	1980 年以前	0.30 (0.21-0.37)	0.45 (0.36-0.51)	0.56 (0.48-0.61)	0.66 (0.58-0.7)	0.82 (0.76-0.86)	0.94 (0.89-0.96)	0.96 (0.93-0.98)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)	0.98 (0.96-0.99)
	1981～1992 年	0.19 (0.13-0.25)	0.25 (0.16-0.31)	0.33 (0.24-0.4)	0.40 (0.3-0.46)	0.51 (0.42-0.56)	0.60 (0.52-0.65)	0.69 (0.62-0.73)	0.78 (0.71-0.81)	0.85 (0.79-0.88)	0.91 (0.86-0.94)	0.95 (0.91-0.98)	0.96 (0.92-0.98)
	1993 年以降	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.23 (0.15-0.3)	0.32 (0.23-0.39)	0.39 (0.3-0.46)	0.46 (0.36-0.52)	0.51 (0.43-0.57)	0.57 (0.49-0.62)	0.63 (0.55-0.67)	0.68 (0.61-0.72)	0.73 (0.66-0.77)
	高気密住宅	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.23 (0.15-0.3)	0.28 (0.19-0.35)	0.32 (0.22-0.39)	0.35 (0.26-0.42)	0.39 (0.29-0.46)	0.42 (0.33-0.49)

付録表 3.3 粒子状物質のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 30%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 30%		風速 (m s <sup>-1</sup> )											
		0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
建築年	1980 年以前	0.22 (0.14-0.28)	0.35 (0.25-0.42)	0.44 (0.35-0.5)	0.52 (0.43-0.57)	0.64 (0.56-0.69)	0.75 (0.69-0.79)	0.85 (0.79-0.88)	0.92 (0.87-0.95)	0.96 (0.91-0.98)	0.96 (0.93-0.98)	0.97 (0.94-0.99)	0.98 (0.96-0.99)
	1981～1992 年	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.24 (0.16-0.3)	0.29 (0.2-0.37)	0.38 (0.29-0.45)	0.46 (0.36-0.52)	0.52 (0.43-0.58)	0.58 (0.5-0.63)	0.64 (0.56-0.69)	0.70 (0.62-0.74)	0.75 (0.68-0.79)	0.80 (0.73-0.83)
	1993 年以降	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.22 (0.15-0.29)	0.28 (0.19-0.35)	0.33 (0.24-0.4)	0.38 (0.28-0.45)	0.42 (0.32-0.49)	0.46 (0.36-0.52)	0.49 (0.4-0.55)	0.53 (0.44-0.58)
	高気密住宅	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.19 (0.13-0.25)	0.21 (0.13-0.27)	0.23 (0.16-0.3)	0.26 (0.18-0.33)	0.29 (0.2-0.36)

付録表 3.4 I<sub>2</sub> のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 0%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセンタイル値～95 パーセンタイル値を示す。

建蔽率 0%		風速 (m s <sup>-1</sup> )											
		0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
建築年	1980 年以前	0.04 (0.03-0.04)	0.08 (0.08-0.09)	0.14 (0.13-0.15)	0.20 (0.19-0.21)	0.35 (0.33-0.37)	0.53 (0.5-0.55)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)
	1981～1992 年	0.01 (0.01-0.01)	0.03 (0.02-0.03)	0.05 (0.04-0.05)	0.07 (0.06-0.07)	0.11 (0.11-0.12)	0.17 (0.16-0.18)	0.24 (0.23-0.25)	0.32 (0.3-0.33)	0.40 (0.39-0.42)	0.50 (0.48-0.52)	0.61 (0.58-0.63)	0.63 (0.6-0.66)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.02 (0.02-0.03)	0.04 (0.04-0.05)	0.07 (0.06-0.07)	0.09 (0.09-0.1)	0.12 (0.12-0.13)	0.16 (0.15-0.17)	0.20 (0.19-0.21)	0.24 (0.23-0.25)	0.29 (0.27-0.3)
	高気密住宅	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.03 (0.02-0.03)	0.04 (0.03-0.04)	0.05 (0.04-0.05)	0.06 (0.05-0.06)	0.07 (0.07-0.07)	0.08 (0.08-0.09)



付録表 3.5 I<sub>2</sub> のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 15%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセントイル値～95 パーセントイル値を示す。

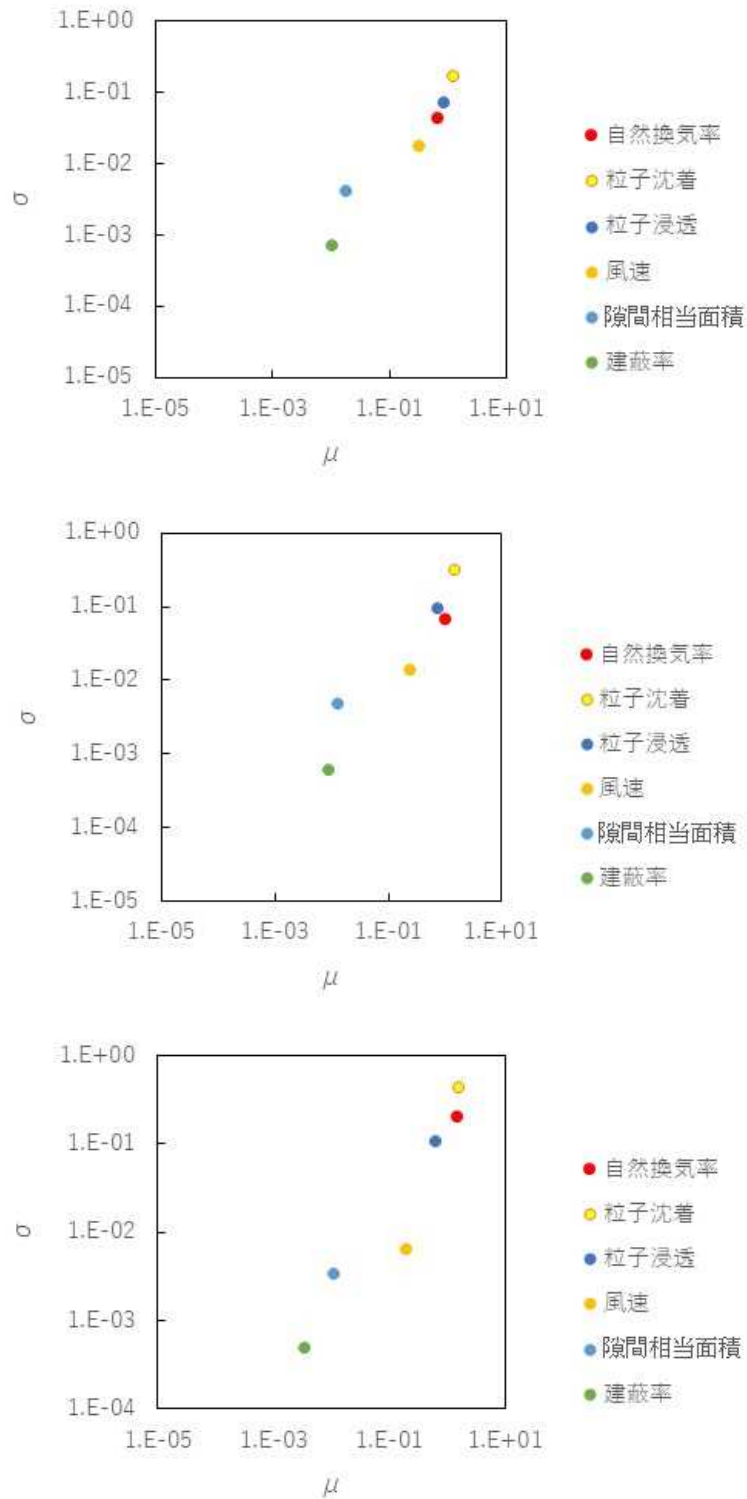
建蔽率 15%	風速 (m s <sup>-1</sup> )												
	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
建築年	1980 年以前	0.02 (0.01-0.02)	0.04 (0.04-0.05)	0.07 (0.07-0.08)	0.11 (0.1-0.11)	0.18 (0.17-0.19)	0.26 (0.25-0.28)	0.36 (0.35-0.38)	0.47 (0.45-0.49)	0.60 (0.57-0.62)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)	0.63 (0.6-0.66)
	1981～1992 年	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.02-0.02)	0.03 (0.03-0.04)	0.06 (0.06-0.06)	0.09 (0.08-0.09)	0.12 (0.11-0.12)	0.15 (0.15-0.16)	0.19 (0.19-0.2)	0.24 (0.23-0.25)	0.29 (0.28-0.3)	0.34 (0.33-0.36)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.02-0.02)	0.03 (0.03-0.03)	0.05 (0.04-0.05)	0.06 (0.06-0.06)	0.08 (0.07-0.08)	0.09 (0.09-0.1)	0.11 (0.11-0.12)	0.13 (0.13-0.14)
高気密住宅	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.02 (0.02-0.02)	0.03 (0.02-0.03)	0.03 (0.03-0.03)	0.04 (0.04-0.04)

付録表 3.6 I<sub>2</sub> のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後、建蔽率 30%）。上部の数字は中央値、下記の（）内の数字は 5 パーセントイル値～95 パーセントイル値を示す。

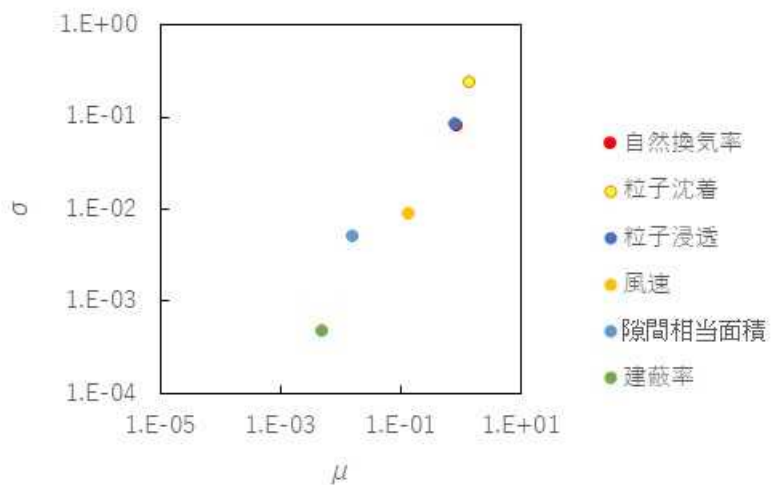
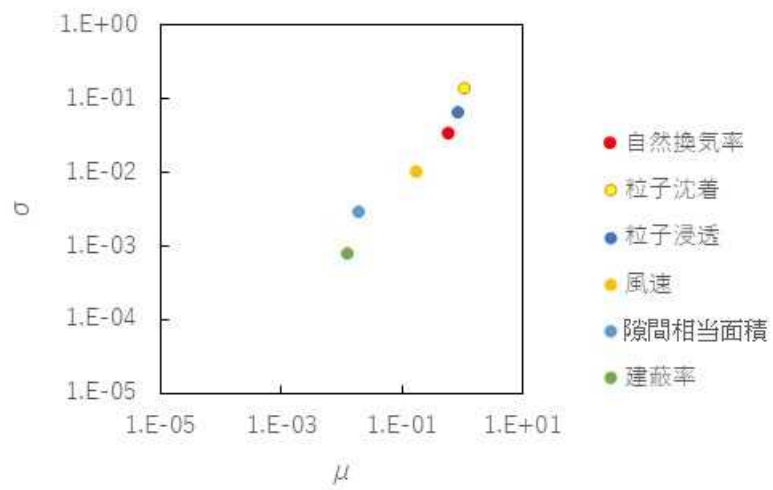
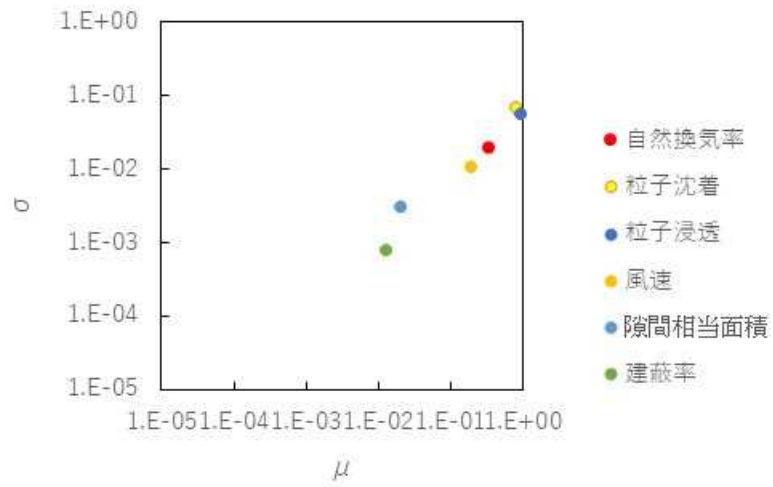
建蔽率 30%	風速 (m s <sup>-1</sup> )												
	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
建築年	1980 年以前	0.01 (0.01-0.01)	0.03 (0.02-0.03)	0.04 (0.04-0.04)	0.06 (0.06-0.06)	0.10 (0.09-0.1)	0.14 (0.14-0.15)	0.19 (0.18-0.2)	0.24 (0.23-0.26)	0.30 (0.29-0.32)	0.37 (0.35-0.38)	0.43 (0.41-0.45)	0.51 (0.48-0.53)
	1981～1992 年	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.03 (0.03-0.03)	0.05 (0.04-0.05)	0.06 (0.06-0.07)	0.08 (0.08-0.08)	0.10 (0.09-0.1)	0.12 (0.11-0.12)	0.14 (0.14-0.15)	0.17 (0.16-0.17)
	1993 年以降	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.02 (0.01-0.02)	0.02 (0.02-0.02)	0.03 (0.03-0.03)	0.04 (0.04-0.04)	0.05 (0.04-0.05)	0.06 (0.05-0.06)	0.06 (0.06-0.07)
高気密住宅	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.01 (0.01-0.01)	0.01 (0.01-0.02)	0.02 (0.01-0.02)

#### 付録4 吸入被ばく低減係数の感度解析結果

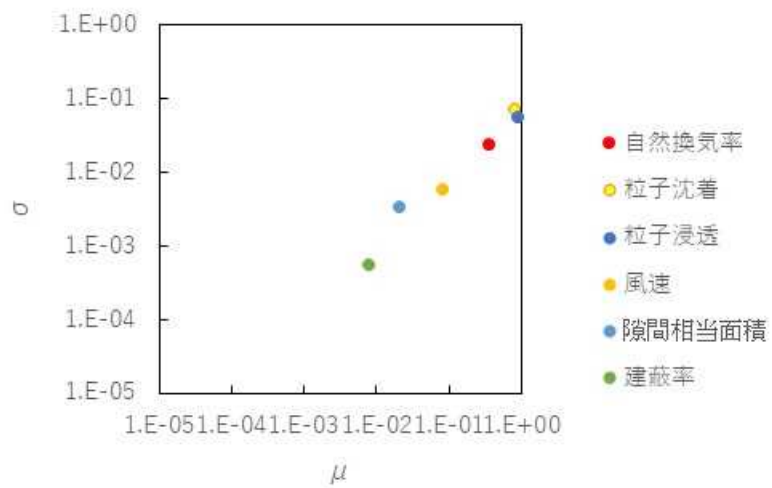
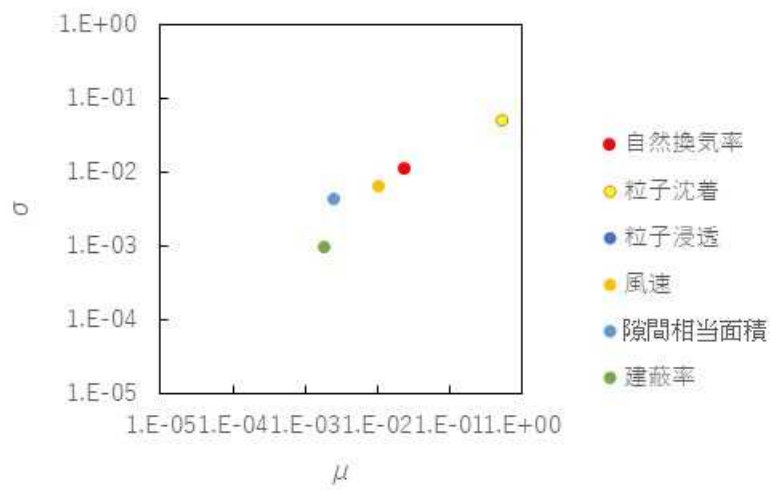
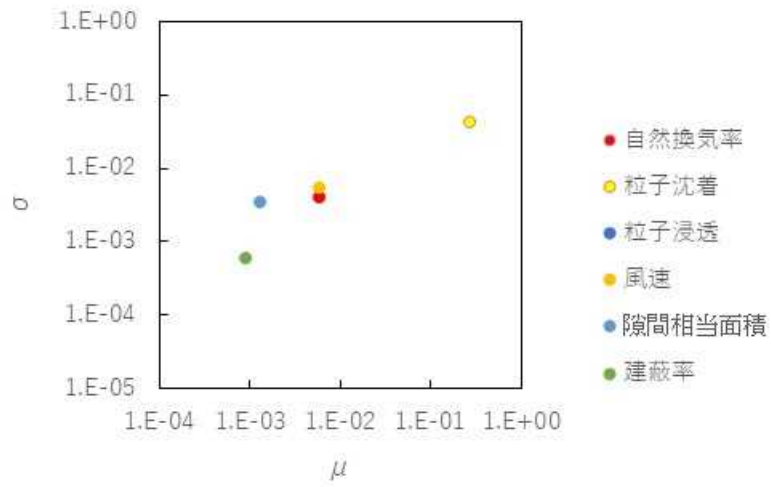
吸入被ばく低減係数の感度解析結果を付録図 4.1～付録図 4.24 に示す。



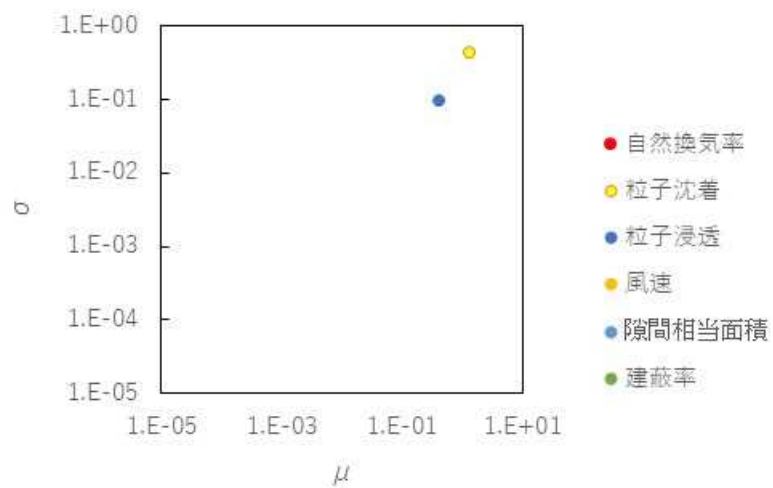
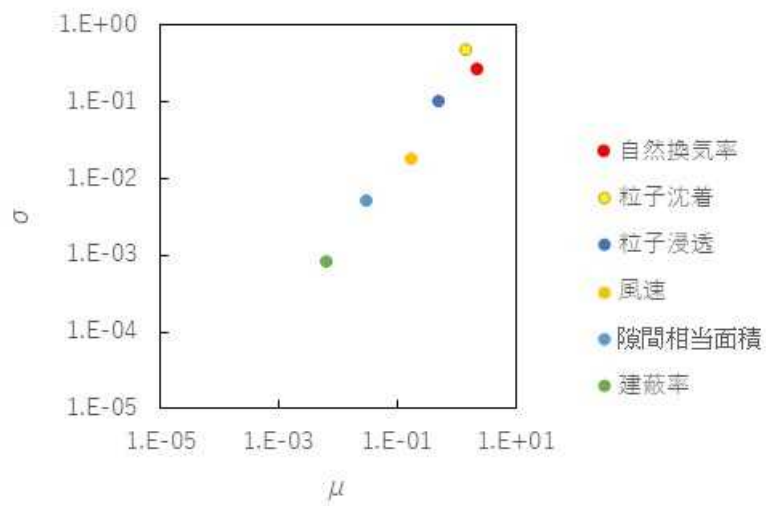
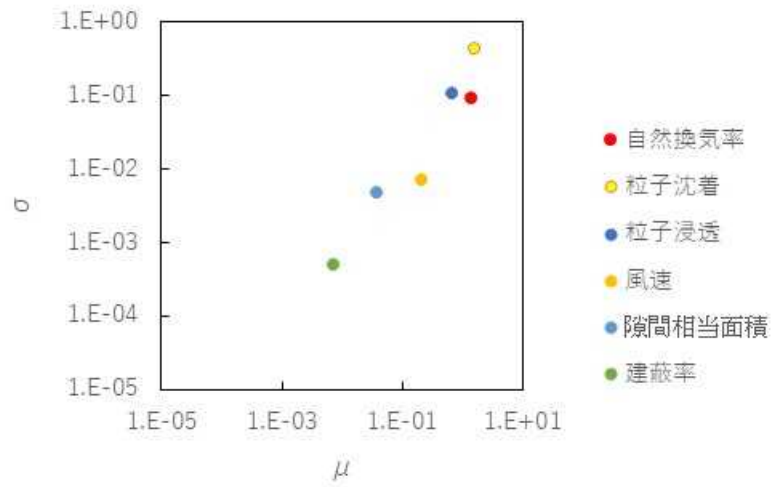
付録図 4.1 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



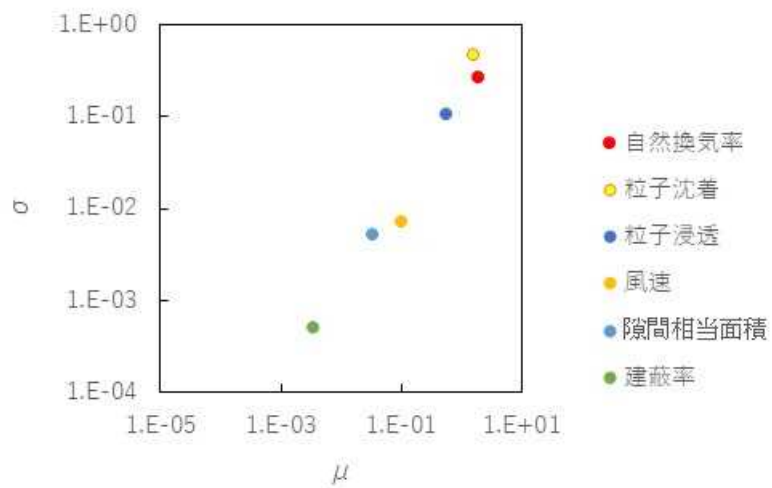
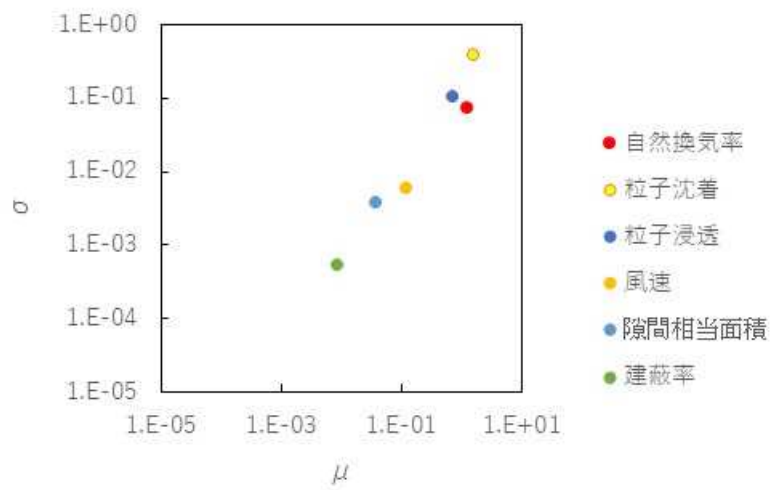
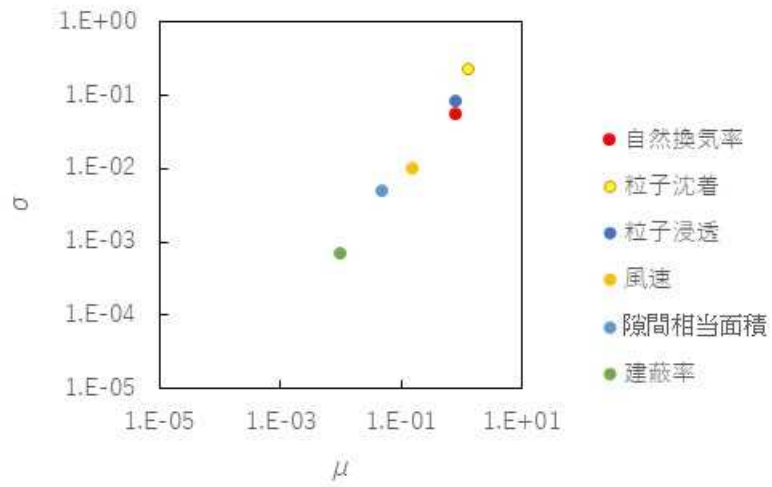
付録図 4.2 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2\text{m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



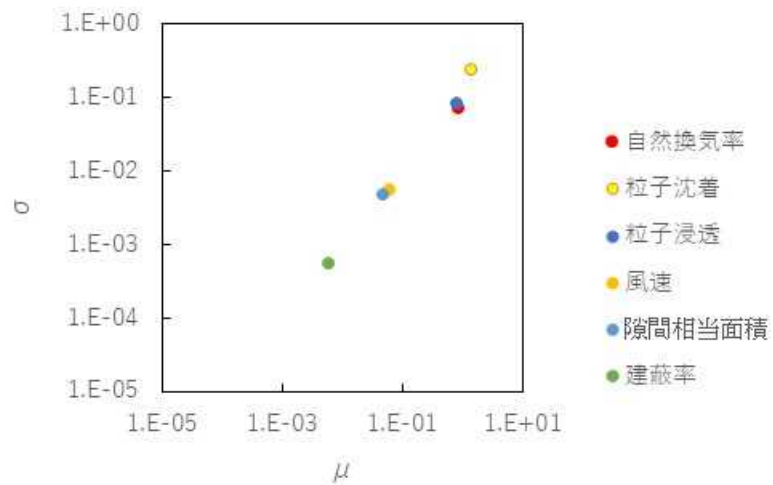
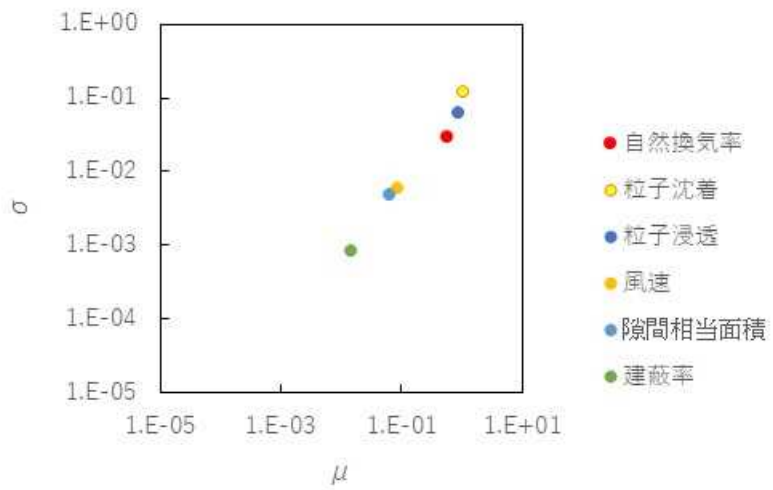
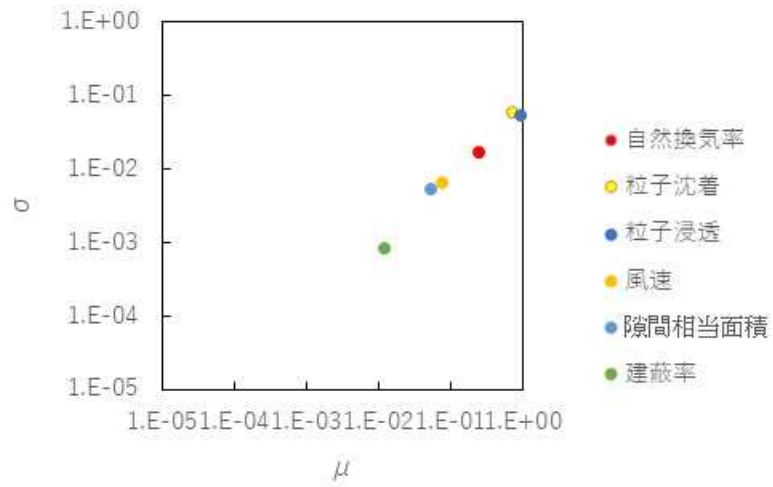
付録図 4.3 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



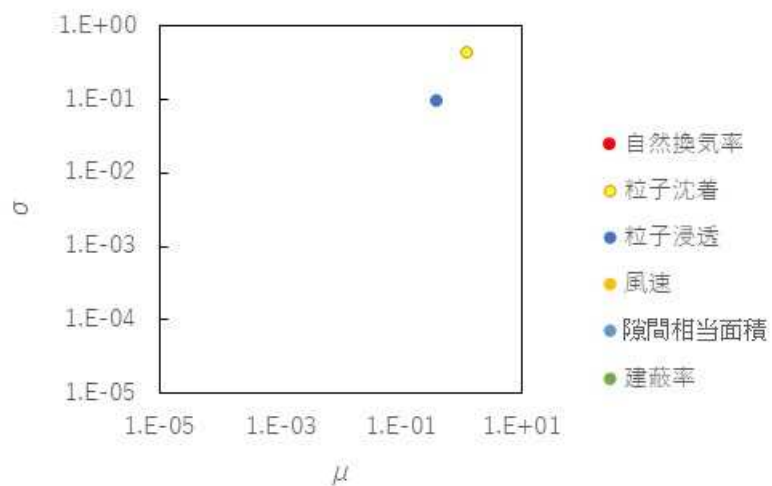
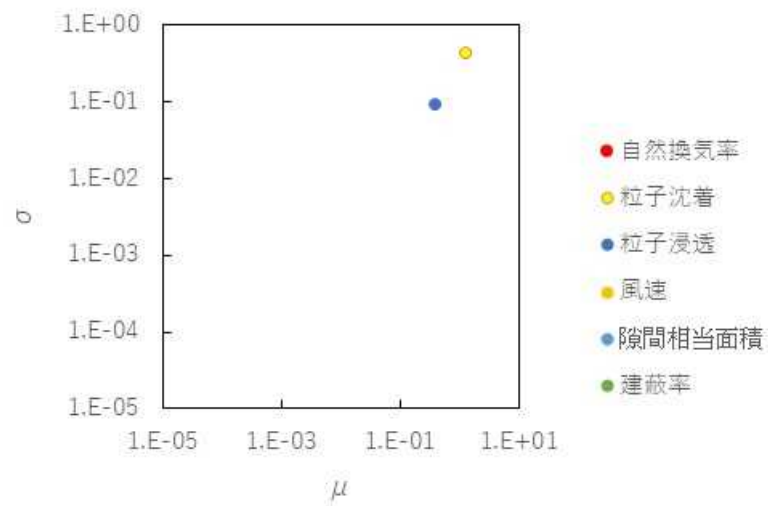
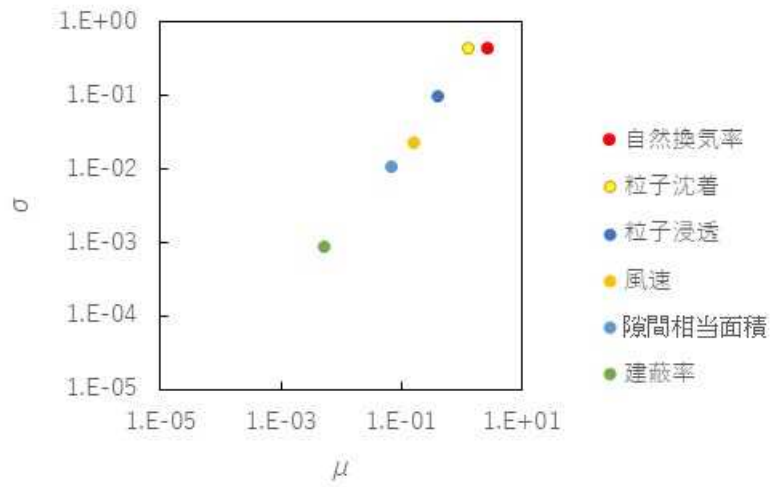
付録図 4.4 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981～1992 年、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



付録図 4.5 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981~1992 年、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

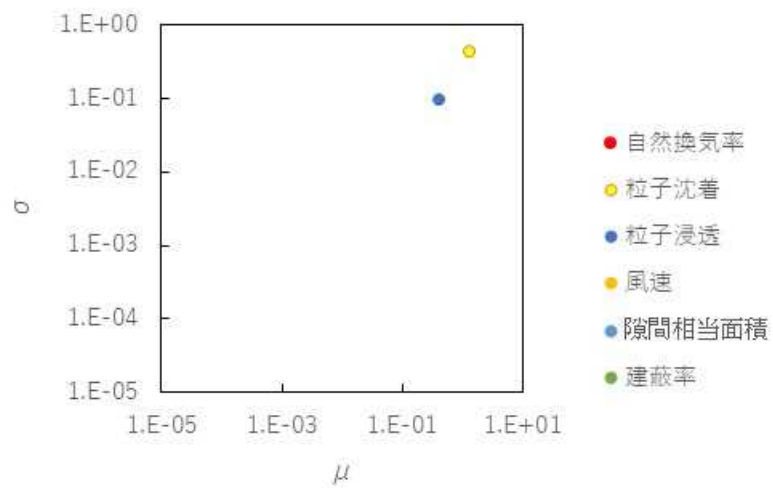
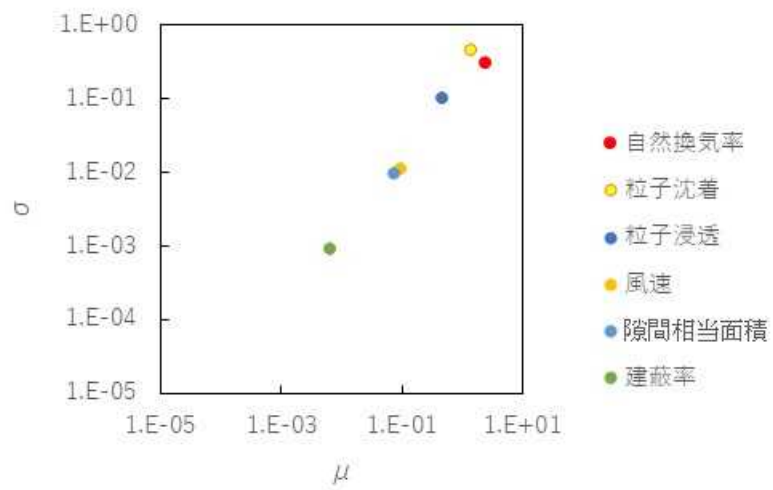
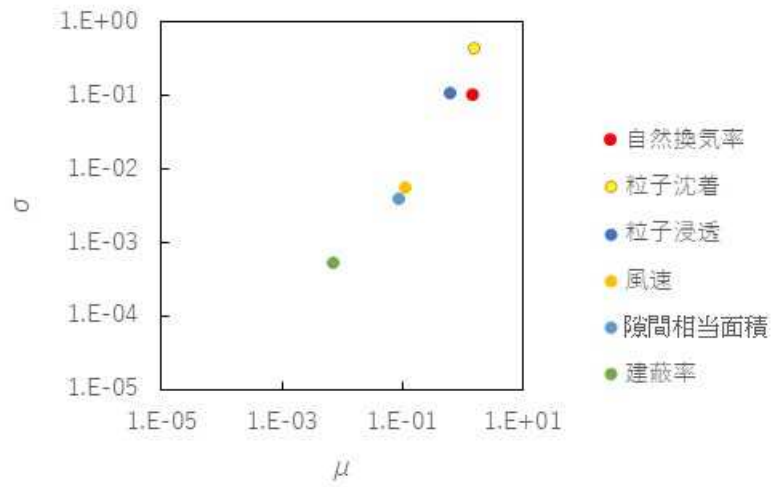


付録図 4.6 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981~1992 年、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

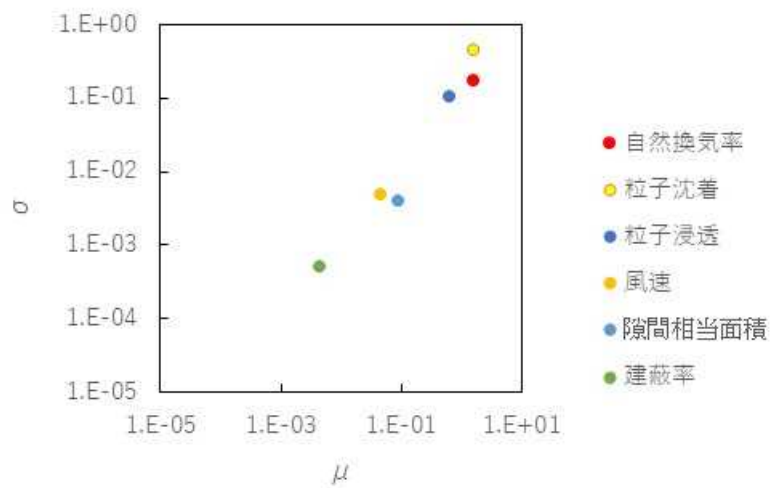
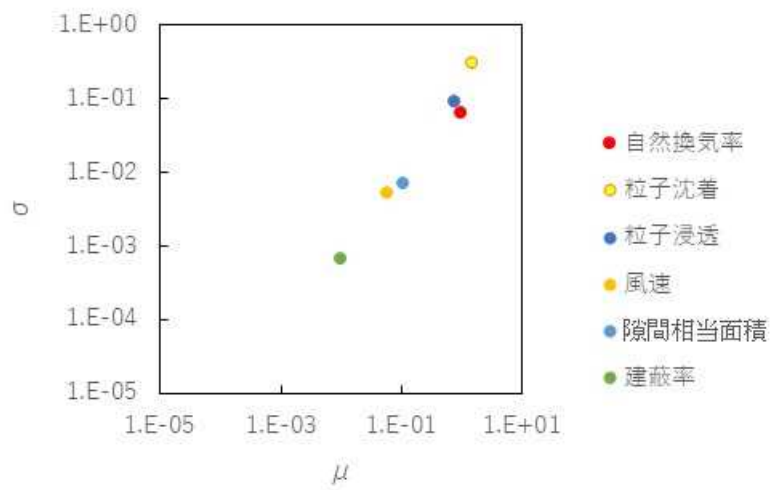
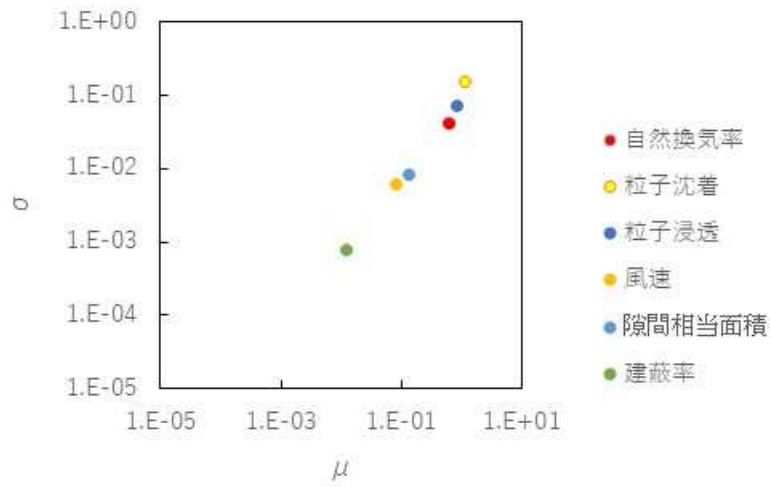


付録図 4.7 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

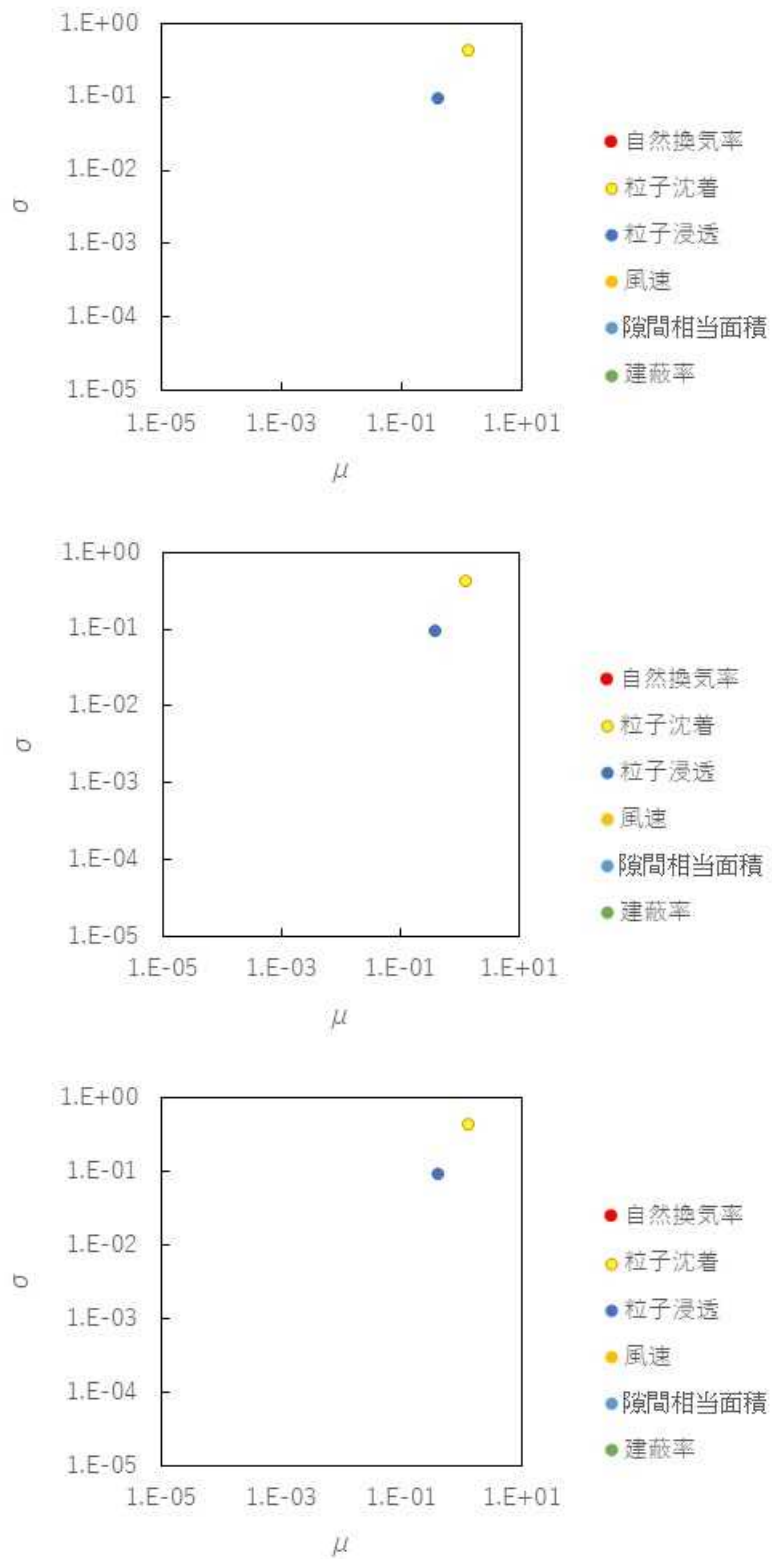




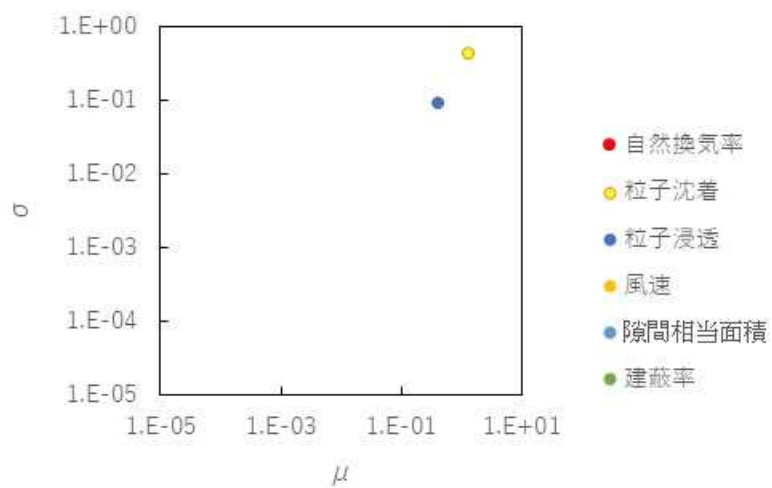
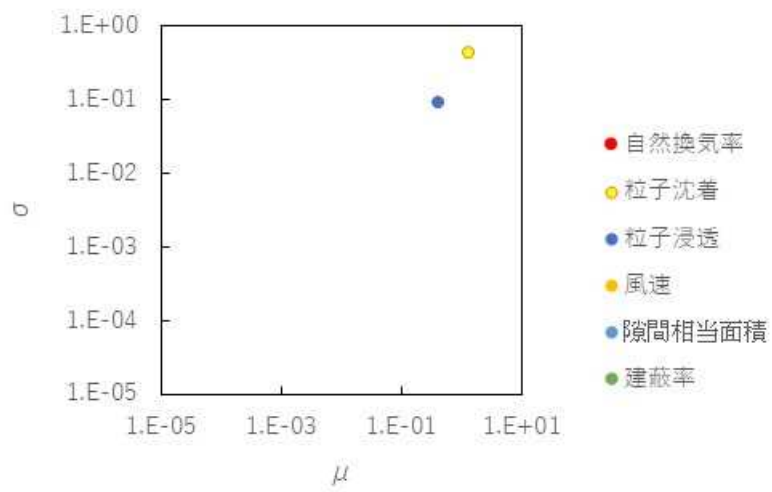
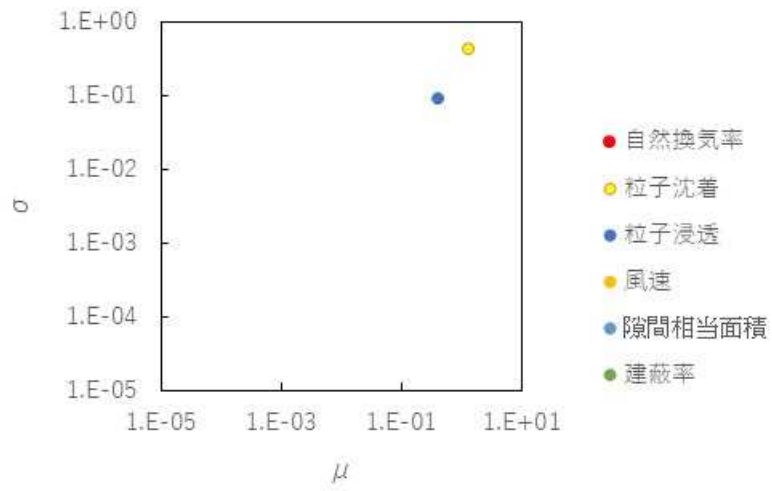
付録図 4.8 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



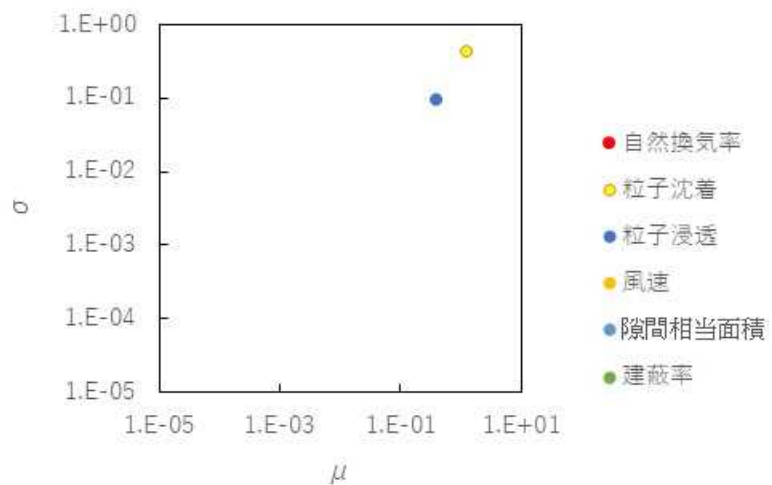
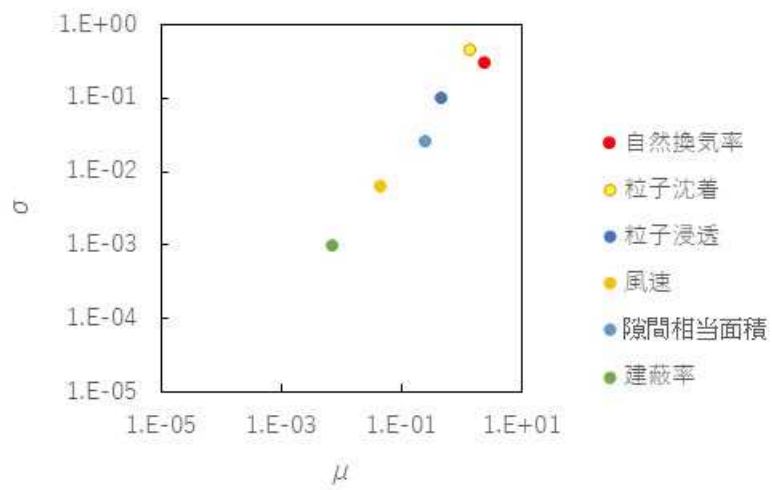
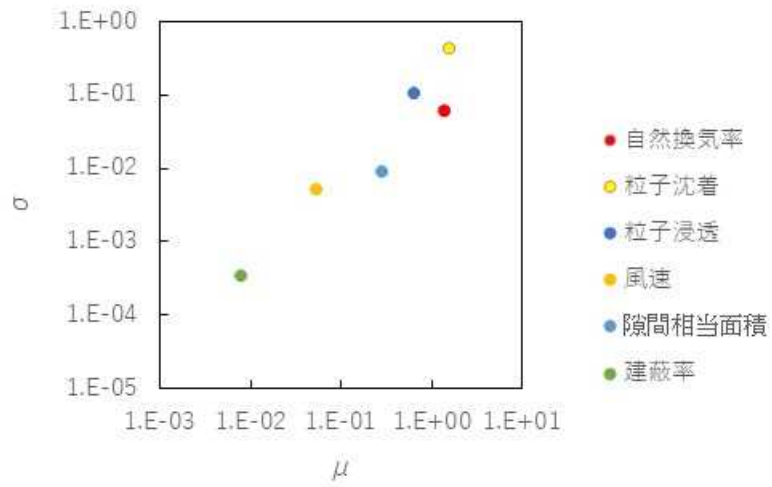
付録図 4.9 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



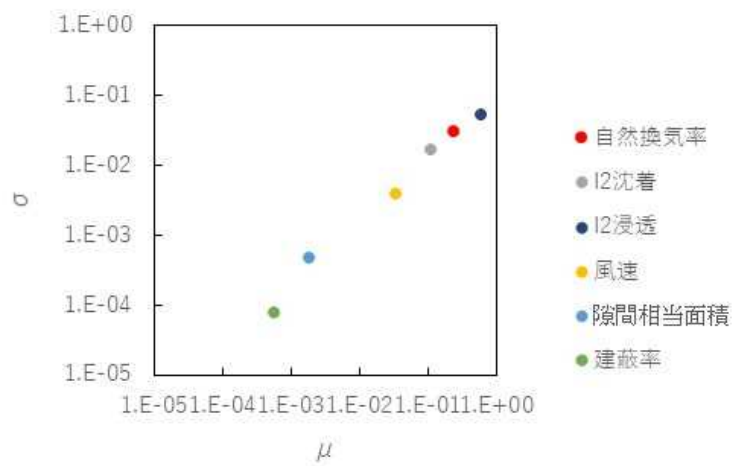
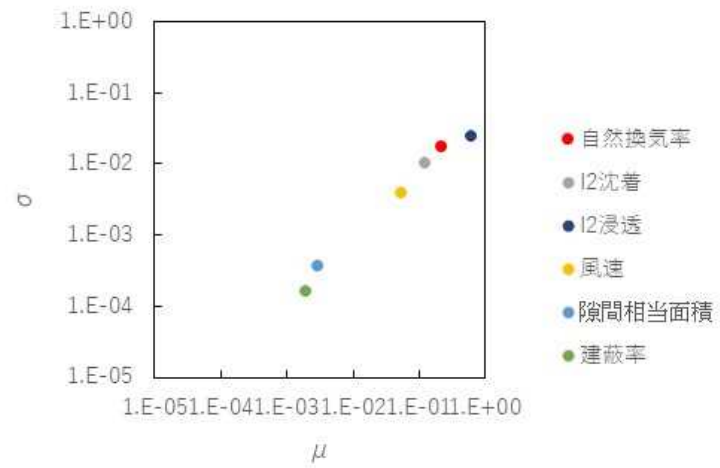
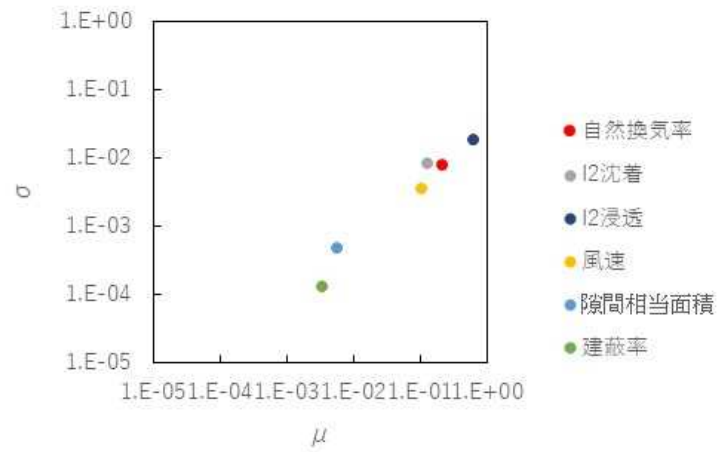
付録図 4.10 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1 \text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



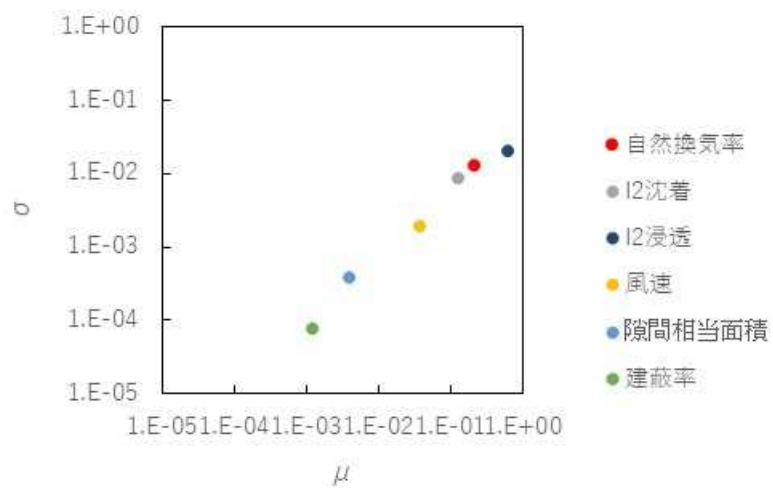
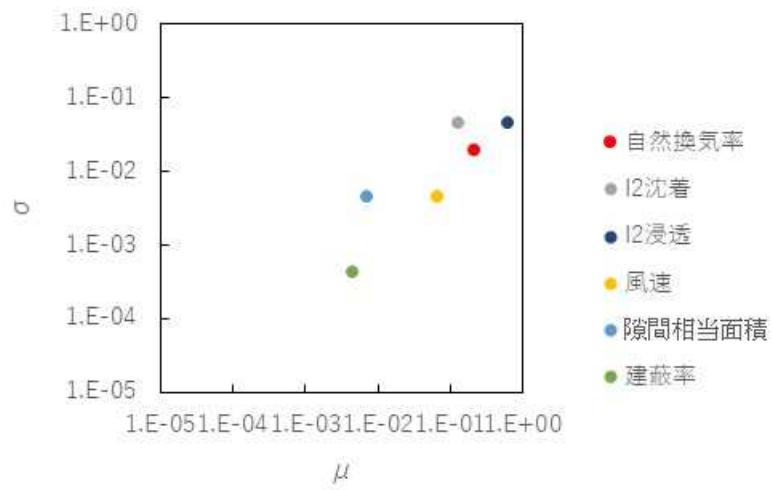
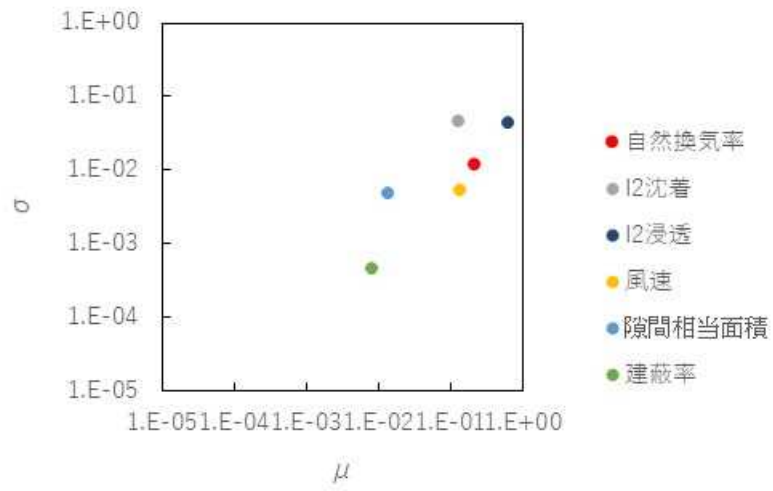
付録図 4.11 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



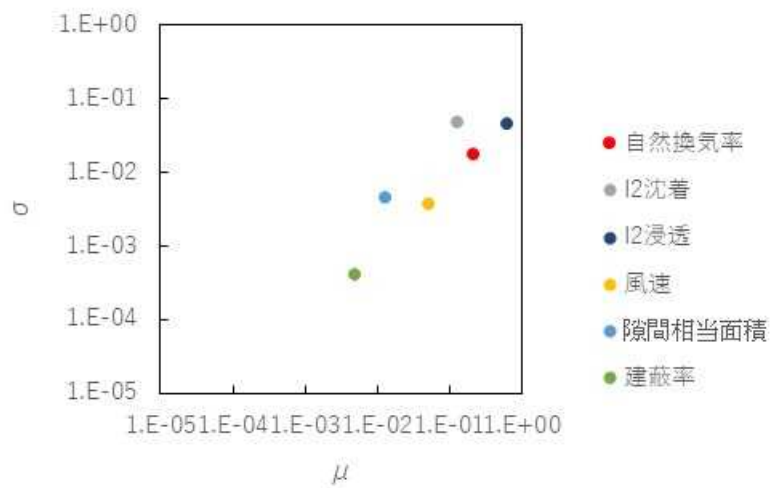
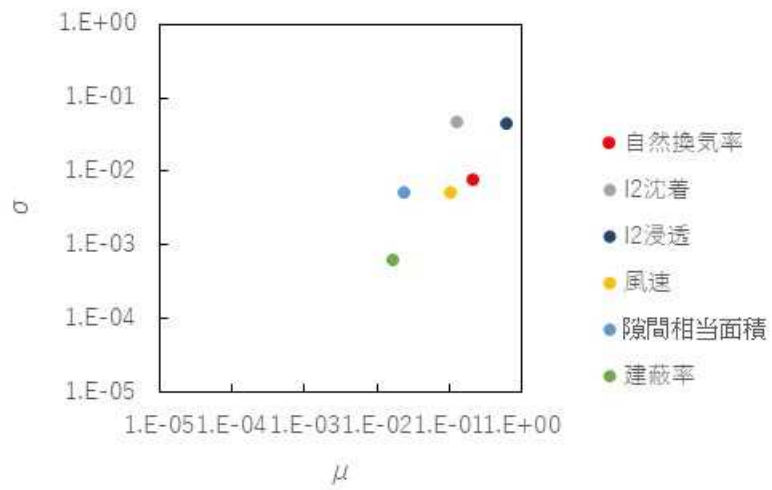
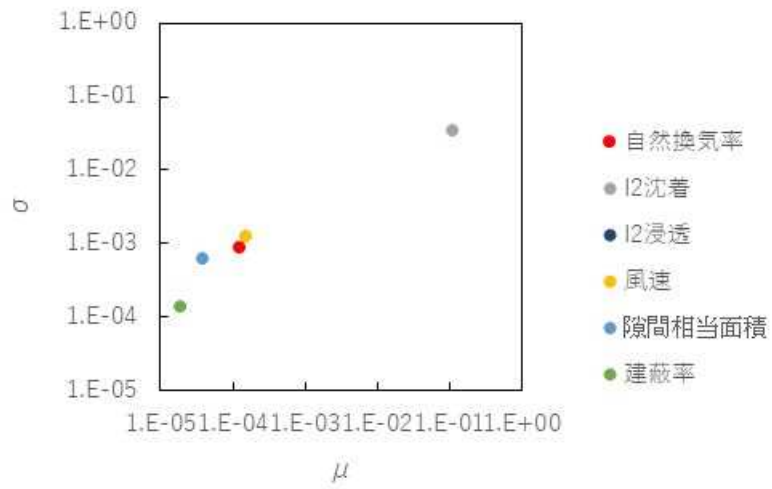
付録図 4.12 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5 \text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、粒子状物質のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



付録図 4.13 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

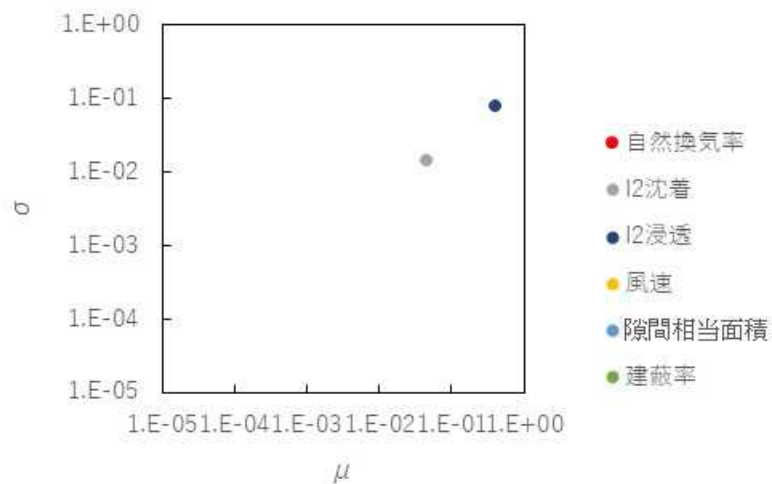
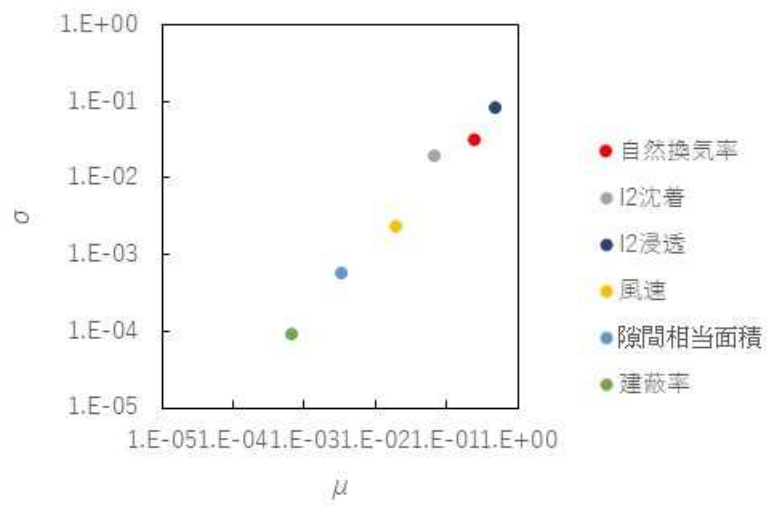
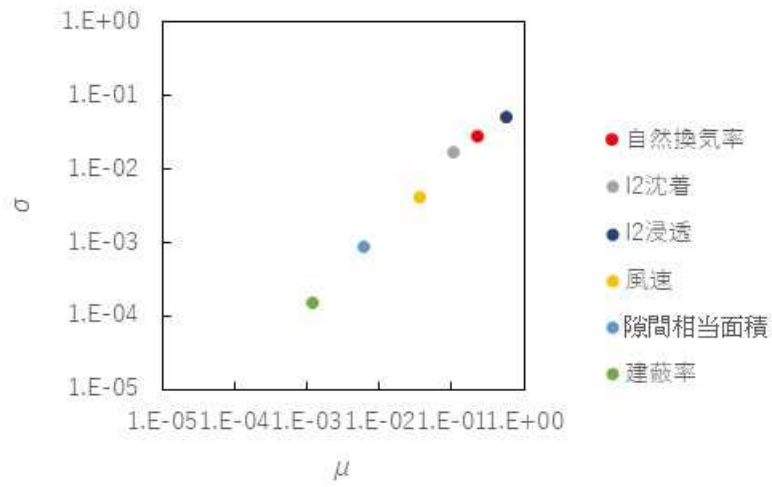


付録図 4.14 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

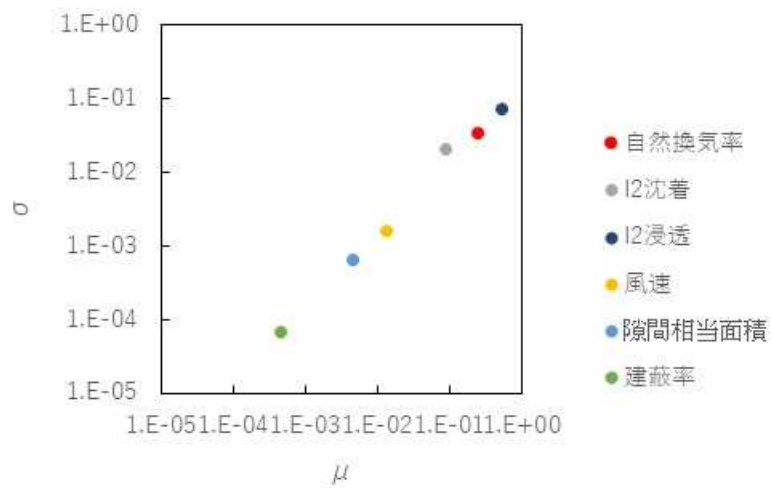
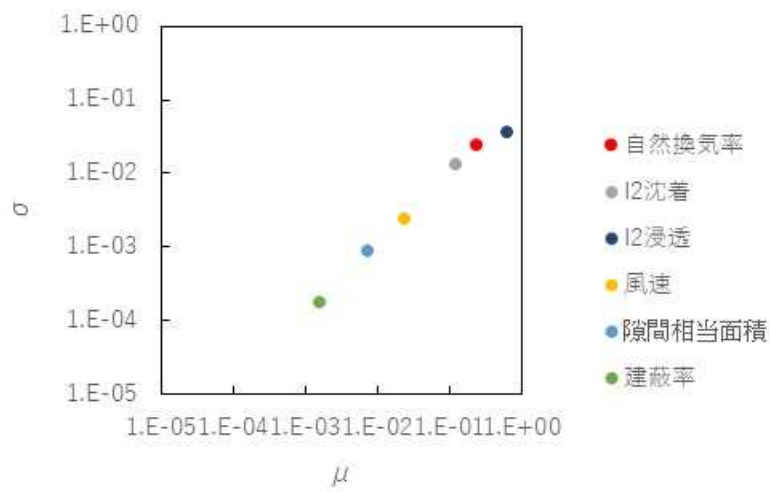
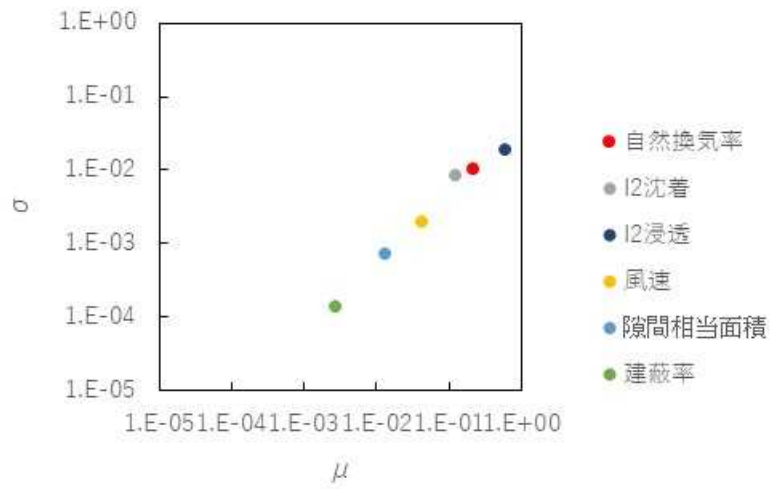


付録図 4.15 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1980 年以前、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

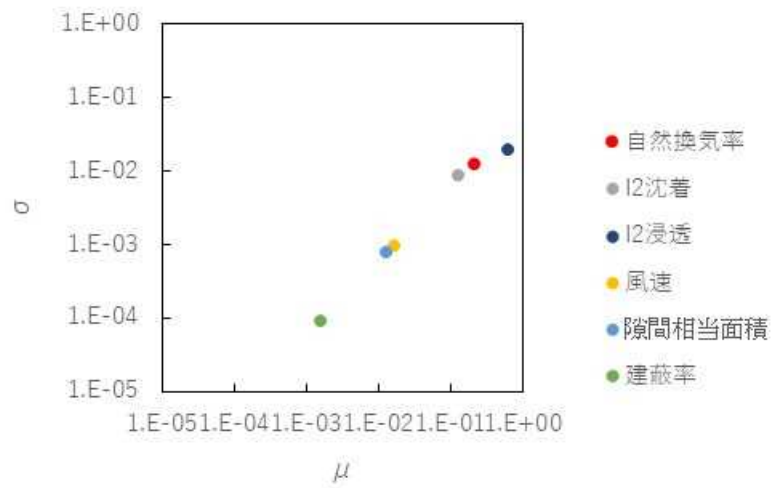
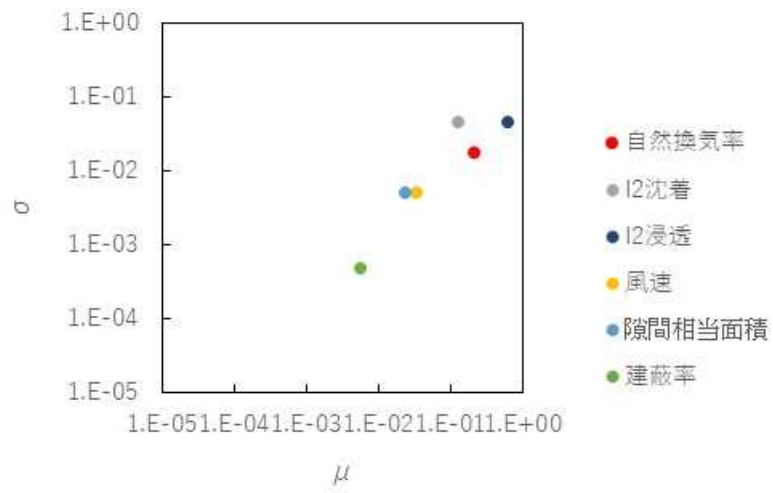
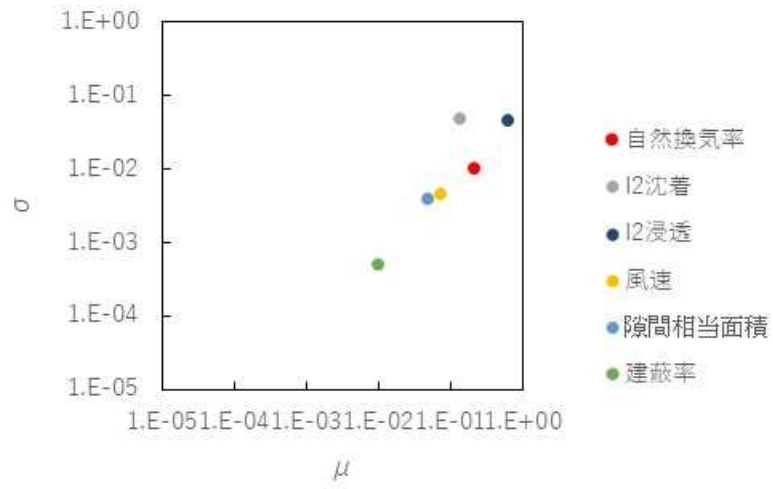




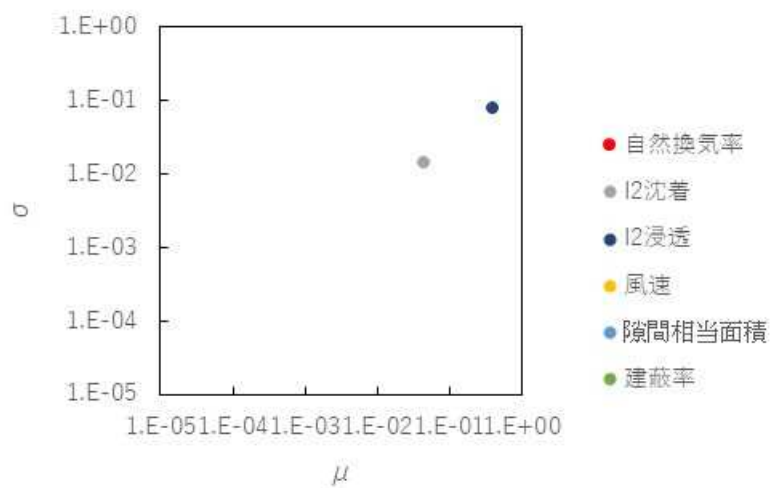
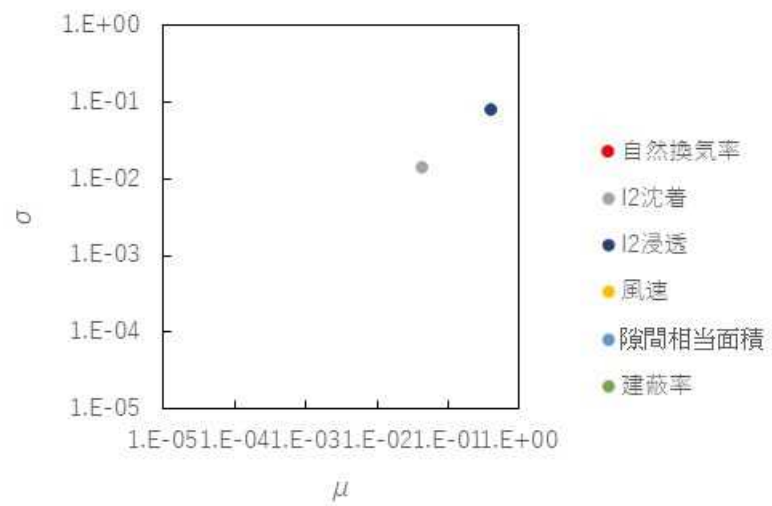
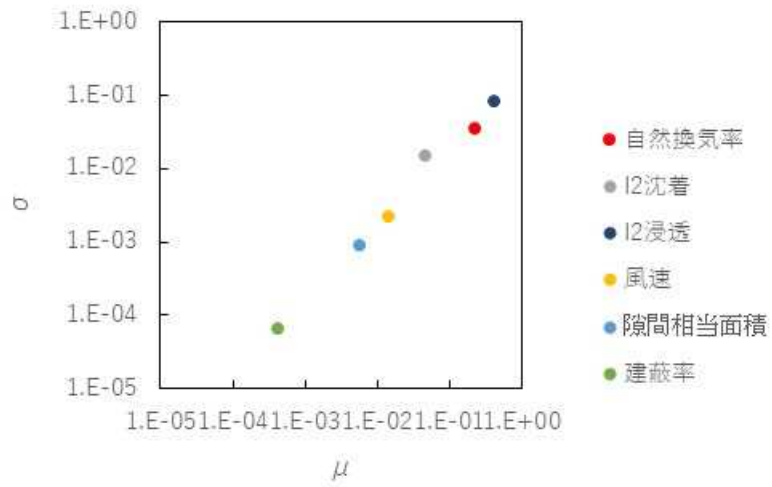
付録図 4.16 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981~1992 年、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



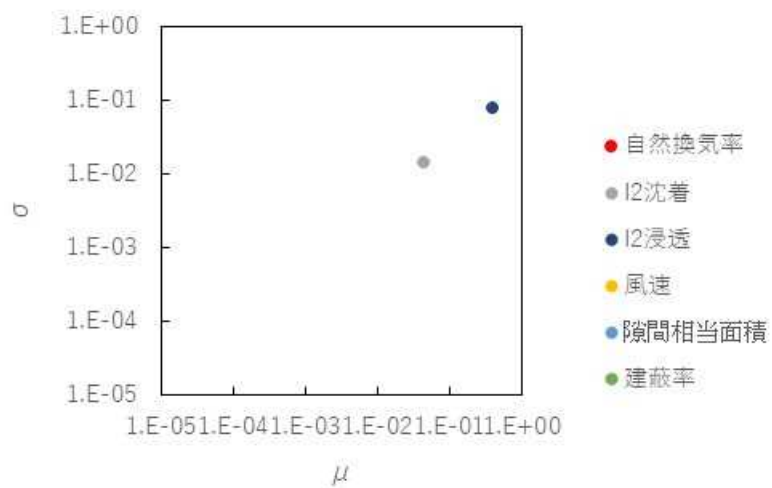
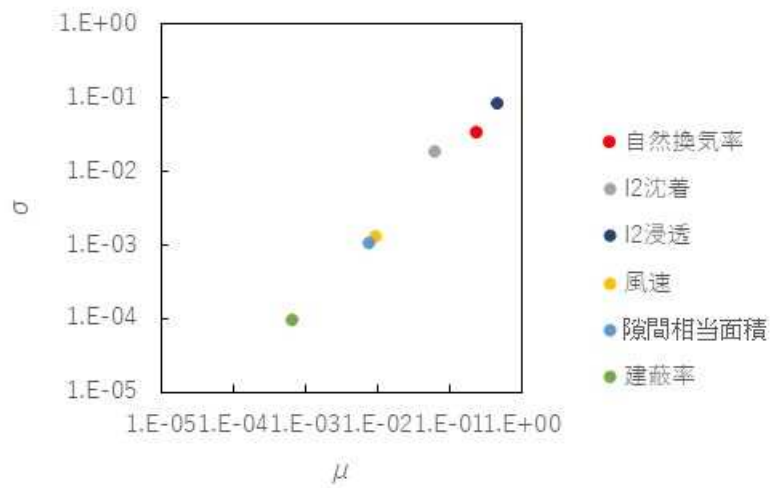
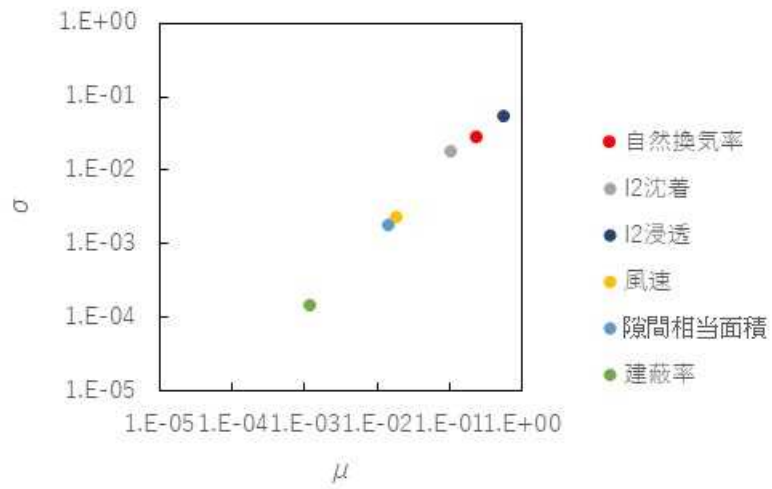
付録図 4.17 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981~1992 年、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



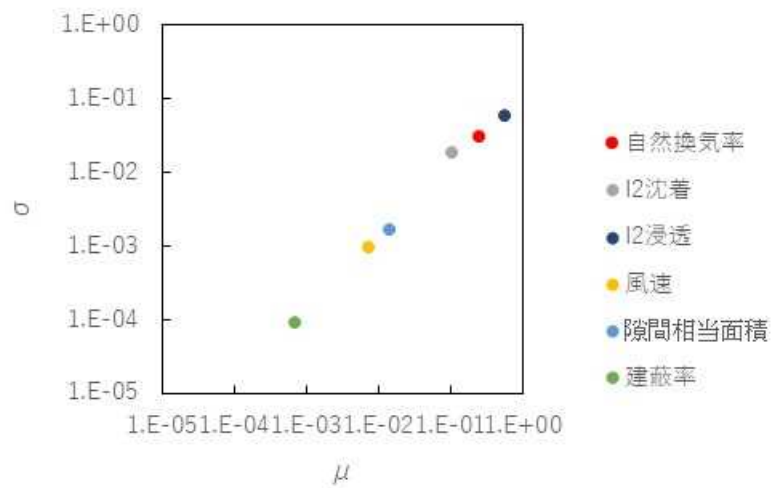
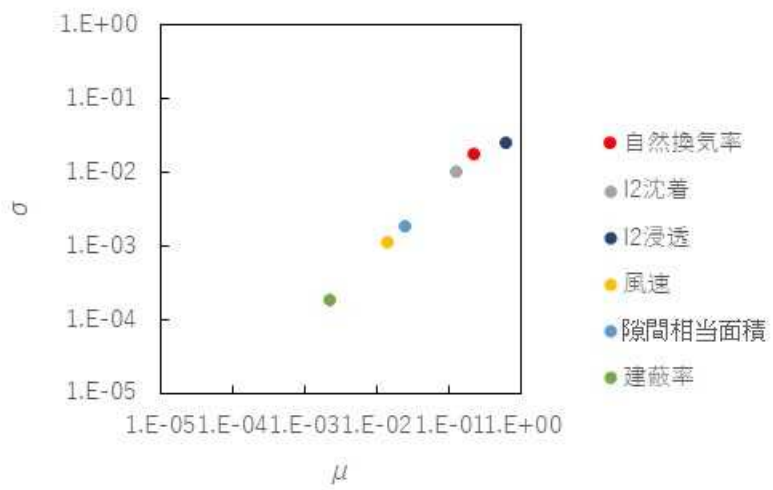
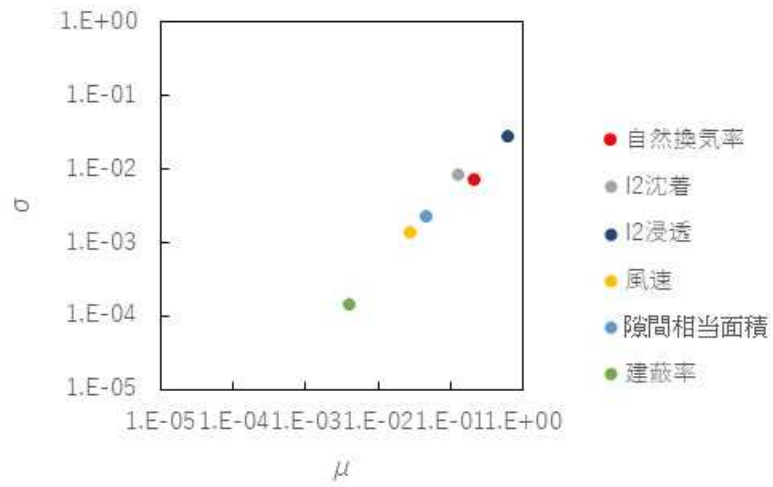
付録図 4.18 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5 \text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1981~1992 年、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



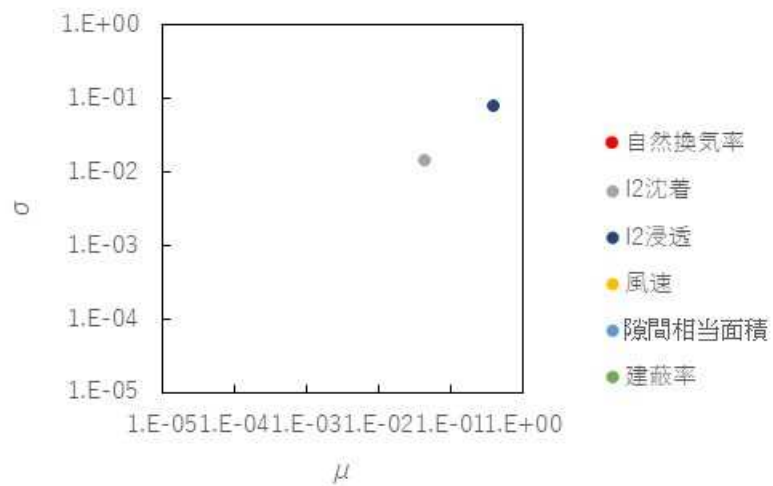
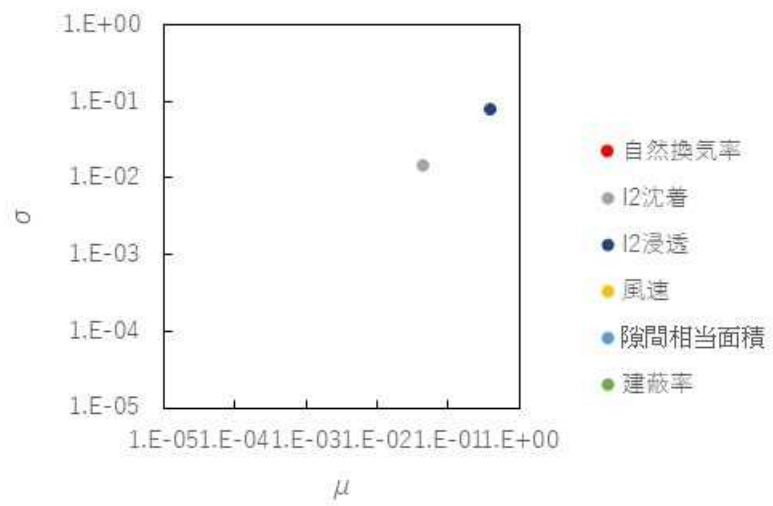
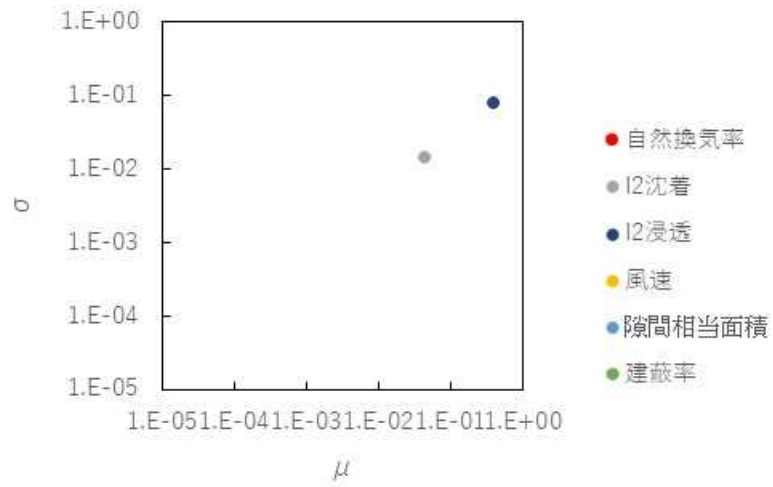
付録図 4.19 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



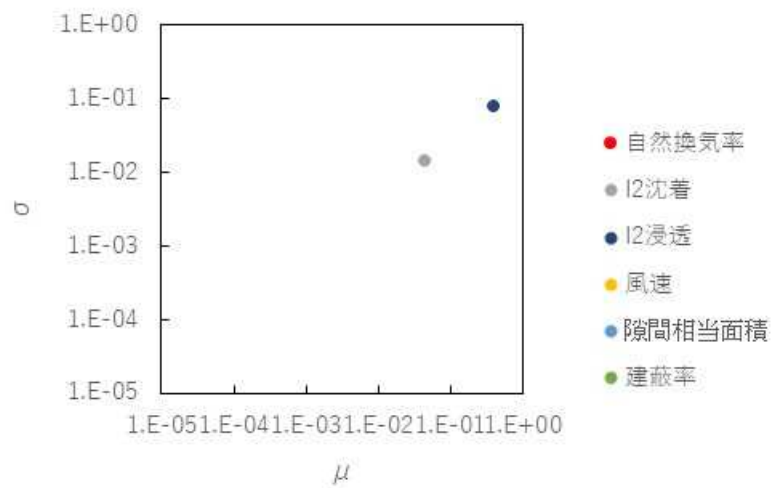
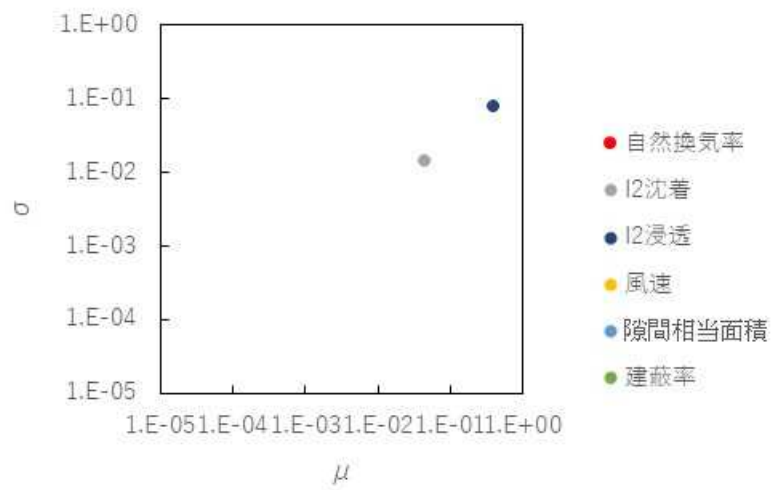
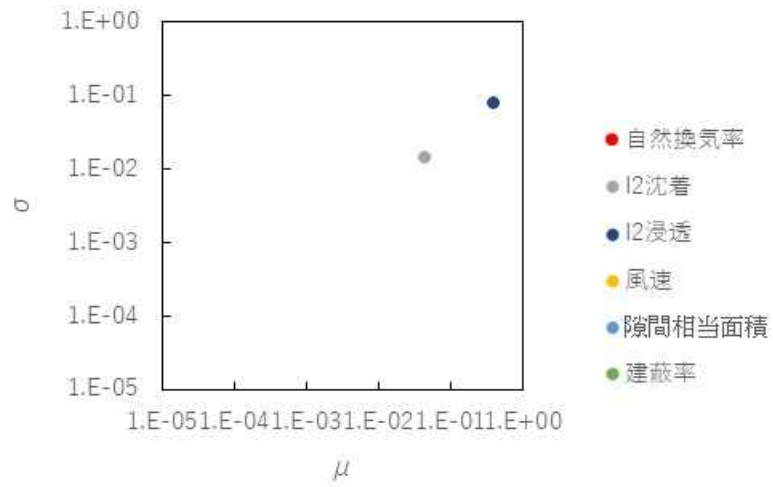
付録図 4. 20 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



付録図 4.21 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5\text{ m s}^{-1}$ 、建築年 1993 年以降、 $I_2$  のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。

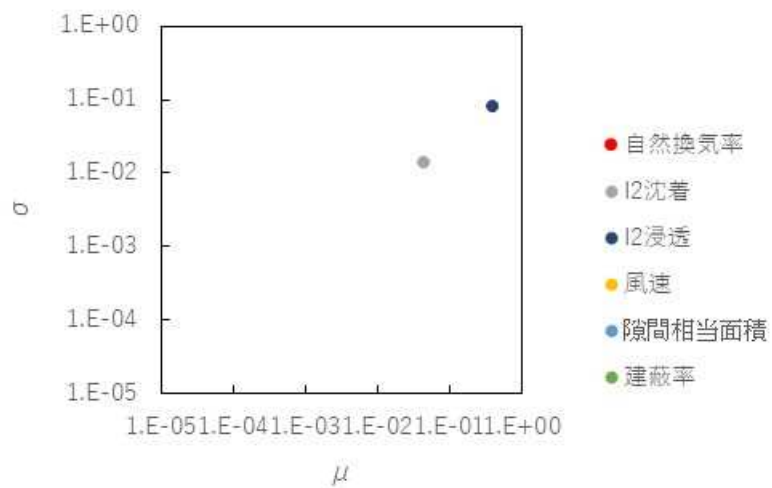
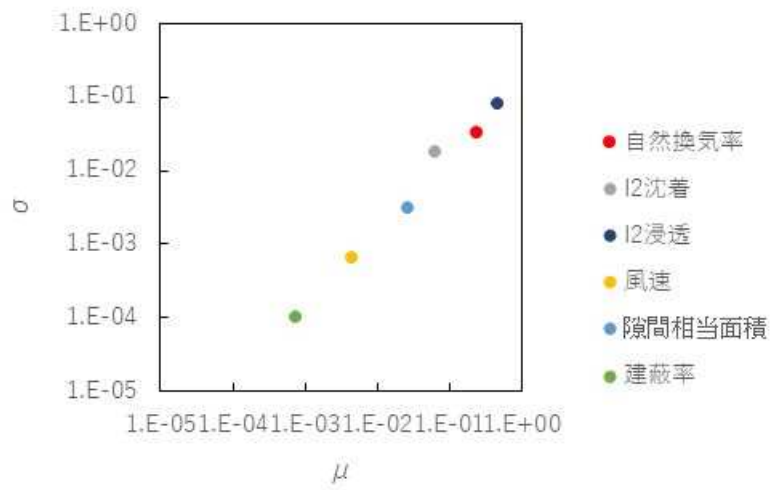
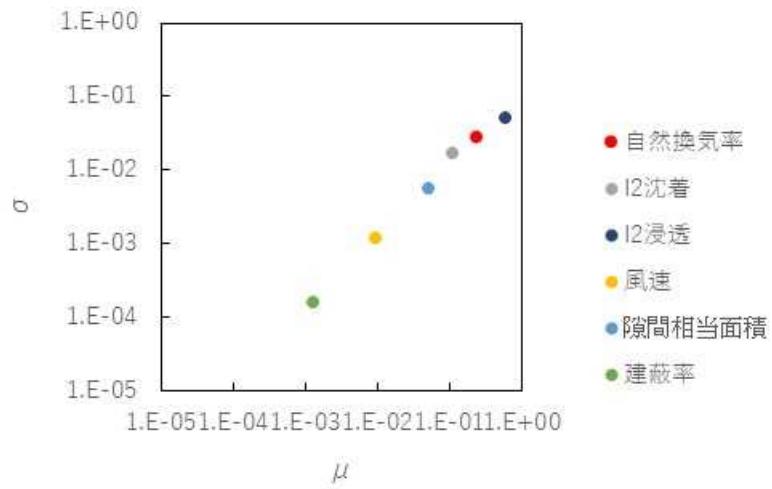


付録図 4.22 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $1\text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、 $I_2$ のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。



付録図 4.23 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $2\text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、I<sub>2</sub>のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。





付録図 4.24 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速  $5\text{ m s}^{-1}$ 、高気密住宅、 $\text{I}_2$ のみ。上から建蔽率 0%、15%、30%。