

資料 2

WHO国際ラドン・プロジェクト ラドン被曝指針ワーキンググループ総括報告書案

1.0 参加国におけるラドンプログラムの策定

- 1.1 国民を屋内ラドンから保護するための効果的なラドン・プログラムの実施には、参加国内における多くの国立機関の協力が必要である。その中には、公衆衛生および放射線防護を促進する責任を担う国・地域・地域の機関が含まれる。地質調査機関・公的および民間ラドン測定所・建設業および建設規定および規約の策定および施行をする機関など、その他の国立機関の専門知識も、何れのラドン戦略においても重要な要素である。しかし参加国は共同的な全国的なラドン・プログラムを推進すべきであり、一つの機関をプログラムの推進および調整における指導的役割を果たす機関として任命すべきである。さらに国全体のデータをこの機関が収集すべきである。
- 1.2 参加国は、家屋内ラドン被曝が集団にリスクをもたらす可能性について、例えばラドン調査などにより、評価すべきである。この評価が終了し更なる措置の必要性が明確になれば、国民を屋内ラドンから保護するための国の総括的なラドン政策を決める。学校および病院などその他の公的な建物におけるラドンリスクを評価することも考慮に入れるべきである。
- 1.3 全国的なラドン政策には幾つかの重要な要素を組み入れるべきである。
 - 参加国は集団のラドン被曝および関連する健康リスクを減少させるための枠組みを作り、それを活用すべきである。
 - 間接喫煙（ETS）を含む喫煙とラドンの間には強い相乗効果があるので、上記の枠組みを、屋内空気質および肺がんなどを扱う他の健康推進プログラムと連結させることが理想的である。さらに、ラドン減少戦略において地元および地域の自治体は有効な役割を果たすことができるので、それら自治体をラドン減少のための国全体の枠組みに含めるべきである。
 - この枠組みにはラドン濃度をできるだけ低く抑えるためのプログラムを含める。これは新しい家屋と既存の家屋の両方におけるラドンを考慮することによって達成可能である。
 - 一般的に、新しい家屋におけるラドン防止措置を取ることが、ラドン濃度を低くし、国の平均的なラドン濃度を減少させるための最も費用効果が高く有効的な方法である。長い期間では、この方法によりラドン被曝に起因する肺がんの総症例数を減少させることができる。
 - 同様に、既存の家屋におけるラドン濃度を低下させる努力も必要である。しかし、新しい家屋と既存の家屋では異なる方法を取る必要がある。このような方法には、国民の意識を高める努力、ラドンテスト、および値が対策レベルを超える場合はラドン軽減を含む。これらの段階については後に詳述する。
 - プログラムには、建築専門家が建物に関する規約および新しい家屋のラドン防護と既存の家屋のラドン問題改善について学べるような研修を含める。ラドン減少プログラムの実施に関わる政府および地方自治体で働く職員にも研修は必要である。
 - 参加国は、個々のリスクを減少させるために家屋内ラドンの対策レベルを国として定めるべきである。
 - 集団のラドン被曝の範囲は、普及しているラドン測定方法を用いた国による調査によって決定すべきである。このような調査によって、ラドン濃度が平均よりも高い地域または高い割合の家屋が対策レベルを超えている地域（ラドン危険地域とも呼ばれる）も明らかにできる。

- 参加国は国民および関係者にラドン問題について周知させるように十分な措置を取るべきであり、ラドンに関する意識を高めるプログラムを開始すべきである。

2.0 国による家屋内ラドン対策レベルの設定

- 2.1 屋内ラドン濃度が一定レベルを超えるとそれを減少させるように参加国が勧告するレベルを対策レベルと呼ぶが、対策レベルは安全と危険の厳密な境界ではない。
- 2.2 2006年にWHOはラドンプログラムを策定している参加国の調査をした¹。対策レベルを定めている国のほとんどがICRPの勧告²に従い、200 Bq/m³ - 600 Bq/m³の範囲で対策レベルを設定しているようであった。
この調査の結果では、回答した27カ国で対策レベルが100 Bq/m³ と 400 Bq/m³の間になっていた。これは、ほとんどのヨーロッパ諸国が対策レベルをこの範囲にしていることを示すヨーロッパ内で実施された調査の結果と一致している³。
- 2.3 肺がんリスクはラドン被曝に伴い線形に増加する。この増加は200 Bq/m³ 未満のラドン濃度についても統計的に有意である。400 Bq/m³ が家屋内ラドンの対策レベルの上限のようである。一般的に、技術・費用効果・実際的な側面を考慮して、100 Bq/m³未満の対策レベルは受け入れられていない。これらの事実を考慮して、WHOは100 - 400 Bq/m³ の範囲内の対策レベルを勧告している。しかし、対策レベルはその国の状況に応じて個々の国で定められていることに留意する。
- 2.4 この範囲内で参加国が適切な対策レベルを選ぶための基準は、その国の集団の健康にとって有意義なもので国の優先順位に鑑みて適切なものでなければならない。
- 2.5 選択した対策レベルの値にも依存するが、ラドン・プログラムの目的が個人のリスクと国の平均ラドン濃度両方の減少であることを考慮すると、家屋内のラドン濃度が対策レベルをかなり下回るようにするために、対策レベル未満であっても防護策を取ることが適当であるかもしれない。
- 2.6 ラドンと喫煙の間には相乗効果があるため、喫煙者（一日に一箱）の絶対リスクは非喫煙者の25倍である。喫煙者にとっては、禁煙をしてラドン濃度を下げた場合にリスクの減少が最大になる。したがって、この情報を集団に普及させるように十分努力をすべきである。米国での経験では、ラドンと喫煙の情報を合わせて流すことにより、非喫煙者が楽観的になりすぎてラドンのリスクを軽視または過少推定したようである。したがってこのような情報は注意深く普及させるべきであり、肺がんリスクを最小限にするための禁煙プログラムの一環として情報を提供することが望ましい。
- 2.7 喫煙者よりも絶対リスクは低いですが、ラドンと間接喫煙（ETS）の間にも相乗効果が存在する。この情報も集団に普及させるべきである。喫煙者の場合と同様に、間接喫煙をしている人々でも、ラドンの減少と間接喫煙の減少または回避を組み合わせることにより、リスクが最も大幅に減少する。

3.0 ラドン測定方法と計画書

- 3.1 参加国は明確なラドン測定計画書を作成しそれを用いて対策レベルと比較することが重要である。これは、ラドン測定を行う機関の間での一貫性を保つ

に役立つ。

3.2 参加国は以下の事項を明らかにすべきである。

- 最少の、もしくは勧告された測定期間
- 使用するラドン検出器の種類
- 適用する測定手順
- 特定の季節のみに測定を実施すべきか（一年より短い期間の測定の場合のみに必要）
- 季節ごとの補正因子を結果に当てはめるべきか否か（一年より短い期間の測定の場合のみに必要）
- ラドン測定所が満たすべき質的基準
- 家屋所有者／居住人に結果を知らせる方法
- 家屋所有者／居住人に与える助言、特にラドン濃度が対策レベルを超える場合の助言

3.3 参加国が使用できるラドン測定方法は様々である。特定の国々で良く使用されているラドン測定方法のリストを付録1に示す。例えばヨーロッパでは、家屋内の空中ラドンを測定するのに最も多く使用されているのは長期的な（一ヶ月から一年まで）飛跡エッチング検出器³である。スウェーデンやフィンランドなどの国々では、暖房を使う季節（10月から4月まで）が屋内のラドン濃度が高いと考えられるため、この季節に測定をすべきだとしている。例えば英国やアイルランドなど他の国では、一年のうち任意の3ヶ月間ラドン測定を実施し、測定値に季節ごとの補正因子を当てはめている。またイタリアなどの国々では、住居によって大きく異なる可能性のある季節変動に関係する不確実性を避けるために、一年間の測定値が一般に用いられている。

3.4 個々の国が特定のラドン測定方法を選択するに当たっては、ラドン測定の経験と利用可能な専門知識を基に決定を行う。

3.5 参加国は、ラドン測定結果に高い信頼性が得られるよう、精度管理プログラムを実施すべきである。ラドンを測定するすべての機関は、ラドンを正確に測定するための能力を示さなければならない。これは、ラドン測定所が着実な手順に従っており、また適切な訓練を受けた職員を確保していることを示す測定所認定システムのもとに実施できる。

測定所認定のみが、特定の測定所がラドン測定を十分に実施できるかどうかを評価する唯一の方法ではない。英国の保健防護庁⁴やスイスのPaul Scherrer研究所が実施するものと類似の国内または国際相互比較システムや他の検証システムに適切な形で参加することにより、測定所の十分なラドン測定能力を示すことができる。相互比較システムに参加することにより測定所の認定を補足することが可能で、二つを合わせると測定所への信頼がより強固なものになる。

4. 国によるラドン調査

4.1 ラドン濃度の季節変動による不確実性を最小限にするために、国によるラドン調査のためのラドン測定は、各家で一年を通して実施することが理想的である。

4.2 参加国は、認定されたラドン測定器および技法を用いた国全体のラドン調査により、集団のラドン被曝の範囲を決定すべきである。これらの調査により、ラドンによるリスクが最も高い地域を示すラドン地図を作成することができる。

北米ではヨーロッパ式の屋内ラドンガス測定⁵が最も頻繁に使われている調査法であり、これはICRP 65でも推奨されている方法である。

- 4.3 国によるラドン調査の企画に当たっては、二つの点を主に考慮する必要がある。
- 屋内ラドンへの集団の平均的被曝および被曝の分布の広さを推定する。これは、無作為に選択した家屋における屋内ラドンレベルを測定することによる集団荷重調査によって可能である。
 - 参加国内で屋内ラドン濃度が高いと予想される地域を同定する。これは地理調査によって可能となる。

- 4.4 集団荷重調査は、集団全体の家屋の代表となるような家屋を測定用に選択する調査を意味する。これは、その国（または、どの程度詳細な知識が必要かによって、各地域／州／町）の家屋リスト全体から無作為に家屋を選択することにより可能である。

集団荷重調査は、国（地域／州／町）の集団のラドン被曝分布を決定し、それにより、平均被曝量および対策レベルを超える住居数を推定するのに必要である。このような調査を実施するに当たっては、偏りにより調査結果に歪みが生じる多くの可能性があるため、統計的助言を得ることが重要である。特に、その国（地域／州／町）の家屋を代表するような家屋を選択する方法を考えなければならない。

集団荷重調査の結果を用いてラドン地図を作成できるが、人口密度が低い地域はほとんど、または全く結果が得られないであろう。これは調査したサンプルの大きさおよびその地域の人口分布に依存する。より完全なラドン地図のためのデータを得るためには、より均一に分布した結果が必要である。地理調査によりこれが可能である。

- 4.5 地理調査では、地域ごとに最小限数の結果が得られるように家屋を選択する。地域は規則的な形（格子状の正方形）でもよいし、不規則な形（町／州などの行政区分による地域）、または特定の地質学的単位の地域でもよい。格子状の正方形（地域）の実際の数および大きさは、利用できる財源・必要とされる空間的および数的正確性・統計的助言によって決定する。特に少数の測定値しか得られない地域では、調査に選択する家屋が、各地域の代表的な家屋であることが極めて重要である。ラドンリスク地図は、単純な地域平均化によってもより複雑な方法によっても作成できる。

- 4.6 集団荷重調査は地理調査に並行して実施可能で、慎重に計画された調査は集団荷重調査と地理調査両方の必要性および目的を満たすことが可能である（4.3項を参照）。このような調査は注意深く計画する必要があるが、調査結果は、参加国におけるラドン問題の範囲と大きさを記述し、ラドンリスク地図を作成するのに用いることができるであろう。例えば、各地域に位置するすべての住居の完全なリスト（または電子データベース）が利用できるならば、地理調査は、ラドン濃度の集団荷重分布を得るのに使うことが可能である。ラドンリスク地図の使用は、国のラドン政策を実施するのに役立つ。

5. ラドンリスク地図とラドン危険地域

- 5.1 ラドンリスク地図は主に国のラドン政策を実施するに当たり役立つ。特に、すべての住居の系統的な探索に比べて、ラドン濃度の高い家屋の探索を最適化するのに役立つ。有用なラドン地図は、国内の様々な地域におけるラドンの可能性を正確に描いたものである。参加国の中にはこれら高濃度地域が小さいも

のもあり、かなり大きいものもあるかもしれない。地図を用いて、どこが高リスク地域、すなわちラドン危険地域であるかに関する情報が得られ、既存の建物における測定および減少措置および新しい建物における防護措置を奨励していくことができる。したがって、地図を用いることにより、ラドン危険地域に当初の財源を当てていくことが可能となる。ラドン危険地域は屋内測定値によって直接見つけることも可能であるが、直接測定値との相関が判明している場合には土壌内ラドン濃度によって間接的に同定することも可能である。

ラドン危険地域では、分布が対数正規の形状を取るため、ラドン濃度値の分布はかなり大きい可能性もあり、ほとんどの値は低い。一方、ラドン危険地域と区分されていない地域でも、確率は低いが、ラドン濃度の高い住居は存在すると考えられる。したがって、ラドン危険地域を同定するだけでなく、高濃度のラドンとより密接な相関関係を持つ建物の特徴を明らかにするための努力もすべきである。

- 5.2 全国的な屋内測定に基づくラドンリスク地図が、アイルランド・英国・米国など多くの国々で作成されてきた。ラドン危険地域は、屋内ラドン濃度が一定の値を超える家屋が特定の割合に達すると推定される地域と定義づけることもできる。

米国では、屋内測定値・地質学的特長・検出可能な放射線レベルに関する低空飛行情報を組み合わせてラドン推定地図が作成されている。

ヨーロッパおよび米国におけるラドン調査および地図の総括的な検討結果が利用可能である^{5,6}。多くの国が地域の屋内ラドン濃度に関するデータを頻繁に公表している。国際連合原子放射線影響科学委員会によってラドン調査に関する世界中のデータが公表されている⁷。

- 5.3 国の政策を決めるに当たり重要なのは、全国のラドン調査結果および国のラドンリスク地図をどのように用いて、参加国内で最もラドンリスクが高いラドン危険地域を定義づけ見つけるかを考慮することである。

ラドン危険地域には様々な定義が存在する。ある国々ではラドン危険地域の異なる区分の定義が用いられてきた。参加国は、一定以上の割合の家屋が国の対策レベルまたは他の基準レベルを超えるラドン濃度を示すと推定される地域をラドン危険地域と定義づけることもできる。またラドン危険地域を異なるレベルに区分することもできる。例えば、重度・中程度・軽度にラドン危険区域を分けることが可能である。このような決定は複雑であり、平均ラドンレベルや対策レベル、またこれらの地域について提案された処置など多くの要因を考慮に入れる必要がある。

- 5.4 参加国は、ラドン危険地域を同定（または更新）した後、これらの地域に推定濃度の高い家屋の多くが含まれる場合は、これらの地域に当初の資源を充当すべきである。国民の意識を高める運動により、これらの地域における家屋所有者がラドンを測定するよう奨励できるであろう。これらの戦略は、建設業者・建築家・地域および地元自治体・医学界など公衆衛生および家屋に関わる機関および専門家を対象とすることができる。

- 5.5 参加国は、建設中のすべての建物にラドン防護措置を講ずることを規定した建設に関する規則および規約を施行すべきである。ラドン危険地域ではより厳密な規定が必要かもしれない。

6. 既存の家屋におけるラドン濃度を低く抑える処置——ラドン濃度が高い家屋を同定し濃度を減少させるために考慮すべき要因

- 6.1 家屋内のラドン濃度は、家屋の種類・設計および建設・地域の地質など多くの要因に依存するので、近隣の家屋間でも大きく異なり得る。個々の家屋におけるラドン濃度については、測定によってのみ信頼できる値が得られる。
ラドンレベルが高い家屋を見つけるには二つの方法がある。
- 特定地域（ラドン危険地域など）のすべての家屋を測定するための地元・地域の自治体または政府による測定プログラムの実施
 - 国民のラドンに対する意識を強めるプログラムもしくは無料または支援を受けたラドンテストにより、家屋所有者が家屋のラドンを測定するよう奨励すること
- 6.2 家屋のラドンレベルが高いことが判明したら、レベルを減少させるように家屋所有者に奨励すべきである。さらに、その家屋に住む喫煙者は肺がんのリスクが最も高い（2.6および2.7項を参照）。このリスクを最小限にするために、喫煙者は家屋内ラドンレベルを下げ、禁煙すべきである。
- 6.3 家屋所有者は、適切なラドン減少のための方法に関する情報を必要とするであろう。参加国は、家屋所有者に理解できる形でこの情報を提供できるようにする必要がある。
- 6.4 家屋のラドンテストの後、評価を行い、ラドンに関連するリスクを軽減するための措置を勧告する。ラドンが対策レベルを超える家屋については、軽減措置を常に勧告する。軽減措置を加えた家屋のラドンレベルは対策レベルをかなり下回るべきである。ラドンが対策レベルより下の家屋についても、単純で安価な措置によるラドンレベルの減少を勧告する。喫煙者がいる家屋は、ラドンとの相乗効果を避けるため、どのようなラドンレベルであれ禁煙および家屋内間接喫煙の減少または回避を勧告する。
- 6.5 家屋内ラドン濃度を減少させる責任は通常は家屋所有者が持つ。しかし、スイス・チェコ共和国・スウェーデンなど少数の国々では、ラドンのレベルが極めて高い場合は（各々1000 Bq/m³、4000 Bq/m³、200 Bq/m³）減少しなければならないという規定がある。大部分の国では軽減措置にかかる費用は家屋所有者が支払わなければならない。家屋にかかる他の費用に比べてこれは通常は安価であるが、この費用のために家屋所有者は必要な措置を取らないかもしれない。参加国は、特にラドン濃度が極めて高い場合は、家屋所有者に対して費用の一部または全てを弁済することを検討してもよい。軽減措置の有効性を評価するための追跡測定を実施すべきである。参加国が弁済プログラムを実施する場合は、財政支援合意書に追跡測定費用を含めることもできる。
- 6.6 家屋所有者は、ラドン軽減措置を代行できる業者に関する情報も必要とするであろう。したがって、参加国は、家屋所有者に代わってラドン軽減措置を取れる認定された建設専門家のリストを作成すべきである。
- 6.7 建設専門家の研修は、勧告された軽減措置が正しく取られることを確実にするために必要である。したがって参加国は適切な研修コースを設けるべきである。理想的には、ラドンが対策レベルを超える家屋の所有者がレベル軽減のために迅速な措置が取れるように、このようなコースはラドン・プログラムに並行して開設すべきである。
- 6.8 理想的には、参加国は国内で実施されたラドン測定およびラドン軽減作業に関する情報を収集する全国的なデータベースを構築すべきである。収集する情報には、軽減作業前後のラドンのレベル、建物の特徴、軽減措置の種類、実施費

用、年間運営費および維持費、建物へのその他の利点／被害（例えば湿気減少やひび割れ）などの項目を含めるべきである。

7. 家屋を売買する際のラドン測定

7.1 家屋を売る際にラドンを測定するよう規定することは、ラドン測定を行う住居数が増えるだけでなく、対策レベルを超える住居は確実に軽減措置が取れることから、有益である。参加国は、住居を売る際にラドン測定および必要であれば軽減を義務づけることを考慮すべきである。この規定は新しい家屋および既存の家屋両方に適用すべきである。

7.2 通常は家屋をできるだけ早く売るようプレッシャーがあるので、これらの状況では特別の測定計画書が必要かもしれない。このような場合には、通常よりも短い測定期間を売主が要求するようにできる。これは、短期的測定値と長期的測定値の間に良い相関関係がある場合には受け入れることができる。適切な測定計画書については測定および軽減の項を参照すること。

8. 新しい家屋におけるラドン濃度を確実に低くすること——建設規則・規約を策定する際に考慮に入れるべき要因

8.1 建設中の建物におけるラドン防護措置を義務づける規則または規約の施行は、集団を保護する最も費用効果の高い方法として受け入れられている。このような措置が正しく取られれば、ラドンの平均レベルが下がり対策レベルを超える新しい家屋の数が減少するので、これはラドン被曝による肺がん死亡総数を減少させる最も有効な方法である。

8.2 新しい家屋において勧告されたラドン防護および軽減措置が正しく取られるようにするため、建設専門家の研修が必要である。参加国は適切な研修コースを設けるべきである。理想的には、このようなコースはラドンプログラムと調整して設置すべきである。それにより、ラドンが対策レベルを超える家屋の所有者はすでに整った体制を利用して、レベル減少のための迅速な措置が取れるであろう。

8.3 これらの建設規約および規則が無視されないように、これらの遵守を義務づけることは重要である。例えばラドン軽減システムが正しく実施されないか、不適切な要素を含むこともあり得る。詳細については測定および軽減の項を参照すること。このような状況では新しい家屋の所有者は、新しい家屋に住んでいるのでラドンから防護されていると考えるかもしれないが、実際には全く防護されていないかもしれない。

8.4 参加国が建設に関する規則および規約を適切に施行するためには、費用がかかるかもしれない。これは他の規則の施行についても同じである。このような費用は政府が負担しなければならないかもしれない。

8.5 国民は新しい家屋にラドン防護措置が取られていることを知らないかもしれない。例えば、湿気防護壁とは異なるラドン防護壁などのラドン軽減システムが必要とされていることを知らないかもしれない。したがって、いずれは全ての義務づけられたラドン防護措置が正しく取られていることを確認するよう国民が建設業者に対して圧力をかけることができるように、建設に関する規則および規約について国民を教育することは重要である。

- 8.6 建設に関する規則および規約を遵守しても、新しい家屋のラドンレベルが対策レベルより低くなるとは限らない。したがって、ラドンについて家屋の安全性を確かめる唯一の方法は測定の実施であることを国民に知らせるべきである。

9. 費用効果の評価

ジュネーブの2006年総会では、対策レベルの勧告を出す前に、参加国の政府省庁の支援を得るのに役立つように費用効果を評価すべきであると提案された。米国の費用効果の解析では、一人の生命を救うための費用は、自動車の子供用安全シートの備え付けに匹敵すると示されている。

国民と利害関係者への情報提供 (未)
参考文献

2007年4月4日

meyx-08

厚生労働科学研究費補助金（地域健康危機管理研究事業）
分担研究報告書

屋内ラドン低減化対策に関する文献調査

分担研究者 杉山英男 国立保健医療科学院 生活環境部 室長
山口一郎 国立保健医療科学院 生活環境部 主任研究官
米原英典 放射線医学総合研究所放射線安全センター
チームリーダー
藤原佐枝子 放射線影響研究所 臨床研究部 部長
毛利一平 労働安全衛生総合研究所 研究企画調整部
上席研究員
木村真三 労働安全衛生総合研究所有害性評価研究グループ研究員
研究協力者 立川佳美 放射線影響研究所 臨床研究部研究員

研究要旨

EPAやWHOは、屋内ラドンの低減化対策に関して複数の手法を紹介している。そこで、その根拠となっているオリジナル文献を12編調査し、各手法の利点と欠点を調査した。この中で、実際に既存の家屋を対象で低減化工事を行った前後で効果や不具合を調査した論文を中心に述べる。縁の下空間を有する家屋では、縁の下の換気率の向上が有効である。このとき、床に密閉シートを貼り付け、ラドンの屋内への侵入を阻害する工法を併用すると、床材の露結を増加させるため、老朽化を促進するため、現在ではシート貼り付けは推奨されない。換気率の向上のみで十分な低減効果が得られない場合には、土面が露出している場合にはビニール等のシートを土面に敷き、ビニールシート下の土の空気移動率を改善し、また、土中にガス溜まり（サンプ）を作り、パイプで吸引することが有効である。土面の上にコンクリート厚板（スラブ）がある建造物では、同様にスラブ下の土の空気移動率を改善し、また、土中にサンプを作り、パイプで吸引することが有効である。地下室などラドン濃度の高い部屋の空気清浄機使用も一定の低減効果があるが、ラドンやラドン娘核種が付着する塵埃のうち、相対的に粒子径の小さいものが増加し、肺への被ばく線量を考えると、低減効果は良くない。

A. 研究目的
代表的な屋内ラドン低減策に関する文献を調査し、その有効性や欠点、

費用効果などに関する情報を入手する。

調査文献リスト

1. Naismith SP, Miles JCH, Scivyer CR: The influence of house characteristics on the effectiveness of radon remedial measures. Health Phys. 75 (4): 410-416, 1998.
資料1. 日本語要約
2. Cliff KD, Naismith SP, Seivyer S, Stephen R: The efficacy and durability of radon remedial measures. Radiat Prot Dos. 56(Nos 1-4): 65-69, 1994.
3. Gregory TJ, Stephen RK: Radon reduction techniques for suspended timber floors and pressure field extension assessment of hardcore specifications. Radiat Prot Dos. 56 (Nos 1-4): 71-76, 1994.
資料2. 日本語要約
4. Welsh P, Stephen R. Radon remediation of dwellings with suspended timber floors - case studies from the Building Research Establishment (UK). Radiat Prot Dos. 56 (Nos 1-4): 56-50, 1994.
5. Henschel DB: Analysis of radon mitigation techniques used in existing US houses. Radiat Prot Dos. 56 (Nos 1-4): 21-27, 1994.
6. Henschel DB: Cost analysis of soil depressurization techniques for indoor radon reduction. Indoor Air. 3: 337-351, 1991.
7. Hopke PK, Jensen B, Montassier N, Wasiolek P: Evaluation of room air cleaners for the reduction of exposure and dose to indoor radon progeny. Radiat Prot Dos. 56 (Nos 1-4): 55-60, 1994.
資料3. 日本語要約
8. Capra D, Silibello, Queirazza G: Influence of ventilation rate on indoor radon concentration in a test chamber. Radiat Prot Dos. 56 (nos 1-4): 15-18, 1994.
9. Orlando P, Trenta R, Bruno M, Orlando C, Ratti A, Ferrari S, Piardi S: A study about remedial measures to reduce ^{222}Rn concentration in an experimental building. J. Environm Radioact. 73: 257-266, 2004.
10. Mamoon A. Gomma MA, Sohsah M: Laboratory scale studies on mitigation of high ^{222}Rn concentrations in air and water. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 213: 766-769, 2004.
11. Naithmith S: Durability of radon remedial actions. Radiat Prot Dos. 71 (3): 215-218, 1997.
資料4. 日本語要約
12. Huber J, Ennemose O, Schneider P: Quality control of mitigation methods for unusually high indoor radon concentrations. Health Phys. 81 (29): 156-162, 2001.
資料5. 日本語要約
13. Ratti A, Piardi S, Baglioni A: Building techniques for the control of radon pollution in Italy. Radiat Protect Dos. 78 (1): 49-54, 1998.
資料6. 日本語要約

B. 研究方法

欧文雑誌 Radiation Protection Dosimetry が1994年に特集したラドン低減化対策に関する論文を中心に13編を選び調査した(調査文献リスト)。この中には、英国の国立放射線防護庁および建築研究所が実施してきた低減化策施工住宅の施工前後での実態調査に関する論文が含まれている。また、同じグループがその後対象家屋を増やして再解析した論文も追加した。その他、オーストリア、イタリア、米国の文献も追加した。

C. 研究結果

(1) 手法に関する文献

文献1. Naismithらによる英国の943軒の解析結果である。低減対策カテゴリ別の有効性(低減係数)を算出し、低減効果を左右する因子を多変量解析している。建造物の構造にかかわらず、最も効果が高かった手法はガス・水だめ(サンプ)設けて吸引する手法であった(低減率4~17倍)。次いで、1階建ての家では、陽圧換気法が効果があった(3.7倍。但し2階建てでは低減率1.9倍と効果は劣る)。屋内の持続的自然換気プラス密封処置(1.5~2.4倍)。床下の機械的換気(2.8倍)、床下の自然換気(1.9倍)であった。(資料1)

文献2. Cliffらの論文は、文献1に先立つ研究で、345家屋に関する解析を述べている。内容的に文献1と同様である。

文献3. Gregoryらの論文は、英国の2つの小学校で行われたラドン低減法の評価を行っている。この論文で注目すべき事は、最初の小学校が日本の典型的な木造家屋に近い土台構造をもつ点である。露出した土面の上に石の土台を作り、その上に板張りの床が設置されている点である。この小学校では、最初に床下の機械的換気(陽圧および陰圧の両方)を試みた。それ単独ではラドン低減効果が少なかったため、床の密閉度を高める工事(シール材を貼る)を行

文献11. Naithmithによるラドン補修処置法の耐久性に関する論文である。成功裏にラドン低減処置工事を行った58家屋の継続調査結果を報告。26軒からは完全なデータが得られ、32軒からは、一部欠落したデータが得られた。全ての手法は、5年間の調査期間、効果が変わらず作動していた。床下の自然換気は年次毎の変動が大きい。効果が高かったのは、サンプ・システムの機械的吸引、陽圧換気、床下空間の機械的換気、床下空間の自然換気、シーリング(目止め)、コンクリートフロアへの膜張りの順であった。

年4%程度の率で、システムのトラブルが発生した。換気用のファンの故障、陽圧換気システムのフィルターの目づまり、床下自然換気の空気孔ブロックが落ち葉で目詰まりなどが原因であった。(資料4)

文献12. Huberらによるオーストリアからの報告である。5軒の高ラドン家屋のラドン低減処置を評価している。コンクリート床下の土壌減圧が効果があった。1軒の家は、新築するに際して、①地下室の壁を耐水性のコンクリートで作ることにより、い、陰圧で換気が続けた。これにより、湿気を帯びた空気が地面から吸い上げられ、床にキノコ類が生えてしまい、床の乾燥腐敗が急速に進行してしまった。最終的に、床をはがし、キノコ類の菌糸が浸潤しているモルタル部分を消毒し、土面に採石と砂を敷き詰め、コンクリート厚板(スラブ)をその上に施行した。スラブの下にガス溜まり(サンプ)を設置し、パイプで吸引する工事を行った。この手法により、屋内ラドンの低減化を達成した。第2に小学校は、最初からサンプ・システムを採用して対処した。(資料2)

文献4. Welshの論文も、木造浮かせ床構造をもつ英国住宅のラドン対策に関する研究である。Gregoryらの研究より小規模の木造浮かせ床構造をもつ14家屋のラドン低減工事

前後の評価を行っている。この調査対象家屋では、床下換気の改善と平行して、床の密閉度を上げるためシールを貼る工法がとられているが、この方法は、もはや露結を増やし、床の乾燥腐敗を促進するため、もはや行われなくなった。

元々床下空間の換気率が悪い住宅の場合には、単純に縁の下の換気口を拡大、追加設置するだけの受動的換気の向上だけで、屋内ラドンを低減できた。多くの場合、受動的換気では、屋内ラドンを50%低減できる程度である。

縁の下の機械的吸引換気は、床下にコンクリート・スラブがない住宅では、ある程度屋内ラドンを低減することが出来たが、規制値以下にすることは出来なかった。家屋によっては、機械的吸引換気から、機械的送風換気に切り替えて効果が上がった事例があった。

文献5. Henschelの米国で実施されているラドン低減策のレビューである。EPAの「ラドン低減に関する消費者ガイド」と基本的に同じ手法を同じように解説している。施行のコストや、低減率等の数字が多少違うだけである。又、既に米国では使用されなくなった空気清浄機の手法に関しても記載がある。

文献6. この論文で、Henschelは、米国で最も有効と評価されているスラブ下サンプ能動吸引法のコスト分析を行っている。この手法は優れているが、設置費用が高いために十分普及していない。Henschelは、ベースとなる工事費用を算出し、削減できるかもしれないオプションを省いていっても、最終的に設置費用は800 - 1000ドルを下回らないこと、換気用のファンの容量を小さくしても、換気扇の電気代と冷暖房費の削減は年間68ドル程度しか低下しないことを計算している。結論として、介入レベルに近い、中等度屋内ラドン上昇家屋の住人は、スラブ下サンプ能動吸引法を施行するのをためらうで

あろう。そして、もっと経済的なラドン低減化手法の開発が望まれると結論している。

文献7. Hopke は、空気清浄機によるラドンの除去に関する研究を報告している。空気濾過システム、陽イオン静電収集器、イオン化ファンシステムなどがテストされた。一週間稼働させ、屋内ラドンおよび娘核種の濃度と粒子径分布が観測された。肺への被ばく線量は、Jamesらによって開発されたモデルによって計算した。空気清浄機は、どのタイプであれ、屋内ラドンと娘核種の総量は低減させたが、粒子径の小さい粒子に付着したラドンおよび娘核種は相対的に増加した。この結果、肺への沈着による被ばく線量は、屋内ラドンと娘核種の総量の低減から予測されるほどには低減しないことが判った。(資料3)

文献8. Capraらによる本論文では、イタリアの窓のない部屋で床下に40cm高の縁の下がある模擬住宅をチャンバー内に作成し、換気率がおよぼす屋内ラドンおよび縁の下空間のラドン濃度を測定した。又、このデータに基づき数学モデルを構築した。屋内ラドンおよび縁の下空間のラドン濃度には、同調した日内変動が観察される。屋内の換気率を0.8 ACHから2.1 ACHに高めると、屋内ラドンは低下するが、縁の下空間のラドン濃度は、むしろ上昇する。数学モデルによるシミュレーションは、実験結果と合っていない様に見受けられる。文献9. Olandoらによるミラノ東部に位置する一軒の家屋での研究。この地方はラドン濃度が高い。家屋は、圧縮コンクリートブロック、防水タイルで建造されており、床下には高さ30cmの空間がある。初期値の屋内ラドンは、1,700Bq/m³、床下空間のラドン濃度は、16,000Bq/m³であった。屋内の換気率を密閉、自然換気、ファン1個での換気、ファン2個での換気と変化させたところ、ファンを使った場合に

約1/3に低減することが出来たが、規制値をクリアできなかった。次に、直径16cm開口面積20cm²のパイプを2本ずつ径4本、南北の土台部分の壁を削って設置し、床下空間の自然換気を行った。床下空間のラドン濃度は700-1,000Bq/m³に低下し、これに伴って屋内ラドン濃度も150Bq/m³に低下した。この方法は、床下換気が悪い住宅のラドン低減手法として、有効である。

文献10. Mamoonらによる実験チャンパー内の実験である。現実的な家屋での曝露とは条件が異なっており、家屋での実験結果は、参考にならない。高ラドン濃度の水に関する研究は、参考になる。水中ラドンは、バブラーを使って空気を吹き込む曝気法が最も効果が高く、活性炭などの吸着剤による手法より優れていた。

飲料水の水源でラドンを低減する手法と考えられる。

ラドンの屋内への侵入を防止すること、②地下室の床下にドレナージュチューブ（排液チューブ）を1m間隔で敷き、その周囲を砂利、砂で覆うように設計した。これは、土壌のガスの移動を容易にし、減圧の作用がある。機械的吸引をしていないが、この手法で高ラドン地域であるにもかかわらず、建築後6年間の観察期間、屋内ラドンは規制値以下に保たれた。（資料5）

文献13. Rattiらによるレビュー論文である。他の論文と異なり、新築する場合のラドン耐性住宅に関して、纏めている点が新しい。

（資料5）

D. 健康危機情報

なし。

E. 研究発表

1. 論文発表

米原

Iwaoka, K., Tokonami, S., Yonehara, H., Ishikawa, T., Doi, M., Kobayashi, Y., Yatabe, Y., Takahashi, H., Yamada, Y.: Continuous measurements of bronchial exposure induced by radon decay products during inhalation, *Review of Scientific Instruments*, 78(9), 093301, 2007

米原 英典、石森 有、秋葉 澄伯、飯田 孝夫、飯本 武志、甲斐 倫明、下 道國、床次 眞司、山田 裕司、吉永 信治、米澤 理加*: 屋内ラドンリスクに関する疫学研究とその評価、*保健物理*、42(3)、201-213、2007

木村

Kimura, S. Shibato, J. Agrawal, G., K. Kim Y. K. Nahm, B. H. Jwa, N. S. H. Iwahashi, H. and Rakwal R.: Microarray analysis of rice leaf response to radioactivity from contaminated Chernobyl soil.: *Rice Genetics Newsletter*, 2007(online published)

Rakwal, R. Kimura, S. et.al. Growth retardation and cell death in rice plants irradiated with carbon ion beams is preceded by very early dose-/time-dependent gene expression changes: *Molecules and Cells*, 25(3) published in JUNE 30, 2008.

杉山

H. Sugiyama, H. Terada, M. Takahashi, I. Iijima, K. Isomura: Contents and daily intakes of gamma-ray emitting nuclides, ⁹⁰Sr, and ²³⁸U using market-basket studies in Japan. *J. Health Sci.* 2007; 53: 107-118.

山口

坂下 恵治、松岡 哲也、山口 一郎、諸 澄邦彦、長谷川 隆幸、横田 順一朗。救急処置室におけるX線設備に関する検討。日本臨床救急医学会雑誌。10(2)、278、(2007)

藤原

Nerrishi K, Nakashima E, Minamoto A, Fujiwara S, Akahoshi M, Mishima H, Kitaoka T, Shore RE Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: Radiation dose response and threshold. Radiat Res 168:404-408, 2007

Nakashima E, Akahoshi M, Neriishi K, Fujiwara S Systolic blood pressure and systolic hyper-tension in adolescence of atomic bomb survivors exposed in utero. Radiat Res 168:593-9,2007.

2. 口頭発表

Tatsukawa Y, Nakashima E, Yamada M, Funamoto S, Akahoshi M, Fujiwara S. Radiation effects on noncancer diseases among the prenatally exposed atomic bomb survivors. 13th International Congress of Radiation Research. 8-12 July 2007, San Francisco, California, USA.

Nakashima E, Akahoshi M, Neriishi K, Fujiwara S. Systolic blood pressure and systolic hypertension in adolescence of in utero exposed atomic-bomb survivors. 13th International Congress of Radiation Research. 8-12 July 2007, San Francisco, California, USA.

高松倫也、横山知子、木内良明、隈上武志、上松聖典、築城英子、北岡隆、鎌石和男、中島栄二、飛田あゆみ、藤原佐枝子、赤星正純 広島・長崎原子爆弾被爆者に対する緑内障調査 第61回日本臨床眼科学会 2007年10月11日-14日 京都

杉山英男、高橋光子、寺田宙、前田千佳、加藤文男. キノコ(*Pleurotus ostreatus*)によるCsの高濃縮性と局在性に関する検討. 第127年会日本薬学会; 2007; 富山. 同要旨集. p.178.

杉山英男、寺田宙、高橋光子、飯島育代、磯村公郎. トータルダイエツトスタディによる放射性. 第44回アイソト-プ・放射線研究発表会; 2007; 東京. 同要旨集. p.144.

F. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
2. 実用新案登録

なし

3. その他
特記すべきもの無し

資料 1.

Naismith SP, Miles JCH, Scivyer CR, The influence of house characteristics on the effectiveness of radon remedial measures. Health Phys. 75(4):410-416; 1998.

[Naismith他、家屋の特徴がラドン対策の有効性に及ぼす影響]

要旨全訳

英国において、ラドンレベルの高い943軒の家屋を対象として、ラドン曝露低減対策（以下、ラドン対策あるいは対策）の有効性を検討する調査研究が実施された。ラドンレベルは、対策実施の前後3カ月で測定され、結果は、典型的なラドン濃度の季節変動モデルにより補正された。家屋所有者からは、家屋の特徴及びラドン対策に関するアンケート調査への回答を得た。これらの回答から、家屋の特徴が、異なるラドン対策の有効性に及ぼす影響を分析、検討した。特に、築年数、そして対策の実施者、すなわち対策のための工事が大手建設会社、地元建設業者、家屋所有者のいずれによって実施されたかということ、によって対策の有効性に有意差が認められた。

論文要約

英国では一般家屋350,000軒について3ヶ月以上にわたるラドン測定結果があり、そのうち10%（35,000軒）がアクションレベル（200 Bq m⁻³）を超えている。これらアクションレベルを上回る家屋所有者には、ラドン濃度をこのレベル以下に大きく減少させるよう勧告が出され（1995年？）、さらに対策後再びラドン濃度を測定するよう勧告された。

本研究は、これら対策前後のラドン測定値と、ラドン曝露低減対策の具体的内容、家屋の特徴に関するアンケート調査から、家屋の特徴がラドン対策の有効性にどのような影響を与えるかを検討したものである。

ラドン曝露低減対策

・ 床下の減圧／加圧（ガス・水だめ槽）

ガス・水だめ槽は、バケツの容量程度（10～25 L）の空間であり、床下で掘り出され、パイプを利用し適当なファンに連結したものである（BRE、1992年）。ファンは、家屋下の地面から土壌ガスを吸引し、窓やドアから離れた大気へ土壌ガスを放出する。一般的にガス・水だめ槽の設置はラドン濃度をアクションレベルのかなり下の濃度まで低下させるのに有効であるが、そのためには適切なファンが使われている事、配管が適切に行われている事が必要である。

・ 陽圧換気

ろ過された屋根裏の空気を、家屋内へ取り入れるファンを取り付ける方法である。これは、家屋内が低圧にならないようにし、土壌空気が家屋内に入り込むのを防ぐ。この方法は、ラドンレベル750 Bq m⁻³までの家屋において効果が認められるものの、それ以上濃度が高い場合の効果は限定的である。家屋の密閉度が高い場合に、最も効果的である。

・ 持続的な自然換気の追加

閉じられる事のない通気孔を取り付けることで、自然換気を行う。これは、1階の窓にだけ取り付けられるべきである。上階での換気増加は、煙突効果を増加させ、ラドンレベルの上昇を招く。通気孔は、ラドンレベルが最も高くなる冬中、開放する必要があることに注意する。この対策の効果は様々であるが、ラド

ンレベル500 Bq m⁻³までの家屋では、成功する場合がある。

- ・ 床下空間の自然又は機械換気

英国では、多くの家屋が板張りの床であり、その下に、「有孔レンガ」を用いた空隙がある。有孔レンガには、換気孔があり、これを通して換気が行われる。ラドン低減には、有孔レンガの位置が大きく関与する。もし、通気のないデッドスペースがあれば、低減効果は小さい。もし、有孔レンガが建物の至る場所に設置されていれば、風向きに関係なく通気は自由であり、ラドン濃度の大幅な低減につながる。建物の1階が土壌と吊り床の混合である場合、この方法の有効性は、低くなる可能性が高い。この方法の有効性は、建物がどのようにラドンに曝露されているかにより、また、風速及び風向きの変化のため、時間により様々である。この技術は、一般的に、2分の1までラドンレベルを低下させるためには有効であるが、ラドンレベルが最大750 Bq m⁻³の家屋に適用された場合でも、有効であった。

吊り床下の換気率は、空隙から空気を吸引する、あるいは空隙へ空気を供給するファン付きの有孔レンガに取り換えることで、さらに増加する。通常この方法は有効であり、アクションレベルよりかなり低いラドンレベルを達成できる。

- ・ コンクリート床の密封

床のひび割れや供給口部の密封は、土壌空気の侵入を減少させる明確で魅力的な方法であるが、効果的に実行することは難しい。床の密封で最も重要なことは、目に見える全ギャップを確実に封じることである。例えば、もし隙間の90%しか密封されていない場合、ラドンは残りのギャップから侵入し、その濃度はわずかしか低下しない (Naismith, 1994年)。この方法は、主要なラドン対策として用いられ、まずまずの成功を収めているが、ほとんどのケースで、その他の対策も行われている。

- ・ 家屋の種類

最も深刻なラドン問題は、1階又は2階建の一世帯住宅に認められる (Wrixonら、1988年)。この調査研究における全家屋は、この種類のものであり、デタッチド・ハウス (他の家屋と結合していないもの)、セミデタッチド・ハウス (界壁により一方のみ他の家屋と結合しているもの)、又はテラス・ハウス (3戸以上の連続住宅) のいずれかであった。

居間及び寝室の床は、固定床 (下層の地面と接触)、又は吊り床として分類される。吊り床は、板張り又はコンクリートである。板張りの吊り床の方が一般的であり、コンクリートの吊り床は、家屋所有者により固定床として報告されている場合がある。報告された床の種類組み合わせは、以下のとおりである。

- ・ 吊り床の居間／吊り床の寝室

- ・ 固定床の居間／吊り床の寝室

これは、英国で最も一般的な床の種類組み合わせであり、特に、戦後に建造された家屋で顕著である。

- ・ 固定床の居間／固定床の寝室

この種類の家屋の床建設は、1階建、又は居間と寝室が1階にある2階建の家屋に認められる場合がある。

結果及び分析

今まで、1,860名の家屋所有者から、対策実施後のラドン濃度測定依頼があった。これらの測定のいくつかは、依然として進行中である。対策実施前後の全測定は、居間及び寝室に受動エッチング型飛跡検出器を3カ月間設置することにより実施された。測定されたラドン濃度は、最も正確な推定年間平均ラドン濃度を割り出

すため、測定方向及びモニタリング期間中の季節変動式により補正された (Miles, 1998年)。検出下限は 10 Bq m^{-3} で、これ以下のデータはすべて 10 Bq m^{-3} として処理している。

家屋のラドンレベル調査は、一般的に対数正規分布を示す (Gunbyら, 1993年)。そのような分布は、独立変数が多重的に相互作用する場合に認められることが多い。ラドン低減係数が対数正規分布であるかを決定するため、累積対数確率紙 (データが対数正規分布であれば、直線が描かれる) にプロットを行った。グラフは、すべて直線ではないものの、直線部分が認められる (図1)。このパターンは、データが1つ以上の対数正規分布を含む場合に生じる可能性がある。

これが、対数正規からの逸脱の原因であるかどうかを決定するため、対策ごとにデータを再プロットした。図2は、床下空隙の自然換気を例にとったものである。この場合、線は直線的であり、対数正規分布に近い。低減係数が高い場合にの直線からの逸脱が認められる。これは、低減係数が高いという事は最終ラドン濃度が低いという事を意味し、それゆえ、不十分な計数統計のため、測定において大きな不確実性が認められるという事実に起因する可能性がある (Hardcastleら, 1996年)。この場合、及びその他の対策による低減係数の分布は、不完全ではあるものの正規分布より対数正規分布により近い。

これにより、ラドン低減係数は、独立した乗法因数の数により主に決定されることを意味する。したがって、ラドン低減係数に関するデータは、ラドンレベルの高い建物の特徴の同定に用いられたものと類似の乗法モデルを用いて解析をおこなった (Gunbyら, 1993年)。ラドン対策の前後で測定を行い、さらにアンケート調査を完了した家屋がこの解析に含まれている。このデータセットは、546軒の家屋で構成された。ラドン低減係数に、どのような家屋の特徴が影響を及ぼすかについて、5%水準で有意なものであるかを決定するため、重回帰分析を用いられた。

このモデルでは、ラドン曝露低減の程度に影響を及ぼす可能性のある、以下の家屋の特徴及び対策の有無を、カテゴリー変数として扱った。家屋の特徴としては、家屋の種類、戦前/戦後建造、二重ガラスであるかどうか、1階が固定床又は吊り床、1階建又は複数階建、そして是正処置が家屋所有者、地元の建設業者、又は大手建設会社により実施されたかが挙げられる。独立変数は、低減係数に相乗的に寄与するとみなした。上記の因子は、異なるラドン対策によって、異なる効果を示す可能性があるため、ラドン対策ごとに重回帰分析をおこなった。

Gunbyら (1993年) の方法により、ラドン対策ごとに、最も一般的な特徴を持つ標準家屋を定義した。ガス・水だめ槽システムに関して標準的な家屋は、戦後に建造され、二重ガラスではない2階建であり、1階はコンクリートの固定床であり、大手建設会社によりガス・水だめ槽システムが設置されたものである。陽圧換気システムに関しては、戦後に建造された1階建の家屋であり、二重ガラスではなく、1階はコンクリートの固定床であり、大手建設会社によりシステムの設置が行われたものである。自然換気に関しては、標準的な家屋は、戦後に建造され、二重ガラスではない2階建であり、1階はコンクリートの固定床であり、ラドン対策は家屋所有者により実施されたものである。

低減係数の上下を修飾するカテゴリー変数を f_i として、用いられたモデルは、下記のとおりである。

$$\frac{\text{対象家屋における低減係数}}{\text{標準家屋における低減係数のGM}} = f_1 f_2 f_3 \dots$$

標準家屋で、 f_i はすべて1となる。標準家屋における低減係数の幾何平均値 (GM) は、対数正規分布のパラメータとして算術平均値よりも適切である。

自然対数を取る場合、モデルは下記のようなになる。 ■

$$\ln \left[\frac{\text{対象家屋における低減係数}}{\text{標準家屋における低減係数のGM}} \right] = \ln (f_1) + \ln (f_2) + \ln (f_3) + \ln (f_4) \dots$$

解析には統計パッケージStastisticaを用いた。5%水準で有意な効果を示した家屋の特徴を表1に示す。ガス・水だめ槽に関しては、対策作業の実施者（家屋所有者、地元建設業者、大手建設会社）及び家屋が戦前又は戦後に建造されたかの2つの要因が有意であった。この対策に関して、これらの2つの要因間に有意な相互作用が認められるかを決定するため、モデルが変更して分析した。その結果、相互作用は5%水準で有意であり、ラドン対策作業の実施者に関する効果は、家屋が戦前又は戦後に建造されたかによって差異が認められることが示唆された。

有意な変数を確認した後、その他の変数データが存在しないが、これらの全変数に関するアンケート調査データが存在する追加の397家屋を同定した。これらを加え、家屋数は943軒となった。この大規模なデータセットを用いて、重回帰分析を行い、得られた係数をラドン対策別に標準家屋にあてはめ、低減係数の幾何平均値を決定した。ラドン対策の有効性として、ラドン濃度がアクションレベル未満となった家屋の割合を得た。これらのデータを表2に示す。

考察

以前の調査研究同様、床下のガス・水だめ槽設置が最も効果的なラドン対策であることが示された。驚くべきことに、吊り床と固定床とで対策の有効性に有意差は認められなかった。これは、建設業者が、床の種類にかかわらず、ガス・水だめ槽システムに関する優れた作業を実施したため、あるいはこの対策を実施した板張りの吊り床を有する大部分の家屋の下に、コンクリートが打設されていたためかもしれない。

ガス・水だめ槽システムを自身で設置した家屋所有者は、地元建設業者により設置が行われた場合よりも、ラドンレベル低下の有効性が低かった。地元建設業者により設置が行われた場合は、大手建設会社による設置の場合より有効性が低かった。これは、おそらく、建設に関する標準専門知識が低いこと、及び作業の規模や費用を最小限に抑えたいという願いに起因すると考えられる。

戦前に建造された家屋より、戦後に建造された家屋において、ガス・水だめ槽の設置によって低減係数がより高くなっていた。これは、Woolliscroftら（1994年）の調査結果と一致する。彼らはこの差異を、現代風の固定床が多くの以前の固定床と異なり、良好な透過性を有するという事実に起因するものとした。別の要因として、近年の家屋は板張りの吊り床の下にコンクリート層を有する可能性が高いことが挙げられる。このようなコンクリート層を有する家屋は、コンクリート技術の改善により、戦後の英国で非常に一般的となり（1944年以降に建てられた家屋）、1965年の建築基準法（HMS0、1965年）により義務付けられるようになった。また、長い年月を経て、老朽化した床は、ひび割れも多く、新しい配管の設置が多くなる可能性が高いことも要因として挙げられる。残念なことに、今回実施されたような郵送による大規模試験では、構造の老朽化が、建設技術の変化と分離された効果を有するかを決定するのは極めて困難である。

陽圧換気システムは、ラドン低減の達成及び成功率の両方において、2階建の家屋より1階建の家屋で非常に効果的であった。主因は、煙突効果により生じた低下が、1階建の家屋でより小さく、それゆえ、換気システムによる改善効果が、比例的に高くなっている可能性がある。陽圧換気は主に、屋根裏に近い階の換気パターンを変化させるため、換気パターンの変化によるラドンレベルの低下はまた、1階建家屋で著しい可能性が高い。ラドンレベルが最も高い2階建家屋の1階の換気は、この方法では、ほとんど変化しないと考えられる。

持続的自然換気の追加、及びひび割れや供給口部の密封は、ラドン曝露低

減対策のうち、最も効果が低かった。密封は、その他の対策と組み合わせられることもあったが、持続的自然換気の追加と組み合わせ時のみ総合的に有意な低減効果が認められ、またラドン濃度をアクションレベル未満に低減する事のできた家屋の割合に有意にはたらいた。これに関する考えられる解釈は、自然換気及び陽圧換気は、室内と室外の空気間の圧力差を減少させることによってのみラドンレベルを低下させるという事実である。それゆえ、自然換気及び陽圧換気は、侵入ルートの大ささ（サイズ）に特に敏感である可能性がある。陽圧換気は、一般的に密閉と組み合わせられないため、上記の家屋において、この仮説を検証する十分なデータは存在しなかった。

結論

結論として、家屋の特徴を考慮に入れた場合、様々なラドン対策の有効性に関する差異が認められることが、この試験より明らかになった。その他の因子をアンケート調査から発見するのは困難ではあるが、間違いなく測定の有効性に大きな影響を与えている。データからは、作業水準を高く保つため、家屋所有者や建築業者にも同様に、適切な教材を提供することの必要性が明らかである。家屋の建築様式が特殊である、又はラドン濃度が特に高い場合、家屋に関する詳細情報に基づいた専門家の助言を求めることが推奨される。しかしながら、ラドン曝露の低減に成功した大部分のケースにおいて、この分析から得られた情報により、個々の家屋の特徴に適した対策について、有効性の高いと考えられるより正確な助言をおこなうことができる。

表1：ラドン低減係数に効果を有し、5%水準で有意な家屋の特徴

対策	有意な変数
ガス・水だめ槽システム	戦前又は戦後 対策実施者（家屋所有者、地元建設業、又は大手建設会社） 「戦前又は戦後」及び「対策実施者」間の相互作用
陽圧換気	居間及び寝室の位置（異なる階、両方とも1階）
持続的自然換気の追加	ひび割れの追加密封の有無
床下空間の機械換気	有意な変数なし
床下空間の自然換気	有意な変数なし
ひび割れ又は供給口部の密封	有意な変数なし

表2：家屋の特徴がラドン低減係数に及ぼす影響

対策	区分	家屋数	初期ラドンの幾何平均値	低減係数の幾何平均値	アクションレベル未満に削減された家屋の割合
ガス・水だめ槽システム	大手建設会社による設置、戦後の家屋	166	540	17	95
	大手建設会社による設置、戦前の家屋	102	630	9	77
	地元建設業者による設置、戦後の家屋	65	430	11	82
	地元建設業者による設置、戦前の家屋	43	530	6	70
	家屋所有者による設置、戦後の家屋	31	550	7	77
	家屋所有者による設置、戦前の家屋	22	560	4	64
	陽圧換気	居間及び寝室の階が異なる	43	500	1.9

	居間及び寝室が両方とも1階にある	51	580	3.7	63
持続的自然換気の追加	ひび割れ又は供給口部の追加密封なし	59	370	1.5	49
	ひび割れ又は供給口部の追加密封あり	56	430	2.4	60
床下空間の機械換気	全データ	63	540	2.8	54
床下空間の自然換気	全データ	171	390	1.9	53
ひび又は供給口部の密封	全データ	71	470	1.7	41