

# 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ので、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必要がある。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  $200 \text{ Bq/m}^3$  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、自然界では土壌や岩石に存在する。ウラニウムの他の崩壊産物のなかには同位元素のトロン( $^{220}\text{Rn}$ ) とア

クチノン(<sup>222</sup>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(<sup>218</sup>Po と <sup>214</sup>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こし、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ついても討議する。

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, Duport 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ですが、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、實際上、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癌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癌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癌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・肺癌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癌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癌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 の住居ラドンと肺癌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 肺癌症例と肺癌でない対照者 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 超の肺癌症例と 14000 超の対照者が統合解析の対象となった。この調査では、肺癌診断前 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等しい期間のラドン曝露が肺癌リスクに影響を及ぼすとした。得られたラドン測定値は、平均で 23 年の期間をカバーし、必要であれば、季節性の変動を調整し、年間を通じた家のラドン濃度を代表するようにした。ラドン濃度測定がなされなかった家(例

えば、家の改築がなされた）に関しては、同じ地区の対照者集団住居で測定された全てのラドン測定値の平均を間接的な評価値とした。個々人の「実測ラドン濃度」を得るために、過去5年～34年間の居住した全ての家の期間加重平均値を計算して求めた。加重は、それぞれの家に住んだ長さに比例して配分した。

表 2 個々の症例対照研究を合わせた国際統合研究およびラドン曝露鉱夫調査に基づく屋内ラドンの肺がんリスク要約

	Nbr. of studies included	Nbr. of lung cancers	Nbr. of controls	Exposure Window (years) <sup>a</sup>	Percentage increase in risk of lung cancer per 100 Bq/m <sup>3</sup> increase in radon concentration	
					Based on measured radon	Based on long-term average radon <sup>b</sup>
Pooled analyses of studies of indoor radon in the home						
European (Darby et al. 2005, 2006)	13	7 148	14 208	5-35	8 (3, 16)	16 (5, 31)
North American (Krewski et al. 2005, 2006)	7	3 662	4 966	5-30	11 (0, 28)	-
Chinese (Lubin et al. 2004)	2	1 050	1 995	5-30	13 (1, 36)	-
Weighted average of above results of pooling studies					10	~20 <sup>c</sup>
Studies of radon exposed miners <sup>d, e</sup>						
BEIR VI analysis (BEIR VI 1999; Lubin et al. 1997)	11	2 787		5-35	All miners: 5 Miners exposed to <50 WLM only: 14 Miners exposed to <50 WLM and at <0.5 WL only: 30	
German uranium miners study (Grosche et al. 2006)	1	2 388		5-35	All miners: 3 Miners with low exposures incurred at low dose rates: 18 <sup>f</sup>	
French and Czech uranium miners (Tomasek et al. 2008)	2	574		5+ 5-35	All miners (mean exposure rate 4.5 WLM/year): 32	

個人の喫煙の多様性に基づく肺がんリスクの違いを詳細に検討してみたところ、欧州調査では、個々の調査間での屋内ラドン濃度単位増加当たりのリスク増加の変動は、偶然の変動を越すものではないことがわかった。それ故、データを統合することは適切である。データ統合を行うと、ラドンと肺がんの関係に明瞭な正の相関が顕れた。実測ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 増加当たり肺がんリスクは 8% (95%信頼区間: 3-13%) 増加した。この住居ラドン濃度の単位増加当たりの肺がん率パーセント増加の推計値は、偶然の変動を越して年齢や性で変動することはなかった。また、彼や彼女の喫煙歴によっても偶然の変動を越して変動することはなかった (表 3 参照)。

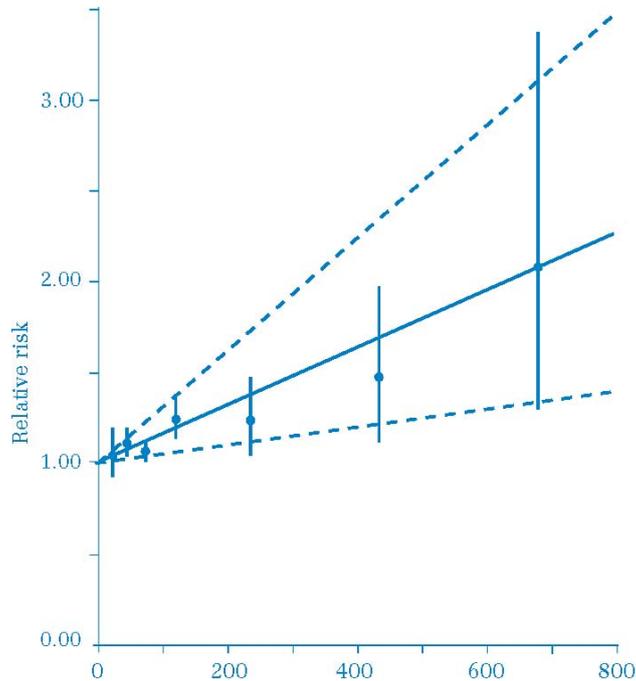
表 3 欧州と北米統合調査結果に基づいた実測屋内ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 当たりのラドン関連肺がん増加リスク

	% risk increase (95% CI)		% risk increase (95% CI)	
Sex				
Men	11 (4, 21)		Men	3 (-4, 24)
Women	3 (-4, 14)		Women	19 (2, 46)
<i>p for heterogeneity</i>	0.19			
Age at disease occurrence (years)				
<55	<0 (<0, 20)		<60	2 (<0, 35)
55-64	14 (3, 31)		60-64	80 (13, 257)
65+	7 (1, 16)		65-69	2 (-5, 28)
			70-74	33 (1, 102)
<i>p for trend</i>	0.98		75+	-2 (-10, 30)
Smoking status				
Current cigarette smoker	7 (-1, 22)		Never smoked	
Ex-smoker	8 (0, 21)		cigarettes	10 (-9, 42)
Lifelong non-smoker	11 (0, 28)		Current or ex-cigarette	
Other	8 (-3, 56)		smoker	10 (-2, 33)
<i>p for heterogeneity</i>	0.92			
Overall				
Based on measured radon	8 (3, 16)		Based on measured radon	11 (0, 28)

欧州統合調査では、曝露－反応関係は大凡線形で、それ以下ではリスクがなくなるような閾値を指示する証拠はなかった。とりわけ、150 Bq/m<sup>3</sup>（すなわち、いかなる閾値であれ、その95%信頼区間の上限が150 Bq/m<sup>3</sup>）を越す閾値とは合致しなかった。さらに、研究者たちが解析を200 Bq/m<sup>3</sup>以下のラドン濃度の家に限定して解析した場合でも、ラドン濃度と肺がんは統計的に有意な相関を示した。実測ラドン濃度が100-199 Bq/m<sup>3</sup>（平均136 Bq/m<sup>3</sup>）の個人は、実測ラドン濃度が100 Bq/m<sup>3</sup>以下（平均52 Bq/m<sup>3</sup>）の個人に比べて肺がんリスクが20%（95%信頼区間：3-30%）高かった。

上記のように、天候の変動(Zhang et al. 2007)などにより、家の平均年間ラドン濃度は年ごとに偶然に変動する。この年ごとの変動を考慮に入れないで、実測ラドン濃度により症例対照研究の肺がんリスクを評価すると、そのリスクは過小評価になる可能性がある。そこで、欧州統合調査では、「長期的な平均ラドン濃度」（実測ラドン濃度における年ごとの偶発的変動を調整した濃度）を用いて再解析がなされた。長期的な平均ラドン濃度を用いた最終的なリスク係数は、100 Bq/m<sup>3</sup>当たり16%（95%信頼区間：5-31%）であった。再度述べるが、この比例スケールでは、年齢や性や個人の喫煙状態で偶然の変動を超えるリスクの変動はなかった。そして、線量効果関係は図1に示すようにほぼ線形であった。

図1 欧州統合調査における肺癌相対リスクと住居ラドンの長期平均濃度



## 北アメリカ統合調査

北アメリカ統合調査 (Krewski et al. 2005, 2006) には、米国とカナダの7調査から 3662名の症例と 4966名の対照者が含まれた。方法論は、欧州調査のそれと同様である。欧州調査と同様に、一旦個々人のデータを統合し直した後は、個別の7調査のラドン関連リスクは一貫性があった。7調査全てのデータをまとめて解析したところ、実測ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 当たり肺癌リスクは 11% (95%信頼区間: 0-28%) 増加した。曝露データの精度が比較的高い個人に限定して解析を行うと、肺癌リスクの推計値は増加した。例えば、調査対象者に選ばれる前の5~30年の期間にただ一カ所ないし2カ所の家にしかならなかつた個人で、最低20年間の線量評価ができた個人では、研究者達は 100 Bq/m<sup>3</sup> 当たり 18% (95%信頼区間: 2-43%) のリスク増加があると報告した。実測住居ラドン濃度の単位曝露量増加当たりの肺癌リスクの推計パーセント増加量は、偶然の変動を超して年齢や性で変動することはなかつた。また、彼や彼女の喫煙歴によっても偶然の変動を超して変動することはなかつた (表3参照)。

欧州統合調査と同様、北米統合調査の結果は、しきい値無し線形の線量効果関係に合致した。しかし、欧州統合調査とことなり、これまでのところ北米統合調査では年毎の住居ラドン濃度の変動を調整する試みはなされていない。さらに解析が進み、年毎の住居ラド

ン濃度の変動が調整されたなら、両方の調査を直接比較することが可能となるであろう。

## 中国統合調査

Lubin とその同僚らは(2004)、ガンスとシェンヤン地区の 2 調査の 1050 名の症例と 1996 名の対照者を解析した。統合されたデータでは、実測ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 増加当たりのリスクは 13% (95%信頼区間：1-36%) 増加した。両調査の結果は、互いに矛盾がなかったが、この結果は、規模がずっと大きいガンス調査の影響が大きい。欧州調査および北米調査と同様に、結果はしきい値無し線形線量効果関係と矛盾しなかった。

## 住居ラドンによる肺がんリスクに関する総合的な証拠

三つの統合調査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同じような結論を導いている (表 2 参照)。一般住宅で観察されるような濃度であっても、ラドンは一般集団の肺がん原因となっていることが、紛れもなく証拠立てられた。特に、三つの調査全てで、ラドン濃度の単位増加当たりのリスク増加率が年齢や性や喫煙習慣により偶然の変動幅を超して変動するという証拠は得られなかった。さらに、線量効果関係は線形で、しきい値の証拠は得られていない。また、多くの国で現在対策が実施されている 200 Bq/m<sup>3</sup> より低いレベルであっても、リスクは増加するという重要な証拠が得られた。

三大統合調査は、実測ラドン濃度に基づく肺がんリスクの増加を実測ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 増加当たり 8% (95%信頼区間：3-16%)、11% (同：0-28%)、13% (同：1-36%) と報告した (表 2)。これらの三つの推計値は互いに矛盾しないので、分散の大きさに比例した加重係数を使って、加重平均を求めた。その結果、三つの統合調査を合わせた推計値は、実測ラドン濃度 100 Bq/m<sup>3</sup> 当たり 10% 増加である。

先に述べたように、年ごとの住居ラドン濃度の変動により、実測ラドン濃度に基づくリスク評価は過小評価になっていると思われる。現在のところ、実測ラドン濃度ではなく長期に亘る住居ラドン濃度の平均値に基づいた詳細なリスク解析を行っているのは欧州統合調査のみである。この調査では、長期平均濃度に基づくリスク推計値は、実測ラドン濃度に基づくリスク推計値の二倍であった。中国でも同じ家で別々の年にラドン測定を実施したデータがあり、その結果は欧州調査と同じような年毎の変動を示している (Lubin et al. 2005)。一方、米国のデータも年毎に相当な変動があることを示唆している (Zhang et al. 2007)。仮に三つの統合調査を合わせた場合でも、年毎の変動を調整した場合の影響が欧州調査と同じであるとするならば、長期ラドン濃度に基づく三つの統合調査の合同リスク評価値は、凡そ 100 Bq/m<sup>3</sup> 当たり 20% となるであろう (表 2 参照)。

ラドン曝露量を評価する上で誤りが起きる可能性のあるその他の原因を列挙すると、測定器の過誤、家の中での空間的ラドン濃度の変動、現在アクセスできないため測定できなかった過去の居住住宅のデータ、対象者の動きとラドン濃度の連携失敗、およびラドン子孫

核種による曝露をラドンガスとして測定すること等がある(Field et al. 2002)。一般に、これらのありそうな曝露測定の過誤の影響を評価することは、一般に難しい。しかし、曝露量の誤評価のおき方が、症例と対照で系統的に異ならないのであれば、観察結果はリスク零の方向へ偏向しやすい(すなわち、真の影響は過小評価される)。実際、過去のラドン曝露をよりよく評価するような経験主義的モデルは、住居ラドンと肺がんの相関をより強く検出する傾向がある(Field et al. 2002)。

大多数の屋内ラドン調査においては、その他の多くの要因が正式な解析には含まれていない。特に、対象者の喫煙カテゴリー振り分けにおいてしばしば過誤が起きている。また、幾つかの国では、エネルギー効率が向上し、空調設備が導入されたため、過去二・三十年の間に系統的なラドン濃度の変動があったと考えられる。これらの要因の総合的な影響は、先に述べたように、年毎の変動を修正した後であっても、真のラドン影響は住居ラドン調査から得られるリスク評価値よりも幾分高くなると思われる。

屋内ラドン調査における肺がんリスクとラドンに曝露した鉱夫調査における肺がんリスクを直接比較するのは、複雑である。それは、鉱夫データでは、一般に曝露量がより高く、また逆線量率効果があるからである(表1参照)。鉱夫調査を要約したリスク評価値は、住居ラドン調査のそれに比較するとやや小さい。例を挙げるなら、BEIR VI委員会の解析に使われた全ての鉱夫を対象にすると、100 Bq/m<sup>3</sup>当たり約5%と推計され、この値は規模の大きなドイツ調査の推計値よりやや低い。BEIR VI調査では、蓄積曝露量が50WLM以下(すなわち、約400 Bq/m<sup>3</sup>のラドン濃度の家に30年居住した際にうける曝露量)の鉱夫に限定した追加解析が行われており(Lubin et al. 1997)、100 Bq/m<sup>3</sup>当たり14%増と評価している。さらに、蓄積曝露量が50WLM以下で、曝露率が0.5WL未満(約2000 Bq/m<sup>3</sup>未満)の鉱夫を対象とすると、リスクの増加は100 Bq/m<sup>3</sup>当たり30%となる。同様に、低曝露率の労働者で、曝露期間を5~34年の期間に設定し、曝露評価の精度が相対的に高い鉱夫に限定してフランスとチェコのコホートを解析したところ、表2に記したようにリスクの増加は100 Bq/m<sup>3</sup>当たり32%にもなった(Tomasek et al. 2008)。

要約すれば、屋内ラドン調査に基づくラドン関連リスクの推計値と低曝露濃度で比較的低蓄積曝露量の地下鉱夫調査で得られた推計値は、良い一致を見せている。

### 1.3 ラドンと肺がん以外の疾患

ラドンとその崩壊産物を含む大気中にいる時に、胸部以外の気道や皮膚もそれなりの線量を受けるだろうが、身体部分で最も放射線被ばく線量が高くなるのは気管支の上皮である。さらに、腎臓や骨髄を含む他の臓器も低い線量を受けるであろう(Kendall et al. 2002)。もしラドンが溶解した水を飲めば、胃もまた被ばくするであろう。

ラドンに関連して肺がん以外の癌死が増加している証拠が無いかどうか、BEIR VI 解析の対象となったラドン曝露鉱夫で解析された。その結果、ラドンが肺がん以外の癌の原因になっている事を示す強い証拠は得られなかった(Darby et al. 1995)。しかし、この問題に関してさらなる調査が継続されている。例えば、チェコのウラニウム鉱夫で白血病とリンパ腫と多発性骨髄腫に関する症例対照研究が最近報告され(Rericha et al. 2007)、ラドン曝露と慢性リンパ性白血病を含む白血病との間に正の相関が認められた。ラドン曝露鉱夫の多くのコホートで、ラドン曝露と心臓血管病の関係が調査されたが、ラドンが心臓疾患を増やしたという証拠は得られていない(Villeneuve et al. 1997, 2007, Xuan et al. 1993, Tomasek et al. 1994, Kreuzer et al. 2006)。飲料水中に自然界のウラニウムとその他の放射性核種を高濃度で含むような地域で、胃がんに関する症例対照研究が 1 件実施されたが、リスクが増加している傾向はなかった(Auvinen et al. 2005)。

一般集団中の小児ないし成人の白血病に関して、約 20 のラドン曝露に関する生態学的調査が実施されてきた。その中には Smith らの方法論的に進んだ調査(2007)も含まれるが、これらの幾つかの調査は、地理学的なレベルにおいて屋内ラドン濃度と白血病リスク (Smith の調査では慢性リンパ性白血病を含む)に相関を認めた(レビューに関しては Laurier et al. 2001 を参照)。ノルウェーの生態学的調査は、多発性硬化症と屋内ラドン濃度の相関を示した(Bolviken 2003)。すでに幾つかの症例対照研究やコホート調査がなされてきたが (Laurier et al. 2001, Mohner et al. 2006。(筆者註：白血病に関する調査))、一般的には、これらの相関は、ラドン曝露鉱夫ないし一般集団の何れかを使って、質的に高い症例対照研究やコホート調査により確認されるものである。ラドン曝露と肺がんの調査でもそうであったように、これらの生態学的調査には数多くのバイアスが入り込みやすい。それ故、これらの調査は誤った結論を導きやすく、ラドンがこれらの疾患の原因として働いているとの証拠として扱ってはならない。

#### 1.4 屋内ラドンを原因とする肺がん負荷

上記の証拠により、一般集団においてラドン曝露は肺がんの原因である事が確立した。どの様な国であれ、毎年、ラドンにより発症する肺がんの比率は、主にその国の屋内ラドン濃度により決定される。経済開発協力機構 (OECD) 参加国 30 の大部分の国における住居ラドン濃度の分布を調べるため、調査が行われた。世界の平均屋内ラドン濃度は、39 Bq/m<sup>3</sup> であると見積もられた (表 4)。

表4. OECD参加国の屋内ラドン濃度

Country	Indoor Radon Levels [Bq/m <sup>3</sup> ]		
	Arithmetic mean	Geometric mean	Geometric standard deviation
OECD countries			
Australia	11	8	2.1
Austria	99	15	NA
Belgium	48	38	2
Canada	28	11	3.9
Czech Republic	140	44	2.1
Denmark	59	39	2.2
Finland	120	84	2.1
France	89	53	2.0
Germany	49	37	2.0
Greece	55	44	2.4
Hungary	82	62	2.1
Iceland	10	NA	NA
Ireland	89	57	2.4
Italy	70	52	2.1
Japan	16	13	1.8
Luxembourg	110	70	2
Mexico	140	90	NA
Netherlands	23	18	1.6
New Zealand	22	20	NA
Norway	89	40	NA
Poland	49	31	2.3
Portugal	62	45	2.2
Republic of Korea	53	43	1.8
Slovakia	87	NA	NA
Spain	90	46	2.9
Sweden	108	56	NA
Switzerland	78	51	1.8
United Kingdom	20	14	3.2
USA	46	25	3.1
Worldwide average	39		

Sources: WHO (2007), UNSCEAR (2000), Billon et al. (2005) and Menzler et al. (2008).

幾つかの国に関して、ラドン曝露に起因するラドン起因性肺がん数が詳細に検討され報告されている。計算は、調査により得られた屋内ラドン濃度の評価値と、BEIR VIの鉦夫の調査解析で得られた間接的なリスク係数を用いるか、あるいは、欧州統合調査で直接的に得られたリスク係数を用いてなされる(表5)。

多くの集団で、現在喫煙者は生涯非喫煙者に較べて肺がん率がずっと高い。住居ラドン調査では、屋内ラドン濃度の単位増加当たりの肺がんリスクのパーセント増加量は、生涯非喫煙者と喫煙者でほぼ同じである(表3)。さらに、喫煙情報が入手可能であった鉦夫調査では、屋内ラドンの単位濃度増加当たりの肺がんリスクのパーセント増加量もまた、近似していた。それ故、大多数のラドン誘発肺がんは、ラドンと喫煙が合わさった原因で起きている。その意味では、個人が喫煙をしなかったか、あるいは、ラドンに曝露しなかったなら肺がんに罹患しなかったかもしれない。

表5. いくつかの国でのラドン起因性肺がん率の推計値

Country	Mean indoor radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	Risk estimate used in calculation	Percentage of lung cancer attributed to radon [%]	Estimated no. of deaths due to radon-induced lung cancer each year
Canada (Brand et al. 2005)	28	BEIR VI	7.8	1 400
Germany (Menzler et al. 2008)	49	European pooling study <sup>a</sup>	5	1 896
Switzerland (Menzler et al. 2008)	78	European pooling study <sup>a</sup>	8.3	231
United Kingdom (AGIR 2009)	21	European pooling study <sup>a</sup>	3.3	1 089
		BEIR VI	6	2 005
France (Catelinois et al. 2006)	89	European pooling study	5	1 234
		BEIR VI	12	2 913
United States (BEIR VI, 1999)	46	BEIR VI	10-14	15 400 - 21 800

<sup>a</sup> with adjustment for year-to-year variation in indoor radon concentrations.

個人のレベルでみると、一定のラドン濃度に曝露した後のラドン誘発肺がんのリスクは、生涯非喫煙者より現在喫煙者のほうがずっと大きい。これは、欧州住居ラドン調査の統合調査で例示されている (Darby et al. 2005)。生涯非喫煙者では、屋内ラドン濃度が0、100、あるいは800 Bq/m<sup>3</sup>の家に住んでいると (75歳までの) 肺がん死亡リスクは各々1000分の4、5、ないし10となる。しかし、喫煙者ではこれらのリスクはずっと大きくなり、それぞれ1000分の100、120、ないし220となる。禁煙したヒトの場合は、ラドン関連のリスクは、喫煙し続けたヒトよりずっと低くなるが、生涯非喫煙者に較べればリスクは高い。

## 2. ラドン測定法

### キーメッセージ

- 住宅でのラドン測定は、簡単に実施できる。しかし、正確で一貫した測定を保証するためには、標準的（国定などの）プロトコルに従う必要がある。
- 住宅やその他の建物の年間ラドン平均値を評価する目的には、長期間のラドン濃度を総和する測定手法の方がよい。
- 時間により屋内ラドン値は大きく変動するので、多くの場合、短期間の測定は信頼性が低い。
- 測定器の型を選択するに当たっては、注意深く選択すべきである。測定器の型によって一件当たりの費用が変わり、それ故国のラドンプログラムの費用が影響を受ける。
- ラドン測定の信頼性を確保するために、品質保証と品質管理の手法を導入することが強く推奨される。

(以下略)

## 3. ラドン防止と減免

### キーメッセージ

- 全体にリスクを低減するためには、ラドン防止（新築住宅）と減免（既築住宅）の戦略が必要である。
- ラドンの放出源、ラドン濃度、そしてラドン輸送機序によりラドン防止と減免にどの戦略を用いるかが変わる
- どのようなラドン防止・減免策をとろうが、その有効性を確認するためにラドン測定を行わなければならない。
- 建築分野の専門家がラドン防止・減免のキープレーヤーである。彼らを訓練し、この分野でのコンピテンス（要求される能力）を確実にする戦略が必要である。
- 国家レベルで、ラドン防止・減免に関する研究に基盤をおくガイドラインや基準を策定すべきである。

この章では、新築（増築や改修を含む）工事中にラドン対策を実施する手法に焦点を絞る。この対策は、ラドン防止とよばれ、既存住宅のラドン低減の場合にはラドン減免または改善(矯正)と呼ばれる。ラドン防止と減免のガイドラインの中で、ラドン制御システムのための訓練と技術的要件に関する議論も行う。屋内ラドンの最も一般的な放出源は、建造物下にある土壌と地質である。しかし、ラドンは、(地下水供給の)井戸を使った地域的飲料水道や、コンクリートや煉瓦や自然石や石膏、リン酸石膏や溶鉱炉の残滓や石炭燃焼灰などの産業2次産物を使った建材などから放出される場合もある (EC 1999, Samlai et al. 2005)。ラドンの供給源およびラドンの移動機序は、様々なラドン防止策や減免策の費用対効果に影響を及ぼす。

#### 3.1 ラドン防止、減免活動のための組織

この節では、組織的なラドン計画という観点から、防止と減免活動に関連した幾つかの特別な項目に関して議論する。国のラドン計画の組織全般に関しては、第6章で詳しく述べる。

ラドン対策は、住民のリスクを総体として低減することを目標にすべきである。これは、既存住宅の減免を目標にしただけでは達成できない。このため、新築住宅のラドン濃度を低減することも低減の目標とするべきである。このような目標設定を行わないと、次のような場合には屋内ラドン濃度の高い住居数が増加するであろう。

1. 屋内ラドン濃度の高い新築住宅が住宅市場に増加する。
2. 減免工事を行った既存住宅数よりも屋内ラドン濃度の高い新築住宅数が多くなる。

国のラドン計画の枠組みの中で防止及び減免を成功させる鍵となる要素は、以下の通りである。

1. ラドン制御活動では、建造物の種類の複合を考慮する。
  - ・ 通常ラドン曝露が最も多いのは自宅であるので、新築と既築の住宅の対策
  - ・ 公衆が長時間曝露するような建造物、例えば学校、幼児施設、国(州)が所有ないし貸し出す建造物や宿泊施設
2. 建造物を調査して、最も効率よい防止や減免ラドン対策が採用されるようにする。地域毎に建築様式や基礎や換気システムは異なっており、また建築方法も異なる。とりわけ、この手の調査は以下の点を明確にしなければならない。
  - ・ 新築住宅のための建築基準などのラドン防止標準手法および規則
  - ・ 既存住宅の改修のためのラドン減免標準手法と要件（3.1.2節参照）
3. 複数のラドンの放出源からの寄与率は、地方毎に異なるし、地方の中でも異なる。以下の機序を考慮に入れるべきである。
  - ・ 気圧差による土壌ガスの侵入
  - ・ 建材からのラドンガス放出
  - ・ 水によるラドンの輸送
4. 効果的な防止や減免工事が実行されるように建築専門家の適切な訓練と免許制度を実施すべきである。

以下数節にわたり、ラドン防止と減免活動に共通する観点を幾つか述べる。

### 3.1.1 ラドン制御システムのデザイン要件

ラドン防止および減免システムは以下のデザイン面での要件がある。

- ・ ラドン濃度を参考レベルよりずっと低いレベルに低減できること
- ・ 安全で（暖炉やストーブ等の炎が屋内に吹き出すような）背面通気が起こらないこと
- ・ 耐久性があり、家の耐久年数の期間機能すること
- ・ 作動が簡便にモニターできること
- ・ 静かで障害にならないこと
- ・ 設置、運転、維持の費用が安いこと
- ・ 受動的土壌減圧法（PSD）を設置する場合、換気扇を簡便に追加できること

これらのデザイン上の要件を考慮に入れた新築用のラドン制御システムの比較を表9に示す。

表9. 新築住宅用のラドン制御対策

対策	ラドン低減効率	長期作動性	モニターの簡便さ	静寂性、非障害性	費用	
					設置	運転
接触している 土壌表面の封入(シーリング)	不可～低・中等度	通常悪い～まあまあ	ラドン測定を繰り返す必要	通常、大変良い	中等度	非常に低い
土壌ガス防壁法	非常に変動	安定しかし屢々限定的ラドン低減	ラドン測定を繰り返す必要	大変良い	管理と品質により異なる	なし
非居住下層空間の受動的換気法	中等度～良	大変良い	ラドン測定を繰り返す必要	大変良い	低い	低い
非居住下層空間の能動的換気法	良	大変良い	ラドン測定を繰り返す必要	良い	中等度	中等度
能動的土壌減圧法 <sup>a</sup>	中等度～良	大変良い	圧測定やラドン測定が必要	通常大変良い	低い	中等度
受動的土壌減圧法 <sup>a</sup>	低～中等度	土壌表面の封入が維持される限り良い	ラドン測定を繰り返す必要	通常大変良い	低い	大変低い
バランス換気法 <sup>b</sup>	低～中等度	作動し維持される限り良い	ラドン測定を繰り返す必要	通常大変良い	低い～高い	中等度～高い

出展： USEPA(1993)

<sup>a</sup>能動的および受動的土壌減圧法は、最も一般的なラドン制御対策である。

<sup>b</sup>バランス換気法は、排気と吸気がバランスする換気システムである。

### 3.1.2 研究を基礎としたガイドラインないし基準

ラドン防止および減免のガイドラインないし基準は、良い工事が実行されるための最少要件として開発され適用されるべきである。ガイドラインや基準は、建築科学に基づいたものでなければならない。さらに、ガイドラインや基準は、全ての可能な状況に言及できないため、明確なデザイン要件に基づくべきである。

このようなガイドラインや基準を準備するに当たって、ラドン減免工事を請け負う業者や建築研究者やその他の建築や工事の専門家と協議する事が重要である。FlaterとSpencer

(1994年)は、これらのガイドラインや基準が建築基準の一部に取り入れられるのであれば、遵法を保証するための検証手段が必要であると述べている。減免ないし防止ガイドライン文書ないし基準を設けている国は、オーストリア、ベルギー、中国、チェコ共和国、フィンランド、フランス、アイルランド、ラトビア、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、スイス、英国、米国である (WHO 2007)。ガイダンスの例をボックス2に例示する。

Box. 2: ラドン・ガイダンス文書の例

中国：低層住宅におけるデザインおよび工事に関するラドン制御策の標準指針 (GB/T17785-1999)； 屋内空気質標準(BB/T18883-2002)。

英国：既築住宅のラドン修繕のためのガイド(BRE1998)

米国：低層住宅における能動的土壌減圧ラドン減免標準指針(AARST2006)； 既築低層住宅におけるラドン減免設置工事の標準実施要領 (ASTM2007)

### 3.1.3 ラドン専門家の訓練と熟練度検定

費用対効果の高いラドン制御システムをデザインし設置するためには、ラドン減免専門家や請負建築業者やその他の防護専門家を訓練するための方策を確立しなければならない。さらに、公衆衛生担当部局の職員は、全般的なラドン防止策に関する訓練を受けるべきである。もしラドン防止規制の要件が実施された暁には、建築専門家もまた訓練されなければならない。

さらなる上級の教育課程を含んでもよいが、この訓練や検定の方策には、最低限度、初期訓練過程を含むべきである。訓練プログラムは、建築研究者や建築請負人や建築労働者とよく話し合いの上で開発されるべきである。訓練には大学、政府や非政府機関が参加すべきである。

さらに、訓練を受けた専門家に証明書ないし免許証を与えるなどにより熟練度を確実にするための方策を確立することを推奨する。

### 3.2 新築工事におけるラドン防止策

先に述べたように、最も重要なラドン輸送機序は、気圧差による土壌から居住スペースにむかう空気の流れである。他の機序には、拡散が含まれる。土壌と居住スペース間に気圧差があることがラドン侵入の主要な原因なので、ラドン防止策は通常この気圧差を逆転させようとする。一般的には、これは能動的（換気扇を使った）または受動的（換気扇は使わない）土壌減圧策により達成される。気圧の制御と平行して土壌と屋内の間に膜を設

置する手法が使われるかもしれない。膜を単独で使う制御技術に関しては 3.2.3 節で述べる。

### 3.2.1 ラドン防止策の有効性の評価

新築住宅にラドン制御策を施しても、それで屋内ラドン濃度が常に低値に維持されるわけではない (Synnot 2003, Saum 1993)。それゆえ、新築住宅のラドン測定が望まれる。

- ・ 居住前： 暖房と換気の状態が異なるため、空き家での屋内ラドン濃度は居住後の濃度とは異なるであろう。しかしながら、居住前に測定することにより問題を発見でき、居住後より簡単にこの問題に対処できるであろう。
- ・ 居住中： 新築住宅に住人が入ったなら、ラドン測定をすることにより屋内ラドン濃度が参考レベル以下になっているかどうか確認しよう。ラドン制御システムの成績は時間の経過により変動するので、ラドン測定は家の寿命にあわせて繰り返し行うべきである (Gammage & Wilson 1990)。

これらの測定は、第2章に述べた認知された測定プロトコルに従い実施されなければならない。

### 3.2.2 建築前の土地評価

様々な単位の地理学的な地域区分において、屋内ラドン濃度が高くなる可能性を事前に評価するため世界中で様々な手法が利用されている。その一つは、地方や郡や市やその他の地理学的領域の (ラドン) 地図を作成することである。他のアプローチ法はチェコ共和国で行われた手法で (Neznal et al. 2004)、個々の建設予定地で測定を行いその土地のラドン指標を求める方法である。この指標は、その土地に家を建造する場合に必要なラドン防止策の度合いを決定するのに使われる。しかしながら、フィンランド、アイルランド、ノルウェー、スウェーデン、スイス、英国および米国では、最も費用対効果のよいアプローチ法は全ての新築住宅にラドン制御策を導入することとされている (WHO2007)。時に、このアプローチは高ラドン地域に限定される (第6章参照)。

### 3.2.3 ラドン防止策

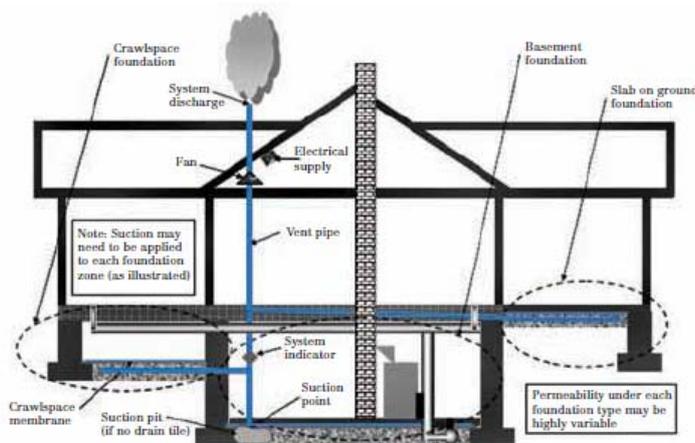
ラドン防止策の多くは、土壌と屋内居住空間との気圧の差により土壌ガスが侵入するのを制限する手段に焦点を合わせている。費用対効果の高いラドン防止策であるためには、建築工事、ラドン放出源の多様性、およびラドンガスの輸送機序のその地域や地方に特異的な3者の複合を考慮に入れなければならない。複数の基盤をもつような建築物などの特殊な状況下では複数の防止策を施工する必要がある。幾つかの防止策について、以下の纏めておく。

a. 能動的土壌減圧法 (ASD)

図4にADSを示す。ADSは簡便に設置できて、受動的土壌減圧法 (PSD) よりラドン低減効果が高い (USEPA 1993)。このため、家を新築する人にとってADSは好ましいオプションである。カナダで試験的に導入されて以来、ADSには豊富な歴史がある (Scott 1979, Gessall & Lowder 1980, DSMA ATCON 1982)。一般的に、ADSシステムは以下の基本的な構成要素を有する。

- ・ 家の地面に接している床あるいは土間床の下に吸引ポイント (1ないし複数) を設け、このポイントを連続的に均一な通気性をもつ採石層や地下水制御システムや貯水槽などに連結する。
- ・ 人への曝露が最少になるような場所、例えば、最も高い屋根の上などに排出ポイントを設ける。ADSの排出を一階の高さにすると、ラドンが再度家に侵入するとの事実がある (Henschel & Scott 1991, Yull 1994, Henschel 1995)。それ故、リスクが低いと思われる場合でも、ADSシステムは再侵入のリスクが最少になるよう設置すべきである。
- ・ 連続的に稼働する配管内換気扇は、ラドンを低減したい家のスペースの外側且つ上部に設置する。既築住宅用と新築住宅用のADSで大きな違いは、後者では通気性層や膜による密閉などを組み合わせているため、小さいがエネルギー効率の高い換気扇を使用することである。
- ・ 換気扇の下の排気管の大気圧の差をモニターするためにUチューブ型の液柱計が利用できる。
- ・ ADSシステム (PDSでも同様) と他の配管設備との混乱を避けるため、手が届く場所にあるシステムには全てラベルを貼るべきである。

図4. 新築住宅のラドン制御のための能動的土壌減圧法 (ADS)



b. 受動的土壌減圧法 (PSD)

PSD (図5参照) は、新築住宅で使われる。ADSと似ているが以下の点で異なる。

・ PSDの有効性は排気パイプの中の空気が熱で上昇する事およびPSD自体による住居の下の土壌を少し減圧する能力に依存している。PSDを有効にするためには、以下の点を考慮しなければならない。

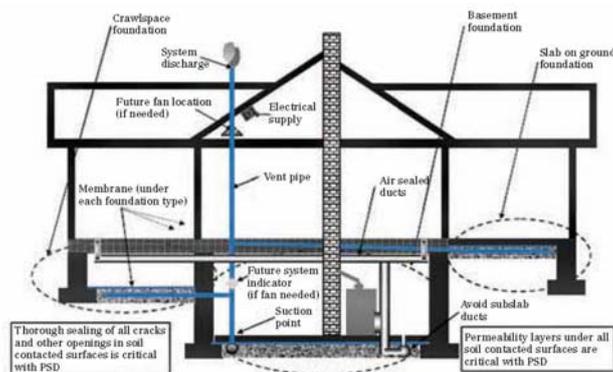
- ① 地面に直接接している全てのエレメント(コンクリート土間床、床下の膜など)の下面には、均一で通気性のある層が必須である。
- ② 排気パイプは、主に建物のなかで加熱されている場所を通るように設計され、かつ、加熱されない場所を通る排気パイプは断熱することが必須である。
- ③ PSDシステムがラドン濃度を十分低減できなかった場合に換気扇を簡単に追加設置できるように、排気パイプのルートを設計すべきである。
- ④ 排気ダクトからの排気は、最も高い屋根より上で行うべきである。
- ⑤ 配管システムと間違わないように、手が届く場所にある全てのPSDシステムにラベルを貼る。

・ 地面に直接接している建物のエレメントは、ガスの侵入を防止するためにシール(密封)されなければならない。

・ 排気パイプと居住空間との気圧の差はとても小さいので、システムの低減成果を確認する唯一の方法は、定期的、又は連続的なラドン測定である。

新築住宅では、PSDはラドン濃度を約50%低減するようだ (Dewey & Nowak 1994)。仮にPSDシステムが適切にデザインされ、施工されているならば、小さな換気扇(75Wかそれ以下)を追加することによりシステムを効率化できるだろう (Saum 1991, ASTM 2007)。小さな換気扇を使うことにより、稼働エネルギーコストを少なくできる。

図5. 新築住宅でラドンを制御するための受動的土壌減圧法



### c. 表面シーリング（密封）

屋内の居住空間と土壌を隔離させる表面シーリングは、PSD や ASD 等の他の防止策の効率を高める事ができる。その効果は相当あると思われるが（Henschel 1993）、シーリングは屋内の空調された空気の漏出を防ぎ、そして土壌から屋内への気圧差を逆転させ増加させる。

それ単独の防止策としては、シーリングはラドン低減策として限定的な効果しかない（Brennan et al. 1990, Scott 1993）。それは、とりわけ長期的にみると限定的である。シーリングは、ラドンが土壌から屋内に移動する主要な理由、すなわち気圧差に基づく空気の流れに関して何ら対策を講ずるものではないからである。

### d. 防壁と膜

土壌と屋内の間に防壁又は膜を設置する手法は、それ単独でラドン防止策として使われたり、他の PSD や ASD などの対策と組み合わせられて使われたりする。膜は、屋内への湿気の移動を制限する上でも役立つ。防壁を使うに当たり、その機密性や拡散や耐久性などの特性に関して独立した第三者機関により認定されているかどうかに注意を払うべきである（SINTEF 2007）。

防壁は土壌から屋内へのラドン輸送を減らす助けになるだろうが、それらの効果に関しては採用するオプションにより変わる。

- ・ 防壁は機密性がなければ効果がない事を認めつつ、防壁の支持者は、設置された後に悪くなるようなことはほとんど無い事をあげている。Scivyer と Noonan (2001)は、研究報告書のなかで全面にラドン膜を設置した家で10年間ラドン濃度の変化はなかったという。しかし、膜法が最初の時期にラドンを低減したのかどうかに関する記載は見あたらない。
- ・ 膜法に対する批判者は、通常の建築状況下で機密性のある膜を作るのは極めて難しい点をあげている。穴の空いた膜は、土壌ガスを集め土壌ガスを家の隙間から注ぎ込む罠として働く可能性がある。さらに、防壁自体は気圧の差を変更するものではない（Scott 1993）。防壁は、気温による気圧差が小さい温暖な気候の方が、効果は高いであろう。図6にラドン防壁設置のまずい例と良い例を示す。



悪い例

良い例

図6. 防壁設置の例

#### e. 非居住空間の換気

居住空間と土壌の間にある非居住空間を換気することは（例えば通気口を備えた床下などの狭空間の換気）、土壌から屋内を分離し、居住空間より下層のラドン濃度を低減することにより、屋内ラドン濃度を低減することができる。この手法がうまくいくかどうかは、幾つかの要素に依存している。これらの要素は、換気されている非居住空間の上層の床の機密性であり、また、受動的な換気システムの場合は、非居住空間の境界にある通気口の分布である。この手法の変形として、換気扇を使って非居住空間に陽圧ないし陰圧をかける手法がある。しかしながら、換気扇を使った狭空間の減圧は、エネルギー損失および燃焼器具から逆向きに排気起きるなどの不都合が生じる（ASTM2003a）。土間下および膜下減圧法（SSD および SMD）は能動的ないし受動的に行うことができ、床下狭空間を土台にもつような建物のラドン制御に推奨される方法である。SSD と SMD は、狭空間の換気よりラドン低減効果が高い。

#### f. 居住空間の換気

屋内空気の総合的な質を確保するためには、屋内と屋外の空気を入れ換えることが望ましい。ラドン防止の目的では、換気は様々な結果を生み出し、極端な気候ではエネルギー損失をもたらすであろう。ラドン放出源の多くが建材であるならば、換気は必要である。しかし、そもそもラドンを放出するような建材は使わない方がよい（EC 1999）。

#### g. 水処理

水中の高濃度のラドンが問題となる地域を除けば、新築住宅で水処理を行うことは一般的ではない。屋内ラドンを低減するための水処理技術に関するさらなる情報は、3.3.2 節の最後にラドン減免のパラグラフがあるので参照されたい。

### 3.3. 既築住宅のラドン減免方策

ラドン減免のある部分はラドン防止と似通っている。しかしながら、その間にはわずかだが重要な違いがある。ラドン減免の費用対効果は、導入されたシステムの種類と設置工事の質により変わる。他の方法や家主自身によって施行された能動的土壌減圧法に較べて、経験豊かな設置業者が行った能動的土壌減圧法は最も効果的にラドン濃度を低減する事ができる (Naismith et al. 1998)。

減免工事を決断する目的あるいは減免工事の効果を判定する目的で、ラドン測定を実施する場合には、認知された測定プロトコルに従い実施し、適応可能な参考レベル値を使うべきである (第2章。第6章参照)。

ラドン測定結果に基づいて、ラドン減免の方針や緊急度に関する勧告が出されるだろう。例えば、測定の結果、屋内ラドン濃度の上昇はわずかであり、それ故ラドン低減の時間的猶予があるのであるならば、限定的ないし段階的な減免策をとることが推奨される。次いで、必要なら後から減免策の質的向上を図る事ができる。

米国などの幾つかの国では、減免策は、能動的土壌減圧法などのより強力な修繕法に集中している。この手法だと、より限定的な策に比してコスト増を小さく押さえつつ、ラドン低減の効果を最大にする事ができる。さらに、強力な方法の方がラドン低減目標を達成するうえでより大きな信頼を得ることが可能である。家の売買など時間的猶予の少ない場合にラドンを低減する必要がある場合には、強力な減免方法が適切である。

既に第2章で議論したように、減免工事が終わった後で必ずラドン低減効果を確認するためにラドン測定を行うべきである。さらに、ラドン減免システムの作動状況は変動するので、減免措置を施した家屋のラドン濃度は定期的に再測定を行うべきである (Gammage and Wilson 1993)。

#### 3.3.1. 減免工事前の家屋調査と試験的測定

以下の段取りは、減免工事を施す家屋の特性に合致するもっとも費用対効果の高いラドン低減システムを見つける上で重要である。一般的にいえば、診断というプロセスは、複雑な家屋ほど、および減免の困難な状況であるほど、より徹底して行うべきである。多くの国で、事前検査は、減免工事を行う業者とは異なる私立の業者によって実施される。スイスでは、国の契約団体がこの調査を行い、家主に減免のオプションを勧告する。ノルウ

エーでは、理想的には減免請負業者と無関係な測定専門の私立の業者が評価を下す事になっている。フィンランド、アイルランド、スウェーデン、英国、米国では、診断は普通減免工事請負業者によって実施される。診断検査は、以下の基本的項目を考慮に入れるべきである。

- ・ 必ず家屋を実地調査して、以下のようなラドン侵入のダイナミックスや応用可能な減免策を決定するべきである。

- ① ラドン侵入部位（複数）
- ② 能動的土壌減圧法（ASD）の吸引ポイント候補（複数）
- ③ ASDのダクト配管ルート候補（複数）
- ④ 家が減圧される主要な機序
- ⑤ 建築歴と改築歴
- ⑥ 燃焼汚染物質を排気している燃焼器具

- ・ もし気圧の差に基づく土壌ガスの侵入が疑われる場合には、科学煙や粉末アンブルやマイクロ圧力計などを使用することがしばしば助けになる。

- ① 土壌と屋内の気圧の差、あるいは屋内外の気圧の差
- ② 吸引式の掃除機や臨時の換気扇を使って減圧した場合に、居住スペースの下面の土壌での圧力場の分布（Henschel 1993）。

非熱的発煙アンブルを使うと、気圧差を質的に示す事ができる。他方、マイクロ圧力計は気圧差を量的に示すデータを提供する。また、排気換気をオンオフした際に起きる屋内外の気圧差をマイクロ圧力計により測定することにより、可能性のあるラドン侵入ダイナミックスを理解する助けになる。

- ・ 屋内空間の加圧ないしラドンが侵入した後の希釈を目的とした機械的な換気を考慮する場合には、建造物の外殻の気密性を調べておく必要がある。屢々この目的のために換気扇ドア（送風機ドアとも呼ばれる）が使われる（ASTM 2003b）。換気扇ドアは、所定の屋内ラドンを低減するために、どの程度の換気量が必要かを定めるためにも使われる。空気流量を測定することによって、元々の換気率の情報が得られ、また屋内ラドン濃度に対する換気システムの効果予測に関する情報が得られるであろう。
- ・ 機械的に換気されている建造物では、連続的にラドンをモニタリングすることにより、機械的な換気システムが屋内ラドン濃度に影響を及ぼしているか否かを決定できるだろう。もし機械的換気システムの稼働がラドンの侵入と相関しているのならば、他のラドン減免措置を執る前に機械的換気システムの調整を行うべきである。どのような換気の調整であれ他の問題を引き起こすべきでないし、調整は換気システムや法律や基準に詳しい施工業者によって行われるべきである。
- ・ 建材からの放出が疑われるのであれば、2.2.4.節で述べたような方法で測定すべきである。

- ・ 私的ないし非公的な井戸から供給される水が原因と思われる場合には、水サンプルを採取して試験機関によって測定してもらうべきである。

### 3.3.2 ラドン減免方策

費用対効果を高めるためには、ラドン減免方策は、家やビルの特色、気候帯、ラドン放出源および輸送機序などの個別的な複合状況にあわせる必要がある。表 10 にラドン減免技術を要約した。施工費用は、熟練したラドン減免業者の費用を反映している。複雑な建造物や一つの方法では満足な結果が得られない場合には、防止の場合と同様に、減免においても個々の技術を組み合わせて施工する場合がある (BRE 1998, Henschel 1993, Pye 1993, Roserens et al. 2000, Welsh et al. 1994)。一般にラドン減免システムは以下のように分類される。

表 10. 一般的なラドン減免技術とその効果および費用<sup>1,2</sup>

技法	代表的なラドン低減率(%)	代表的な施工業者費用(ユーロ) <sup>3</sup>	代表的な年間稼働費(ユーロ) <sup>4</sup>	コメント
ASD <sup>5</sup> ; 高～低多孔性間隙率の土間下	50～99	850～2700	50～275	土間下吸引は、土間下の多孔性の石材層や地下水制御構築物や穴の開いた貯水槽などから行う
ASD <sup>5</sup> ; 極低多孔性間隙率の土間下	50～99	850～2700	50～275	土間下減圧法として知られている技法
ASD <sup>5</sup> ; 膜下減圧法	50～99	1100～2700	50～275	接近可能な床下狭空間で露出している地面の上に膜を置いて、その下から吸引する
床下の能動的換気	50～99	550～1600	50～275	地面と居住空間を隔てている接近不能な空間を換気扇で加圧ないし減圧する。(配管が換気にさらされる場合には、注意が必要)
床下の受動的換気	0～50	0～550 もし換気口を追加するなら	多様	暖房が優勢な地域および気密性の低い床の家では効果はない。(配管の凍結に注意)
ラドン井戸	60～95	2150～4300	多様	非常に多孔性の土壌(氷河床など)で最も有効。複数の家へのラドン侵入を低減するために用いられる。

土壌加圧	50～99	550～1600	50～275	非常に多孔性土壌で中等度に高い土壌ラドン濃度かつ非常に気密性の高いコンクリート土間の場合にもっとも効果的
地面に接している狭空間の加圧	50～99	550～1600	150～550	地面に接している空間が比較的気密性が高く、そして外界や他の屋内空間から隔離されている場合にもっとも効果的
居住空間の受動的換気	多様／一時的	ない	100～750	暖房あるいは冷房された空気の重大な損失。特に気候のより厳しい地域では恒久的な施策ではない。
居住空間の能動的換気	30～70	225～2700	7～550	極めて小さな吸気用扇風機 <sup>6</sup> から均衡熱回収換気まで（両者とも連続運転）

<sup>1</sup> データは USEPA(2003)により報告されたもので、フィンランドと英国からの報告に似通うように修正されている。

<sup>2</sup> 主要な水の減免技術は二つあり、個々には記載されていないが、脱気と活性炭フィルターである。

<sup>3</sup> 設置費用は、家の外観をきれいにする必要のある場合や地域の減免需要が高い場合や減免業者が少なかったりする場合には、高くなるかもしれない。

<sup>4</sup> 換気扇の電気代や家の冷暖房費用の損失は、気候（温暖）、家のサイズ、地域の電気代および暖房用の油の値段を勘案して算定されている（Bohac et al. 1992）。

<sup>5</sup> ASD は能動的土壌減圧法をさす。この表では、ハイライトされているが、それは ASD が最も一般的なラドン減免技術だからである。

<sup>6</sup> 小さな吸気用扇風機は、土壌に接している空間を若干与圧するために使うことができる。

#### a. 能動的土壌減圧法

既に述べたように、ASD は既築住宅のラドン減免の中で最も一般的な方法である。色々な家やビルのラドン減免で、ASD は高い信頼性があるため、ASD は第 1 に考慮すべき手法である。WHO のサーベイによれば（WHO 2007）、能動的土壌減圧法は以下の国々から報告されたラドン減免対策の多数を占めた：オーストリア、ベルギー、ドイツ、ノルウェー、スロベニア、スウェーデン、英国、米国。これらのシステムの形状は、地下室や土間床や床下狭空間など土台の特徴により変化する。

新築住宅への適用に較べて ASD を既築建造物に適用する場合の主な違いは以下の通りである。

- ・ 建造物最下層の床下の土壌は、極めて限定した通気性しか無いかもしれず、その場合には（吸引を実施する土間床下の表面積を増やす目的で）槽や吸引穴を設置する。あるいは、ASD 換気扇を大型のものにする必要がある。
- ・ 土壌と居住空間の間の隙間を防ぐのは難しいかもしれない。
- ・ 排気パイプのルートを設置するのが難しいかもしれない。

#### b. 居住空間の換気

換気扇を使って能動的に行ったり、窓や換気口を手動で開けて受動的に行ったりすることにより、居住空間の換気を行うことができる。ラドン制御のための受動的あるいは自然換気の有効性に関しては限定的な証拠しかない (Cavalla et al. 1991, 1996)。しかし、アイルランドのような温暖な気候では、換気は効果のあるラドン減免法として使われている (Synnott 2004, 2007)。ラドン低減のために換気を使う手法は、小さな家屋よりは機械的に換気をする学校や大きな建造物でより一般的である (WHO 2007)。換気扇を使った換気（吸気）は土壌と居住空間の気圧差を緩和し、屋内に侵入したラドンの濃度を希釈する。以下の要素のうち一つ以上が示唆される場合には、換気によるラドン対策はとりわけ有用である。

- ・ 主なラドン放出源が建築材料である
- ・ 建造物のある地域が冷房優位ないし暖房優位の気候ではなく、換気によるエネルギー損失が小さい
- ・ ラドン以外にも多数の空気質上の問題がある
- ・ ASD の設置が難しいか、ASD のみではラドン濃度を十分低下することができない

機械的換気は、各々の手法の良い面と悪い面を考慮しながら以下の 3 法の一つで行う。

1. 土壌および戸外に対して減圧する排気型換気は、ラドン制御の目的で使われることはほとんどない。特に、暖房や冷房が優勢な気候ではそうである。
2. 吸気型換気（あるいは陽圧換気）は、土壌や戸外に対して屋内を加圧すると共に、屋内に侵入したラドンを希釈する。費用見積もりの例はボックス 3 に挙げた。吸気型換気は、熱帯気候では、建造物の外殻に露結被害などのリスクを及ぼす可能性がある。しかし、英国やスイスでは、小型の吸気型換気扇により屋内ラドンを低減する事に成功している。批評家は、効果的にするためには住人によるフィルター管理がされなければならない、および、全ての窓やドアは閉じていなければならないと論じている (Clarkin et al. 1992)。もっと寒い気候では、換気扇は加熱装置と組み合わせなければならない。

3. バランス排気型換気は、土壌と戸外との関係で屋内を加圧も減圧もしない。この方式の換気は、建造物の中に侵入後にラドンを希釈する。暖房や冷房を行う気候の条件では、平衡換気は屢々エネルギー消費を減らすために熱またはエネルギー回収換気装置を使って行われる。

### ボックス 3. 吸気型換気の例とその費用見積もり

換気扇は、土壌との比較で屋内を僅かに陽圧にしたり、陰圧の屋内の気圧を減じたりすることによりラドンを減らす。英国の家庭では、最大送風 52 l/s の換気扇が使われ、最高750 Bq/m<sup>3</sup>までのラドン濃度を参考レベルの200 Bq/m<sup>3</sup>以下まで低減している。これらのシステムの費用は、設置に500-750\$、稼働に10-15\$/年である。

### C. 表面のシーリング

屋内と土壌の間の建物表面にある隙間を塞ぐこと(シーリング)は、単独でおこなう減免技術としては評価が分かれており、最も良い場合でも、限定的な効果しかない。例えば、シーリング単独の成功例は1500事例のたった1件だけと報告されており、それゆえこの方法は推奨されない(Turk et al. 1991, USEPA 1993)。フィンランドでは、シーリング単独で屋内ラドン濃度を10から30%減少させている(Arvela and Hoving 1993)。ノルウェーではシーリングを第1段階として推奨しており、必要に応じて追加の減免措置を追加する(SINTEF 2007)。能動的土壌減圧法を組み合わせたときに、シーリングはシステムの性能を改善する。しかし、単独の方策としては、気圧差によるラドン侵入を防止するに足るほど地面に接している建造物表面を封入する事は大変難しい。

### d. 水処理

比較的まれなケースとして、個人的に掘削した井戸から供給される水を介して大量のラドンが屋内に輸送され、ラドンが屋内の空気に放出される場合がある。このような場合には、水処理は屋内のラドン濃度を減らすために使われる。水中のラドンによる健康リスクは、飲水ではなく一義的に吸入による。井戸水からの屋内ラドンを減らす第一の方策は、家への入り口で行う次のような方法である。

- 脱気： 密閉したタンクの中で、水の中に空気を泡状に吹き込む、又は水を空中に噴霧する、又は水を物体の上を何段も滝のように流す。これにより、その間にラドンは水から外気に放出される。
- 粒状の活性炭で濾過する方法は、費用が一般的に安いがラドンの低減は低い。

Dembek ら (1993) および飲料水に関するWHOガイドライン(WHO 2005)は、水のラドン減免に関して追加情報を提供している。

## 4. ラドン規制の費用対効果

### キーメッセージ

- 防止策の費用対効果は、地域の平均ラドン濃度が上昇すればするほど上昇する。しかしながら多くの場合、全ての新築住宅にラドンバリアなどのラドン防止策を施工の方が費用対効果は高くなる。
- 既存住宅の減免の費用対効果は、ラドン濃度の高い家を同定するための費用と減免工事の費用そのものに影響される。
- 減免プログラムの費用対効果解析により、全国規模では費用対効果が悪いと判定された場合でも、高ラドン濃度の地域では減免工事を実施すべきである。
- 費用対効果解析は、現行の政策を評価する有用な道具であり、ラドンを低減させる新規のそして費用対効果の高い方法を導入する事につながる。
- 政策およびその代替策を評価するに際し、費用対効果解析は政策決定者に有用な情報を提供する。しかし、それは不確実性と限界を伴わざるをえない。それゆえ、この種の解析結果は注意深く解釈され、伝えられるべきである。

(第4章、以下略)

# 5. ラドンリスクコミュニケーション

## キーメッセージ

- ラドンのリスクやその防護に関するコミュニケーションは、ラドンが一般には知られていないこと、さらには公衆にとって健康リスクと認識されていないことにより、重大なチャレンジである。
- 公衆に情報を伝えるのに加えて、ラドンリスクコミュニケーションの第1の目的は、ラドンというものは対策が必要な公衆衛生問題であることを政策決定者に納得させることである。
- リスクコミュニケーションが有効になるためには、組織間の共同作業、明瞭で調和のとれたメッセージ、そして社会からの信頼の厚い協力者の参加が必要である。
- ラドンリスクコミュニケーションの一部として、特定の対象聴衆を狙った一連のコアメッセージを開発することが推奨される。これらのメッセージは、単純で、短く、要領を得たものでなければならない。
- 対象聴衆のラドンに関する知識レベルや理解度を評価することを強く推奨する。リスクコミュニケーション運動の前後において、この評価を実施すべきである。

この章の目的は、ラドンリスクコミュニケーションプログラムを展開するための手引きをすることにある。また、章では異なった複数のコミュニケーションの技術と行動プログラムを推奨する。ここで述べられる情報は、一般的なコミュニケーションの原則に基づいており、また、ラドンプログラムが良く開発されている幾つかの国の経験を踏まえたものである。ここに書かれる手引きは、国内あるいは地域の支配的な文化的、社会的、経済的な状況に応じて合わせる必要がある。この章では、ラドンに伴う健康リスクを心配している公衆とどの様にコミュニケーションするのかを調べ、また国のラドンプログラムの目的を調べる。

国のラドンプログラムにおいては、公衆と明瞭にそして効果的にコミュニケーションすることが第1の目的に掲げられるべきである。公衆とのコミュニケーションでは、基礎となるステップが複数有り、この章で詳らかにしていく。これらのステップには、公衆のリスクの認識度合いの評価、明瞭で理解しやすいリスクのメッセージ、対象聴衆の同定、そして幾つかの状況下ではラドン曝露によるリスクを明確化するための比較（例えば、ラドンによる肺がんとその他の原因による肺がん）などが基本的な構成要素が含まれる。

## 5.1 原則、行動プログラム、活動分野（チャンネル）

コミュニケーションにおいては、メッセージの内容と文脈の両方が重要である。ラドンのリスクに関するメッセージを受け取る聴衆は多岐にわたるため、彼らがどの様に受け止めるかを考慮することが重要である。5.2節でさらに説明するが、集団が異なればリスクの定義が異なる。効果的なコミュニケーションを構築するためには、信頼感を醸成し、注意深く、開放的な対話を維持する事が重要である(WHO 2002)。信頼感を醸成するためには、コミュニケーターは、対話能力があり、礼儀正しく、正直で、魅力的であり、明瞭で理解可能な言語を使わなければならない。注意深いコミュニケーターは、言葉を選ぶに賢明であり、積極的に聞き取り、身体言語を観察し、感情を認識することにおいて意図的である。開放的な対話を維持するために、コミュニケーターは、投入すべき情報を探し、情報を共有し、コミュニケーションの方法を提供する(WHO 2002)。

コミュニケーターを選ぶ時には、個人間のコミュニケーション技術に長け、トピックの領域の知識が豊富で、信頼のおける人物を選ぶことが重要である。コミュニケーターは、信用性を確立しようとする場合には、言語以外のコミュニケーションは言語によるコミュニケーションと同じように重要であることを必ず思い出す必要がある(USEPA 2007, WHO 2007)。

USEPA(2007)によれば、リスクコミュニケーションを行う際に共通して観察される誤った思いこみがある。例えば、「人々がどのような質問をするか予測することはできない」とか「リスクコミュニケーションすることは、人々に安心を与えるより、警告を発するほうが多い」などである。実際は、もしコミュニケーターが十分準備していさえすれば、質問や相違点に関する懸念の95%は予測可能であった。一般的なリスクに関する質問やより専門的な放射線リスクの質問の例は、他に纏められている(WHO2007、USEPA 2007)。

リスクコミュニケーションを評価する際には、3つの主要な構成要素がある。すなわち、リスク評価、リスク認知、リスク管理である(WHO 2002)。それぞれの構成要素は、いろいろな特性を包含している。リスク評価は、悪い結果がもたらされる可能性を述べるためのプロセスである。リスクが科学的なリスク評価を通じて定義されるなら、政策決定者はリスク管理のプログラムを策定することができる。リスク認知は、単なる公衆による認知にとどまらない。公衆の認知自体、過去に経験した他のハザード(危険)やリスクにより影響を受けている(Slovoc 1987)。さらにそれは経済的および政治的要素をも考慮に入れている。公衆の認知は、知識が獲得されたり情報が蓄積されたりするに従い、時間とともに変化する。リスク管理は、政策決定者および政府機関が公衆のリスク評価と認知にたいしてどのように対応するのかを扱う。政府機関は、新しい法や政策を作ることにより対応できる。このリスク管理の要素が、実行されるラドンプログラムの方向性に影響を与えるだろう。

公衆に情報提供することとは別に、ラドンリスクコミュニケーションプログラムの一義的

な目的は、ラドン曝露は対策が必要となる重大な公衆衛生問題であることを国および地方レベルの政策決定者に納得させることである。以下の第6章では、国および地方レベルで実施されるべき対策に関して議論する。

スウェーデンなどのいくつかの国での経験は、政策決定者をして政策を通じた対策の必要性を納得させることが、一般公衆にむけてリスクコミュニケーションのメッセージを発するだけよりずっと効果的であることを示唆している。しかしながら、住居のラドンレベルを低減する必要性を公衆に気づかせる事は、相変わらず重要な戦略である。政府が採択するコミュニケーション戦略は、以下の要素に依存する。

- 国の問題の重大さ
- ラドンプログラムの全体的な目的
- 目的に関するコミュニケーション
- プログラムの資金
- 参考値
- 国の建築基準

使われるコミュニケーションの経路と通路は、受動的（提供者との対話の機会を設けない情報提供）および能動的（情報は提供されると共に、受領者が相互作用し、対話が成立するよう）な実行技術を組み合わせて採用すべきである(WHO 2002)。例を表 16 に示す。

表 16. コミュニケーションに引き込むテクニック

受動的コミュニケーション	能動的コミュニケーション
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ダイレクトメール(例:ファクトシート、小冊子)</li> <li>・ 巡回興業や掲示板表示</li> <li>・ WEB サイトやリスト・サービス</li> <li>・ 新聞広告</li> <li>・ 建築業者の展示会に情報コーナーを設置</li> <li>・ メディアと直接接触(プレスリリースなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地方ラジオ局での電話相談室</li> <li>・ 第3者機関のネットワーク利用(コミュニティグループミーティングへの要約説明)</li> <li>・ 情報ホットラインやヘルプラインの提供</li> <li>・ 集会や公聴会の開催</li> <li>・ レポーターのインタビュー(ラジオ、テレビ)</li> </ul>

複数の国は大変よく練られたラドンプログラムをもっている。これらの国は、異なる戦略とコミュニケーション通路を利用している。いくつか例をここに述べる。

- 建築家のためのワークショップや訓練コースを通じて建築あるいは改築を実施している人々に直接アプローチして訴える
- 能動的および受動的なチャンネルの両方を通じて報道による情報を広める
- ラドン記念日やラドンフォーラムといった行事を組織し、適当な間隔で定期的な情報を伝える
- 医師や教師といった信頼の置ける中間的な対象群を利用する
- 政策決定者に規制のオプションをつくるよう説得する。このためには省庁間の意思疎通のチャンネルを確立しておく必要がある。

## 5.2 リスクコミュニケーションのためのラドンリスク問題の枠組み

ラドンリスクコミュニケーションプログラムは、明確で実行可能な目標を持たなければならない。これらは、異なる対象聴衆（5.4.1 節参照）に応じてラドンに関する情報を提供することに焦点をあわせる必要があり、またこれらの聴衆に対策をとってもらうよう説得することに焦点を合わせる必要がある。ラドンリスクコミュニケーションプログラムは、技術的な専門家（例えば放射線科学者や疫学者）とコミュニケーションの専門家（例えば社会学者、心理学者、ジャーナリスト）との共同作業であるべきだ（WHO 2002）。ラドンの健康影響に関して情報を伝達する際には、専門的な健康リスク評価という文脈においても「リスク」という言葉はいくつもの定義があることを認識しておかなければならない。一般には、個人に対するリスクの陳述書には、危害の確率ないし見込みの記述とその危害の重大さの記述が要求される。ラドンの場合、危害は主に肺がんであり、それは痛みを伴い致死的な疾病である。

コミュニケーション作戦で用いることのできる基本的情報として、屋内ラドン曝露に関するリスクメッセージの例をボックス4に示す。

ボックス4. 基本的な情報メッセージ例

「ラドン曝露においては、そのレベルより低ければリスクが無くなるようなしきい値は知られていない。家のラドン濃度が低ければ低いほど、リスクは低くなる。」

### 5.2.1 ラドンの肺がんリスク

第1章で述べたように、WHOのがん研究所である国際がん研究機関（IARC）は、ラドンを証明されたヒト発癌物質として分類した。この分類カテゴリーにはタバコ煙、アスベスト、ベンゼンが分類されている（IARC 1988）。世界中で家の中でのラドン曝露は肺がん死の最

も重要な原因の一つである。実際、ラドンに関係した肺がん死の大部分は、一般に屋内ラドンの参考値として使われている値よりも低いラドン濃度に曝露した人に起こるのであろう。これらの知見は、ラドンリスクコミュニケーションの戦略にとってばかりでなく、国のラドンプログラムにとっても含蓄を有する。USEPAは、これまで得られたデータを用いて米国では年間約21,000名の肺がん死が住居のラドンに起因していると推計した(USEPA 2003)。同じような推計が欧州25カ国について行われている(Darby et al. 2005)。これらの推計によれば、世界中で毎年数万人のラドンに関係した肺がん死が起こっている。

疫学という観点からは、リスクを表現する手法は様々である。一つの手法は相対リスク(RR)という方法で、所定のラドン濃度での(約30年の曝露の)リスクを特定の低いレベル(典型的には10-15 Bq/m<sup>3</sup>程度)でのリスクと比較するものである。RRが1ということは曝露した人にリスクの上昇がないことを意味する。住居のラドン疫学調査は、ラドン濃度が増えるに従いリスクは増加する事、すなわちRR>1であることを発見した。しかも、RRは濃度に比例して増加した。このことはラドン濃度単位増加当たりの過剰相対リスク(ERR = RR -1)すなわち100 Bq/m<sup>3</sup>当たりのERRとして表現された。これらのリスク推定値の信頼区間の推計値は、その結果が統計的に有意であるかどうかの判断に役立つ。

例えば第1章で説明したように、欧州調査(Darby et al. 2005)は、長期的なラドン濃度の平均値が100 Bq/m<sup>3</sup>増加するごとに肺がんERRが16%(95%信頼区間:5-31%)と推計した。北アメリカと中国の調査においても同じような結果が導かれた(Krewski et al. 2005, Lubin et al. 2004)。

公衆に相対リスクといった概念を説明するのは難しいかもしれない。効果的なリスクコミュニケーションのためには、リスクを絶対的な数字で表現するほうが良いかもしれない。例えば、集団の中でラドン曝露に関して発症すると推計される肺がん症例の絶対数などは、ずっと理解し易いであろう。同様に、色々な濃度のラドンに曝露された喫煙者と非喫煙者の生涯リスクを示すことも、公衆とラドンのリスクを伝達するうえで有用な方法となるだろう。ラドン曝露は喫煙者の肺がんリスクを有意に増加させるという事実を強調することにより、ラドンと喫煙が複合して影響を及ぼすとの情報は、タバコ規制キャンペーンを助けるだろう。

### 5.2.2 喫煙とラドンの相乗的効果

是非とも伝えなければならないもう一つの重要な情報は、ラドン曝露に伴う肺がんリスクとたばこ煙の関係だ。疫学調査は、どのようなレベルのラドン曝露であっても、喫煙者のラドン曝露に伴う肺がん絶対リスクは、非喫煙者や禁煙者に比べてずっと大きいこと、すなわちラドン曝露と喫煙に相乗効果があることを強調している。欧州調査を例にとると、

一日 15-24 本喫煙する喫煙者の相対的な肺がんリスクは、非喫煙者でラドン曝露がない人々と比べて、ラドン濃度が 0、100、400 Bq/m<sup>3</sup> の場合、それぞれ 26、30、42 倍となる。非喫煙者では、これらの相対的なリスクの大きさは、それぞれ 1.0、1.2、1.6 倍となる。後半の数値は、非喫煙者であっても高いラドン曝露での肺がんリスクが割り引かれることはないことを示している。

現在喫煙者（約 1 箱/日）では、ラドン曝露が 0 のばあい、75 歳の時の累積絶対肺がんリスクは約 10%と推計される。長期にわたり 800 Bq/m<sup>3</sup> のラドンに曝露する現在喫煙者は、このリスクが 2 倍以上の 22%に増加する。生涯非喫煙者の対応する絶対リスクは、それぞれ 0.4%と 0.9%である。ラドンによる禁煙者のリスクは、現在喫煙者と非喫煙者の値の間になる。

ボックス 5 に、肺がんに対するラドン曝露と喫煙の影響に関する有用なメッセージを例示する。

例え環境煙(ETS)とラドンの間に複合影響があると証明されなくとも、効果的なたばこ規制の対策および屋内空気質プログラムにより ETS 曝露は推奨されない (WHO 2008, Bochiocchio 2008)。

ボックス 5 : ラドンと喫煙の関係を説明するメッセージの例

「大部分のラドンに関係した肺がん死は、現在喫煙している人と過去に喫煙していた人で起きている。」

「ラドン曝露は、現在喫煙しているか、過去に喫煙していたか、喫煙経験がないかに関わらず、全ての人の肺がんリスクを高める。」

### 5.2.3 ラドンの癌リスクと他の原因の癌リスクとの比較

国あるいは地方レベルでラドンに起因する肺がん死亡率の推計値を他の癌とのそれと比較することは、ラドンリスクコミュニケーションに役立つだろう。多くの国で肺がんは癌死亡の大きな要素である。疫学調査によれば、ラドンによる肺がん死は 3~14%と推計されている。それ故、屋内ラドン曝露は、重要な公衆衛生上の危険要素となっている。実数であっても、ラドン関連肺がん死亡率は、他の癌死亡率より大きいであろう。合衆国を例にとると、ラドンに起因する肺がん死亡数は年間約 21000 であるが、この数は卵巣や肝臓や胃や黒色腫などの一般的な癌死亡数より大きい(Field 2005)。欧州を例にとれば、ラドンに起因する年間肺がん死亡は全癌死亡の約 1.8%、2006 年では大凡 30000 人にのぼる。この数は、食道や口腔咽頭の癌に匹敵し、黒色腫死亡数より大凡 50%多い(Darby et al. 2005, Ferlay et al. 2007)。このような情報はボックス 6 に示す情報メッセージとして表現できる。

## ボックス6：他のリスクとの比較をした情報メッセージの例

「ヨーロッパにおいては、黒色腫よりラドン関連で肺がんにより死亡する人の方が多い。」

### 5.3 ラドンリスクコミュニケーションにおけるコアメッセージ

公衆に理解しやすい情報を提供することは、難問である。このためには、メッセージを簡潔にし、標的聴衆に便益があることを示せるように組み立てる。簡単な言葉で、そしてよく知られた事例と比較しながらラドン問題を説明することは可能である。例えば、ラドンからの年間放射線被ばく線量は、通常 of 肺の放射線診断などの医療手技の被ばく線量と比較することができる。もし、良質な癌リスクデータがあるなら、前述したようにラドンによる肺がんリスクの大きさを他の癌リスクと比較して示す事は有用である。ある場合には、交通事故などの日常的なリスクと比較することも有用であろう。

ラドンリスクコミュニケーションは、現代の科学的共通理解を正確に反映した、簡潔で容易に理解可能な言葉で述べられた少数のコアメッセージに焦点を絞るべきである。標的聴衆にあわせてメッセージの形式は修正される。ラドンリスクコミュニケーションプログラムの一環として、一連のコアメッセージを開発することを推奨する。ボックス7に例を掲げる。メッセージを開発するには、簡潔で、短く、そして要領を得たものであることが重要である(USEPA 2007, WHO 2007)。

## ボックス7：ラドンコアメッセージの例

「ラドンは肺がんの原因である」  
「ラドンは家の中にある放射性ガスである。」  
「ラドンは簡単に測定できる。」  
「あなたは、ラドンから家族を簡単に守る事ができる。」

全てのラドンリスクコミュニケーションのメッセージは、個々の対象聴衆に応じて試験し、翻案しなければならない。メッセージを見やすくすることにより、ずっと効果が高まる。メッセージの伝達者として信頼があり尊敬される人物(例：地域の健康の権威者、医療人、学校の先生)を採用し、適切な情報伝達チャンネルを使うことが重要である。メッセージがうまく伝わるかどうかは、対象聴衆に適応した翻案のでき具合、伝達者と聴衆の信頼関係、そしてメッセージの明瞭さに依存する(WHO 2007)。

一般公衆と話し合う場合コミュニケーションをする場合、ボックス8に例示するような簡潔で非定量的メッセージにより、ラドン曝露と喫煙の相乗的な影響を強調するために使えるかもしれない。

#### ボックス8：簡潔な非定量的メッセージの例

「ラドンは元々高い喫煙者の肺がんリスクをさらに高める。しかし、喫煙するか否かにかかわらず、ラドン曝露はあなたの肺がんリスクを高める。」

住居のラドン測定後にラドンリスクと補修に関する簡潔なファクトシートを家主に送りつけることは、良いことである。これにより、彼らにラドンのリスクを低減するための行動の取り方について情報に基づく決断を下す事を可能とし、行動を促す助けになるであろう。ファクトシートは、公衆にメッセージを伝える良い方法である。コアメッセージを含む簡潔なファクトシートは、公衆衛生当局や工事請負業者の事務所や病院や学校や地方行政および国行政当局などで作成することができるだろう。

## 5.4 コミュニケーションキャンペーン

### 5.4.1 対象となる聴衆の同定

ラドンリスクコミュニケーションの本質的構成要素は、情報を伝えたいと思う対象であり、ラドンから自らを防御するために必要な行動をとるよう説得したい対象聴衆を同定することである。これらの対象聴衆は、以下に記すように二つのカテゴリー（直接および間接）に分けることができる。いくつかの対象聴衆は、状況によりいずれかのカテゴリーだけか両方のカテゴリーに属すると見なされる。それにもかかわらず、この二分的な分類法はコミュニケーション戦略を計画するうえで助けになる。表17は、対象となる聴衆を直接と間接カテゴリーに分類した例である。

最初の直接カテゴリーは、彼らの行動が直接肺がんリスクを低下させる可能性のあるグループである。リスク低下はいろいろな方法で達成可能である。例えば、既存の家をラドン低減化技術で改修したり、膜土壌減圧システムを取り入れた新築住宅を建設したりするなどの方法でラドンの肺がんリスクの低下を達成できる。規制や資金制度を導入することによりこれらの行動を助長することができる。しかし、いくつかのケースでは個人の選択というものが重要な要素となるであろう。喫煙者も直接カテゴリーに含めた。なぜなら、禁煙とか減煙に努めるか否かにかかわらず、彼らが住宅のラドン曝露を低減したいと決断すれば、それは相当な肺がんリスクの低減をもたらすと思われるからである。

表 17. 種々の対象聴衆カテゴリー

直接カテゴリー	間接カテゴリー
<ul style="list-style-type: none"> <li>・自宅を建築ないし改修中の人</li> <li>・家主</li> <li>・借家人</li> <li>・喫煙者</li> <li>・建築家とエンジニア</li> <li>・建築会社、請負会社</li> <li>・金融組織</li> <li>・不動産会社</li> <li>・地方行政当局</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・政府および政治上の政策決定者</li> <li>・地方行政当局</li> <li>・金融組織</li> <li>・法律アドバイザー、弁護士</li> <li>・医師、看護師、薬剤師など</li> <li>・教師</li> <li>・メディア</li> <li>・DIYショップ</li> <li>・関連学会</li> </ul>

第 2 のグループは、間接的なカテゴリーで、このグループの個人が決断をしたりラドン問題を取り上げたりすることにより、世間がこの問題に気づき、認知度を高めるのを助け、またそれによって地域社会のラドン防止や低減を促すこととなるであろう。

銀行や抵当保証人など金融組織もまた重要な対象聴衆と見なされることに注目してほしい。なぜなら、将来住宅が効果的なラドン防護技術で建築されることを確実にする上で重要な役割を果たす可能性があるからである。彼らが納得し、彼らが金融上の利害を持っている物件の家主にラドン測定を要請するようになれば、その行動は世間のラドン問題に対する関心を高めるであろう。合衆国や英国などのいくつかの国では、ラドン測定が家の売買の一連の手続きの中に加えられている。

#### 5.4.2 ラドンリスクの認知度

対象聴衆のラドンに関する認知や知識レベルを評価することを強く推奨する。この評価を行うもっとも簡便で費用対効果の高い方法の一つは世論調査である(WHO 2006)。リスクコミュニケーションキャンペーンの計画を練るため、また、キャンペーン自体を評価し、改善するために、調査はリスクコミュニケーションキャンペーンの前後に二度行われるべきである。これらの調査は、時間が経過した後にキャンペーンの結果を追跡するのにも有用で

ある。

対象聴衆により、調査は以下に例示するような項目に関する質問を含む。

- ラドンに関する基本的な知識
- ラドンの発生源と進入経路
- ラドンの健康影響
- ラドンから人々を守るために使える技術的方法
- 行動を起こす意志があるかどうか

調査の成功とその力は、効率性、均一性、解析の簡便さ、時間を経た後でも比較が可能であること、結果を一般化できる可能性などに依存している(WHO 2006)。公衆の知識を記録し、公衆のラドンの認知度を評価する上で、調査結果の解析評価は最重要な要素である。解析評価は、政策決定者にコミュニケーションプログラムに目を向けるきっかけを与え、それを改善するよう促す。また、解析評価は、地方および政府機関にコアメッセージを確立することを促す。もし、対象聴衆がラドン問題に対して基本的な理解に欠けているのなら、キャンペーンは失敗に終わるであろう。キャンペーンに先立った解析評価は、キャンペーンにおいて重点的に対象聴衆へメッセージを伝えることを可能とする。同様に、コミュニケーションキャンペーンが確立され、対象聴衆へメッセージを伝えた後においては、調査を繰り返し、キャンペーンの有効性を判断する必要がある。

キャンペーンのメッセージに対する公衆の反応を評価することは、キャンペーンが成功したか否かを判断するうえで重要である。WHO によれば(2007)、この評価においては3つの主要な要素をみなければならない。

- アウトリーチ：メッセージは実際何人ぐらいの人々に届いたのか？
- 反応の評価：聴衆は反応したか？
- 影響(衝撃)の評価：彼らの行動は変容したか？

### 5.4.3 公衆がラドン低減行動をとるよう促す

公衆とラドンのリスクに関して明確にかつ効果的に対話することは難しいかもしれない。ラドンのリスクに関する情報を広く伝えるだけでは、通常、迅速な行動、すなわちラドン測定あるいはラドン低減策を実行させるのに不十分である。住居でのラドン曝露を低減するためには、家主の決断と行動が必要である。公衆を説得し、新築住宅の防護策を実施させる、既存住宅でラドン測定を実施させる、そして家の修繕を行わせるためには、第6章で説明するような国のラドンプログラムが必要である。ラドンのリスクに対する無気力と不信や修繕費用額などの様々な理由により、高ラドン住宅に住む人の中には自宅のラドン

曝露を低減する行動をとらないと決断する人も現れる。

多くの国で実施された社会とリスクコミュニケーションの調査によると、ラドンリスクコミュニケーションプログラムの主要な障害物は、公衆および政策決定者の双方において、ラドンリスクに対する行動における無気力あるいは非積極性であった(WHO 1993)。個々の家主の場合と同様に、行動を起こすことに無気力あるいは非積極的である理由は複雑である。屋内ラドンに関する一般的な誤解の一つに、それは自然であり、住居のラドンレベルが高くなっても誰も責任をとる必要はないというものだ。ラドンガスは自然界の物質だが、住居のラドンレベルが高いのが全て自然の成り行きだとはならない。高まった住居ラドン濃度は、家のデザインや工法といった人為的活動の結果であり、また住人の生活習慣の結果である。住居の高ラドン濃度は、自然放射線を工学的に増強したものに他ならない。第3章にずっと詳しく述べたように、土中のガス濃度がとても高いため1階部分の屋内ラドン濃度が高まる可能性がある場合でも、現代の建築技術を持ってすれば屋内ラドンの許容できる低いレベルに保つことが可能である。

合衆国などいくつかの国では、数年にわたりソーシャルマーケティングの手法を取り入れて、住民にラドン測定を動機付けし、問題があればそれを修繕する事を促してきた。ソーシャルマーケティングは、対象聴衆のなかの変革を追求すると同時に便益を強調する。この手法は、ラドンによるリスクを公衆に伝達することを主目的としていた初期のキャンペーンよりずっとうまくいった(USEPA 2003, USDHHS 2005)。リスクコミュニケーションを効果的にするためには、他の組織と協調し、メッセージを調整し、医師や教師といった社会的な信頼されている人々の助力をえる事が重要である。

## 6. 国家ラドンプログラム

### キーメッセージ

- 国家ラドンプログラムは、国民全体のリスクを減らし、また高ラドン濃度下で生活している人々の個人的なリスクを減らすことを目的とすべきである。
- 個人へのリスクを抑えるために、国の参考値として  $100 \text{ Bq/m}^3$  を推奨する。この値が不可能な場合にあっても、選定した値は  $300 \text{ Bq/m}^3$  を超えるべきではない。
- 国民全体のリスクを低下させるためには、建築中の家でラドン防護対策を要求する建築基準を制定するべきである。
- ラドン測定プロトコルの詳細な国家ガイダンスを作り、ラドン試験の質と堅実性を保証するために必須である。長期にわたり測定結果をモニターした国家ラドン・データベースを作ると、それは国家ラドン計画の実効性を評価するのに役立つ。
- 国家ラドンプログラムの実効性を高めるためには、国のなかの複数の機関が関与する必要がある。一つの機関が実施主体となり、調整を図り、たばこ規制や他の健康増進計画との連携を確実なものにする。

この章では、国のラドンプログラムに重要な構成要素について述べ、また国レベルのこのようなプログラムを実施するための組織の骨格を述べる。ラドンプログラムは、平均的なラドン濃度に曝露している国民全体のリスクと高ラドン濃度で生活する個人のリスクの両方を低減する事を目的とする。

ラドンプログラムの策定には、明確な組織骨格、および、ラドンレベル測定に関する準備、防止や修繕を促進するための準備、公衆および利害関係者にラドンリスクコミュニケーションのサービスを提供するための準備などの別々の構成要素の準備が含まれる。

ラドンプログラムを樹立したいと考えている国においては、第1段階は評価、すなわち、できることなら国全体のラドンサーベイを実施し、国中の代表的なラドン濃度分布を得ることである。この章では、とりわけ高ラドン地域の候補を含めて地理的なラドン濃度の分布を得ることを目標とする一般的な計画およびサーベイ実施のためにガイダンスを提供する。

同様に、適切な参考値を決定するためのガイダンスが与えられる。参考値とは、その濃度以上のラドン濃度では国が積極的に修繕工事を実施することを推奨したり実施するレベルを指す。家のラドン濃度が参考値より低い場合でも、ラドン防護策の実施は、家のラドン

濃度が一貫してそのレベル以下であることを確実にするために適切である。

地理的なラドン濃度の地図を利用することもこの章で議論されている。これらのデータはラドンの放出源を絞り込むのに便利な道具である。しかしながら、これらの地図は、決して高ラドン地区においてのみ、屋内ラドン濃度が高い場所を見つけることができるという誤った解釈をするべきでない。

先に述べたように、効果的なプログラムは、新築住宅でのラドン曝露防止策であることを強調している。長期的には住宅の在庫を変えることにより、リスク低減を図るために必要な策である。建造中の家でラドン防止策を正しく取り付ける事が重要である。新築住宅の低ラドン濃度を確実にするための建築基準または建築規則を工夫する際に考慮しなければならない要素も述べている。この章と第 2 章（ラドン防止と修繕）の両方がこのような観点を扱っている。

既存住宅のラドンリスクを低く抑える手法や高ラドン濃度の家を修繕する際に考慮しなければならない要素にかんしては、この章の最期に概要を述べておく。

## 6.1 国家ラドンプログラムの組織

屋内ラドンから公衆を守るための効果的なラドンプログラムを実行するためには、図 10 (省略) に示すような多くの国の機関および他の利害関係者の関与が必要である。この中には、公衆衛生や放射線防護を担当する国や地域や地方の組織が含まれる。地理計測研究所、公的あるいは私的なラドン測定研究所、建築工学者・建築科学者、建築業者および建築規則や建築基準を実施しそれを守らせる立場の機関などのその他の機関や団体や専門家からの専門知識が、ラドン戦略におけるもう一つの鍵となる要素である。政府は調整のとれた国家ラドンプログラムを促進するべきであり、またプログラムを運行し調整する指揮組織または機関を指定するべきである。このプログラムの有効性を評価するために、この指揮組織により国家のデータを集めるべきである。

プログラム実施の最初だけでなくもっと後の諸相においても、以下のことは評価されなければならない。

- できれば住民ベースの国家ラドン調査にもとづき、家でのラドン曝露がどの程度のリスクをもたらすのかの評価
- 理想的には地域ベースの調査に基づき、ある種の家あるいは特定の地域が他に比較してリスクが高いか低いかを明らかにするために曝露のパター評価

一旦初期評価が完了しラドン対策の必要性が固まったなら、屋内ラドン曝露から公衆を守るための包括的な国家ラドン政策を作る必要がある。学校や育児センターやその他の人々

が一定の時間滞在する公的な建造物に関してもラドンのリスクを評価すべきである。国家ラドン政策は以下の要素を含むべきである。

- 全住民のラドン曝露とそれによる健康リスクを低減する枠組み
- 全住民のラドン曝露の程度を判断するために、認定されたラドン測定技術とプロトコルによって国レベルの調査を実施する準備
- 国として住居ラドン濃度の参考値を設定する準備
- 喫煙戸ラドンの複合影響を考慮すること。ラドン政策をたばこ規制や屋内空気質を取り扱う他の健康増進プログラムと関連づける事が推奨される。
- 実行可能な限りラドン濃度を低く保つための枠組み
- 地方と地域の当局を巻き込む準備
- ラドン問題を公衆や利害関係者に情報提供するためのプログラム、および、ラドンへの意識レベルを高めるプログラム
- 新築住宅や既存の家の改修のための建築基準とラドン防止に関して建築の専門家を訓練する準備。ラドン測定の正確さを保証すること、訓練は事前に実施されなければならない。
- 既存住宅の低ラドン濃度を確保することに焦点を当てたプログラム
- 新築住宅のラドン防止策に焦点を当てたプログラム（建築中あるいは改築中の住宅）（ボックス9参照）。

ボックス9. 新築住宅のラドン防止策に焦点を合わせることの重要性

正しく適応されるなら、新築住宅にラドン防止策を導入することは一般にもっとも費用対効果が高く、また個人住宅での低ラドン濃度を達成する効率が高い。その結果、国の平均的なラドン濃度を低減させる効率が高い。時が立つにつれ、このアプローチが他の手法、参考値を超す既存の建造物でラドンを低減させるだけの手法、にくらべてラドンによる肺がんの総数をずっと減らすことができるだろう。

## 6.2 国のラドン調査

国中の住民のラドン曝露がわかるような全国の屋内ラドン濃度分布を決定する目的で、認定されたラドン測定機器と手法で国のラドン調査は実施されるべきである。この全国調査は地理的な分布に関する情報をもたらすであろうが、調査は全住民の曝露と地理的曝露の両方を評価できるよう適切に計画されなければならない。北アメリカや欧州では屋内ラドンガスの測定が調査手法としてもっともよく使われた手法である(Synnott and Fenton 2005a)。国際放射線防護委員会(ICRP)もまたこの測定技法を推奨している(ICRP 1994)。全国ラドン調査を計画するに当たり、二つの重要な目的がある。

- 屋内ラドンへの平均的な公衆曝露および曝露の分散を推定すること。これは、無作為に選別された家で屋内ラドンを測定する人口加重調査により達成される。
- 国土の中でも屋内ラドン濃度が高い家をもっとも見つかりやすい地域を特定すること。これは、地理に依拠した調査により達成される。

できることならば、上記両方の調査法で、しかも季節的なラドン濃度の変動による不確実性を最小にするため1年の期間、個々の住宅で測定するべきである。

人口加重調査は、全住民の家の代表として個々の家は選ばれ測定される調査である。要求される情報の質によるが全国または各地方・県・町の全住人(戸建て、マンションなど)のリストから家は無作為に選別することにより達成される。この調査により、国・地方・県・町の全住人のラドン曝露分布を確定し、平均的曝露量と参考値を越す家屋割合を評価できるようになる。このような調査を実施するに当たっては、多くのバイアスが結果をゆがめる可能性があるため統計学者からの助言をえる事が重要である。特に、国・地方・県・町の住居を代表するようなサンプルを得るための手法に関して工夫が必要である。人口加重調査の結果は、ラドン分布図に使えるであろう。しかし、調査のサンプルサイズやその地域での人口分布によっては、人口密度の低い地域は情報が少ないか全くないかもしれない。

空間的に均一なラドン分布図を目的としてデータを得るためには、地理的測定基準で測定する家を選ばなくてはならない。地域ごとに必要最低数の測定値が得られるよう対象家屋が選別されるので、地理学的基準での調査ならこれを達成することができる。地域は規則正しかったり(格子状に分けられた地域)、不規則であったり(町や県の行政区域境界)、既存の境界(既定の地理的ユニット)であったりするであろう。実際に測定する格子区域の数や大きさは、獲得できる予算、要求される空間的数的精度、そして計画の段階でえられる統計学者からのアドバイスにより決められるであろう。とりわけ重要なことは、選ばれた家がそれぞれの地域の代表的な住宅であることであり、特に測定数が少ない地域ではこれが重要である。ラドン分布図は、単純に地域の平均により作成することも、ずっと洗練された形式で作成することもできる。

人口加重調査は、地理学的調査と平行して行うことができる。注意深く調査計画することにより、両方の要求と目的を達成することが可能である。例えば、それぞれの地域に住む住人の完全なリスト(あるいは電子データベース)があれば、地理学的調査は人口加重ラドン濃度分布を得るために利用できる。ラドン分布図を使うと、国のラドン政策を実施する際の助けになるだろう。

大多数の調査でラドン濃度分布は対数正規分布に従ったので、多くの国は要約データとして幾何平均値(GM)と幾何標準偏差(GSD)を使っている(Miles 1998)。しかし、GMやGSDを使っていない国のデータとの比較が可能なように要約データとしてGMと算術平均(AM)とそれぞれの標準偏差(GSD, SD)の両方を使うと便利である。

### 6.2.1 ラドン分布図

地理学的ラドン調査により地域ごとのラドン分布が評価できる。この情報は高ラドン地域の同定を可能にし、ラドンが高い可能性のある地域図として公表されるかもしれない。適切に計画された調査によりこのデータが得られたのであれば、これらの図版は国のラドン政策を実行するうえで有用な道具となる。ラドン分布図は高ラドン濃度の家を探索する際に最適化の道具として使え、また新築住宅に特別な防護策を実施すべき地域を同定する道具として使える。全国をカバーする屋内測定に基づくラドン分布図は、すでに英国や米国やアイルランドで作成された(Miles et al. 2007, USEPA 1993, Fennell et al. 2003)。

ラドン分布図は、高リスクないし高ラドン地域を同定する情報を提供し、また既存住宅や新築住宅のラドン測定と修繕策を実施させる動機付けのための情報を提供する。しかしながら、地域内のラドン濃度レベルは均一ではないと思われ、屋内ラドン濃度は対数正規分布に従うであろう。図版は、測定を実施しなくても良い地域を示唆するのではなく、むしろ資源を高ラドン地域に集中させるために主に使われる。

米国および欧州のラドン調査と図版化に関する包括的なレビューは出版されている (USEPA 1993, Dubois 2005)。世界中のラドン調査データは原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR 2000, 2008) が出版している。しかし、これらのデータの取り扱いには注意が必要である。なぜなら、これらの値は、当該国での個々の家のラドン濃度の代表値とはなっていないからである。図 11 にラドン分布図の例を示す (スイスのラドン分布図 省略)。

### 6.2.2 高ラドン地域

高ラドン地域では、ラドン濃度の分布は非常に幅広くなり、分布が対数正規分布なので大部分の測定値は低い可能性がある。これと逆に、高ラドン地域と分類されなかった地域でも、確率はずっと低いが、高ラドン住宅が見つかるだろう。それ故、高ラドン地域を同定するだけでなく、高ラドン濃度の住宅に特徴的なものを見つける努力を払うべきである。

高ラドン地域は、直接屋内ラドンの測定、あるいは家のラドン濃度と土壌中のラドン濃度との間に確立された関係があるとの前提のもとに、間接的に土壌中のラドン濃度を測定することにより同定することができる。

アメリカ合衆国では、屋内ラドン測定、地質学的特徴、空間放射能、土壌の通気性、家屋の基礎の形式を組み合わせるラドン分布図が作成されている (USEPA 1993)。ドイツでは、図版は土壌ガス中のラドン濃度により作成されている。オーストリアでは、その地域のラドン濃度の平均値により分類されている (Friedmann 2005)。

国の政策を作っている上で重要なことは、国のラドン調査結果およびラドン分布図を屋内ラドンレベルが高い可能性のある国の中の高ラドン地域を定義し同定するためにどのような利用していくかを熟慮することである。

高ラドン地域の定義はいろいろある。国は、参考値を超すラドン濃度の家屋のパーセントがある数値以上あると予測される地域を高ラドン地域と定義する事ができる。高ラドン地域を階級分けして定義することも可能である。例えば、高ラドン地域は、高、中、低に分類されるかもしれない。これらの決断は複雑で、平均的ラドンのレベルや参考値やこれらの地域で提案されている対策や地域の人口などを考慮に入れなければならない。高ラドン地域には、理想的には高ラドン濃度の家の全数のうち大きな割合の家が含まれるべきである。

一旦高ラドン地域が同定されたなら、これらの地域に高ラドン濃度の家の大多数が存在するとの前提で、これらの地域に資源を振り向けるべきである。公衆の注意を喚起するキャンペーンは、これらの地域の家主に自宅のラドンを測定する事を促すだろう。キャンペーンでは、公衆衛生や住宅に関連した団体や専門家、例えば建築者、設計者、地域や地方の行政当局や医学団体などを対象とする作戦もあるだろう。

### 6.2.3 ラドン測定技術とプロトコル

全国で実施されるラドン測定の一貫性を担保するためには、明瞭に具体的に記載された、そして定期的に最新情報に書き換えられるラドン測定プロトコルが重要である。

国・地域・地方の当局は以下に例示する項目を具体的に記載しなければならない。

- 使用するラドン測定器の型
- 使用する測定プロトコル
- 推奨される最短測定期間。一年より短い測定では、特定の季節に測定を行うべきかどうか、または、季節調整係数を用いるかどうかを考慮しなければならない。
- ラドン測定研究所が達成しなければならない品質標準
- 住居の家主や住人に結果を連絡する手段
- 家主や住人に伝達されるべき助言と、とりわけ参考値を超すラドン濃度の家主や住人に伝達されるべき助言

非常に高い信頼性をもつラドン測定結果を得るためには、品質管理プログラムを実施しなければならない。このトピックスに関する詳細は、第 2 章を参照されたい。ラドンを測定する会社、団体、個人は、認定証や許可証を提示するなどして、ラドンを正確に測定できる能力を示さなければならない。

### 6.3 国の参考値

参考値は、居住家屋の最大容認できる平均年ラドン濃度である。参考値は、国のラドンプログラム重要な要素であり、国家レベルで国の基準を決めるべきである。測定値がこの値を超す場合には、ラドン濃度を低減するための対策をとるよう強く推奨される。スウェーデン、スイス、チェコ共和国などのいくつかの国では、それは強制である (Synnott and Fenton 2005b)。参考値を超した場合に家や他の建造物でラドン低減対策を推奨するのか強制するのかは、個々の国にゆだねられている。

国の参考値は、安全か危険かの厳格な境界を特定しているのではない。それは、将来にわたり何もなされないまま放置するには高すぎると国が判断した屋内ラドンの健康リスクレベルである。しかしながら、このレベル以下であっても家のラドン濃度がこのレベルよりずっと下にあることを確実にするために防護策をとることは適切である。参考値という概念は、最新の ICRP 103 勧告 (ICRP 2008) が出る以前に多くに国が使っていた介入レベルという概念とは違う。以前は、ラドン濃度が介入レベルを超す場合にのみ、それを修繕する作業が勧告された。これは、このレベル以下のラドン濃度は安全であるといった誤った印象を与えてしまった。WHO が 36 の国を調査したところ、ほとんど全ての国が既存住宅向けの参考値を 200 から 400 Bq/m<sup>3</sup> の間に設定していた。いくつかの国では、新築住宅と既存住宅で異なる参考値を設定しており、新築住宅に低い値を設定していた (WHO 2007)。

第 1 章で述べたように、肺がんのリスクは長期のラドン曝露が増えると線形に、しきい値がある証拠はなく、増加する。そのリスク増加は、ラドン濃度が 200 Bq/m<sup>3</sup> 以下であっても統計的に有意である。鉱夫の疫学調査からのリスク推計値と住居の症例対照ラドン調査からのリスク推計値は、驚くほど首尾一貫している。鉱夫調査は、ラドン曝露のリスク評価および修飾因子の線量効果関係への影響を解析するのに強力な根拠を与えている。一方、最近の統合住居調査の結果は、鉱夫調査から演繹することなく屋内ラドンに曝露された住民のリスクを直接的に評価する方法を提供した (UNSCEAR 2008)。

無理のない方法で達成可能ななるべく低いレベルに国の参考値を設定することを推奨する。屋内ラドンの健康影響に関する最新の科学的知見に照らしてみれば、100 Bq/m<sup>3</sup> という参考値は、公衆衛生的見地から正当化される。なぜなら、これによってラドンに関連した健康危険を有効に低減できると予測されるからである。しかしながら、このレベルが国内の優勢な状況により実施不可能な国においては、選択する参考値が 300 Bq/m<sup>3</sup> を超すべきではない。300 Bq/m<sup>3</sup> という値は、最新の ICRP の計算によれば 10 mSv/年にほぼ等しい。

国の参考値を設定する決断は、支配的な経済的社会的背景を考慮に入れて最適化の手順を踏む必要がある (ICRP 2008)。加えて、国に特有な種々の要因、例えばラドンの分布、高ラ

ドン濃度の既存住宅の数、屋内ラドンレベルの算術平均値、喫煙率などの要因を考慮に入れる必要がある。大部分の新築で修繕策がとられている住宅では、既存の住宅よりずっと簡単に、またより低い経費で低ラドン濃度を実現できる。それ故、このような建造物ではラドン濃度は国の参考値よりかなり低くならなければならない。

すでに国のラドンプログラムができていて、100-300 Bq/m<sup>3</sup>の間の参考値が確立している国では、最初にラドン測定の受け入れ率を改善し、そしてアドバイスの仕方を改善し、家主や店子への支援を改善することを通じて修繕策施工率を上昇させるべきである。例えば、英国で受け入れ率と修繕策施工率を2倍に増やすと、参考値を変えなくとも、年間肺がん死亡の減少数は5倍増加すると推計されている。一方、参考値を200から100 Bq/m<sup>3</sup>に減らしても、これまでと同じ受け入れ率と修繕策施工率のままであれば、年間肺がん死亡の減少数はたった2倍しか増やせない (Gray et al. 2009)。

一般には高いラドン濃度に曝露されている住民は、全住民の一部でしかないため、国の参考値はラドンの健康負荷を減ずる一つ的手段に過ぎない。適切な建築規則や基準を実施して全ての住民の平均的なラドン濃度を低下させる事が中心的な成功の道であり、国のラドンプログラムで概説され、指示されるべき道である。

## 6.4 建築規則と建築基準

建造中の家屋全てを対象にラドン防止策を導入するための建築規則や建築基準を実施することは、住民を守るために費用対効果が高い方法として受け入れられている (第3章、第4章参照)。仮に正しく実施されるとすれば、このような方法は長い間には国のラドン平均レベルを低下させ、参照値を超す新築住宅の数を減らすであろう。

国・地方・地域の行政当局は、建造中の全ての新築住宅にラドン防止策を必要とする建築規則や建築基準を実施することを考慮すべきである。高ラドン地域では、より厳格な条件が必要となる。

ラドン修繕工事を請け負う専門家の訓練は、新築や既存の住宅において勧告されたラドン防止や修繕策が正しく設計され実行されることを確実にするために必要である。その目的に適切な訓練プログラムを開発しなければならない。理想的には、このようなプログラムはラドンプログラムと協調して開発されているべきで、そのことにより参考値を超すラドン濃度の家主や財産権を持つオーナーが防止と修繕のためのインフラに容易に連絡でき、ラドン濃度を低減するために迅速な行動がとれるようになる。

このような建築規則や建築基準が遵守されていることを確認する事は重要である。例えば、ラドン修繕システムは正しく設計されておらず、正しく導入されていないかもしれない。

このような状況では、新築住宅の家主は、新しい家に住んでいるのでラドンから守られていると思うかもしれないが、それは現実とは違う事もあり得る。

新築住宅に導入されたラドン防止策に住民は気がつかないかもしれない。例えば、ラドン防止システムの導入を知らない可能性がある。この理由で、ラドン防止システムの構成機器は、適切に表示されている必要がある。さらに、全住民に対してラドン防止の利点を教育することは重要である。このことにより、最終的に建築者に圧力がかかり、全ての必要なラドン防止策が正しく導入される事を確実にする。

建築規則と建築基準単独では、新築住宅において参考値以下のラドンレベルを保証することはできない。それ故、自分の家がラドンから安全であるか否かを知る唯一の方法はラドン測定であることに住民が気づくようにしなければならない。

## 6.5 高ラドン濃度住宅の同定と修繕

家のラドン濃度は、家の形式、設計と建築、地域の地質、土壌の通気性など多くの要因により変わる。そして、ラドン濃度は近所の家の間でもびっくりするほど変わる。個々の家のラドン濃度は、測定によってのみ決定される。ラドンレベルが高い住宅を同定するために、一般に二つの方法が使われている。

- 地方や地域または国当局による測定キャンペーンが実施され、(高ラドン地域など) その地域の全ての住宅が測定される。
- 公衆の注意喚起プログラムにより家主が自宅のラドン測定をする気になる。いくつかの国では、ラドン測定の費用負担にたいし部分的ないし全額補助を行っている。

家のラドン測定は、その評価と対になっているべきで、評価の中にはラドン関連リスクを低減するための推奨対策も含まれる。参考値をこすラドン濃度の家に対しては、修繕することが常に推奨される。家主に対して効果的なラドン低減技術を分かりやすく伝えなければならない。さらに、住人に対してラドンの健康影響と共にラドンと喫煙の複合影響に関して情報提供されるべきである。ラドンと喫煙に関する情報は、WHOを含む公衆衛生当局によるたばこ規制運動を援助するために利用できるであろう (IRCA 2004, WHO 2008)。

家のラドン濃度を低減する責任は、普通家主にある。しかし、スウェーデンやスイスやチェコ共和国など複数の国では、それぞれ 200 Bq/m<sup>3</sup>, 1000 Bq/m<sup>3</sup>, 4000 Bq/m<sup>3</sup> を超す場合には、それを低減させなければならないという必要条件がある(Synnott and Fenton 2005b)。大多数の国では、修繕にかかる費用は家主か所有者によって支払われる。これらの費用は、他の維持費に比べて通常小さいが、時に家主が対策をとることをためらわせる。経済的に恵まれていない場合やラドン濃度が非常に高い場合には、家主や所有者にこの費用の一部あ

るいは全額を弁済することを国は考慮の対象とする。修繕の効果を検証する追跡測定を実施すべきである。国の弁済プログラムが実施されているなら、追跡測定のコストについても資金援助契約に含めるべきである。

住宅の改築を実施する家主や所有者への資金援助あるいは税制上の優遇策は、彼らをラドン修繕対策に踏み込ませるであろう。

家主や所有者は、ラドン低減工事を請け負う業者の情報を必要とする。それゆえ、地域や地方当局は、認定されたラドン修繕専門家のリストを作成し、更新しなければならない。このリストは家主や所有者が簡単に入手できるようにする。推奨される修繕工事が正しく設計され、工事される事を確実にするためには、ラドン修繕専門家の訓練が必要である。それゆえ、適切な訓練プログラムは国のラドンプログラムの常連の構成要素である。

ラドンプログラムの有効性を評価する手段として、国はラドン測定値やその他のラドンプログラムに関係すると思われる情報を集めて国全体のデータベースを構築すべきである。可能な限り、修繕前と後のラドン濃度、建造物の特色、修繕工事の種類、工事費、年間の維持費、建造物にたいするその他の便益や不利益（湿気の低下や亀裂など）などの情報を収集する。

家の販売時にラドン測定を義務づけるのは、ラドン測定をした住宅数を増やすだけでなく、参考値を超す住宅が同定され、修繕される事を確実にする意味で有益である。ボックス 10 にこのような義務を課している国の例を挙げた。特に住宅の売買頻度が高い場合には、国は住宅販売時にラドン測定と修繕を推奨ないし義務化することを考慮すべきである。

しばしば家をできるだけ早く売りたいという要望が強いので、このような状況においては専用の測定プロトコルが必要となるだろう。この場合には、普通より短い期間の測定が売り手に要請される。短期間の測定値と長期間の測定値によい相関があること、そして短期間の測定値には高い不確実性が伴うことを考慮に入れることを前提とすれば、これは受け入れ可能であろう(USEPA 1992)。

ボックス 10： 住宅取引の一貫としてラドン測定義務づけている国の例

ノルウェー、スイス、英国、合衆国は、住宅の売買に際してラドン測定値が考慮に入れられている (WHO 2007)。