

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K10426

研究課題名（和文）リスクに対応できる社会を目指した生活環境中ラドンのダイナミクス研究

研究課題名（英文）Study of the dynamics of radon in the living environment for a risk-adapted society

研究代表者

迫田 晃弘（Sakoda, Akihiro）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核燃料・バックエンド研究開発部門 人形峠環境技術センター・研究職

研究者番号：50603221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ラドン（Rn-222）やトロン（Rn-220）は希ガスの天然放射性元素で、生活環境のあらゆる場所に存在するため、環境動態や健康影響の理解、及び公衆のリスク認知が重要である。本研究では、屋内外で各種測定とモデル解析を行い、モデルルーム内におけるラドン・トロンの時空間変動を明らかにした。特に、本研究は発生源としての建材のその場測定に重点を置いた初めての試みであった。また、我が国における屋内ラドンのリスク評価を行い、国際機関が勧告する参考レベルを導入した際の効果（肺がん死者数の低減）は限定的であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ラドンやトロンに関する環境動態の一連のプロセス（発生から被ばくまで）を理解することで、今日、国内外で高い関心が示されている屋内ラドン・トロンについて、低減等の技術的可能性を拡大することができる。また、屋内ラドンへの対応には公衆のリスク認知も重要で、関係者（専門家を含む）による説明のあり方が問われている。本研究成果は、これら課題に対して大きく貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：Radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) are natural radioactive inert gases that are ubiquitous in the living environment, making it important to understand their environmental fate and health effects and public risk perception. In this study, various indoor and outdoor measurements and model analyses were performed to clarify the spatio-temporal variation of radon and thoron in a model room. This study was the first attempt to focus specifically on in-situ measurements for building materials as sources of radon and thoron. We also conducted a risk assessment of indoor radon for the Japanese population and found that the effect (reduction of lung cancer deaths) of introducing the reference level recommended by international organizations was limited.

研究分野：環境放射能

キーワード：ラドン トロン 発生 移流 拡散 リスク

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ラドン (Rn-222) は希ガスの放射性元素で、岩石や土壌などから発生する。タバコに次ぐ2番目の肺がんリスク因子であるが、地球上のどこにでも存在し、我々は常に吸入被ばくしている。近年、そのリスクが従前の2倍以上に見直されたことで、放射線防護における国際的関心は高く¹⁾、欧州諸国を中心に屋内ラドンへの対応が進んでいる。また、ラドンのみならず、同位体のトロン (Rn-220) にも注意が向けられつつある。

ラドンの環境影響評価には環境動態 (散逸～移行～曝露) の理解が必要である。これまで屋内ラドン濃度と気象などの関連パラメータの連続測定、および相関分析や数理モデル解析がなされてきた。このとき、屋内ラドンの発生源としての建材の重要性は認識されながらも、土壌のみを発生源に当てることが多く、建材のその場測定に基づく検討は進んでこなかった。

また、日本における屋内ラドン状況について、全国調査に基づく濃度分布の報告があり、国際的には低濃度のクラスであることが明らかになっている²⁾。現在、我が国で屋内ラドンに対する対応は無いが、今後、施策とその効果を考えるには、リスクに関して更なる情報が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、ラドンやトロンの挙動・動態・影響をより精緻に理解するため、発生源としての建材に注目して、モデルルーム内外でラドン、トロンおよび関連パラメータ (子孫核種、気象など) の連続測定を1年間以上にわたり実施した。また、日本人集団に対する屋内ラドンのリスク計算、および国際機関が勧告する参考レベル (100～300 Bq/m³) の導入に伴う効果の推定を行った。

3. 研究の方法

(1) ラドンと関連パラメータの連続測定

本研究にあたり、5階建ての集合住宅 (岡山県、1980年竣工) の一戸 (1階) をモデルルームとして用意した。測定は2021年4月～2023年1月まで実施し、当期間中に居住状況はなく、電化製品 (エアコン、ヒーターなど) の使用もなかった (ただし、研究目的でのエアクリナーの稼働を除く)。以下、建材からのラドン・トロン散逸率に焦点を当てて説明するが、これと並行して、大気中ラドン・トロンと子孫核種、周辺土壌のラドン散逸率、気象 (温度、湿度、気圧)、エアロゾル粒径分布も1時間間隔で測定した。

建材の散逸率は、円筒形チャンバー (蓄積容器) を壁に直接設置し、一定期間、その中にラドン・トロンを蓄積させることで分析した (図1)。対象壁は、コンクリート壁 (戸境壁) と石膏ボード (外周壁。コンクリートと断熱材を伴うと推測) で、データ解析の仕様上、前者は約2日間、後者は1時間毎の平均散逸率を取得した。

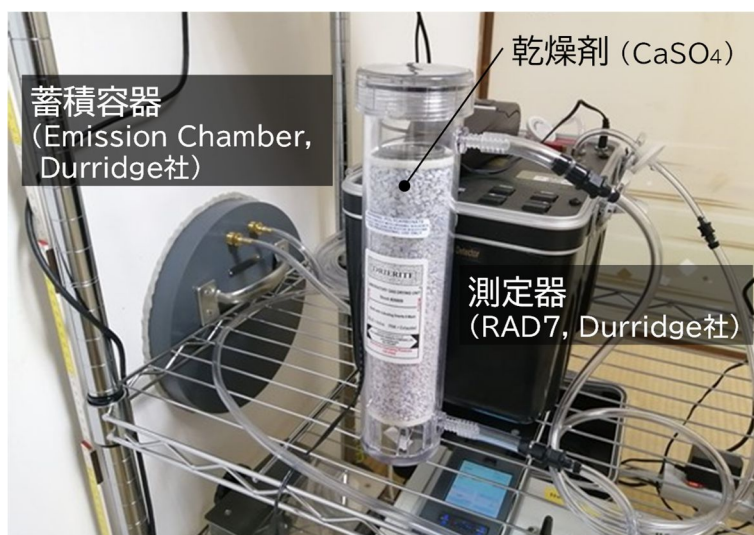


図1 ラドン・トロン散逸率測定の様子

(2) 日本における屋内ラドンのリスク評価

リスク計算には、米国環境保護庁 (EPA) によって開発されたリスクモデルを使用した³⁾。入力パラメータとして、日本人の性別・年齢別の全死因や肺がんによるベースライン死亡率、および喫煙率などを用意した。ラドン濃度 1 Bq/m³ 毎に全原因肺がん死の生涯リスクと集団寄与割合

を算出し、それぞれ日本の屋内ラドン濃度の度数分布²⁾による荷重平均を計算することで、日本人集団に対するリスクを求めた。

4. 研究成果

(1) 建材によって異なるラドン・トリウム散逸率の特徴

モデルルーム内の異なる2部屋にあるコンクリート壁について、図3にラドン散逸率、図4にトリウム散逸率の温度特性を示す。部屋によって程度の差はあるが、温度と両散逸率に正の相関がみられた。先行研究にコンクリート試料片を用いた実験室試験があり、本結果を支持するデータが報告されている⁴⁾。先行研究や理論計算から、散逸率は散逸能と拡散係数に支配されることがわかっており、壁1と壁2の温度に対する散逸率の変化度合いの違いは、これらパラメータが関係していると考えられる。部屋によって環境条件が異なることでコンクリートの経年変化に違いが生じ、結果として散逸率の温度に対する変化にも違いが表れたのかもしれない。

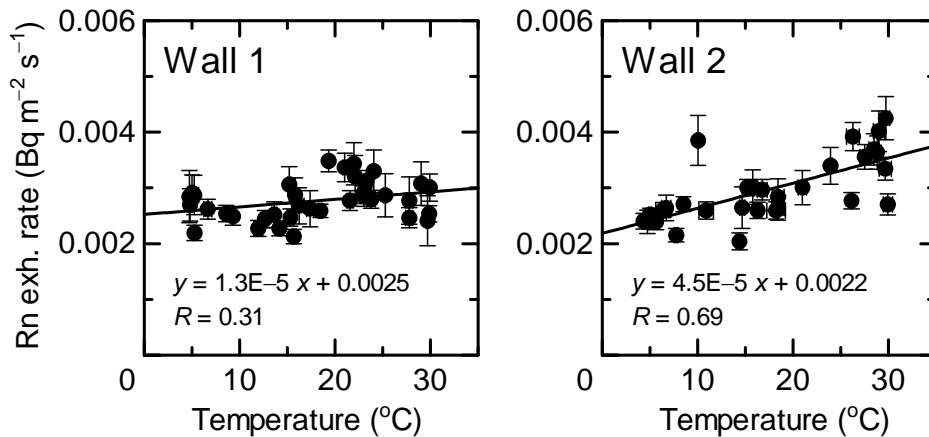


図2 コンクリート壁における気温によるラドン散逸率の変化

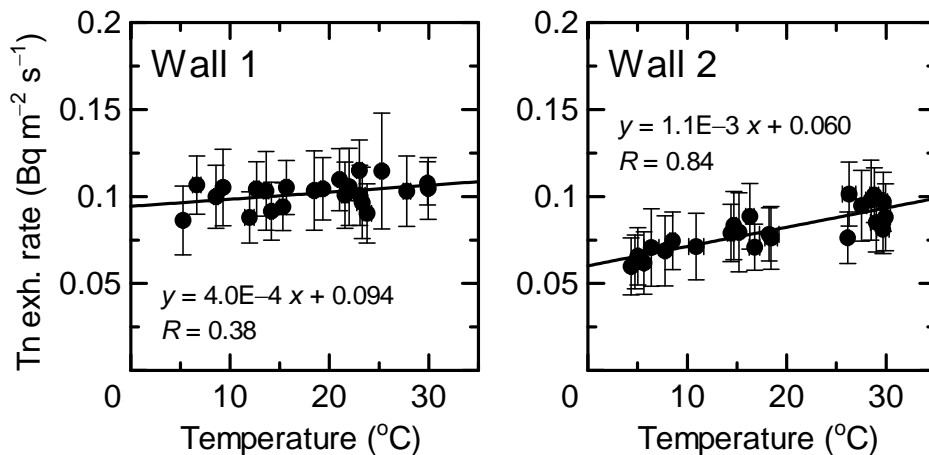


図3 コンクリート壁における気温によるトリウム散逸率の変化

一方、石膏ボードでは、図4に示すようにラドン散逸率の日内変動がみられた。これは、少なくとも数日間は散逸率が一定とみなせたコンクリート壁とは異なる特徴であった。本研究の対象壁を想定してモデル計算を行ったところ、石膏ボードの両側面のラドン濃度差が散逸率を支配していることが示唆され、これが日内変動の一因として考えられた。また、図5にラドン散逸率の温度または屋内外差圧（石膏ボードの両側面差圧の近似として採用）に対する変化を示す。コンクリート壁と同様に温度とは正の相関がみられたが、差圧との有意な相関はみられなかった。しかし、ここでは天候に伴う大気圧の急な著しい変化を考慮していないため、今後、より詳細な解析を要する。

本研究では、一戸のケーススタディではあるが、その場測定に基づくラドン・トリウム散逸率について新たな知見が得られた。これは、屋内ラドンの挙動や動態の理解はもとより、数理モデリングに必要なラドン・トリウム発生源の精度向上への貢献が期待される。

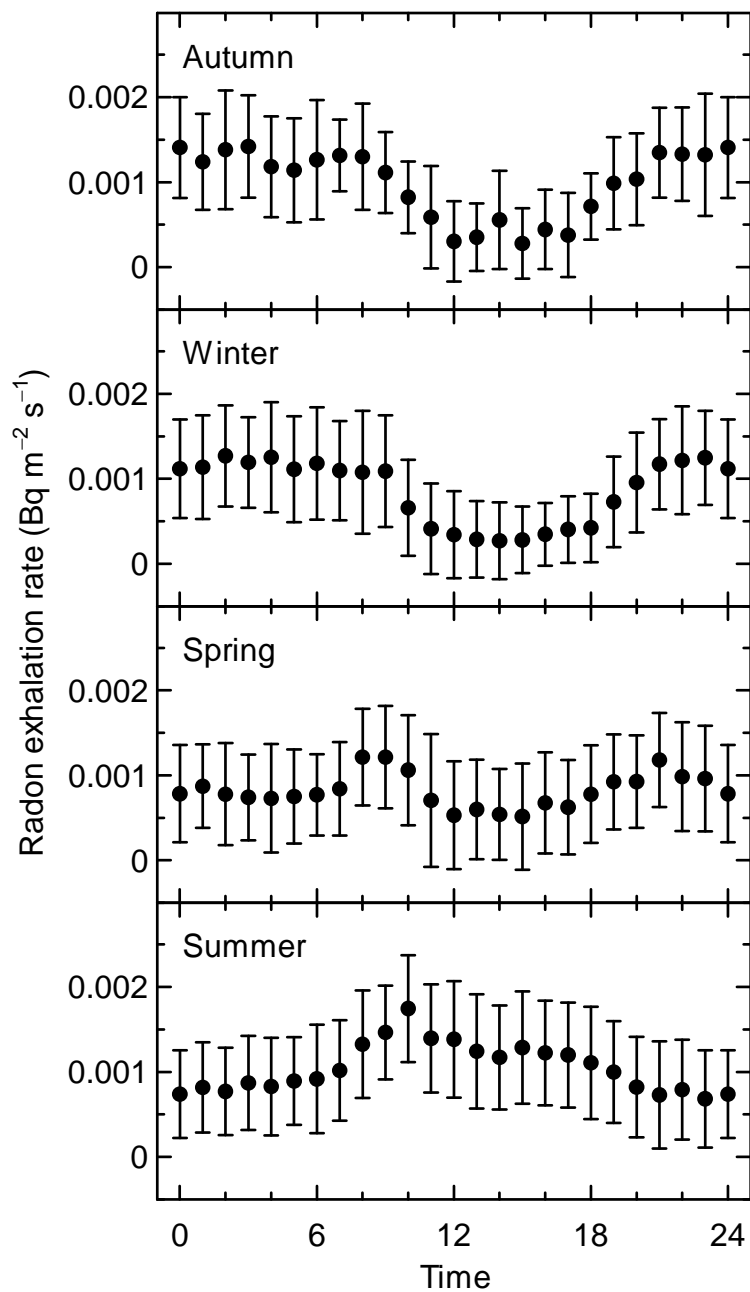


図4 石膏ボードにおけるラドン散逸率の日内変化

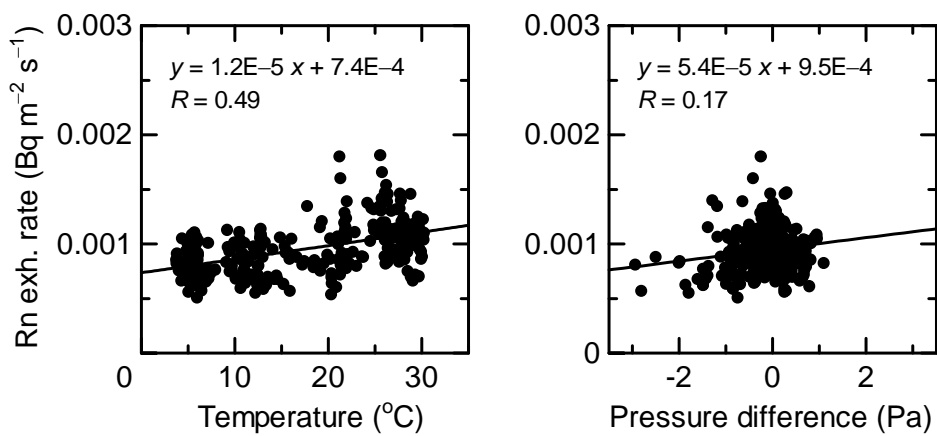


図5 石膏ボードにおける気温または屋内外差圧によるラドン散逸率の変化

(2) 日本における屋内ラドンのリスク評価

全ての肺がん死数のうち屋内ラドンが最も大きく寄与したのは、男性の喫煙者に対してであった。これは、ラドンの影響が肺がんのベースラインに相乗的で、かつ男性の喫煙率が女性より高いためである。また、日本の屋内ラドンは全体的に低濃度側に分布しているため、100 Bq/m³を超える住居が集団全体のリスクに与える影響は極めて小さかった。そのため、仮に国際機関が勧告するような参考レベルを我が国が設定しても、肺がん死者数の低減効果は統計上有意に現れないレベルで、肺がん死者数の低減が施策の直接的動機になるとは考えにくい。2002年の建築基準法の改正（常時換気システムの設置）に伴うラドン濃度の低下傾向も考えれば、今後、ラドン対策を実施するには、その目的や意義を明確にすることが重要である。一方、高濃度の家屋は今後も一定程度で存在するだろうから、引き続き、その要因調査に関する研究は求められる。

現状、屋内ラドンに対する施策で考えるべきは、個人的なリスク認知のための基本的情報の提供、自主的な測定・評価の支援、および測定結果に対する不安解消に向けた支援と考える。現在の日本の状況を鑑みると、自主的なラドン測定や低減措置がすぐに広く浸透するとは考えにくく、明確で実行可能なリスクコミュニケーションの目標設定、および計画・展開が重要である。

普遍的に存在するラドンの対策には、我が国の置かれた状況を認識したうえで、公衆衛生対策としての目的設定、生活習慣・環境に関連する予防可能なリスク因子とのリスク比較、それら因子に対する既存の施策と実効性の評価など、総合的な検討が望まれる。

表1 日本における屋内ラドンによる肺がん死者数の推定値

ラドン濃度 (Bq/m ³)	家屋割合 (-)	ラドンによる肺がん死者数 (-)		
		喫煙者	非喫煙者	合計
0	0	0	0	0
1~5	0.1788	41	68	109
6~10	0.3269	148	249	397
11~15	0.2120	156	261	417
16~20	0.1186	122	202	324
21~25	0.0659	86	144	230
26~30	0.0375	60	101	161
31~35	0.0220	41	69	110
36~40	0.0133	29	49	78
41~45	0.0085	20	34	54
46~50	0.0053	14	24	38
51~60	0.0058	18	30	48
61~70	0.0027	9	17	26
71~80	0.0013	6	9	15
81~90	0.0007	3	6	9
91~100	0.0004	2	4	6
101~	0.0005	4	6	10
合計	1	759	1,273	2,032

<引用文献>

- 1) International Commission on Radiological Protection (ICRP). Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115, Annals of the ICRP 40 (2010).
- 2) G. Suzuki, I. Yamaguchi, H. Ogata, et al. A nation-wide survey on indoor radon from 2007 to 2010 in Japan. Journal Radiation Research 51, 683-689 (2010).
- 3) Environmental Protection Agency (EPA). EPA Assessment of Risks from Radon in Homes, EPA 402-R-03-003 (2003).
- 4) E. Strandén, A.K. Kolstad, B. Lind. The influence of moisture and temperature on radon exhalation. Radiation Protection Dosimetry 7, 55-58 (1984).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sakoda Akihiro, Nomura Naoki, Kuroda Yujiro, Kono Takahiko, Naito Wataru, Yoshida Hiroko	4. 巻 41
2. 論文標題 Review of engagement activities to promote awareness of radiation and its associated risk amongst the Japanese public before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Radiological Protection	6. 最初と最後の頁 1258 ~ 1287
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6498/ac2678	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hasan Md. Mahamudul, Janik Mirosław, Sakoda Akihiro, Imoto Takeshi	4. 巻 193
2. 論文標題 Status of radon exposure in Bangladeshi locations and dwellings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Monitoring and Assessment	6. 最初と最後の頁 770
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10661-021-09571-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakoda Akihiro, Ishida Tsuyoshi, Kanzaki Norie, Tanaka Hiroshi, Kataoka Takahiro, Mitsunobu Fumihito, Yamaoka Kiyonori	4. 巻 19
2. 論文標題 Radon Solubility and Diffusion in the Skin Surface Layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 7761 ~ 7761
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ijerph19137761	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sakoda Akihiro, Ishimori Yuu, Jin Qianhao, Imoto Takeshi	4. 巻 207
2. 論文標題 Improved data analysis techniques for calculating more accurate radon and thoron exhalation rates from building interior solid walls	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 111180 ~ 111180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apradiso.2024.111180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakoda Akihiro, Ishimori Yuu, Hasan Md. Mahamudul, Jin Qianhao, Imoto Takeshi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Seasonal variations in radon and thoron exhalation rates from solid concrete interior walls observed using in situ measurements	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 迫田晃弘、石森有	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 日本における屋内ラドン対策の議論に向けたリスク評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 保健物理	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 迫田晃弘、Md. Mahamudul Hasan、飯本武志
2. 発表標題 建物内壁からのラドン散逸率のin-situ測定
3. 学会等名 第4回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 迫田晃弘、石森有
2. 発表標題 日本における屋内ラドンのリスクと参考レベルの効果推定
3. 学会等名 日本保健物理学会第56回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihiro Sakoda, Yuu Ishimori, Md. Mahamudul Hasan, Qianhao Jin, Norie Kanzaki, Takeshi Imoto
2. 発表標題 In-situ measurement of radon and thoron exhalation rates from interior walls in a Japanese building
3. 学会等名 7th International Conference on Environmental Radioactivity (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Qianhao Jin, Akihiro Sakoda, Takeshi Imoto
2. 発表標題 Study on influence factors on radon exhalation rate from soil the improvement of accumulation chamber technique
3. 学会等名 7th International Symposium on the System of Radiological Protection (ICRP 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関