



Japan Atomic Energy Agency

屋内退避による被ばく低減効果の評価

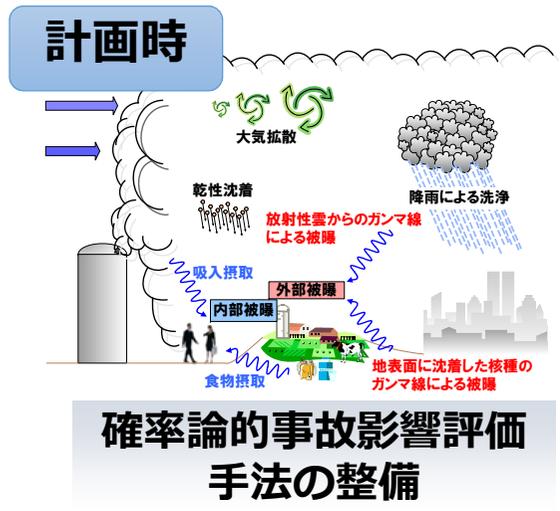
日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
リスク評価研究ディビジョン
放射線安全・防災研究グループ

廣内 淳

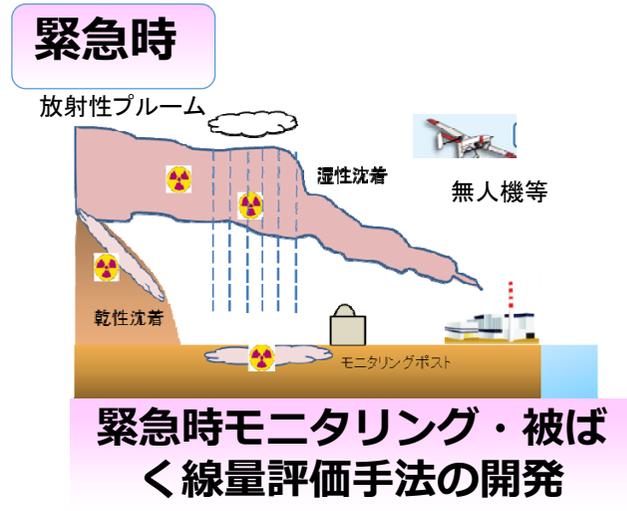
平成29年度 安全研究センター報告会
平成29年11月29日
富士ソフト アキバプラザ

本発表の一部は原子力規制庁からの受託事業の成果である

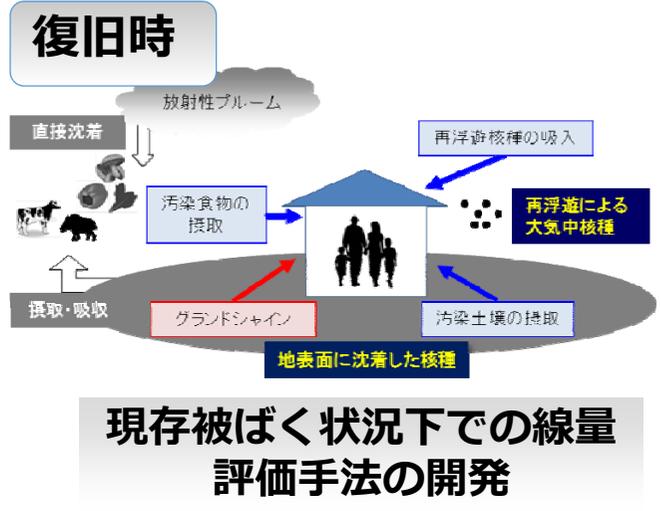
1F事故の知見等に基づき、原子力施設の種々の経路を考慮した住民等の被ばくを含む事故影響評価手法を高度化するとともに、原子力災害時の時間推移を考慮しつつ、原子力防災における最適な防護戦略の立案を可能にする技術基盤を取得する。



- ◆レベル3PRAコードOSCAARの整備
- ◆レベル2コードとの連携強化 等



- ◆緊急時モニタリング手法の開発
- ◆住民・防災関係者等の緊急時被ばく線量評価手法の開発 等



- ◆事故後における住民の被ばく線量評価手法の開発
- ◆居住環境等の不確かさを考慮した確率論的被ばく線量評価・管理手法の開発 等

研究成果であるパラメータ・モデルに関する知見を事故影響評価手法に反映

最適な防護措置の検討に寄与

1 F事故の教訓を踏まえ、原災指針では、

- 5km圏内 (PAZ) は放射性物質放出前に原則として避難
- ただし要配慮者は一時退避施設 (病院等) に退避
- 30km圏内 (UPZ) では原則として**屋内退避 ← 本発表**

車両による避難に関する研究



福島で実施した車両の外部被ばく低減効果の試験



サーキュレーターを用いた車両の換気率試験

車両による避難時の被ばく低減効果の実験

一時退避施設への退避に関する研究

一時退避施設の例

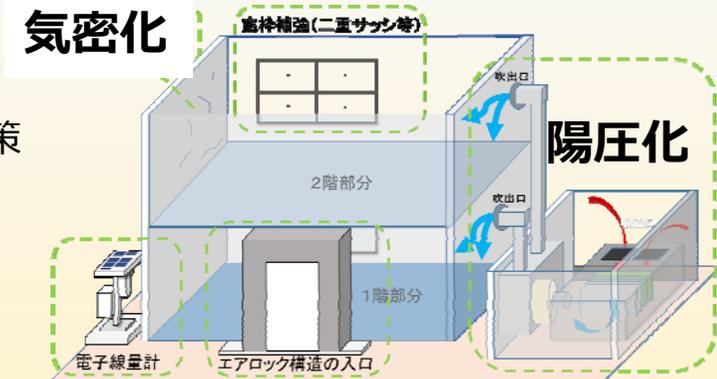


病院



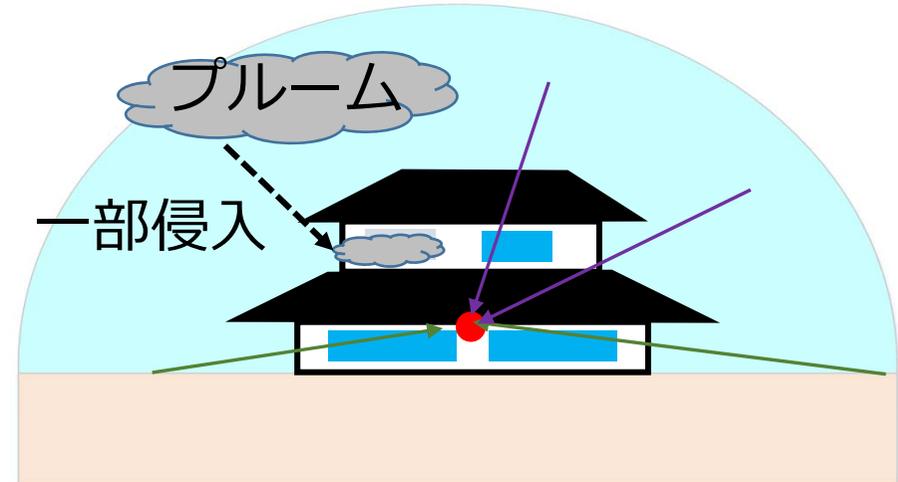
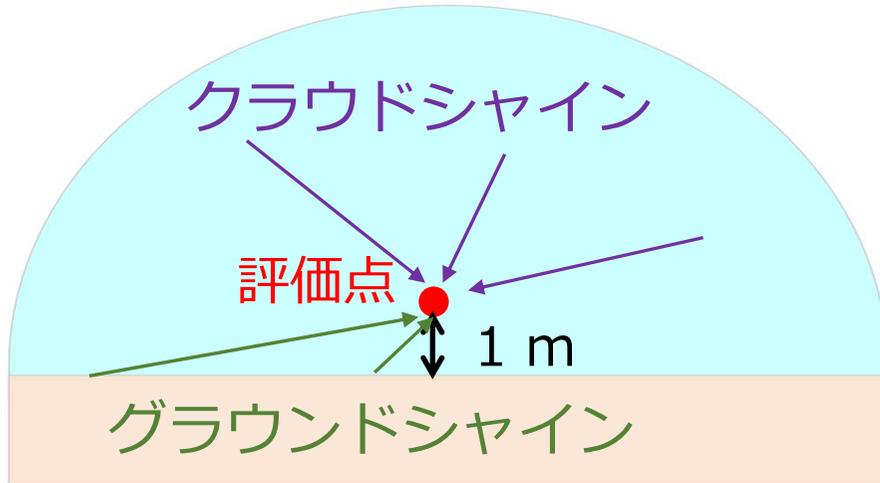
福祉センター

放射線防護対策の例



一時退避施設への退避時における被ばく低減効果の評価

周囲に何も存在しない無限平面



外部被ばく

被ばく低減係数 (DRF)

$$= \frac{\text{家屋内の空間線量率}}{\text{家屋外の空間線量率}}$$

※ 家屋外：地上高さ1 m (無限平面)
家屋内：床上1 m

DRF・・・Dose Reduction Factor

内部被ばく

被ばく低減係数 (DRF)

$$= \frac{\text{家屋内の時間積分濃度}}{\text{家屋外の時間積分濃度}}$$

※ プルーム通過開始時刻から時刻 t までの積分

低減係数が1に近いほど、低減効果は小さい
0に近いほど、低減効果は大きい

防護措置	外部被ばく	内部被ばく
木造家屋への退避	<ul style="list-style-type: none"> 放射線プルームからのγ線等（クラウドシャイン）の影響に対して10%低減 (DRF=0.9) 周辺環境中の沈着核種からのγ線等（グラウンドシャイン）の影響に対して60%低減 (DRF=0.4) 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線プルーム中の放射性物質を呼吸により摂取する影響に対して75%低減 (DRF=0.25)
石造の建物への退避* *コンクリート造は石造よりも高い被ばく低減効果が期待できる。	<ul style="list-style-type: none"> クラウドシャインの影響に対して40%低減 (DRF=0.6) グラウンドシャインの影響に対して80%低減 (DRF=0.2) 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線プルーム中の放射性物質を呼吸により摂取する影響に対して95%低減 (DRF=0.05)

引用) 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 (案), 原子力規制庁<http://www.nsr.go.jp/data/000047953.pdf>

低減効果の元文献 Z. G. Burson and A. E. Profio, Health Phys, 33, 287-299 (1977)
 IAEA, IAEA-TECDOC-995 (1997)
 U.S. Environmental Protective Agency, Protective action Evaluation Part I (1978)

屋内退避の被ばく低減効果

- ◆ IAEA等で報告されている屋内退避の被ばく低減効果は**欧米の家屋が対象**
- ◆ 屋内退避の効果は住居の特性（建築様式等）に依存するため、**日本特有の住居に対応した被ばく低減効果**を評価する必要あり

目的

日本家屋での屋内退避による被ばく低減効果を調査・検討し、防護戦略に必要な技術的知見を提供

内容

- ・ 家屋調査（建築様式、建築年、壁材、壁厚さ・密度、気密性能）
- ・ 家屋内の物質挙動に関する実験的評価と文献調査
- ・ 放射線輸送計算コードを用いた外部被ばく低減効果の計算
- ・ 家屋内外の空気交換を模擬したコンパートメントモデルを用いた内部被ばく低減効果の計算

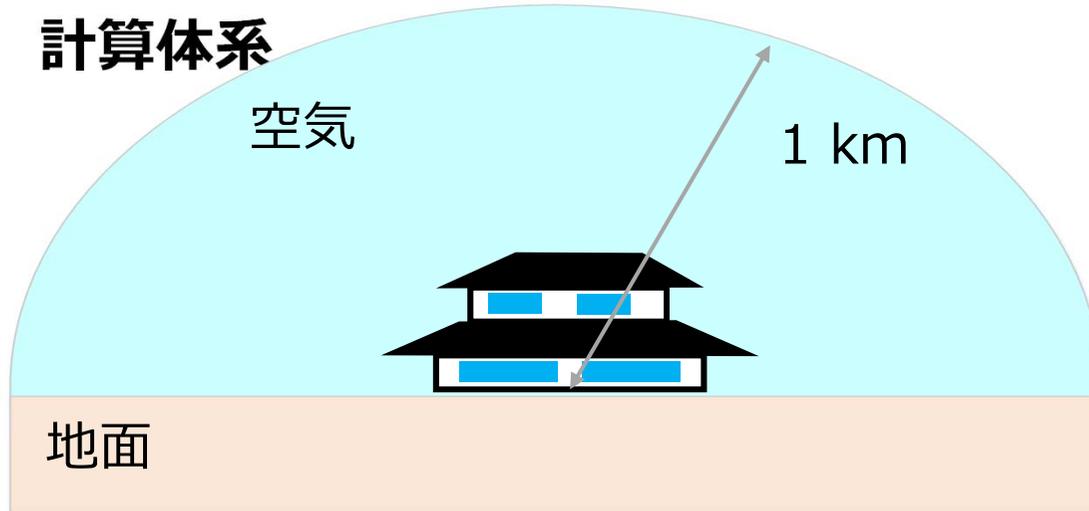
外部被ばく低減効果

- ・ 家屋調査（建築様式、壁材、壁厚さ・密度）

↓
入力データ
↓

- ・ 放射線輸送計算コードを用いた外部被ばく低減効果の計算

計算体系



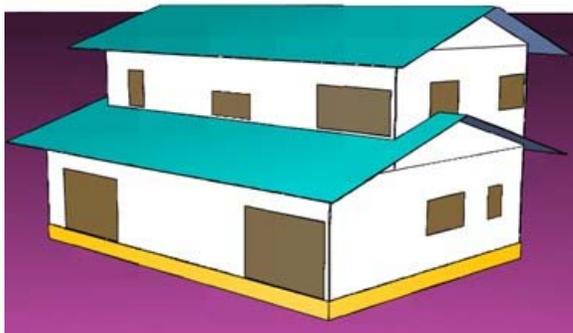
クラウドシャイン：
核種は大気中一様分布

グラウンドシャイン：
核種は地表面上一様分布

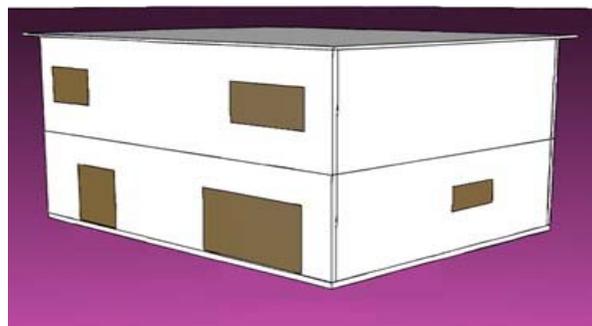
核種は家屋内、家屋直下、
屋根面・壁面上に存在しない

放射線輸送計算コード（PHITS）を用いて、建屋ごとに被ばく
低減係数の家屋内分布を計算 *Particle and Heavy Ion Transport code System

福島県内の家屋調査を基に間取りを設定し¹⁾、
建屋面積と壁・屋根の重量厚さは文献調査、統計調査結果を基に決定



木造住宅



鉄筋コンクリート造住宅

他に集合住宅、体育館、学校、病院も実施

1) 古田琢哉, 高橋史明, JAEA-Research 2014-003 (2014)

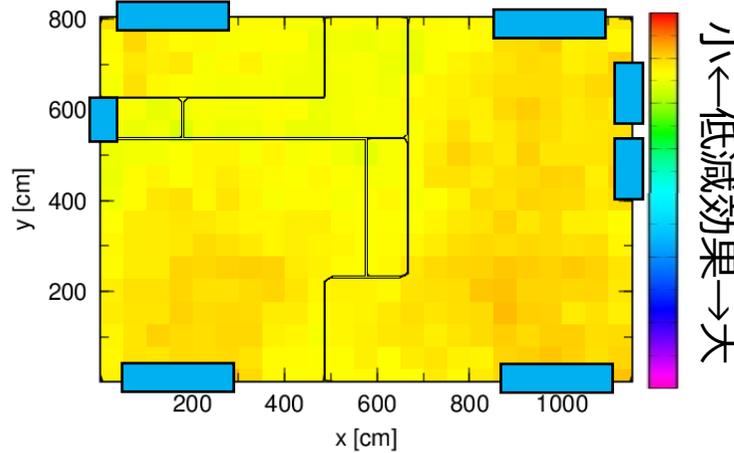
文献調査、メーカーカタログ、統計調査等に基づいた設定

建屋	外装材			内装材			
	名称	厚さ (cm)	密度 (g/cm ³)	名称	厚さ (cm)	密度 (g/cm ³)	重量厚さ (g/cm ²)
木造	窯業系サイディング材	1.6	1.1	石膏ボード張り	0.95	0.7	2.4
	セラミックタイル	0.8	2.1				2.4
	漆喰	2.0	1.0				2.7
	土壁	6.0	1.28				8.1
	木製サイディング材	1.8	0.38	板張り	1.2	0.38	1.1
木造 ¹⁾	-	-	-	-	-	-	≈ 10
コンクリート造	コンクリート	15	2.1	-	-	-	31.5
コンクリート造 ¹⁾	-	-	-	-	-	-	≈ 30

日本の木造家屋の重量厚さは従来設定された木造家屋の重量厚さ¹⁾よりも小さい

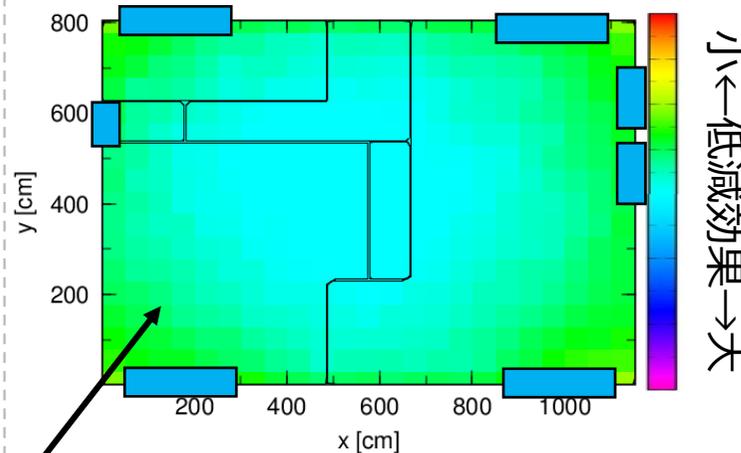
重量厚さ (g/cm²) = 壁の厚さ (cm) × 壁の密度 (g/cm³) 1) Z. G. Burson and A. E. Profio, Health Phys, 33, 287-299 (1977)

クラウド
シャイン



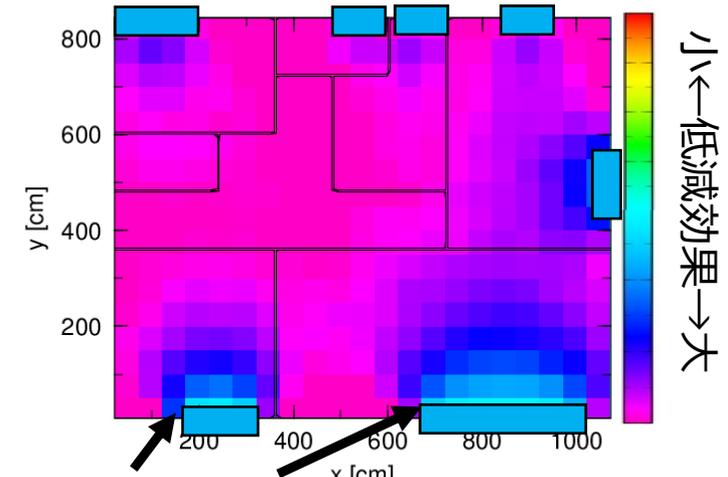
窓

グラウンド
シャイン

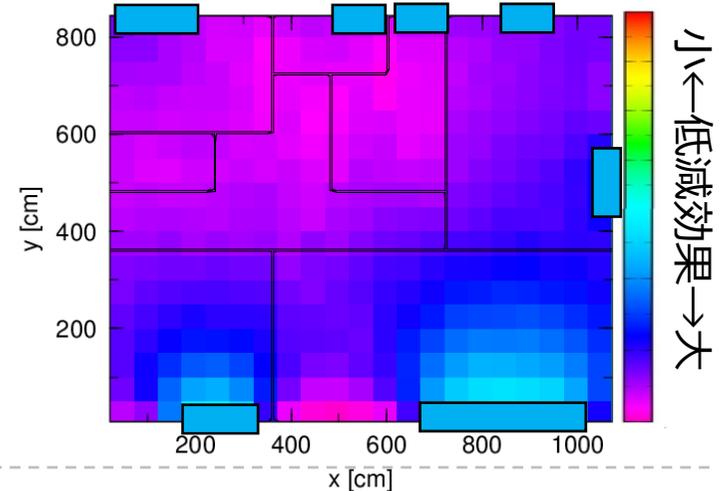


2階建て木造
(1F, 窯業系サイディング材)

中央付近の低減効果は壁際よりも約20%高い



窓付近では低減効果は約半分



2階建てコンクリート造 (1F)

- 日本家屋の調査を行い、日本家屋の外部被ばく低減効果を導出
- 家屋以外にも避難施設となりうる学校、病院、体育館の外部被ばく低減効果を導出

低減効果の家屋内分布の結果

- グラウンドシャイン時、中央付近で壁付近よりも約20% 低減効果が高い
- コンクリート造の建物では、窓付近で低減効果は約半分 等

上記の解析結果を踏まえて、

- ✓ クラウドシャインとグラウンドシャインに関する日本家屋における代表値を検討中
- ✓ 屋内退避時にどういった行動をとれば低減効果が高まるかをとりまとめ、公衆に周知するための資料（パンフレット等）を提案予定

内部被ばく低減効果

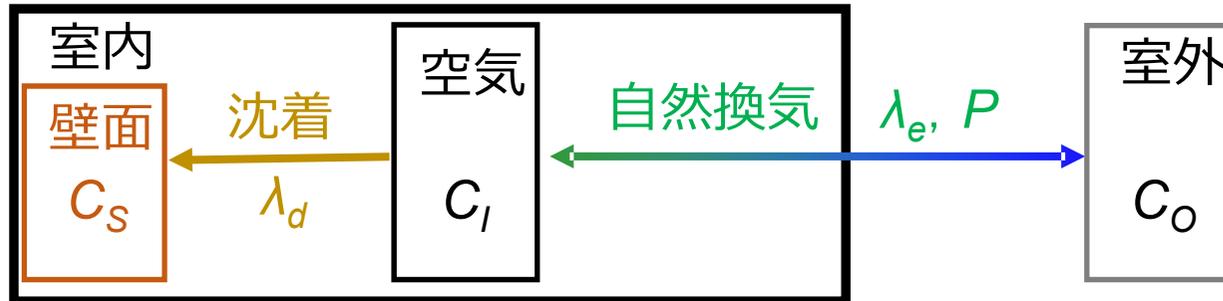
- ・ 家屋内の物質挙動に関する実験的評価と文献調査

↓
入力データ
↓

- ・ 家屋内外の空気交換を模擬したコンパートメントモデルを用いた内部被ばく低減効果の計算

$$\text{被ばく低減係数 (DRF)} = \frac{\text{家屋内の時間積分濃度}}{\text{家屋外の時間積分濃度}}$$

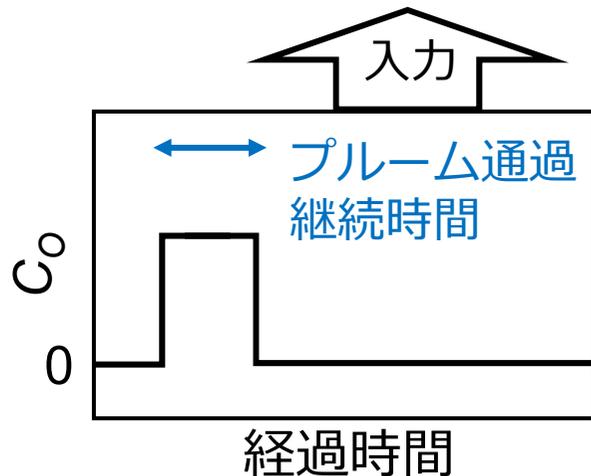
室内外の物質交換



室内の濃度変化

$$\frac{dC_I}{dt} = \underbrace{P\lambda_e C_o}_{\text{侵入}} - (\underbrace{\lambda_e}_{\text{放出}} + \underbrace{\lambda_d}_{\text{沈着}} + \lambda) C_I$$

- C_I : 室内の放射能濃度 (Bq m⁻³)
- C_o : 室外の放射能濃度 (Bq m⁻³)
- P : 浸透率 (-)
- λ_e : 自然換気率 (h⁻¹)
- λ_d : 室内での沈着速度 (h⁻¹)
- λ : 壊変定数 (h⁻¹)



日本家屋に対する代表値を求める必要有り

浸透率：室内に侵入しようとする放射性物質のうち、実際に室内に侵入した放射性物質の割合

Ref.
U.S. Environmental Protective Agency,
Protective action Evaluation Part I (1978)

自然換気率、沈着速度、浸透率に関する得るべき情報

- 日本家屋での値
- 依存性の把握（粒径, 隙間・壁材質*, 建築様式など）

実家屋実験

- 実家屋での値を把握
- 家屋依存性の把握

ラボ実験

- 環境因子コントロール下で家屋以外の依存性の把握

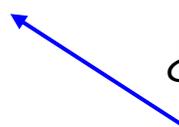
文献調査

*隙間：窓、換気扇など 壁・床材質：畳、フローリング、絨毯など

本発表では

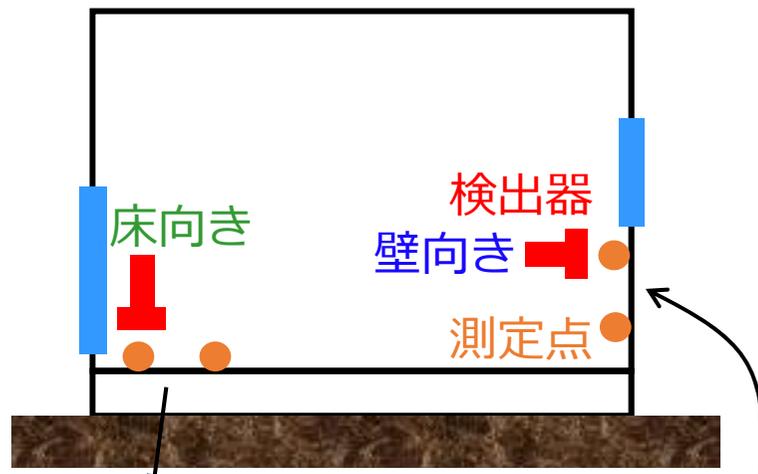
- 実家屋での核種の侵入しやすい箇所、汚染分布の調査
- 自然換気率と浸透率の実家屋実験
- 実験値を基に被ばく低減係数の計算（沈着速度は文献引用）

どんな隙間を想定すべきか



目的：放射性物質の侵入しやすい箇所、家屋内の汚染分布の把握
対象家屋：双葉町、大熊町の8家屋（戸建住宅）

測定方法

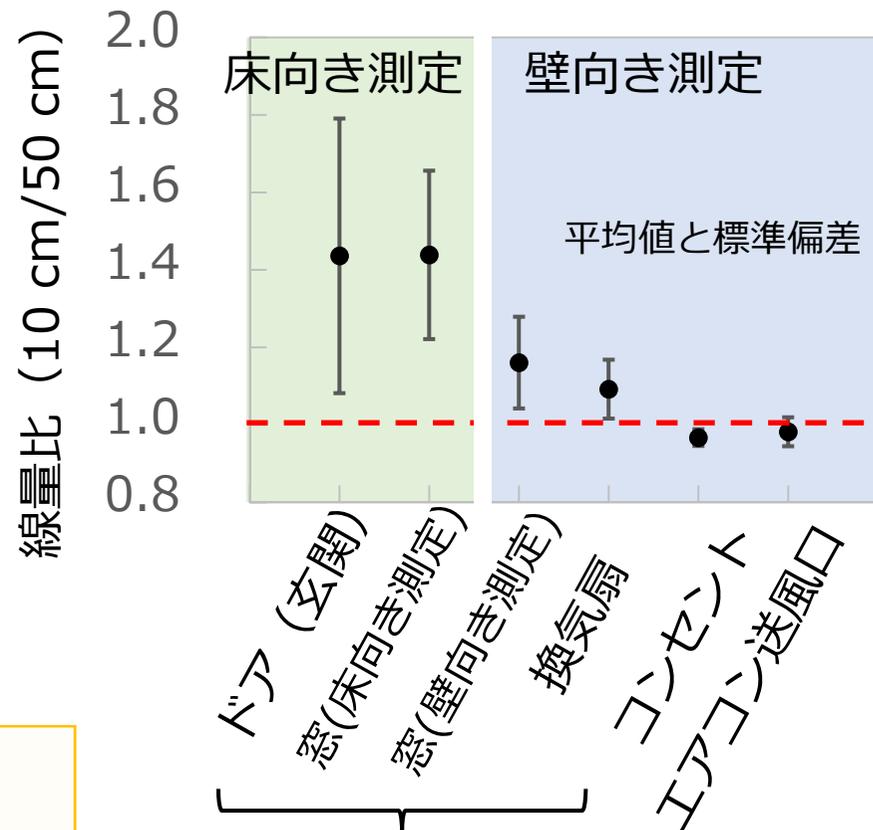


壁から10, 50 cm 隙間から10, 50 cm
 NaIサーベイメーターで隙間付近の線量率を測定

本研究での定義

隙間：窓、ドア、換気扇、
 エアコンの送風口、コンセント
 （建築専門家への聞き取り調査より決定）

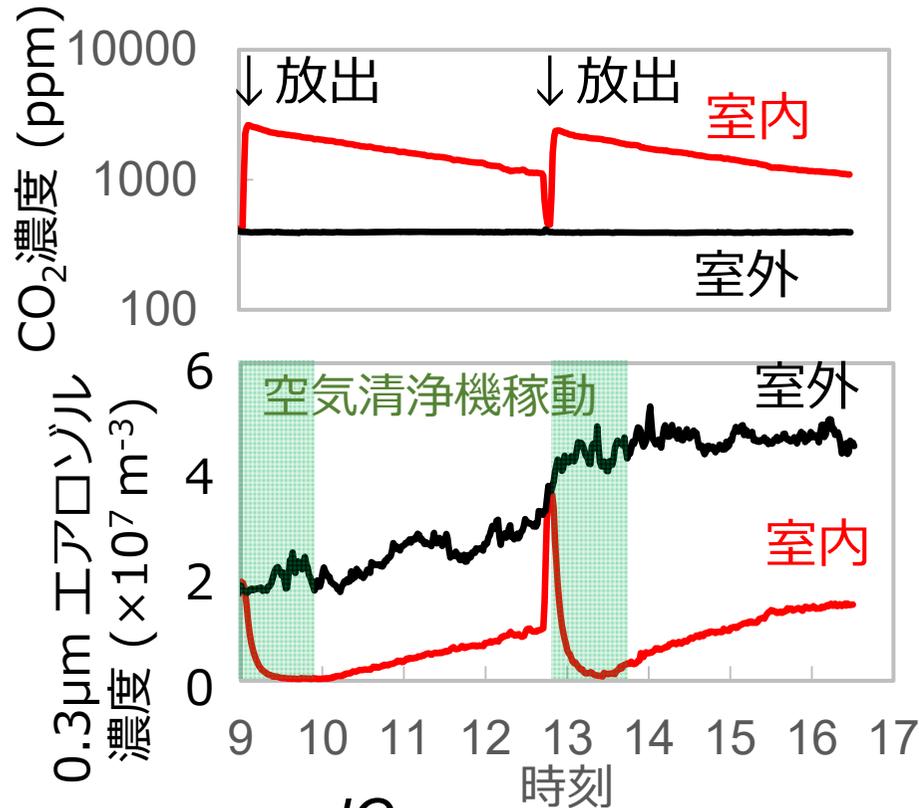
結果



核種の主たる侵入経路の可能性 大

自然換気率 λ_e の導出

対象部屋に約100LのCO₂を散布。
その後のCO₂濃度変化から導出。



$$\frac{dC_i}{dt} = P\lambda_e C_o - \lambda_e C_i$$

※CO₂放出時以外、人の出入りはなし

浸透率 P の導出

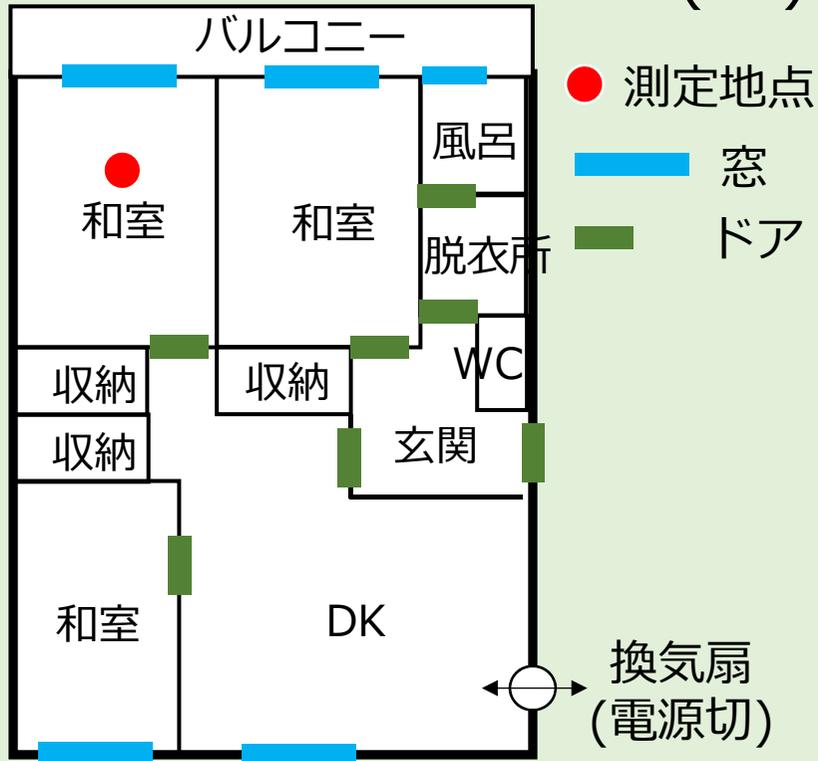
空気清浄機を1時間稼動させ、
沈着項を無視できるよう、室内の
エアロゾル濃度を室外よりも小さくし、
その後の濃度変化から導出



家屋A

建築年：1975

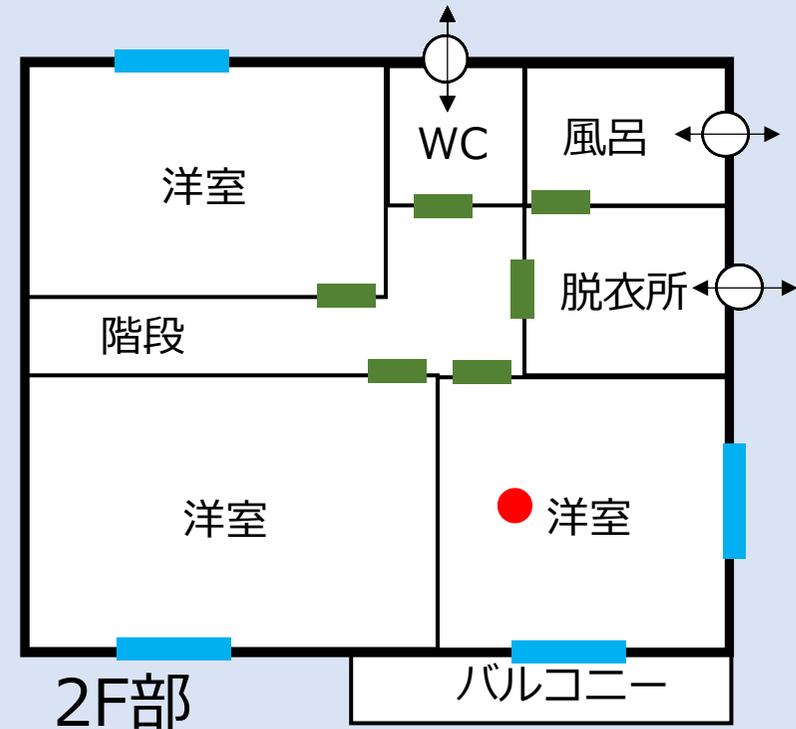
様式：コンクリート造 集合
(3F)



家屋B

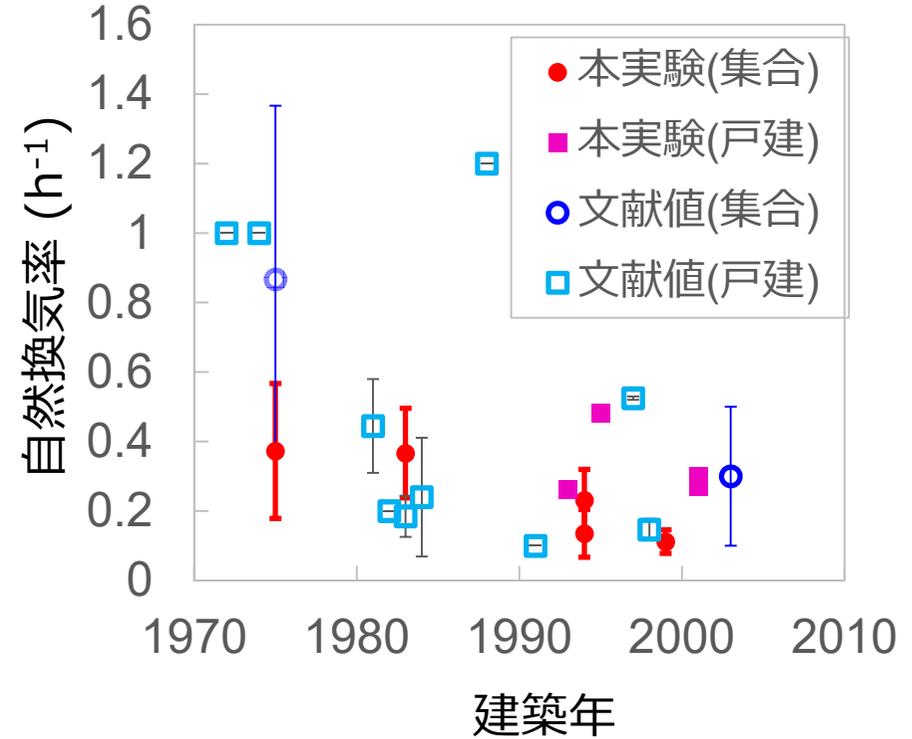
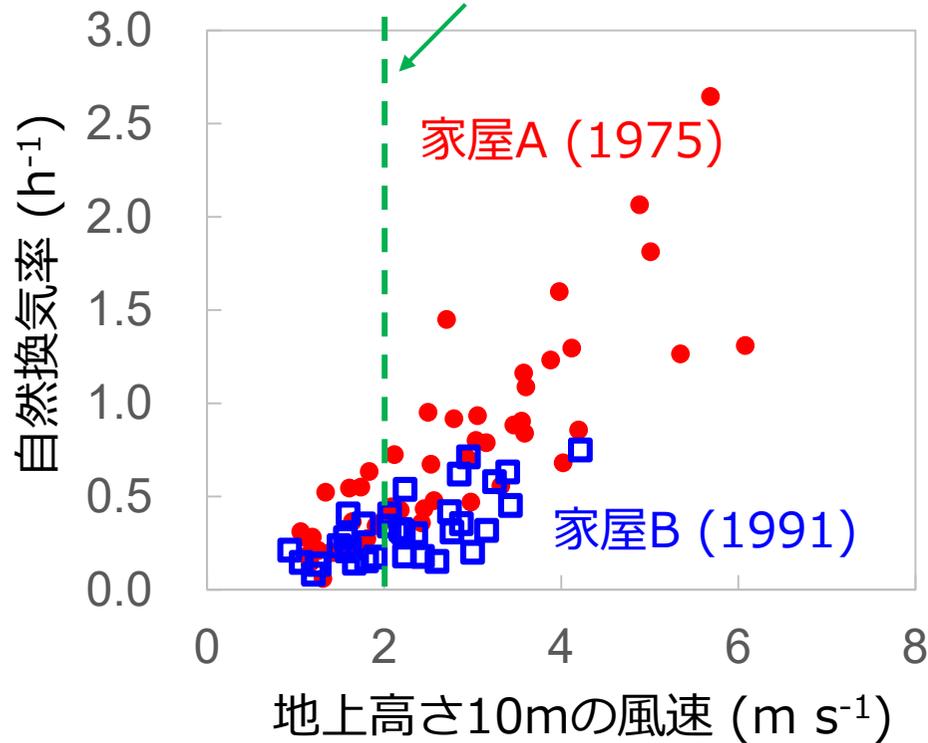
建築年：1991

様式：コンクリート造
メゾネットタイプ (2F)



その他、集合住宅3軒 + 木造戸建4軒で実験中

日本における原子力発電所付近の平均風速

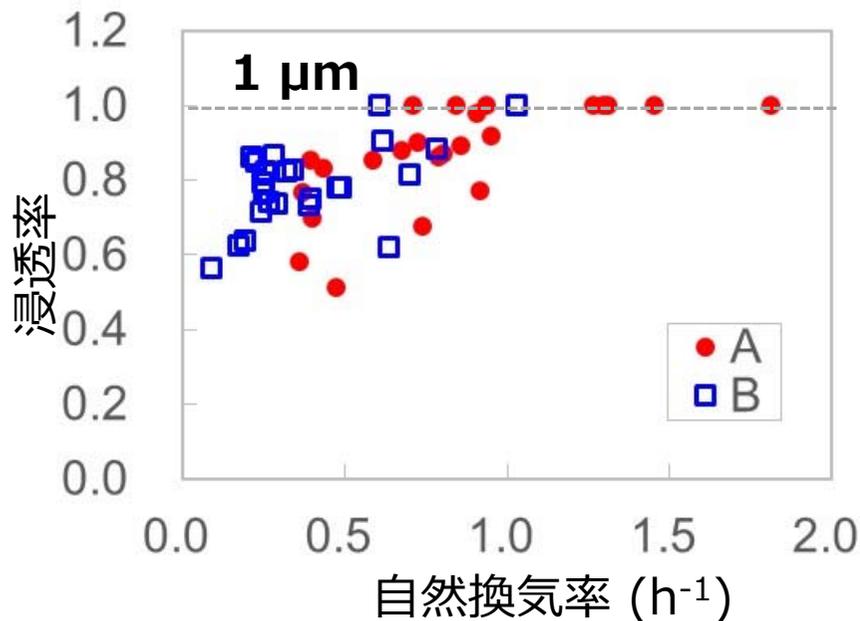
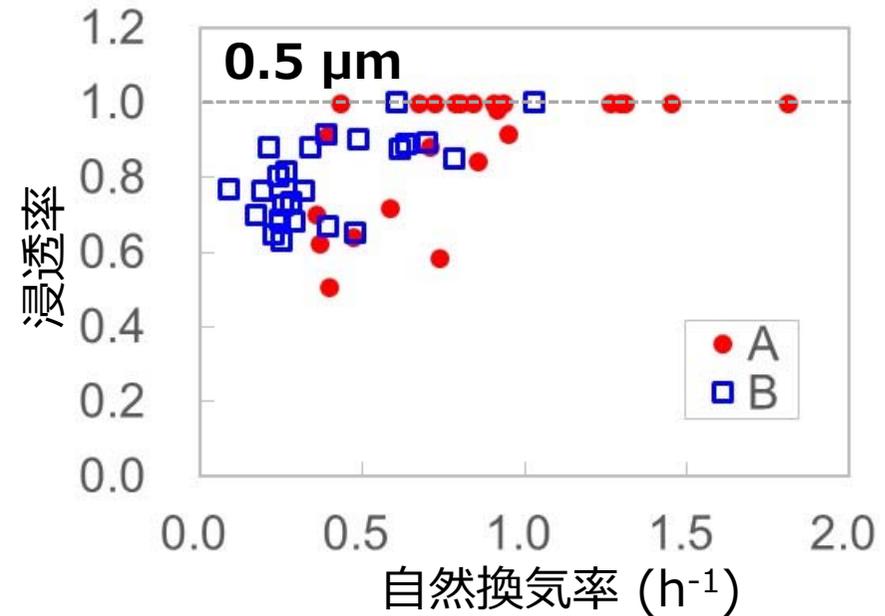
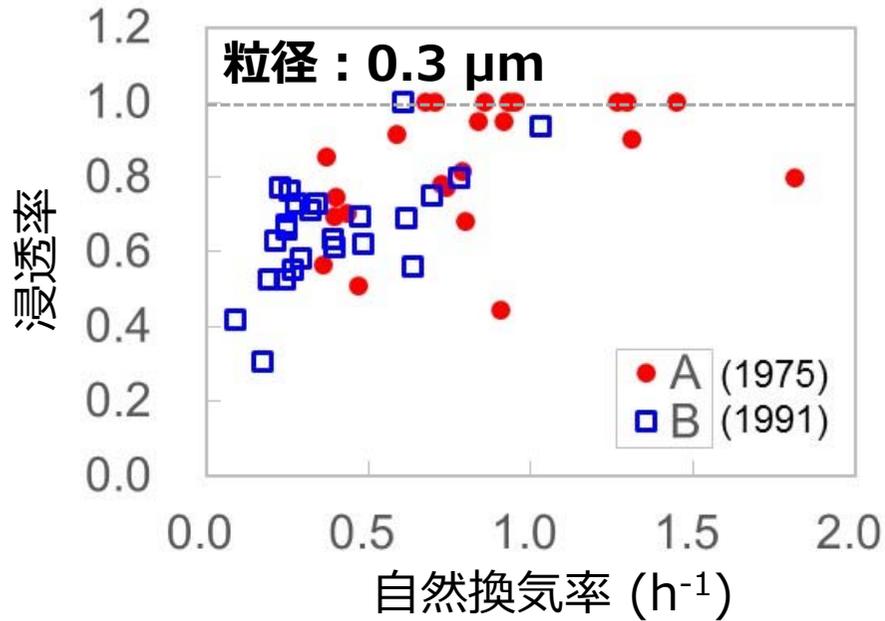


1980年と1992年に、住宅の気密性能に関する基準の更新

- 戸建住宅 : $0.1 \sim 1 h^{-1}$
- 集合住宅 : $0.1 \sim 0.5 h^{-1}$

本実験は風速 $3 m s^{-1}$ 以上を除外して平均値をとった

Ref. 三原他, 日本環境管理学会誌, 52, 166-169 (2004)
 鳥海他, 日本建築学会環境系論文集, 81, 385-391 (2016)
 など



- ✓ 浸透率 : 0.5~1
- ✓ 自然換気率 1 h^{-1} 以上 : 概ね 1
- ✓ 自然換気率 1 h^{-1} 未満 :
自然換気率と正の相関
- ✓ 粒径・家屋依存性 : 見られない

チェルノブイリ事故時等に放出された粒径 : 0.2~1 μm ¹⁾

1) Tschiersch and Georgi, J. Aerosol Sci., 18, 689-692 (1987) など

低減効果に関わる因子の影響を定量的に評価するため、感度解析を実施

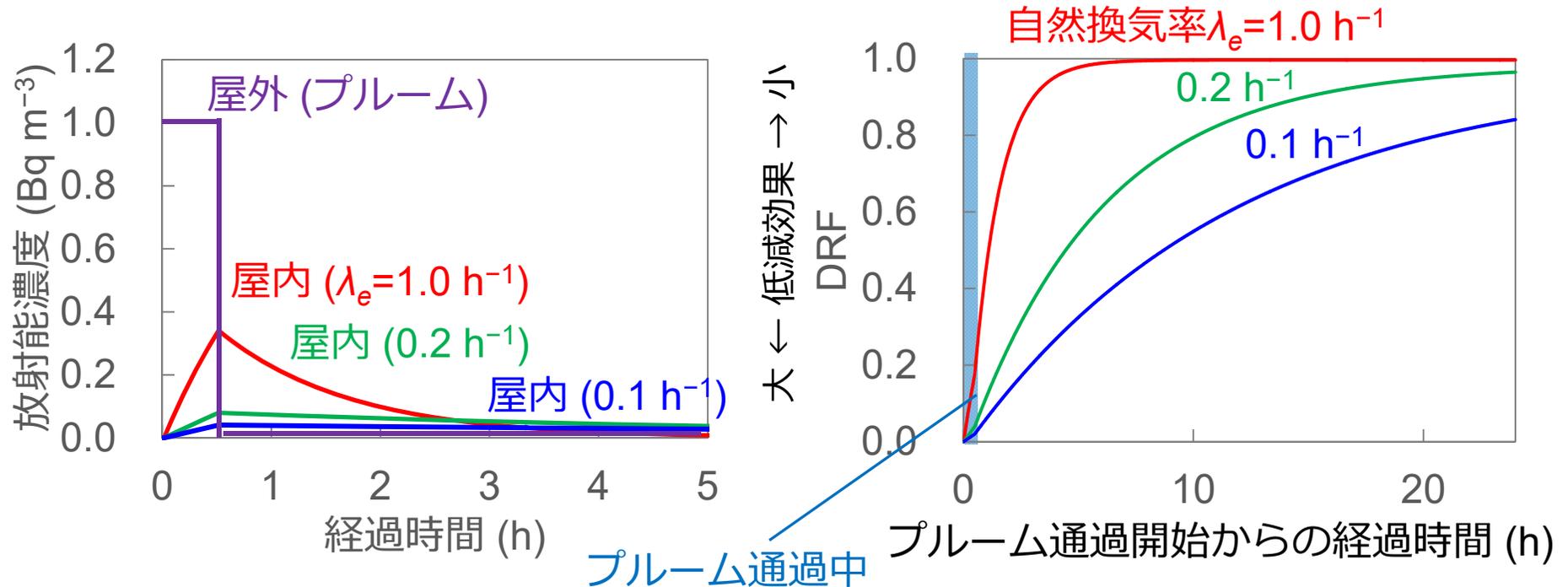
入力パラメータ

変動因子	変動幅	化学形態
自然換気率 (λ_e)	0.1-1 h ⁻¹	
沈着速度 (λ_d)	0.1-1 h ⁻¹ 1)	粒子状
	0 h ⁻¹	ガス状**
浸透率 (P)	0.5-1	粒子状
	1	ガス状**
ブルーム通過継続時間*	30 分	
化学形態	ガス状のみ	
	粒子状のみ	

* 1 F事故時に測定されたサイトから30 km以内のモニタリングポストの線量率変化から決定

** I₂, CH₃I, HOIなど

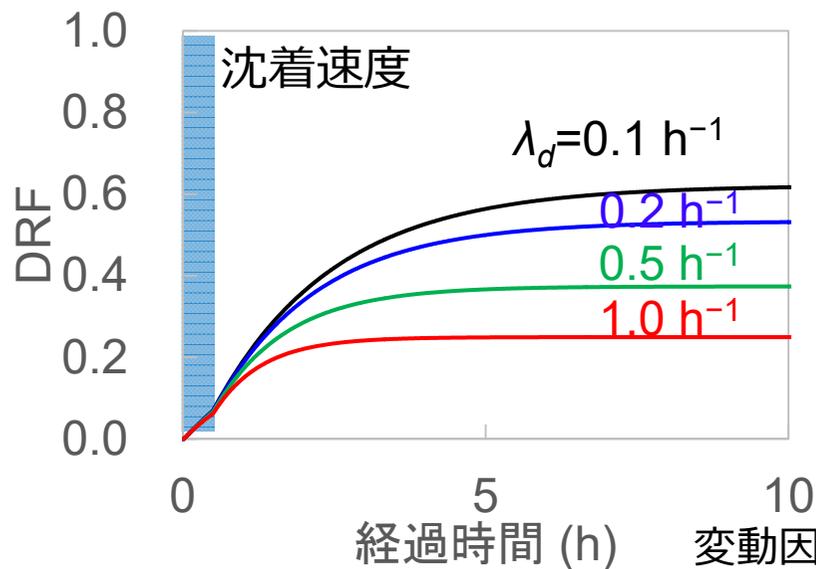
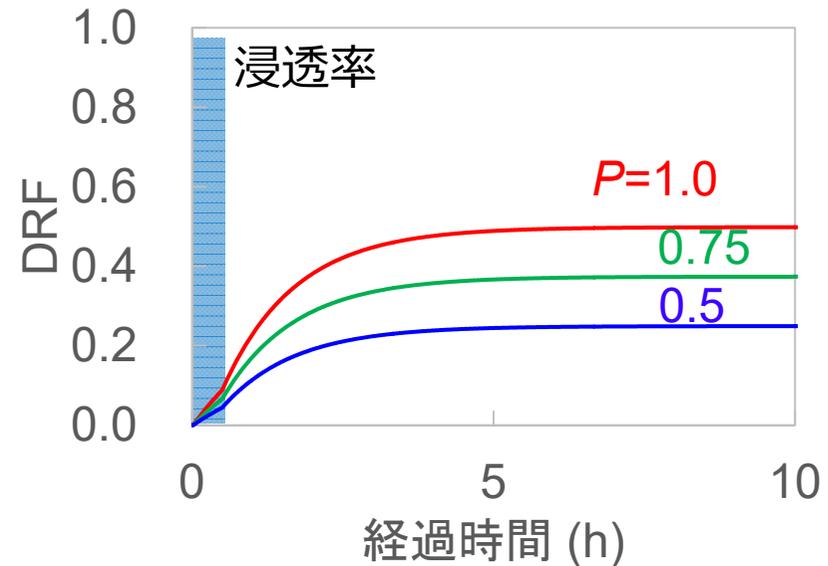
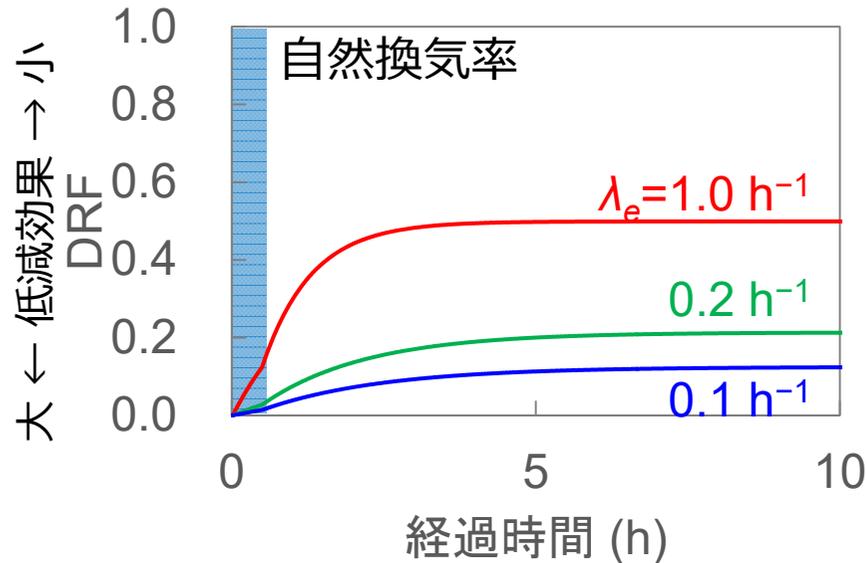
1) 伊藤他, 日本建築学会環境系論文集, 76, 973-979 (2012)など



- ✓ 屋内退避継続時間によって、被ばく低減効果が異なる
- ✓ 近年の日本家屋 (自然換気率 約0.2 h⁻¹)では、プルーム通過後数時間では、被ばく低減効果が大きい

計算条件：
 沈着速度 = 0 h⁻¹, 浸透率 = 1

$$\text{被ばく低減係数 (DRF)} = \frac{\text{家屋内の時間積分濃度}}{\text{家屋外の時間積分濃度}}$$



粒子状物質の場合、低減効果は各因子が複合的に影響を及ぼす。特に甲状腺被ばくを引き起こすヨウ素のうち、 I_2 は壁面へ付着すると報告されているため、**沈着速度と浸透率の値について厳密な評価が必要**。

(保守的な評価では、沈着速度 = 0 h^{-1} 、浸透率 = 1が用いられる)

変動因子以外の計算条件：

自然換気率 = 0.5 h^{-1} 、沈着速度 = 0.5 h^{-1} 、浸透率 = 0.75

実験的に日本家屋での内部被ばく低減効果にかかる因子を調査

自然換気率

- 風速と建築年ごとに自然換気率の関係を導出
- 戸建住宅では $0.1 \sim 1 \text{ h}^{-1}$ 、集合住宅では $0.1 \sim 0.5 \text{ h}^{-1}$

浸透率（粒子状）

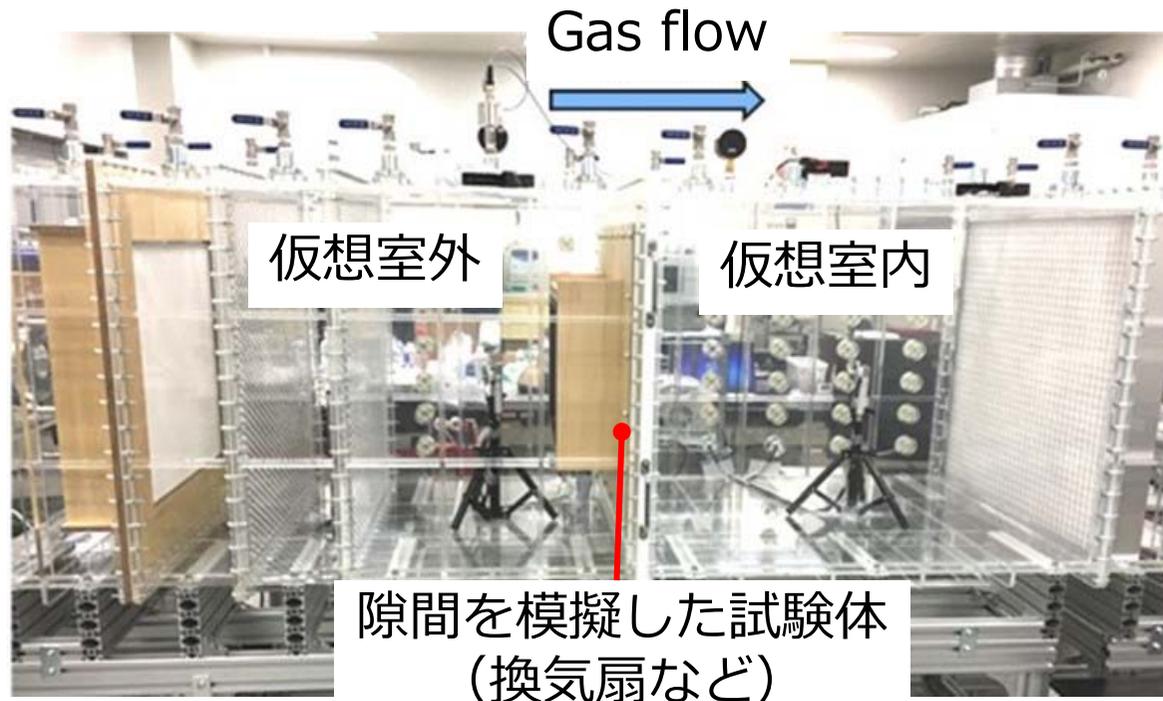
- 実家屋で浸透率を導出（ $0.5 \sim 1$ ）
- 自然換気率 1 h^{-1} 以上で浸透率は概ね1
- 1 h^{-1} 未満では、自然換気率と浸透率は正の相関

感度解析

- ガス状では屋内退避継続時間に依存
- 粒子状では各因子が複合的に影響 等

課題

被ばく低減効果を導出するために必要な核種（特にヨウ素）の浸透率と沈着速度に関してラボ実験等により導出する必要あり



↑ 14ページ目の実験結果を基に試験体を決定

実験の目的

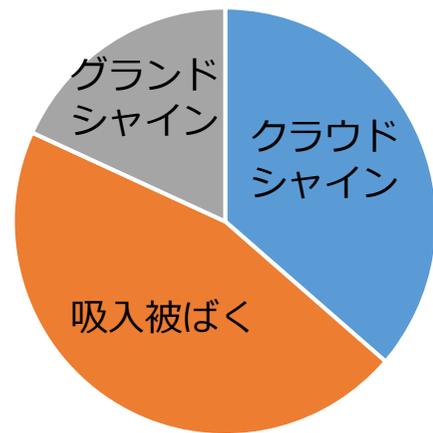
- ヨウ素に関するパラメータを導出
- 日本独特の材質（畳など）の浸透率、沈着速度を導出

実験設備の特徴

- 隙間、壁面材質を変更可能
- ガス流量を自由に変えることができ、様々な換気率下で実験可能

日本家屋を対象に、実家屋試験・ラボ実験・感度解析等を通して外部被ばく、内部被ばくに対する被ばく低減効果の評価を進めた

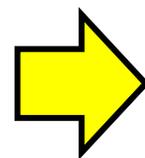
今後の展開



被ばく線量の経路別割合
(例)

- 各経路での低減効果を総合的に評価する必要
- 主要な被ばく経路での低減効果の把握が重要

- ✓ 被ばく低減係数の定量的評価を継続（ラボ実験）、代表値を設定
- ✓ 仮想事故シナリオ、気象条件等の事例を用いた被ばく線量評価



各被ばく低減係数の被ばく線量への影響を定量的に把握

- ✓ 最適な防護措置のための技術基盤を提供

これら成果を、確率論的事故影響解析コードOSCAARに反映し、最適な防護措置の検討に活用していく