

る、(3) 感じる、(4) 判らない

0 : (1)	N=2297,	2.352 ± 0.7817
1 : (2)	N=263,	2.389 ± 0.7128 (vs. 0: p = 0.463)
2 : (3)	N=292,	2.405 ± 0.7883 (vs. 0: p = 0.272)
99 : (4) 未記入		

⑨ Q23 出入り口の開閉 : オリジナル (1) 普段は閉まっている、(2) 開いている時と閉まっている時は半々、(3) ほとんど開いたまま、(4) 判らない

0 : (1)	N=688,	2.470 ± 0.7649
1 : (2)	N=1080,	2.339 ± 0.7307 (vs. 0: p < 0.001)
2 : (3)	N=1116,	2.308 ± 0.8178 (vs. 0: p < 0.001)
99 : (4) 未記入		

⑩ Q24 換気システム : オリジナル (1) ある a: 第1種換気方式(給排気とも強制ファン使用), b: 第2種換気方式(給気は強制ファン使用、排気は自然排気), c: 第3種換気方式(吸気は自然給気、排気は強制ファン使用) (2) ない、(3) 判らない

0. (2)	N=1943,	2.417 ± 0.7702 (vs. 1: p < 0.001, vs. 2: p = 0.04, vs. 3: p = 0.018)
1. (1)a	N=428,	2.191 ± 0.7669
2. (1)b	N=100,	2.252 ± 0.9531 (vs. 1: p = 0.492, vs. 3: p = 0.638)
3. (1)c	N=282,	2.301 ± 0.7571 (vs. 1: p = 0.06)
99. (3) 未記入	N = 225	2.278 ± 0.7784

建造時期が H15 年以降の場合、換気システム (1a,1b,1c) を導入した家屋は全体の 66.2%をしめ、30%は 1a であるが、建造時期 S64-H14 年では、その値は 28.9%、16.5%に低下する

## B. 回帰分析

ステップワイズ投入法

全体

被説明変数：対数変換屋内ラドン濃度

	非標準化係数	SE	p
季節	-0.627	0.028	<0.001
住宅形式	0.541	0.030	<0.001
建造時期	0.131	0.013	<0.001
窓の開閉	-0.078	0.014	<0.001

住宅構造別

被説明変数：対数変換屋内ラドン濃度

住宅構造		非標準化係数	SE	p
木造・2x 4	季節	-0.653	0.034	<0.001
	建造時期	0.142	0.015	<0.001
	窓の開閉	-0.076	0.017	<0.001
	住宅形式	0.268	0.095	0.005
鉄筋コン クリー ト、煉 瓦、コン クリート ブロック	季節	-0.584	0.053	<0.001
	建造時期	0.110	0.027	<0.001
	窓の開閉	-0.091	0.026	0.001
	住宅形式	0.392	0.054	<0.001

## 資料4. 米国環境保護庁EPA ラドン低減に関する消費者ガイド

(ラドン低減化技術に関する節と表のみ収録)

### ラドン低減技術

あなたの家のラドン濃度を下げするために施工業者が選択できる方法は、いくつかあります。いくつかの技術は、ラドンが家に侵入するのを防止するものですが、他の技術はラドンが家に入ったあとで減らす技術です。EPAは、一般に、ラドンの侵入を防止する方法を推奨します。例えば、土中吸引 (soil suction) は、家の下からラドンを吸引して、1本あるいは複数本のパイプを使って屋根の上に発散させる手法で、ラドンは急速に希釈され、家に侵入するのが妨げられます。

お宅の構造についてどんな情報でも、施工業者が最適のシステムを選ぶのに役立ちます。施工業者はお宅を目視点検して、お宅の特徴を考慮したシステムを設計します。目視点検だけでは十分な情報が得られない場合、施工業者はあなたの家に最適なラドン低減システムを開発するために施工の最初の段階で診断的検査を行う必要があるかもしれません。たとえば、あなたの施工業者は、空気の供給源と移動方向を見つけるために、化学煙を使うことがあります。すなわち、穴、排水管、溜りや割れ目に少量の煙を注入して、気流の源と方向を学ぶのです。気流の発生源は、ラドンの移動ルート可能性があります。ラドン低減オプションを考慮するとき、施工業者は燃焼機器の排気ガスや煙の逆流に対する懸念を抱く場合があります、住宅所有者が燃焼機器を資格のある検査官にチェックしてもらうよう勧めるかもしれません。

もう一つの種類の診断的検査は「地中伝播試験 (soil communication test)」です。この検査では、掃除機と化学煙を使い、家の土台の下の1ポイントからもう一つへどれくらい簡単に化学煙が移ることができるかを調べます。掃除機ホースを1つの小さな穴に挿入して、第2の小さな穴で化学煙を使うことによって、施工業者は煙が掃除機の吸入によって第2の穴に吸引されるかどうか見ることができます。地中伝播試験の間に煙の挙動を見ることにより、施工業者は特定のラドン低減システムがよくお宅で働くかどうか判断することができます。

診断的検査が必要であるかどうかは、例えば土台の設計とか家の下の物質の種類などのお宅に特有の詳細によって決定されます。また、類似した家と類似したラドン測定結果に対する施工業者の経験とによっても、診断的検査が必要かどうか決まります。

## 家の土台のタイプ

あなたの住宅タイプによって、最適なラドン低減システムは変わります。

家は、通常、その土台設計によって分類されます。例：地下室型、土間床型（地表面にコンクリートを流し込んだ土台）、または床下空間型（一階の床下に浅い空間がある）若干の家には、複数の土台設計が組み合わさっています。たとえば、家の一部の下に地階を持って、残りの家の土台は土間床型か床下空間型であることは、良く見受けられます。これらの状況では、ラドン濃度を4pCi/L以下に下げするために複数のラドン低減技術の組合せが必要かもしれません。

ラドン低減システムは、住宅土台設計によってグループ化することができます。

あなたの家が上記の土台設計のどの種類かを確認して、どのラドン低減システムがお宅のために最適か見つけて下さい。（日本では、気密防湿を強化した土間床型と床下空間型の折衷型である基礎断熱型がある。）

## 地下室と土間床型家

地下室または土間床をもつ家では、ラドンは通常4種類（土間床下吸引、排出タイル吸引、排水桝吸引およびブロック壁吸引）の土中吸引法のうちの1つによって低減されます。

能動的な土間床下吸引（別名土間床下陰圧法とも呼ばれる）は、最も一般的で、通常最も信頼できるラドン低減方法です。一つ以上の吸入パイプは、床を通して土間床下の砂利または土に挿入されます。吸引パイプは、家の外から土間床の下に挿入されます。必要な吸入パイプの数と位置は、空気が土間床下の砂利や土の中をどれくらい簡単に移動するか、またラドン源の強さ次第で変わります。しばしば、一つの吸引点だけで十分です。施工業者は、通常、目視検査や診断テストあるいは経験から、この情報を得ます。吸引パイプに接続したラドン排気ファンは、家の下からラドン・ガスを吸引して、外気にそれを放出すると同時に土間床下に陰圧を生みます。ファンの一般的な設置場所は、空調していない家やガレージ・スペース（屋根裏を含む）と家の外です。

受動的土間床下吸引は、能動的な土間床下吸引と同じ手法ですが、家の下からラドンを吸引するのにファンの代わりに自然の圧力差と気流に頼ります。受動的土間床下吸引は、通常、新しく建設された家（14ページを見る）に設置されるラドン防止措置と合わせて用いられます。受動的土間床下吸引は、通常、能動的土間床下吸引ほど効果的に高いラドン濃度を減らすことが出来ません。

若干の家は、家の土台下の水を取り除くために、排水タイルか有孔パイプを設置しています。これらのタイルまたはパイプの吸引は、ラドン濃度を減らすことにしばしば効果的です。土間床下あるいは排水タイル吸引の1つのバリエーションとして、排水枡吸引があります。

しばしば、地階のある家には、望まれない水を取り出すために排水ポンプが設置されています。この排水枡に蓋を被せて、水を連続的に吸引するようにすれば、それはラドン吸引パイプの設置場所になります。

ブロック壁吸引法が、地階の土台が中空ブロックの壁でできている場合に使うことができます。この方法は、土間床下吸引と類似して、ラドンを除去して、ブロック壁を減圧します。この方法は、土間床下吸引と組み合わせてしばしば使われます。

#### 床下空間を持つ家

床下空間を持つ家で効果的にラドン濃度を減らすためには、地面を高密度プラスチック・シートで覆うことが必要です。換気パイプとファンを使って、シートの下からラドンを吸引して、屋外に放散することが出来ます。土中吸引のこの形は、膜下吸引法と呼ばれています。適切に適用された場合、この方法は、床下空間を持つ家のラドン濃度低減で最も効果的な方法であります。もう一つの次善のオプションは、換気扇を使って能動的に床下空間の減圧をはかる方法です。この技術は、一般に膜下吸引法と同様には機能しません。そして、燃焼機器からの排ガスや煙の逆流に対する特別な注意を必要としますし、空調した空気が漏れるために、光熱費が増加するかもしれません。

場合によっては、受動的に（ファンを使わずに）あるいは能動的に（ファンを使って）床下空間を換気することによって、ラドン濃度を下げることができます。床下空間の換気は、土から家へのラドン吸入を減らし、そして、床下のラドンを希釈することによって屋内のラドン濃度を下げます。受動的な床下空間の換気は、換気口を開けるか、換気口を追加設置することによって行います。能動的な換気は、自然な空気循環に頼る代わりに、床下に空気を吹き込むためにファンを利用します。より寒い気候の地域では、受動的および能動的床下空間の換気を実施する場合には、床下の水道管、下水道、その他の機器の寒冷対策をとる必要があるかもしれません。

これらの換気オプションは、家の光熱費の増加をもたらします。

## 他のタイプのラドン低減方法

どんな種類の家でも使うことができる他のラドン低減技術を以下に記します。これらは、密閉、家・部屋の加圧、熱回収換気と自然な換気です。

土台の隙間やその他の開口部を密閉することは、ラドン低減の最も基本的な方策です。隙間を密閉することは、ラドンの屋内への流入を制限し、それによって他のラドン低減技術をより効果的で経済的にします。そして、空調した空気の損失を減らします。隙間の密閉は、それ単独ではラドン濃度を下げることができなかつたり、一貫した結果を示さなかつたりしますので、EPAは、ラドンを低減するために単独でこの手法を採用することを推薦していません。ラドンが侵入してくる場所を確認して、そこを永久に封をすることは難しいのです。通常の家屋では、常に新しい侵入ルートができてしまい、また封入した古いルートが再開してしまいます。

家・室の加圧は、地階または生活空間に上階や屋外からファンを用いて空気を送り込むことによって達成します。これは、ラドンが家に侵入するのを防ぐために十分な圧力を、最も低い層の屋内（たとえば地階で）に加えようとするものです。この技術の効果は、住宅構造、気候、家の他の機器と居住者ライフスタイルによって制限されます。ラドンを中に入れない十分な圧力を維持するために、通常の入退室時を除いて、最も下層階のドアと窓は、閉じておかなければなりません。この手法は、一般に、より多くの外気を屋内に導き、そして、それは結露と腐朽を招き、エネルギー浪費を引き起こすこととなります。

従って、他のより一般的な技術がラドンを十分に低減しなかったあと、この技術は考慮されるべきでしょう。

熱回収換気装置（HRV）（空気-空気熱交換器とも呼ばれている）は、屋内の換気量を増やし、ラドン濃度を減らす目的で設置することができます。HRVは、熱するか、冷やした空気を排出する際に、この排気を使って、取り入れる外気を暖めたり冷やしたりして、換気を増やします。HRVは、あなたの家の全部または一部を換気するように設計することができますが、地階だけを換気するのに用いられると、ラドン濃度を減らすのにより効果的でしょう。きちんとバランスが保たれて、維持されるならば、HRVは年を通して恒常的な換気レベルを確実に維持します。HRVは、他の屋内の汚染物質を持っている家では、空気質を改善することが期待されます。HRVは、冷暖房経費を確実に増大させますが、熱回収（16、17ページを見る）のない換気ほど増大しないでしょう。

総ての家ではある程度の自然換気が起きています。下層のフロアで窓やドアや換気口を開けることにより、家の換気量は増えます。換気の増加は、外気とラドンを含んでいる屋内

の空気を混ぜ合わせて、ラドン濃度を低下させる事ができます。しかし、一旦窓やドアや換気口が閉じられるならば、しばしばラドン濃度はおよそ12時間以内に前の値に戻ります。どんな種類の家の自然な換気でも、以下の欠点のため、一時的なラドン低減アプローチだと考える必要があります。その欠点とは、空調した空気の漏出とそのため不快、取り込んだ外気を空調するための更なる経費、そしてセキュリティ懸念などです。

### ラドン低減装置設置・稼働のコスト(EPA消費者ガイドライン)

技術	典型的ラドン低減率	典型的設置コストの範囲(施工業者)	典型的稼働コストの範囲:ファンの電気代、冷暖房費の増加(年)	コメント
土間床下吸引法(土間床下陰圧法)	50-99%	\$800-2500	\$50-200	土間床下の空気が容易に移動する場合は、最も良く機能
受動的土間床下吸引法	30-70%	\$550-2250	若干の冷暖房費増加	寒い地域でより効果的。能動的土間床下吸引法より効果悪い
排水タイル吸引法	50-99%	\$800-1700	\$50-200	部分的あるいは完全な排水タイルループのどちらでも効果
ブロック壁吸引法	50-99%	\$1500-3000	\$100-400	中空ブロック壁の家屋で応用可。主要な開口部を塞ぐ必要
排水柵吸引法	50-99%	\$800-2500	\$50-250	土間床下の空気が容易に排水柵に移動する場合は、最も良く機能
床下空間膜下減圧法	50-99%	\$1000-2500	\$50-250	寒い地方では、自然換気より熱損失が少ない

床下空間の自然換気	0-50%	無し、換気口追加の場合には\$200-500	若干の冷暖房費増加	コストは変動する
ラドン侵入経路の密閉	コメント参照	\$100-2000	なし	通常、他の技術と組み合わせて実施。適切な材料と施工が重要。
屋内(地下室)加圧法	50-90%	\$500-1500	\$150-500	空気の漏れが少ない地下室で、外部や上階から隔離されていると機能
自然換気	効果は様々で、一時的	無し、換気口追加の場合には\$200-500追加	\$100-700	冷暖房の空気が顕著にもれるため、換気の頻度に応じて冷暖房費が増加
熱回収換気法(HRV)	効果は様々。コメント参照	\$1200-2500	継続的に使用すれば、\$75-500	限定的使用。効果は、ラドン濃度とHRVにより取り入れる希釈用の外気量により変わる。地下室などの限定的な空間に使用されるとき、最も効果が高い。
私的井戸水水道:曝気	95-99%	\$3000-4500	\$50-150	一般的に次のGACより効果的。効果を維持する目的で、毎年掃除と汚染防御が必要。ラドンを廃棄する装置が必要



私的井戸水道:活性炭 素粒(GAC)	85-95%	\$1000-3000	なし	高濃度のラドンでは、曝 気より効果が劣る。中等 度(5000pCi/L・水 以下) で使用。活性炭に放射性 のラドン娘核種が蓄積。 タンクの周りに遮蔽を設 置し、廃棄に際しても配 慮が必要となるかもしれ ない
-----------------------	--------	-------------	----	--

注1. ファン稼働させた場合の電気代および冷暖房費の増加は、季候や家のサイズは電気代・燃料代などに関する一定の条件下で計算されている。あなたの家では、異なるかもしれません。

注2. 美観を保つための改修を加えると、個々に記した典型的なコストよりも高くなるでしょう。

## WHO 屋内ラドンハンドブック

### 公衆衛生的大局観

### 国際保健機関

(2009年)

### 要 旨

ラドンは岩石や土壌から散逸する放射性の気体で、地下鉱山や家屋のような囲まれた空間で濃度が高くなる傾向がある。土壌ガスの侵入は住居におけるラドンの最も重要な経路として認識されている。建材や井戸からくみ出す水を含む他の経路は、殆どの場合それほど重要ではない。ラドンは一般集団が受ける電離放射線の線量についての重要な要因となっている。

ヨーロッパ、北アメリカとアジアにおける屋内ラドンと肺がんに関する最近の研究は、ラドンが一般集団においてかなりの人数の肺がんの原因となっているという強力な証拠を提供している。関連している国の平均ラドン濃度と算出方法によると現在推定されるラドンに起因する肺がんの割合は3~14%の範囲である。この分析は肺がんのリスクがラドンの被ばくの増加に比例して増加することを示している。多くの人々が低濃度および中濃度のラドンに被ばくしているため、ラドンに関係する肺がんの多くは、高い濃度によるよりもむしろこれらの低・中濃度の被ばくレベルがもたらすものである。ラドンは喫煙に次いで2番目の肺がんの原因である。ラドンが引き起こす肺がんのほとんどは、喫煙とラドンの強い複合影響により喫煙者に生じる。

ラドン測定は比較的行うことが簡単で、住居のラドン濃度を評価するのに欠かせない。それら測定は、正確で整合性のある測定を確実にするための標準化されたプロトコルに基づくことが必要である。屋内ラドン濃度は建物の構造や換気の習慣によって変動する。これ

らの濃度は季節により大幅に変動するだけでなく、日ごとあるいは時間ごとでも変動する。これらの変動のため、屋内空気のラドン濃度の年間平均値の推定は、少なくとも3ヶ月、望ましくはそれ以上の平均ラドン濃度の信頼できる測定を必要とする。短期間の測定は単に実際のラドン濃度のおおよその指標を供給するだけである。測定の質を確実にするためにラドン測定器の品質保証が大いに推奨される。

ラドンに取り組むことは、新しい建築物の建設（防止）と既存の建築物（修繕と減免）の両方において重要である。主なラドンの防止と修繕方策は、ラドンの侵入経路を塞ぐことと、異なる土壌の減圧技術を介して屋内の囲まれた空間と戸外の土壌との間の空気差圧を逆転させることに重点がおかれる。多くの場合、方策の併用がラドン濃度の最大の低減をもたらす。

ラドンの防止と低減の介入の選択は費用対効果の分析に基づくことがあり得る。この方法により、様々な対策や方策によりもたらされる健康上の便益から正味の健康管理コストが計算されるので、どの対策や方策を優先するべきかが判断できる。

選択された分析は、5%以上の現在の住居が200 Bq/m<sup>3</sup>以上のラドン濃度であるような地域において、全ての新築の建築物における防止方策の費用対効果が高いことを示している。新築の家の防止は、既存の家のラドン濃度低減コストより費用対効果が高い傾向がある。低いリスクの地域においては、すでに低減対策がなされた住居の割合に比較して、測定しなければならない住居の数が多いために、測定費用が（既存の住居を）低減するためのコストより高くなる場合もある。たとえ分析によって、改善プログラムが全国ベースでは費用対効果が高くないことを示したとしても、高濃度の屋内ラドンはかなり大きな個人の肺がんのリスクを引き起こし、低減が求められる。

一般集団は屋内ラドンに関連するリスクに気づかないことが多いので、特別なリスクコミュニケーションが推奨される。ラドンのリスクコミュニケーションは、異なる相手に情報を与えることと、屋内ラドンの低減に関する適切な対策を推奨されることに重点がおかれる必要がある。一つのコアメッセージを作成するために技術とコミュニケーションの専門家が係わる協調的な努力が必要である。ラドンのリスクメッセージは可能な限りシンプルで、量的なリスク情報は公衆に対して明確に理解できる用語で表現しなければならない。例えば、ラドンによる肺癌リスクを他の癌のリスク、または日常生活における一般的なリスクと比較することは有用である。

ラドンのリスクを低減させるための公衆衛生プログラムは、国のレベルで理想的に策定されるべきである。そのような国のラドンプログラムは、高いラドン濃度のところで生活する人々に関する個人リスクと同様に全国平均ラドン濃度から国民全体のリスクも低減させるように設計されているであろう。

国のラドン政策は、その住民のラドン被ばくによるリスクが最も高い地質学的な地域を認識することと、関係する健康リスクに関して住民の認識を高めることに焦点をおくべきである。成功した国のプログラムについての重要な要素は、他の健康増進プログラム(例えば、屋内空気の質、タバコ規制)との協力と、建築の専門家およびラドン防止と低減の実施に関わる他のステークホルダーの訓練を含んでいる。建築中の家でのラドン防止策の取り付けを要件とする適切な建築基準法を制定するべきであり、家の売り買いの期間のラドン測定は高いラドン濃度の家を認識するのに役に立つ。

ラドンのための国の参考レベルは、住居における容認される最も高いラドン濃度を表し、それは国のプログラムの重要な要素である。このレベルを超えたラドン濃度の家において、改善対策が推奨されるかもしくは要求されるかもしれない。参考レベルを設定するときは、例えばラドンの分布、高いラドン濃度の既存の住宅数、屋内ラドンレベルの算術平均値や喫煙率のような様々な国の要因を考慮に入れるべきである。最新の科学的データから考慮して、WHOは、屋内ラドン被ばくによる健康被害を最小にするために  $100 \text{ Bq/m}^3$  の参考レベルを提案する。しかしながら、このレベルが、普及している国特有の条件の下で達することができないのであれば、設定された参考レベルは国際放射線防護委員会 (ICRP) による最近の計算により 1年あたり約  $10 \text{ mSv}$  を示す  $300 \text{ Bq/m}^3$  を超えるべきではない。

このハンドブックの全般的な目的は、ラドンと健康の重要な側面の最新の概要を提供することである。このハンドブックは、既存の放射線防護基準に置き換わることを目指してはいない。むしろ国のラドンプログラムの包括的プログラム、実行および評価に関連している問題に重点を置いている。

(略語集 割愛)

(用語集 割愛)

## イントロダクション

電離放射線のヒト健康リスクはよく知られている。自然界における電離放射線の中でラドンガスは圧倒的に重要な放射線源である。ラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) は、ウラニウム ( $^{238}\text{U}$ ) の崩壊産物であるラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) から生成される希ガスである。ウラニウムとラジウムは、自然界では土

壤や岩石に存在する。ウランウムの他の崩壊産物のなかには同位元素のトロン( $^{222}\text{Rn}$ ) とアクチノン( $^{210}\text{Rn}$ ) がある。ラドンガスは、半減期が 3.8 日あるので、岩石や土壌から発散して地下鉱山や家屋などの閉鎖空間に濃縮されやすい。ラドンガスは、一般集団がうける電離放射線からの線量の主要な寄与線源である。

ラドンガスが吸入されると、ラドンの短半減期崩壊産物( $^{218}\text{Po}$  と  $^{214}\text{Po}$ )から照射されるアルファ粒子は、高密度にイオン化を起し、肺の生体組織と反応しDNA損傷を引き起こす可能性がある。癌は最低 1 つの突然変異が必要と一般に考えられており、一定程度のDNA損傷をもつ中間段階の細胞が増殖することは、前癌状態の細胞プールを著しく増加させる。たった一つのアルファ粒子でも細胞に重大な遺伝的損傷あたえることができるので、ラドンに起因するDNA損傷は、どんなレベルの被ばくによってでも起こりうる。それゆえラドンが肺がんを誘発しないしきい濃度といったものは存在しないであろう。

ラドンの健康影響とりわけ肺がん影響に関して数十年間研究されてきた。最初のころ、研究の焦点は、職場環境の高濃度のラドンに被ばくした地下鉱山の労働者であった。しかし 1980 年代前半に住宅や他の建造物中のラドン濃度測定が実施され、その結果と鉱夫の研究から得られたリスク推定を合わせてみると、一般集団でもラドンは肺がんの重要な原因になっているという間接的証拠が得られた。最近になり、直接的に屋内ラドンと肺がんの関係を調べる調査努力がなされ、とうとう一般家屋で測定されるようなレベルのラドン濃度であっても屋内ラドンは肺がんのリスクを増加させるという説得力のある証拠が得られた。鉱山と住宅の両方のラドンに対するリスク評価の結果、ラドンによる健康リスクに関する明確な知見が得られた。現在では、ラドンは喫煙に次いで 2 番目に重要な一般集団の肺がん原因であると認識されている。

ここ数十年に亘って放射性核種としてのラドンおよびラドンの輸送機序に関する知見が蓄積されてきた。1950 年代には、地域的に掘削した井戸由来の飲料水に高い濃度のラドンが観察された。当初、水を飲むことによる健康影響が心配された。後に、水中ラドンの第 1 の健康リスクは、屋内に放出したラドンを吸入することによることが判った。1970 年代中頃には、一部の地域では、ラジウムを多く含むミョウバン頁岩\*を使用した建材から放散するラドンが問題である事が判った。1978 年までに、井戸水あるいは建材からの放散以外の原因で屋内ラドン濃度が高い住宅が確認された。土壌ガスの侵入が屋内ラドンの発出源として最も重要であると認識されるようになった。建材や井戸水を含む他の放出源は、大多数の事例で重要性が低い。

\*ある種の軽量コンクリートで使われるいろいろな頁岩や粘板岩のこと。

このハンドブックは屋内ラドン被ばくに焦点を合わせている。疫学的証拠は、一般集団の肺がんのうちかなりの症例が屋内ラドンに起因するという事を示唆している。多くの国において屋内ラドン濃度の分布は対数正規分布で最もよく表すことができ、その大多数のラ

ドン濃度は低い範囲に収まる。その結果、ラドン起因性の肺がんの大多数は、低いし中等度のラドン濃度への曝露で生じると考えられる。「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」(UNSCEAR)は、鉱夫の疫学調査から得られたリスク推定値と住居のラドン濃度と肺がんに関する症例対照疫学調査から得られたリスク推定値のあいだに顕著な一貫性があることを最近報告した。鉱夫の調査は、ラドン被ばくのリスク評価および線量・効果関係の修飾因子の影響を研究するうえで強固な基盤を提供している。一方、最近発表された住居調査のプール解析は、住民に対するラドンのリスクを直接的に評価する方法論を提供しており、鉱夫の調査から外挿する必要を無くした。

このハンドブックは 6 章からなり、各章は読者に効果的なオリエンテーションをあたえるためにキーメッセージにより始まる。通常、最初に使われる用語や単語は、その場で定義がなされている。幾つかの特殊な用語は、この本の用語集のページでさらに詳しく定義づけられている。

第 1 章では、ラドンの健康リスクに関する現在の知識に関して討議し、またラドン公衆被曝およびそれに伴う肺がんリスクに関する最新の評価を提示する。この章では、ラドンに関係する可能性のあるその他の健康影響に関しても述べる。

第 2 章では、ラドン測定機器の選択および空気中および水中のラドンを信頼性高く測定するための手続きを確立するための枠組みを提示する。加えて、本章では一つの家の測定や建材の診断的測定など、種々のラドン測定シナリオにたいするガイダンスを概説する。

第 3 章では、新規に住宅を建築する際のラドン制御オプション（防止）および既存住宅のラドン低減（修繕ないし減免）に関して討議する。

第 4 章では、異なる防止および減免工事の費用と便益を評価する系統的な方法として経済学的評価を援用することを検討する。費用対効果解析手法およびそのラドン対策への応用の妥当性をレビューする。事例研究により手法と結果の解釈に関して例示する。

第 5 章では、ラドンリスクコミュニケーションを確立するためのガイダンスを提示し、また、異なる対象集団とラドンリスクに関する対話を行う際の中心的なメッセージを提案する。

最後に第 6 章では、国のラドンプログラムの展開に必要な構成要素およびこのようなプログラムを組織するための枠組みについて述べる。第 6 章では、この文脈の中でラドン参考値とその重要性に関しても討議する。

このように、このハンドブックの各章は環境保健問題としてのラドンに関する国際的な大局観を提供する。ハンドブックは住居のラドン被ばくに焦点をあて、公衆衛生的観点からその影響力を強調するとともに、ラドンリスクの低減およびラドン防止・修繕のための健

全な政策選択に関する詳細な提言を提示する。各国は、それぞれの地域固有の要素（例えば、ラドンの供給源、輸送機序、建築法、建築基準、建築特性など）を反映したラドン防止・修繕プログラムを策定する必要がある。ハンドブックは、既存の放射線防護基準を置き換えることを意図するものではない。しかし、このハンドブックは、各国が一貫性のある国のラドンプログラムを策定し、実施し、それを評価できるようになることを意図している。このハンドブックは、国のラドンプログラムを策定中の国、あるいは既存のラドン対策を拡大中の国、および建築業界や建築専門家などラドン対策に巻き込まれている利害関係者のために出版される。

## 第1章 ラドンの健康影響

### キーメッセージ

- ▶ 疫学調査は、住居のラドンが一般集団の肺癌リスクを増加させることを確認した。ラドンによる肺癌以外の健康影響に関しては、一貫した結果はえられていない。
- ▶ 全肺癌のうちラドンに関係したものの割合は、国のラドン濃度平均および計算法の違いによって、3%から14%の間と評価されている。
- ▶ 多くの国でラドンは喫煙に次ぐ最も重要な肺癌原因である。ラドンは、生涯非喫煙者であった人々より、喫煙者あるいは過去に喫煙していた人々で肺癌を誘発していると思われる。しかしながら、ラドンは、非喫煙者の肺癌の第一義的な原因である。
- ▶ リスクが無くなるラドン曝露のしきい値濃度は知られていない。例えラドン濃度が低くとも、肺癌のリスクは少し増加する。
- ▶ 大多数のラドン誘発肺癌は、高濃度のラドンよりは低いし中濃度のラドン濃度での被ばくが原因である。これは、一般に少数の人々しか高濃度の住居ラドンに被ばくしないからである。

この章では肺癌及び他の健康影響が疑われる疾患を含めてラドンの健康影響に関する最新の知見を討議する。また、様々な国のラドン濃度の推定値およびラドン起因性の肺癌の大きさに関する最新の推定値を要約する。ラドンは大多数の国で自然放射線源からの電

離放射線被ばくのうち最大のものである。特定のグループでは職業的なラドン被ばくが大きなリスクであるが、一般集団においては、大部分の被ばくは屋内、特に住宅などの小規模建造物の中で生じる（UNSCEAR2000）。

中央ヨーロッパの地下鉱山労働者の特定集団で呼吸器疾患により死亡が多いという証拠は、一六世紀にさかのぼる。しかし、その疾患が実際肺がんであると理解されるのは一九世紀まで待たなければならなかった。二〇世紀になりラドンに曝露された鉱夫の肺がんの一義的な原因としてラドンが初めて疑われた。そして、1950年代にラドンが肺がんの病因であることが強固に証明された。さらに詳細な歴史は、下記の報告書に述べられている（BEIR IV 1988）。通常それは高い濃度の曝露であるが、職業的にラドン曝露を受けた地下鉱山労働者の複数の調査は、一貫して喫煙者および非喫煙者の両者に肺がんリスクが増加することを明らかにしてきた。一義的にはこの証拠に基づき、国際癌研究機関は1988年にラドンをヒト発癌物質に分類した（IARC 1988）。

1980年代以降、一般集団の肺がん和屋内ラドンの関係を直接的に調査する沢山の研究が実施されてきた。個々の調査は一般にサイズが小さ過ぎたため、具体的なリスクを否定することも、リスクがあることを明瞭に証拠立てすることもできなかった。そこで欧州、北米、中国の研究者達はそれぞれのデータを持ち寄り、中心となる研究者が再解析を実施した（Lubin et al. 2004, Krewski et al. 2005, 2006, Darby et al. 2005, 2006）。これらの3つのプール解析は、住居でのラドン曝露による肺がんリスクに関して極めて類似した結論を導いた。総合すると、これらの結果は、一般集団においてラドンがかなりの数の肺がん患者で発がん原因となっていることを示す強固な証拠となっており、また直接的にリスクの大きさを推計する基礎となっている。また、これらの結果は、現在多くの国で対策の目安として提唱されているラドン濃度である200 Bq/m<sup>3</sup>以下の濃度であっても、肺がんリスクは排除できないことを示唆している。

## 1.1 ラドン曝露鉱夫の肺がんリスク

ラドンに曝露された鉱夫の肺がん率は、通常コホートデザインの調査で行われてきた。コホート研究では、特定の期間に就労した鉱山で働くすべての男性を特定する。それらの男性は、鉱山にその後就労しているか否かにかかわらず何年にも渡って追跡され、追跡期間の最期に各々の男性の健康状態が確認される。すでに死亡した者は、死亡時期と死因が特定され、全体として、および年齢や暦期間やラドンへの累積曝露で階層化されたうえで、肺がんによる死亡率が計算される。これらの調査では、ラドンへの曝露は過去にさかのぼって評価され、多くの調査では、曝露評価の質は低い。これは、とりわけとりわけ鉱山開設の初め頃には、曝露がもっとも高かったがラドンの測定がなされていなかったためである。ラドン曝露鉱夫の調査では、ラドン子孫核種の濃度は一般に「作業レベル」（WL）という用語で表されている。作業レベルは、1 Lの空気中に含まれるあらゆる短半減期の子孫



核種の組み合わせが最終的に  $1 \times 10^5$  MeV のアルファ粒子エネルギーを放出する状態と定義される。このレベルの濃度に「作業月」である 170 時間曝露（または倍の濃度であれば半分の期間、等々）することを「作業レベル月」（WLM）と定義する。

1990 年代に利用可能であった地下鉱山労働者の主要な調査結果は、電離放射線生物影響委員会によってレビューされた（BEIR VI 1999）。欧州、北米、アジア、オーストラリアの総数 6 万人の鉱夫集団で、その中から 2600 人の肺がん死亡が発生した 11 のコホート調査データが対象となった。これらの調査のうち 8 集団はウラニウム鉱夫で、残りは錫や螢石や鉄鉱山の鉱夫であった。肺がん率は、一般に蓄積ラドン曝露量に比例して増加した。しかし、一つの調査（コロラド・コホート）では、肺がん率は中等度の蓄積曝露量では増加したが高蓄積曝露量になると減少した。この調査の 3200WLM 以上の蓄積曝露量症例を除くと、11 コホート全てにおいて蓄積曝露量が増加するにつれほぼ線形に肺がん率が増加した。しかし、単位曝露量当たりの肺がん率の増加の大きさは、コホート間で 10 倍以上も変動し、それは偶然で説明できるよりずっと大きかった。異なる調査研究間でリスクの大きさにかかなりの変動がみられたが、BEIR VI 委員会は、各々の調査に異なる加重を付与しながら、11 全ての調査データを統合（プール）したデータを使った多くの解析を実施した。一連の解析のなかから、統合 11 調査集団では、WLM 当たりの肺がん死増加の平均は 0.44% (95%信頼区間：0.20-1.00%) という推計が得られた。WLM 当たりの肺がん死亡率増加(%)は、曝露後の時間で変化し、曝露後 4-15 年が最も高かった。また、同死亡率増加(%)は、曝露した個人の年齢によっても変化した。すなわち、曝露時年齢が若ければ若いほど死亡率増加(%)は高くなった。BEIR VI 研究のもう一つの発見は、比較的低いラドン濃度に曝露した鉱夫は、高濃度のラドン濃度曝露した鉱夫と比較して、WLM 当たりの肺がん死増加率(%)が高かった。ラドン曝露鉱夫調査におけるリスクを要約し、他のラドン曝露集団の恐らくあると思われるリスク外挿に使用するために、BEIR VI 委員会は、若干数の数学モデルを生み出した。実例として曝露・年齢・濃度モデルを表 1 に要約した。

BEIR VI 報告書が発表されてから、ラドン曝露鉱夫のコホート研究は継続しており、チェコ調査結果 (Tomasek et al. 2002) およびフランス調査結果 (Rogel et al. 2002, Laurier et al. 2004) が報告された。その他幾つかの集団で調査結果が発表され、より詳細な追加解析の機会を提供した (Langholz et al. 1999, Stram et al. 1999, Hauptmann et al. 2001, Hornung et al. 2001, Dupont et al. 2002, Archer et al. 2004, Hazelton et al. 2001, Heidenreich et al. 2004)。これに加えて、ポーランド (Skowronek et al. 2003) とブラジル (Veiga et al. 2004) のラドンに曝露された炭坑鉱夫コホートの調査結果が発表され、また東ドイツの大規模なウラニウム鉱夫のコホート (Kreuzer et al. 2002) が加わった。

ドイツのコホートは、東ドイツのビスムート社に雇用された総数 59001 名の男性からなる (Grosche et al. 2006)。最初の死亡追跡調査時点までに 2388 名の肺がん死が発生していた。ドイツ・コホートは、BEIR VI 委員会が解析した 11 のコホートを全て足したと同じ規模

をもっているため、大変重要である。加えて、鉱夫は全て同一の地理的な場所および社会的背景を共有している。また、追跡調査手法と曝露の評価システムも共通である。この調査では、WLM当たりの肺がん死亡率は平均で0.21% (95%信頼区間：0.18-0.24%) 増加しており、その値はBEIR VIでの解析値の半分以上をちょっと上回る値である。BEIR VI委員会が使った曝露・年齢・濃度モデルをドイツ・コホートに当てはめてみると、WLM当たりの肺がん死亡率増加が最大だったのは、BEIR VIモデルでは5~15年の期間であったが、ドイツ・コホートでは15~24年の期間に観察された(表1参照)。BEIR VIモデルと同様に、死亡率の増加は高齢者では低下したが、年齢による低下のスロープはずっと浅かった。両方の調査集団でも、単位曝露量当たりの死亡率増加は、ラドン濃度が増加するに従い低下し、15.0+ WLの曝露は0.5WL未満と比較してリスクは1/10に減少した。

BEIR VI委員会が利用できた幾つかの鉱夫調査では、喫煙の情報が得られており、それらの調査ではWLM当たりの肺がん死亡率は平均で0.53% (95%信頼区間：0.20-1.38%) 増加した。この値は、BEIR VI委員会が使った11コホート全体から得られた値と近似している。一度も喫煙しなかった者(生涯非喫煙者)と喫煙経験者(現在喫煙者と禁煙者)に分けて解析すると、WLM当たりの肺がん死亡率の増加は、生涯非喫煙者で1.02% (95%信頼区間：0.15-7.18%)、喫煙経験者で0.48% (95%信頼区間：0.18-1.27%)であった。このようにWLM当たりの肺がん死亡率の増加は、非喫煙者の方が喫煙経験者より大きい。その差は統計的に有意ではなかった(BEIR VI 1999)。

ドイツ・コホートでは、一般に喫煙習慣の情報は集められていない。しかし、1990年代に特定の複数クリニックで診断を受けたドイツ・ウラニウム鉱山会社の前従業員にかんして、肺がんに関する症例対照研究が実施されている(Brueske-Hohlfeld et al. 2006)。この調査でも、WLM当たりの肺がん死亡率パーセント増加は、生涯非喫煙者が禁煙者より高く、禁煙者は現在喫煙者より高かった(現在喫煙者：0.05% (95%信頼区間：0.001-0.14%)、禁煙者：0.10% (95%信頼区間：0.03-0.23%)、生涯非喫煙者：0.20% (95%信頼区間：0.07-0.48%))。

WLM当たりの肺がん死亡率パーセント増加が実際に生涯非喫煙者と喫煙経験者で異なるかどうかは問題だが、WLM当たりの絶対死亡率は、現在喫煙者の方が生涯非喫煙者よりずっと高いことに注目すべきである。その理由は、ある一定のラドン濃度に曝露したとして、喫煙者は非喫煙者に比して肺がん率が高いという事実にある。禁煙者に関しては、WLM当たりの絶対増加率は、現在喫煙者と生涯非喫煙者の間になるはずで、その大きさは喫煙期間や禁煙前の一日の喫煙本数や喫煙後の年月に依存する。

## 1.2 一般集団における屋内ラドンからの肺がんリスク

### 背景

ラドンに曝露した地下鉱夫に認められた肺がんリスクの大きさから、家や他の建造物中で生じるラドン曝露が一般集団において肺がんの原因となっている可能性が示唆された。鉱山と家屋では曝露状況は大いに異なり (NRC 1991)、また調査対象の鉱夫における喫煙のリスクと今日の一般集団の喫煙のリスクは異なる。例を挙げれば、多くの鉱夫は、ラドンに加えてヒ素などの他の肺がん発癌物質にも曝露していた。これらの諸々の違いにより、鉱夫の調査から外挿して家でのラドンによる肺がんリスクを定量的に評価すると、そこにはかなりの不確実性が入り込む。

鉱夫の調査から定量的に外挿する不確実性の多くは、直接的に屋内ラドンと肺がんリスクの相関を調査することにより、排除することができる。このような調査において、ラドン曝露は、個人が過去二・三十年の期間に家で曝露した一立方メートルの空気中の平均的なラドンガス濃度で通常表され、単位はベクレル/立方メートル(Bq/m<sup>3</sup>)である。ここで、1 Bqは、一秒当たり一回の崩壊をさす。個人住宅の屋内ラドン濃度は、通常、系統的な日内および季節性の変動がつきまとう。また、年平均ラドン濃度もまた、複数の要因 (気候のパターンや窓の開閉などの住人の行動) により相当変動する。

屋内ラドンの肺がんリスクを研究する初期の試みとして、多くの地理学的な調査 (時に「生態学的調査」と呼ばれる) が実施された。これらの調査では、異なる地域間でラドン平均濃度と地域の平均肺がん率の相関を調べる。しかしながら、このような調査の有用性は、以下の理由から強く制限される。すなわち、多くの集団でラドンより遙かに多くの肺がん患者で原因となっている喫煙などの他の肺がんリスク要因を十分調整できない。それ故、生態学的調査は、しばしばバイアスのかかった、そして誤ったラドン関連リスクの評価を与えてしまう。さらに詳しい議論とバイアスの例示は、他の文献に述べられている (Puskin 2003)。

肺がん住居のラドン曝露の相関を検討するより適切な方法は、症例対照研究である。その調査では、決められた数の肺がん症例を同定し、同時に決められた数の肺がんを発症しなかった、しかしそれ以外では肺がん症例を抽出した集団の代表性を有しているような、対照となる個人が同定される。これらの調査では、対照者は症例と年齢および性を合致させる。次に調査対象の全ての人で詳細な居住歴が必要で、喫煙に関する詳細な情報および肺がんのリスクに関係する他の要素に関する情報が必要となる。調査対象の個々人が過去二・三十年の期間に曝露したラドン濃度の平均値を推計するために、彼や彼女の現在の住居、および過去二・三十年の期間に引っ越しているのなら、過去に住んでいた住居の両方でラドンの測定を行う。これらのデータがまとまったなら、肺がんを発症した個々人と対照者のラドン濃度を比較する。肺がんの発症リスクに影響を与える他の因子の変動を調整するために特別な統計学的手法が編み出されており、実際上、同じような喫煙歴をもち、他の肺がんリスク因子も同一であるような個々人間で、屋内ラドン曝露量の比較がなされる。このような手法によって、肺がんと過去二・三十年の期間の平均的な屋内ラドン濃度

との相関を評価することができる。

少なくとも 40 の症例対照研究が屋内ラドンと肺がんに関して実施されてきた。個々の調査は、規模が小さかったため、リスクの上昇はないと結論づけることも、リスクが上昇していると明確に結論づけることもできなかった。そこで、一つ以上の調査の情報を統合するため、若干名の著者はいくつかの発表された調査結果を結合してメタ解析を試みた(Lubin and Boice 1997, Lubin 1999, Pavia et al. 2003)。これらの報告された論文の系統的レビューは、個々の調査では一つ一つの論文ごとにラドン関連の肺がんリスクはかなり異なることを結論づけた。しかし、それぞれの調査で解析の手法は大きく異なり、とりわけ個々人の喫煙が及ぼす肺がんリスクの違いをどこまで調整するのかにおいて、また個々人のラドン曝露歴の定量において、違いが大きかった。これらの違いの大きさは、個々の調査でのリスク評価の差異を来す十分な原因となる可能性があり、これらの調査対象者となった個々人の基本データに直接照合する以外、この違いを解消することはできない(Field et al. 2002)。

異なるラドン・肺がん症例対照研究の観察結果を適切に比較し、個々人の喫煙に関係したリスクを完全に調整するために、それぞれのオリジナルな調査のデータの中から、個々人の基本となるラドン濃度や喫煙歴や他の重要な因子を統一した形式で集め、統合する必要がある。このような作業がなされた後に、個々の調査は平行して解析することができるようになり、個々の調査結果は、比較することが可能となる。そして、異なる調査の結果が一貫性を持つようならば、それらの調査は統合されて、これら全ての調査集団をベースとして、ラドンに関連した肺がんリスクの評価が可能となる。若干数の調査集団から個人情報照合し、比較した解析が三つ行われた。すなわち、13 欧州調査 (Darby et al. 2005, 2006)、7 北米調査 (Krewski et al. 2005, 2006)、そして 2 中国調査 (Lubin et al. 2004)である。三つの解析は、構成要素の個々の研究から得られた情報から、住居のラドンによる肺がんリスクの統合的なリスク評価を得ることは適切であるとの結論に達した。これらの統合解析の結論は表 2 に要約されており、以下に詳しく述べる。

## 欧州統合調査

欧州統合調査(Darby et al. 2005, 2006)は、対象の選別基準を満たした欧州で実施された 13 の住居ラドンと肺がん調査の全てからデータを集めた。これらの基準は、調査は一定の規模を有すること (最小 150 肺がん症例と肺がんでない対照者 150 名が同じ集団から抽出されていること)、そして個々人の詳細な喫煙歴が得られていることであった。曝露に関する基準は、過去 15 年かそれ以上居住していた個人の住居でのラドン測定がなされたことであった。総数で 7000 超の肺がん症例と 14000 超の対照者が統合解析の対象となった。この調査では、肺がん診断前 5 年前までの過去 30 年の曝露期間のラドン曝露、あるいは対照者のそれに相同する期間のラドン曝露が肺がんリスクに影響を及ぼすとした。得られたラ