

付録

付録A

ラドン曝露低減対策に関するアンケート調査により収集されたデータ

家の種類は何ですか？

デタッチド・ハウス	71%
セミデタッチド・ハウス	19%
テラスハウス	8%
フラット	2%
その他	1%

床の種類は何ですか？

居間		寝室
61%	固定床（コンクリート又は石）	24%
36%	吊り床（木又は合板）	76%
4%	その他	0%

建築されたのはいつですか？

1990年以前	31%
1990年～1919年	5%
1920年～1944年	12%
1945年～1964年	13%
1965年～1976年	20%
1976年以降	20%

どの階にありますか？

居間		寝室
1%	地下	1%
80%	1階	43%
19%	2階	56%
1%	3階	0%
0%	4階以上	0%

以下のものが設置されていますか？

二重ガラス	全て	部分的	なし	隙間風防止
70%				50%
2%				2%
28%				48%

ラドン濃度低減のため、どのような対策が取られましたか？

(複数の対策が実施された場合もあるため>100%)	
土壌床下の床下吸引（ガス・水だめ槽）システム	43%
陽圧換気又は圧力	13%
持続的自然換気の追加	19%
吊り床下空間の自然換気増加	23%
吊り床下空間の機械換気増加	7%
床全体のひび割れ及び供給口部の密封	44%

対策実施者は誰ですか？

自分自身	36%
地元建設業者	32%
大手建設会社	31%

対策実施に費やされたおおよその費用はいくらですか？

平均 £ 630.00

資料 2.

Radiation Protection Dosimetry Vol. 56. Nos I-4, pp71-76 (1994)
木造吊り床向けのラドン削減技術と充填材の仕様の圧力場の拡張評価

T.J.Gregory および R.K Stephen

Cornwall 郡委員会(Cornwall Country Architects Department, Radon Testing and Mitigation Consultancy)

Country Hall, Truro, Cornwall, TR1 3AY, UK

英国建築研究所(Building Research Establishment)

Garson, Watford WD2 7JR, UK

要旨 - 本論文は2つのケース スタディから成る。最初のケーススタディは、木造の吊り床が使用されている小さな小学校で実施された一連の軽減対策である。ラドン濃度の低下は有効であったが、その後床は乾燥腐敗により崩壊した。床を、Cornwall 郡委員会 (CCC) が設置した200程度のサンプル ファンシステムのうち典型的なサンプルを取り付けた支持層コンクリート スラブと入れ替えた。英国建築研究所 (BRE; Building Research Establishment) と相談し、小径管のネットワークを建設時に床下に設置して、ラドン濃度と圧力の変動を記録するようにした。2番目のケーススタディでは、別の学校でも床の交換について解説する。この学校は最初のケーススタディの学校と類似しているが、コンクリート スラブの下に材料の透過層がある点が異なり、またより多くの圧力測定点が設置された。圧力測定とそれらの結果分析について解説し、上記2ケースの導入を比較する。BREとCCCの専門性を活かし、この技術は現在多数の交換床に適用され、様々な充填材や接合用素材の圧力場の拡張評価を実施している。充填材および接合用素材を注意深く選択することにより、圧力場が拡張され、それによって床下の吸収点が少なく済み/または、ファンによる電力消費の削減が可能となる新たな建築特性が、現在よりもはるかに高い成功率で実現されることが期待されている。これまでの吸収システムの選択と設計がまさに実用上の基礎となっている。

緒言

Cornwall は英国諸島の中でも最もラドンの影響が深刻な郡である。Cornwall 郡委員会 (CCC) が最初にこの課題に面したのは、1983年7月、英国放射線防護庁 (NRPB) に協力し、国家の試験的研究「職場におけるラドン」で試験を実施する場所を提供したときであった。

郡建築家局 (County Architects Department) は1987年1月に独自の試験・軽減プログラムを開始した。それ以来、学校、住居、事務所、図書館、消防署および公舎など、委員会の約900の建物で4500回以上測定を実施した。得られた情報は、郡財務局 (Country Treasurer's Department) が部内で製作した目的指向型ソフトウェアによりコンピュータ データベースに記録する。この情報に基づき、120以上の建物で有効な軽減作業が実施された。

BRE も1983年に住居における是正処置を中心にラドン対策に乗り出した。しかし、着手当時から、関連する原則は他の様々な建物にも適用できることが判明したため、CCCとの協力が当たりすでに基礎が整っていた。1987年以降、BRE の研究プログラムは様々なラドン是正処置の有効性、構築可能性およびその他の側面について、100を超える既存の住居で調査した。また新築住居についても、200を超える新築住居で建築時に組み入れるラドン保護措置の評価を実施した。これらの作業はモデリング研究および実験室での研究によって補完された。

当初から、CCC は担当者のラドン被ばくを1985年電離放射線規制の要件の適用対象とならないレベルに削減することを方針としていた。BRE との初期の協力により、現在英国で「標準サンプ」(図1)として英国で広く知られているものを生成し、CCC が単独で200以上設置した。1998年、NRPB が委員会の放射線防護諮問委員会(RPA; Radiation Protection Advisers) に指名され、同年後半、英国安全衛生庁 (HSE; Health and Safety Executive) との協議により、NRPB CR-39 エッチング型飛跡検出器より直接取得した結果を基にした試験・軽減に関する手順を策定した。

長期的ラドン試験は最初の事前試験で1ヶ月、その後は3ヶ月という期間で実

施した。短期測定はすべてThomson-Neilsen委員会のTN L10 探知機で実施され、通常30分間であった。

過去6ヶ月間、BREとCCCの郡建築家局は、ラドン試験と軽減における広範な実用的経験を蓄積してきた。これにより、CCCは相談サービスを実施でき、また講義やセミナーで定期的に情報を提供できるようになった。BREは、ラドン改善措置に関する研究の実施と講義、セミナーおよびトレーニングコースの開催を継続している。また、BREは電話により「ラドンホットライン」を運営し、家屋保有者に無料のアドバイスを提供しているほか、ラドン軽減および保護に関心のある人を対象とした様々な出版物を発行している。

ケーススタディ：St. Levan 小学校

この小学校は英国で最も南西に位置する学校の一つで、ランズエンド岬から3マイル未満の急な傾斜地にある。近くの小村落は、地元ではBottoms (底地)として知られているが、行政上はより丁寧な表現でSt Levanと呼ばれている。同校には現在5歳から11歳までの約70名の生徒が在籍している。同校はCCCが管轄する最も古い学校の一つである。CCCは、英国における学校出席の義務化を定めた1870年の教育法以前に、地元の教会による資金で設立された小さなグループの一つである。

建物は1948年に完成し、その工法は非常に伝統的である。硬い壁は地元の御影石で出来ており、急勾配の屋根は天然スレート葺きである。木造の吊り床は2つの内部構造壁で支えられ、土地(土の下地床)を覆うコンクリートや薄膜はない。

過去150年以上の間、予測される通り、時折メンテナンスが必要となった。1967年、当初の175ミリ幅の突き合わせ継手式床板の代わりに、125mm幅の凹凸板が元の梁の上に置き換えられた。1979年に学校の屋根全体が交換された。1985年には、小規模な乾燥腐敗の発生に対する対策を実施し、地表面が床面高さの約250mm上である校舎の裏側で、2つの床板が交換された。同校は1987年2月の予備的ラドン試験の対象であり、その結果は $1420\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ であった。

これは同年7月に行われた2回目の事前試験で確認され、結果は1620と900 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ であった。1987年の夏休み中、正面にある750mm厚の御影石の脚柱に穿孔機で多数の換気穴を空けることにより、自然換気が大幅に向上した。厚い御影石の脚柱を通して裏側に4つの通気口を開け、地表面で終了するように直角に曲がった直径110mmのPVCu管を取り付けることで、初めて通気換気を導入した(図2)。短期間の測定では、ラドンレベルの低下は限定的であった。

床下の換気をさらに向上するため、Roof Units Group Turbo T2ファンを伸縮継手ホース経由で裏面換気装置にある配管の連結管に装着した(図2)。このファンはその耐水性のあるプラスチック構造と米国およびその他の国々におけるラドン削減の実績から採用した。T2ファンは非失速特性があり、250Paで $42\text{L}\cdot\text{S}^{-1}$ 、自由大気供給時には $131\text{L}\cdot\text{S}^{-1}$ を達成できる。ファンを選択的に加圧モードと吸収モードで数回運転させ、短期的な試験を実施した。記録されたラドンレベルは各モードで同様であったが、加圧式を使用する縦に狭い家で起きたカナダの問題を考慮に入れ、ファンは吸収モードで使用し煙突横に高レベルの排気口を装着することにした。さらなる一連の短期測定により、以前に達成された減少が確認されたが、そのレベルはアクションレベルのしきい値である $400\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を上回ったままであった。

続く11月の半期休暇中、床や端部付近の溝を通して漏出するラドンを減らす試みとして、木板をハードボードで覆い、溶接シームのビニールシートを重ね、適合する凹型の幅木で床を張った。シーティングを実施する前に、床に腐敗の兆候がないかを十分に確かめておく必要がある。同時に、ファンを使って空気流を改善するため、配管の伸縮継手を固定軽減器と交換した。この時点で、前面換気開口部の一部を固定のプラスチックシートの切片で閉鎖し、ファンシステムにより床下で生成される減圧が増加させるという一連の実験が実施された。

その時点で、地面(床下の土地)の上を覆う防壁がないことから、湿潤空気が土壌から排出され、木造床の水分含量を腐敗が発生するレベルまで上昇させる懸念が生じた。リスクを最小限に留めるため、一部の換気口を常時開いた状態に

し、外気からの一定の換気を維持するようにした。短期的な測定から、このソリューションによりラドンは必要なレベルまで削減され、これは1989年春に行われた全3ヶ月間の試験により確認された(レベルは 60 および 50 Bq.m³であった)。

1991年のイースター直後、校長からビニールシートの床に亀裂が生じたとの報告を受けた。査察から、亀裂の原因は床下が一部崩壊していることだった。一般には、崩壊の原因は腐敗だったが、驚くことに、問題部分は以前に腐敗が発生した裏側ではなく、開けたままにしておいた換気口の1つに近い正面付近であった。続く夏休みの初めに、床仕上げ材を持ち上げると大量の乾燥腐敗が現れた(図2)。床下に3つの子実体(キノコ)が見つかり、土壌の大部分がオレンジ色の孢子で覆われていた。木材の中でも、ハードボード直下の凹凸版には最も深刻なダメージがあった。この事実から、ビニールシート下のこのゾーンが腐食の発生には最適な条件であったことが分かる。

床全体の取り外しが行われた。木材侵入腐敗専門家からの報告によると、石膏壁の下に多数の根茎があったが、屋根のつり天井レベルより上では活性的な兆候はなかったとのことである。したがって教室の壁から石膏を取り除き、それを殺菌剤で処理した。床下全体を建設業者が通常使用する砂で目つぶしをした粗石充填材で施工した。標準サンプ2台を元の換気装置の接続部に接続し(110mm排水管を使用)、そこからファンへと接続した。

この新しい床は125mmのコンクリート スラブで構成され、プラスチック製の薄膜上に1層のA142 ファブリック亀裂防止強化材を塗布している。完成を早めるため、砂やセメントの代わりに25mmのアスファルト スクリードを使用し、元と同じ水準の床が完成した。

新しい床の仕上げには再び継ぎ目が溶接されたビニールシートが使用された。内部の壁は再び石膏仕上げが施され、エマルジョン塗料で塗装された。作業は6週間以内で終了し、秋学期の開始に間に合った。続く秋に実施された3ヶ月間のパッシブ試験では、結果が 120 と 40 Bq.m³であった。

床の交換作業中、多数の直径6mm耐衝撃ナイロン管を薄膜下の充填材の上に配置し、完成した床の下で圧力とラドン濃度を測定できるようにした。これらは床全体のさまざまな点から2つの冗長化した背面の通気管を通して、背面壁の外側に装着された2つの大きな耐水性プラスチックボックスへと接続されている(図3のXとY)。床の工事中に崩壊する危険性を減らすため、床下にある6mm管の端を短い直径12mmのスリーブで保護した。6mm管のもう一方の端はプラスチックボックスに接続され、床の設計図(plans)にある穴を通して床スラブ下のそれぞれの位置に対応するようにする。

床の完成から2ヶ月後、BRE はサンプが生成した床下の圧力をその上の教室との相関性から測定した。高感度の電子マイクロマンメーターをチャート式記録計への出力と共に使用し、様々な圧力の測定を可能とした。幸い、圧力差は非常に安定的であった。

サンプで測定された圧力は大きく異なった。ファンへの配管が最も短い管(約5m)のサンプでは125Pa、配管の長さが2倍でさらに屈曲のある管のサンプでは56Paのみであった。当初は圧力管が水でブロックされたことが疑われたが、小さなフットポンプのある管を通りぬける吹き込み空気には差異はなかった。不均一な充填材のまたは土壌の透過性によりサンプ圧の違いが生じているのかもしれないが、名目上は床全体に同じ充填材の素材が使用されている。したがって、この違いはおそらく2つの空気抽出管の空気流の違いによるものとし、このような複数のサンプに接続された管はそのサイズ設定と設計に注意する必要があるとの結論に達した。

同校への2度目の査察は1年以上が経過した後に行われ、上記の測定が繰り返えされた。サンプの圧力は138と 71Pa と著しく上昇していることが分かった。床下の圧力も上昇していたが、その程度は様々だった。

この2度の査察における圧力データ集を分析し、最も近いサンプの圧力をサンプからの距離で割って正規化した圧力差のグラフを生成した。3つの測定点は2つのサンプから等距離にあり、高い方のサンプ圧で正規化した。図4はその結果を示しており、相当なばらつきがあるものの(おそらく一部は2つのサンプ間の相関性による)、圧力はサンプからの距離とおおよそ直線状に落ちていることが分か

る。これは単純な理論から予期し得るものではなく、床下にはダルシーの法則は存在しないことを示唆しているのかもしれない。

簡潔に説明すると、2つのデータ集で線形回帰を実施し、その結果が図5である。フロアスラブのサイズから圧力場の端部を実際には測定できなかったため、公平性に欠ける部分がある。フロアスラブが大きい場合、線形回帰が示唆するよりもサンプルからの距離が長い点で多少低い圧力を測定すると考えるだろう。しかし、この線形回帰から、いくつかの興味深い観測が行える。

St. Levan の回帰から、サンプル圧は上昇し、圧力場の拡張は、運用開始後の最初の一年間はどちらかと言うとわずかに向上した。向上した理由には、充填材のまたは土壌の水分含有量の変化や床の端部付近の空気流経路を封鎖したことなどが挙げられる。著者は、さらに繰り返し測定を行うことで、ラドン削減におけるサブスラブ減圧の長期的なパフォーマンスを評価したいと考える。

ケーススタディ：Trannack 小学校

St. Levan 小学校での作業、および米国の EPA による透過性充填材を満たす作業に後押しされ、Cornwall郡 Helston 近く、Trannack の小さな小学校で同様の試みを実施された^(6,7)。Trannack 小学校は、St. Levan と規模、工法の点で非常に類似しているが、緩やかな傾斜地に建ち、主要教室につながる第2教室が裏側にある。主要教室の木造の吊り床を St. Levan と同様の支持層コンクリートスラブと交換したが（単に構造上の理由から）、重要な違いが2点ある。

1つ目は、12.7m x 5.6m の床の中央にサンプルを1台のみ設置したことである。もう一つの違いは、圧力場の拡張を向上するため、乾燥した貧配合コンクリートで目つぶした清潔な 25mm 幅花こう岩の切片の 150mm 厚の層をコンクリートスラブ直下に組み入れた点である。残念ながら、現場に納品された充填材は予定よりもかなり細かい素材が含まれており、したがって透過性が低かった。この問題について、建設業者は、乾燥した混合コンクリートを施工するかわりに、建築用の砂を透過性のある充填材の上に詰めることで対応した。結果として、予定していたよりも透過層のレベルが低くなったが、時間とコストの都合から修正することはできなかった。

床スラブを敷く前に、St. Levan 校と同様に合計51の圧力管を設置した。これらは1メートル四方のグリッドに配置され、床の半分は完全に覆い、もう一方の半分は選択した点のみを覆った。図6はフロアプランと圧力管の位置を示している。

1993年初頭、Turbo T2 ファンをサンプルに装着し、圧力を 86Pa に設定して、St. Levan で使ったのと同様の方法で下地床の圧力測定一式を実施・分析した。圧力結果は、St. Levan のそれよりもばらつきがはるかに少なく（図7参照）、サンプルから3mを超える距離でも、圧力がおよそ直線的になっているが、全体的な関係は明らかに直線的ではない。

Trannack 校の透過性充填材の層は内部床下地の基礎壁の上方を横断している。したがって、これらの壁は、新しい床の下では圧力場に対する大きな影響を受けなかった。しかし、層を分断する近代の完全なモルタル壁を使用した場合、圧力場の拡張に大きな障壁をもたらすことが予測される。

以前と同様の線形回帰が実施され、図5にその結果の回帰線が示されている。先述のように、単純な線形回帰は圧力とサンプルからの距離の関係を正確に示すことはできないが、これにより比較を行うことはできる。St. Levan と比べ、Trannack における圧力場の拡張は、充填素材の透過性が予定よりも低かったにもかかわらず、明らかに改善した。

距離の切片を指標とすると、圧力場の「限界」は、St. Levan の約4mから Trannack では7mを十分に超える（おそらく約11m）距離まで拡張されたようである。しかし、圧力場の拡張は土壌の透過性（透過性充填材の層の下）や、境界壁の透過性の影響も受ける。

結論

- (1) 木造吊り床の下の空間で機械的な抽出換気を行うと、過剰な湿気が発生し、材木の腐敗に繋がる場合がある。したがって実施時には特別な注意が必要である。
- (2) 水分不透過性のシート素材を敷き、木造の吊り床をシーリングすることによ

り、材木の腐敗が著しく進行する場合がある。このようなシーリングは推奨されない。

- (3) ラドンサンプ（サブスラブの減圧）システムの抽出配管は、管の長さや屈曲などによる気流への抵抗を考慮し、注意深く設計およびサイズ設定される必要がある。これは、分岐した複数のサンプシステムでは、すべてのサンプに同じ圧力を適用する上で重要である。
- (4) 充填材の仕様を慎重に選択し、過剰な砂の目つぶしを避けることにより、床下の透過性は大幅に改善される。それはたとえ完璧に実施されなくても言えることである。
- (5) 充填材の仕様および目つぶし砂の仕様を慎重に選択することにより、圧力場の拡張が促進されるため、床下の吸収点が少ない建築で、および（または）ファンの電力消費が減少する可能性が現在よりもはるかに高くなる。
- (6) 透過性の充填層により、圧力場をサンプから11m以上にまで拡張されたようである。しかし、圧力場の拡張は土壌の透過性（透過性充填材の層の下）や、境界壁の透過性の影響も受ける。

今後の研究

木造の吊り床は、今後もラドンの軽減における問題となるため、CCC と BRE における今後の共同研究が提案された。この研究には、気象パラメータとの相関性や下地床空間における様々な換気対策の効果などが含まれる。

以下を判断する上で、300平方メートルの途切れのないフロアエリアを持つ建物など、その他の建物において、小口径管技術によるサブスラブ実験をさらに実施しすることが望まれる。

- (a) 充填材の最適な透過性仕様
- (b) 透過性充填材の層に必要な最小厚
- (c) ラドンサンプ（サブスラブの減圧）の最適な設計
- (d) 壁と障壁の影響
- (e) 床面の高さが異なり、擁壁のある連続的な透過層の適切な設計
- (f) ラドンサンプ（サブスラブの減圧）システムの長期的なパフォーマンス

資料3.

Evaluation of Room Air Cleaners for the Reduction of Exposure and Dose to Indoor Radon Progeny

P.K. Hopke, B. Jensen, N. Montassier and P. Wasiolek
Radiation Protection Dosimetry 56:55-60 (1994)

室内空気清浄機によるラドン子孫核種の曝露と線量の低減の評価

要旨

気管上皮に最も線量を与えるのは、そこに沈着したラドン子孫核種である。その曝露による線量は、室内環境からラドン子孫核種を効果的に取り除くと減らすことができると考えられる。

このため、室内空気清浄機は室内ラドンのリスクを減らす可能性があると考えられる。

しかしながら、Po-218の半減期は短く(3.1分)、室内環境から取り除いても、(ラドンの存在下では、)それ以降のラドン子孫核種は速やかに元に戻ることと、室内空気清浄機が室内のエアゾルの挙動を変えるために、曝露/線量状況や線量の大きさは変動しうる。

通常の居住家屋での個人のラドン子孫核種への曝露を把握し、室内空気清浄機のラドン子孫核種曝露の低減効果を検証するために、自動弁別スクリーン法を用いた一連の測定を行った。

2つの長期間の実験で、ろ過システム、陽イオン静電収集機、イオン化/ファンシステムの放射性空気浮遊物や浮遊粉塵の除去能が試験された。

両方の実験は室内空気清浄機を1週間以上運転して実施した。室内空気清浄機を運転していないバックグラウンドと室内空気清浄機での曝露が粒子系別に比較された。8分岐までの気道の気管上皮の表面の分泌細胞と深部の基底細胞の双方への線量が、Jamesらによって開発されたモデルを用い、いくつかの曝露条件下で計算され比較された。

多くの場合、室内空気清浄機は、ラドン子孫核種の曝露を低減させた。しかしながら、曝露の低減に比べ線量の低減の程度は小さかった。2つのろ過システムや2つの同等のイオン化/ファンシステムの比較では、結果はほぼ同じであった。測定の結果が集約され、さらなる研究の必要性が記述された。

イントロダクション

PAEC (potential alpha energy concentration) は健康リスクの一つ。室内空気清浄機は、PAECを低減させ健康リスクを低下させる。しかしながら、PAECの低減が肺での放射線量の低下につながると考えるのは早計。何故なら、ラドン子孫核種が付着した粒子径が重大な要素であるから。

粒子径は気管内の沈着の挙動を決定する。室内空気清浄機による空気中の粒子やPAECの除去は、粒子径分布にも影響を与え、非付着成分を増加させるために、線量やリスクの低減に有用ではないとも考えられている。サイズ表記法の単純化にも問題は潜んでいる。非付着成分や放射能荷重サイズよりも、operationally defined size categoryの方が、空気清浄機の線量低減機能を正確に評価できる。

最近の測定法の改善により居住者の影響を受けることなく自動測定が可能になった。

実地研究

室内空気清浄機に関するいくつかの研究結果が最近発表された。地下の広さが200平方メートルで一階が210平方メートルの二つの家屋を用いた。家屋の居住人数は3人でこの中に喫煙者はいない。測定は1991年の5月から7月で、この期間に暖房器具は使用しなかった。サンプラーと空気清浄機は食堂(23平方メートル)の台

所の端に設置。3種類の空気清浄機がテストされた。イオン化、ろ過、空気循環システム (NO-RAD)、ファン付き電気空気清浄機 (EAC)、ファン付き多段ろ過 (Pureflow)

同様の実験が1992年2月から3月に2階建ての家屋で実施された。地下室は石壁で床は土。居室の換気率は 4.5 ± 0.3 回/時 この換気率設定は通常よりも遙かに高いが、この家屋は一層の外壁のみで断熱材や内壁を持たない。この家屋はプロパンガス暖房炉による強制換気がある。実験中、家屋は雪に覆われていた。

この実験では、異なる製造業者の製品を比較検討できた (Optimum Air FiltrationとAmway PureFlow)。

様々な空気清浄機が多彩な視点で評価された。

図1と図2に平均大きさ分布を示す。(a)BGと比べ(b) Optimum Air Filtration、(c)Pureflow filtration system、(d)Ion systems NO-RADでは、ナノサイズの粒子でのPAECが増加しているように見受けられる。

図3-5に平衡値の積算頻度分布を示す。

図6-8に気道の気管上皮の分泌細胞への線量分布を示す。

ファンのみやイオン化装置のみでは、測定数が35、23と少なく、不確かさが大きい。ファンとイオン化の組み合わせでは、曝露や線量の双方とも低減できると思われなかった。このため、予備的な検討では、それぞれを分けて計測し、さらに詳細に検討した。

Optimum Air FiltrationはAmway PureFlowよりも有効性がわずかに劣ると考えられた。イオン化、ろ過、空気循環システム (NO-RAD) の異なる二つの製造会社の製品は、同等であった。しかしながら、上述に理由により、きちんと比較はできなかった。

結論

これらの複数の空気清浄機の予備的検討では、線量低減効果は、放射性空気中浮遊物の濃度低下効果より、総じて大幅に小さかった。空気清浄機は、空気中の放射性物質だけでなく空気中浮遊物を除去することにより、ラドン子孫核種による線量を増加はさせないが、ラドン濃度がガイダンスレベルである $150\text{Bq}/\text{m}^3$ 程度にならないと、有意な健康利益をもたらすほどの線量低減効果は認められなかった。

曝露状況の想定をより広げ、できれば、異なる空気清浄機の形式 (特にイオン発生タイプ) も対象にしたさらなる研究が必要である。

原子力研究開発機構の低線量被ばくデータベースによる平衡ファクタの説明

平衡ファクタは、生体に影響を与えるラドン子孫核種の量を示すために用いられるファクタで、「空気中のラドン子孫核種のポテンシャルアルファエネルギーを、ラドン濃度と等しくかつ子孫核種が放射平衡にあると仮定したときのポテンシャルアルファエネルギーで除した値」と定義される。なお、ラドン濃度に平衡ファクタを乗じた量を平衡等価ラドン濃度というが、前述のように、これは子孫核種の濃度である。ラドンの人体への影響では、親のラドンガスは吸気されても呼気により排出されるためにその影響は小さく、一方、ラドン子孫核種の方は吸入の段階で呼吸気道に沈着し、そこで壊変を繰り返すなどのために約40倍もラドンよりも大きく寄与する。したがって、「ラドンによる被ばく」とは、実際には「ラドン子孫核種による被ばく」のことである。わが国の平衡ファクタは、屋内では0.4 (幅: 0.3~0.5)、屋外が0.60 (幅: 0.50~0.70) で7)、1993年の国連科学委員会報告によると、世界の代表的な値は屋内0.4、屋外0.8となっている。

資料4

Naithmith S: Durability of radon remedial actions. Radiat Prot Dos. 71(3): 215-218, 1997.

ナイスミス S: ラドン補修処置の耐久性

要約

英国では、凡そ3600の家主が、家の高いラドン濃度を低減するために処置を実行したと思われる。1993年に、成功裏にラドン補修処置を行ったこれらの家主に対して、その耐久性に関する調査へ参加するようお願いした。この調査では、毎年ラドン濃度を測定する事が含まれている。完全なデータが得られた26の家、および不完全だがデータが得られた32の家に関して、この論文で議論する。耐久性の調査期間は5年である。低減効果が最も大きく変動したのは、床下空間の自然換気を行った家であった。全ての補修処置の失敗率は年当たり4.0%であった。しかし、多くの場合、家主によって気がつかれ、修復された。再調査まで気づかれなかった失敗は、年当たり0.4%であった。

イントロ

NRPBは、英国の対策レベルである200Bq/m³をこす家を約33,000軒発見した。10,174軒の家主の調査から、少なくとも11%の家主がラドン補修を実施した。すなわち、英国全体では、3600軒が対策を実施したと予想される。

ラドン補修処置

表1に、489家屋で実施されたラドン補修処置の低減係数（処置前ラドン濃度／処置後ラドン濃度）を示す。複数の手法が実施された家屋は除いてある。また、データは、算術平均ではなく、幾何平均を採用している。これは、一部の突出した低減係数の例によってデータが乱されないようにするためである。

表1. 異なるラドン補修処置で計測されたラドン低減係数

補修処置	家の数	低減係数の幾何平均
床下吸引(サンプ) システム	252	7.2
陽圧換気	85	2.4
床下空間の機械的換気	24	2.3
床下空間の自然換気	61	1.8
シーリング(目止め)	45	1.5
コンクリート床への膜張り	22	1.8

結果

表2に示すように、58軒中9軒で平均3.9年間の観察期間中に失敗が認められた。失敗率は、4.0%±1.4%/年である。9軒中8軒では、家主が気づき、修繕していた。それ故、気づいた失敗率 0.4%±0.4%/年ということになる。

表3に示すように、それぞれの手法の有効性持続(耐久性)は、優れている。床下空間の自然換気で認められた。これは、風の影響などを強く受けやすいシステムであるからと思われる。家主が代わり、らどん補修システムはそのまま稼働させたがラドン低減効果が大幅に減少した家屋が1例あった。この例では、屋根裏部屋にフィルターを通した外気を取り入れて地下や1階の部屋に空気を送る陽圧換気が行われていた。新しい家主が、上階の窓を常に開放するため、陽圧が下の階に加わらなかったためと思われる。

表2. 補修手法の失敗

補修処置	原因	解決策	失敗発生年次
サンプ	ファン停止	ファン交換	4
サンプ	ファン停止	ファン交換	4
サンプ	ファン停止	ファン交換	1
陽圧換気	吸入フィルター目詰まり	フィルター交換	4
陽圧換気	吸入フィルター目詰まり	フィルター交換	3. 4
機械的床下換気	吸入フィルター目詰まり	フィルター除去	3
床下自然換気	空気孔ブロックの目詰まり	枯れ葉の取り除き	2
シーリング(目止め)	ひび割れの再発	割れ目の再シール	4

表3. 補修処置の耐久性。ラドン低減絶対値の幾何平均。

ラドン補修処置	家屋数	低減値の絶対値 (Bq/m ³)				
		第1年次	第2年次	第3年次	第4年次	第5年次
サンプ吸引	1 3	890	890	890	890	870
陽圧換気	5	780	780	780	800	760
機械的床下換気	1	380	370	390	400	390
床下自然換気	3	220	230	120	260	150
シーリング (目止め)	3	160	150	180	170	140
コンクリート床の膜張り	1	180	120	180	180	140

資料5.

Huber J, Ennemoser O, Schneider P. Quality control of mitigation methods for unusually high indoor radon concentrations.

Health Phys. 2001; 81: 156-162.

室内ラドン濃度異常高値での低減システムの品質管理

【要約】

本研究の目的はオーストリア西チロル地方の村（ウムハウゼン、住民2,600名）での異常に高い屋内ラドン濃度（最大で274,000Bq/m³）に対する異なったラドン低減手段の品質管理をすることである。低減措置を行った5年後、活性炭液体シンチレーションラドン検出器や連続的に記録するAlphaGuardラドン検出器を用いた平均ラドンの測定により5ヶ所の異なった手段の有効性が調べられた。

住宅1の低減方法は地下室への熱交換器を用いた機械的吸気・排気換気システムと合わせて長期間の安定性を特長とする土壤陰圧システムを使用した。この方法で、地下室で最も好ましい空気圧(+100Pa)で、冬の地下室のラドン濃度が設置5年後、20,000Bq/m³から3,000Bq/m³に減少した。換気により地下室の平均ラドン濃度は冬で3分の1、夏で15分の1まで削減するにもかかわらず、専門家の意見に反して住民は消費電力を最小にするため、大部分の時間換気システムの電源をoffにしていた。

住宅2の低減方法は床の下や地下室の壁の外側、地下のない部分の土壤からラドンを排出するための2つのファンとドレーンチューブのループ設置した土壤減圧システムを用いた。この方法が1999年冬（すなわち設置の6年後）まで、最もうまくラドン濃度を改善していた。小さなひびが空いた結果、平均ラドン濃度は250 Bq/m³から1500 Bq/m³に上昇した。これらの微少なひびを妨ぎ、土壤乾燥を最小にする手段が開発されている。

住宅3の低減方法として、多層の床の設置及び平板土台と床の間の層からラドンを吸引するためのファンの設置が行われた。この方法により、換気と地下室のドアが開いた状態で冬の平均ラドン濃度は25,000Bq/m³から1,200Bq/m³に減少した。

住宅4の低減方法は地下室をシーリングする技術を用いた。しかし、設置後5年間の間ほとんどラドン濃度は変わらず、不成功であった。

住宅5の低減方法は特に将来の住宅への方法であるウオータープルーフの地下室の技術を用いた。この方法により平均地下室内のラドン濃度は300 Bq/m³、1階部分の平均ラドン濃度は200 Bq/m³まで減少した。これは新しい建物に対するオーストリアの指針レベルである。

これらの結果は極度に高いラドン濃度を持つ地域でさえ、家特異的、長期間安定した減少システムを設置することにより、効果的な室内ラドンの軽減が達成可能であることを示している。

【背景・目的】

オーストリアの西チロル地方のウムハウゼンでは、肺癌の死亡率がチロル地方全体と比較して有意に高値であった。ウムハウゼンの室内ラドン濃度は最大で274,000Bq/m³という異常高値であり、肺癌による死亡率の増加は過度の室内ラドン濃度と関連があるのかもしれない。本研究の目的はこの室内ラドン濃度が異常に高い村で異なった低減法の有効性を調査することである。

【方法】

5つの住宅に異なったラドン低減システムを設置し、設置前後の室内ラドン濃度を測定する。濃度測定は活性炭液体シンチレーションラドン検出器とAlphaGuardラドン検出器を用いた。

各家屋におけるラドン軽減システムの種類は下記に示す通りである。

住宅①（200年前の貿易商社）：対策方法；地下室に熱交換器付きの機械的に吸気、排気する換気システム＋土壌陰圧システム（2つの地下室の床下からラドンをファンとドレナージュチューブを用い排気）を設置。

住宅②（1910年に建てられた典型的な住宅（石の壁、地下室（土の床）は一部のみ）：対策方法；土壌低減システム。ファンとドレナージュチューブのループで地下室の床下や壁の外側からラドンを排気、もう一つのファンとループ状のドレナージュチューブで地下室のない部分の土壌からラドンを排出

住宅③（約200年前の農家）：対策方法；多層の床を建設＋床と平板土台との間の層にラドンを吸引するためのファンを設置。小さな地下室へのとは閉鎖し、家の外へ新たな地下室への階段を設置。

住宅④（1987年に建てられた新しい住宅）：対策方法；地下室の壁の外層に垂直の断熱材を設置。地下室のシーリングとして、特別なケイ酸溶液やケイ酸パウダーを含んだセメント懸濁液を圧縮注入した。

住宅⑤（ウムハウゼン中央、ラドン濃度が最も高い地域に1992年に建てられた新しい住宅）：対策方法；土壌からのラドンの拡散を防ぐためにウォータープルーフのコンクリートで地下室の壁を作成。地下室の下にドレナージュチューブが1 m間隔で設置され、その周りを砂利、さらに砂利を覆うようにプラスチックを置いた。

【結果・考察】

I. 住宅①

平均室内ラドン濃度；

設置後すぐに平均室内ラドン濃度は減少したが、5年後の地下室の平均ラドン濃度は設置後すぐに測定したものとほとんど変わらなかった。一方、1階部分の平均ラドン濃度は設置後に減少し、設置後5年での濃度は直後よりも有意に低くなっていた。この違いは専門家のアドバイスにより窓を頻回に開けるという換気習慣の変化によるものであろう。

⇒長期間安定していたが、冬での地下室及び1階の室内ラドン濃度はオーストリアの住宅の対策レベルである400 Bq/m³を下回ることにはなかった。古い地下室の壁や隙間のシーリングを行っておらず、また専門家のアドバイスに反して、住人は電気代の節約のために長時間の時間換気システムの電源を切っていた。

換気システムの効果；

換気システムをonにしたとき室内ラドン濃度は370 Bq/m³まで減少した。その後、電源切ったとき、最大で30, 200 Bq/m³まで増加した。換気システムを使用していないときのラドン濃度は大きく変動していた。

II. 住宅②

平均ラドン濃度は設置後すぐに減少し、5年後でも十分濃度は低かった。その後、地下室の床や壁に小さなひびが入ったため、ラドン濃度は上昇した。夏に濃度上昇がおきなかったのでは換気が良かったため及び/あるいは夏では地下室周囲の土壌内のラドンガスが低かったためかもしれない。

⇒このシステムは土壌の湿度を減らし、結果として土壌の体積を減少させる。したがって、床や地下室のひび割れの防止＋土壌の乾燥を少なくするための換気の改善に対する効果的な技術を研究するための新しいプロジェクトが計画されている。

III. 住宅③

夏では地下室、1階ともに基準値を下回っていた。冬では設置後すぐに地下室のラドン濃度は減少したが、基準値を超えており、5年後の冬の地下室ラドン濃度設置直後と比べかなり増加した。これは専門家の意見とは反対に地下室のドアを

閉めたままにしたためである。(ただし、住宅③の地下室は土の床と多くの隙間のある壁でできていたので、地下室の濃度の減少は目的としていなかった)。多層の床及びファンでは1階のラドン濃度を基準値以下には達成できなかった。

⇒一般的にこのシステムは石の壁でできている地下室、あるいは地下室の内家では良い方法である。十分なファンの容量がこの方法の効率には不可欠であり、さらに夏のみでなく、冬での換気も行うべきである。

IV. 住宅④

設置後すぐのラドン濃度はほとんど変わらなかった。冬の5年後の濃度がやや低いのは換気が増えたためかもしれない。

V. 住宅⑤

設置後6年を経過してもラドン濃度は季節によらず300 Bq/m³、推奨レベル以下であった。新規の住宅には良い方法である。

⇒ウムハウゼンの新規の住宅はこの方法あるいは改良されたよりコストのかからない方法を使うべきである。

【結論】ラドン濃度は異常に高い地域でさえ、家特異的な、長期間、安定している低減システムを適用することにより室内ラドンの効果的な減少が達成可能である。

資料6.

Radiation Protection Dosimetry Vol. 78. No.1, pp49-54 (1998)

イタリアでのラドン汚染制御に関する建設技術

A. Ratti, S. Piardi and A. Baglioni

Department of Industrial Design and Architectural Technology

Politecnico di Milano

Via Bonardi, 3 - 20133 Milano, Italy

招待論文

要旨—この論文は、設計段階での建造物内のラドン汚染制御及び既存の建造物での是正処置に関する主要技術及び建設の選択肢の概要を示すものである。建造物の種類及び築年数といった因子が及ぼす影響に関する意見をまず述べ、イタリアで一般的に用いられる技術、又はその他の地域で考案されたものの、直接適用することができない解決策を検討する。

緒言

ラドンの発生源及び伝播に関して行われた近年の研究により、既存の建造物に関するプロジェクトの技術考案や、新しい建造物の設計基準案の作成が可能となった。しかしながら、ラドンの建造物内への侵入及び伝播を防ぐことは、技術的なサービスを提供する専門家や専門企業のネットワーク設定に加え、ユーザへの情報提供、リスクエリアの調査、及び測定モデルの作成を含む関連対策の導入を意味する。

イタリアでは、換気基準及び建築技術に加え、様々な居住地区の人口密度（密度の高い旧市街中心、高価な地区）と築年数及び建造物の種類（デタッチド又はセミデタッチド・ハウス、フラット）の両方に関して、状況は非常に様々である。

そのため、その他の地域で用いられる技術は、参考としては使用できるが、必ずしもイタリアのケースへそのまま適用できるわけではない。適用する場合は、各建造物の特定の特徴に注意を払う必要がある¹。

概略

1970年代まで、建材は、建造物におけるラドンの主要発生源と考えられていた。しかしながら、1980年代及び1990年代に実施された調査により、主要発生源は、建造物の建つ土壌であることが指摘された。その他の発生源は、深井戸の水及び建材である。

UNSCEAR²により作成されたモデルによれば、様々な発生源の寄与が組み合わされることにより、一般的な建造物のラドン濃度は、1階で平均50 Bq. m⁻³、上層階での推定濃度は20 Bq m⁻³であるということである（表1参照）。

建造物の種類による影響

建造物の特徴と同様に、建造物の建築形態及び位置は、室内のラドン濃度に大きな影響を及ぼし得る。階数、建造物の種類（高層、線状、テラスハウス等）、周辺建造物との関係（一世帯家屋、タウンハウス、フラット）、地域との関係（町又は国、住宅地域又は旧市街中心）といった様々な変数に関与する（表2参照）。それゆえ、形態とリスク間の対応を発見するのは容易ではなく、大規模かつ明確なサンプリング及び複合モデルを使用する必要性がある。

近年の調査³から、いくつかの重大なパラメータが定義され、依然として少数のパラメータに制限されるものの、異なる状況に適用できる試験方法が強調された。この調査によれば、換気パターン（窓の開口周期）も地面で建造物を固定するこれらの部分の建造物の特徴（コンクリート層、基礎、縁の下空間、地下室）も、様々な部屋のラドン濃度へ重大な影響を及ぼさないが、代わりに、形態と建造物の種類を含む多変数調査因子により示される。

つまり、1階の平均ラドン濃度は、デタッチド・ハウス及び複数階のフラットの
下層階で高いことが確認された。観察された差異は、統計学的に有意であると考
えられた。また、最も築年数の古い家屋（75年以上）において検出されたラドン
濃度が低かったため、建造物の築年数は、これらの結果に影響を及ぼすと考えら
れた。しかしながら、形態及び種類にかかわらず、2階及び上層階のラドン濃度は、
同じ建造物の1階のものより低いことが観察された。

イタリアでは、建造物の種類が非常に様々であるため、その他の国々より問題
はさらに複雑となる。始めに、建造物の築年数に関する概要を述べる。ISTAT（イ
タリア国立統計局）により提供されたデータによると、イタリアの約70%の建造
物が、築25年を超えるものであった（表3参照）。

既存の建造物に対する可能な処置

建造物内のラドンレベルを減少させるためには、ガスの外向きの動きを促進す
ることが必要である一方、ラドンの侵入を遮断し、その希釈を高めることが必要
である。各処置の有効性は、建造物の特徴、ラドンレベル、ラドンの侵入経路、
及び技術的な実現可能性によって決定される。基本的に、技術は以下の2つに分類
される。ひとつは、受動的技術であり、取り付け後、更なる介入は必要とされな
い。もうひとつは、機器やシステムを使用する能動的技術である。有効性が同等
であれば、前者の方が望ましい。エネルギー消費及び／又はユーザによる処置が
必要とされないためである。

今まで試みられた技術の概要は以下のとおりである²。

- (i) ラドンの侵入は、地下に位置する部屋又は地下室の減圧により減少する。
- (ii) 換気の増加に伴い、ラドン濃度は希釈される。
- (iii) 縁の下空間（又は、ラドン発生材料により建造されている場合は壁）を密封
することにより、建造物のラドンへの抵抗は増加する。
- (iv) 発生源を除去する。

それゆえ、建造物のプロジェクト案には、建造物に関する特定の状況に従い、デ
ザインの異なる技術の組み合わせが含まれる。

既存の選択肢は下記のとおりである。

- (1) 主要ラドン侵入経路を密封する。
- (2) 地下室の壁を覆う、又は噴射により絶縁する。
- (3) 空隙を作るため、コンクリート層を打設し直す。
- (4) 1階の全表面を断熱する。
- (5) 小さなファンを用い、空気を吸引する。
- (6) 縁の下空間の減圧を行うため、吸引点または排水管を設置する。

自然換気

ラドンからの有効な防護は、窓やドアの開放、及び換気システムのスイッチを
入れることにより達成される。これは、居住者により直接実施され、建造物の診
断を含むものではない。削減の程度は様々であり、今までのところ、十分なデー
タは得られていない。

地下に位置する部屋又は地下室の換気は、これらの部屋の減圧を行うため、ラ
ドンを希釈するだけではなく、その侵入も低下させる。問題は、暖房費が増加す
るということである⁴。

強制換気

室内の空気の交換及び室内と室外圧間の差異の変化は、自然換気により行われ
ることが原則である。しかしながら、このシステムを用いれば、気候に関係なく、
必要なレベルの空気交換が維持される。換気装置は、強制暖房システムや熱風グ

リルの調整弁に取り付け可能であり、直接ドアや窓にも適用できる。

自然換気と同様に、強制換気は、全建築物へ適用できるが、不快の原因となり得る。そして、すべての場合において暖房費が著しく増加する。

地面との接触面の処置

ラドンの主要発生源が地面である場合、特に地面で建造物を固定する全構造に関する建造物と地面の関係の詳細分析が必要であることは明確である。考えられる処置は、用いられる固定方法により異なり、詳細は下記のとおりである。

縁の下空間の能動的な減圧

土壌のラドンは、土壌と建造物内の圧力差のため、建造物内へ侵入する傾向がある。それゆえ、建造物内へ侵入するラドン量は、圧力の状態を修正することで減少させることができる。大部分の建造物において、直接土壌と接触する最初の層は、コンクリート層であり、直接土壌の上、あるいは石又は砂利の縁の下空間上に位置している。これにより、建造物の下に、ラドンが蓄積する空間が作られる。様々な方法が推奨されており、最も簡単な方法は、縁の下空間にファンを設置することであるが、必ずしも可能とは限らない。その他のシステムは、コンクリートを通す様々なパイプを設置することである。これが最も有効性の高い技術であり、80%及び99%の削減率が示されたとする研究者もいる⁵。有効性の程度は、土壌の透過性及び縁の下空間の特徴によるところが非常に大きい。

割れ目及び開口部の密封

ラドンは、継ぎ目、建材の間隙、及び様々なシステムのパイプや導管を通す壁の隙間といったあらゆる割れ目から室内へ侵入する。そのため、その他の技術の適用と同様に、これらの全要素は、常時密封されるべきである。一般的に、密封単独では、その効果は乏しい(0%~50%)。

建材に接着しやすい柔軟な密封剤を用いるべきである。可能であれば、上層階との継ぎ目である空洞レンガ壁の頂点を密封すべきである。密封剤としてモルタルを使用する、又は合成樹脂を注入することができる。壁と床の継ぎ目は、柔軟膜(可能であればポリマー)を用いて密封することができる。孔壁は、(エポキシ)不透過性ペンキを用いて防護されるべきであるが、セメント・プラスターを用いることもできる。

その他の方法としては、土台の下にポリエチレンシートを敷くことである。一枚のものが好ましく(複数枚の場合には適切に重なり、密封されるもの)、シートは連続的に壁の雨押えと接続するようにする。

地中における吸引

建造物の中には、有孔管を用いて水が土壌から除去されるものがある。これが建造物周辺で環状に設置されている場合、ラドン除去にも使用することができる。この技術を用いて、最大98%削減できる場合もある。主な難点は、全建造物の排水管が環状に設置されているわけではないことと、単にラドン除去のためだけにこれを設置するには、費用効率が良くない可能性があるという事実である。排水管により収集された水は、通常、建造物から離れた場所、又は排水ピットへ向かう。排水トラップとともに、換気装置をパイプへ適用することにより、パイプ内に十分な吸引圧がかかり、ラドンが建造物下の土壌から除去され得る(図1)。

その他の従来の技術的解決策の使用が、ラドン濃度低下に関して非常に効果的であることを忘れてはならない。通気性壁体システムの使用はその1例である。空気管内の上昇気流により作られた陰圧が、コンクリート層の下の縁の下空間とつながる場合、効果的に、既存のラドン濃度を減少させる(図2及び3参照)。主要処置を有効性の評価項目とともに比較したものを表4に示す⁶。

設計時の処置

ラドンの存在しない建造物を建設するための第一段階は、建設場所の問題レベルを決定することである。最も良いのは、建設開始前にその場所での測定を実施し、入手可能であれば、リスクマップを参照することである。適用される様々な技術に関しては、全体的にみると、既存の建造物改装のために使用される主原則を参考にすることができる。明らかに、主要な違いは、建設中にそのような処置を行えることであり、既存の建造物の場合と比較し、処置は容易であり費用を削減することができる。

ラドンの室内濃度を低下させる主要基準の概要は、下記のとおりである。

- (i) ラドン濃度の低い土壌を選択し、ガスの透過性を減少させる。
- (ii) 地面に接触する点の気密システムを改善する。
- (iii) コンクリート層下の空間減圧を行い、ラドンを空気中へ放出する換気装置を用い、吸引を実施する。
- (iv) 建造物の換気率を上昇させる。しかし、この方法は、その他の室内空気汚染物質に関して価値があるものの、省エネの必要性があることに留意する。
- (v) 陰圧差を減少させる。

いくつかの主要選択肢を以下に示す。換気技術の詳細は提供されていない。既存の建造物に関しては、この章で説明された事項を参照のこと。

建造物へのラドン侵入予防措置

土壌上に直接建設されており、最初の第1層がコンクリート層であるこれらの建造物では、ラドンの侵入は、以下の処置を実施することにより避けられる、又は制限される⁴。

- (1) ポリエチレンフィルムを床下に設置する。シート間の継ぎ目は、30 cm程度重複させるべきである。全パイプ又は不均一な部分の周辺の外装は、厳重に密封すべきである。例えば、不織布を用いてコンクリートを打設する場合（図4参照）、外装の損傷を避けるため、手入れが必要である。
- (2) 収縮を最小限にし、床のひび割れを減少させるため、水とセメントの割合を適切にするよう注意する。一旦打設した後は、数日間、表面を覆って湿らせておく。
- (3) 床の大きなひび割れを防ぐため、鉄鋼網が補強に使用された場合、打設下ではなく（スペーサを用いる）、打設内に位置するよう確認する。流動化又は抗収縮混合剤、あるいは、繊維強化コンクリートの使用が推奨される。
- (4) ラドンは、壁と床間の継ぎ目を通して、及び分離した打設間の継ぎ目に侵入することが多い。この侵入リスクを削減するためには、柔軟性及び伸縮性のある補正物質（例えば、ポリエチレン、あるいはゴム素材のものの方がなお良い）をこれらの部分に置くことが必要である。床の状態を数日間観察した後、物質の上層を取り除く必要があり、生じたギャップには密封剤を使用すべきである。
- (5) 土台及び基礎の作成は、1回の打設で可能であるため、この方法は、設置物質の層を挿入することにより、寒冷気候でも適用可能である。
- (6) コンクリート層の形成後すぐ、時間とともに腐敗し、穴を残す可能性のある残りの木材をすべて除去し、すべてのひび割れをコンクリートでうめる。
- (7) コンクリート層を通過するパイプ周辺の全隙間を厳重に密封する。地下室のある建造物では、以下の事項を実施することができる。
- (8) 地面から出現する地下の壁が、空洞レンガにより建設されている場合、壁内に上昇してくるガスを防ぐため、詰材又は不透過性膜を使用すべきである。
- (9) 地下の壁部分では、パイプが通る全隙間を密封する。
- (10) 良質な水／蒸気密封剤、不透過性膜、又はポリエチレンフィルムを用いて、地下の壁の外面を不透過性にする（図4参照）。

- (11) 耐水ペンキを用いて、壁の内面を防護する。
- (12) 暖房用及び換気用パイプを地下表面に通さない。さらに重要なのは、これらをコンクリート層下の縁の下空間に通さないことである。これが不可能な場合、全パイプを密封する必要がある。これは、還気管において特に重要である。還気管が陰圧の影響下にあり、ラドンが侵入しやすいためである。
- (13) 地下に位置する部屋と建造物のその他の部分の間のドアや開口部は、完全に気密状態にしなければならない。
- (14) コンクリート層下の地面上に、ポリエチレンの防湿材を設置する（図4参照）。

更なるオプション

ラドンからの防護は、現在、新しい建材分野において、従来の建設技術とうまく相互混合され、エネルギー費を伴わず、シンプルかつ非破壊的な防護技術の発見を目的とし、研究及び実験対象となっている。この目的は、加圧及び機械換気システムが一般的になっていないイタリアの状況を考えた場合、非常に有用である。新製品の中で、解決策が検討された1方法を下記に示す。

遮蔽用塗料

単純な原則は、防ガス材を用いて建造物要素に浸透させる、又は覆うことにより、建造物外面を通して居間へ侵入するラドンを防ぐことである。最も効果的なものは、エポキシ樹脂であるが、高価であり、適用が困難で、その他のものと比較した場合、室内の空気の質に影響を及ぼす。

防水ペンキに関しては、2種類のものがラドンの遮蔽に適しており、両方とも毒性がなく、容易に使用できることが確認されている。ひとつは、セメントベースであり、完全に無機性のペンキである。もうひとつは、ポリマーで有機性のものであり、両方とも水溶液である。

吸収性の壁紙

吸収性の壁紙は、非常に異なる効果を有する。壁を防水性にする代わりに、均等に拡散される2つの繊維層間に置かれた活性炭素粒 ($>200 \text{ g.m}^2$) の層を用いて、建造物の空気と水蒸気の浸透性を一定に保つ。この壁紙は、アルミニウムやポリマーフォイルのようなバリアではないが、ラドンを吸収し、吸収層内に伝播させる。調査によれば、活性炭素を用いた吸収性の壁紙は、建材による排出のため、ラドン濃度を低下させるのに有効である。実験室での試験では、最初の2週間後に、ラドン濃度は 2400 Bq.m^{-3} から 40 Bq.m^{-3} へ劇的に低下し、3カ月後にはさらに 30 Bq.m^{-3} へ低下した後、6カ月後は、 40 Bq.m^{-3} で安定したことが示された。しかしながら、現場での試験では、3カ月後には同様の低下が認められたものの、6カ月後には、濃度の50%が再上昇した。これは、おそらくその他の発生源（土壌等）の存在に関連する浸透事象によるものと考えられる。

縁の下空間の換気要素

建造物と土壌間の圧力に関する処置の重要性は、前ページですでに検討された。コンクリート層下の縁の下空間の換気は、縁の下空間と上に位置する部屋の間の吸引圧を生み出すことに関して2倍の効果があるため、ラドンを建造物外へ排出することができる。この原則は、機械換気システムを用いることで成立し、コンクリート層下の換気空隙を作るため、建造物の基礎で、スラブオングレード又は縁の下空間上に適切な定型枠を直接設置することにより容易に達成される。イタリアで近年製造され、流通しているひとつの製品は、脇の空いた再生プラスチックケースであり、2方向の気流を生じさせることができるため、土壌からのラドン建造物外へ排出する（図5参照）。

表1：一般的な家屋における異なる発生源の相対寄与率²

発生源	1階	上層階
土壌	～60%	0%
建材	～20%	～50%
外気	～20%	～50%

表2：家屋の特徴と室内ラドン濃度 (Bq.m⁻³)³

家屋の変数	家屋数	相乗平均値	相加平均値
家屋の種類			
一世帯家屋	47	64.75	75.11
タウンハウス	59	26.27	32.93
フラット	59	33.67	41.07
家屋の築年数 (年)			
<10年	59	45.88	51.8
11年～30年	48	33.3	48.1
31年～75年	35	40.33	51.8
>75年	37	27.01	35.15

表3：イタリアにおける建造物の建造年

年	(%)
1700年以前	8
1700年～1919年	12
1918年～1945年	12
1946年～1960年	23
1961年～1971年	25
1971年以降	20

ISTATデータより

表4：主要是正処置の有効性⁶

是正処置	ラドン濃度削減率	備考
単純な密封処置	0～25%	最大1000 Bq.m ⁻³ までの場合に適用されることがSKから推奨される。
換気装置による小規模な地下貯蔵室の減圧／換気	最大50%、特別なケースで最大80%	
壁を含まない床内又は床上の絶縁層	30～80%	
壁を含む床内又は床上の絶縁層	50～90%	銅シートを取り付けた壁
床構造内の二次圧力のメンテナンス (中間空間形成フォイル)	10～90%	結果は隣接する壁の種類より大きく異なる。
床構造下の二次圧力のメンテナンス (排水システム、点吸引)	10～95%	床の透過性及び排水管の位置による。
新規に設置された床スラブ内の分離及び建造物下の二次圧力のメンテナンス	最大99%	建造物全体を通して、必然的に弱い点の持続絶縁層以外

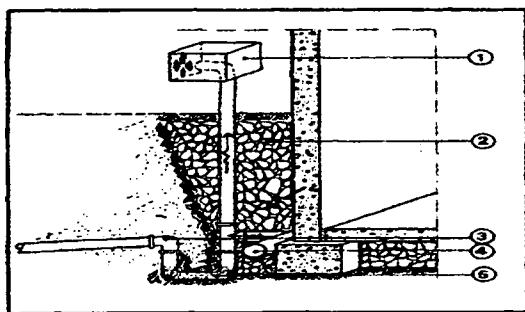


図1：地中における吸引 1：換気装置、2：排水装置、3：排水管、4：有孔管、5：排水トラップ

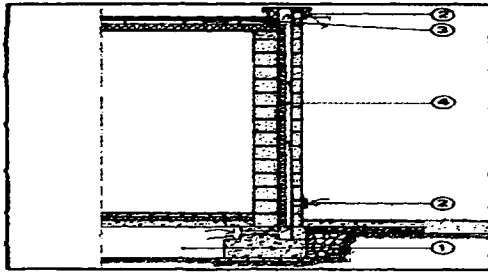


図2：通気性壁体システム 1：通気性縁の下空間、2：通気性グリッド、3：通気上部、4：空気管

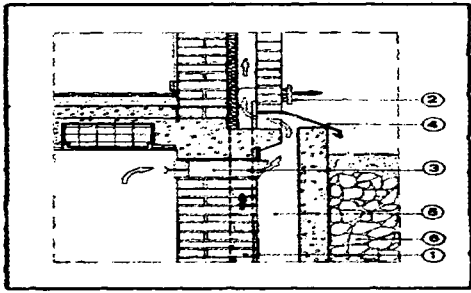


図3：縁の下空間と地下に位置する部屋からの複合換気装置 1：持続換気管、2：通気グリッド、3：地下に位置する部屋の通気、4：防護要素、5：空隙、6：排水装置

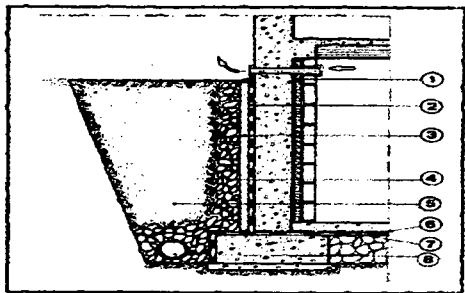


図4：第1層の防護 1：断熱材、2：防水加工、3：防護要素、4：排水装置、5：土壌、6：不織布、7：防水加工、8：排水管

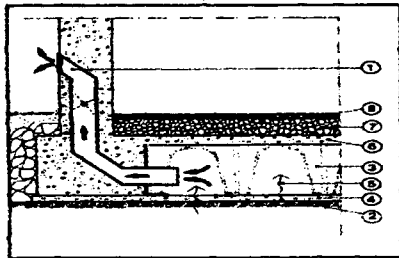


図5：縁の下空間の換気要素 1：通気孔、2：土壌、3：換気要素、4：スラブオングレード、5：ラドンガス、6：コンクリート、7：断熱材、8：コンクリート層