

令和2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

2021年3月

正誤表

令和 4 年 11 月

日本原子力研究開発機構

令和 2 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																																																								
P2-7 12 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> 。																																																								
P2-34 表 2.5 放出場所： チェルノブイリ 測定場所： 日本	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 12.5%;">I₂</td> <td style="width: 12.5%;">HOI</td> <td style="width: 12.5%;">CH₃I</td> <td style="width: 12.5%;">粒子状ヨウ素</td> </tr> <tr> <td><u>19±9</u></td> <td><u>5±2</u></td> <td>70±11</td> <td><u>6±3</u></td> </tr> </table>	I ₂	HOI	CH ₃ I	粒子状ヨウ素	<u>19±9</u>	<u>5±2</u>	70±11	<u>6±3</u>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 12.5%;">I₂</td> <td style="width: 12.5%;">HOI</td> <td style="width: 12.5%;">CH₃I</td> <td style="width: 12.5%;">粒子状ヨウ素</td> </tr> <tr> <td><u>5±2</u></td> <td><u>6±3</u></td> <td>70±11</td> <td><u>19±9</u></td> </tr> </table>	I ₂	HOI	CH ₃ I	粒子状ヨウ素	<u>5±2</u>	<u>6±3</u>	70±11	<u>19±9</u>																																								
I ₂	HOI	CH ₃ I	粒子状ヨウ素																																																							
<u>19±9</u>	<u>5±2</u>	70±11	<u>6±3</u>																																																							
I ₂	HOI	CH ₃ I	粒子状ヨウ素																																																							
<u>5±2</u>	<u>6±3</u>	70±11	<u>19±9</u>																																																							
P2-34 表 2.5 放出場所： 福島第一	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">測定場所</td> <td style="width: 50%;">測定場所</td> </tr> <tr> <td>測定期間</td> <td>測定期間</td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/14-16</u></td> <td><u>2011/3/14-16</u></td> </tr> <tr> <td>福島第一</td> <td>福島第一</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>福島第二</td> <td>福島第二</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>福島第一、二</td> <td>福島第一、二</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/29-31</u></td> <td><u>2011/3/29-31</u></td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2016/3/29-31</u></td> <td><u>2011/3/29-31</u></td> </tr> </table>	測定場所	測定場所	測定期間	測定期間	茨城	茨城	<u>2016/3/14-16</u>	<u>2011/3/14-16</u>	福島第一	福島第一	<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	福島第二	福島第二	<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	茨城	茨城	<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	福島第一、二	福島第一、二	<u>2016/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>	茨城	茨城	<u>2016/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">測定場所</td> <td style="width: 50%;">測定場所</td> </tr> <tr> <td>測定期間</td> <td>測定期間</td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/14-16</u></td> <td><u>2011/3/14-16</u></td> </tr> <tr> <td>福島第一</td> <td>福島第一</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>福島第二</td> <td>福島第二</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/19-26</u></td> <td><u>2011/3/19-26</u></td> </tr> <tr> <td>福島第一、二</td> <td>福島第一、二</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/29-31</u></td> <td><u>2011/3/29-31</u></td> </tr> <tr> <td>茨城</td> <td>茨城</td> </tr> <tr> <td><u>2011/3/29-31</u></td> <td><u>2011/3/29-31</u></td> </tr> </table>	測定場所	測定場所	測定期間	測定期間	茨城	茨城	<u>2011/3/14-16</u>	<u>2011/3/14-16</u>	福島第一	福島第一	<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	福島第二	福島第二	<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	茨城	茨城	<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>	福島第一、二	福島第一、二	<u>2011/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>	茨城	茨城	<u>2011/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>
測定場所	測定場所																																																									
測定期間	測定期間																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2016/3/14-16</u>	<u>2011/3/14-16</u>																																																									
福島第一	福島第一																																																									
<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
福島第二	福島第二																																																									
<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2016/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
福島第一、二	福島第一、二																																																									
<u>2016/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2016/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>																																																									
測定場所	測定場所																																																									
測定期間	測定期間																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2011/3/14-16</u>	<u>2011/3/14-16</u>																																																									
福島第一	福島第一																																																									
<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
福島第二	福島第二																																																									
<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2011/3/19-26</u>	<u>2011/3/19-26</u>																																																									
福島第一、二	福島第一、二																																																									
<u>2011/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</u>																																																									
茨城	茨城																																																									
<u>2011/3/29-31</u>	<u>2011/3/29-31</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
1.4 実施方法	1-2
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.....	2-6
2.2 屋内退避による吸入被ばく低減効果の解析方法	2-12
2.2.1 解析方法の概要.....	2-12
2.2.2 入力値	2-23
2.2.3 風速一定条件下での吸入被ばく低減係数	2-35
2.2.4 風速変動による吸入被ばく低減係数への影響	2-43
2.3 屋内退避中にとることが望ましい行動、注意事項	2-65
2.3.1 マスク着用による低減効果	2-65
2.3.2 空気清浄機稼働による低減効果	2-68
2.3.3 屋内退避中の注意事項	2-70
2.4 第2章の参考文献.....	2-71
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	3-10
3.4 実験結果	3-11
3.4.1 初期沈着割合	3-11
3.4.2 残存率	3-17
3.5 外部被ばく低減係数への影響	3-20
3.6 第3章の参考文献.....	3-20
4. OSCAAR コードで出力されるパラメータを用いた被ばく低減効果の解析.....	4-1

1. 実施計画

1.1 事業名

令和2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、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整備するため、吸入被ばく及び外部被ばくに関するパラメータの整備、及びそれらのパラメータを用いて低減効果を解析してきた。平成30年度及び平成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（以下「平成30年、31年度事業」という。）において得られた成果及び課題を踏まえ、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。

また、国内における屋内退避の被ばく評価に係る会議等が開催される場合にはこれに参加し、屋内退避に関連する情報を入手する。

1.3.1 吸入被ばくの低減効果の評価

平成30年、31年度事業までに、家屋内への放射性物質の侵入及び家屋内の動態に関するパラメータ（自然換気率、沈着率、浸透率等）を実験的に求めて整備し、各パラメータの依存性について調査を行ってきた。しかし、特に I_2 の浸透率と沈着率に関して不確かさが存在し、低減効果の不確かさも大きいままである。そこで、被ばく低減効果の不確かさを低減のために、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し、各パラメータの知見を整備する。

また、今までは風速一定などの理想的な環境条件で低減効果を解析してきた。しかしながら、実際の環境条件で解析した低減効果と同様の値であるかの確認がされていない。実際の環境条件下での低減効果についても解析し、理想的な環境条件下で求めた低減効果との違いを整理し、理想的な環境条件下で求めた低減効果を使用する場合の注意点がある場合にはまとめる。

また、平成30年、31年度事業までに得られた知見等を基に、防護効果をより高める観点から屋内退避中にとることが望ましい行動や注意事項等があれば、それら行動を行った際の低減効果もあわせて整理する。

1.3.2 外部被ばくの低減効果の評価

平成30年、31年度事業までに、各建屋の建築具材、厚さ等のパラメータ調査を行い、そのパラメータを用いて低減効果の解析を行ってきた。屋根材に付着した放射性物質からの低減効果への寄与も解析し、影響度を把握したものの、屋根材への沈着量に不確かさが残ったままである。この要因の一つとして、屋根材上の付着量が均一でないこと、さらに破壊試験で測定したことが

挙げられた。

始めに、測定精度向上のために、蛍光 X 線分析装置などの非破壊で屋根材上の付着量を測定できる装置を整備する。非破壊試験と平成 31 年度事業で実施した測定法の比較を行った後、平成 30 年度事業で整備したウェザーメーターを用いて代表的な屋根材への沈着量と降水環境（降水強度、積算降水量など）との関係を実験的に求める。さらに、実験結果を基に、屋根材への放射性物質の沈着を考慮した外部被ばくの低減効果を整備する。

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。

2. 吸入被ばくの低減効果の評価

第2章では、屋内退避による吸入被ばくの低減効果を検討する。始めに吸入被ばくの低減効果の評価するために必要なパラメータのうち、 I_2 の沈着率と浸透率に対してラボ実験を実施した結果を示す。今までに得られたパラメータを用いて、理想的な環境条件（風速一定）と実際の環境条件で解析した吸入被ばくの低減効果の比較を示す。平成30年、31年度事業までに得られた知見等を基に、防護効果をより高める観点から屋内退避中にとることが望ましい行動を行った際の低減効果や注意事項をもあわせて整理する。

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 m^3 ($35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$) であり、表面積は 0.735 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。

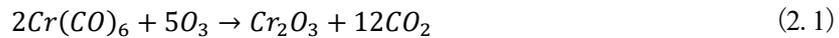
平成31年度事業では、使用したチャンバーの密閉度が低く、チャンバーの隙間から空気が漏れていた可能性が高かった。チャンバーからの空気の漏れにより、換気率が低い場合の実験結果が不安定となった。そこで、チャンバーの隙間と考えられる場所（ねじ穴、吸入/排気口）にシーリング材を充填することで、密閉度を高めた。平成31年度事業では、測定系への流量と排気量の和は供給量と等値ではなかったものの、シーリング材を充填した後では、測定系への流量と排気量の和は供給量と等値であり、漏れはほとんどないことが確認された。

粒子状物質を対象とした実験では、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 $0.3 \mu\text{m}$ ）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 を対象とした実験では、図2.2に示されている円筒形の容器の中の固体ヨウ素の揮発性を利用し、 I_2 を発生させた。 I_2 濃度の測定には、ICP-MS (iCAPQ、Thermo scientific) を使用した。本実験では、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。O₃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 O₃ によって酸化クロム (III) の粒子に酸化される。次に O₃ と NH₃ 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 NH₄NO₃ と凝集し、GED の多孔質膜を通過できない大きさにまで成長し ICP-MS に導入される。キャリアとして機能する NH₄NO₃ 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 O₃ と NH₃ 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 μL 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 μL min⁻¹ ~ 99.99 μL min⁻¹ の間で変化させて ICP-MS へ導入し、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、チャンバー内の換気率を設定した。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。

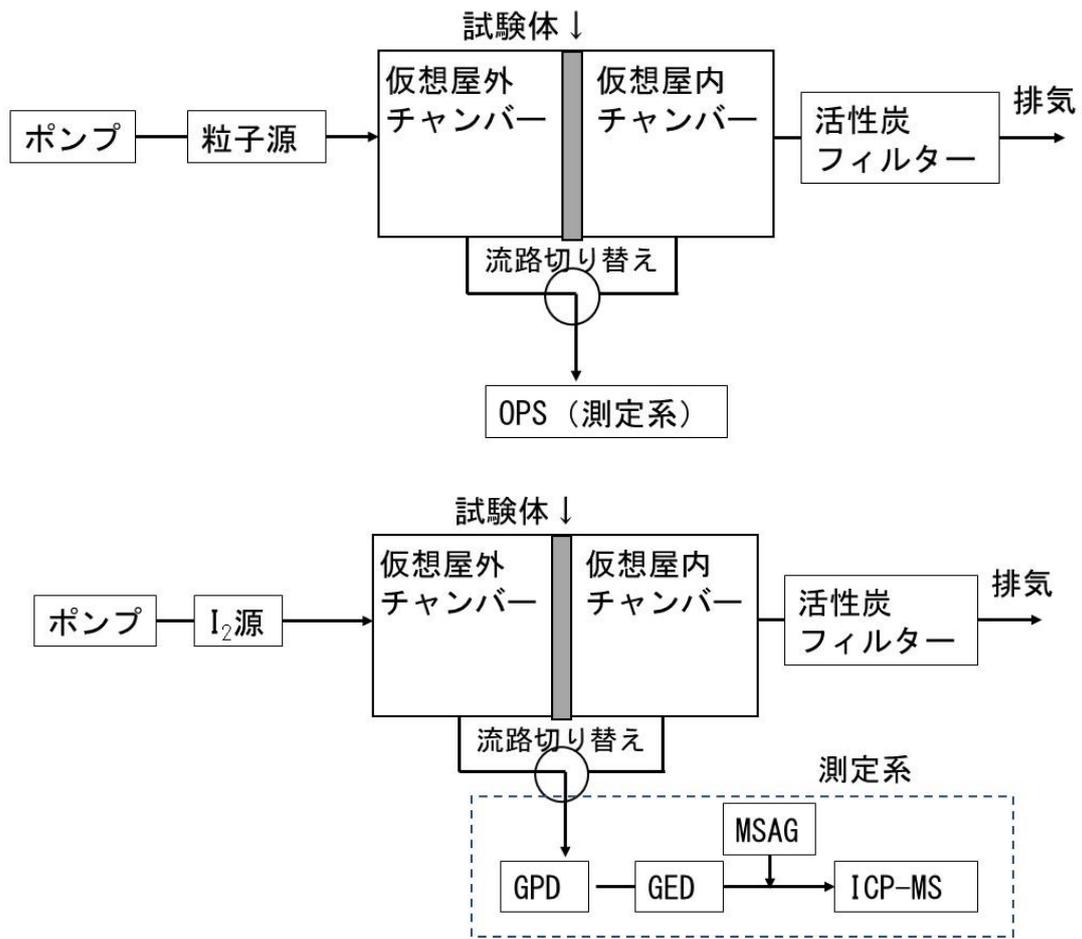


図 2.1 粒子状物質（上）と I_2 （下）の沈着率と浸透率に関する実験系



図 2.2 実験チャンバー（左）と試験体（右）の写真

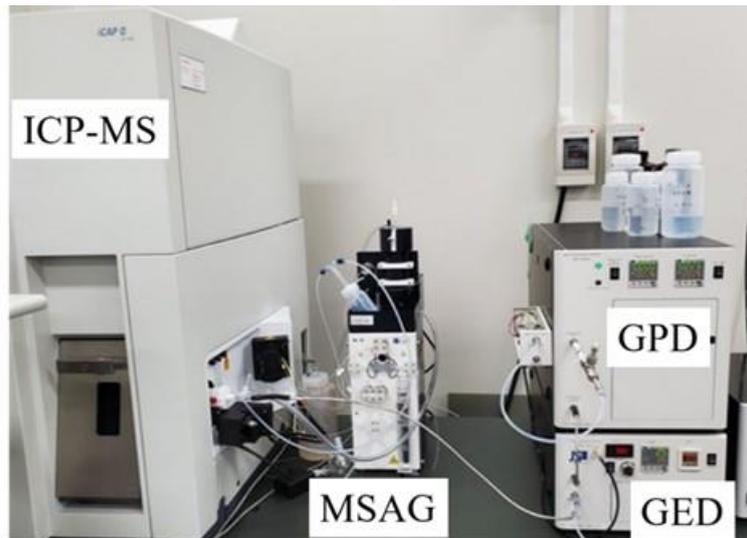


図 2.3 I₂に関する測定系の写真

(1) 沈着率

沈着率試験では、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、さらに床材に何も敷かない場合（床材無し：ステンレス）の沈着率も求めた。仮想屋外チャンバーの床面全体に対象床材を敷き、実験を実施した。仮想屋外チャンバーに粒子または I₂ 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 I₂ 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¹、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・I₂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⁻³)

λ_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⁻¹)

λ_d : 粒子状物質または I₂ の沈着率 (h⁻¹)

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 λ_d を決定した。

¹ 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 I₂ が付着し、ヨウ素が検出されなかった。ポンプ内での I₂ 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、床材に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、床材に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})
- λ_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})
- λ_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、

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

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

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 $C_{\text{内,ave}}$ と $C_{\text{外,ave}}$ を利用した。また、沈着率 λ_d には同時に試験した床材無し時の沈着率を利用した。

2.1.2 実験結果

(3) 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 2.5 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 0.55 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 m^{-1} 、一般的な部屋の体積表面積は 2.1 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 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。

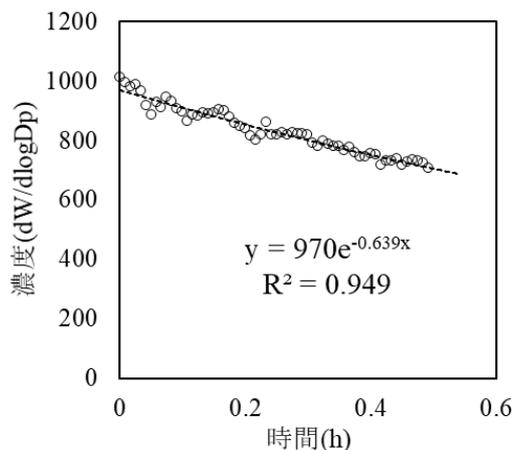


図 2.5 粒子状物質の沈着率試験時の測定結果例（床材無し）

(4) I_2 の沈着率

I_2 の沈着率試験時の測定結果例を図 2.6 に示す。本試験では、連続的にチャンバー内の I_2 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_2 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)² 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_2 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_2 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_2 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³。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_2 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 2.7(a) に示す。図 2.7(a) には、平成 31 年度の結果と本年度の結果を合わせて示す。ここで、換気率は式 (2.3) の λ_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_2 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_2 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。強制滞留が大きいほど、物質の壁面への移行量が大きくなるため、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

² 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。

³ 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 ($5.2 \times 5/6 \approx 4.3$) 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。

なつたと考えられる。

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 2.7(b))。

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 のほうが大きかつた。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 0.5h^{-1} の時、実家屋での I_2 の沈着率は約 0.2h^{-1} であり、換気率が 3h^{-1} の時に約 1.4h^{-1} であつた。

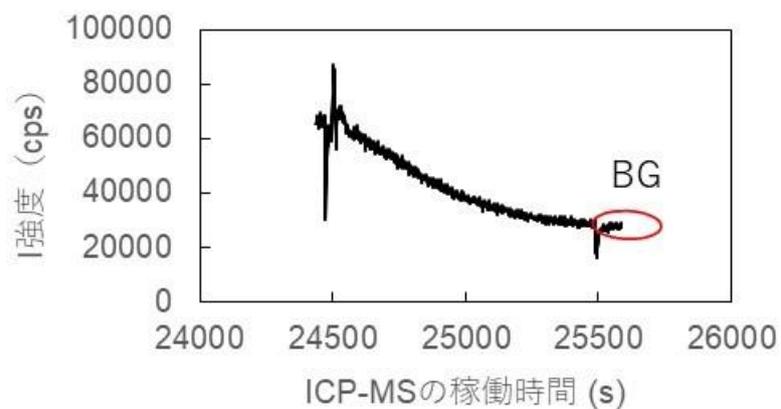


図 2.6 I_2 の沈着率試験時の測定結果例

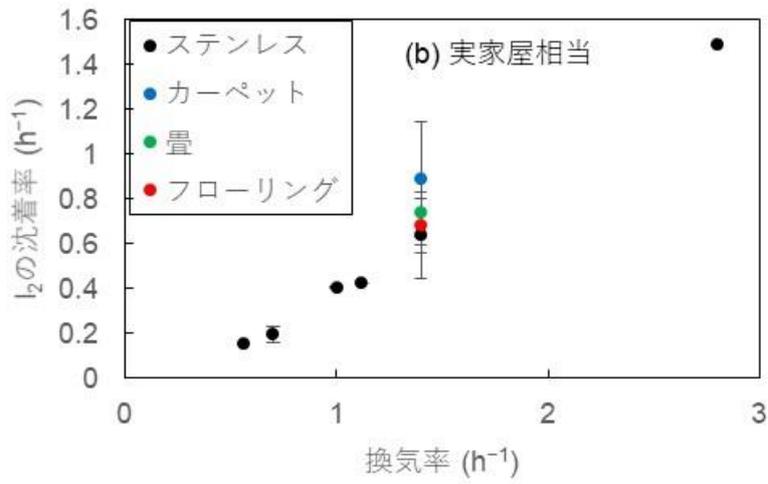
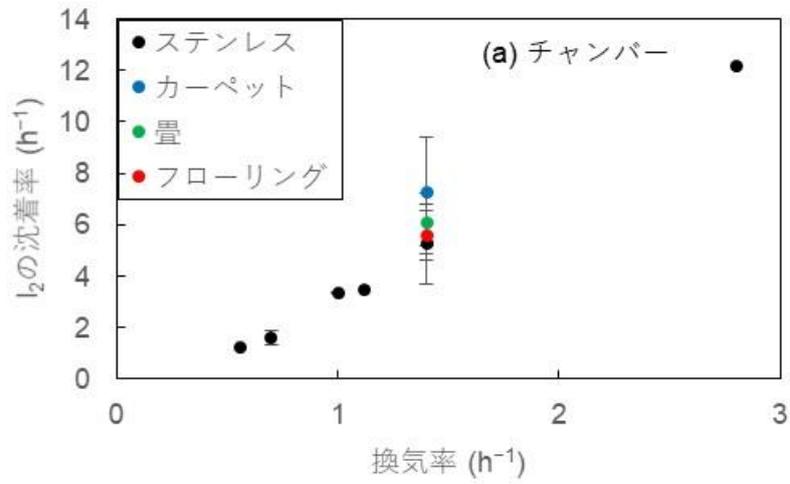


図 2.7 I₂の沈着率と換気率の関係。プロットは各換気率条件下での実験値の平均値。誤差棒は標準偏差。誤差棒が無いデータは試験回数3回未満。(a) 体積表面積比補正無し、(b) 体積表面積比補正を行い、実家屋相当。

表 2.1 I₂の沈着率の結果

床材	沈着率 (換気率 1.4 h ⁻¹ 時)	
	全面	床面のみ
カーペット	7.3 h ⁻¹	2.9 h ⁻¹
フローリング	5.6 h ⁻¹	1.2 h ⁻¹
畳	6.0 h ⁻¹	1.7 h ⁻¹
床材無し	5.2 h ⁻¹	0.9 h ⁻¹

(5) 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 2.8 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。

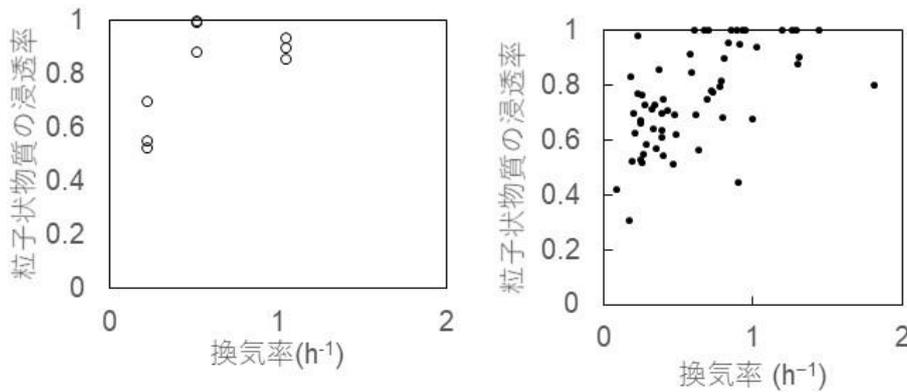


図 2.8 粒子状物質の浸透率と換気率の関係 (左：本実験、右：平成 30 年度事業の結果)

(6) I₂の浸透率

I₂の浸透率試験時の測定結果例を図 2.9 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) は仮想屋内チャンバ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。I₂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、I₂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 I₂源の供給量を変えることにより調整した。換気率は式 (2.7) の λ_c である。

I₂の浸透率と換気率の関係を図 2.10 に示す。図 2.10 には、平成 31 年度の結果と本年度の結果を合わせて示す。粒子状物質と同様に換気率が大いほど浸透率が大きくなる傾向が見られた。同じ換気率での浸透率を比較すると、どの換気率条件下でも I₂の浸透率は粒子状物質の浸透率よりも小さく、I₂は粒子状物質よりも家屋内に侵入しにくいことが示されている。例として、換気率が 1 h⁻¹の場合、粒子状物質の浸透率は約 0.9 に対し、I₂の浸透率は約 0.3 であった。

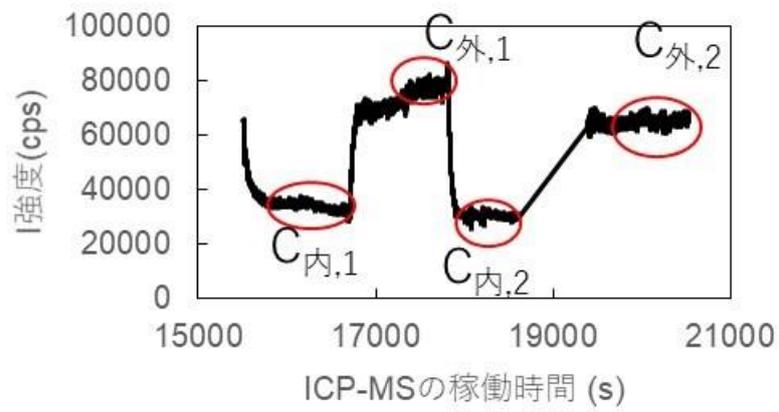


図 2.9 I₂の浸透率試験時の測定結果例

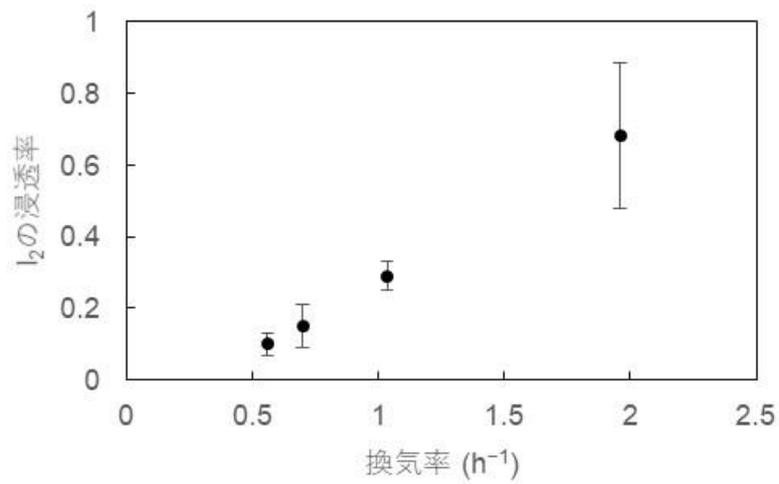


図 2.10 I₂の浸透率と換気率の関係。プロットは各換気率条件下での実験値の平均値。誤差棒は標準偏差。

2.2 屋内退避による吸入被ばく低減効果の解析方法

2.2.1 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。なお、被ばく低減係数が大きいほど被ばく低減効果が小さく、被ばく低減係数が小さいほど被ばく低減効果が大きいことを示している。

$$\frac{D_{in}(t)}{D_{out}(t)} = \frac{\sum_i S_{i,in}(t) \cdot e(i)}{\sum_i S_{i,out}(t) \cdot e(i)} \quad (2.8)$$

- $D_{in}(t)$: 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（積算空气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（積算空气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^{-1})
 t : プルーム通過開始時刻からの経過時間 (h)。ここでは、プルーム通過開始時刻から屋内退避が継続されているとしており、「屋内退避継続時間」と同義である。

各核種の e_i は ICRP Publ. 71 の値を用いた (表 2.2)。本年度の事業では、対象とする核種、粒子状のタイプは確率論的事故影響評価コードシステム OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in reactor accident) (本間他, 2000; 放射線安全・防災研究グループ, 2020) と合わせた。

本年度は、平成 31 年度事業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 2.11 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。

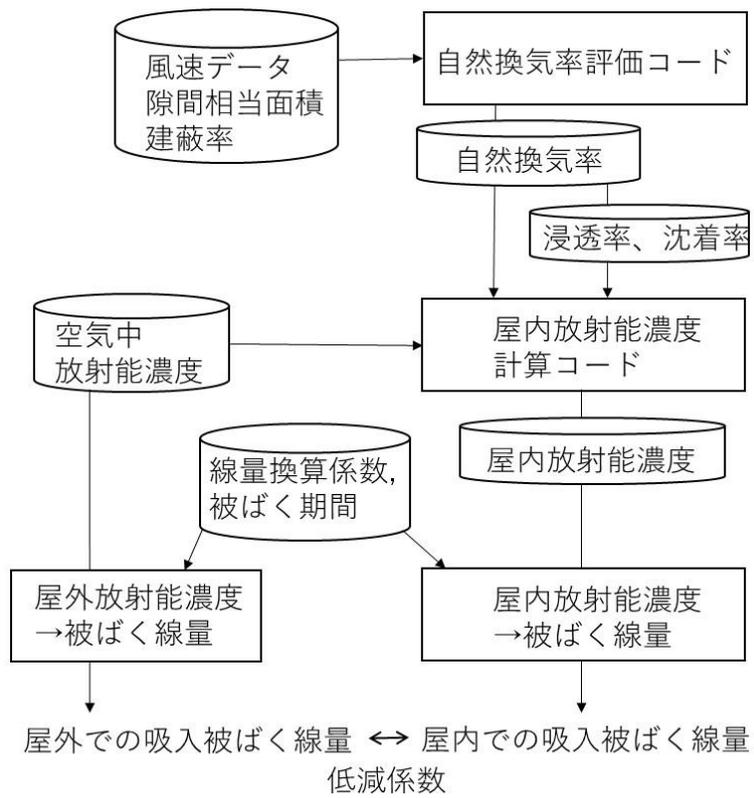


図 2.11 吸入被ばく線量評価コードの概要

表 2.2 各核種の半減期と放射能から吸入摂取による実効線量（成人、粒径 1 μm）及び甲状腺等価線量（成人、粒径 1 μm）への換算係数（ICRP, 1995）（1/3）

核種	粒子状のタイプ* または化学形態	壊変定数 (h ⁻¹)	実効線量 (Sv Bq ⁻¹)	甲状腺等価線量 (Sv Bq ⁻¹)
Co-58	S	4.1E-04	2.1E-09	5.1E-10
Co-60	S	1.5E-05	3.1E-08	9.8E-09
Kr-85	Gas	7.3E-06	0.0E+00	0.0E+00
Kr-85m	Gas	1.5E-01	0.0E+00	0.0E+00
Kr-87	Gas	5.4E-01	0.0E+00	0.0E+00
Kr-88	Gas	2.4E-01	0.0E+00	0.0E+00
Rb-86	F	2.1E-03	9.3E-10	7.4E-10
Sr-89	F	5.7E-04	1.0E-09	1.8E-10
Sr-90	F	2.7E-06	2.4E-08	5.9E-10
Sr-91	F	7.2E-02	1.6E-10	2.6E-11
Sr-92	F	2.6E-01	9.8E-11	1.5E-11
Y-90	S	1.1E-02	1.5E-09	4.2E-14
Y-91	S	4.9E-04	8.9E-09	2.8E-12
Y-92	S	2.0E-01	1.8E-10	1.1E-12
Y-93	S	6.8E-02	4.2E-10	9.0E-13
Zr-95	M	4.5E-04	4.8E-09	6.4E-10
Zr-97	M	4.1E-02	9.2E-10	2.7E-11
Nb-95	S	8.2E-04	1.8E-09	2.3E-10
Mo-99	S	1.1E-02	9.9E-10	1.1E-11
Tc-99m	M	1.2E-01	1.9E-11	5.4E-12
Ru-103	S	7.4E-04	3.0E-09	1.6E-10
Ru-105	S	1.6E-01	1.8E-10	4.5E-12
Ru-106	S	7.7E-05	6.6E-08	5.4E-10
Rh-105	S	2.0E-02	3.5E-10	2.6E-12
Sb-127	M	7.5E-03	1.7E-09	4.1E-11
Sb-129	M	1.6E-01	2.3E-10	8.6E-12
Te-127	M	7.4E-02	1.3E-10	2.8E-12
Te-127m	M	2.6E-04	7.4E-09	8.6E-10

*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 OSCAAR コードのデフォルトの Type とした。

表 2.2 各核種の半減期と放射能から吸入摂取による実効線量（成人、粒径 1 μm）及び甲状腺等価線量（成人、粒径 1 μm）への換算係数（ICRP, 1995）（2/3）

核種	粒子状のタイプ* または化学形態	壊変定数 (h ⁻¹)	実効線量 (Sv Bq ⁻¹)	甲状腺等価線量 (Sv Bq ⁻¹)
Te-129	M	6.0E-01	3.7E-11	3.5E-13
Te-129m	M	8.6E-04	6.6E-09	1.0E-09
Te-131m	M	2.3E-02	9.4E-10	2.7E-09
Te-132	M	8.9E-03	2.0E-09	4.3E-09
I-131	F	3.6E-03	7.4E-09	1.5E-07
I-132	F	3.0E-01	9.4E-11	1.4E-09
I-133	F	3.3E-02	1.5E-09	2.8E-08
I-134	F	7.9E-01	4.5E-11	2.6E-10
I-135	F	1.0E-01	3.2E-10	5.7E-09
Xe-133	Gas	5.5E-03	0.0E+00	0.0E+00
Xe-135	Gas	7.6E-02	0.0E+00	0.0E+00
Cs-134	F	3.8E-05	6.6E-09	6.3E-09
Cs-136	F	2.2E-03	1.2E-09	1.0E-09
Cs-137	F	2.6E-06	4.6E-09	4.4E-09
Ba-139	F	5.0E-01	3.4E-11	1.7E-12
Ba-140	F	2.3E-03	1.0E-09	1.2E-10
La-140	M	1.7E-02	1.1E-09	6.6E-11
La-141	M	1.8E-01	1.5E-10	1.1E-12
La-142	M	4.6E-01	8.9E-11	5.7E-12
Ce-141	S	8.9E-04	3.8E-09	2.2E-11
Ce-143	S	2.1E-02	8.3E-10	6.7E-12
Ce-144	S	1.0E-04	5.3E-08	1.4E-10
Pr-143	S	2.1E-03	2.4E-09	1.3E-14
Nd-147	S	2.6E-03	2.4E-09	1.7E-11
Np-239	M	1.2E-02	9.3E-10	8.2E-12
Pu-238	S	9.0E-07	1.6E-05	2.8E-07
Pu-239	S	3.3E-09	1.6E-05	3.2E-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 OSCAAR コードのデフォルトの Type とした。

表 2.2 各核種の半減期と放射能から吸入摂取による実効線量（成人、粒径 1 μm）及び甲状腺等価線量（成人、粒径 1 μm）への換算係数（ICRP, 1995）（3/3）

核種	粒子状のタイプ* または化学形態	壊変定数 (h ⁻¹)	実効線量 (Sv Bq ⁻¹)	甲状腺等価線量 (Sv Bq ⁻¹)
Pu-240	S	1.2E-08	1.6E-05	3.2E-07
Pu-241	S	5.5E-06	1.7E-07	7.1E-09
Am-241	M	1.8E-07	4.2E-05	2.9E-06
Cm-242	M	1.8E-04	5.2E-06	3.5E-08
Cm-244	M	4.4E-06	2.7E-05	1.3E-06
I-131	CH ₃ I	3.6E-03	1.5E-08	3.1E-07
I-132	CH ₃ I	3.0E-01	1.9E-10	3.2E-09
I-133	CH ₃ I	3.3E-02	3.1E-09	6.0E-08
I-134	CH ₃ I	7.9E-01	2.2E-09	7.0E-10
I-135	CH ₃ I	1.0E-01	6.8E-10	1.3E-08
Ru-103	RuO ₄	7.4E-04	1.1E-09	7.0E-10
Ru-105	RuO ₄	1.6E-01	1.8E-10	2.2E-11
Ru-106	RuO ₄	7.7E-05	1.8E-08	1.5E-08
I-131	I ₂	3.6E-03	2.0E-08	3.9E-07
I-132	I ₂	3.0E-01	3.1E-10	3.6E-09
I-133	I ₂	3.3E-02	4.0E-09	7.6E-08
I-134	I ₂	7.9E-01	1.5E-10	7.0E-10
I-135	I ₂	1.0E-01	9.2E-10	1.5E-08

*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 OSCAAR コードのデフォルトの Type とした。

(7) 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⁴（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）。本事業では、多くのパラメータの組み合わせに対して、自然換気率を求めるために、赤林の関係図を数式化した自然換気率評価コード（図 2.12）を作成した。

自然換気率評価コードの入力値は風速、建蔽率、隙間相当面積、屋内外の温度差である。なお、平成 31 年度事業の感度解析結果より、屋内外の温度差による被ばく低減係数への影響が小さいことが示されたため、ここでは、屋内外の温度差は常に 0 度とした。自然換気率評価コードを使用することにより、風速の時間変化、対象とする建物の情報（建蔽率と隙間相当面積）を入力することで、風速の時間変化に合わせた自然換気率の時間変化を出力することができる。

各パラメータの頻度分布と取り得る範囲の情報を 2.2.2 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 m s^{-1} 、建蔽率 0%、温度差 0°C の場合、図 2.13 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 2.13 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 2.13 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 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 2.14）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。

$$Y = (0.00005K^2 - 0.0037K + 0.079)U^2 + (0.0003K^2 - 0.0218K + 0.6111)U + \frac{\Delta T(20 - U)}{300} \quad (2.9)$$

Y : 赤林の関係図（右側）の y 切片

K : 建蔽率 (%)

U : 風速 (m s^{-1})

ΔT : 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。

$$\lambda_e = \exp(1.083b - 3.2623) \quad (2.10)$$

⁴ 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。

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

- λ_e : 自然換気率 (h^{-1})
- Y : 式 (2.9) 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 2.3 と表 2.4 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。なお、赤林の関係図上（数式上）では、隙間相当面積に応じて非常に小さな自然換気率も計算上では算出されるものの、実際に測定された自然換気率は過去の文献値も含めて 0.05 h^{-1} を下回ることはなかったため、自然換気率の下限値を 0.05 h^{-1} と仮定した。

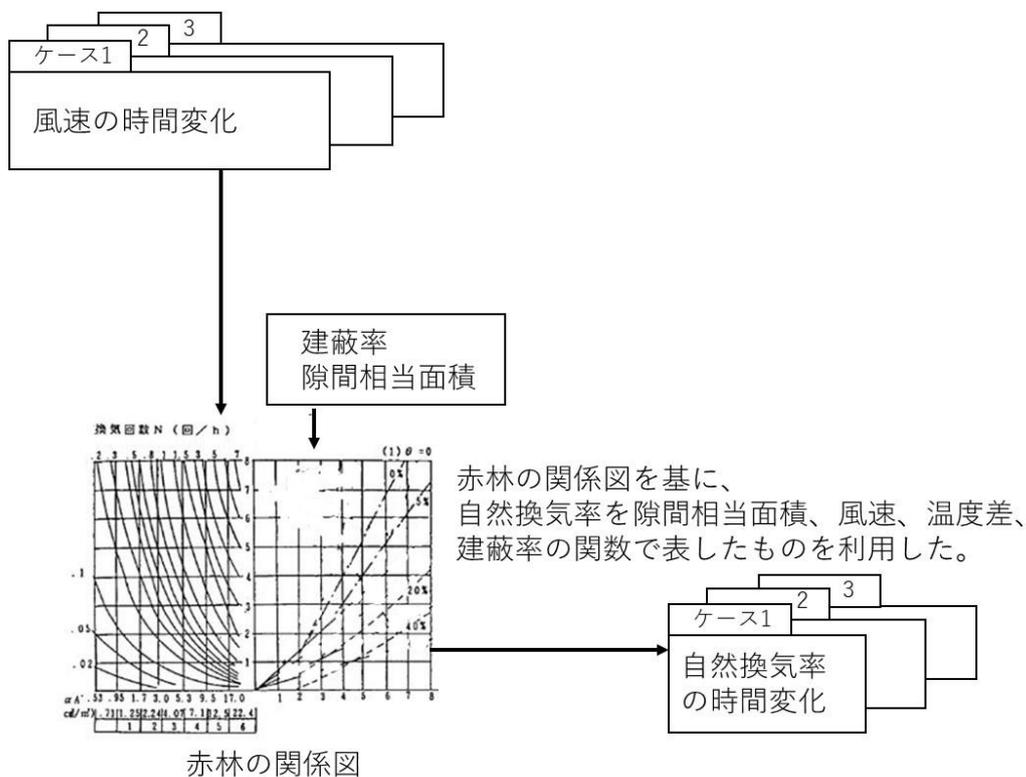


図 2.12 自然換気率評価コードの概要

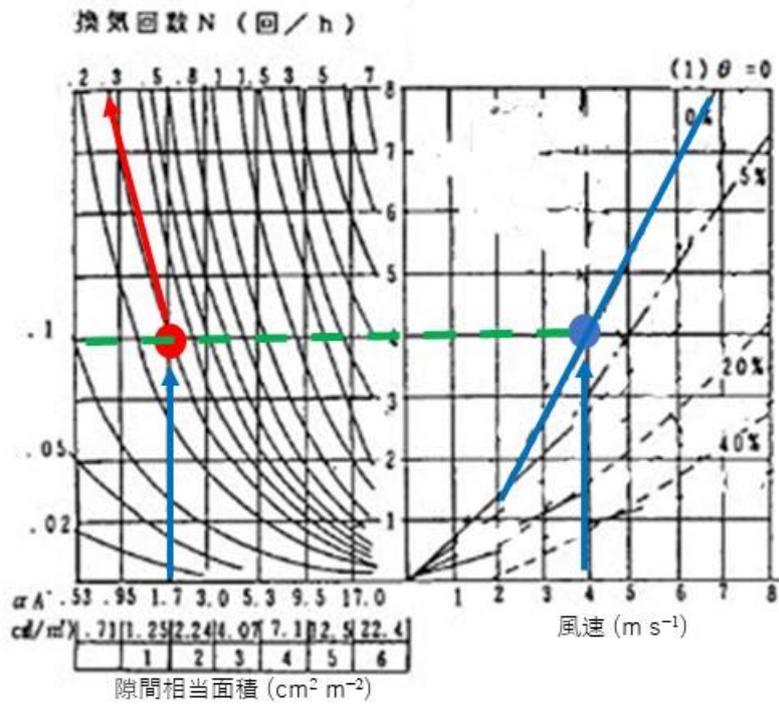


図 2.13 隙間相当面積と自然換気率の関係（本文中では、赤林の関係図と表記）。自然換気率と換気回数は同義。右側の値はグロス建蔽率を表している（引用：赤林他, 1994）。

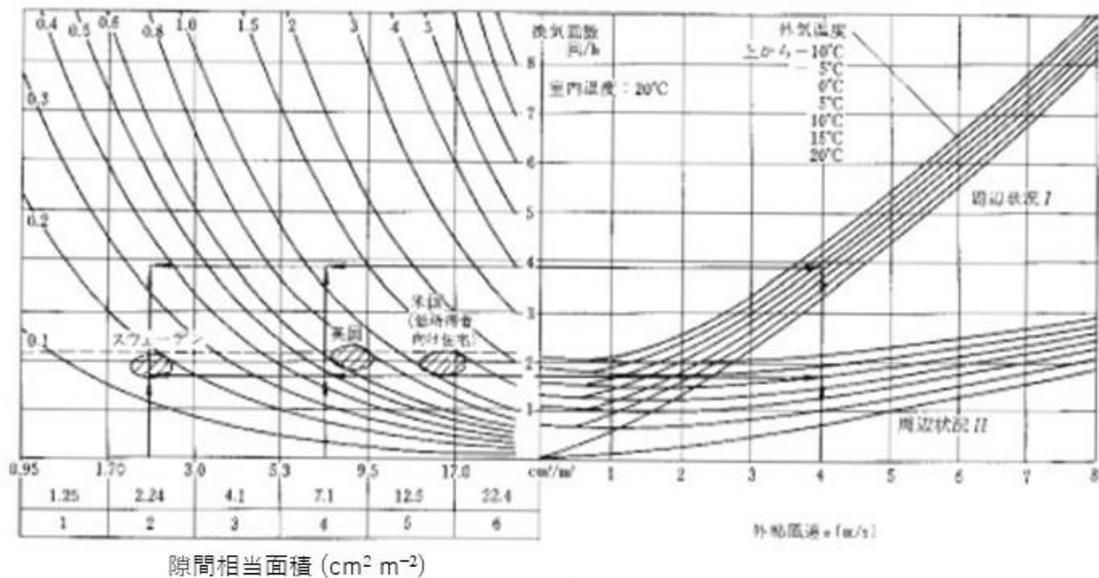


図 2.14 隙間相当面積と自然換気率の関係（本文中では、吉野の関係図と表記）。自然換気率と換気回数は同義。周辺状況 I は風上側に障害物がない場合、周辺状況 II は周囲に建物が立て込んでいる場合（引用：吉野他, 1984）。

表 2.3 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 (m s ⁻¹)							
	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 2.4 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 ² m ⁻²)	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

(8) 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。

コンパートメントモデルを用いて屋内の放射能濃度 C_I は次式で表される。

$$\frac{dC_I}{dt} = P_e \lambda_e C_o(t) - (\lambda_e(t) + \lambda_d + \lambda + P_c \lambda_c) \cdot C_I \quad (2.11)$$

$C_o(t)$: 時刻 t における屋外の放射能濃度 (Bq m⁻³)

$\lambda_e(t)$: 時刻 t における自然換気率 (h⁻¹)

λ_d : 屋内での沈着率 (h⁻¹)

λ : 壊変定数 (h⁻¹)

P_e : 浸透率 (-)

P_c : 空気清浄機の除去率 (-)

λ_c : 空気清浄機の循環率 (h⁻¹)

である。平成 31 年度事業までは、自然換気率とプルーム通過時の屋外の放射能濃度は一定値を使用していた。しかしながら、実際の環境場では、一定値になることはほとんどないため、これらのパラメータが時間変化した場合の被ばく低減係数も求められるようにコードを改良した。

風速とプルーム通過時の屋外の放射能濃度が一定である理想的な条件下において、自然換気率も一定とすると、屋内の放射能積分値 $S_{i,m}(t)$ と屋外の放射能積分値 $S_{i,out}(t)$ は以下の手順で計算され

る。

式 (2.11) の解析解は

$$C_I = \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}} [1 - \exp(-\lambda_{out}t)] \quad (\text{プルーム通過時 : } 0 \leq t \leq T_1) \quad (2.12)$$

$$C_I = \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}} [1 - \exp(-\lambda_{out}T_1)] \cdot \exp[-\lambda_{out}(t-T_1)] \quad (\text{プルーム通過後 : } T_1 \leq t) \quad (2.13)$$

$$\lambda_{in} = P_e \lambda_e \quad (2.14)$$

$$\lambda_{out} = \lambda_e + \lambda_d + \lambda + P_c \lambda_c \quad (2.15)$$

と表せる。ここで、 $t=0$ はプルーム通過開始時刻及び屋内退避開始時刻、 T_1 はプルーム通過継続時間 (h) である。プルーム通過時の屋内の積算放射能濃度 S_1 (式 (2.12) を時間 0 から T_1 まで積分した値) は

$$S_1 = \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}} \left[T_1 - \frac{1}{\lambda_{out}} (1 - \exp(-\lambda_{out}T_1)) \right] \quad (2.16)$$

と表せ、プルーム通過後の屋内の積算放射能濃度 $S_2(t)$ (式 (2.13) を時間 T_1 から t まで積分した値) は

$$S_2(t) = \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}^2} [1 - \exp(-\lambda_{out}T_1)] [1 - \exp(-\lambda_{out}(t - T_1))] \quad (2.17)$$

と表せる。式 (2.16) と式 (2.17) の和より、プルーム通過による屋内の積算放射能濃度 $S_m(t)$ は次式で表せる。

$$S_{in}(t) = S_1 + S_2(t) = \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}} T_1 + \frac{\lambda_{in} \cdot C_0}{\lambda_{out}^2} [\exp(-\lambda_{out}t) - \exp(-\lambda_{out}(t - T_1))] \quad (2.18)$$

プルーム通過時の屋外の積算放射能濃度 S_{out} は、

$$S_{out} = C_0 T_1 \quad (2.19)$$

と表される。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_2 の沈着率は自然換気率との従属関係がラボ実験 (図 2.7 と図 2.10) 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と I_2 の沈着率を求めた。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。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 (2.8) に入力して、被ばく低減係数を求めた。

各パラメータの頻度分布と取り得る範囲の情報を 2.2.2 にまとめる。

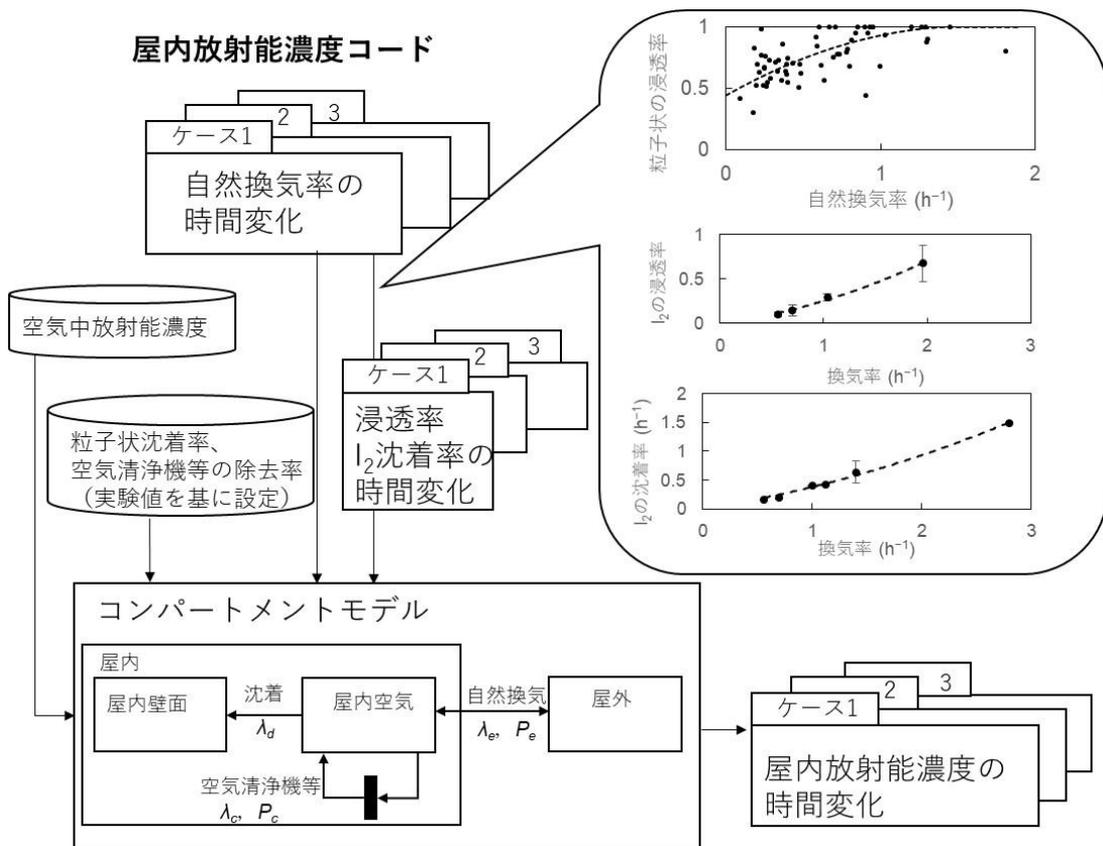


図 2.15 屋内放射能濃度計算コードの概要

2.2.2 入力値

(9) 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 10m⁵）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⁻¹ 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⁻¹、御前崎と敦賀での風速の中央値は約 4 m s⁻¹、唐津、浪江、六ヶ所での風速の中央値は約 1 m s⁻¹ であった。図 2.16 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的の風速の頻度分布をそれぞれ示す。

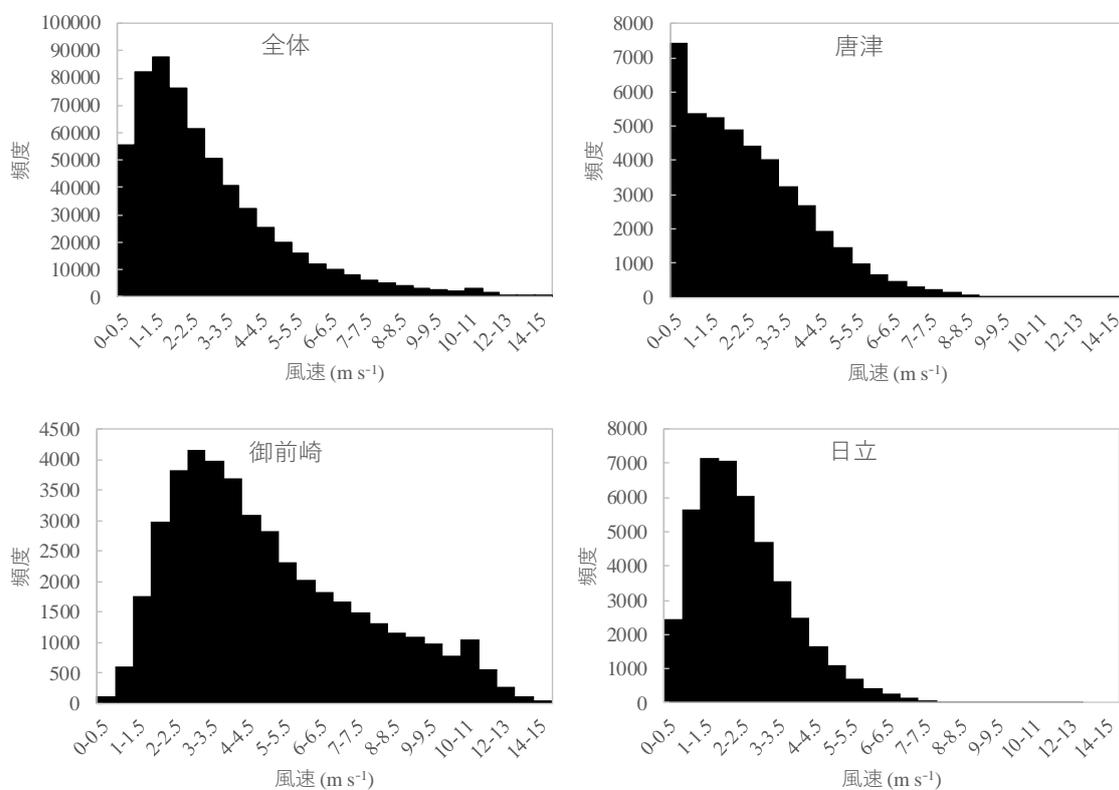


図 2.16 1 時間平均風速の頻度分布

⁵ 赤林の関係図の風速は地上高さ 10m 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。

(10) 建蔽率

平成 31 年度事業で、Google map を用いて東海村の戸建住宅（770 軒）を対象に建蔽率⁶を調査した。求めた建蔽率の頻度分布を図 2.17 に示す。建蔽率の頻度分布はガウス分布に近い形をとり、対象とした家屋の建蔽率の平均値は約 15%であった。

図 2.18 に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 2.18 を見ると、人口密度が 1000 人 km^{-2} 以下では建蔽率の平均値は 10%程度、人口密度が 4000 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。

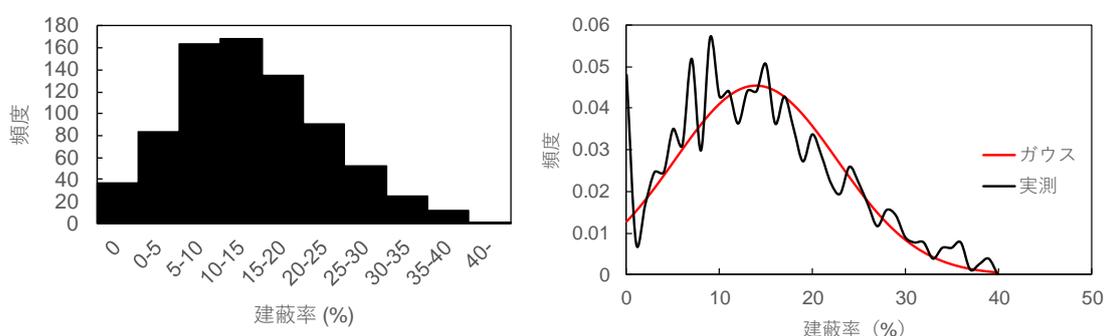


図 2.17 東海村での建蔽率の頻度分布。右図は建蔽率の頻度分布をガウス分布で近似した場合。

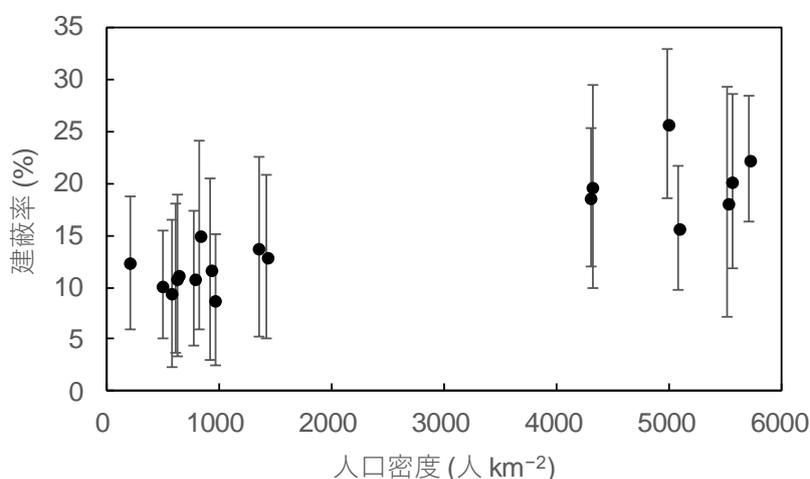


図 2.18 東海村の各地区での建蔽率と人口密度の関係。建蔽率は各地区での平均値と標準偏差を示す。

⁶ 通常、建蔽率は建物が建てられている土地の面積に対する建物の面積である。本事業では赤林の関係図で使用されている建蔽率の意味と合わせるため、道路等も含めた周辺地域の面積に対する建物の面積とした。

(11) 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。建築年ごとの隙間相当面積を図 2.19 に示す。戸建住宅、集合住宅ともに隙間相当面積は年々小さくなっていった。1990 年以前の家屋では集合住宅の方が、戸建住宅よりも隙間相当面積が小さい傾向であったものの、1990 年以降は戸建住宅と集合住宅の隙間相当面積は概ね等しかった。戸建住宅に関して、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。本事業では戸建住宅⁷を対象とし、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 2.20 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 2.21 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。

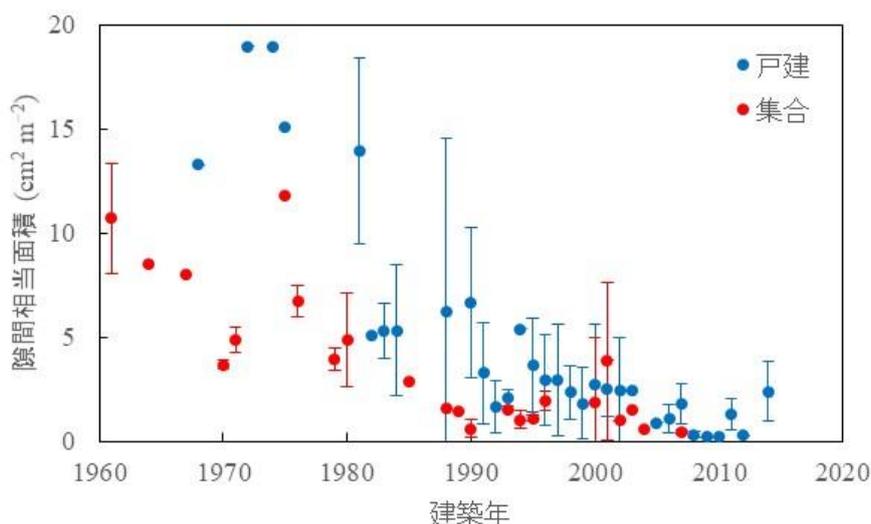


図 2.19 隙間相当面積の建築年の関係。隙間相当面積は各年の平均値と標準偏差を示す。

⁷ 本事業では自然換気率を求めるために赤林の関係図を使用している。この関係図を用いて集合住宅の自然換気率を求めることはできない。

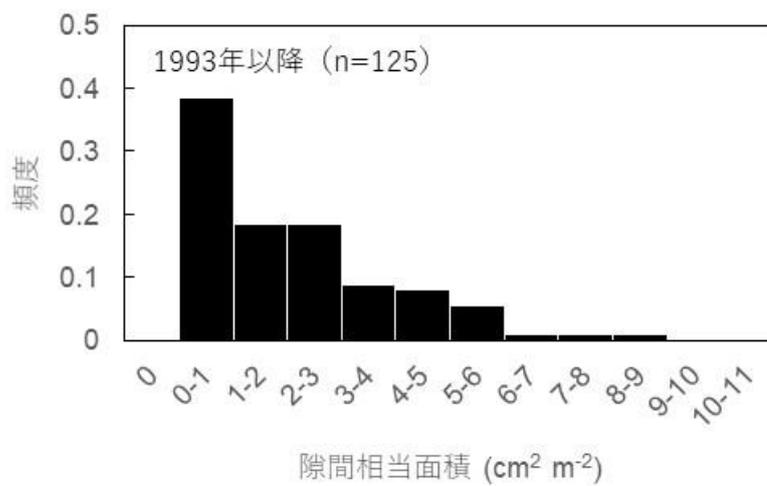
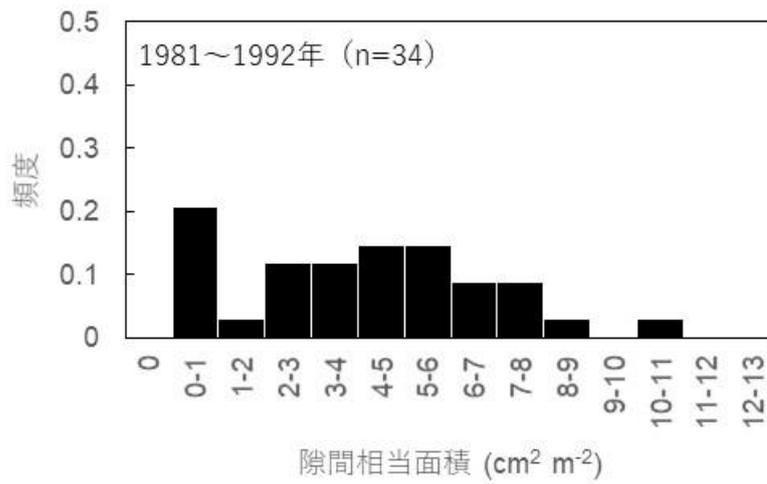
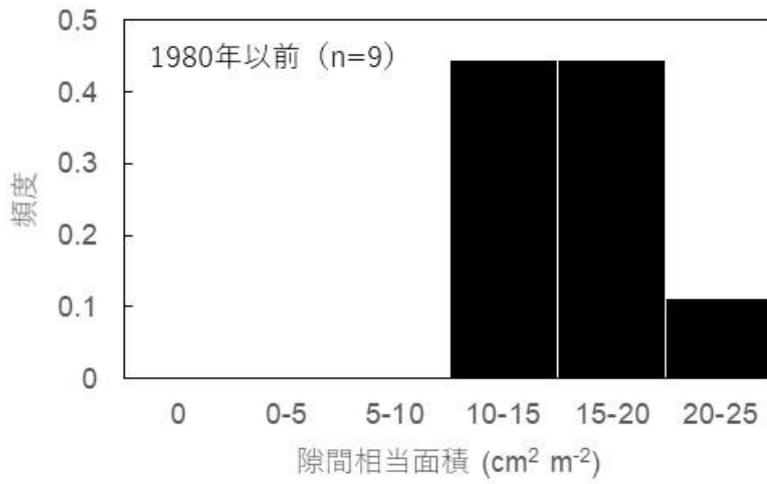


図 2.20 戸建住宅の隙間相当面積の頻度分布。n はサンプル数。

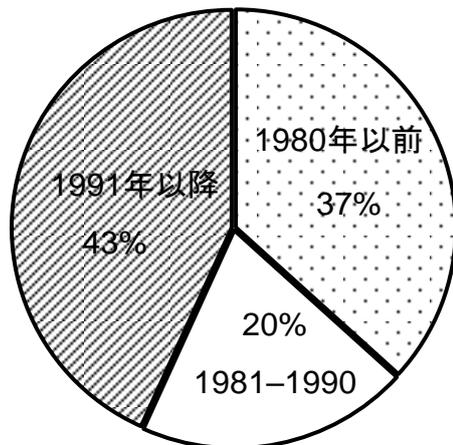


図 2.21 原子力発電所立地県での木造戸建住宅の建築年の割合（統計局, 2013）

(12) 屋内での沈着率

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⁸。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い。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、沈着率は粒子状ヨウ素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; Schmel, 1980; Roed, 1988, 1990; EPA, 1978)。今年度までの事業では、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 2.22 に、沈着率と自然換気率の関係を図 2.23 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 2.23 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 2.24 に示す。実験方法等の詳細は 2.1 節に示す。図 2.24 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。本事業では自然換気率と I_2 の沈着率の近似式を利用して被ばく低減係数の解析を行った。

⁸ 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)。

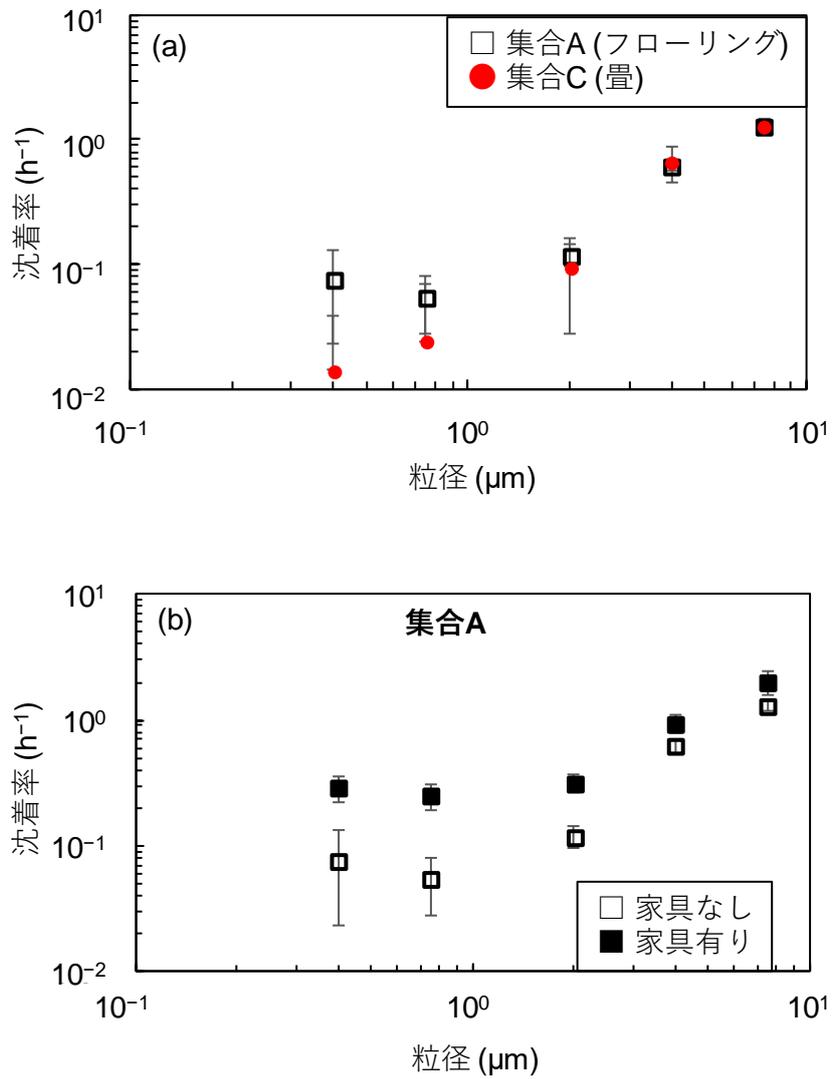


図 2.22 粒子状物質の粒径ごとの沈着率 (1/2)。沈着率は全実験の平均値と標準偏差を示す。(a) 床材の違い、(b) 家具の有無による違い、(c) 部屋の大きさによる違い、(d) 戸建住宅での結果。

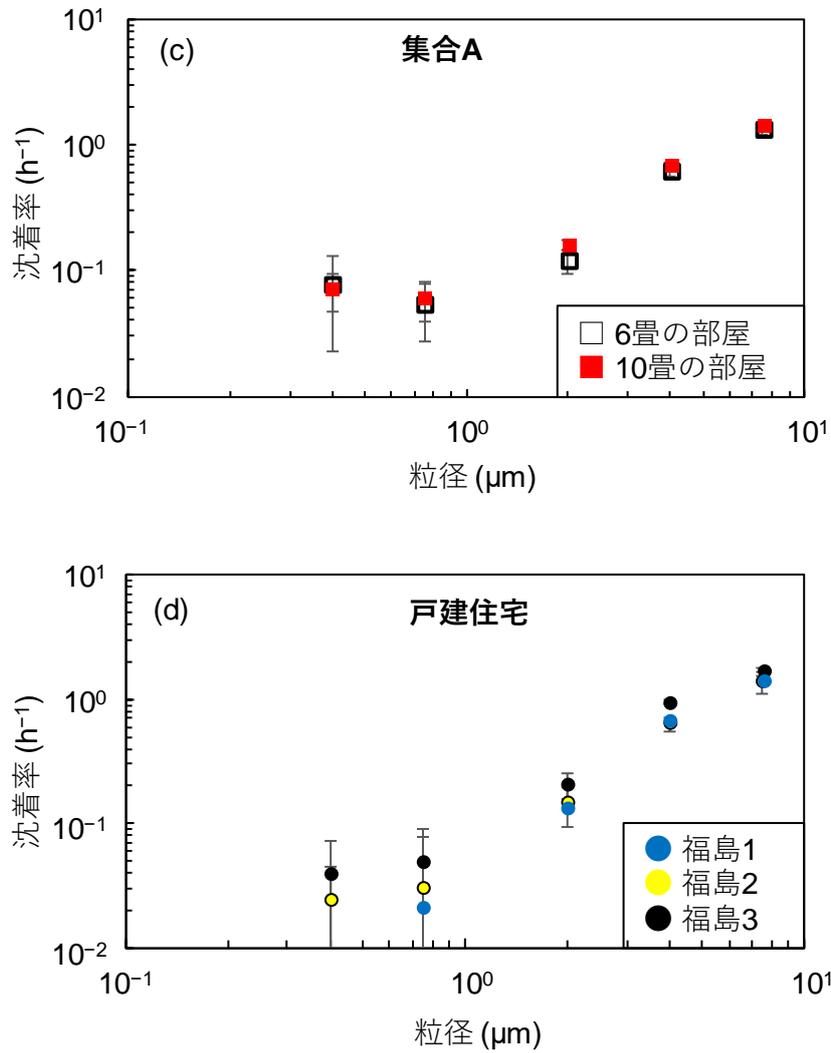


図 2.22 粒子状物質の粒径ごとの沈着率 (2/2)。沈着率は全実験の平均値と標準偏差を示す。(a) 床材の違い、(b) 家具の有無による違い、(c) 部屋の大きさによる違い、(d) 戸建住宅での結果。

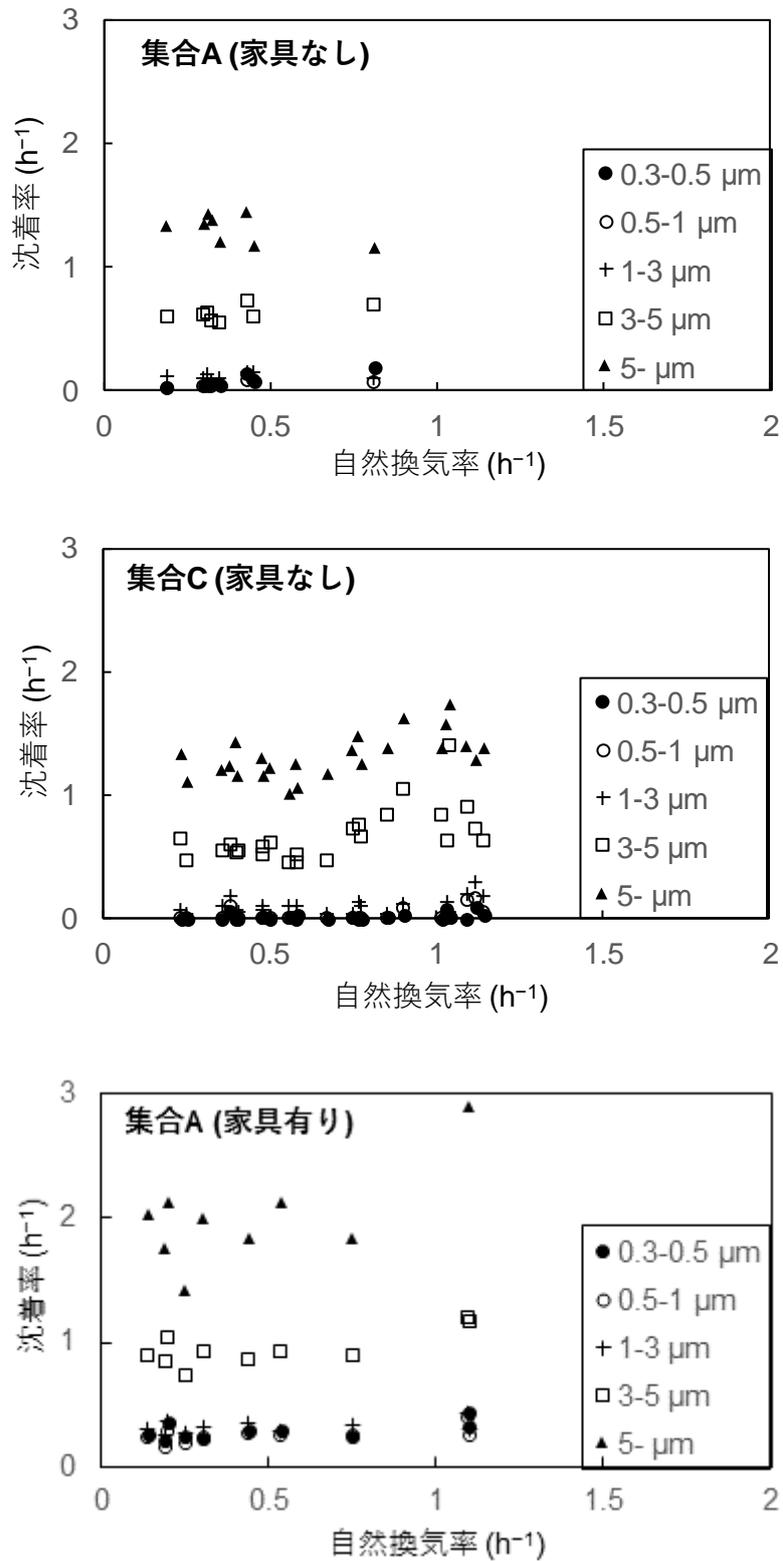


図 2.23 粒子状物質の沈着率と自然換気率の関係。実験毎にプロットしたもの。

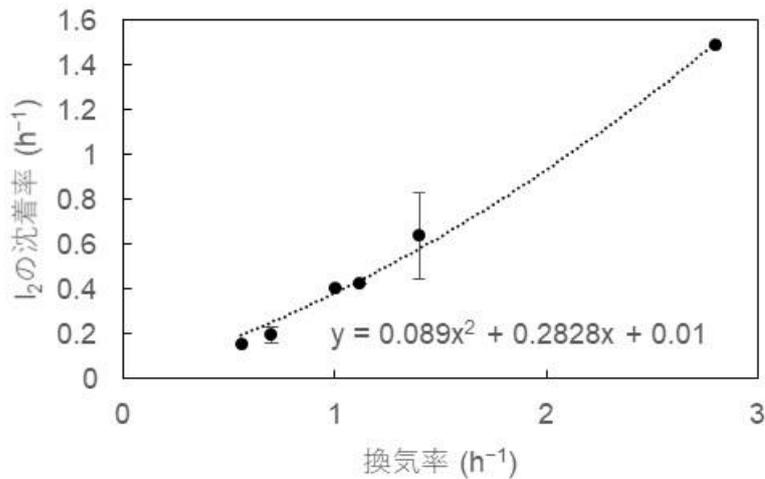


図 2.24 実家屋相当の I₂ の沈着率と自然換気率の関係

(13) 浸透率

今年度までの事業では、実家屋実験で粒子状物質の浸透率、ラボ実験で I₂ 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 2.25 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⁻¹ 以上では浸透率が概ね 1 であり、1 h⁻¹ 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、以下の近似式を利用して被ばく低減係数の解析を行った。

$$\begin{aligned}
 P &= -0.2277\lambda_e^2 + 0.719\lambda_e + 0.442 \quad (\lambda_e < 1.4) \\
 \lambda_e &= 1 \quad (\lambda_e \geq 1.4)
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

P : 粒子状物質の浸透率
 λ_e : 自然換気率 (h⁻¹)

I₂ の浸透率と自然換気率の関係を図 2.26 に示す。実験方法等の詳細は 2.1 節に示す。I₂ 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、自然換気率と I₂ の浸透率の近似式を利用して被ばく低減係数の解析を行った。

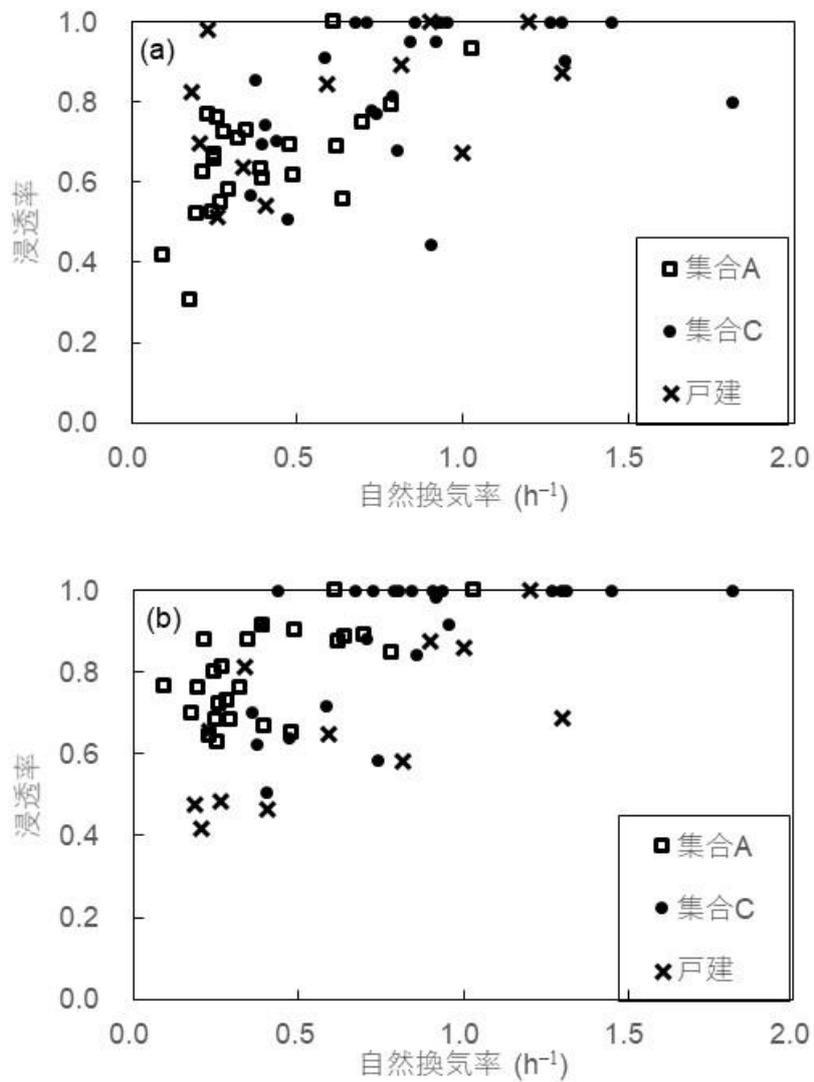


図 2. 25 ラボ実験と実家屋実験で得られた粒子状物質の浸透率と自然換気率の関係の比較。(a) 粒径 0.3~0.5 μm 、(b) 粒径 0.5~1 μm 。

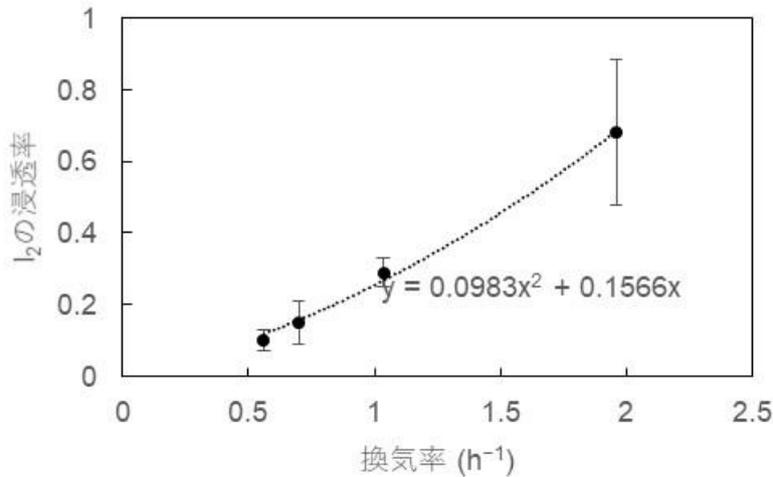


図 2.26 ラボ実験で得られた I₂ の浸透率と自然換気率の関係。自然換気率 2.5 h⁻¹ 以上では、浸透率は 1 とした。

(14) 化学形態の組成、核種組成

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、線量係数も化学形態、核種によって異なる。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、ヨウ素の化学形態及び核種組成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 (表 2.5)。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 31 年度事業では、ある化学形態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。その結果、下式を用いることで、混合状態時の被ばく低減係数も評価可能であることが示された。

$$R(t) = \frac{xe_G R_G(t) + ye_I R_I(t) + e_P R_P(t)}{xe_G + ye_I + e_P} \quad (2.21)$$

$R(t)$: 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)

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⁻¹)

ここで、 x と y は組成比 (CH₃I : I₂ : 粒子状ヨウ素 = x : y : 1)、添え字の P は粒子状ヨウ素、 I は I₂、 G は CH₃I、 in は屋内、 out は屋外を表す。

表 2.5 放出された ^{131}I の物理・化学形状の組成比 (%)

放出場所	測定場所 測定期間	I_2	HOI	CH_3I	粒子状 ヨウ素	参考文献
ハンフォード	スタック	30-90	-		0-6	Perkins, 1964
	スタックから 5km まで	49-82	-	残りが	10-30	
	スタックから 5-10km	35-48	-	CH_3I か?	5-14	
	スタックから 10km 以上	≈40	-		≈35	
TMI-2	TMI 原子炉補助 建屋	25.1	18.0	29.6	27.3	Bellamy, 1981
チェルノブイ リ	日本 1986/5/6-19	19±9	5±2	70±11	6±3	Noguchi and Murata, 1988
	ワルシャワ 1986/4/27-6/15	20-40	-	0-60	20-60	IAEA, 2012
	プラハ 1986/4/29-5/8	60-80 (ガス状として分類)			20-40	
	スロバキア 1986/5/1-12	20-30	≈0	30-60	20-30	
福島第一	茨城 2016/3/14-16	50 (ガス状として分類)			50	Lebel et al., 2016
	福島第一 2016/3/19-26	60 (ガス状として分類)			40	
	福島第二 2016/3/19-26	15 (ガス状として分類)			85	
	茨城 2016/3/19-26	50 (ガス状として分類)			50	
	福島第一、二 2016/3/29-31	30 (ガス状として分類)			70	
	茨城 2016/3/29-31	70 (ガス状として分類)			30	

2.2.3 風速一定条件下での吸入被ばく低減係数

平成31年事業で、風速一定の条件でシナリオ（風速、建蔽率、隙間相当面積、化学形態の組成比）ごとに被ばく低減係数を評価した（図2.27と図2.28、表2.6～表2.8）。図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）、建蔽率が高い家屋（周辺に建物がよくある家屋）ほど、自然換気率及び浸透率が小さくなり、放射性物質の侵入量が小さくなるため、被ばく低減効果は大きい。一方、風速が大きくなるほど、自然換気率及び浸透率が大きくなるため、被ばく低減効果は小さい。 I_2 は粒子状ヨウ素と比較して浸透率が小さく、沈着率が大きいため、 I_2 の被ばく低減係数は粒子状ヨウ素の半分程度であった。

表2.6～表2.8は一つの化学形態のみが存在する場合の被ばく低減係数である。式(2.21)に示されるように、化学形態が混合した場合の被ばく低減係数は、一つの化学形態のみが存在する場合の被ばく低減係数と各化学形態の存在割合で計算される。そのため、不活性な CH_3I が多く含まれる場合には、被ばく低減効果は小さくなり、粒子状ヨウ素または I_2 が多く含まれる場合には、被ばく低減効果は大きくなり、放出されるヨウ素の化学形態の組成比によって被ばく低減効果は異なる。

平成31年度事業では、被ばく低減係数への感度解析を実施し、各因子の変動・不確かさによる被ばく低減係数への影響の大きさの把握、及び被ばく低減係数に最も影響する因子を調査した。感度解析の結果を図2.29と図2.30に示す。図の横軸(μ)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 μ を0.1とすると、風速が 1ms^{-1} 変化した時に被ばく低減係数が0.1大きくなる）を表しており、 μ が大きいほど感度が高いことを示している。また、図の縦軸(σ)は、両者を同時に変化させた際の被ばく低減係数の変化率のばらつきの大きさを表しており、着目しているパラメータと他のパラメータとの相互作用の強さを表している。なお、高气密住宅では沈着率と浸透率以外のプロットが表記されていなかった。高气密住宅の場合には、風速、建蔽率、隙間相当面積が少し変わっても自然換気率及び被ばく低減係数の変化がなく、 μ が0になったことに起因する。

粒子状物質、 I_2 ともに沈着率と浸透率の感度が大きいことが示されている。粒子状物質の場合、沈着率と浸透率の実験による不確かさはそれぞれ最大で0.2と0.5であった。沈着率と浸透率の μ はそれぞれ約1と0.7であるため、沈着率と浸透率の不確かさによる被ばく低減係数への影響の大きさは最大でそれぞれ約0.2と0.35となる。 I_2 の場合、沈着率と浸透率の実験による不確かさはそれぞれ最大で0.5と0.3であった。沈着率と浸透率の μ はそれぞれ約0.1と0.5であるため、沈着率と浸透率の不確かさによる被ばく低減係数への影響の大きさは最大でそれぞれ約0.05と0.15となる。なお、沈着率が現状の設定値よりも大きくなった場合、甲状腺等価線量と被ばく低減係数はより小さく計算され、浸透率が現状の設定値よりも大きくなった場合、甲状腺等価線量と被ばく低減係数はより大きく計算される。

各因子の変動による被ばく線量と被ばく低減係数の変動傾向を表2.9にまとめた。

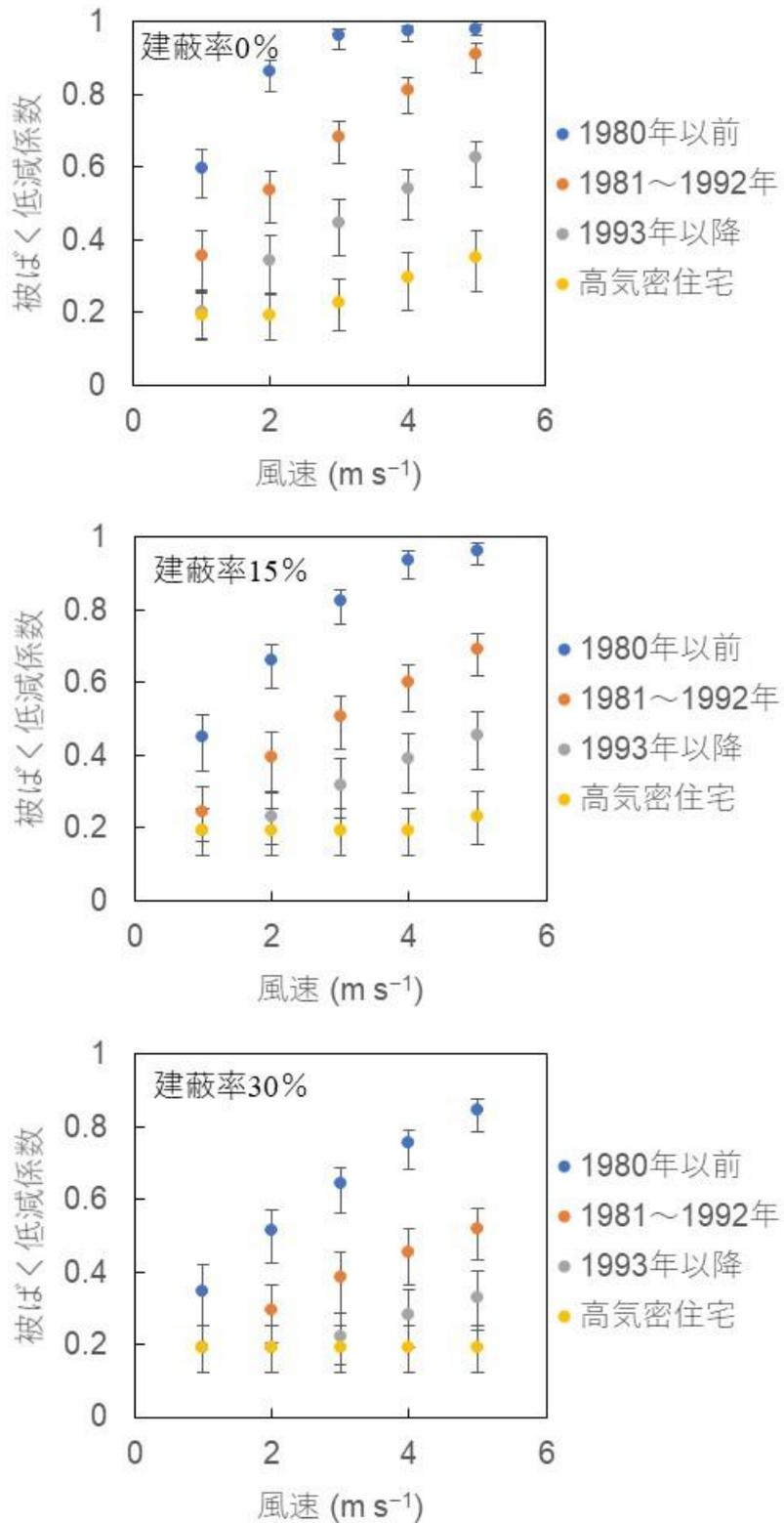


図 2.27 粒子状ヨウ素のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後）。5 パーセンタイル値、中央値、95 パーセンタイル値を表示。

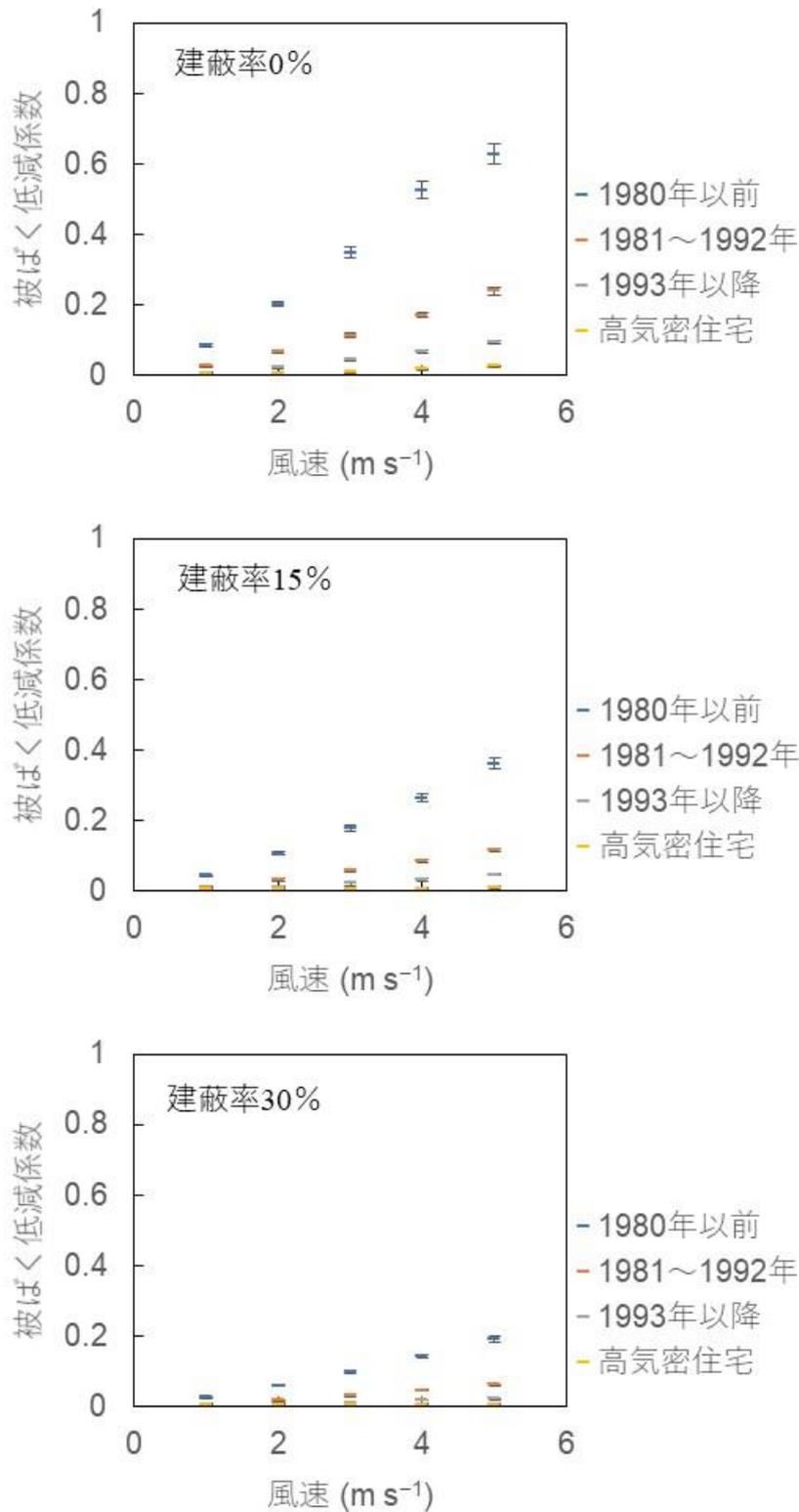


図 2.28 I₂のみの被ばく低減係数（甲状腺等価線量の比、プルーム通過から 24 時間後）。5 パーセンタイル値、中央値、95 パーセンタイル値を表示。

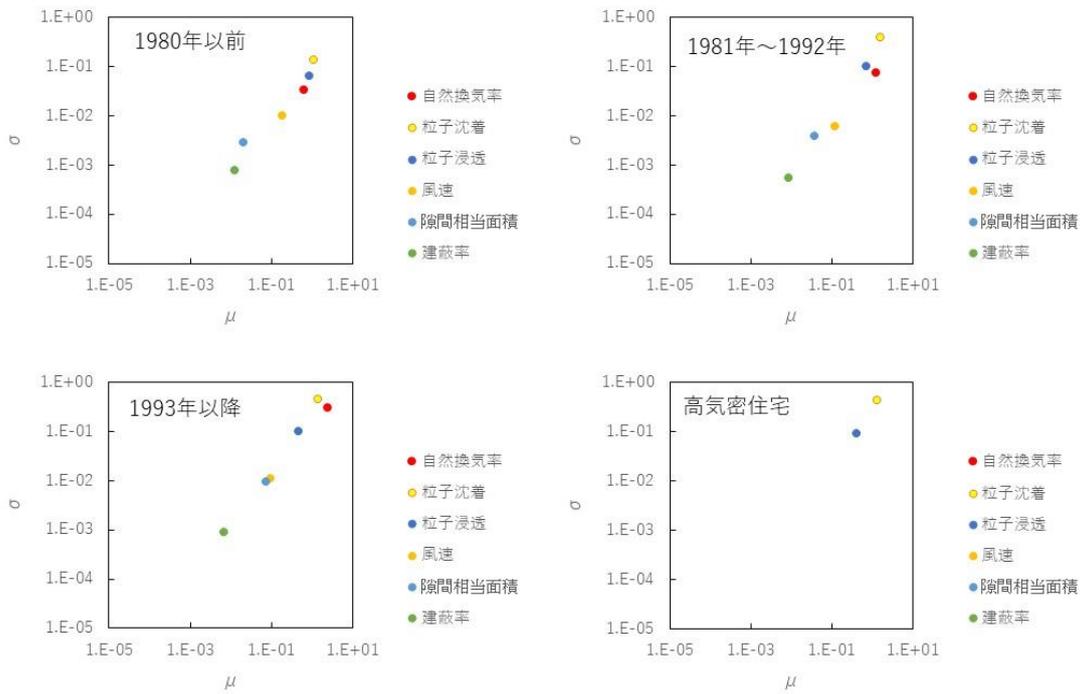


図 2.29 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速 2 ms^{-1} 、建蔽率 15%、粒子状ヨウ素のみ。

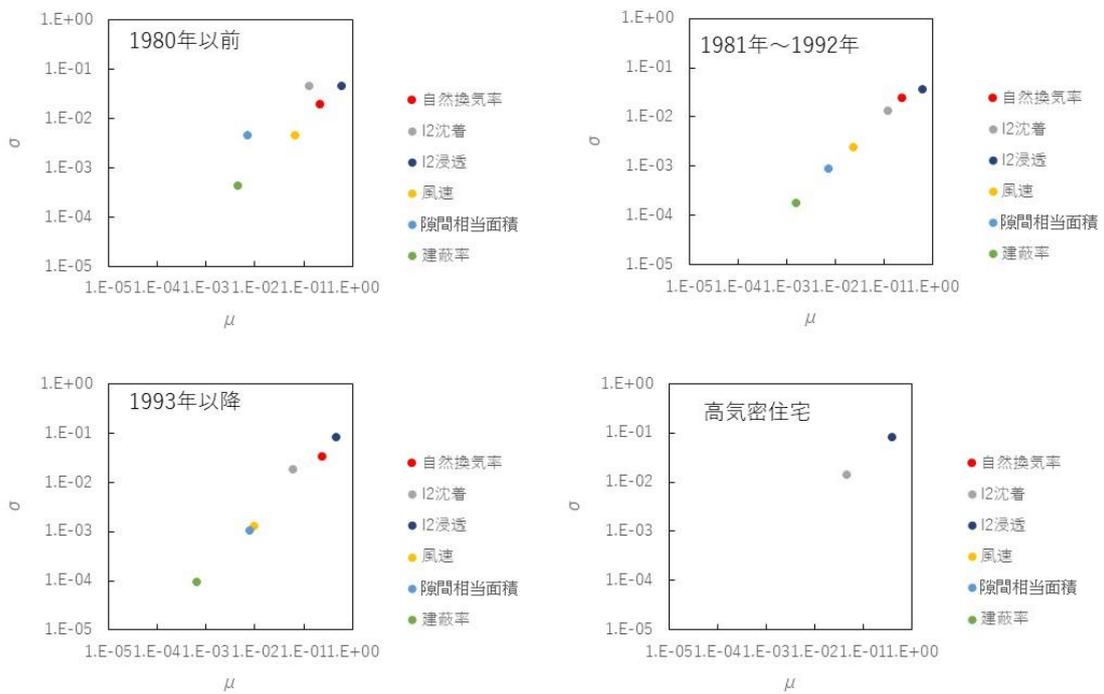


図 2.30 吸入被ばく低減係数への感度解析結果。風速 2 ms^{-1} 、建蔽率 15%、 I_2 のみ。

表 2.6 粒子状ヨウ素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	0.60 (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 (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 (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 2.7 I₂ 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 (m s ⁻¹)		
		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 ⁻¹)		
		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 ⁻¹)		
		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 2.8 CH₃I 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%		風速 (m s ⁻¹)		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	1.00	1.00	1.00
	1981～1992 年	0.96	1.00	1.00
	1993 年以降	0.71	0.95	1.00
高気密住宅		0.70	0.70	0.96
建蔽率 15%		風速 (m s ⁻¹)		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	1.00	1.00	1.00
	1981～1992 年	0.81	0.98	1.00
	1993 年以降	0.70	0.78	1.00
高気密住宅		0.70	0.70	0.79
建蔽率 30%		風速 (m s ⁻¹)		
		1	2	5
建築年	1980 年以前	0.95	1.00	1.00
	1981～1992 年	0.70	0.90	1.00
	1993 年以降	0.70	0.70	0.94
高気密住宅		0.70	0.70	0.70

表 2.9 各変動因子が増加した場合の被ばく線量と被ばく低減係数の傾向

因子	因子による影響	被ばく低減係数
自然換気率	自然換気率が大きくなると外気の室内への流入量が増えるため被ばく低減効果は小さくなる（すなわち、被ばく低減係数は増加する）。自然換気率は、相当隙間面積と隙間に加わる風圧（すなわち、風速）とともに大きくなり、周囲に建物がある場合には風速が小さくなるので建蔽率が大きくなると小さくなる。	増加
沈着率	室内の表面への沈着率が大きくなると、室内の空気中濃度は低くなるので、被ばく低減効果は高くなる（すなわち、被ばく低減係数は低下する）。	低下
浸透率	室外から室内へ侵入する割合（浸透率）が大きくなると、室内の空気中濃度は高くなるため、被ばく低減効果は低くなる（すなわち、被ばく低減係数は増加する）。	増加

2.2.4 風速変動による吸入被ばく低減係数への影響

ここでは、実際の環境下での低減効果と理想的な環境条件下で求めた低減効果との違いを調査する。実際の環境で測定された風速の時間変化を利用して、自然換気率の時間変化を求め、その自然換気率を用いて吸入被ばく低減係数を求めたものと、プルーム通過時の風速が 48 時間一定であると仮定した場合の被ばく低減係数を求めたものを比較した。

(15) 入力パラメータの一覧

本事業では、建蔽率と隙間相当面積を場合分けして解析を行う。各パラメータの分布形を考慮して場合分けを行った (表 2.10)。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。

風速は、日立で観測された 2011 年～2015 年のデータから、連続した 2 日間分をランダムに 100 ケース分抜き出した。

表 2.10 入力値一覧。

パラメータ	使用した値
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%
風速	日立で観測されたアメダスデータ (2011 年～2015 年) から、連続した 2 日間分をランダムに 100 ケース抜き出した。
粒子状物質の沈着率	0.1 h^{-1}
I_2 の沈着率	図 2.24 の関係式を用いて算出。
粒子状物質の浸透率	関係式 (2.20) を用いて算出。
I_2 の浸透率	図 2.26 の関係式を用いて算出。
屋外放射能	I-131 のみ (粒子状物質のみ、 I_2 のみ、 CH_3I のみ)、プルーム通過時間 : 1 時間、濃度 : プルーム通過中は常に 1 Bq m^{-3}

(16) 被ばく低減係数の解析

実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比（実環境/理想環境）を図 2.31～図 2.39 に示す。理想的な環境下で求めた被ばく低減係数は、プルーム通過時の風速が 48 時間一定であると仮定した場合である。図の横軸はプルーム通過中の自然換気率とプルーム通過終了後 4 時間の平均自然換気率の比（プルーム通過中/プルーム通過後）である。プルーム通過中の自然換気率がプルーム通過後の自然換気率よりも大きいほど、実環境下で求めた被ばく低減効果が小さくなることが示されている。傾きは最大で 1 であり、化学形態別にみると、 CH_3I が最も大きく、 I_2 、粒子状物質の順に小さくなった。

プルーム通過後の自然換気率がプルーム通過中の自然換気率よりも小さい場合、屋内に侵入した放射能はプルーム通過後に屋外に放出されにくく、放射能を吸入する時間が長くなる。一方で、プルーム通過後の自然換気率がプルーム通過中の自然換気率よりも大きい場合、屋内に侵入した放射能はプルーム通過後に屋外に放出されやすく、放射能を吸入する時間が短くなる。その結果、自然換気率比（プルーム通過中/プルーム通過後）が大きいほど、実環境下で求めた被ばく低減効果は理想環境下で求めた被ばく低減効果よりも小さくなった。

対象が不活性なガス状物質（ CH_3I ）の場合、屋内の放射能濃度の時間変化は自然換気率のみに依存する。プルーム通過後の自然換気率が 2 倍になった場合、屋内の放射能濃度は 2 倍早く減少し、プルーム通過後に吸入する積算放射能は半分となり、被ばく低減係数は約半分となる。その結果、自然換気率比と被ばく低減係数比の傾きは概ね 1 であったと考えられる。

対象が I_2 の場合、屋内の放射能濃度の時間変化は自然換気率、浸透率、沈着率に依存する。ラボ実験結果から、浸透率と沈着率は自然換気率と概ね線形関係であったため、不活性なガス状物質と同様に、自然換気率比と被ばく低減係数比の傾きは約 1 であったことが考えられる。ただし、浸透率は 0～1 までの値しかとらず、浸透率が 1 付近になった場合には、自然換気率の増加分に比べて、被ばく低減係数の増加分が小さくなる。その結果、不活性なガス状物質よりも I_2 の傾きが小さくなったと考えられる。

対象が粒子状物質の場合、屋内の放射能濃度の時間変化は自然換気率、浸透率、沈着率に依存する。実家屋実験結果から、浸透率と自然換気率の関係は上に凸の 2 次関数であった。また、粒子状物質の浸透率は I_2 の浸透率よりも取り得る範囲が狭かった。その結果、自然換気率が 2 倍増加しても、浸透率は 2 倍よりも小さい値しか増加せず、被ばく低減係数の増加分が小さくなったと考えられる。その結果、粒子状物質は他の化学形態に比べて傾きが小さくなったと考えられる。

今回対象とした風速データでは、プルーム通過中と通過後の自然換気率の比が 0.5～2 の範囲に集中した。プルーム通過前後の自然換気率の比が 2 以上のケースを調査するため、プルーム通過中と通過後の風速を仮想的に変化させた場合（仮想条件下）を解析した。解析したプルーム通過中と通過後の風速の一覧を表 2.11 に示す。表 2.11 に示されるように、プルーム通過中と通過後の風速の比が同じであっても、風速の値が異なる場合に被ばく低減係数の比が異なるかも合わせて調査した。

表 2.11 の仮想条件下で求めた被ばく低減係数と理想環境下で求めた被ばく低減係数の比を図 2.40～図 2.48 に示す。実環境下で計算したもの（図 2.31～図 2.39）と比較すると、傾きは概ね一致していた。図 2.40～図 2.48 に示されるように、新しい家屋では被ばく低減係数比と自然換気率比は一つの直線で表されるものの、古い家屋では被ばく低減係数比と自然換気率比の傾きにばらつきが見られた。

古い家屋で傾きが大きいケースを抜き出した場合、プルーム通過中の自然換気率が低い（風速

が小さい) 傾向が見られた。一方、傾きが小さいケースを抜き出した場合、プルーム通過中の自然換気率が大きい(風速が大きい) 傾向が見られた。一般的に、プルーム通過中の自然換気率が大きいほど、プルーム通過終了直後の屋内濃度は高くなる。しかし、プルーム通過中の換気率が 3 h^{-1} 以上の場合、1 時間以内で屋内濃度が屋外濃度と等しくなる。そのため、自然換気率が 3 h^{-1} 以上の場合には、プルーム通過終了直後の屋内濃度は換気率に依存せずに屋外濃度と等値となる。その結果、プルーム通過前後の換気率比が同じであっても、プルーム通過中の自然換気率が大きいほど、屋内での積算放射能濃度の変動幅が小さくなり、傾きが小さくなったと考えられる。

本解析より、プルーム通過中と通過後 4 時間の自然換気率の比を用いることで、風速一定条件下で求めた被ばく低減係数を風速が変動している場合の被ばく低減係数に補正することが概ね可能であることが示された。また、風速一定条件下で求めた被ばく低減係数と実環境で測定された風速条件下で求めた被ばく低減係数の比は、 CH_3I と I_2 の場合には概ね $1/2\sim 2$ 、粒子状物質の場合には概ね $1/1.5\sim 1.5$ の範囲内であることが示された。

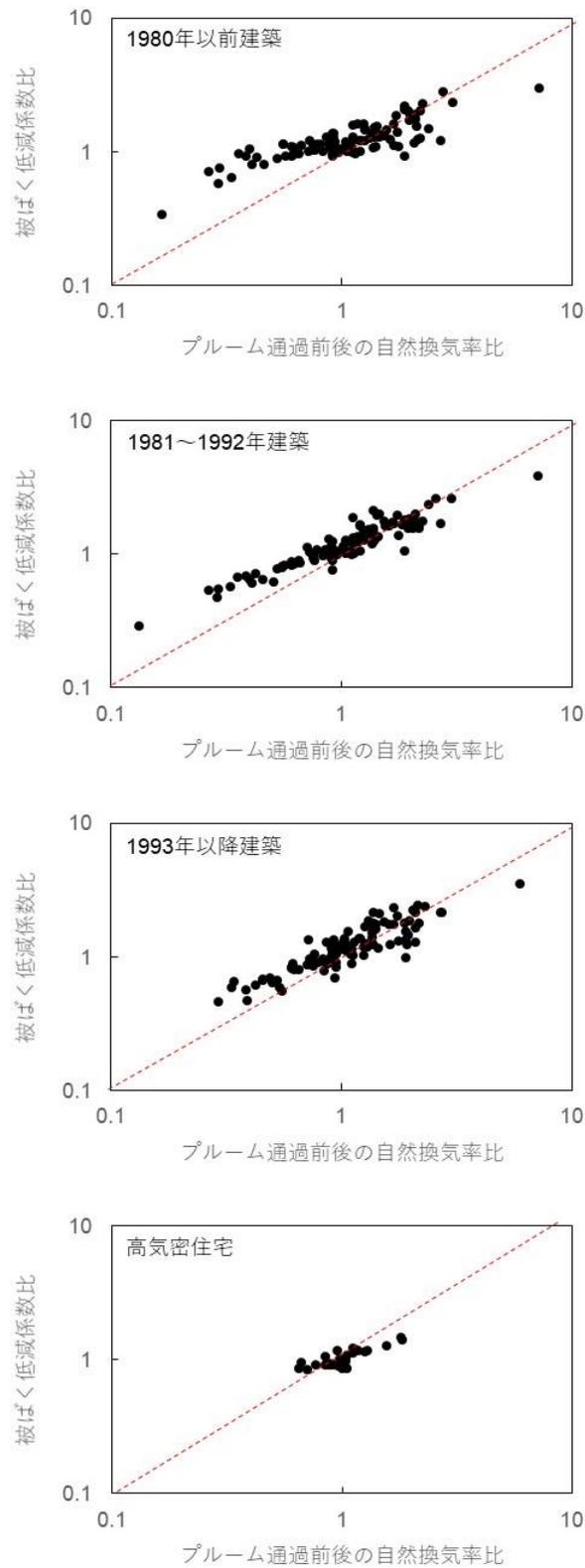


図 2.31 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 0%、CH₃I)

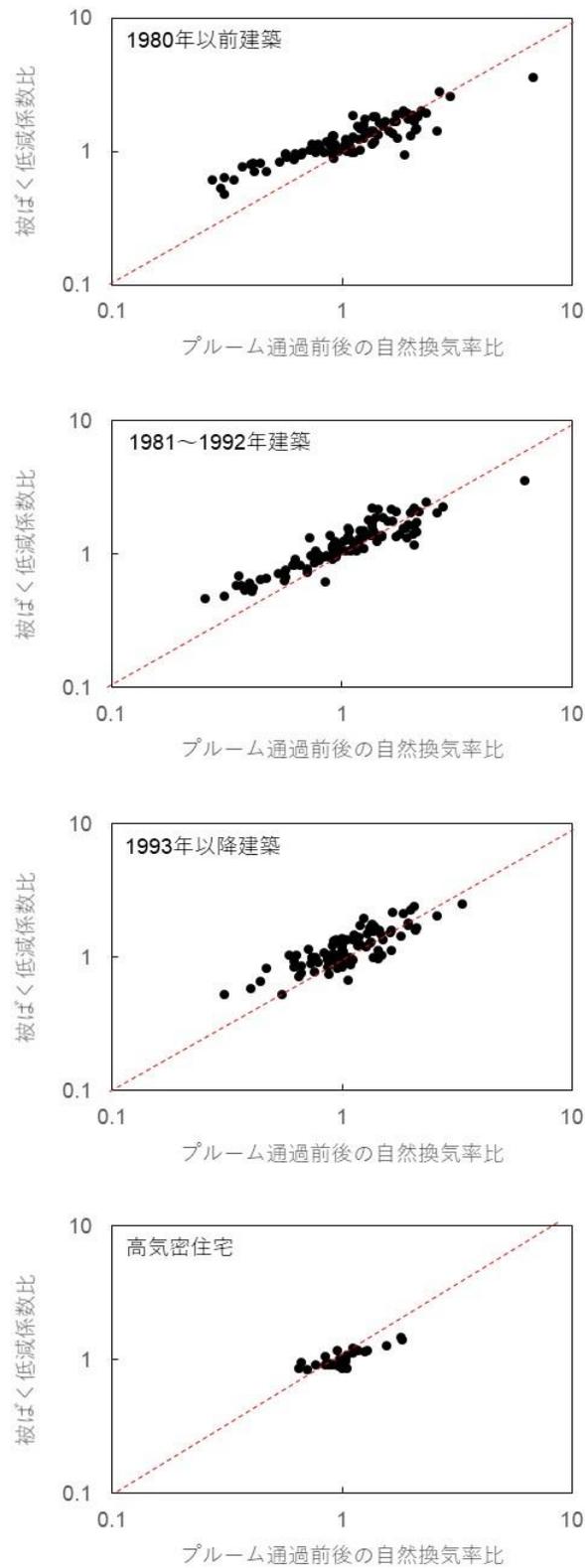


図 2.32 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 15%、CH₃I)

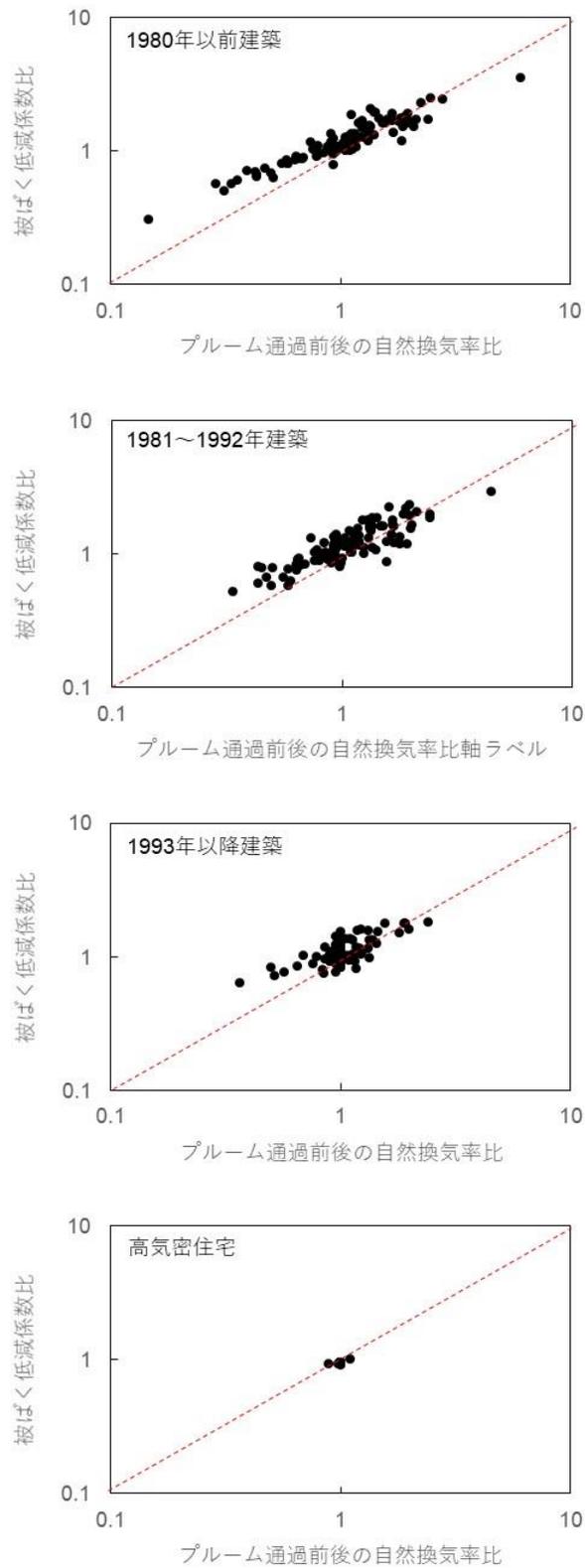


図 2.33 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 30%、CH₃I)

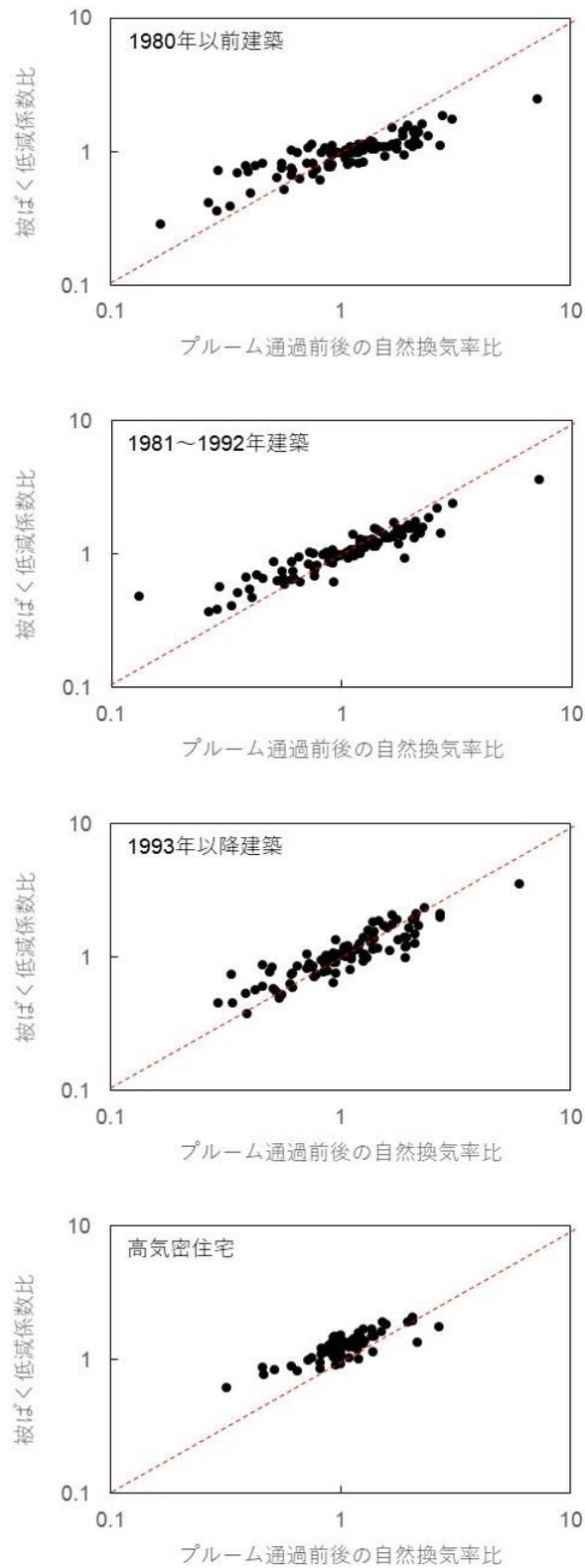


図 2.34 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比
(実環境/理想環境) (建蔽率 0%、 I_2)

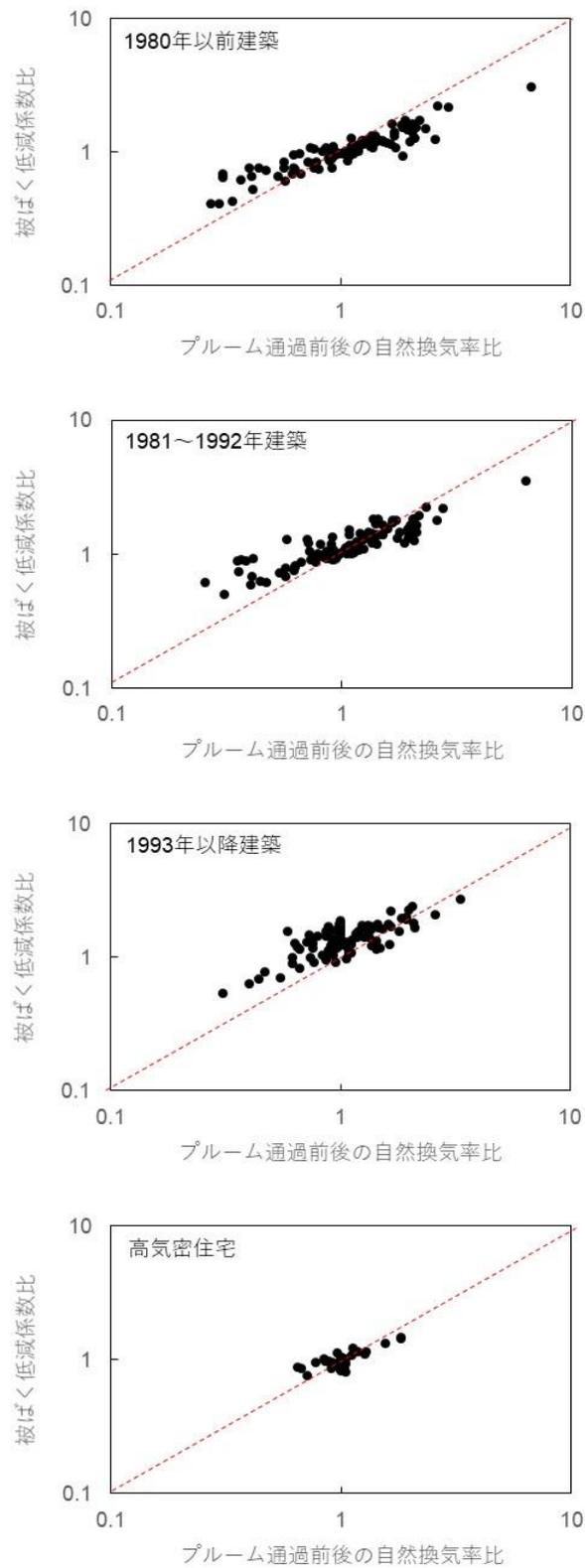


図 2.35 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 15%、 I_2)

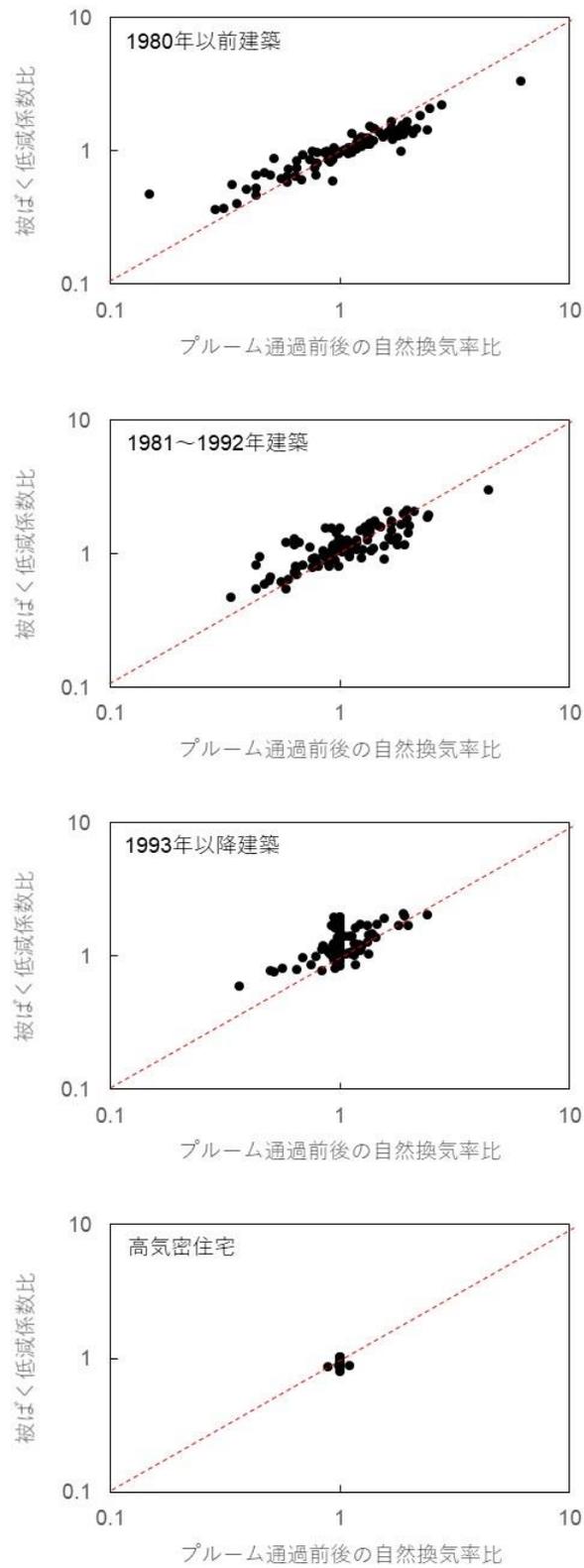


図 2.36 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 30%、 I_2)

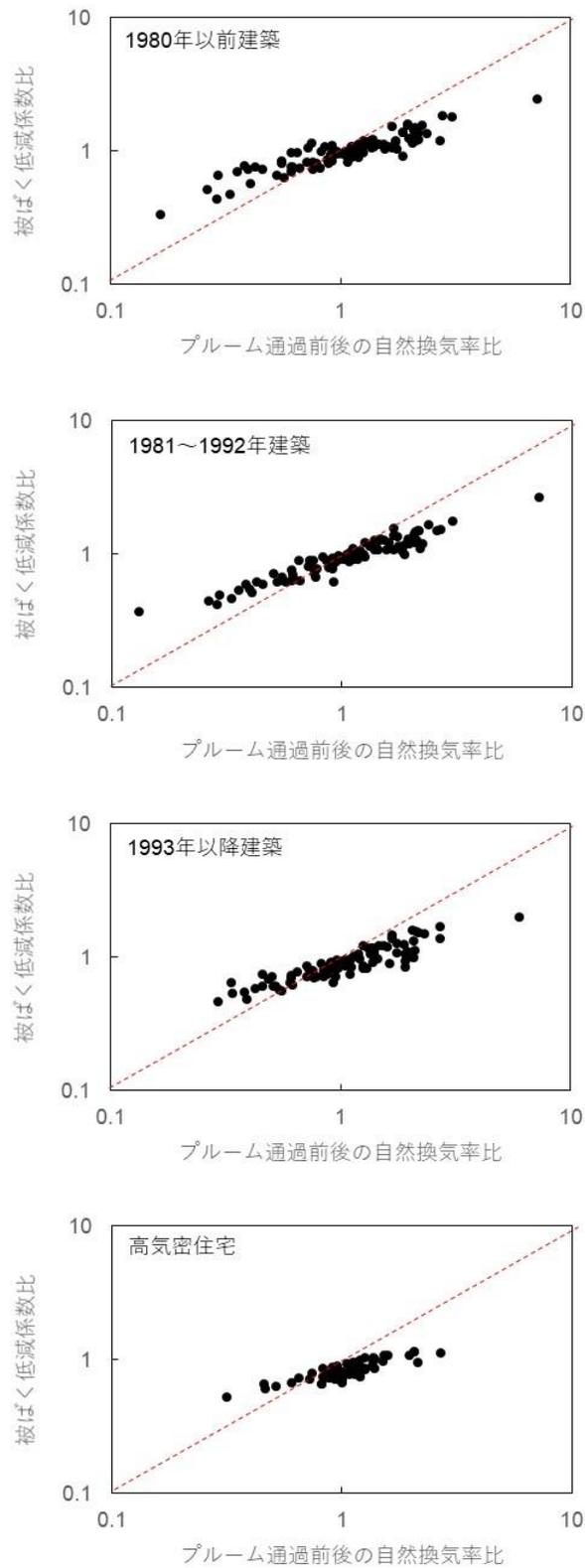


図 2.37 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 0%、粒子状物質)

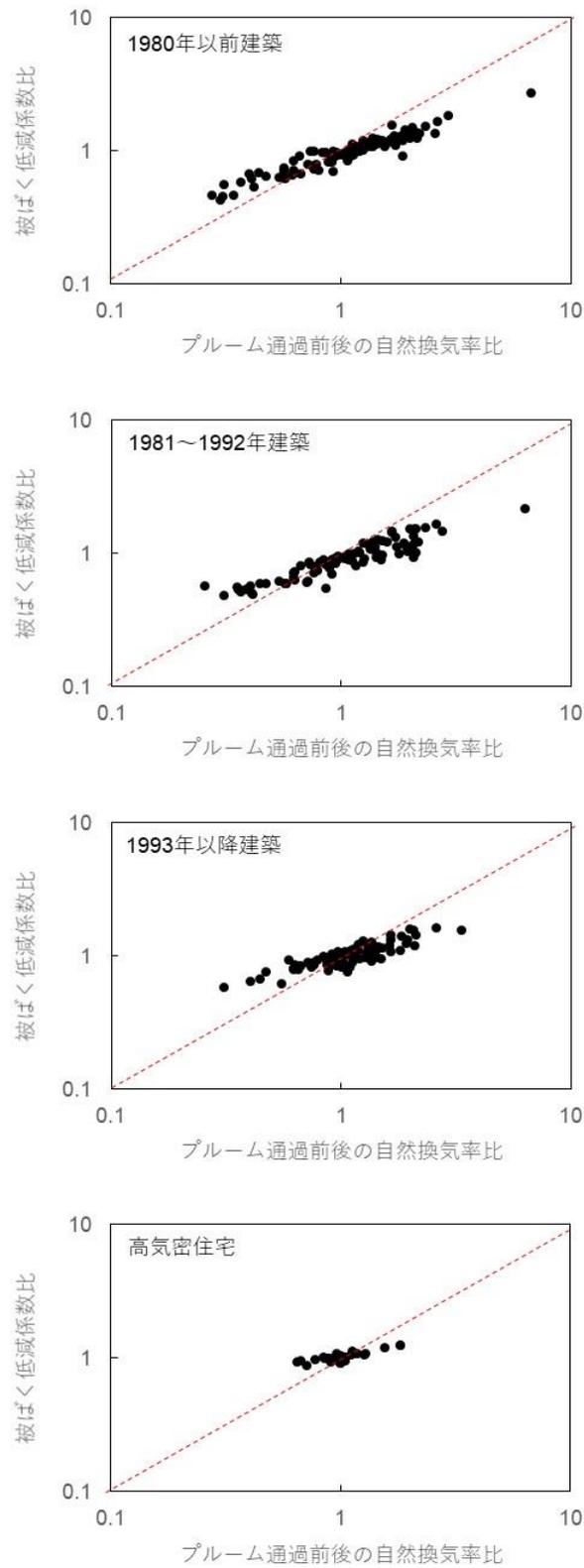


図 2.38 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 15%、粒子状物質)

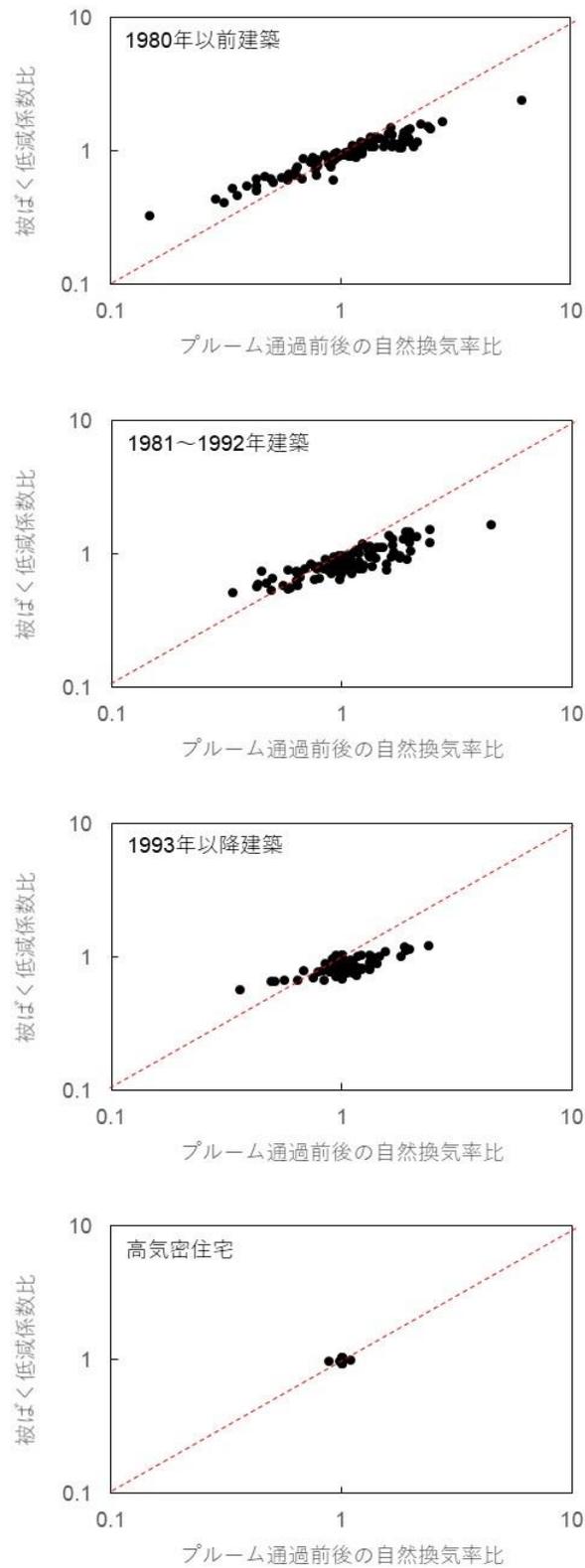


図 2.39 実際の環境下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (実環境/理想環境) (建蔽率 30%、粒子状物質)

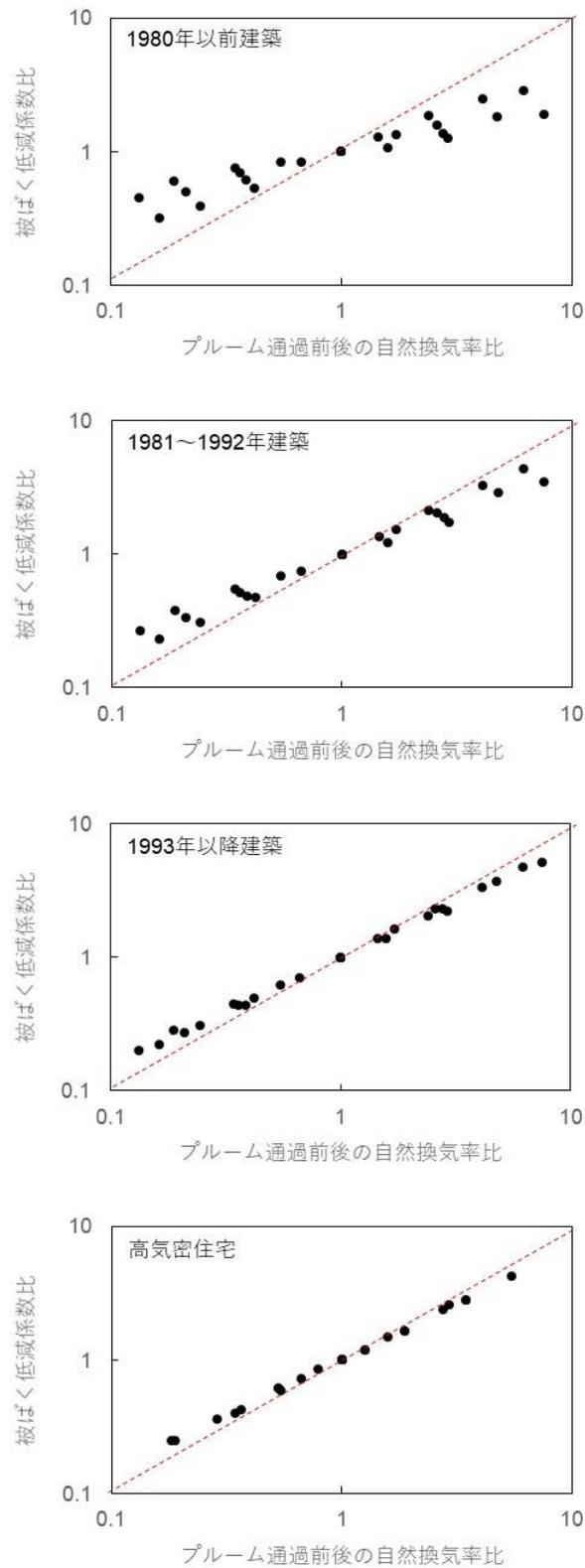


図 2.40 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 0%、CH₃I)

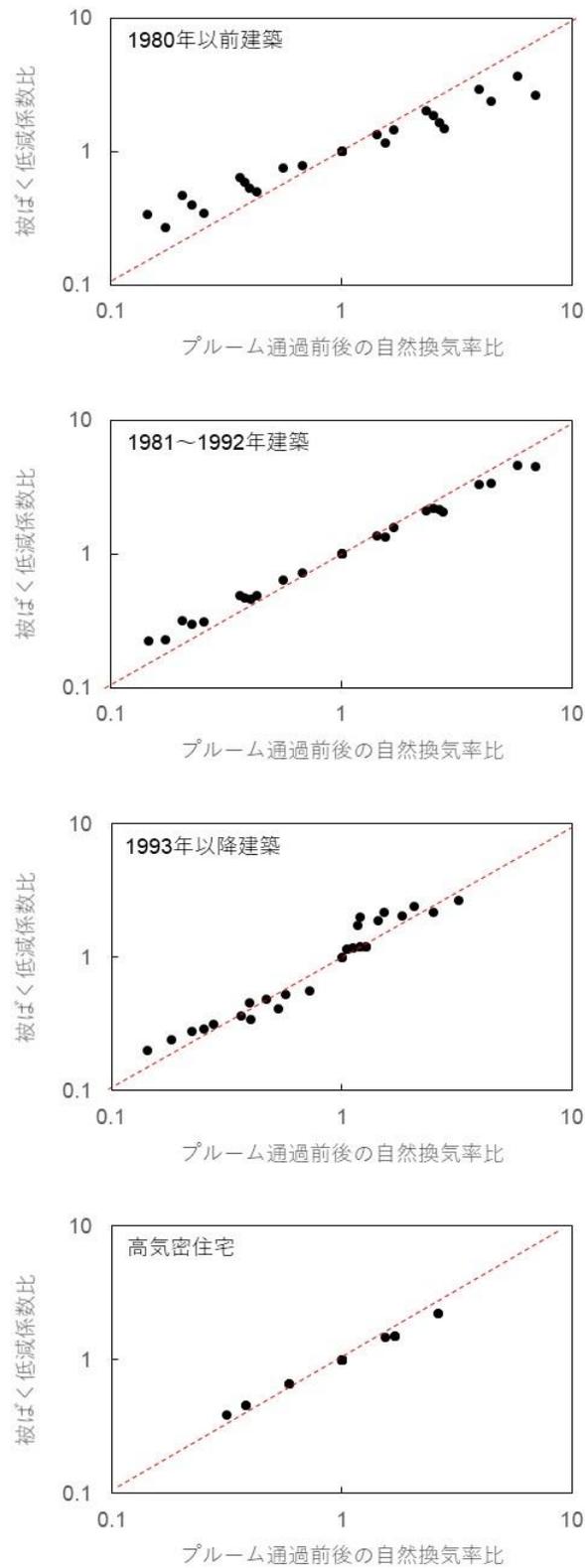


図 2.41 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 15%、CH₃I)

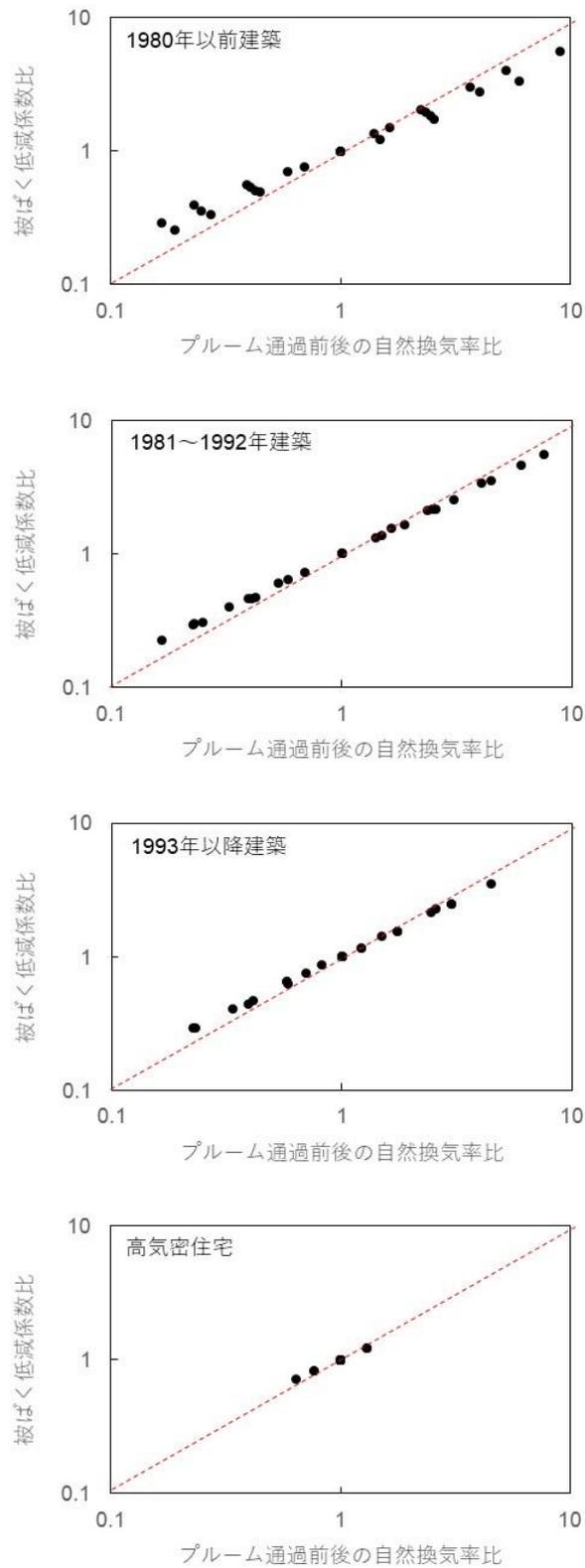


図 2.42 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 30%、CH₃I)

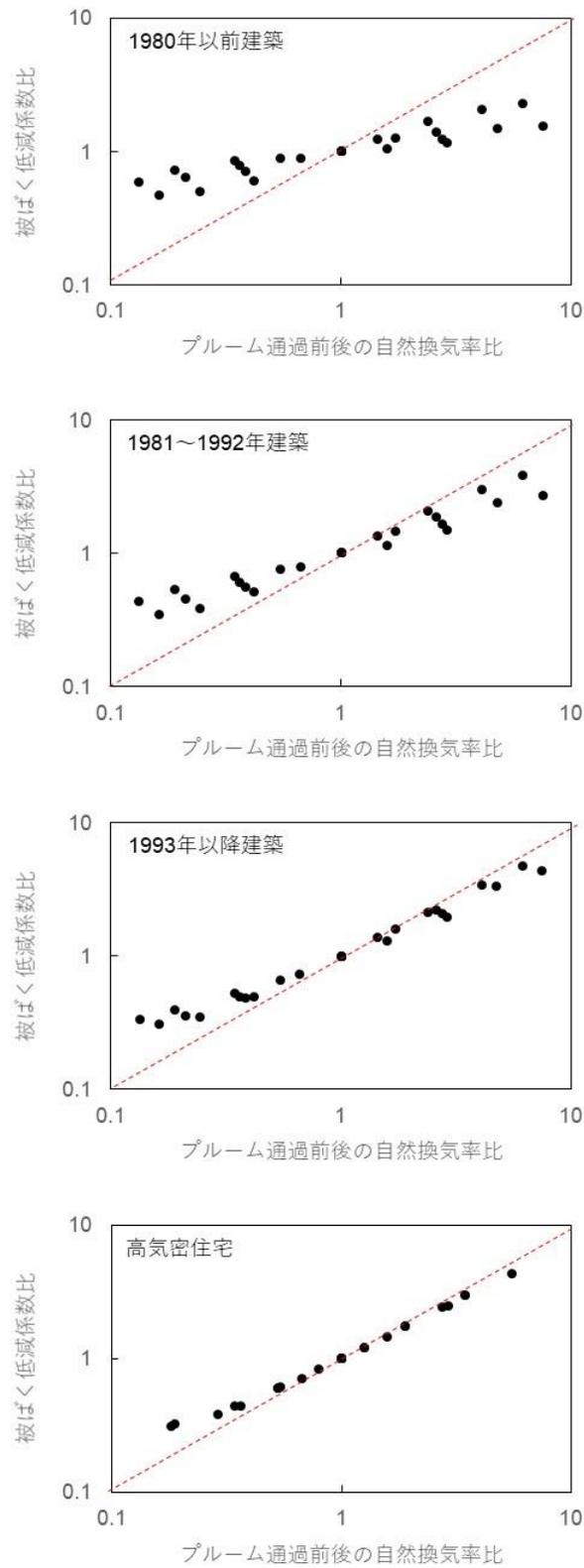


図 2.43 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 0%、 I_2)

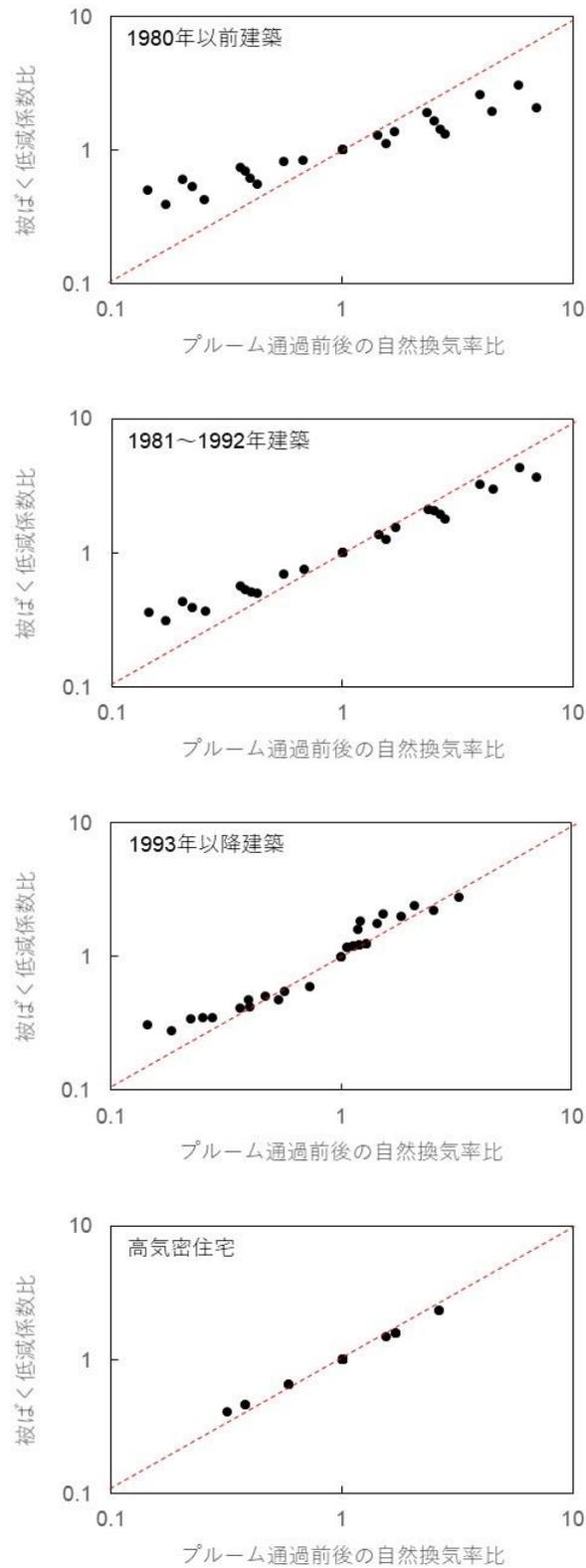


図 2.44 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 15%、 I_2)

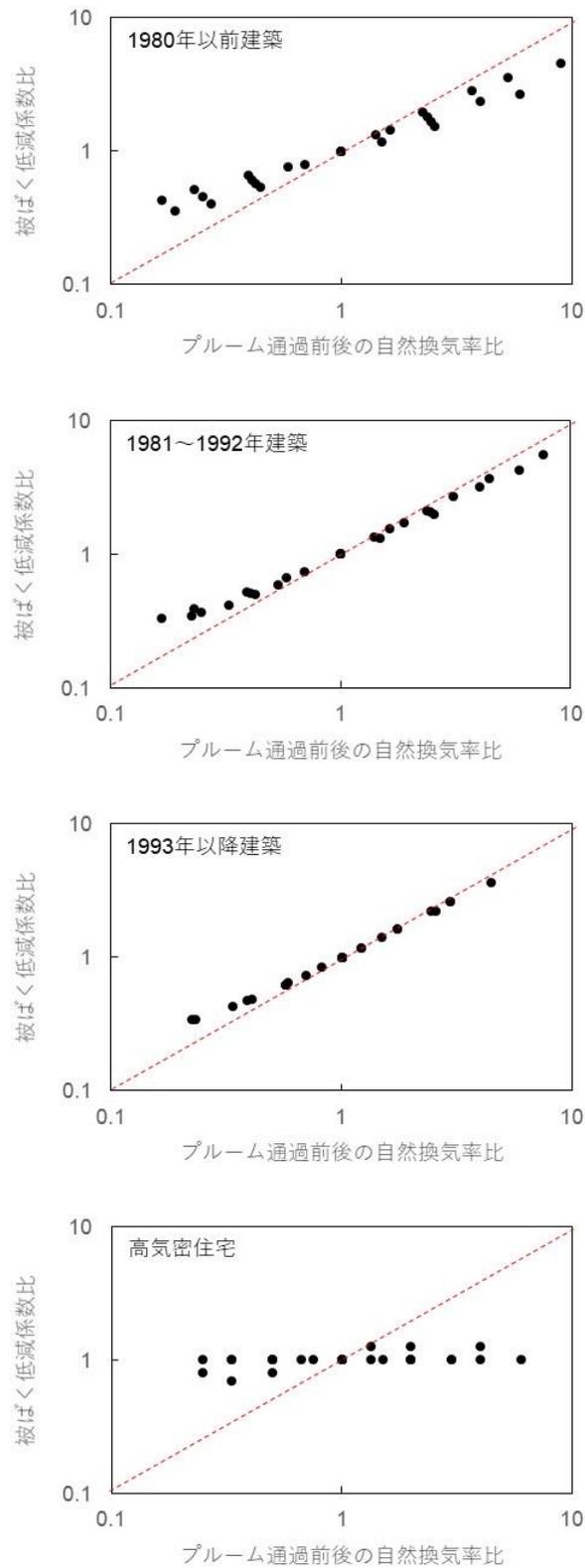


図 2.45 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 30%、 I_2)

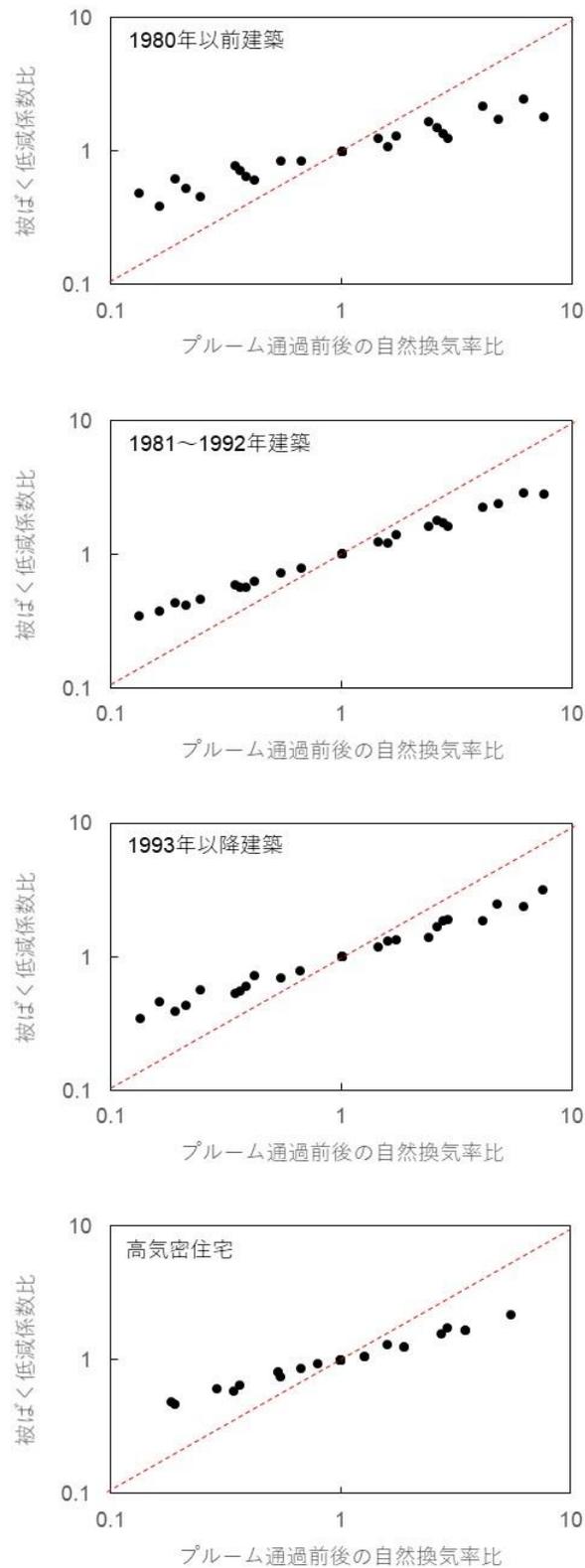


図 2.46 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 0%、粒子状物質)

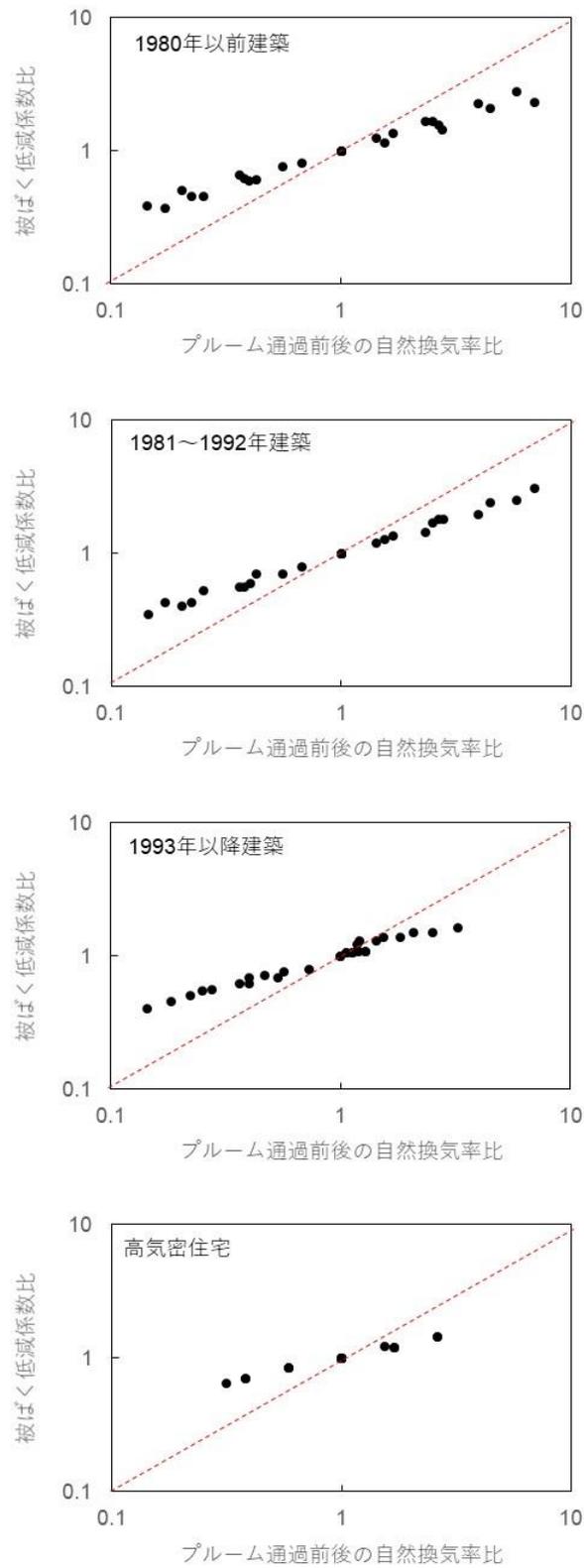


図 2.47 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 15%、粒子状物質)

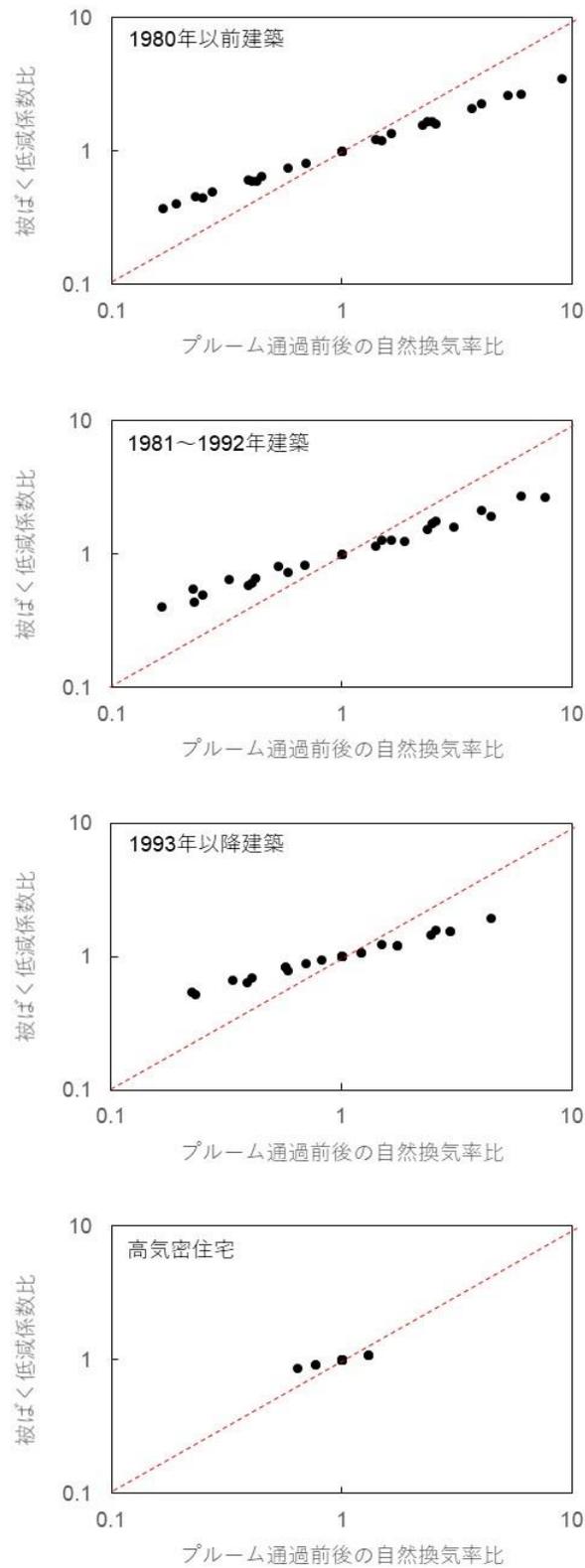


図 2.48 仮想風速下で求めた被ばく低減係数と理想的な環境下で求めた被ばく低減係数の比 (仮想環境/理想環境) (建蔽率 30%、粒子状物質)

表 2.11 解析に利用したプルーム通過前後の仮想的な風速の一覧

プルーム通過中の風速 (m s^{-1})	プルーム通過後の風速 (m s^{-1})
1	1
1	2
1	3
1	4
2	1
2	1.5
2	2
2	4
2	6
2	8
3	1
3	2
3	3
3	4
3	6
3	9
4	1
4	2
4	4
4	6
4	8
6	1
6	2
6	3
6	6
8	2
8	4
8	6
8	8

2.3 屋内退避中にとることが望ましい行動、注意事項

平成 30 年度、31 年度事業では、屋内退避中の防護効果をさらに高める行動として、マスクの着用、空気清浄機の稼働を挙げ、それらを実施した際の低減係数を求めるためのパラメータをまとめた。ここでは、それらパラメータを基に、屋内退避の効果を高める行動を実施した場合の低減係数をまとめる。また、今までの解析から判断できる、屋内退避中の注意事項をまとめる。

2.3.1 マスク着用による低減効果

平成 31 年度事業では、マスク着用による防護係数を調査するために必要である、マスクの漏れ率⁹と透過率¹⁰を実験的に求めた。マスクの防護係数（マスク未着用時と着用時の吸入量の比）は次式で表される。

$$P_m = X + F_m - XF_m \quad (2.22)$$

P_m : 防護係数
 X : 漏れ率
 F_m : 透過率

平成 31 年度事業では、4 種のマスクに対して、粒子状物質と I_2 の透過率を求めた（図 2.49）。粒子状物質の場合、マスク No.2 の透過率は約 0.8 であり、それ以外は約 0.05 であった。マスク No.2 に記載してあった粒子の捕集効率は花粉に対して 99%（透過率 0.01）であった。花粉の粒径は約 30 μm であり、今回対象としている粒径よりも 100 倍程度大きい。フィルターの捕集対象が粒径 0.1~1 μm 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 μm であり、今回対象としている粒径とほぼ同じである。

I_2 の場合、透過率はマスク No.1 で約 0.2、マスク No.2 で約 0.05、マスク No.3 で約 0.55%、マスク No.4 で約 0.02 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 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。

また、同じ 4 種のマスクに対して、普段通りに着用した場合とよりフィットする着用した場合の漏れ率を求めた（図 2.50）。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 0.9 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 0.3 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 0.6、No.2 は約 0.5、No.3 と 4 は約 0.2 であった。また、マスク着用時の写真より、マスクを正しく着用した人のみを抽出した場合、マスク No.1 と 2 の漏れ率は約 0.4、No.3 と 4 は約 0.2 であった。

透過率と漏れ率を用いて、マスク着用時の防護係数を求めた（図 2.51）。0.3 μm 程度の粒子の

⁹ マスクのフィルターを通らず、マスクと顔の隙間を通してマスク内に侵入する割合。

¹⁰ マスクのフィルターを通過する前と後の濃度比。

挙動は気体とほぼ同じであると考え、 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 の防護係数は粒子状物質と I_2 ともに 0.9 以上であった。カップ型のマスク No.3 と 4 の防護係数は粒子状物質で約 0.3、マスク No.3 の I_2 に対する防護係数は約 0.7 と No.4 で約 0.4 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 I_2 ともに改善がみられ、防護係数は粒子状物質で約 0.5、 I_2 で約 0.5 であった。マスク No.2 では粒子状物質の透過率が大きいいため、粒子状物質の防護係数は 0.9 と大きいものの、 I_2 に対しては約 0.5 であった。マスク No.3 と 4 では着用方法の改善によって防護係数は 15%程度の改善であった。

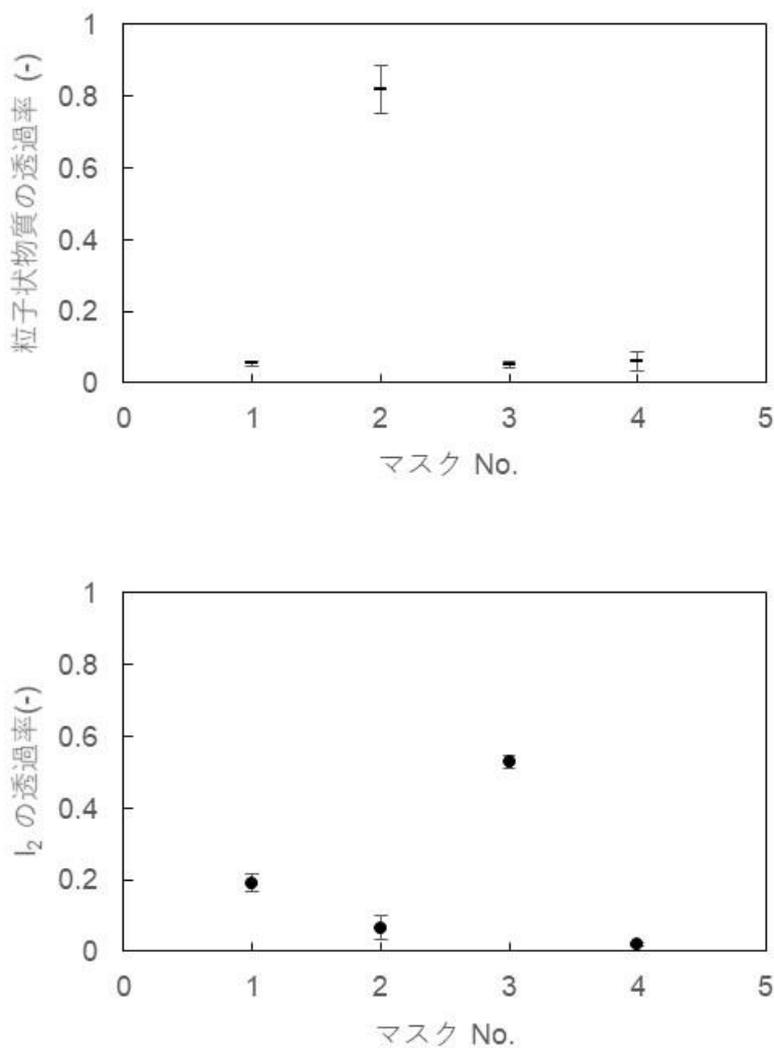


図 2.49 マスクの透過率。マスク No.1 はプリーツ型、No.2 は立体型、No.3 と 4 はカップ型。マスク No.1 のフィルターは不織布+活性炭フィルター、No.2 はポリウレタン、No.3 は不織布、No.4 は不織布+活性炭フィルターである。

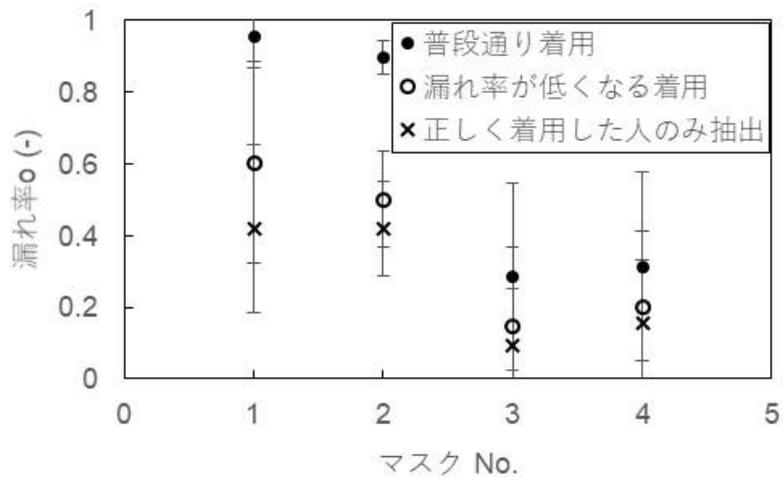


図 2. 50 マスクの漏れ率。漏れ率は対象者全員の平均値と標準偏差を示す。マスク No.1 はプリーツ型、No.2 は立体型、No.3 と 4 はカップ型。マスク No.1 のフィルターは不織布+活性炭フィルター、No.2 はポリウレタン、No.3 は不織布、No.4 は不織布+活性炭フィルターである。

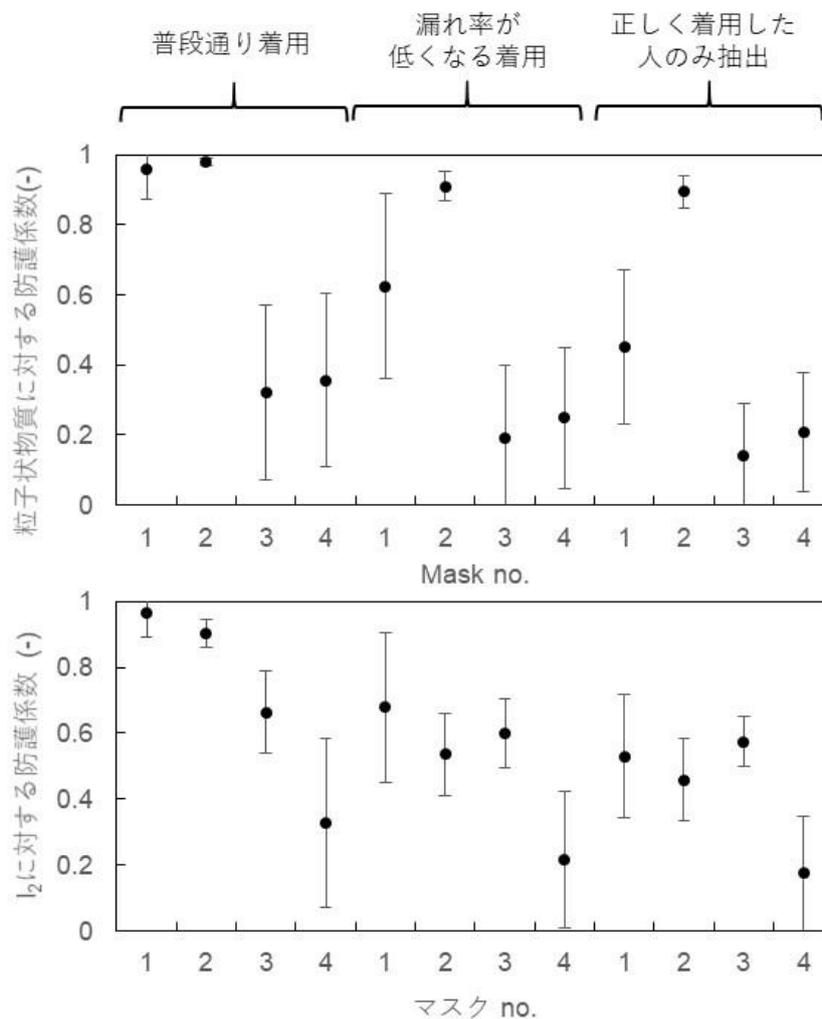


図 2.51 マスク着用による防護係数。マスク No.1 はプリーツ型、No.2 は立体型、No.3 と 4 はカップ型。マスク No.1 のフィルターは不織布+活性炭フィルター、No.2 はポリウレタン、No.3 は不織布、No.4 は不織布+活性炭フィルターである。

2.3.2 空気清浄機稼働による低減効果

平成 30 年度事業では、空気清浄機を稼働させた場合の被ばく低減係数を求めるために必要である、粒子状物質に対する除去率（式 (2.11) の P_c ）を実験的に求めた。粒子状物質に対する空気清浄機の除去率と循環率の関係を図 2.52 に示す。本事業で対象としている粒径範囲（0.3~1 μm ）の粒子では、除去率は 0.3~0.8 の値であり、循環率を大きいほど除去率が小さい傾向であった。

この除去率と循環率の関係をを用いて、空気清浄機稼働時の被ばく低減係数を求めた（表 2.12）。なお、化学形態は粒子状物質のみ、風速は常時一定、建蔽率 15%の条件で計算したものであり、プルーム通過開始から 48 時間後の被ばく低減係数を示す。全て粒子状物質の場合には、空気清浄機を稼働させることによって被ばく低減係数は半分以下になる。空気清浄機の除去率は循環率が大きいほど小さかったものの、被ばく低減効果は循環率が大きいほど大きくなる事が分かる。

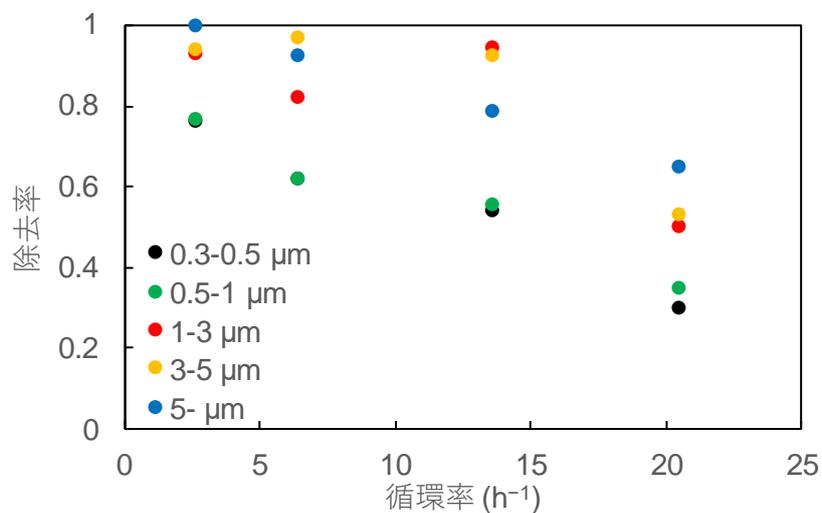


図 2.52 粒子状物質の空気清浄機の除去率と循環率の関係

表 2.12 空気清浄機稼働による被ばく低減係数の影響。ヨウ素の化学形態を全て粒子状としたときの被ばく低減係数。風速は常時一定、建蔽率 15%の条件で計算した場合である。

		建屋	風速 (m s ⁻¹)		
			1	2	5
空気清浄機未稼働		1980 年以前の木造家屋	0.40	0.62	0.94
		1981-1992 年の家屋	0.20	0.34	0.66
		1993 年以降の家屋	0.16	0.19	0.41
		高気密住宅	0.16	0.16	0.19
循環率 2.6 h ⁻¹		1980 年以前の木造家屋	0.05	0.14	0.44
		1981-1992 年の家屋	0.02	0.04	0.16
		1993 年以降の家屋	0.01	0.01	0.05
		高気密住宅	0.01	0.01	0.01
循環率 6.4 h ⁻¹		1980 年以前の木造家屋	0.03	0.08	0.30
		1981-1992 年の家屋	0.01	0.02	0.10
		1993 年以降の家屋	0.01	0.01	0.03
		高気密住宅	0.01	0.01	0.01
循環率 13.5 h ⁻¹		1980 年以前の木造家屋	0.02	0.05	0.20
		1981-1992 年の家屋	0.00	0.01	0.06
		1993 年以降の家屋	0.00	0.00	0.02
		高気密住宅	0.00	0.00	0.00
循環率 20.4 h ⁻¹		1980 年以前の木造家屋	0.02	0.06	0.22
		1981-1992 年の家屋	0.01	0.01	0.06
		1993 年以降の家屋	0.00	0.00	0.02
		高気密住宅	0.00	0.00	0.01

2.3.3 屋内退避中の注意事項

本節で示したマスク着用と空気清浄機の利用等の追加の防護対策によって、吸入被ばくによる線量は低減することができる。マスク着用時には、ブリーツ型、立体型であっても、追加で50%程度の低減が見込まれる。しかしながら、マスクフィルターが0.1~1 μm の粒子を捕集対象とし、活性炭フィルター付属しており、正しくマスクを着用した場合に限定される。これらのいずれかを満たしていない場合、低減効果はほとんどなくなる。例えば、マスクフィルターの対象としている粒子が異なった場合、図2.51のマスクNo.2のように、正しく着用したとしても、防護係数は0.9程度であり、追加で10%程度の低減しか見込まれない。また、マスクを正しく着用していない場合、図2.51のマスクNo.1のように、防護係数が1付近であり、追加の防護効果がほとんど見込まれないことが示されている。

空気清浄機を利用した場合、粒子状物質の被ばく低減係数は半分以下になることが示された(表2.12)。また、表2.12より、風量大きいモードで稼働させる方が、被ばく低減効果はより大きくなることが示されている。より防護効果を高めるためには、なるべく風量大きいモードで空気清浄機を稼働させることが良いことが示されている。

本節で示した追加の防護対策以外にも、プルーム通過後に窓を開ける、換気扇を稼働させる等によって、屋内に滞留する放射性物質を早く屋外に追い出すことも、低減効果を高める行動の一つである。しかしながら、図2.31~図2.48に示されるように、プルーム通過中の換気率がプルーム通過後の換気率よりも大きくなった場合、換気率が一定条件下よりも被ばく低減効果が小さくなることが示された。また、その比は概ね換気率比であることが示された。仮に、プルーム通過中に窓を開放し、プルーム通過後に窓を閉めた場合、常時に窓を開けた場合(常時外にいる場合と同意)または常時窓を閉めた場合よりも被ばく線量が高くなり、屋内退避の効果が低下する。無用な被ばくを避けるためにも、大気中放射能濃度がリアルタイムに観測され、対象地域がプルーム通過中であるかを判断できない限り、屋内退避中は窓を閉めること、換気扇を稼働させないことが望ましいと考えられる。

2.4 第2章の参考文献

- Bellamy R.R. (1981): Investigation into the air cleaning aspects of the Three Mile Island Accident, 16th DOE Nuclear Air Cleaning Conference, CONF-801038, **2**, pp. 1427–1441.
- 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 ¹³¹I 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.
- 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.
- 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.
- Noguchi H. and Murata M. (1988): Physicochemical speciation of airborne ¹³¹I in Japan for Chernobyl, *J. Environ. Radioact.*, **7**, pp. 65–74.
- 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.
- Perkins R.W. (1964): Physical and chemical forms of ¹³¹I from fallout and chemical processing plants. Hanford Radiological Sciences Research and Development Annual Report for 1963, HW-81746, pp.3.55–3.58.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 : 2021 年 3 月 1 日) .
- 東海村 : とうかいの統計
https://www.vill.tokai.ibaraki.jp/sonseijoho/tokei_chosa_kansa/tokei/2916.html (最終閲覧日 :
2021 年 3 月 1 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 : 2021 年 3 月 1
日) .
- 放射線安全・防災研究グループ (2020) : OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル, JAEA-
Testing 2020-001.
- 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健 (2000) : 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対
する環境影響評価, JAERI-Research 2000-060.
- 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.

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年度および平成31年度事業においては、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実際の屋根材を用いた実験を行った。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、もう一つは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。本年度事業においては、屋根材角度の違いによるこれらパラメータの依存性も調査した。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。

$$\text{初期沈着割合} = \frac{\text{実際に屋根材に付着した Cs 量 (g)}}{\text{降下した Cs 量(g) [= 地面上の Cs 量に相当]}} \quad (3.1)$$

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。

$$\text{残存率 (t)} = \frac{\text{時刻 t 時点での付着量 (g)}}{\text{初期沈着量 (g) [= 式(4.1)の分子]}} \quad (3.2)$$

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。

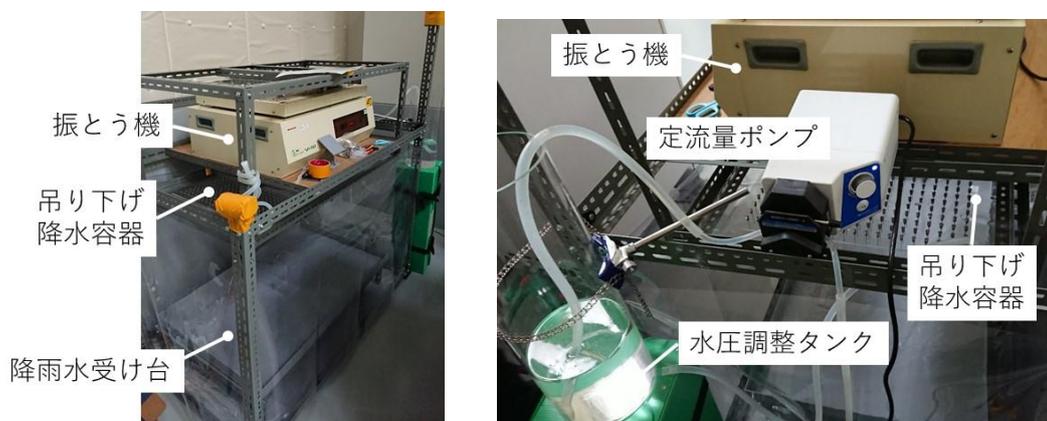
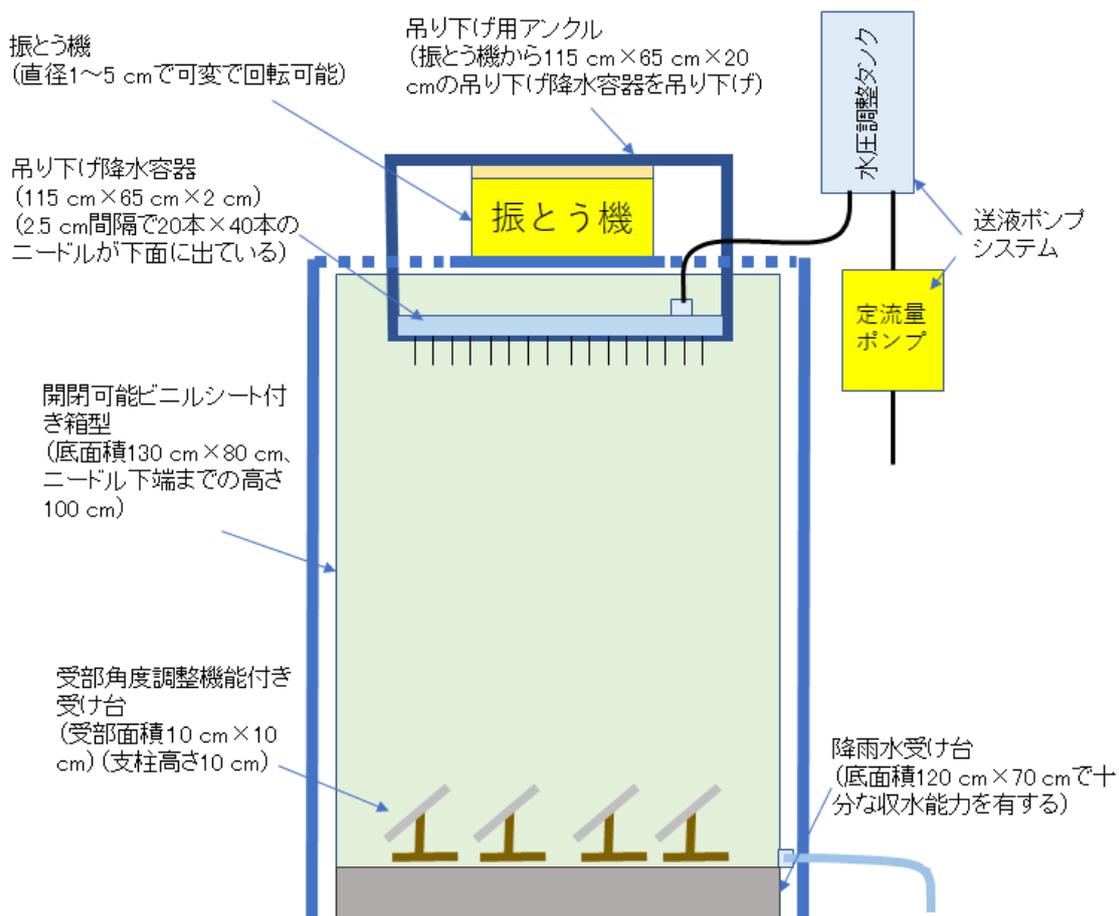


図 3.1 人工降雨装置の概略図と写真

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。

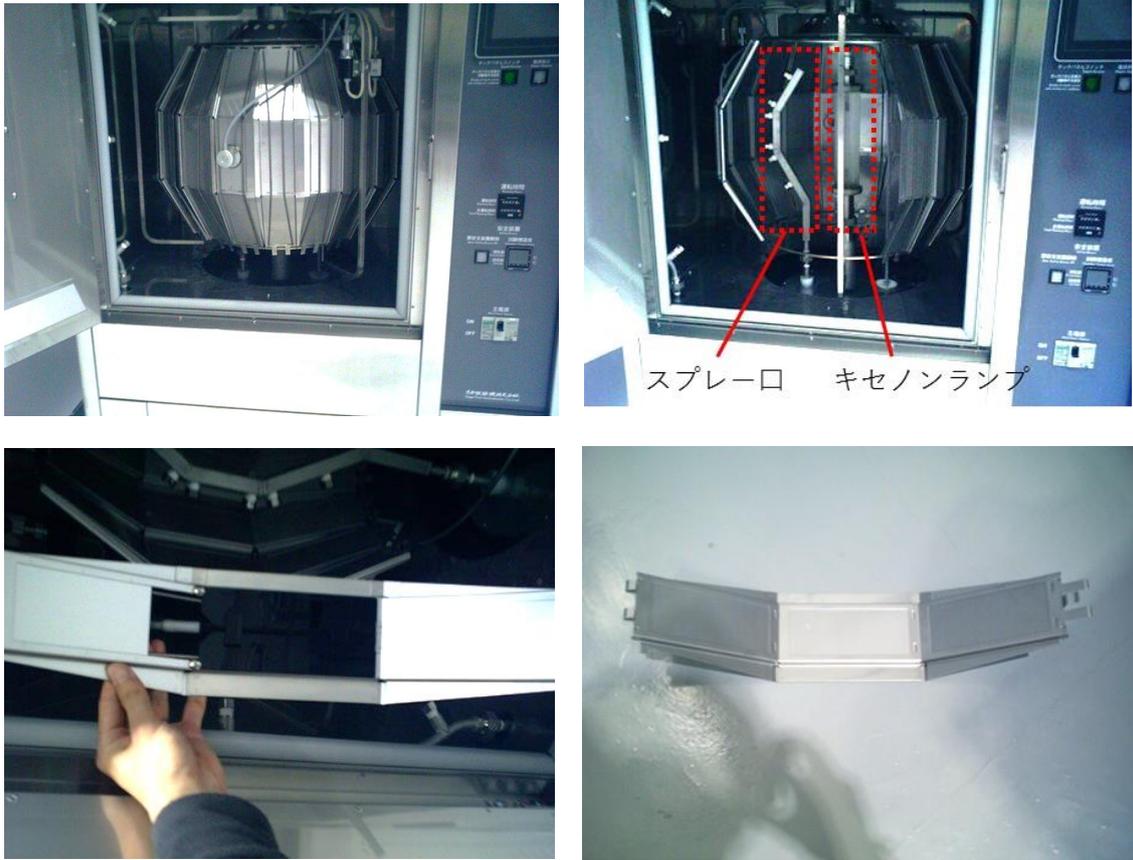


図 3.2 ウェザーメーターの概要図 (左上：サンプルホルダーを全て設置した状態、右上：サンプルホルダーを一部取り外した状態、左下：黒板付きサンプルホルダー、右下：サンプルホルダー)



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。

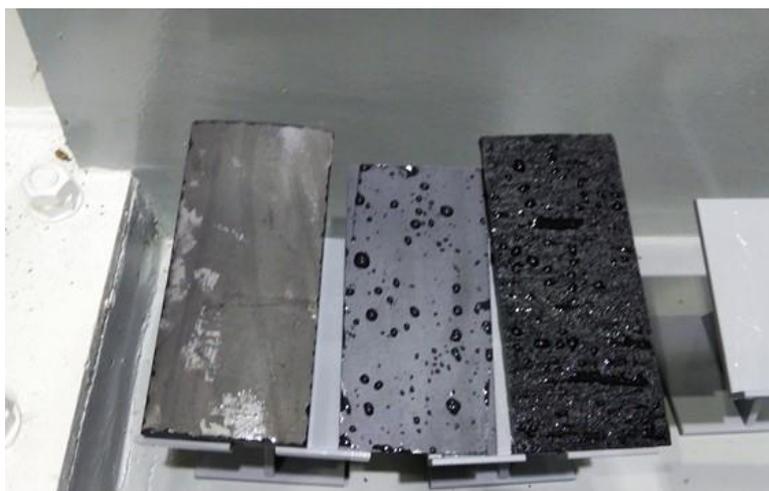


図 3.4 実験対象の屋根材（左から瓦、金属鋼板、スレート）

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 31 年度事業では、ICP-MS による模擬雨水中のセシウム濃度測定を行ったが、サンプルの一部を削る必要があり時間経過を考慮した連続測定が行えなかった。そこで本年度事業では、実験室内においての即時性や連続した測定結果を可能とするためにハンドヘルド蛍光 X 線分析計 VANTA（オリンパス株式会社製、VANTA M-series、以下 VANTA と呼ぶ）を使用した。

この測定方法の変更に際し、いくつかの濃度の模擬雨水を VANTA で計測を行いセシウム濃度が 5 g L^{-1} 以上であれば安定して測定できることを確認した。

(2) 降水

今回の実験に使った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あるため、本実験では、サンプルを図 3.6 のように、なるべく装置の真ん中付近に設置した。屋根の傾きについては、一般的に施工される四寸勾配（ 21.8° ）を基本勾配とし、その前後の勾配にあたる三寸勾配（ 16.7° ）と五寸勾配（ 26.6° ）の 3 種類を対象とした（図 3.5）。今回の実験

サンプルは、上記した3種類の屋根材を1セット（1種類の屋根材3枚ずつ、計9枚）として、それぞれの降水条件において実験を行った（表3.1）。

表3.1 初期沈着割合の実験条件

実験 No.	平均降水強度 (mm h ⁻¹)	積算降水量 (mm)	屋根角度 (寸勾配)
1	5.0	10.0	4
2	1.0	1.0	4
3	1.5	6.0	4
4	1.4	11.0	4
5	6.0	1.2	4
6	6.3	5.0	4
7	6.3	5.0	4
8	4.4	7.0	4
9	15.0	1.5	4
10	9.5	3.8	4
11	15.6	12.5	4
12	1.5	1.5	3
13	1.5	6.0	3
14	1.3	9.0	3
15	7.5	1.5	3
16	6.3	5.0	3
17	6.3	5.0	3
18	4.4	7.0	3
19	10.0	1.0	3
20	8.8	3.5	3
21	15.0	12.0	3
22	1.0	1.0	5
23	1.3	5.0	5
24	1.3	9.0	5
25	7.5	1.5	5
26	6.3	5.0	5
27	6.3	5.0	5
28	4.7	7.5	5
29	10.0	1.0	5
30	8.8	3.5	5
31	9.4	7.5	5

各実験において降雨水受け台の上のサンプルの中央に積算降水量を測定する容器を配置した(図 3.6)。実施目安として積算降水量 1、5、10 mm および降水強度 1、4、8 mm h⁻¹ としたが、降水強度は安定しなかったため、容器内に溜まった水の量(積算降水量)と雨水曝露時間(降雨時間)を用いて実際の平均降水強度を算出した。

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。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のままとした。



図 3.5 屋根の傾き(左から瓦 3 寸、瓦 4 寸、瓦 5 寸)

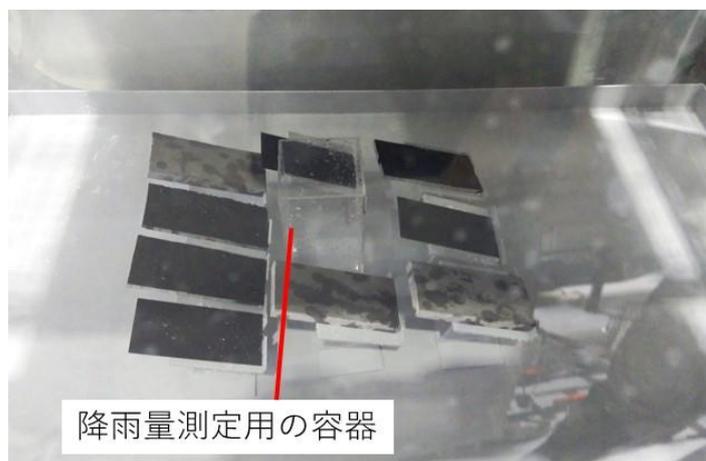


図 3.6 人工降雨装置作動時の状況

(3) 濃度測定

濃度測定に使用した VANTA は、計測対象に向けて X 線を照射し、発生させた蛍光 X 線を VANTA 内にある検出器で読み取ることで、成分元素や含有量を分析する計測器である。本実験では、この VANTA の他にインターロック機構を搭載したワークステーション(スタンド型 X 線

遮蔽箱)を組み合わせて計測を行った(図3.7)。

VANTAは、分析窓と呼ばれるVANTA本体先端部に設けられた直径約1cm程度の小さなホール(図3.8)からX線を照射して計測を行う。そのため、計測対象となる面積はかなり狭い範囲に限定される。特に、ある屋根材における経時変化を測定する場合には、毎回同じ場所で測定する必要がある。

上記の留意点を踏まえて、VANTA濃度測定方法は下記の通りとした。

【測定前準備】

測定する位置合わせの精度を高めるために、屋根材の測定面全体を上部・中央・下部という大きく3つのエリアに分け、さらにそれぞれのエリアに対して左側・中央・右側と3カ所の測定点を設け、計9カ所の測定点が記されたターゲットマークを用意する(図3.9)。

【手順①】

測定したい屋根材の分析面を下にしてワークステーション内に置き、その屋根材裏側にターゲットマークを乗せる。次に、測定したいターゲットマーク(測定点)とVANTA底面に書かれたクロスライン(クロスライン中央が分析窓)を合わせる(図3.10)。

【手順②】

屋根材を正しい位置にセットした後、VANTAに有線接続されたPCアプリケーションを使って計測を行う。今回の計測では、X線20秒間照射を行い、そこで得られた平均を計測結果とした。



図3.7 VANTA(左:VANTA本体、右:VANTAとワークステーションの組み合わせ)

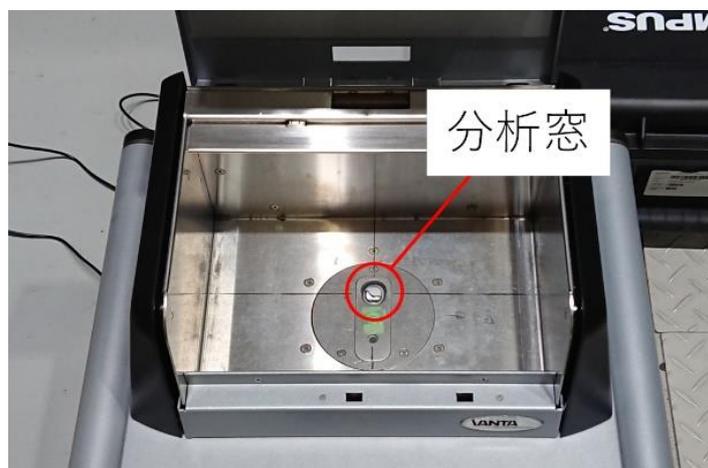


図3.8 ワークステーション内にセットされたVANTAの分析窓

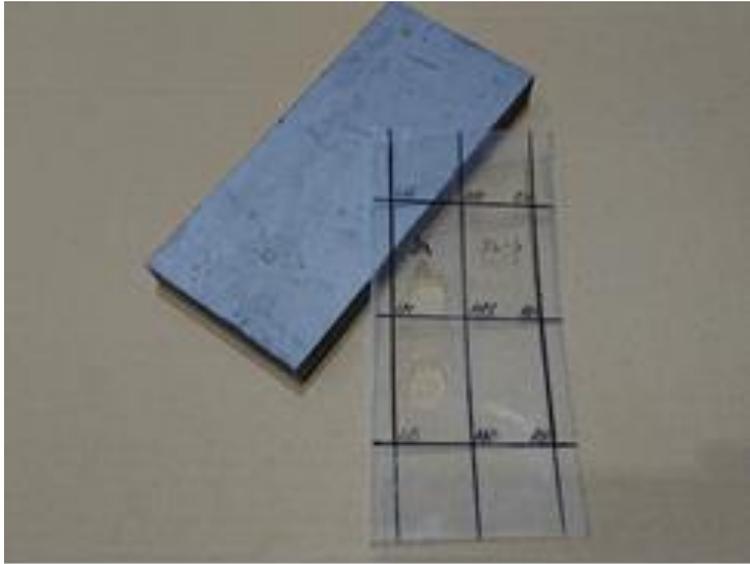


図 3.9 屋根材計測用のターゲットマーク（線が交差してる 9 カ所が VANTA 計測点）



図 3.10 ワークステーション内の置いた屋根材（上部左側の測定点に合わせた状態）

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
2. (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
3. 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 VANTA を用いた。初期沈着割合の試験で作成したサンプルを用いて各降雨後の付着量を測定した。

(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 3.11 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 3 寸勾配と 4 寸勾配および 5 寸勾配の 3 種類とした。設置期間は 2020 年 10 月 30 日～同年 11 月 4 日、2020 年 11 月 19 日～同年 11 月 24 日である。10 月 30 日～11 月 4 日の降雨期間は約 15 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 3.5 mm h^{-1} であった。11 月 19 日～11 月 24 日の降雨期間は約 7 時間であり、その期間の積算降水量は 5.5 mm、最大降水強度は 2 mm h^{-1} であった。



図 3.11 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 1.7 mm の降水量に相当することを示した。実環境試験時の積算降水量 20mm 相当まで 5 回測定した。

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」 ¹¹ を1分間、「照射」を5分間のサイクル
放射照度	60 W m ⁻²
黒板温度、槽内温度	黒板温度 55°C、槽内温度は 40°C
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、各降雨後にサンプルを実験室内において十分に乾燥させてから VANTA による濃度測定を行った。なお、測定点場所については、初期沈着割合の濃度測定で用いたターゲットマークを使用して同じ場所になるように留意した。

3.4 実験結果

3.4.1 初期沈着割合

表 3.3 に実験毎の初期沈着割合を示す。初期沈着割合は、式(3.1)で示したように、VANTA で測定した屋根材に存在する Cs 量を、実験の実施期間にサンプルに降下した Cs 量で除したものとなる。図 3.12 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。

図 3.12 に示されるように、部材の違いによって付着量が異なり、瓦、スレート、金属鋼板の順に小さくなった。また、VANTA 測定ではサンプル上面に 9 カ所の測定点（上部 3 箇所・中部 3 箇所・下部 3 カ所）を設定して濃度測定を行ったが、サンプルの上部・中部・下部といった測定位置の違いにおける目立った偏りはみえず、付着量の位置依存性は見られなかった（図 3.13）。

図 3.12 に示されるように、どの部材においても、初期沈着割合は積算降水量に依存しており、降水強度にはほとんど依存しなかった。初期沈着割合は、初期の降水で急激に減少し、その後の変動は緩やかであった。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。

図 3.14 に示されるように、初期沈着割合は屋根の傾きの違い（三寸勾配・四寸勾配・五寸勾配）に依存しなかった。また、同じ積算降雨量で初期沈着割合を比較した場合においても、降水量強度依存性は見られなかった（図 3.15）。

¹¹ 「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。

表 3.3 各部材の初期沈着割合(%)

実験 No.	初期沈着割合(%) [=サンプル 3 枚分の平均]		
	瓦	スレート	金属鋼板
1	11.16	8.99	2.30
2	47.86	32.00	5.87
3	13.33	3.89	0.57
4	10.63	3.26	0.46
5	44.39	31.67	22.51
6	22.31	7.70	1.95
7	18.09	7.37	1.65
8	12.49	7.76	5.74
9	18.74	14.51	3.55
10	14.09	7.50	0.79
11	7.42	2.76	1.12
12	30.93	18.75	2.66
13	14.92	6.18	1.26
14	8.74	6.40	1.38
15	43.69	40.84	19.52
16	12.20	7.64	0.92
17	23.38	7.94	0.85
18	15.90	12.29	4.20
19	39.62	23.62	3.68
20	21.79	10.20	3.78
21	4.56	3.34	1.95
22	45.04	35.49	5.30
23	11.12	7.57	0.54
24	19.59	6.69	3.29
25	55.77	44.69	16.68
26	16.27	6.90	2.55
27	12.11	5.98	0.846
28	13.83	4.61	0.64
29	38.75	23.26	3.44
30	18.90	12.47	3.10
31	14.66	4.37	0.59

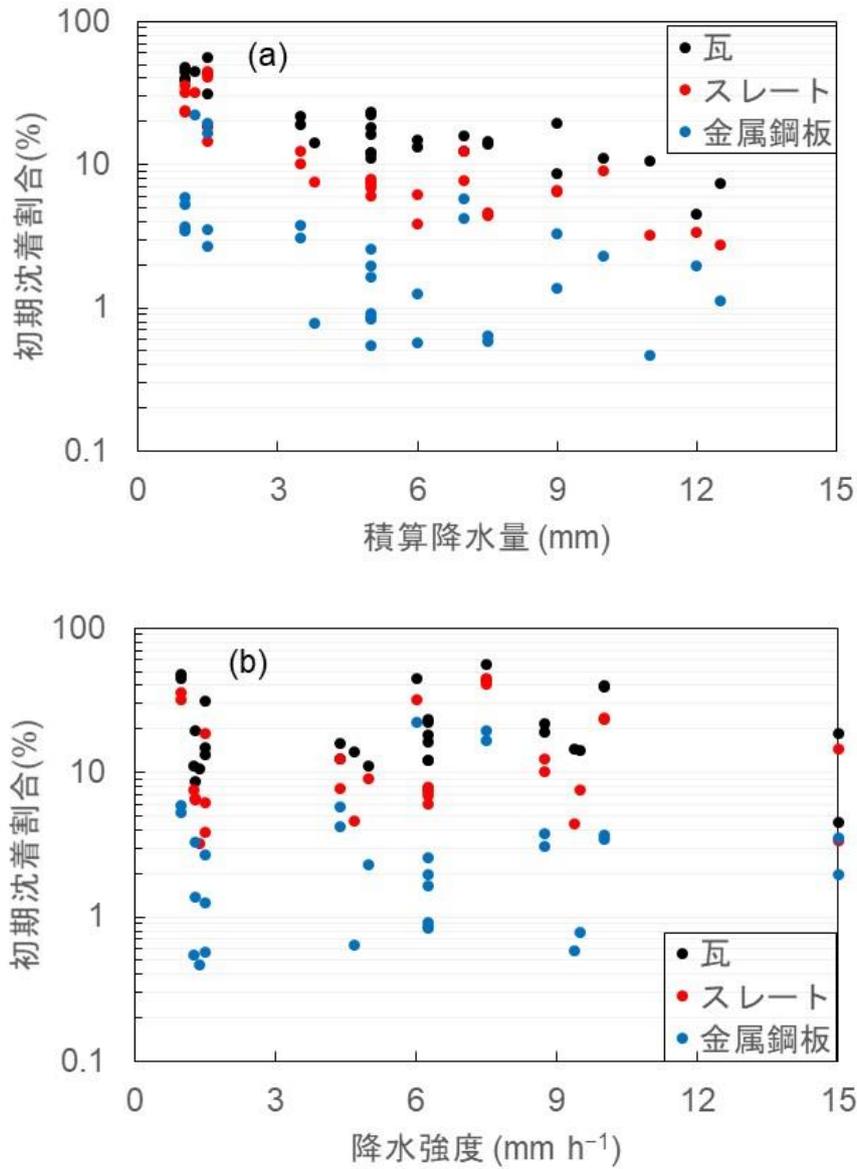


図 3.12 (a) 初期沈着割合と積算降水量の関係。(b) 初期沈着割合と平均降水強度の関係。

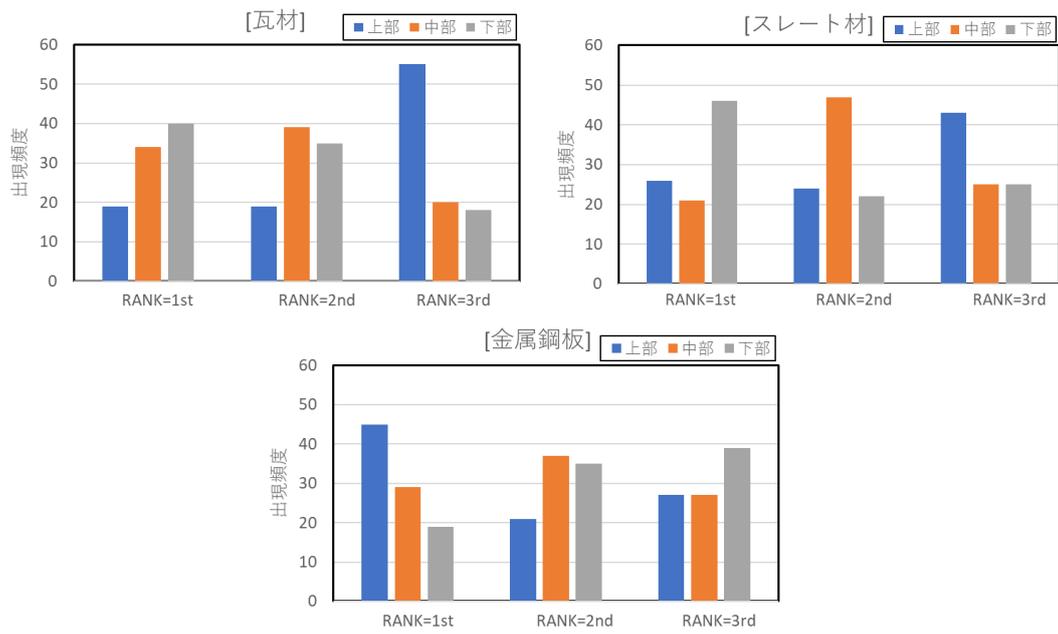


図 3.13 初期沈着割合のランクの頻度分布

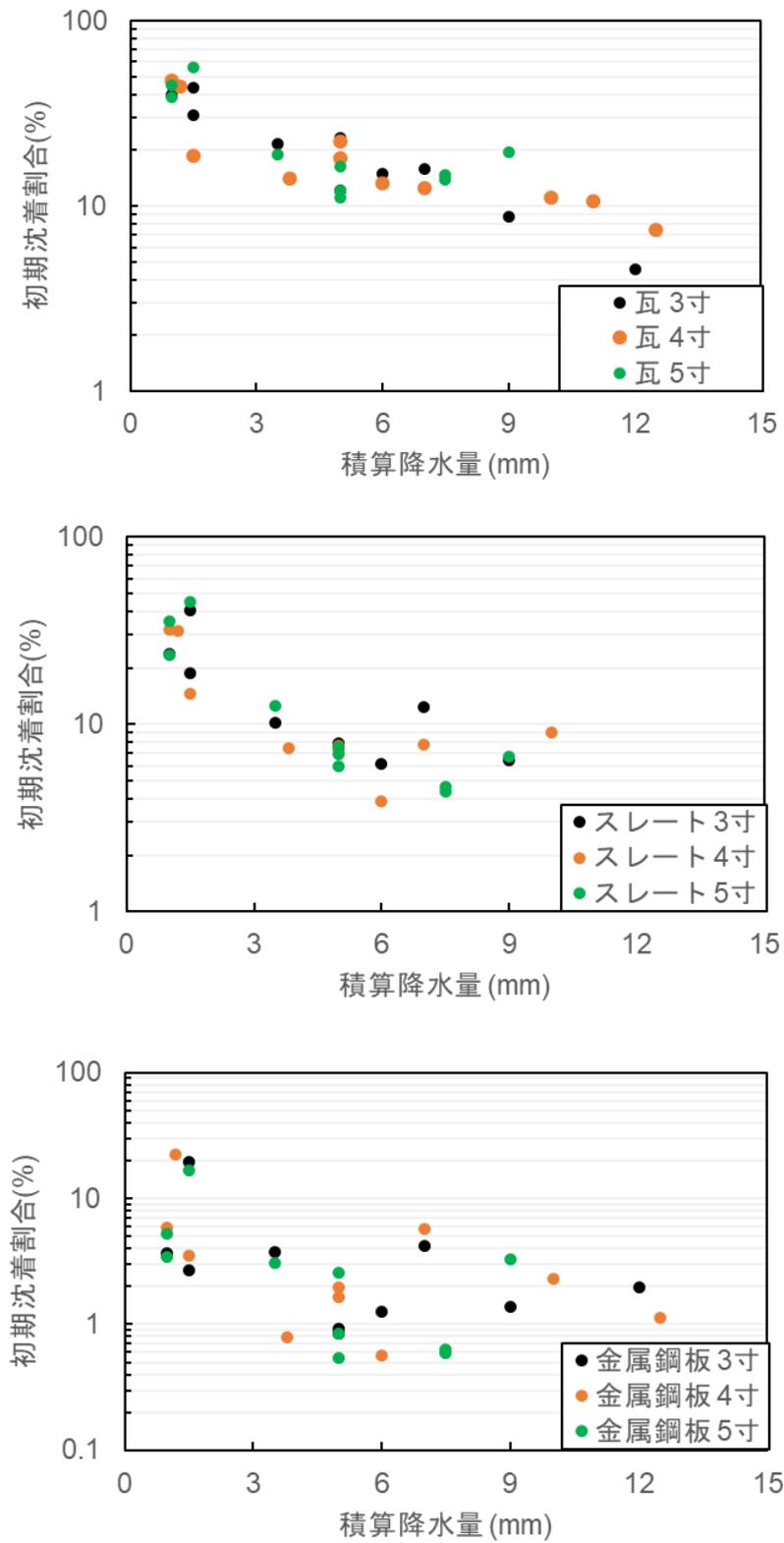


図 3.14 初期沈着割合と屋根角度の関係

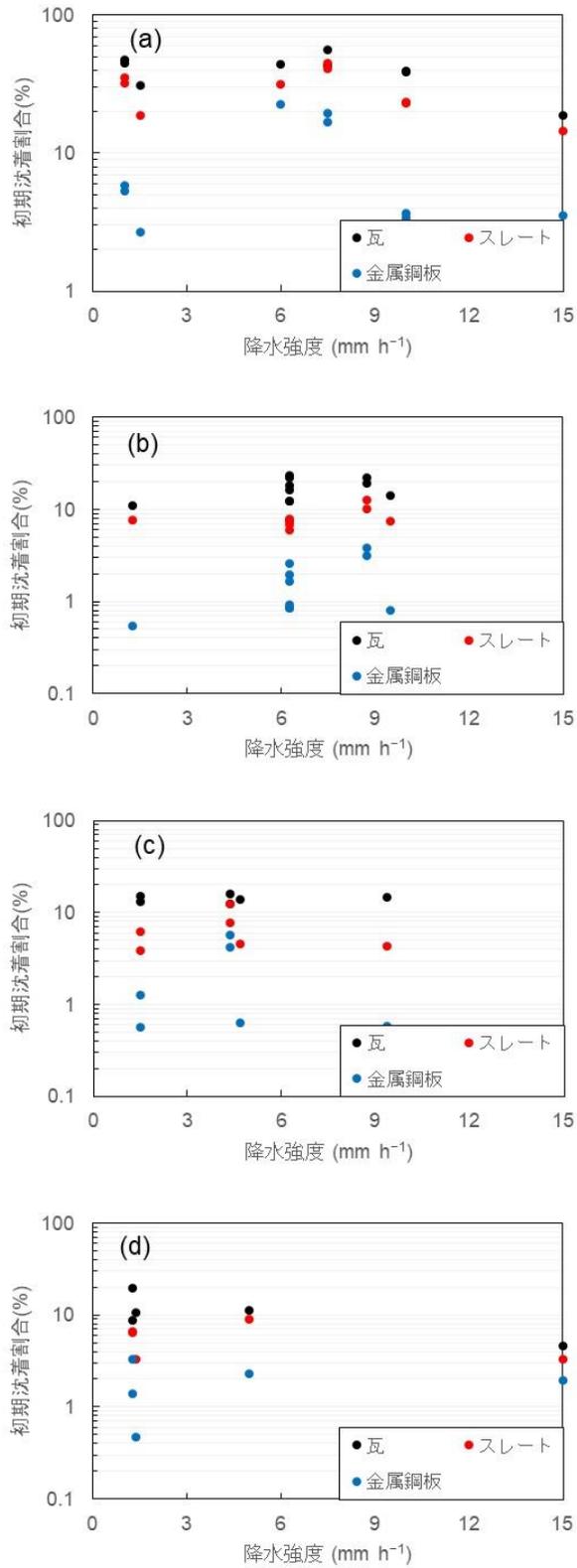


図 3.15 積算降水量毎の初期沈着割合と平均降水強度の関係。(a) 積算降雨量 0~3mm、(b) 積算降雨量 3~6mm、(c) 積算降雨量 6~9mm、(d) 積算降雨量 9mm 以上。

3.4.2 残存率

昨年度までの残存率測定の方法は、硝酸を利用してサンプルに付着した Cs を洗い流して Cs 付着量を測定していた。そのため、一度測定した後のサンプルには、Cs がほとんど残っておらず、その後の測定が行えなかった。そこで、本年度は非破壊で濃度測定が可能な VANTA（蛍光 X 線分析装置）を用いることで、同じサンプルの同じ場所における Cs 付着量の時間変化を求めた。

実環境試験とウェザーメーター環境試験における残存率と積算降水量の比較結果を図 3.16 に示す。残存率と積算降水量の関係は、実環境試験とウェザーメーター試験の間で大きな違いは見られなかった。また、残存率は、実環境試験およびウェザーメーター環境試験ともに、瓦、スレート、金属鋼板の順に小さくなった。いずれの材質においても、残存率は初期に大きく減少し、その後の残存率の変動は小さかった。各材質の残存傾向としては、金属鋼板は、最初の降雨でほとんどが洗い流されてしまい、スレートは降水量が多くなるにつれ、徐々に残存率が小さくなった。瓦に関しては、同じサンプルであっても測定した場所によって、以下のように残存割合の時間変化が大きく異なる傾向が見られた（図 3.17）。

- ・最初の雨で濃度が上がり、その後減少する。
- ・途中で濃度が上がり、その後減少する。
- ・単調に減少する。

上記のような時間変化について原因を特定できていないが、考えられる理由のひとつとして、VANTA の測定範囲外からの流入があると考えられる。瓦は、他の屋根材とは異なり、多孔質な材質であり、比較的 Cs を保持しやすいことが報告されている（Andersson, 2009）。そのため、瓦に付着した Cs は他の材質に比べてゆっくりと移動することが考えられる。その結果、測定範囲外に付着した Cs が脱離して、測定範囲内に再度付着した可能性があり、濃度が途中で上がったと考えられる。

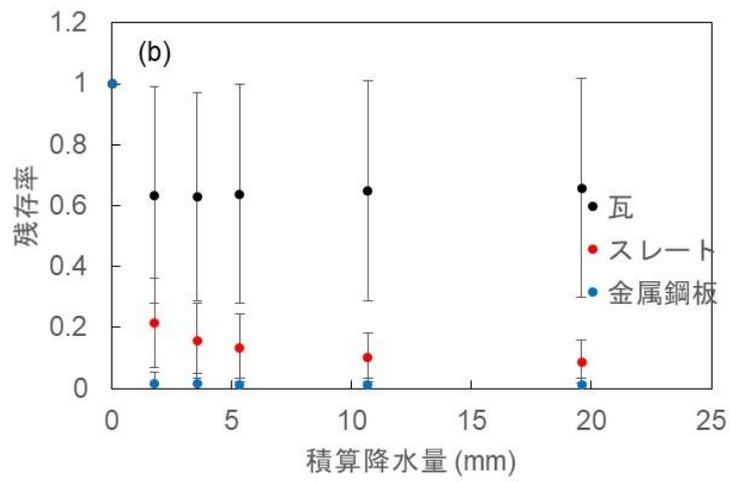
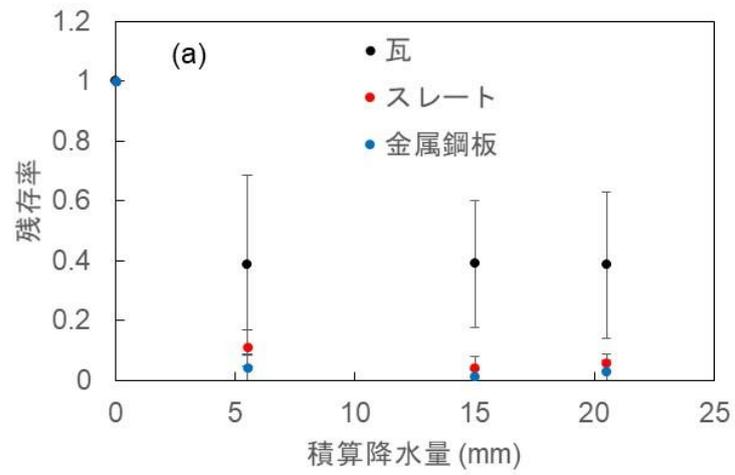


図 3.16 残存率と積算降水量の関係。残存率は、平均値と標準偏差を示す。(a) 実環境試験、(b) ウェザーメーター試験。

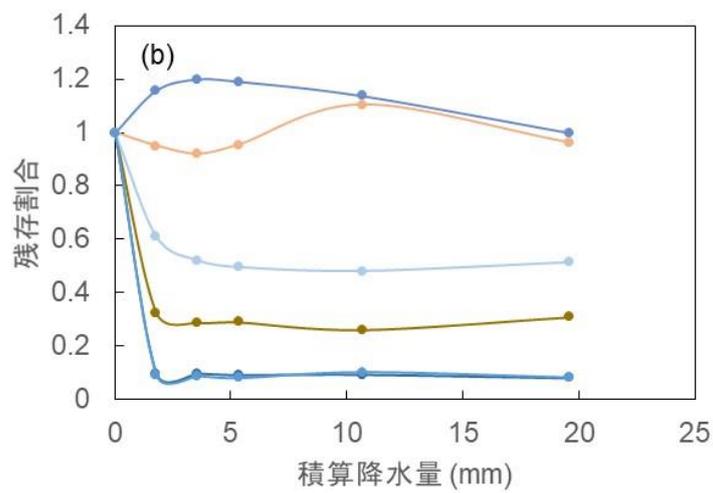
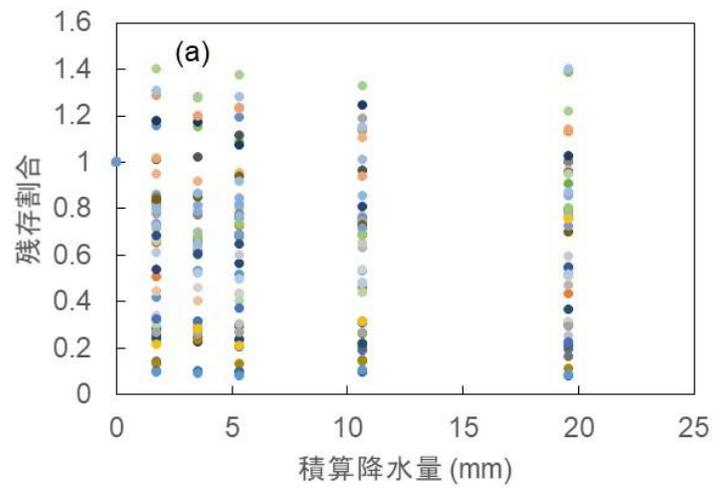


図 3.17 ウェザーメーター試験での積算降水量毎の瓦の残存割合。各プロットは測定位置での残存率。(a) 全結果、(b) (a)の結果を一部抜粋

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 3.4）。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。

例として、福島第一原子力発電所事故後に観測されたアメダスのデータを使用する。福島第一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^{-1} 、積算降水量 12 mm、原町で最大降水強度 2.0 mm h^{-1} 、積算降水量 6.5 mm、船引で最大降水強度 3.0 mm h^{-1} 、積算降水量 8.0 mm であった。図 3.12 によると、これらの降水では初期沈着割合は瓦で 10~20%、スレートで 2~10%、金属鋼板で 0.5~5% である。この初期沈着割合の時の低減係数は、屋根が瓦の家屋 1F で 0.50~0.51、2F で 0.50~0.53、屋根がスレートの家屋 1F で 0.48~0.50、2F で 0.48~0.50、屋根が金属鋼板の家屋 1F で 0.48~0.49、2F で 0.48~0.49 である。

表 3.4 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

- Andersson, K.G. (2009): Migration of radionuclides on outdoor surfaces. *Radioactivity in the Environment*, **15**, Elsevier Science, pp. 107–146
- 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 (最終閲覧日: 2021 年 3 月 4 日) .

4. OSCAAR コードで出力されるパラメータを用いた被ばく低減効果の解析

第2章では吸入被ばくに関して、第3章では外部被ばくに関して、それぞれの被ばく経路ごとに被ばく低減効果に係るパラメータの調査等を実施した。本章では、吸入被ばくと外部被ばくの寄与を合算した場合の、屋内退避による被ばく低減効果の解析例を示す。

第2章では風速が一定及び変動した際に、被ばく低減係数がどのように変動するかについて述べた。ここでは、第2章での知見を踏まえ、実際の気象条件のもとでの屋内退避の被ばく低減効果を評価するため、OSCAAR コード（本間他,2000; 放射線安全・防災研究グループ,2020）を用いて大気拡散・沈着解析を行い、その結果をもとに被ばく低減係数を評価した。

OSCAAR コードを用いた解析では、図 4.1 に本計算の流れで7日間での積算線量を算出した。ここでは、OSCAAR コードからメッシュ¹²ごとに屋外濃度と風速の時間変化を抜き出し、メッシュごとに自然換気率、沈着率、浸透率を求め、その値を用いてメッシュごとに屋内外の甲状腺等価線量と被ばく低減係数を求めた。本研究では、原子力規制委員会が放射線防護対策を検討するうえでの仮想的な事故と位置付けている事象を前提として評価するため、対象とした核種、気象シーケンス、サイト、ソースタームは原子力規制委員会（原子力規制委員会,2014）が報告した資料を基にした。入力パラメータの情報を表 4.1 に示す。

吸入被ばくの甲状腺等価線量を計算する際、対象核種は甲状腺等価線量に大きな影響を及ぼすヨウ素とテルルのみとした。これらの核種からの甲状腺等価線量への寄与割合は全体の99%に相当するため、全核種を想定した場合と計算される甲状腺等価線量はほとんど変わらない。また、2.2.3 で示した感度解析では、隙間相当面積の方が建蔽率よりも吸入被ばく低減係数に与える影響が大きいことが示された。そこで、本研究では建蔽率を東海村での中央値（15%）に固定し、建築年区分ごとに解析を行った。クラウドシャインとグラウンドシャインに対する被ばく低減係数は建築構造（木造、コンクリート造など）に依存するものの、同じ構造であれば壁の厚さ密度は建築年区分によらずほぼ一定である。本事業では木造家屋に屋内退避した場合の被ばく低減効果の評価するため、クラウドシャインとグラウンドシャインに対する被ばく低減係数は、建築年区分によらずそれぞれ0.9と0.4とした。

屋内退避を2日間した場合の距離別の甲状腺等価線量を図 4.2 と図 4.3 に示す。本計算では、気象シーケンスごとにメッシュごとの屋内外の甲状腺等価線量が計算される。その甲状腺等価線量は、風速や大気安定度の違いにより同じ評価点でも気象シーケンスによって異なる。ここでは、ブルームの中心が通ったと考えられる地点での甲状腺等価線量を評価するため、図 4.2 と図 4.3 を以下のように作成した。

①気象シーケンスごとに同距離で最も高く計算された方位の甲状腺等価線量を抜き出した。
②距離ごとに抜き出した甲状腺等価線量を気象シーケンス間で比較し、昇順に整理した。③ここでは甲状腺等価線量が平均的になる気象条件と高くなる気象条件の両方を把握するため、甲状腺等価線量が50%値と95%値となる気象シーケンスの甲状腺等価線量を図示した。
建築年が新しい家屋ほど、住宅の気密性能が向上し、自然換気率および浸透率が小さくなることによって、甲状腺等価線量が小さかった。

被ばく経路別の線量比率を図 4.4 に示す。図 4.4 は図 4.3 に示された95%値を用いたものである。屋内退避をしない場合、甲状腺等価線量では、吸入被ばくによる線量が全体の約70%、クラウドシャインによる線量が約25%、グラウンドシャインによる線量が5%未満であった。1980年

¹² 距離は0～30 km を12分割、方位は32方位に分割されている。

以前の家屋に屋内退避をした場合、吸入被ばくによる線量が全体の約 60%、1981 年～1992 年の家屋に屋内退避をした場合、吸入被ばくによる線量が全体の約 50%、1993 年以降の家屋と高気密住宅に屋内退避をした場合、吸入被ばくによる線量が全体の約 40%であった¹³。

各条件で求めた屋内退避による被ばく低減係数を表 4.2 に示す。被ばく低減係数は評価点（場所）によって異なるため、甲状腺等価線量で重みづけ平均したものである。吸入被ばくによる被ばく低減係数は 1980 年以前に建築された家屋で 0.56、1981 年～1992 年の家屋で 0.33、1993 年以降の家屋で 0.24、高気密住宅で 0.22 であった。クラウドシャインによる低減係数は 0.9、グラウンドシャインによる低減係数は 0.8¹⁴であった。

本事業では建屋条件（建築年）ごとに吸入被ばくによる甲状腺等価線量を解析したものの、甲状腺等価線量は建屋条件以外にも風速、建蔽率の条件によっても異なることに留意すべきである。例えば、建蔽率が 15% よりも大きい場合には、自然換気率と浸透率がより小さくなり、甲状腺等価線量は図 4.2 と図 4.3 に示した値よりも小さくなり、被ばく低減係数は表 4.2 に示した値よりも小さくなりうる。また、沈着率と浸透率には図 2.24～図 2.26 に示されるように不確かさがあり、その不確かさによって甲状腺等価線量にも不確かさが生じる。本事業では、吸入摂取による甲状腺等価線量への換算係数は成人、粒径 1 μm の条件のものを用いた。しかしながら、この換算係数は年齢、粒径によって異なることも念頭に入れるべきである（なお、平成 29 年度事業では、被ばく低減係数は年齢区分、粒径に依存しないことを報告した）。

¹³ 距離によって比率は異なるため、本文で示した値は各距離における比率の平均である。

¹⁴ グラウンドシャインによる低減効果は 60% と設定している。ここでは 7 日間の積算線量の比を低減係数としており、屋内退避は初めの 2 日間のみである。そのため、屋内退避期間のみ 60% 低減し、そのあとの 5 日は低減効果なしと計算されるため、低減係数は 0.4 ではなく 0.8 となった。

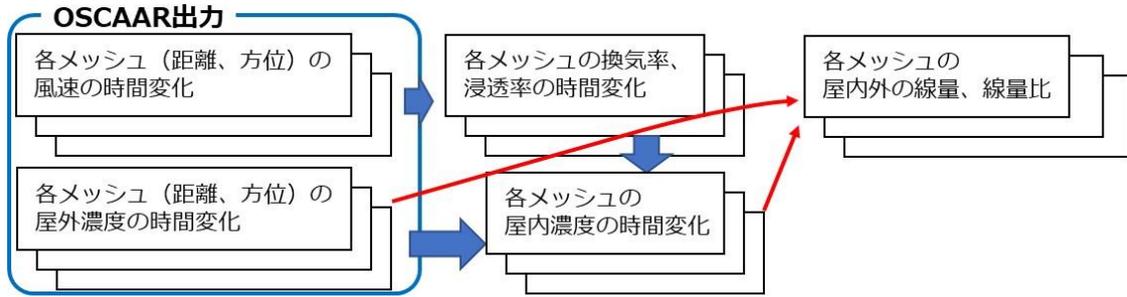


図 4.1 OSCAAR コードの出力値を用いた被ばく低減係数の計算方法の概略

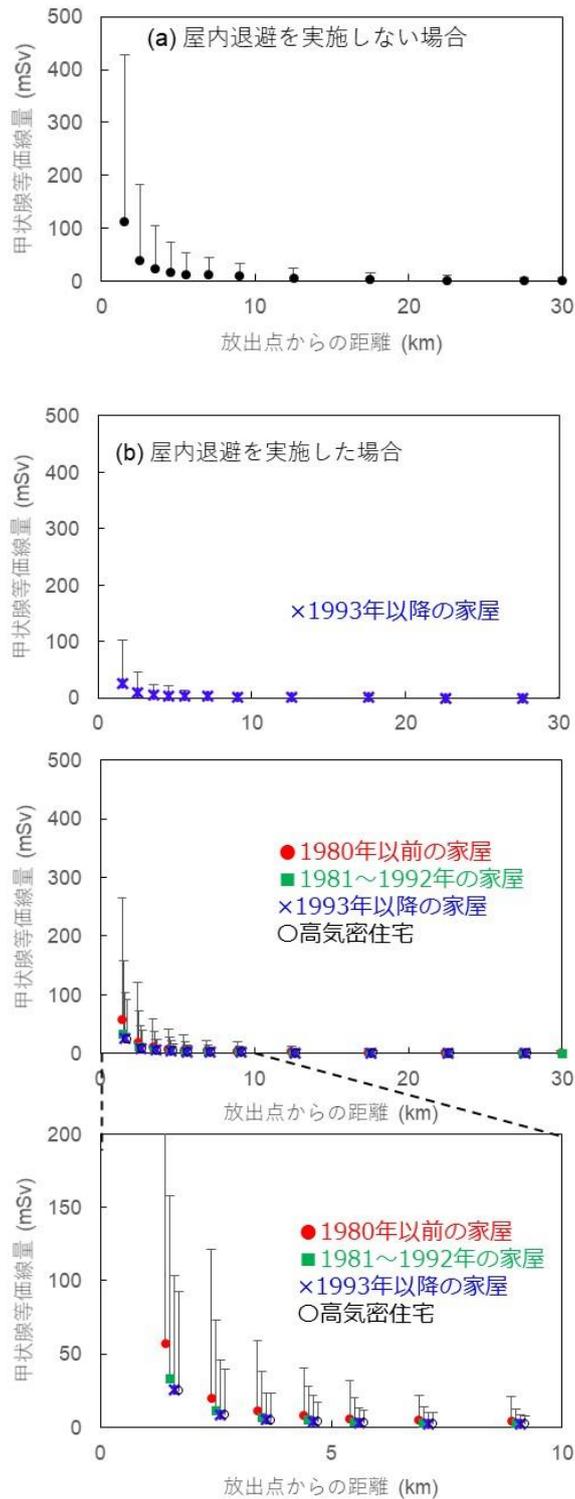


図 4.2 屋内退避を実施しない場合と屋内退避を 2 日間実施した場合の放出点からの距離ごとの甲状腺等価線量（吸入摂取による寄与のみ）。50%値と 95%値を示す。建蔽率が 15%の場合。距離はわざとずらしており、正しい距離は 1981～1992 年の家屋の距離。

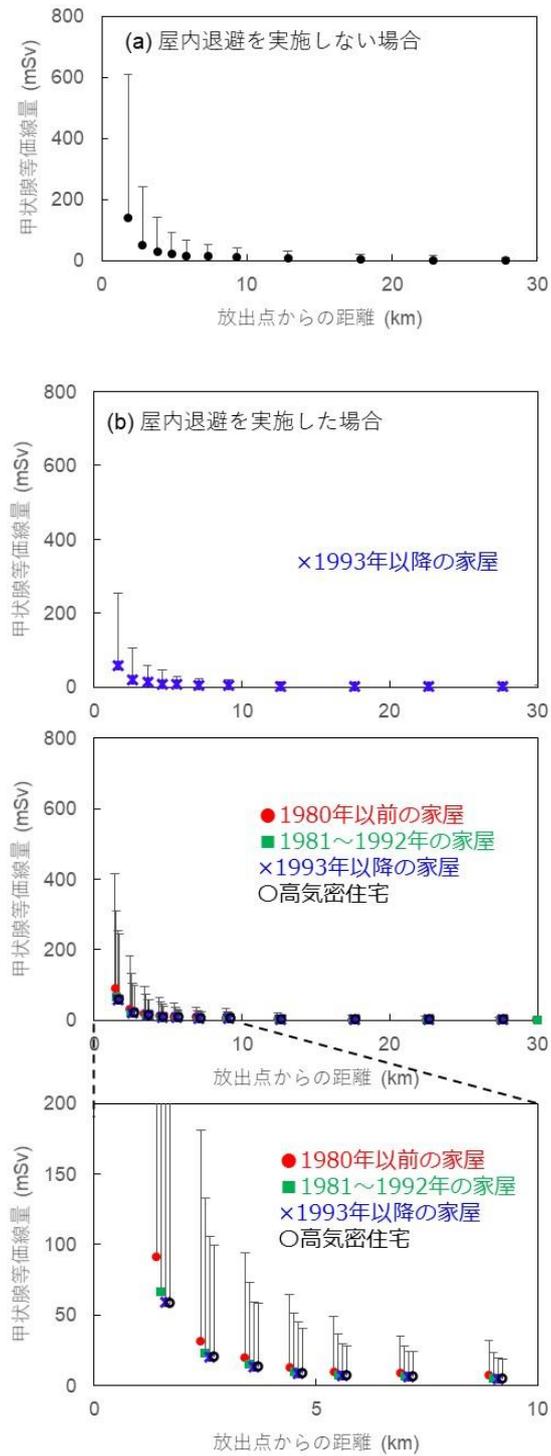


図 4.3 屋内退避を実施しない場合と屋内退避を 2 日間実施した場合の放出点からの距離ごとの甲状腺等価線量 (吸入摂取、クラウドシャイン、グラウンドシャインによる寄与の合算値)。50%値と 95%値を示す。建蔽率が 15% の場合。距離はわざとずらしており、正しい距離は 1981~1992 年の家屋の距離。

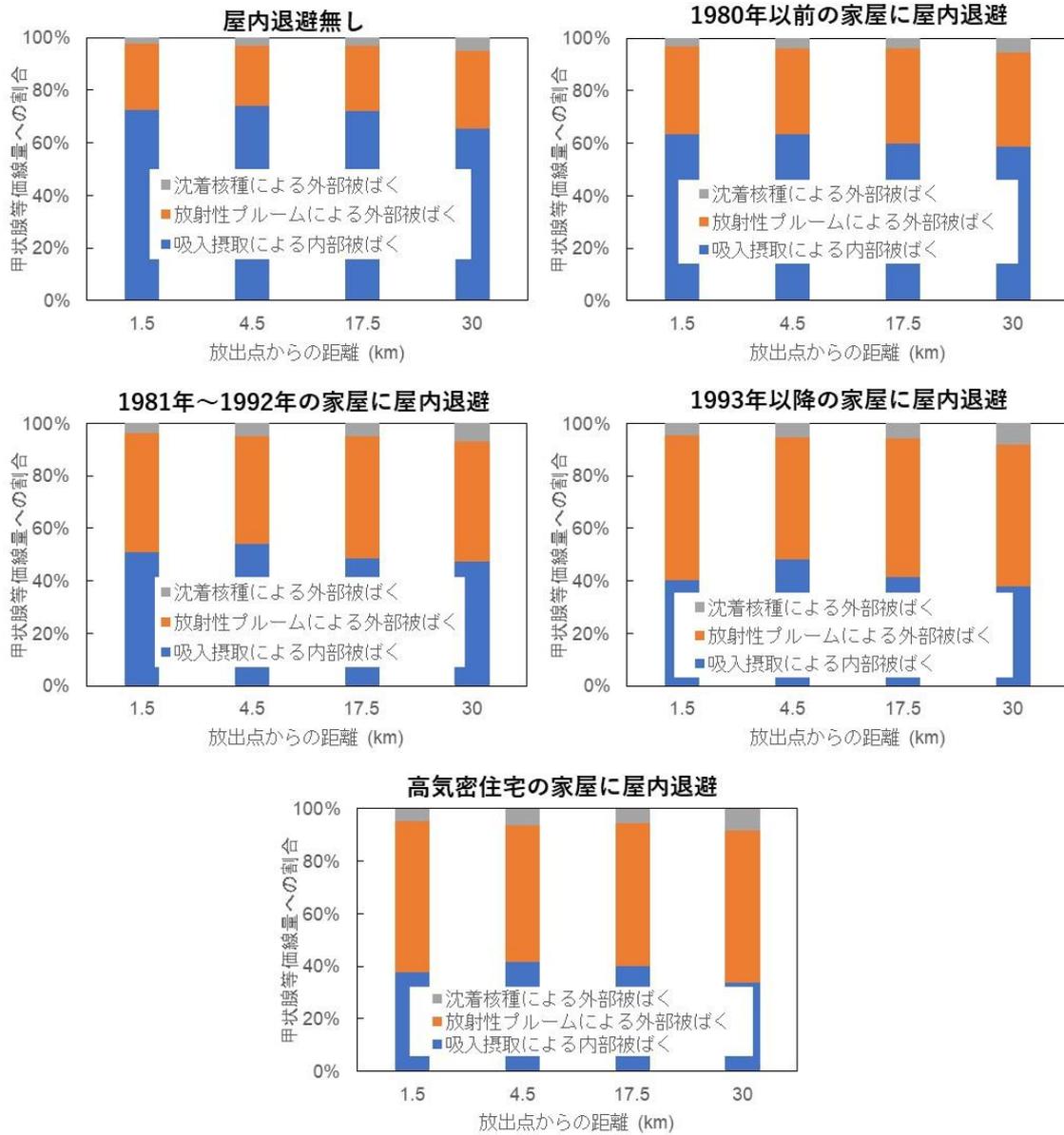


図 4.4 被ばく経路別の甲状腺等価線量比率。95%値の値を利用。建蔽率が15%の場合。

表 4.1 OSCAAR コードで出力されるパラメータを用いた吸入被ばく低減係数の計算条件

事故シナリオ、 ソースターム 関連の条件	計算した線量	7日間での積算線量
	想定する事故	具体的な事故のシーケンスは設定せず
	炉心内蔵量	80万 kWe 級加圧水型軽水炉 (PWR) モデル (事故直前まで定格熱出力 (2,652 MWt) 比 102%の熱出力で 40,000 時間運転を継続した もの)
	格納容器への放出割合	米国 NRC の NUREG-1465 から引用
OSCAAR 関連 計算条件	環境への放出割合	Cs-137 の環境への放出量が 100 TBq となる ように求めた係数を、NUREG-1465 から得ら れた各核種グループの格納容器への放出割 合に乗算して算出。ただし希ガス類につい ては全量が放出と仮定
	ヨウ素比	95 : 5 : 0
	粒子状 : CH ₃ I : I ₂	
	呼吸率、線量係数	呼吸率 : 0.9576 m ³ /h、線量係数: ICRP Publ.71
	放出開始時間	原子炉停止から 24 時間後
	環境中への放出継続時間	5 時間 (一定の割合で放出されると仮定)
	放出高さ	50 m
	被ばく経路	吸入被ばく、クラウドシャイン経路、グラウ ンドシャイン経路
	核種	外部被ばく : 表 2.2 に示した核種 (Ba-139, La- 141, La-142, ガス状 Ru, Sr-92, Y-92, Y-93, 元 素状 I (I ₂) を除く) 吸入被ばく : ヨウ素同位体 (元素状 I 除く)、 テルル同位体
	気象シーケンス数	248 (茨城県東海地区、年間における 1 時間 ごとの気象データ (8760 通り) から 248 通り をサンプリング)
屋内退避関連 計算条件	建物	1980 年以前 1980 年～1992 年 1993 年以降 高気密住宅
	建蔽率	15% (東海村中央値)
	屋内退避継続時間	放出開始から 2 日間
	クラウドシャインに対す る低減効果	10%低減

グラウンドシャインに対 60%低減
する低減効果

表 4.2 建築年区分ごとの被ばく低減係数⁽¹⁾

	建築年区分			
	1980 年以前	1981～1992 年	1993 年以降	高気密住宅
吸入被ばく	0.56	0.33	0.24	0.22
グラウンドシャイン	0.80	0.80	0.80	0.80
クラウドシャイン	0.90	0.90	0.90	0.90
全体	0.65	0.48	0.41	0.40

(1) ここでは7日間の積算線量の比を低減係数として示した。屋内退避は初めの2日間のみであり、この期間中のみ60%低減し、そのあとの5日は低減効果なしと計算されるため、低減係数は0.4ではなく0.8となった。

第4章の参考文献

- Soffer L., Burson S.B., Ferrell C.M., Lee T.Y. and Ridgely J.N. (1995): Accident source terms for light-water nuclear power plants, NUREG-1465, 13.
- 原子力規制委員会 (2014) : 緊急時の被ばく線量及び防護措置の効果の試算について
<https://www.nsr.go.jp/data/000055769.pdf> (最終閲覧日: 2021年3月1日) .
- 放射線安全・防災研究グループ (2020) : OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル, JAEA-Testing 2020-001.
- 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健 (2000) : 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, JAERI-Research 2000-060.