

原著論文

北海道における屋内ラドンと
ラドン短寿命娘核種放射能濃度の測定調査横山真太郎¹, 月館司², 青木徹³, 西願栄二⁴, 内見裕聡⁵, 池田耕一⁶, 飯田孝夫⁷

[受付 2002.7.19] [受理 2002.10.4]

Measurements of Indoor Radon and Its Daughters in Hokkaido

Shintaro YOKOYAMA¹, Tsukasa TSUKIDATE², Tohru AOKI³, Eiji SAIGAN⁴,
Hiroaki UCHIMI⁵, Koichi IKEDA⁶ and Takao IIDA⁷

[Received Jul 19, 2002] [Accepted Oct 4, 2002]

要 旨

わが国の中で北方圏に属する北海道では、近年、省エネルギーのための高断熱仕様や地下室付き住宅が増えつつあり、それ故、在来の床下空間を持つ住宅と比較し、屋内ラドンならびにラドン短寿命娘核種濃度の高レベル化が問題とされる。

そこで、われわれは現場測定に適していると考え、先に検討したフィルター法と飯田らにより開発された静電式ラドンモニター法を用い、北海道におけるコンクリート個別住宅やR-2000住宅を含む各種省エネルギー住宅、学校、事務所、病院、地下室の屋内濃度測定調査を行った。その結果冬期のコンクリート個別住宅の濃度が際だって高いことがわかった。北海道における濃度レベルとラドン娘核種の除去指標の検討結果では、本州で得られた値と比較すると暖房期の濃度レベルが高いことがわかった。特に、コンクリート個別住宅での値が高い。また、ラドン娘核種の除去指標の検討結果からは、非暖房期と比較すると、暖房期の値が低く、特に暖房期のコンクリート個別住宅の値が低いことが示された。

Abstract

In recent years more and more houses in Hokkaido, a northland in Japan, are built air-tight and equipped with basements to conserve heating energy. Therefore, concentration of indoor radon and its daughters are expected to be elevated in these houses compared to those built elsewhere in Japan where houses have crawl spaces.

In a previous study we examined several aspects of the filter pack method and extended its applications for field surveys. In the current study we have used the extended filter pack method and the electrostatic radon monitoring method to measure concentrations of radon and its daughters as well as the removal indicator values of indoor radon daughters in energy-efficient houses, schools, offices, hospitals and underground living spaces in Hokkaido. The sampling locations include concrete single-family homes, concrete apartment buildings, wooden houses and R-2000 houses. During the winter the concentrations in the concrete single-family homes were higher than those in the other house types. The annual variations in concentration and removal indicator values of radon daughters were examined. The peak concentrations in each house type in winter was higher than that the peak concentration obtained in central Japan. The removal indicator of radon daughters during the heating season were lower than those during the non-heating seasons. During the non-heating seasons the removal indicator values for the concrete single-family homes were the lowest of all house types.

Key words: indoor radon, radon daughters, radioactive concentration, Hokkaido

-
- 1 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-13 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan
 - 2 北海道立北方建築総合研究所 〒078-8801 旭川市緑が丘東1条3丁目1-20
Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, 1-20 1jo-3chome, Midorigaokahigashi, Asahikawa, Hokkaido 078-8801, Japan
 - 3 北海道ガス(株) 〒060-8530 札幌市中央区大通り西7丁目3-1
Hokkaido Gas Co., Ltd., 3-1 Nishi-7, Odori, Chuo-ku, Sapporo 060-8530, Japan
 - 4 松下環境空調エンジニアリング(株) 〒564-0062 大阪市吹田市垂水町3丁目28-33
Matsushita Environmental & Air-conditioning Engineering Co., Ltd., 3-28-33 Tarumi-cho, Suita-shi, Osaka 564-0062, Japan
 - 5 (株)エヌ・ティ・ティファシリティーズ 〒108-0023 東京都港区芝浦3-4-1
NTT Facilities Inc., 3-4-1 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan
 - 6 国立保健医療科学院 〒108-8638 東京都港区白金台4-6-1
National Institute of Public Health, 4-6-1 Shirokanedai, Minato-ku, Tokyo 108-8638, Japan
 - 7 名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

1. はじめに

近年、わが国特に北海道では地球環境問題が要請する省エネルギーを考慮した高断熱高気密化仕様や地下室付き建物やが増えつつある。建物の換気が十分でない場合、土壌やコンクリートから発生するラドン(Rn)ならびにラドン短寿命娘核種 (Rn-Dts) が高気密建物で蓄積することによってその建物の居住者あるいは屋内活動者に肺ガンをもたらす危険性が懸念される。そこで、ラドン短寿命娘核種の測定法の中で屋内現場測定調査に適していると考えられるフィルター法に検討を加えた¹⁾。他方で、屋内での長期暴露を評価するために静電式ラドンモニター計を開発し、測定を計画した^{2,3)}。

本報では、それらの方法を用い、北海道におけるコンクリート個別住宅やR-2000住宅を含む各種省エネルギー住宅、学校、病院、地下室の屋内濃度測定調査を行った。Rn と Rn-Dts 濃度レベルの実態把握とその季節変動について議論した。同時に、肺ガンの直接の原因物質であるラドン短寿命娘核種の除去指標の季節変動についても議論した。

2. 測定方法とその手順

2.1 モニター法

本法の装置は、名古屋大学原子核工学科^{2,3)}によって開発されたものを用いた。本装置の特徴は居住環境のみならず低レベルの自然大気まで測定を可能にするために、2ないし3箇月間にわたってラドンを捕集するものであり、高い検出感度を得る積分型ラドン濃度測定器である。Fig.1に示すようにこの装置は上下2つの層からなるステンレス性円筒容器からなる。上層部 (Battery Box) には270Vの乾電池が置かれ、下

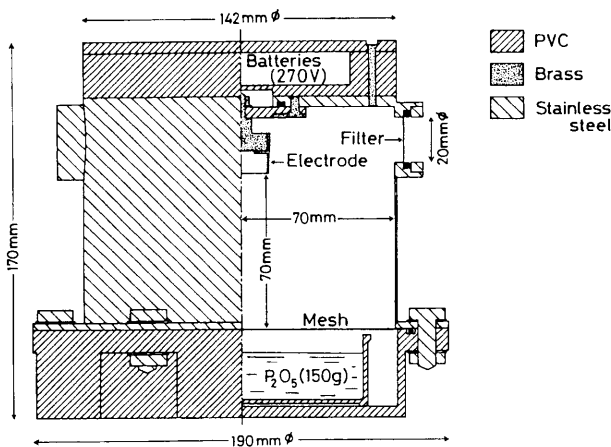


Fig. 1 Electrostatic integrating Rn monitor

層部 (Collecting Vessel) にはフィルターが入っている二つの円形窓が備えられている。このフィルターによって空気中の放射性エアロゾル成分(ラドン娘核種)が除かれ、容器にはフィルターを通してラドンのみが入る仕組みになっている。

容器の中央には Fig.2のような電極(Electrode)が置かれ、270Vの負電位がかけられている。容器内に流入したラドンはα崩壊してRaA (²¹⁸Po)を生成する。RaAは崩壊直後大部分正に帯電しているため、形成される静電場によって負の電極に誘導され、アルミニウム・マイラー (Aluminized Mylar) 上に捕集される。電極上で崩壊したRaAからのα線は固体飛跡検出器 (CN Film) に入射してトラックをつくる。固体飛跡検出器を捕集電極面から1cm離しているため、固体飛跡検出器上には一様分布した径の比較的小さなエッチピットが得られる。そのエッチピットの計測値を式(1)に代入するとラドン放射能濃度Qn (Bq/m³)が求まる。

$$Q_n = \frac{(D-B)}{CF \cdot T} \quad (1)$$

ここで、D:エッチピット濃度(Etch pit density) [トラック/cm²]。B:バックグラウンド密度(Background density) [トラック/cm²]。T:曝露時間(Exposure time) [h]。CF:換算係数(Calibration factor) [トラック/cm²(Bq・h/m³)]で、その値は0.052±0.002と同定されている¹⁾。

容器の底には、ラドンを吸着せず除湿能力の大きい五酸化二リン (P₂O₅) 約150gが置かれ、金網で覆われている。これは静電場によるRaAの捕集効率が空気中の湿度に依存するため、それを一定に保つために不可欠なものである。

尚、測定器は居間の中央部の高さ約180cmレベルの棚上に設置することを基本とした¹⁾。

2.2 フィルター法

フィルター法はラドン短寿命娘核種 (Rn-Dts) のほ

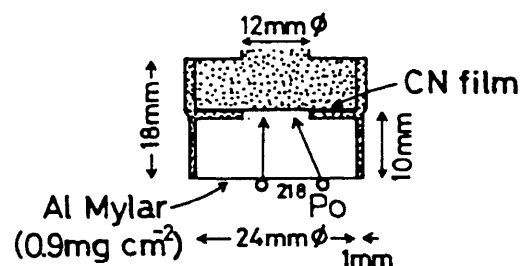


Fig. 2 Electrode of electrostatic integrating Rn monitor

Table 1 の最大値(Max.)の欄をみると、ブロック造個別住宅の241.8 Bq/m³と地下室の231.2 Bq/m³が高く、これは藤元ら¹¹⁾のわが国の全国調査結果と比較しても最高レベルに達しており、EPAの基準値をはるかにこえている。これまで、わが国ではラドン問題が等閑視されていたきらいがあるが、近年のコンクリート系高気密化住宅や地下室付き高気密住宅ではラドンならびに短寿命娘核種を室内空気質の測定項目に入れるべきことを示していると考えられた。

RC造集合住宅の最大値は126.7 Bq/m³を示したが、これもWHOならびにASHRAEの基準値(100Bq/m³)¹²⁾をこえていた。このことは、ブロック造個別住宅や地下室あるいはRC造集合住宅におけるラドン放射能濃度が条件さえ整えば、わが国でもかなりの高濃度になる可能性があり、注意を要することを示唆している。木造個別住宅の47.5 Bq/m³とR-2000仕様住宅の18.5 Bq/m³はそれほど高濃度ではなく、ラドンに対して比較的 안전한環境をもたらしているといえる。また、外気の最大値が4.3 Bq/m³であり、北海道の大気中ラドン濃度が相対的に低レベルにあることを示している¹³⁻¹⁵⁾。

ブロック造個別住宅の変動係数は138.0%で、他の住宅より高い値を示した。続いてRC造集合住宅の79.3%で、発生量と換気量の組み合わせの幅が大きいことを示している。それに対して、木造個別住宅の

41.1%、R-2000仕様住宅の64.0%は、発生量が低いことに基因して、相対的に低くなっている。ちなみに外気の変動係数は54.0%で、最小の値となった。これらの結果は、同様な建築構造でも季節や生活様式によってラドン放射能濃度が変化することを意味している。

モニター法による建築構造別のラドン放射能濃度の平均値と標準偏差の月別変動をみると、ブロック造個別住宅では、3, 11, 12月の暖房期のラドン放射能濃度の平均値が5, 7, 9, 10月の非暖房期の結果より高くなっていることがわかった。RC造集合住宅もブロック造個別住宅と同様な月別変動を示していたが、全般的にブロック造個別住宅よりも低い濃度レベルにあった。木造個別住宅では顕著な月別変動が見られなく、7, 10月を除いて、RC造集合住宅よりも低い濃度レベルにあった。外気は極低濃度レベルで経過したが、2, 9, 10, 11月の値が他の月より若干高め濃度レベルを示した。そこで、4, 5月を春期、6~8月を夏期、9と10月を秋期、11~3月を冬期として、ラドン放射能濃度の平均値(Mean)、最大値(Max.)、標準偏差(S.D.)と変動係数(C.V.)を季節ごとにTable 2にまとめた。いずれの建築構造でも4, 5月の春期には30 Bq/m³前後の低濃度レベルとなり、夏期には15 Bq/m³前後に低下し四季中の最小の値をとって

Table 2 Seasonal variations in Rn concentrations with electrostatic Rn monitor method in different houses of Hokkaido

	Rn Concentration (Bq/m ³)		S. D.	C. V. [%]
	Mean	Max.		
Concrete Single House				
Spring (n=6)	25.87	59.56	17.67	68.3
Summer (n=7)	17.10	30.59	7.59	44.4
Autumn (n=9)	30.02	55.66	16.36	54.5
Winter (n=16)	69.96	241.80	84.65	121.0
Concrete Apartment House				
Spring (n=7)	27.87	58.55	20.72	74.3
Summer (n=7)	12.85	30.83	10.19	79.3
Autumn (n=10)	27.30	59.82	19.63	71.9
Winter (n=16)	48.18	126.70	28.72	59.6
Wooden House				
Spring (n=6)	21.93	34.22	12.01	54.8
Summer (n=7)	15.62	37.53	11.61	74.3
Autumn (n=10)	21.86	44.87	14.88	68.1
Winter (n=17)	24.90	47.53	13.31	53.5
R-2000 House				
Spring (n=7)	4.80	6.43	1.66	34.5
Summer (n=7)	2.72	4.23	0.95	32.4
Autumn (n=7)	6.87	12.43	2.71	39.5
Winter (n=8)	11.57	18.54	3.96	34.2
Outdoor				
Spring (n=5)	1.31	2.59	0.83	63.6
Summer (n=5)	1.37	2.66	0.88	63.9
Autumn (n=7)	3.06	4.33	0.76	24.7
Winter (n=11)	2.23	3.47	1.09	48.7

とんどが通常の生活圏では放射性エアロゾルを形成しており、それらはフィルターによって容易に捕捉されるという性質を利用するものである^{1,4-8)}。その原理は、試料空気を小型エアポンプにより捕集効率の高いミリポアフィルターを通し、フィルター上にラドン娘核種を捕集するものである。このフィルター表面から発現してくる α 粒子をZnS(Ag)シンチレーション検出器と α 線用シンチレーション・カウンターを用いて計測し、その計測値からラドン娘核種放射性濃度を算出する方法である。

ラドン短寿命娘核種間の放射平衡比が同一 ($R_1 = R_2 = 1$) を仮定して、一回計測法により求める平衡仮定ラドン娘核種濃度^{9,2)}と三回計測法により RaA (^{218}Po), RaB (^{214}Pb), RaC (^{214}Bi) の各娘核種濃度を算定した。

既報の検討¹⁾により、一回計測法の捕集時間 S は 300 s, 計測開始時間 T_1 を 60 s, 計測終了時間 T_2 を 1800 s とした。この計算方法の適用にあたっての前提条件として、厳密に言えば、以下の3条件を満足しなければならない。1) 少なくとも捕集および計測中のラドンとその娘核種の崩壊数が等しいとみなされること、2) ラドン娘核種の壁体などへの沈着率が 0 であること、3) 屋内換気回数が 0 であること、である。一般の屋内環境では上記の3条件を満足することはほとんどありえない。

三回計測法の捕集時間 (S) と計測時間 (T_1, T_2) の設定は、前報¹⁾の検討により、 $S = 300\text{s}$, (60, 300), (360, 1200), (1260, 1800) とした。捕集時間帯が定常状態と見なせるとき、三回計測法の拡張法ともいえる、換気回数 ν (/h) とラドン短寿命娘核種の壁・床・天井などの沈着率 γ (/h) の和であるラドン短寿命娘核種の除去指標である ($\nu + \gamma$) とラドン放射能濃度 Q_n (Bq/m^3) を算定した。その際、前報に従い、精度を確保するため ($\nu + \gamma$) の同定には 2次元 Complex 探索法を用いた。

また、捕集時間帯での非定常性や α 粒子の発現の偏倚性により、($\nu + \gamma$) の同定が達成されない場合が

ある。その場合は、前報の平衡仮定ラドン娘核種濃度によるラドンとその娘核種の推定式に従い求めた。

フィルター法の具体的な計測機器は (A) アロカ ZDS-451B ; アロカ TDC-103 と (B) アロカ ZDS-451Fu ; アロカ TDC-105 の二式を併行して用いた。それらを基にミリポアフィルター (住友電工, AF07P-47 mm ϕ ; WP-500-50-47 mm ϕ), 小型エアポンプ (Iwaki, APN-215) および流量計, タイマを具備したシステムを構成し、測定した。サンプリング場所は居室中央とし、高さは約 60 cm レベルで行った。

3. 測定結果と考察

3.1 モニター法による測定結果と考察

モニター法を用いて、北海道にあるブロック造個別住宅 7 戸, RC 造集合住宅 6 戸, 木造個別住宅 8 戸と R-2000 仕様住宅 8 戸のラドン放射能濃度 (Bq/m^3) を測定した。これまでの結果を Table 1 にまとめた。なお、Table 1 にはラドン放射能濃度の平均値 (Mean), 最大値 (Max.), 標準偏差 (S.D.) と変動係数 (C.V.) を示した。表からわかるように、平均値では、地下室の 139.1 [Bq/m^3] が最大値となっている。これは、地下室がラジウムを含んだ土壌およびコンクリート系建材由来のラドンガスの発生源がごく近傍にあり、一般に換気が少なく、そのため高濃度に蓄積されるためと考えられている^{9,10)}。次いで高濃度を示したのはブロック造個別住宅の 43.8 Bq/m^3 , RC 造集合住宅の 33.2 Bq/m^3 であった。さらに一般木造個別住宅の 22.1 Bq/m^3 および R-2000 仕様住宅の 6.7 Bq/m^3 の順と続いた。室内のラドン放射能濃度は土壌と建材由来のラドンガスの発生量と屋内換気量とに大きく支配されている。上記の結果は其中で、コンクリート系のラドンガス発生量がレンガ系より多く、木材が最も少ないという発生量に大きく影響され、さらに同じ木造住宅でも継続換気設備が作動している R-2000 仕様住宅のような住宅ではラドン放射能濃度が低レベルに保持されていると解釈できる。ちなみに外気濃度は 2.1 Bq/m^3 で、最小の値であった。

Table 1 Rn concentrations with electrostatic Rn monitor method

	Rn Concentration (Bq/m^3)		S. D.	C. V. [%]
	Mean	Max.		
Concrete Single (n=38)	43.80	241.80	60.46	138.0
Concrete Apartment (n=40)	33.24	126.70	26.37	79.3
Wooden House (n=40)	22.07	47.53	9.06	41.1
R-2000 House (n=29)	6.67	18.54	4.27	64.0
Underground (n=2)	139.12	231.15	-	-
Outdoor (n=28)	2.12	4.33	1.14	54.0

る。秋期に再び春期と同様な濃度レベルとなってくるが、木造個別住宅では他の建築構造と比較しやや低めとなっている。冬期にはいずれの建築構造のラドン放射能濃度も四季の中で最大の値をとっている。秋期と比較すると、ブロック造個別住宅の 69.96 Bq/m^3 が2倍以上増えており、他の建築構造よりも急増していることがわかった。これらのことより、冬期には屋内ラドン放射能濃度が増加し、特にブロック造個別住宅では注意を要すると考えられた。外気では春期と夏期に低く、秋期になるとやや高くなって来るが、冬期にまた低くなっていった。わが国の従来の調査報告¹³⁻¹⁵⁾では、一般に外気濃度は夏期に低く、秋期や冬期に高いというものであったが、本報のように冬期に地表面が積雪に覆われている地域では、ラドンの大気への散逸率が低下するものと考えられた。

以上より、ラドン放射能濃度は建築構造と季節の違いによって変動すると考えられた。そこで、建築構造間と季節間のラドン放射能濃度の変動の有意差を検定するために、分散分析法の乱塊法を用いて検討した。季節因子では4水準(S=4)、建築構造因子では3水準(T=3)にカテゴリー分けして、反復回数を5回(R=5)として分散分析を行った。主効果の季節間と建築構造間には有意水準1%で有意差が認められた。また、季節と建築構造の交互作用(S×T)では有意水準5%で有意差が認められた。より詳しく建築構造と季節との交互作用を検定するため、最小有意差(least significant difference)を用いて検討した。すなわち交互作用が有意になった場合、主効果の各水準の判定は一般には行わないが、交互作用が有意であっても主効果の分散が交互作用の分散より4ないし5倍以上であれば、主効果の各水準間の判定を行った上で、交互作用について判定を下すという手法である。いま、季節因子の分散と交互作用の分散との比は4.4となったので、主効果の季節について判定したうえで、交互作用について判定することとした。

その結果、季節間の標準偏差と最小有意差は、冬期は他のどの季節に対しても有意に高く、夏期は冬期に対してだけ有意に低く、他の季節間では有意差が見られないという結果となった。また、季節因子の効果を

建築構造因子の水準ごとに、また建築構造因子の効果を季節因子の水準ごとに、判定すると以下のように結論づけられた。1)春期、夏期、秋期には建築構造間に差は認められない。2)冬期では、ブロック造個別住宅がRC造集合住宅と木造個別住宅に比較し有意に高い。3)ブロック造個別住宅の冬期濃度は春期、夏期、秋期より有意に高い。4)RC造集合住宅では冬期濃度が夏期と秋期と比較し有意に高い。5)木造個別住宅では季節間の差は認められない。

すなわち、春、夏と秋では家屋構造間の有意差が認められなかったが、冬ではブロック造個別住宅のラドン放射能濃度が他の2つの家屋構造に対して有意に高い。木造個別住宅では季節間の有意差が認められなかったが、ブロック造個別住宅では冬におけるラドン放射能濃度が他のどの季節に対しても有意に高く、RC造集合住宅では冬におけるラドン放射能濃度が夏と秋のみに対して有意に高いことを示している。

3.2 フィルター法による測定結果と考察

上述したモニター法によるラドン放射能濃度の測定のほかに、フィルター法による、教室、地下室、病院ならびに北海道大学構内に建設されたローエネルギーハウスおよび各種住宅において、ラドンとその娘核種の放射能濃度および娘核種の除去指標をも測定してきた。ここでは、それらの測定結果について示す。

Table 3にフィルター法によるラドンとその娘核種放射能濃度の学校における教室と地下室の測定結果を示す。教室におけるRaA (^{218}Po)放射能濃度は約31~38 Bq/m^3 、ラドン濃度は約36~42 Bq/m^3 であった。それに対して、地下室のRaA (^{218}Po)放射能濃度は約236~245 Bq/m^3 、ラドン濃度は約247~260 Bq/m^3 であった。なお、地下室のラドン濃度は先述のモニター法の最大値と同レベルであった。

換気回数 ν (/h)とラドン娘核種の壁体などへの沈着率 γ (/h)の和であるラドン娘核種の除去指標である $(\nu + \gamma)$ についてみると、同一の建物内にある教室と地下室では異なる値をとっている。教室のラドン娘核種の除去指標 $(\nu + \gamma)$ は地下室のそれよりもはるかに大きい。これは測定対象の教室は授業時間帯に行っ

Table 3 Rn daughters and Rn concentrations (Bq/m^3) with filter pack method in schools

	RaA	RaB	RaC	Rn	$\nu + \gamma$
Lecture room (1)	31.04	12.36	10.40	36.41	2.35
Lecture room (2)	37.88	19.39	10.99	42.00	1.48
Underground (1)	245.46	159.21	147.41	260.59	0.84
Underground (2)	236.02	165.50	161.62	247.46	0.66

たもので、学生や生徒の出入があるため、屋内換気量が多くなり、ラドン放射能濃度が発生量の多い地下室と比較して、はるかに低くなっているといえる。沈着率 γ (/h) は部屋の内表面積と容積との比に規定され、Jacobi¹⁶⁾によれば通常の部屋形状では $\gamma \approx 0.5$ としている。そこで、沈着率 γ を 0.5 (/h) と仮定して計算すると、教室の換気回数 ν は約 1.0 と 1.9 (/h) で、地下室は 0.34 と 0.16 (/h) となる。しかも、明瞭に換気回数が異なる教室では、 1.0 (/h) の方が 1.9 (/h) よりラドンとラドン娘核種の放射能濃度が高レベルとなっている。ラドン娘核種の除去指標である $(\nu + \gamma)$ については前報¹⁾で詳しく検討したが、以上の結果はこの指標が実用的にも活用し値することを示していると考えられた。

Table 4に科学技術振興事業団の自立型都市をめざした都市代謝システムの開発の一環として建設された北海道大学構内のローエネルギーハウスにおける測定結果を示した。ローエネルギーハウスは地下室付きの2階建て木造住宅であるが、地下部はRC造とした。1, 2階合計の床面積は 128 m^2 、地下室を含めた延べ床面積は 192 m^2 である。本住宅は、断熱パネル工法に

より建設された高断熱・高气密住宅である。外壁、屋根と地下壁に使用したパネル内の断熱材は発砲ポリスチレン板で、厚さは外壁と屋根が 236 mm で、地下壁が 100 mm である。内壁の仕上げ材はOSBボードである。面積が約 21 m^2 の南面の窓には、アルゴンガスを封入したLow-Eペアガラスを使用している。南側窓の上部には日除けオーニングを設けた。換気方式は、アースチューブを用いて外気を地下室に導入し、予熱・予冷をしてから、温度差を主動力として換気塔より各居室へ換気する自然換気方式と台所・便所・浴室が強制排気する機械換気がある。単位床面積あたりの住宅の熱損失係数の計算値は約 $0.98 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ である¹⁷⁾。アースチューブによるパッシブ換気と低レベルの継続機械換気の作動によりラドンとラドン娘核種の放射能濃度は比較的低濃度におさえられていることがわかる。また、地下室でアースチューブによるパッシブ換気を作動させた場合と低くおさええた場合のラドン娘核種の除去指標はそれぞれ 2.28 と 0.96 となり、この指標が先述したように実用的にも活用し値することを示している。

Table 5に病院でのラドン、ラドン娘核種放射能濃

Table 4 Rn daughters and Rn concentrations (Bq/m^3) with filter pack method in low-energy houses

	RaA	RaB	RaC	Rn	$\nu + \gamma$
BF	36.56	19.75	15.27	39.19	0.96
	32.08	21.72	7.67	37.56	2.28
1F	38.92	12.23	5.11	48.04	3.13
2F	18.95	5.72	3.84	22.19	2.29

Table 5 Rn daughters and Rn concentrations (Bq/m^3) with filter pack method in hospitals

	RaA	RaB	RaC	Rn	$\nu + \gamma$
No. 1	9.07	8.67	2.51	10.83	2.59
No. 2	4.71	2.49	0.39	6.95	6.34
No. 3	4.38	1.71	1.56	4.81	1.31

Table 6 Rn daughters and Rn concentrations (Bq/m^3) with filter pack method in houses of Hokkaido

	RaA	RaB	RaC	Rn	$\nu + \gamma$
Concrete Single House (n=15)					
Mean	33.37	22.99	13.40	38.05	2.50
Max.	94.80	70.22	56.47	98.40	10.41
S. D.	23.05	18.73	15.82	23.58	2.82
C. V. [%]	69.1	81.5	118.1	62.0	112.7
Concrete Apartment House (n=22)					
Mean	26.85	13.69	7.33	30.97	2.80
Max.	60.27	37.76	23.88	65.02	13.48
S. D.	17.21	9.88	6.53	19.44	2.83
C. V. [%]	64.1	72.2	89.1	62.8	101.3
Wooden House (n=20)					
Mean	22.72	10.85	4.05	28.14	3.27
Max.	46.58	20.98	13.84	57.65	11.92
S. D.	12.06	5.12	3.26	14.70	2.46
C. V. [%]	53.1	47.2	80.4	52.3	75.4

Table 7 Rn daughters and Rn concentrations (Bq/m³) in heating and non-heating seasons

		RaA	RaB	RaC	Rn	$\nu + \gamma$
Concrete Single House						
Heating (n=6)	Mean	48.66	36.50	22.74	53.09	1.50
	Max.	94.80	70.22	56.47	98.40	3.41
	S. D.	27.79	18.45	18.96	28.49	0.99
	C. V. [%]	57.1	50.5	83.4	53.7	65.9
Non-Heating (n=9)	Mean	23.18	13.99	7.16	28.03	3.17
	Max.	42.37	32.34	31.30	43.88	10.41
	S. D.	12.73	9.61	9.17	14.26	3.38
	C. V. [%]	54.9	68.7	128.0	50.9	106.6
Concrete Apartment House						
Heating (n=9)	Mean	29.88	13.22	8.02	35.33	2.43
	Max.	60.27	28.19	23.88	65.02	5.26
	S. D.	15.21	7.51	6.28	18.07	1.61
	C. V. [%]	50.9	56.8	78.2	51.1	66.1
Non-Heating (n=13)	Mean	24.75	14.02	6.84	27.95	3.05
	Max.	57.04	37.76	22.98	65.34	13.48
	S. D.	18.18	11.22	6.66	19.79	3.41
	C. V. [%]	73.4	80.0	97.2	70.8	111.8
Wooden House						
Heating (n=10)	Mean	24.97	11.28	4.65	30.44	2.89
	Max.	44.59	20.98	9.00	57.65	5.42
	S. D.	10.17	4.81	2.39	12.87	1.19
	C. V. [%]	40.7	42.6	51.4	42.3	41.3
Non-Heating (n=10)	Mean	20.47	10.43	3.44	25.84	3.64
	Max.	46.58	20.76	13.84	53.17	11.92
	S. D.	13.31	5.39	3.84	16.01	3.23
	C. V. [%]	65.0	51.7	111.6	62.0	88.7

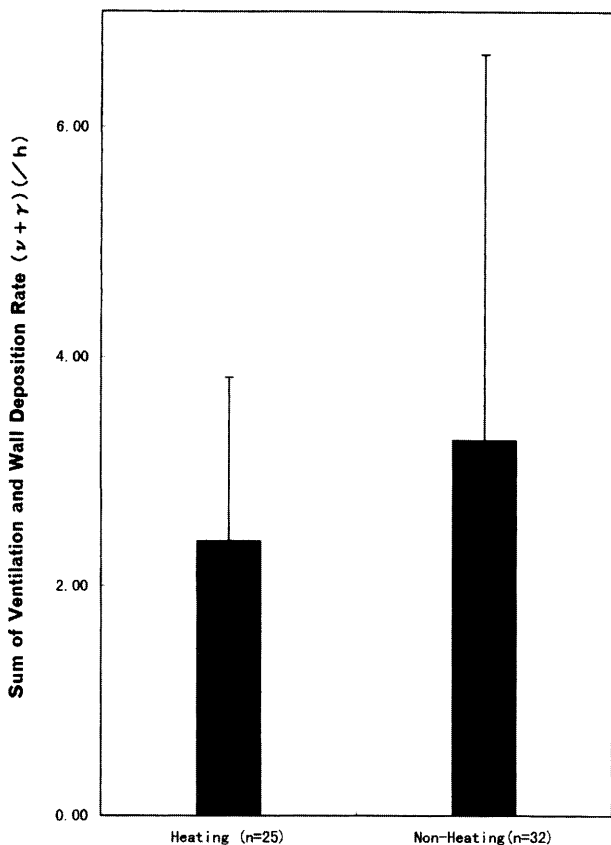


Fig. 3 Ventilation rate ν and wall deposition rate γ (/h) in heating and non-heating seasons

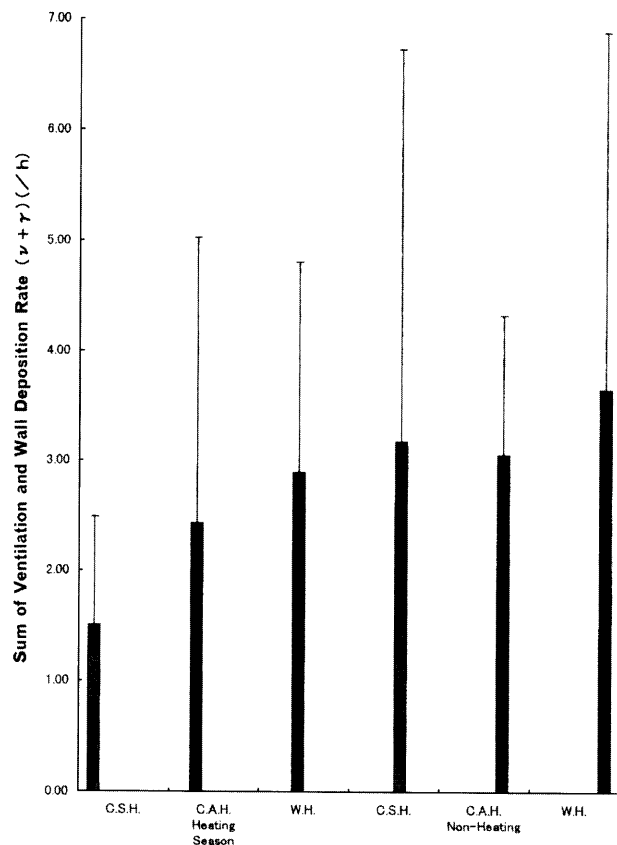


Fig. 4 Ventilation rate ν and wall deposition rate γ (/h) of three kinds of houses in heating and non-heating seasons. C. S. H.: Concrete Single-family Homes; C. A. H.: Concrete Apartment; W. H.: Wooden House

度、その除去指標の結果を示した。これらの結果は現状の病院内ではラドンとその娘核種放射能濃度に対して安全な環境を与えているといえる。

Table 6 と Table 7 に、フィルター法によるブロック造個別住宅、RC 造集合住宅、木造個別住宅の結果をまとめた。これらは、モニター法が積分値を測るのに対して、昼間の5分間値を示している。最大値の比較から、各建築構造で使われている建材のラドンガスの発生量は、やはりブロック造個別住宅の方がRC造集合住宅より多く、木造個別住宅が最も少ないと考えられた。暖房期と非暖房期の比較ではモニター法の結果同様、暖房期の値が高い。

ラドン娘核種の除去指標 ($\nu + \gamma$) に着目し、暖房期と非暖房期に分けて Fig. 3 と Fig. 4 にまとめた。沈着率 γ を先述のように0.5(/h)と仮定して、同じ家屋構造における暖房期と非暖房期の換気回数を推定すると、いずれも暖房期の方が非暖房期より小さい。その差が最も著しいのは、ブロック造個別住宅である。これは、暖房期にブロック造個別住宅の気密性が発揮されていることを意味する。従って、冬にブロック造個別住宅でのラドンとその娘核種放射能濃度が高くなっているのは、建材からの発生量の側面と住宅の気密性の側面の複合効果と考えられた。

謝 辞

北海道大学にて本研究を行うにあたりご指導いただきました落藤澄名誉教授に謝意を表します。また、測定法の多くの事柄を直接ご指導いただきました池辺幸正名古屋大学名誉教授と藤田保健衛生大学の下道国教授にお礼申し上げます。北海道における一連の測定調査にご協力いただきました皆様と当時北海道大学工学部4年生ならびに工学研究科大学院生の諸君に謝意を表します。

註

註1) 換算係数 $CF=0.052 \pm 0.002$ は本研究で用いたものと同一の計測装置に対しての統計値である³⁾。

註2) 測定場所の設定に関しては、1) 幼児による五酸化二リン (P_2O_5) の事故防止対策と2) 土壁構造の住宅における壁体と土間近傍でのトロン (^{220}Rn) の影響¹⁸⁾ の両面に配慮して行った。尚、北海道の住宅では土壁構造が少なく、今回の対象住宅では皆無であったことを付記する。

註3) 本文でも触れたように一般の屋内環境ではラドン娘核種間の放射平衡比が同一となることはほとんどありえない。

しかし、一回計測法による平衡仮定ラドン娘核種濃度が RaB 濃度と近似した値を示すことおよび平衡仮定ラドン娘核種濃度による Rn と各娘核種濃度の推定式を利用せざるを得ない場合のために求めた。

文 献

- 1) 横山真太郎, 青木徹, 吉岡誠記, 月館司, 増田正夫, 内見裕聡, 下道国: フィルター法による屋内ラドン娘核種の測定法とその除去指標およびラドン濃度の簡易同定法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, (投稿中)
- 2) Y. Ikebe, T. Iida, M. Shimo, H. Ogawa, J. Maeda, T. Hattori, S. Minato and S. Abe: Evaluation by α -track detectors of Rn concentrations and f values in the natural environment, *Health Physics*, 49, 992-995 (1985).
- 3) T. Iida, Y. Ikebe, T. Hattori, H. Yamanishi, S. Abe, K. Ochufuji and S. Yokoyama: An electrostatic integrating ^{222}Rn monitor with cellulose nitrate film for environmental monitoring, *ibid.*, 54, 139-148 (1988).
- 4) H. Harley: Sampling and measurement of airborne daughter products of radon. *Nucleonics*, 11 (7), 12-45 (1953).
- 5) E. C. Tsivoglou, H. E. Ayer and Holaday: Occurrence of nonequilibrium atmospheric mixtures of radon and its daughters, *ibid.*, 11(9), 40-45 (1953).
- 6) 池辺幸正, 清水邦保, 川野実: 気中ラドン濃度のフィルター法による測定. 応用物理, 39, 114-118 (1970).
- 7) J. W. Thomas: Modification of the Tsivoglou method for radon daughters in air, *Health Physics*, 19, 691 (1970).
- 8) 下道国: $ZnS(Ag)$ シンチレーション検出器を用いたフィルター法における測定効率, 保健物理, 209-215 (1988).
- 9) E. Strandén and L. Berteig: Radon in dwellings and influencing factors, *Health Physics*, 39, 275-284 (1980).
- 10) W. W. Nazaroff and S. M. Doyle: Radon entry into houses having a crawl space, *ibid.*, 48, 265-281 (1985).
- 11) 藤元憲三, 小林定喜, 内山正史, 土居雅広, 中村裕二: 屋内ラドン濃度全国調査, 保健物理, 32, 41-51 (1997).
- 12) 横山真太郎: 室内空気質. 現代の空気調整工学 (落藤澄編著). 朝倉書店, P.59-85 (1996).
- 13) N. Murayama: Mean level of natural radioactivity in the surface air in Japan, *J. Rad. Res.*, 7, 1-7 (1966).
- 14) 下道国: 大気中のラドン—研究の概観と人間への影響—, *ESI-NEWS*, 5, 1-12 (1987).
- 15) 望月定: 自然環境に出現する自然放射性物質ラドンとその娘核種, 細氷, 34, 2-10 (1988).
- 16) W. Jacobi: Activity and potential α -energy of ^{222}Rn - and ^{220}Rn -daughters in different air atmospheres, *Health Physics*, 2, 441-450 (1972).
- 17) 濱田靖弘, 落藤澄, 長野克則, 中村真人, 横山真太郎, 永坂茂之: 自然エネルギーをハイブリットに活用したエネルギー自律型住宅に関する研究 (第1報) 建

築・設備計画および実験住宅の建設, 空気調和・衛生
工学会論文集, 73, 53-62 (1999).

18) T. Iida: Passive Methods for environmental radon and

thoron monitoring. Radon and Thoron in the Human
Environment (Ed. A. Katase and M. Shimo), World
Scientific, 18-27 (1997).