各種建築材料の放射能含有量

NATURAL RADIOACTIVITY CONCENTRATIONS IN BUILDING MATERIALS

伊藤和男*, 浅野賢二**

Kazuo ITO and Kenji ASANO

As part of our study program on environmental radiation levels in buildings, we have undertaken to measure the natural radioactivity, such as radium-226, thorium-232, and potassium-40 in various inorganic building materials.

The specimens of their materials include cements, aggregates, concretes, asbestos cement slates, tiles, gypsum boards, rock wool boards, bricks, wall clays, soils, phosphorous ore, zirconia, zircon flower and zircon sand that used in Japan.

The ranges and mean values of natural radioactivity concentrations existing in their materials are tabulated and evaluated.

Keywords: radioactivity, building material, radium-226, thorium-232, potassium-40, radon

放射能, 建築材料, ラジウム-226, トリウム-232, カリウム-40, ラドン

1. はじめに

原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) の1988年の報告書¹⁾によれば, 一般環境において人が自然放射線によって被曝する年間の実効線量当量 (単位: シーベルト (Sv), 注参照) の平均的な値は約2.4mSvであり, その約54%に相当する約1.3mSvがラドン・トロンとそれらの娘核種による肺の体内被曝線量であるとしている。一方, 建築構法の高度化により, 従来に比べて格段に気密性の高い建築物が出現し, 居住環境におけるラドン・トロンとそれらの娘核種の濃度が必然的に高められることとなった。このようなことから, 近年, 生活環境における自然放射線 (能) についても人工放射線の場合と同様にその被曝によるリスクを考慮する必要が生じてきている。

放射線施設あるいは医療施設における人工放射線による被曝形態と全く同様に, 生活環境においても放射線による被曝の形態は二つある。その一つは人体の外部にある自然の放射線源による体外被曝とよばれるものであり, もう一つは呼吸あるいは経口的に摂取される自然の放射性核種に起因する体内被曝とよばれるものである。

宇宙線²⁾の存在および建物の地盤を構成する土壌 (大地) や無機質系の建築材料・部材に地球起源の自然放射性核種が多少は含まれているなどの理由により, 建物内では次のような放射線被曝を受ける。

(1)宇宙線による体外被曝。(2)大地放射線による体外被曝。(3)建築材料・部材から放射されるガンマ線による体外被曝。(4)建築材料・部材から散逸するラドン・トロンとそれらの娘核種による体内被曝。(5)大地から散逸するラドン・トロンとそれらの娘核種による体内被曝 (ラドン・トロンとそれらの娘核種による体外被曝も多少はある)。

それ故, 建築分野では, 次のような事項が関心事となっている。

- (A)建物内における放射線量当量率 (宇宙線・大地放射線によるものの他に建築材料・部材に起因するものを含む) に関すること。
- (B)建物内のラドン濃度形成のメカニズムに関すること。
- (C)地下街などの特殊環境における放射線レベルに関すること。
- (D)国民の自然放射線被曝量の実態把握・推定に関すること。

以上の(A)~(D)の事項を解明するためには, 基盤的な資料として本研究の主題である「各種建築材料の放射能含有量」の明確化が不可欠である。この明確化はまた居住環境における放射線被曝量の低減対策にもつながるものである。

本研究では, 人が一日の大半を過ごしている建物内の放射線レベルの形成に寄与する建築材料・部材の放射能含有量について, 建設省建築研究所で実施した測定結果について報告する。なお, 上記の(B)の事項については文献²⁾で一部報告済みである。

本報告は文献3)~10)に加筆・修正を加えたものである。

* 建材技術研究所 技術委員・工博
(元建設省建築研究所)

** 筑波技術短期大学建築工学科 教授・工修
(元建設省建築研究所)

Building Materials Research Institute, Dr. Eng.

Prof., Tsukuba College of Technology, M. Eng.

2. 天然の放射性核種について

天然の放射性核種（自然放射能）を放射性壊変系列別にみると、ウラン系列の場合は ^{222}Rn （ラドン 222）と ^{218}Rn （ラドン 218）が、トリウム系列の場合は ^{220}Rn （ラドン 220、別名トロン）が、アクチニウム系列の場合は ^{219}Rn （ラドン 219、別名アクチノン）がそれぞれ生成する。ラドンはアルファ線を放出する無色・無臭の放射性希ガスである。これらのラドンの半減期は、 ^{222}Rn : 3.8日、 ^{218}Rn : 3.5×10^{-2} 秒、 ^{220}Rn : 55.6秒、 ^{219}Rn : 3.96秒である。 ^{218}Rn および ^{219}Rn は半減期がきわめて短いので、生成してただちに消滅するとみてよく、我々の生活環境で問題となるのは ^{222}Rn と ^{220}Rn の2種類のラドンとみてよい。しかし、 ^{220}Rn の半減期もそれほど長いとはいえないので、場合によっては無視できることもある。それ故、建築分野で問題の対象となるのは ^{222}Rn であることが多い。 ^{222}Rn は ^{226}Ra （ラジウム 226、半減期: 1600年）が放射性壊変して生成する。また、 ^{220}Rn は ^{224}Ra （ラジウム 224、半減期: 3.66日）が放射性壊変して生成する。

このほかに放射性壊変系列をなさぬ ^{40}K （カリウム 40）がある。

3. 建築材料・部材の放射能含有量

建築材料は単一素材からなる製品ばかりでなく、数種類の素材を複合した製品も数多く使用されており、思わぬ材料がかなりの量の放射能を有していることもある。一般的には、無機質系材料は有機質系材料に比べて天然の放射能含有量は大きい。石膏ボードのラド

ンガス散逸率（放出率）の測定結果³¹⁾によれば、同じ建築材料であれば ^{226}Ra の含有量の多いものほどラドンの散逸率は大きい。したがって、屋内のラドン濃度を低くおさえて体内被曝を少なくするためにはラドン源になる放射能含有量の少ない建築材料を使用することが効果的であるし、また、体外被曝を少なくするためには ^{40}K の放射能含有量の少ない建築材料を使用することが効果的であるといえる。建築材料は多種多様であり、そのすべてについて放射能含有量を測定することは時間と経費の関係で容易ではないが、我が国で流通している建築材料・部材について、現在までに得られた測定結果のうちで放射能含有量が問題視される無機質系材料の測定結果を表1に示す。放射能含有量の測定は、試験体を容器に密封して30日以上経過してから4000チャンネルの多重波高分析装置により2日間計測し、 ^{222}Rn 源として ^{226}Ra の含有量、 ^{220}Rn 源として ^{232}Th の含有量およびガンマ線源として ^{40}K の含有量を定量する方法をとった。なお、ここでは、建築材料・部材の放射能含有量は放射能濃度（Bq/kg）で示す。

3.1 コンクリート系材料・部材の放射能含有量

3.1.1 セメント

全国の14カ所のセメント工場で生産された市販の普通ポルトランドセメント14種類および混合セメント2種類の放射能含有量の測定結果を表1（その1）に示す。

(1) 普通ポルトランドセメント

表1 各種建築材料の放射能含有量（その1）

建築材料		放射能濃度 (Bq/kg)				備 考
			Ra-226	Th-232	K-40	
セメント	普通ポルトランドセメント	最小～最大	22.6～67.4	1.5～15.2	75.9～225.2	全国14カ所のセメント工場の製品（14種）
		算術平均値	39.6±13.9	7.9±3.4	149.9±54.8	
	混合セメント	最小～最大	65.6～84.8	17.4～21.5	131.5～155.9	山口県の2カ所のセメント工場の製品（2種）
		算術平均値	75.2±13.6	19.5±2.9	143.7±17.3	
コンクリート系	普通コンクリート用骨材	最小～最大	5.2～37.0	*～42.6	166.3～1248.5	静岡県以東の1都12県の各種骨材（41種）
		算術平均値	22.3±8.7	18.5±11.7	607.0±233.4	
	重晶石		4.1	*	*	北海道（1種）
	鉄鉱石		12.2	*	*	金平鉱山（1種）
	カラ岩		*	*	*	北海道（1種）
	普通コンクリート	最小～最大	24.4～37.0	14.8～28.9	444.8～684.0	茨城県つくば市で打設したもの（6種）
		算術平均値	29.8±5.5	21.4±5.0	587.8±78.4	
	軽質コンクリート	最小～最大	13.3～469.6	*～113.7	19.3～2633.3	各種軽質コンクリート（7種）
		算術平均値	97.0±165.1	29.2±39.0	769.1±892.8	
	石綿スレート板	最小～最大	*～93.3	3.3～15.2	34.8～154.4	各種石綿スレート板（8種）
		算術平均値	39.9±32.3	8.8±4.5	82.9±45.6	
石・粘土系	陶器質（施釉）	最小～最大	41.1～110.0	39.6～68.5	194.8～401.1	壁タイル（内装用）（14種）
		算術平均値	79.8±21.0	50.7±7.0	271.4±57.4	
	非陶器質（施釉）	最小～最大	48.2～102.6	44.1～61.9	221.9～375.2	壁タイル（内装用）（7種）
		算術平均値	83.8±16.8	52.2±5.5	333.6±53.4	
	磁器質（施釉）	最小～最大	58.9～73.0	60.0～61.5	1198.5～1273.3	壁タイル（内装・外装両用）（3種）
		算術平均値	65.4±7.1	61.0±0.9	1228.4±39.6	
	磁器質（無釉）	最小～最大	67.4～115.6	65.9～87.8	924.4～1134.4	床タイル（8種）
		算術平均値	82.6±17.7	73.7±8.9	998.0±74.5	

*印：バックグラウンド以下。

表1 各種建築材料の放射能含有量（その2）

建築材料		放射能濃度 (Bq/kg)				備 考
			Ra-226	Th-232	K-40	
石・粘土系	燐酸石膏ボード	最小～最大	407.4～1233.3	*～140.7	*～59.3	燐酸石膏の混合比が50%以上のボード（15種）
		算術平均値	678.4±216.7	15.7±35.0	23.9±19.2	
	排煙脱硫石膏ボード	最小～最大	*～25.9	*～14.8	*～140.7	排煙脱硫石膏が100%のボード（15種）
		算術平均値	13.1±8.7	3.2±4.8	20.7±38.2	
	チタン石膏ボード	最小～最大	*	*	11.1	チタン石膏が100%のボード（1種）
		算術平均値	*	*	11.1	
	天然石膏ボード	最小～最大	1.9～14.6	*～3.7	*～10.0	天然石膏が100%のボード（5種）
		算術平均値	5.1±5.5	0.7±1.7	3.5±4.9	
	ロックウール天井材	最小～最大	53.7～123.7	13.3～38.1	17.4～140.4	各種ロックウールの天井材（7種）
		算術平均値	91.4±26.9	21.2±8.1	88.6±44.9	
その他	れんが	最小～最大	51.9～123.3	37.0～120.4	220.4～781.9	各種れんが（5種）
		算術平均値	78.5±30.2	70.9±34.7	456.0±212.8	
	壁土	最小～最大	17.0～86.7	14.4～92.2	125.9～1226.7	愛知県以西の10県の日本製用各種壁土（20種）
		算術平均値	46.9±19.6	47.0±22.9	804.9±293.3	
	地下土壌	最小～最大	14.0～32.6	3.7～24.5	106.0～540.4	東京都A区（2地点）の地下約10m～50mの間の各種土壌（8種）
		算術平均値	23.1±5.9	16.4±7.3	437.1±141.4	
	燐 鉱 石	最小～最大	1324.8～1829.6	9.3～63.0	*～30.4	3カ国の各種燐鉱石（4種）
		算術平均値	1681.2±238.5	34.4±24.1	14.1±14.3	
	ジルコニア（パデライト）		13392.6	1292.6	*	建築分野では軽質コンクリートの化粧層その他に使用（1種）
材料	ジルコンフラワー		3863.0	692.6	*	同上（1種）
	ジルコンサンド		4085.2	766.7	34.4	同上（1種）

*印：バックグラウンド以下。

普通ポルトランドセメントの ^{226}Ra の放射能濃度は $22.6 \sim 67.4 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $39.6 \pm 13.9 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどである。 ^{232}Th の放射能濃度は $1.5 \sim 15.2 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $7.9 \pm 3.4 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約10倍である。平均値で比較すると、普通ポルトランドセメントの ^{232}Th は ^{226}Ra の1/5程度の放射能濃度である。 ^{40}K の放射能濃度は $75.9 \sim 225.2 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $148.9 \pm 54.8 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどである。

(2) 混合セメント

高炉セメントやフライアッシュセメントのような混合セメントは、試験体数がそれぞれ1種類と少ないが、前述の普通ポルトランドセメントと比べてみると ^{226}Ra と ^{232}Th の放射能濃度がやや高く、平均値でみて、それぞれ約2倍ほどになっている。 ^{40}K の放射能濃度は高炉セメントが 131.5 Bq/kg 、フライアッシュセメントが 155.9 Bq/kg であり、普通ポルトランドセメントの ^{40}K の放射能濃度と同程度である。

3.1.2 コンクリート用骨材

主として関東・甲信越地方(東北地方および東海地方の一部を含む1都12県)で産出する天然骨材と人工骨材(主として砕砂・砕石)41種類および遮蔽用コンクリートに用いる骨材として重晶石、鉄鉱石、カンラン岩各1種類の測定結果を表1(その1)に示す。

(1) 普通コンクリート用骨材

普通コンクリート用骨材の ^{226}Ra の放射能濃度は $5.2 \sim 37.0 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $22.3 \pm 8.7 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約7倍ほどである。しかし、骨材の種類による差や地域的な差については、この測定結果だけでは判然としなかった(もっとデータ数を多くする必要がある)。平均値で比較すると、普通コンクリート用骨材の ^{226}Ra の放射能濃度は前述の普通ポルトランドセメントの平均値の約1/2である。 ^{232}Th の放射能濃度は $* \sim 42.6 \text{ Bq/kg}$ (*印はバックグラウンド以下であることを示す。以下同様。平均値: $18.5 \pm 11.7 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にある。この場合の最大値と最小値の差は大きい、骨材の種類による差や地域的な差については ^{226}Ra の場合と同様に、この測定結果だけでは判然としなかった。平均値で比較すると、普通コンクリート用骨材の ^{232}Th の放射能濃度は普通ポルトランドセメントの約2倍ほどである。 ^{40}K の放射能濃度は $166.3 \sim 1248.5 \text{ Bq/kg}$ (平均値: 607.0 ± 233.4) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約8倍ほどある。標準偏差は大きい、あえて平均値で比較してみると ^{40}K の放射能濃度は普通ポルトランドセメントの約4倍に相当する。

今後、関東地方以西のコンクリート用骨材についても同様の測定をする必要がある。

(2) 重晶石・鉄鉱石(磁鉄鉱)・カンラン岩

重晶石の ^{226}Ra の放射能濃度は 4.1 Bq/kg で、後述する天然石膏ボードなみの低濃度である。鉄鉱石の ^{226}Ra の放射能濃度は 12.2 Bq/kg で、後述する排煙脱硫石膏ボードなみの低濃度である。カンラン岩の ^{226}Ra の放射能濃度はバックグラウンド以下である。 ^{232}Th および ^{40}K の放射能濃度については、重晶石、鉄鉱石、カンラン岩ともにバックグラウンド以下である。これらを骨材とする遮蔽用コンクリートの放射能含有量は使用するセメントの放射能含有量に依存するといえる。

3.1.3 コンクリート

茨城県筑波郡大穂町(現つくば市)で打設した6種類の普通コンクリートおよび7種類の軽量コンクリートの放射能含有量の測定結果を表1(その1)に示す。

(1) 普通コンクリート

普通コンクリートの ^{226}Ra 、 ^{232}Th および ^{40}K の放射能濃度の平均値は、それぞれ $29.8 \pm 5.5 \text{ Bq/kg}$ 、 $21.4 \pm 5.0 \text{ Bq/kg}$ 、 $587.8 \pm 78.4 \text{ Bq/kg}$ であり、バラツキは比較的少ない。これらの値は標準偏差を考慮すれば普通コンクリート用骨材の放射能濃度とほぼ同等である。コンクリートの放射能含有量は、コンクリートの原料であるセメントや骨材の放射能含有量およびそれらの混合比に依存するとみられる。なお、セメントと骨材を混練りするための通常の水の放射能含有量は、セメントやコンクリート用骨材の放射能含有量に比べて無視できるほどのものであろう。

(2) 軽量コンクリート

軽量コンクリートの ^{226}Ra の放射能濃度は $13.3 \sim 469.6 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $97.0 \pm 165.1 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は約35倍である。また、ある種の軽量コンクリートの ^{226}Ra の放射能濃度の最大値は前述の普通コンクリートのその約13倍ほど高い。標準偏差が大きすぎるが、あえて平均値で比較してみると、軽量コンクリートの ^{226}Ra の放射能濃度は普通コンクリートに比べて約3倍ほど高い。これは、後述するジルコン系材料がプレハブ住宅用の軽量コンクリート版(試験体)に原料の一部として使用されていることによるものである。 ^{232}Th の放射能濃度は $* \sim 113.7 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $29.2 \pm 39.0 \text{ Bq/kg}$) の範囲内にあり、最大値と最小値との差は大きい。 ^{232}Th の放射能濃度についても ^{226}Ra の場合と同様にジルコン系材料の混入の影響がみられ、普通コンクリートの最大値の4倍近い放射能濃度を示すものもある。 ^{40}K の放射能濃度は $19.3 \sim 2633.3 \text{ Bq/kg}$ (平均値: $769.1 \pm 892.8 \text{ Bq/kg}$) の広範囲にわたり、最大値と最小値との差は約136倍ほどもある。 ^{40}K の場合も標準偏差が大きいが、あえて平均値で比較してみると、普通コンクリートの約1.3倍ほどでしかない。これらのことは、後述するジルコン系材料の ^{40}K の放射能濃度が極めて低いこととあわせて考えると、軽量コンクリートに使用されている骨材に由来するものと思われる。

3.1.4 その他

8種類の石綿スレート板の放射能含有量の測定結果を表1(その1)に示す。

(1) 石綿スレート板

石綿スレート板の ^{226}Ra と ^{232}Th の放射能濃度は、平均値でみて、それぞれ $39.9 \pm 32.3 \text{ Bq/kg}$ 、 $8.8 \pm 4.5 \text{ Bq/kg}$ であり、前述の普通ポルトランドセメントのそれに近い値を示している。また、 ^{40}K の放射能濃度の平均値 ($82.9 \pm 45.6 \text{ Bq/kg}$) は、普通ポルトランドセメントの最小値に近い値を示している。表1には明示していないが、別途に行った石綿の放射能含有量の測定結果⁸¹⁾によると、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th および ^{40}K の放射能濃度はいずれもバックグラウンド以下ないしはバックグラウンドを多少上回る程度であった。これらのことから、石綿スレート板の放射能含有量は、製造時に使用するセメントの放射能含有量に依存するといえる。

3.2 石・粘土系材料・部材の放射能含有量

イ・粘土系に属する建築材料の種類は極めて多いが、ここでは代表的ないくつかの測定結果について述べる。

3.2.1 タイル

市販の陶器質施釉壁タイル（内装用14種）、半磁器質施釉壁タイル（内装用7種）、磁器質施釉壁タイル（内装・外装両用3種）、磁器質無釉床タイル（8種）の合計32種の放射能含有量の測定結果を表1（その1）に示す。

(1) 陶器質施釉壁タイル

陶器質施釉壁タイルの ^{226}Ra の放射能濃度は41.1～110.0Bq/kg（平均値：79.8±21.0Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどである。 ^{232}Th の放射能濃度は39.6～68.5Bq/kg（平均値：50.7±7.0Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。 ^{40}K の放射能濃度は194.8～401.1Bq/kg（平均値：271.4±57.4Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。

(2) 半磁器質施釉壁タイル

半磁器質施釉壁タイルの ^{226}Ra の放射能濃度は48.2～102.6Bq/kg（平均値：83.8±16.8Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。半磁器質施釉壁タイルと前述の陶器質施釉壁タイルの ^{226}Ra の放射能濃度を平均値で比較してみると、両者はほぼ同等である。 ^{232}Th の放射能濃度は44.1～61.9Bq/kg（平均値：52.2±5.5Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は比較的少ない。半磁器質施釉壁タイルと陶器質施釉壁タイルの ^{232}Th の放射能濃度を平均値で比較してみると、両者はほぼ同等である。 ^{40}K の放射能濃度は221.9～375.2Bq/kg（平均値：333.6±53.4Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。半磁器質施釉壁タイルと陶器質施釉壁タイルの ^{40}K の放射能濃度を平均値で比較してみると、標準偏差を考慮すれば両者に大差はない。

半磁器質タイルは素材区分上は陶器質タイルに属するためか、今回の測定結果によれば、半磁器質タイルの ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の放射能濃度は陶器質タイルのそれに極めて近い値を示した。

(3) 磁器質施釉壁タイル

磁器質施釉壁タイルの ^{226}Ra および ^{232}Th の放射能濃度は、それぞれ58.9～73.0Bq/kg（平均値：65.4±7.1Bq/kg）、60.0～61.5Bq/kg（平均値：61.0±0.9Bq/kg）の範囲にあり、試験体数が少ないためか最大値と最小値との間に大きな差はない。磁器質施釉壁タイルを基にして前述の陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルの3者の ^{226}Ra および ^{232}Th の放射能濃度を平均値で比較してみると、標準偏差を考慮すれば3者に大差はないとみてよい。 ^{40}K の放射能濃度は1198.5～1273.3Bq/kg（平均値：1228.4±39.6Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差はほとんどないとみてよい。磁器質施釉壁タイルを基にして陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルの3者の ^{40}K の放射能濃度を平均値で比較してみると、磁器質施釉壁タイルの ^{40}K の放射能濃度は陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルのそれに比べて約4倍ほど高い。

(4) 磁器質無釉床タイル

磁器質無釉床タイルの ^{226}Ra の放射能濃度は67.4～115.6Bq/kg（平均値：82.6±17.7Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。磁器質無釉床タイルと前述の半磁器質施釉壁タイルの ^{226}Ra の放射能濃度は、平均値でみると極めて近い値で

ある。また、磁器質無釉床タイルを基にして前述の陶器質施釉壁タイル、半磁器質施釉壁タイルおよび磁器質施釉壁タイルの4者の ^{226}Ra の放射能濃度を平均値で比較してみると、標準偏差を考慮すれば4者に大差はないとみてよいであろう。 ^{232}Th の放射能濃度は65.9～87.8Bq/kg（平均値：73.7±8.9Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は比較的少ない。磁器質無釉床タイルと磁器質施釉壁タイルの ^{232}Th の平均の放射能濃度は、標準偏差を考慮すればほぼ同等であるが、磁器質無釉床タイルを基にして陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルの3者の ^{232}Th の放射能濃度を平均値で比較してみると、磁器質無釉床タイルの ^{232}Th の放射能濃度は陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルのそれに比べて1.4倍ほど高い。 ^{40}K の放射能濃度は924.4～1134.4Bq/kg（平均値：998.0±74.5Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値に大差はない。磁器質無釉床タイルの ^{40}K の放射能濃度は磁器質施釉壁タイルのそれに比べて多少低めであるが、オーダー的には同等である。磁器質無釉床タイルを基にして陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルの3者の ^{40}K の放射能濃度を平均値で比較してみると、磁器質無釉床タイルの ^{40}K の放射能濃度は陶器質施釉壁タイルおよび半磁器質施釉壁タイルのそれに比べて約3倍ほど高い。

陶器質施釉壁タイル、半磁器質施釉壁タイル、磁器質施釉壁タイル、磁器質無釉床タイルの各放射能含有量を調べた結果、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th の放射能濃度については4者間に大差はないが、 ^{40}K の放射能濃度については陶器質系タイルおよび半磁器質系タイルに比べて磁器質系タイルが3～4倍ほど高い値を示しているのが特徴的である。

3.2.2 石膏ボード

石膏ボードの原料は、おおむね燐酸石膏・排煙脱硫石膏・天然石膏の3種類とみてよいが、チタン石膏もある。石膏ボードの製造に際しては、それぞれの石膏原料を単独で使用する場合と適当に混合して使用する場合とがある。

燐酸石膏ボード15種類（燐酸石膏50%～100%、排煙脱硫石膏あるいは天然石膏50%～0%の混合比で製造されたボード）、排煙脱硫石膏ボード15種類、チタン石膏ボード1種類および天然石膏ボード5種類の放射能含有量の測定結果を表1（その2）に示す。

(1) 燐酸石膏ボード

燐酸石膏ボードの ^{226}Ra の放射能濃度は407.4～1233.3Bq/kg（平均値：678.4±216.7Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどあり、標準偏差も大きい。 ^{226}Ra の放射能濃度が最大値を示したボードは、燐酸石膏100%の原料で製造されたものと考えられる。 ^{232}Th の放射能濃度は*～140.7Bq/kg（平均値：15.7±35.0Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は大きい。最大値の140.7Bq/kgという値は、後述する燐鉱石の ^{232}Th の最大値の約2倍に相当している。このことは、試験体として使用した3ヵ国4種類の燐鉱石とは全く別の産地の燐鉱石から副次的に産出した ^{232}Th の放射能濃度の高い燐酸石膏で製造したボードが今回の試験体として含まれていたことを示唆している。 ^{226}Ra の放射能濃度と ^{232}Th のそれとを平均値で比較してみると、 ^{226}Ra の放射能濃度のほうが圧倒的に高い。 ^{40}K の放射能濃度は*～59.3Bq/kg（平均値：23.9±19.2Bq/kg）の範囲にあり、最大値と最小値との差は大きい。燐酸石膏ボードと前述のコンクリート系材料の ^{40}K の

放射能濃度を平均値と比較してみると、磷酸石膏ボードのそれは桁違いに少ない。

(2) 排煙脱硫石膏ボード

排煙脱硫石膏ボードの ^{226}Ra の放射能濃度は $\sim 25.9\text{Bq/kg}$ （平均値： $13.1 \pm 8.7\text{Bq/kg}$ ）の範囲にある。排煙脱硫石膏ボードと前述の磷酸石膏ボードの ^{226}Ra の放射能濃度を平均値と比較してみると、排煙脱硫石膏ボードのそれは桁違いに少ない。 ^{232}Th の放射能濃度は $\sim 14.8\text{Bq/kg}$ （平均値： $3.2 \pm 4.8\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、平均値でみて、その量は少ない。 ^{40}K の放射能濃度は $\sim 140.7\text{Bq/kg}$ （平均値： $20.7 \pm 38.2\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は大きい。平均値でみてみると、排煙脱硫石膏ボードと前述の磷酸石膏ボードの ^{40}K の放射能濃度は近似している。

(3) チタン石膏ボード

チタン石膏ボードの試験体数は1種類と少ないが、測定結果によれば ^{226}Ra と ^{232}Th の放射能濃度はいずれもバックグラウンド以下である。 ^{40}K の放射能濃度は 11.1Bq/kg であり、小さな値を示している。

(4) 天然石膏ボード

天然石膏ボードの ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の放射能濃度の平均値は、それぞれ $5.1 \pm 5.5\text{Bq/kg}$ 、 $0.7 \pm 1.7\text{Bq/kg}$ 、 $3.5 \pm 4.9\text{Bq/kg}$ であり、いずれも極めて小さな値を示している。

石膏ボード全般に関しては、磷酸石膏ボードの ^{226}Ra の放射能濃度が際立って高く、原料である磷鉱石の影響が大きいことをうかがわせる。

3.2.3 その他

ロックウール天井材7種類、れんが5種類、愛知県以西の壁土20種類、東京都内2地点の地下土壌8種類の各放射能含有量の測定結果を表1（その2）に示す。

(1) ロックウール天井材

ロックウール天井材の ^{226}Ra の放射能濃度は $53.7 \sim 123.7\text{Bq/kg}$ （平均値： $91.4 \pm 26.9\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。石綿スレート板および磷酸石膏ボードを除けば、板状の建築材料としてのロックウール天井材は各種石膏ボードなどに比べて ^{226}Ra の放射能濃度は比較的高濃度である。 ^{232}Th の放射能濃度は $13.3 \sim 38.1\text{Bq/kg}$ （平均値： $21.2 \pm 8.1\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどである。平均値でみると、 ^{232}Th の放射能濃度は前述の普通コンクリートなみである。ロックウール天井材の測定値の標準偏差はかなり大きい、 ^{232}Th と ^{226}Ra の放射能濃度を平均値と比較してみると、 ^{226}Ra の放射能濃度のほうが約4倍ほど高い。 ^{40}K の放射能濃度は $17.4 \sim 140.4\text{Bq/kg}$ （平均値： $88.6 \pm 44.9\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約8倍ほどである。平均値と比較してみると、ロックウール天井材の ^{40}K の放射能濃度は前述の石綿スレート板なみである。

(2) れんが

5種類のれんが（普通れんがと耐火れんが）の放射能含有量の測定結果を表1（その2）に示す。れんがの ^{226}Ra 放射能濃度は $51.9 \sim 123.3\text{Bq/kg}$ （平均値： $78.5 \pm 30.2\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。 ^{232}Th の放射能濃度は $37.0 \sim 120.4\text{Bq/kg}$ （平均値： $70.9 \pm 34.7\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約3倍ほどである。れんがの測定値の標準偏差

はかなり大きい、 ^{226}Ra および ^{232}Th の平均の放射能濃度を前述の普通コンクリートのそれと比べてみると、それぞれが約3倍ほど高い。 ^{40}K の放射能濃度は $220.4 \sim 781.9\text{Bq/kg}$ （平均値： $456.0 \pm 212.8\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、標準偏差はかなり大きい。最大値と最小値との差は約4倍ほどである。

(3) 壁土

壁土の ^{226}Ra の放射能濃度は $17.0 \sim 86.7\text{Bq/kg}$ （平均値： $46.9 \pm 19.6\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値の差は約5倍ほどである。 ^{232}Th の放射能濃度は $14.4 \sim 92.2\text{Bq/kg}$ （平均値： $47.0 \pm 22.9\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約6倍ほどである。 ^{226}Ra と ^{232}Th の放射能濃度は同程度とみてよい。 ^{40}K の放射能濃度は $125.9 \sim 1226.7\text{Bq/kg}$ （平均値： $804.9 \pm 293.3\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約10倍ほどである。

平均値でみた場合、愛知県以西の壁土の ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の放射能濃度は、表1には示していないが別途に行った茨城県つくば市の通常の土壌の放射能濃度（ ^{226}Ra ： $26.2 \pm 0.8\text{Bq/kg}$ 、 ^{232}Th ： $15.2 \pm 3.1\text{Bq/kg}$ 、 ^{40}K ： $212.6 \pm 12.6\text{Bq/kg}$ ）¹⁰⁾に比して高く、それぞれ約2倍、約3倍、約4倍ほどである。

今後、関東地方をも含めた全国的な壁土の放射能含有量の測定を行い、その実態を把握する必要がある。

(4) 地下土壌

地下10～50mの土壌の ^{226}Ra の放射能濃度は $14.0 \sim 32.6\text{Bq/kg}$ （平均値： $23.1 \pm 5.9\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約2倍ほどである。 ^{232}Th の放射能濃度は $3.7 \sim 24.5\text{Bq/kg}$ （平均値： $16.4 \pm 7.3\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約7倍ほどである。 ^{40}K の放射能濃度は $106.0 \sim 540.4\text{Bq/kg}$ （平均値： $437.1 \pm 141.4\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、最大値と最小値との差は約5倍ほどである。

地下土壌の ^{226}Ra 、 ^{232}Th および ^{40}K の放射能濃度は、前述の壁土のそれに比して、いずれも1/2程度である。

3.2.4 原材料

磷鉱石4種類、ジルコニア1種類、ジルコンフラワー1種類、ジルコンサンド1種類の各放射能含有量の測定結果を表1（その2）に示す。磷鉱石が直接的に建築材料として使用されることはないと思われるが、磷鉱石は磷酸石膏ボードの原材料であるため、その放射能含有量が注目される。ジルコン系材料の用途は、すぐれた諸特性のゆえに多方面にわたるが、建築材料としての利用は今のところ必ずしも多いとはいえない。1例としては前述のように軽量コンクリートの化粧層への適用例があげられる。

(1) 磷鉱石

磷鉱石の ^{226}Ra の放射能濃度は $1324.8 \sim 1829.6\text{Bq/kg}$ （平均値： $1681.2 \pm 238.5\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、極めて高濃度である。最大値と最小値との差は 500Bq/kg ほどあり、産出地による相違のあることがうかがえる。したがって、前述の磷酸石膏ボードの放射能含有量は、原材料である磷鉱石の種類によって大きく左右される。

^{232}Th の放射能濃度は $9.3 \sim 63.0\text{Bq/kg}$ （平均値： $34.4 \pm 24.1\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、それほど高濃度ではない。最大値と最小値との差は約7倍ほどである。 ^{40}K の放射能濃度は $\sim 30.4\text{Bq/kg}$ （平均値： $14.1 \pm 14.3\text{Bq/kg}$ ）の範囲にあり、前述の普通コンクリート用骨材のそれに比べると桁違いに低い。

(2) ジルコニア

ジルコニア（パデライト）の ^{226}Ra の放射能濃度は 13392.6 Bq/kg と桁違いに高く、表1に示した測定結果のなかでは最も高濃度であり、 ^{226}Ra の放射能濃度が高い部類の燐鉱石（最大値： 1829.6 Bq/kg ）の約7倍に相当する濃度である。また、 ^{226}Ra の含有量が高い材料とみなされている燐礦石骨ボード（最大値： 1233.3 Bq/kg 程度）の10倍以上に相当する。 ^{232}Th の放射能濃度は 1292.6 Bq/kg であり、表1に示した測定結果のなかでは最も高濃度である。量的には燐礦石骨ボードの ^{226}Ra 含有量（最大値）に匹敵する。 ^{40}K の放射能濃度はバックグラウンド以下である。

(3) ジルコンフラワー

ジルコンフラワーの ^{226}Ra の放射能濃度は 3863.0 Bq/kg である。この値は前述のジルコニアのその約1/4ほどではあるが、他の建築材料に比べて極めて高濃度である。 ^{232}Th の放射能濃度は 692.6 Bq/kg で、ジルコニアのその約1/2ほどであるが、やはり他の建築材料に比べて極めて高濃度である。 ^{40}K の放射能濃度はバックグラウンド以下である。

(4) ジルコンサンド

ジルコンサンドの ^{226}Ra の放射能濃度は 4085.2 Bq/kg である。この値は前述のジルコンフラワーのそれとほぼ同程度であり、他の建築材料に比べて極めて高濃度である。 ^{232}Th の放射能濃度は 766.7 Bq/kg である。この値はジルコンフラワーのそれとオーダー的に同程度であり、やはり他の建築材料に比べて極めて高濃度である。 ^{40}K の放射能濃度は 34.4 Bq/kg であり、無機質系材料としては低濃度の部類にはいる。

4. おわりに

無機質系の建築材料・部材の天然の放射能含有量の測定結果について述べた。各国におけるこの種の測定例は文献1)、11)、12)にみられるが、我が国のデータの記載はない。本報告の測定結果は、試験体の種類やサンプル数も十分とはいえないが、我が国で使用されている建築材料・部材の放射能含有量に関する実態を概観し得る唯一のまとまったデータといえる。これにより、建物内における国民の被曝線量推定ならびに放射線被曝量の低減対策に資することができる。また、建築材料中の放射能濃度を規制している国¹³⁾や建物内のラドン濃度等に限度を設けている国^{14)、15)}もあるが、我が国では検討を開始し、その報告書¹⁶⁾も出ているが規制値や限度値を設定するまでには至っていない。これらのことについては、国際放射線防護委員会勧告等の動向に注意を払う必要がある。前にも述べたように、建築材料は極めて多種多様であり、上記の測定結果はその一部に過ぎないし、ジルコン系材料の放射能濃度を超えるような材料も使用されているかもしれない。また、今後において、放射能濃度の高い材料が現れないとも限らない。建築材料・部材の放射能含有量に関する基礎的データの更なる蓄積が必要である。

なお、本研究は建設省建築研究所において国立機関原子力試験研究費により実施したものである。

注 実効線量当量 [Sv] と放射能濃度 [Bq/kg] の関係について

Sv（シーベルト）は線量当量と呼ばれるSI単位のひとつで、単位質量の物質の吸収エネルギーと定義づけられている吸収線量 [Gy

（グレイ）、 $1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg}$ （ジュール／キログラム）に線質係数（放射線の種類や性質によって決まる係数）を乗じたものである。人体が放射線を受けた場合、その影響の現れかたは組織によって異なるので、各組織の影響を合計して評価するための量として実効線量当量 [Sv] と呼ばれるものが使われる。

さて、モデルや係数を用いることにより、放射能 [Bq] から人体が受ける放射線量 [Sv] を求めることができる。たとえば、ラドンによる呼吸器官の被曝線量を推定する場合、呼吸器官の実効線量当量 H [Sv] は基本的には次式で求まる。

$$H = \alpha \cdot F \cdot T \cdot D$$

ここに、 α ：屋内のラドン濃度 [Bq/m³]

F：平衡係数（ラドンの娘核種（例：ラドン）が壊変して生成する ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi など）とラドンの存在比）

T：居住時間 [h]

D：線量変換係数 [Sv/(Bq・h/m³)]

なお、建築材料・部材の放射能濃度 [Bq/kg] から屋内のラドン濃度 [Bq/m³] を算出するためにはモデル家屋の条件設定（空間構成、建築材料や部材の種類・使用量・ラドン散逸率、換気量等）が別途に必要となる。

参考文献

- 1) United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation: Exposures from Natural Sources of Radiation (1988)
- 2) 浅野賢二、伊藤和男：地下室におけるラドン発生性状に関する実験家屋による検討、日本建築学会計画系論文報告集、第430号、pp.33~43 (1991.12)
- 3) 伊藤和男：建物内の放射線レベル(3) 建築材料のラドンガス放出率、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）(1985)
- 4) 伊藤和男、斉藤茂郎：石膏および石膏ボードの放射能含有量、建設省建築研究所内部資料(1983)
- 5) 伊藤和男、斉藤茂郎：セメント・コンクリート用骨材・コンクリートの放射能含有量、建設省建築研究所内部資料(1983)
- 6) 伊藤和男：建物内の放射線レベル(2) 建築材料中の自然放射能、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）(1984)
- 7) 伊藤和男、浅野賢二：建物内の放射線レベル(4) 建築材料中の自然放射能、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）(1987)
- 8) 伊藤和男、浅野賢二：建物内の放射線レベル(5) 建築材料中の自然放射能、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）(1988)
- 9) 伊藤和男、浅野賢二：建物内の放射線レベル(6) 建築材料中の自然放射能、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）(1989)
- 10) 伊藤和男、浅野賢二：各種建築材料の放射能含有量、建設省建築研究所内部資料改訂版 1~12(1990~1993)
- 11) 放射線医学総合研究所監訳：放射線の線源と影響（1977年国連科学委員会報告書）(1978)
- 12) 放射線医学総合研究所監訳：放射線とその人間への影響(1984)
- 13) R.K. Collings: Uranium-Radium in Phosphate Fertilizer and Co-Product Phosphogypsum, Mineral Sciences Laboratories Report MRP 77-06, May (1977)
- 14) Gun Astri Swedjemark: Swedish Limitation Schemes to Decrease Rn Daughters in Indoor Air, Health Physics Vol.51, No.5 (1986)
- 15) 国際放射線防護委員会：自然放射線源に対する公衆の被曝を制限するための諸原則 (Publ.39) 日本アイソトープ協会(1985)
- 16) 放射線審議会基本部会：放射線審議会基本部会打合せ会（ラドン）報告書ラドン・トロンとその娘核種の発生と測定(1991)

(1997年5月9日原稿受理、1997年9月8日採用決定)