



JAEA-Data/Code

2018-022

DOI:10.11484/jaea-data-code-2018-022

建屋の遮蔽性能評価のための建築材料の  
光子透過率データ集  
(受託研究)

Photon Transmittance Data Collection of Building Materials  
for Evaluating Radiation Protection Capability of Buildings  
(Contract Research)

石崎 梓 普天間 章 田窪 一也 中西 千佳  
宗像 雅広

Azusa ISHIZAKI, Akira FUTEMMA, Kazuya TAKUBO, Chika NAKANISHI  
and Masahiro MUNAKATA

安全研究・防災支援部門  
安全研究センター  
リスク評価研究ディビジョン

Risk Analysis and Applications Research Division  
Nuclear Safety Research Center  
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

March 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

## 建屋の遮蔽性能評価のための建築材料の光子透過率データ集

(受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門  
安全研究センター リスク評価研究ディビジョン  
石崎 梓、普天間 章<sup>+</sup>、田窪 一也<sup>\*</sup>、中西 千佳<sup>\*</sup>、宗像 雅広

(2018年12月26日 受理)

原子力災害発生時に、被ばく線量を低減するための手段として、屋内退避施設や家屋等の建屋への避難をする場合がある。被ばく線量をどの程度低減することができるかを評価するためには、避難対象施設を構成している建築材料の遮蔽能力を把握しておく必要がある。そこで、国内にて現在、建屋を建築する際に使用されている主な建築材料について、3種類のエネルギーの光子(X線及びガンマ線)照射試験を実施し、各建築材料の光子透過率を取得、整理した。その結果、木構造や鉄骨構造で多く使用されている複合壁や屋根の遮蔽性能が比較的低いことがわかった。また、複合壁や屋根に使用する材質が異なることによって、遮蔽性能が変化する結果となった。例えば、複合壁の場合、外壁が窯業系サイディング材の場合と比較すると、軽量コンクリートの場合では、透過率が低くなった。さらに、遮蔽性能が比較的低い建築材料については、遮蔽性能を強化するための追加対策として、遮蔽材を付加した場合の光子透過率についても測定を行い、その結果を取りまとめた。

---

本報告書は内閣府が日本原子力研究開発機構との(委託研究)契約により実施した研究(業務)成果に関するものである。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4

+ 防災研究開発ディビジョン

\* 株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター

**Photon Transmittance Data Collection of Building Materials for Evaluating Radiation  
Protection Capability of Buildings  
(Contract Research)**

Azusa ISHIZAKI, Akira FUTEMMA<sup>+</sup>, Kazuya TAKUBO<sup>\*</sup>, Chika NAKANISHI<sup>\*</sup>  
and Masahiro MUNAKATA

Risk Analysis and Applications Research Division, Nuclear Safety Research Center  
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 26, 2018)

If a nuclear disaster occurs, we may evacuate indoor escape facilities and buildings such as houses as avoid extra exposure doses. In order to evaluate exposure doses, it is necessary to estimate shielding capabilities of the building materials constituting the sheltering facility. Therefore, photon irradiation tests with three kinds of photon energy were carried out for Japanese familiar building materials in Japan, and photon transmittance of each building material is acquired and summarized. As a result, it was found that the shielding capabilities of composite walls and roofs which are widely used in a tree structure and a steel structure were relatively low. And, difference of materials used for composite walls and roofs resulted in a difference in shielding capabilities. For example, in the case of composite walls, the photon transmittance of wall with lightweight concrete was lower than that of wall with ceramic-based siding materials. Furthermore, photon transmittances of building materials added shielding materials became lower and shielding capabilities were enhanced.

Keywords: Building Materials, Shielding, Photon Transmittance

---

This work was performed by Cabinet office under contract with Japan Atomic Energy Agency.

+ Nuclear emergency preparedness research and development division

\* Visible Information Center, Inc.

目 次

1. 序論 -----	1
2. 照射サンプル -----	1
3. 照射試験 -----	2
3.1 試験方法 -----	2
3.2 結果 -----	3
4. 結論 -----	3
謝辞 -----	19
参考文献 -----	20

Contents

1. Introduction -----	1
2. Irradiation samples -----	1
3. Irradiation test -----	2
3.1 Test procedure -----	2
3.2 Results -----	3
4. Concluding Remarks -----	3
Acknowledgements -----	19
References -----	20

表リスト

表 1	照射サンプルの構成	4
表 2	追加対策材料	5
表 3	コリメータ非設置時の建築材料の透過率	6
表 4	コリメータ非設置時の追加対策材料の透過率	7
表 5	コリメータ設置時の建築材料の線量率比と線減弱係数	8
表 6	コリメータ設置時の追加対策材料の線量率比と線減弱係数	9

図リスト

図 1	照射体系	10
図 2	X 線の透過率	11
図 3	$^{137}\text{Cs}$ ガンマ線の透過率	12
図 4	$^{60}\text{Co}$ ガンマ線の透過率	13
図 5	X 線の線減弱係数	14
図 6	$^{137}\text{Cs}$ ガンマ線の線減弱係数	15
図 7	$^{60}\text{Co}$ ガンマ線の線減弱係数	16
図 8	透過率と面積重量との関係	17
図 9	光子エネルギーと吸収の関係	18

Table list

Table 1 Configurations of irradiation samples -----	4
Table 2 Materials of additional shielding -----	5
Table 3 Transmittance of building material without a collimator -----	6
Table 4 Transmittance of additional shielding materials without a collimator -----	7
Table 5 Linear attenuation coefficients of building material -----	8
Table 6 Linear attenuation coefficients of additional shielding materials -----	9

Figure list

Fig. 1 Schema of irradiation systems -----	10
Fig. 2 X-rays transmittance -----	11
Fig. 3 <sup>137</sup> Cs gamma-rays transmittance -----	12
Fig. 4 <sup>60</sup> Co gamma-rays transmittance -----	13
Fig. 5 Linear attenuation coefficients of X-rays -----	14
Fig. 6 Linear attenuation coefficients of <sup>137</sup> Cs -----	15
Fig. 7 Linear attenuation coefficients of <sup>60</sup> Co -----	16
Fig. 8 Relation between transmittance and area weight -----	17
Fig. 9 Relation between photon energy and attenuation -----	18

This is a blank page.



## 1. 序論

原子力施設事故により放射性核種が環境中に放出された場合、施設からの距離や周辺住民それぞれの状況に応じて、遠方への避難または屋内退避の対応がとられる<sup>1)</sup>。屋内退避することによって被ばく線量を低減するために重要となるのが、屋内退避する建屋がどの程度の遮蔽性能を持っているかを事前に評価しておくことである。屋内退避に使用される建屋のうち、原子力施設近傍地域に立地する施設の放射線遮蔽性能を高めることはさらに重要となる。このような施設に対して、放射線防護性能をより高める場合には、壁、窓、屋根等への遮蔽体の設置は有効な対策と言える。

放射線遮蔽能力は建屋に使用されている材料によって大きく影響を受ける<sup>2)</sup>。放射線を使用する施設のような、高い遮蔽能力が必要な施設に用いられているコンクリートや鉛等の建築材料の遮蔽性能については、既に多くの文献等に記述されている<sup>3)-7)</sup>。その一方、住宅や地域の集会所、福祉施設のような一般的な建屋は木構造や鉄骨構造であることが多く、そのような建屋の壁、屋根等の構造には様々な建築材料が複合的に使用されている。このような一般的な建屋に屋内退避した場合の被ばく線量低減係数は0.4前後であるとされている<sup>8),9)</sup>が、国内で実際に使用されている建築材料は多種であり、個々に遮蔽性能について評価された文献は少ない<sup>10)</sup>。そこで、木構造や鉄骨構造の建屋に使用されている建築材料単体及び建築材料に追加対策として、遮蔽材を付加した照射サンプルを作成し、3種類のエネルギーの光子照射試験を行い、その遮蔽性能を評価し、取りまとめる。

## 2. 照射サンプル

日本国内における鉄筋コンクリート造、コンクリート造、鉄骨構造、木構造の建屋に使用されている建築材料として使用頻度の高いとされる材料及び組み合わせを選定し、これらの建築材料に対して、照射試験を実施した。原子力施設事故等により環境中に放出され、建屋外に浮遊もしくは沈着した放射性核種から放出される光子は主に、屋根、壁、窓を透過して屋内へ入射し、屋内退避している人々の被ばくに繋がる<sup>2)</sup>。そこで、様々な建屋構造における、屋根、壁、窓の材質を調査し、さらに、材料が複合的に使用されている箇所に関してはその組み合わせについて調査を行った。想定する建屋構造は鉄筋コンクリート構造、コンクリート構造、木構造、鉄骨構造である。選定した建築材料及び組み合わせを使用箇所ごとに面積重量、厚み等と併せて表1に整理した。鉄筋コンクリート造又はコンクリート造の場合は、壁、天井共に鉄筋コンクリートもしくはコンクリートが使用されることが多い。木構造又は鉄骨構造の壁には、石膏ボード、木板、断熱材、外壁材から構成される複合壁が使用されることが一般的である。外壁材には、様々な種類があるが、本照射試験では、窯業系サイディング材と軽量コンクリートを外壁材として採用した。一方、屋根には野地板の上に防水シートを敷設し、さらにその上に屋根材を敷設する工法が広く用いられている。屋根材として、ガルバリウム鋼板とルーフトイルを選定した。窓には単相窓と複層窓がある。単相窓は4mm程度のガラス1枚から構成されている窓である。近年、住宅の高気密化・高断熱化が進んでいる中で、より冷暖房効率を向

上させる等の目的で複層窓の需要が拡大している<sup>11)</sup>。そこで、複層ガラスを模擬するため、厚さ 4mm のガラス 2 枚を積層して照射を行った。

表 1 に示す通りに選定した建築材料の放射線遮蔽能力が比較的低い場合は、追加の対策として、表 2 に示す遮蔽材をさらに付加して照射を行った。追加対策として使用する遮蔽材は全て市販されている製品の中から選定した。壁への追加対策として、鉛 10mm 相当の鉛ラミネートマットを選定した。一方、屋根や窓への追加対策として、鉛相当厚 1mm と 5mm の樹脂タングステンシートを選定した。窓は採光の役割や火災の際の避難経路となることもあるため、通常時に遮蔽材を敷設することはできない。つまり、緊急時に遮蔽材を移動、敷設する作業が必要となるため、作業の効率や実行性を考慮すると、重量をできるだけ小さく抑える必要がある。また、屋根は耐震性や崩落の危険性等を考慮すると、窓と同様に重量をできるだけ小さく抑える必要がある。以上の理由から、窓と屋根には壁とは異なり、樹脂タングステンシートによる対策を選定した。

### 3. 照射試験

#### 3.1 試験方法

各建築材料の光子透過率を求めるため、図 1 に示す照射体系を構築した。本照射試験では、直接線と散乱線を測定することによって透過率を取得し、直接線のみを測定することによって、線減弱係数を取得する。直接線のみを測定する場合は、照射サンプルの上流及び測定器の上流側にコリメータを設置する。光子エネルギーは UNSCEAR (2013)<sup>12)</sup>に記載されている福島第一原子力発電所事故時に放出されたとされる 8 核種 ( $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ) の主たる放出光子エネルギー範囲である 30 keV~1400 keV を考慮して、実効エネルギー 164 keV の X 線、 $^{137}\text{Cs}$  線源 (662keV: 放出割合 85.1%)、 $^{60}\text{Co}$  線源 (1.17eMeV: 放出割合 99.9%、1.333 MeV: 放出割合 100%) の 3 種類の線源を使用した。X 線の照射線量率は 13mGy/h、 $^{137}\text{Cs}$  の照射線量率は 61.5mGy/h、 $^{60}\text{Co}$  の照射線量率は 70.9mGy/h であった。測定器は電離箱を使用しており、X 線測定の場合は応用技研社製 C-110、ガンマ線測定の場合は応用技研社製 CX-250 を使用した。線量率計には応用技研製 AE-1326 を使用した。線源測定器実行中心間距離は照射装置の形、照射室広さ、照射に要する時間等を考慮して、X 線測定の場合は 3000 mm、ガンマ線測定の場合は 1050 mm と設定した。

測定結果から、光子透過率  $f$  と線減弱係数  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) を以下の式の通りに算出する。

$$f = I/I_0$$

$$\mu = -\log(I_c/I_{c0})/t \quad (1)$$

ここで、 $I$  及び  $I_0$  はそれぞれ、コリメータが無い照射体系において測定される照射サンプルを透過した後の線量率と照射サンプル設置前に測定した線量率である。 $I_c$  及び  $I_{c0}$  はそれぞれ、コリメータを設置した照射体系において測定される照射サンプルを透過した後の線量率と照射サンプル設置前に測定した線量率である。 $t$  (cm) は照射サンプルの厚みを示す。

### 3.2 結果

線源ごとの光子透過率の結果を表 3、図 2、図 3、図 4 に示す。図 2、図 3、図 4 はそれぞれ、X 線源、 $^{137}\text{Cs}$  線源、 $^{60}\text{Co}$  線源による照射の結果である。光子のエネルギーの低下に応じて透過率も低下していることがわかる。例えば、密度  $2.0 \text{ g cm}^{-3}$  の鉄筋コンクリートの透過率を比較すると、X 線の場合は 0.003、 $^{137}\text{Cs}$  線源の場合は 0.074、 $^{60}\text{Co}$  線源の場合は 0.152 となった。2 種類ある複合壁のうち、外壁材に窯業系サイディングを使用した複合壁 1の方が外壁材に軽量コンクリートを使用した複合壁 2 よりも透過率が線源に応じて、1.26 倍から 1.83 倍程度高くなった。屋根も同様に、線源に応じて、屋根 1 が屋根 2 よりも透過率が 1.26 倍から 2.04 倍程度高くなった。追加対策のための材料は 1 mm 厚の樹脂タングステンシートと 1 mm 厚の鉛が同程度の透過率となった。同様に 5 mm 厚の樹脂タングステンシートと 5 mm 厚の鉛の透過率は概ね同等であった。これら追加対策材料の透過率を対策前の建材の透過率に乗ずることによって、追加対策後の建材の透過率を見積もることができる。線源ごとの光子の線減弱係数を表 4、図 5、図 6、図 7 に示す。複合壁や対策後の建材等のような積層されている状態の材料は、総厚で規格化される。また、鉄筋コンクリートの場合、コリメートされた細い光子が鉄筋上を通過した場合とそれ以外の場合で値が大きく異なる。本報告書では、鉄筋上を光子が通過した場合の結果を示している。

光子の透過率は面積重量と相関があることが知られている。面積重量は材料の密度と厚みの積から簡単に求めることができるため、建材の遮蔽性能の推定に役に立つ。本照射試験で得られた結果について、透過率と面積重量との関係を図 8 のように求めた。線源ごとの結果を比較すると、 $^{137}\text{Cs}$  線源と  $^{60}\text{Co}$  線源を用いた照射結果については、面積重量の増加に伴い透過率が低下する明らかな傾向が見られた。一方、X 線を用いた照射結果については、対策を行わない場合の結果と各対策を施した場合の結果との間で、それぞれ減少傾向が異なる結果となった。この要因として、追加対策材料が鉛やタングステン等の高原子番号の材料を使用しているためであると考えられる。図 9 に光子線と吸収係数の関係を示す。水のような低原子番号元素で構成されている物質の場合、光子エネルギーの低下に応じて徐々に吸収係数が増加している。しかし、鉛、タングステン等の高原子番号元素で構成されている物質では、光子エネルギー 100 keV 付近では吸収端と呼ばれる急激な吸収係数が見られる。本照射試験で使用した X 線の実効エネルギーは 164 keV であるため、吸収端の影響を受けて、高原子番号元素を含む対策材料を付加した条件における透過率が大幅に低下したと考えられる。図 9 を見ると、本照射試験で使用した X 線の実効エネルギー 164 keV では、線減弱係数は水、鉄、鉛、タングステンの順に増大し、鉛とタングステンは同程度であった。また、鉛の線減弱係数は水の約 150 倍であり、鉄の約 15 倍であった。光子エネルギーの増大に従い、物質ごとの線減弱係数の差は小さくなり、 $^{60}\text{Co}$  から放出されるガンマ線のエネルギーの一つである 1173 keV の場合は、鉛の線減弱係数は水の約 11 倍であり、鉄の約 1.7 倍であった。

## 4. 結論

エネルギーの異なる光子に対して、様々な建築材料及び追加対策材料の照射試験を行い、透過率と線減弱係数を取りまとめた。木構造や鉄骨構造の場合、壁や屋根には様々な材料を組み合わせ使用されており、材料の違いによって透過率に違いが表れた。実際には、本照射試験で使用した材料以外にも多種多様な材料が使用されており、特定の建屋の評価を行う場合は、使用されている建築材料の密度や厚みからある程度、推測することができる。

表 1 照射サンプルの構成 (1/2)

使用箇所	サンプル名	構造	面積重量 (g/cm <sup>2</sup> )
壁	鉄筋コンクリート	総厚 180 mm 鉄筋 D13、配筋率 0.25% コンクリート部密度 1.5 g/cm <sup>3</sup>	32.9
	鉄筋コンクリート	総厚 180 mm 鉄筋 D13、配筋率 0.25% コンクリート部密度 2.0 g/cm <sup>3</sup>	40.5
	鉄筋コンクリート	総厚 180 mm 鉄筋 D13、配筋率 0.25% コンクリート部密度 2.5 g/cm <sup>3</sup>	49.8
	普通コンクリート	総厚 180 mm コンクリート部密度 1.5 g/cm <sup>3</sup>	30.3
	普通コンクリート	総厚 180 mm コンクリート部密度 2.0 g/cm <sup>3</sup>	37.9
	普通コンクリート	総厚 180 mm コンクリート部密度 2.5 g/cm <sup>3</sup>	47.1
	複合壁 1	石膏ボード 13.4 mm 断熱材 81 mm 木板 12 mm 窯業系サイディング 16.6 mm	3.60
	複合壁 2	石膏ボード 13.4 mm 断熱材 81 mm 木板 12 mm 軽量コンクリート 100 mm	7.27
屋根	屋根 1	木板 16.75 mm アスファルトルーフィング 1.1 mm ガルバリウム鋼板 0.97 mm	1.17
	屋根 2	木板 16.75 mm アスファルトルーフィング 1.1 mm ルーフトイル 20 mm	1.67

表 1 照射サンプルの構成 (2 / 2)

窓	ガラス 4mm	総厚 4 mm 密度 2.45 g/cm <sup>3</sup>	0.98
	ガラス 8mm	総厚 8 mm 密度 2.45 g/cm <sup>3</sup>	1.96
	鉛ガラス	総厚 19.3 mm 鉛 3 mm 相当	7.37

表 2 追加対策材料

使用箇所	サンプル名	構造	面積重量 (g/cm <sup>2</sup> )
壁	鉛ラミネートマット	ラミネート鉛板 1.2 mm×10 枚 鉛 10 mm 相当	11.9
屋根/窓	樹脂タングステンシート	総厚 1.4 mm	1.41
屋根/窓	樹脂タングステンシート	総厚 5.9 mm	5.86

表3 コリメータ非設置時の建築材料の透過率

照射サンプル	厚み (cm)	基準条件との比		
		X線	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
鉄筋コンクリート 密度 1.5 (追加対策なし)	21.16	0.007	0.123	0.222
鉄筋コンクリート 密度 2.0 (追加対策なし)	21.18	0.003	0.074	0.152
鉄筋コンクリート 密度 2.5 (追加対策なし)	21.23	0.001	0.040	0.099
コンクリート 密度 1.5 (追加対策なし)	18.06	0.024	0.150	0.265
コンクリート 密度 2.0 (追加対策なし)	18.08	0.009	0.091	0.178
コンクリート 密度 2.5 (追加対策なし)	18.13	0.002	0.049	0.116
複合壁 1 (追加対策なし)	12.30	0.607	0.781	0.842
複合壁 2 (追加対策なし)	20.63	0.332	0.568	0.671
複合壁 1+鉛ラミネートマット	13.60	0.000	0.237	0.466
複合壁 2+鉛ラミネートマット	21.93	0.001	0.171	0.370
屋根 1 (追加対策なし)	1.88	0.842	0.924	0.946
屋根 2 (追加対策なし)	3.79	0.413	0.662	0.748
屋根 1+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	2.02	0.162	0.807	0.885
屋根 2+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	3.93	0.082	0.576	0.698
屋根 1+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	2.47	0.003	0.543	0.716
屋根 2+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	4.38	0.002	0.387	0.565
屋根 1+鉛 1mm 厚	1.99	0.141	0.807	0.888
屋根 2+鉛 1mm 厚	3.90	0.070	0.577	0.701
屋根 1+鉛 5mm 厚	2.44	0.001	0.509	0.708
屋根 2+鉛 5mm 厚	4.34	0.001	0.362	0.557
ガラス 4mm 厚 (追加対策なし)	0.49	0.855	0.927	0.948
ガラス 8mm 厚 (追加対策なし)	0.97	0.732	0.861	0.901
ガラス 4mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	0.63	0.164	0.807	0.885
ガラス 4mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	1.08	0.002	0.545	0.719
ガラス 8mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	1.11	0.142	0.750	0.841
ガラス 8mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	1.56	0.002	0.506	0.683
ガラス 4mm 厚+鉛 1mm 厚	0.60	0.142	0.810	0.891
ガラス 8mm 厚+鉛 1mm 厚	1.08	0.122	0.751	0.845
ガラス 4mm 厚+鉛 5mm 厚	1.04	0.001	0.545	0.710
ガラス 8mm 厚+鉛 5mm 厚	1.53	0.001	0.506	0.672
鉛ガラス	1.93	0.006	0.540	0.703

※1 RTS : 樹脂タングステンシート

表4 コリメータ非設置時の追加対策材料の透過率

照射サンプル	厚み (cm)	基準条件との比		
		X線	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
鉛 1mm 厚	0.11	0.164	0.871	0.938
RTS <sup>*1</sup> 1mm 厚	0.14	0.192	0.866	0.930
鉛 5mm 厚	0.56	0.001	0.550	0.748
RTS <sup>*1</sup> 5mm 厚	0.59	0.003	0.577	0.747
鉛ラミネートマット	1.30	0.000	0.304	0.556

※1 RTS : 樹脂タングステンシート

表5 コリメータ設置時の建築材料の線量率比と線減弱係数

照射サンプル	厚み (cm)	$I_c / I_{c0}$			線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )		
		X線	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$	X線	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
鉄筋コンクリート 密度 1.5	21.16	-	0.027	0.074	-	0.170	0.123
鉄筋コンクリート 密度 2.0	21.18	-	0.014	0.045	-	0.203	0.147
鉄筋コンクリート 密度 2.5	21.23	-	0.009	0.033	-	0.221	0.161
コンクリート 密度 1.5	18.06	0.015	0.105	0.197	0.233	0.125	0.090
コンクリート 密度 2.0	18.08	-	0.052	0.116	-	0.163	0.119
コンクリート 密度 2.5	18.13	-	0.035	0.081	-	0.184	0.139
複合壁 1	12.30	0.593	0.767	0.823	0.042	0.022	0.016
複合壁 2	20.63	0.327	0.478	0.596	0.054	0.036	0.025
複合壁 1+鉛ラミネートマット	13.60	-	0.201	0.410	-	0.118	0.066
複合壁 2+鉛ラミネートマット	21.93	-	0.137	0.304	-	0.090	0.054
屋根 1	1.88	0.693	0.887	0.922	0.195	0.064	0.043
屋根 2	3.79	0.379	0.590	0.675	0.256	0.139	0.104
屋根 1+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	2.02	0.160	0.763	0.845	0.907	0.134	0.083
屋根 2+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	3.93	0.072	0.511	0.622	0.669	0.171	0.121
屋根 1+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	2.47	-	0.489	0.668	-	0.289	0.163
屋根 2+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	4.38	-	0.327	0.481	-	0.255	0.167
屋根 1+鉛 1mm 厚	1.99	0.132	0.784	0.857	1.015	0.122	0.077
屋根 2+鉛 1mm 厚	3.90	0.063	0.519	0.624	0.711	0.169	0.121
屋根 1+鉛 5mm 厚	2.44	-	0.475	0.660	-	0.306	0.171
屋根 2+鉛 5mm 厚	4.34	-	0.305	0.480	-	0.274	0.169
ガラス 4mm 厚	0.49	0.843	0.909	0.911	0.352	0.197	0.192
ガラス 8mm 厚	0.97	0.718	0.836	0.878	0.342	0.184	0.134
ガラス 4mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	0.63	0.160	0.783	0.881	2.929	0.391	0.203
ガラス 4mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	1.08	-	0.516	0.661	-	0.616	0.385
ガラス 8mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	1.11	0.137	0.699	0.822	1.789	0.322	0.176
ガラス 8mm 厚+RTS <sup>※1</sup> 5mm 厚	1.56	-	0.471	0.650	-	0.482	0.276
ガラス 4mm 厚+鉛 1mm 厚	0.60	0.139	0.806	0.841	3.313	0.362	0.291
ガラス 8mm 厚+鉛 1mm 厚	1.08	0.102	0.744	0.798	2.117	0.274	0.209
ガラス 4mm 厚+鉛 5mm 厚	1.04	-	0.488	0.651	-	0.691	0.413
ガラス 8mm 厚+鉛 5mm 厚	1.53	-	0.445	0.631	-	0.531	0.302
鉛ガラス	1.93	0.010	0.506	0.642	2.402	0.353	0.229

※1 RTS : 樹脂タングステンシート



表6 コリメータ設置時の追加対策材料の線量率比と線減弱係数

照射サンプル	厚み (cm)	$I_c / I_{c0}$			線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )		
		X線	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$	X線	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
鉛 1mm 厚	0.11	0.156	0.903	0.961	16.909	0.932	0.365
RTS <sup>※1</sup> 1mm 厚	0.14	0.186	0.847	0.906	12.022	1.183	0.706
鉛 5mm 厚	0.56	-	0.526	0.718	-	1.156	0.598
RTS 5mm 厚	0.59	-	0.559	0.710	-	0.987	0.582
鉛ラミネートマット	1.30	-	0.269	0.496	-	1.011	0.539

※1 RTS : 樹脂タングステンシート

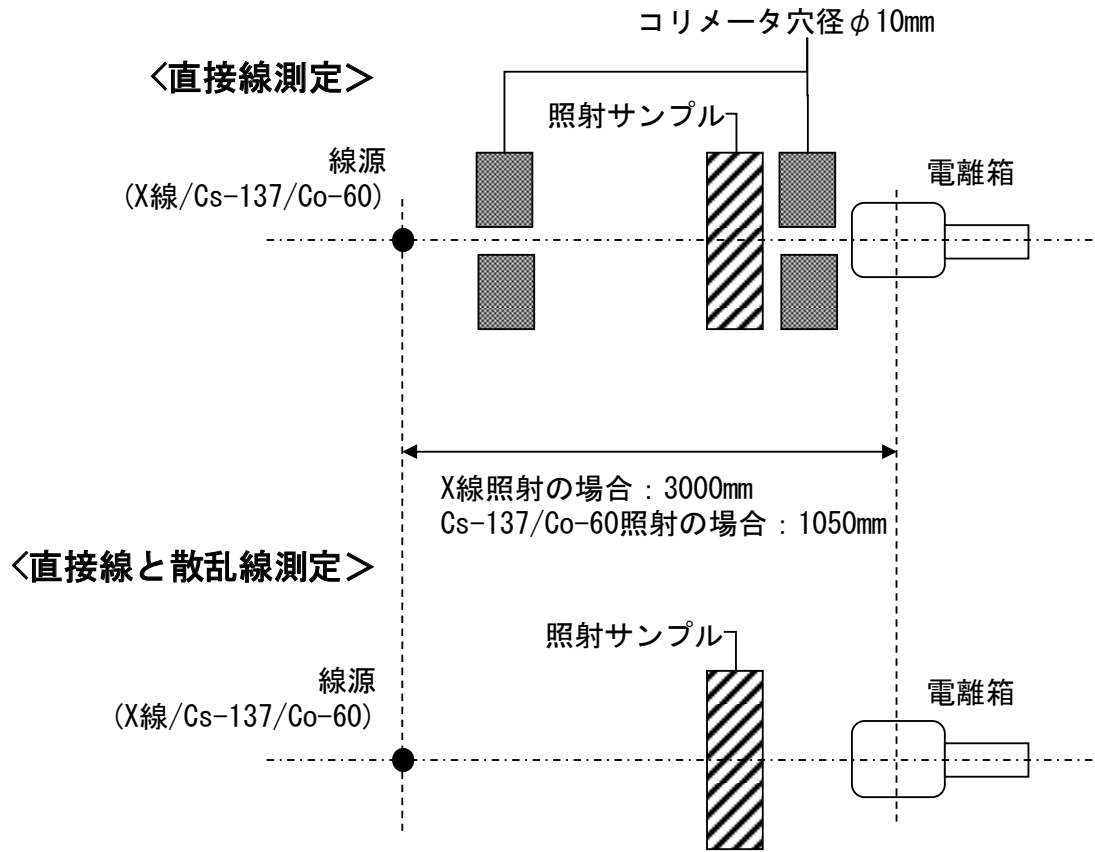


図1 照射体系

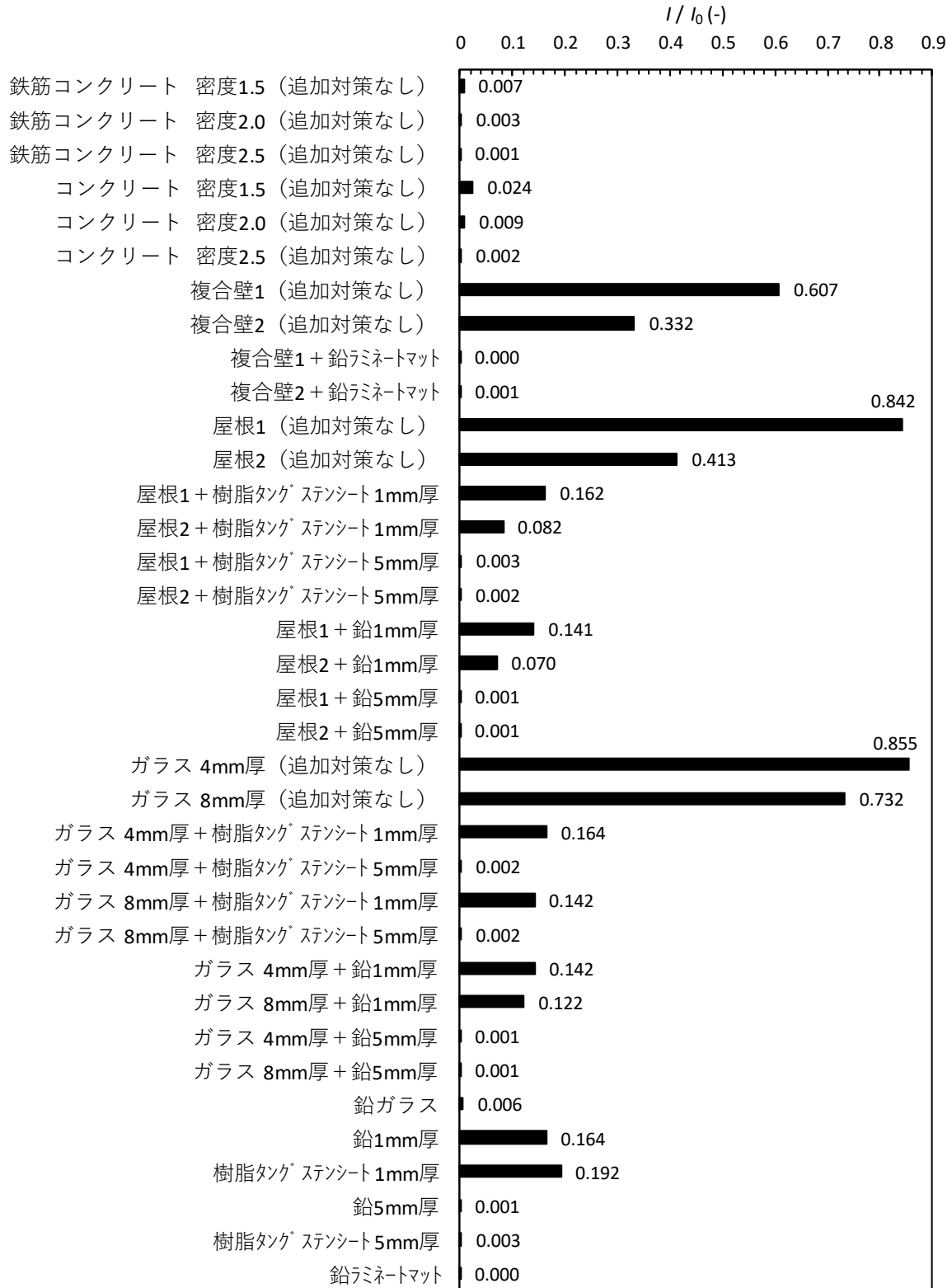


図2 X線の透過率

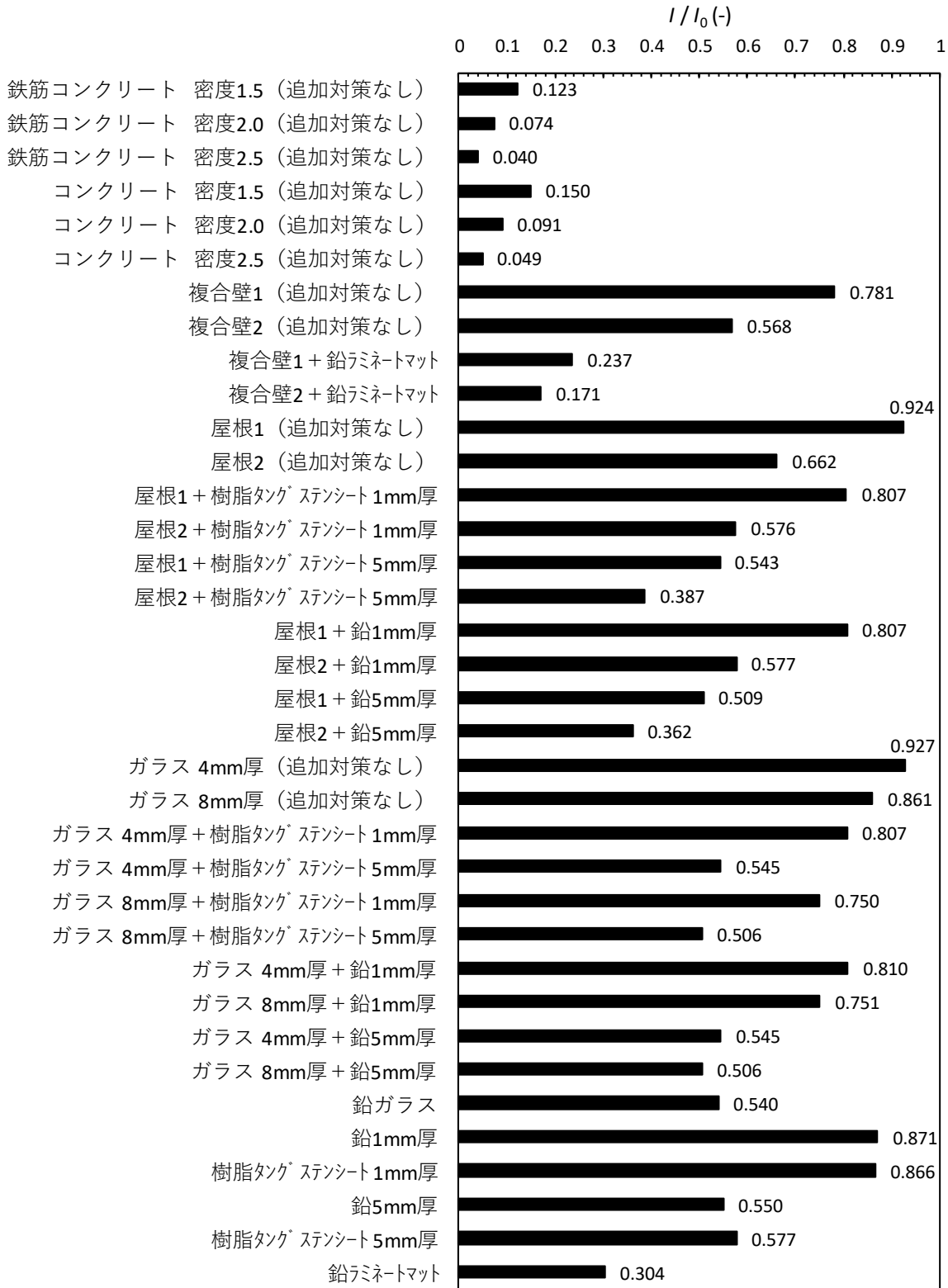


図3  $^{137}\text{Cs}$  ガンマ線の透過率

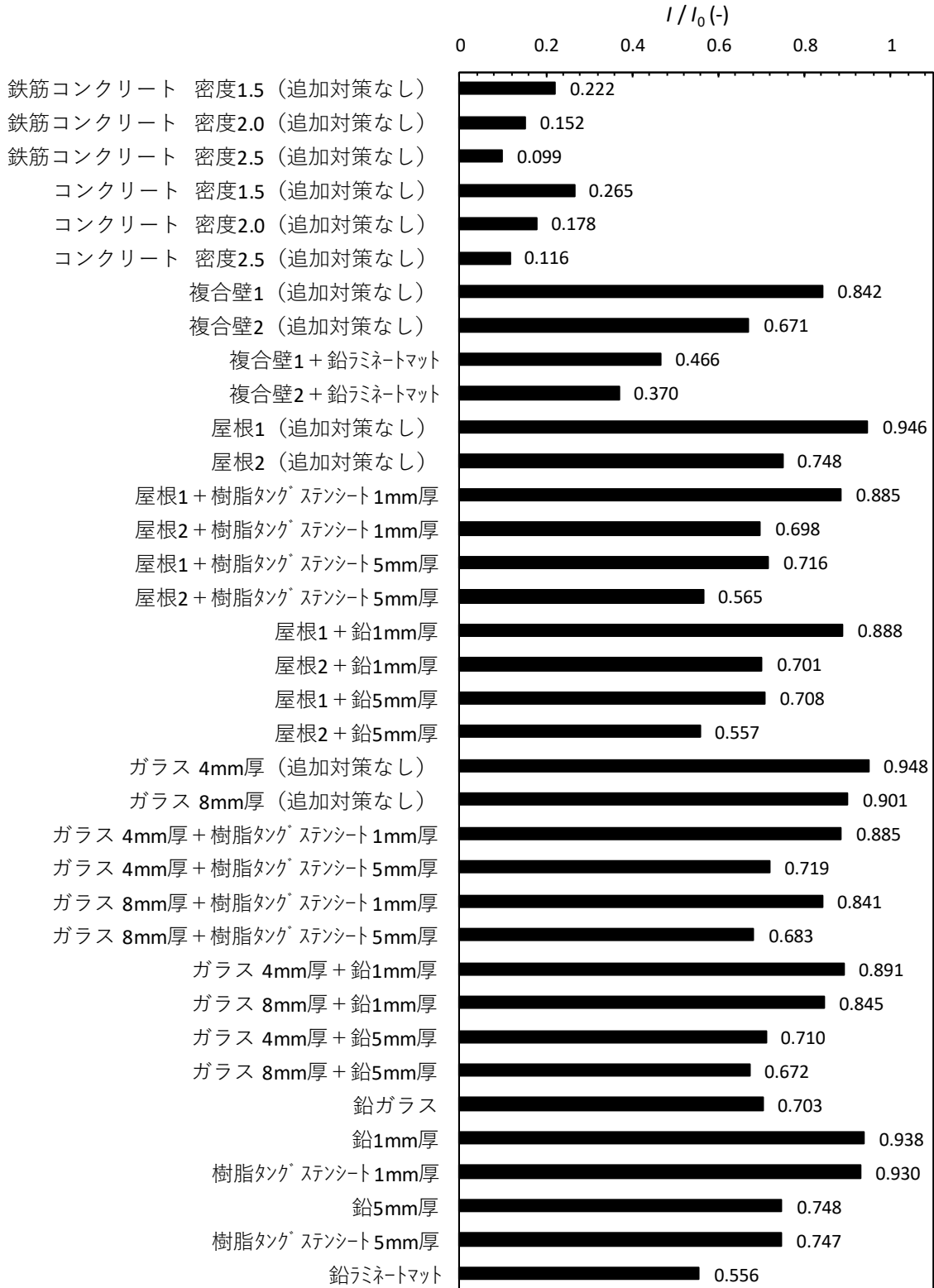


図4  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線の透過率

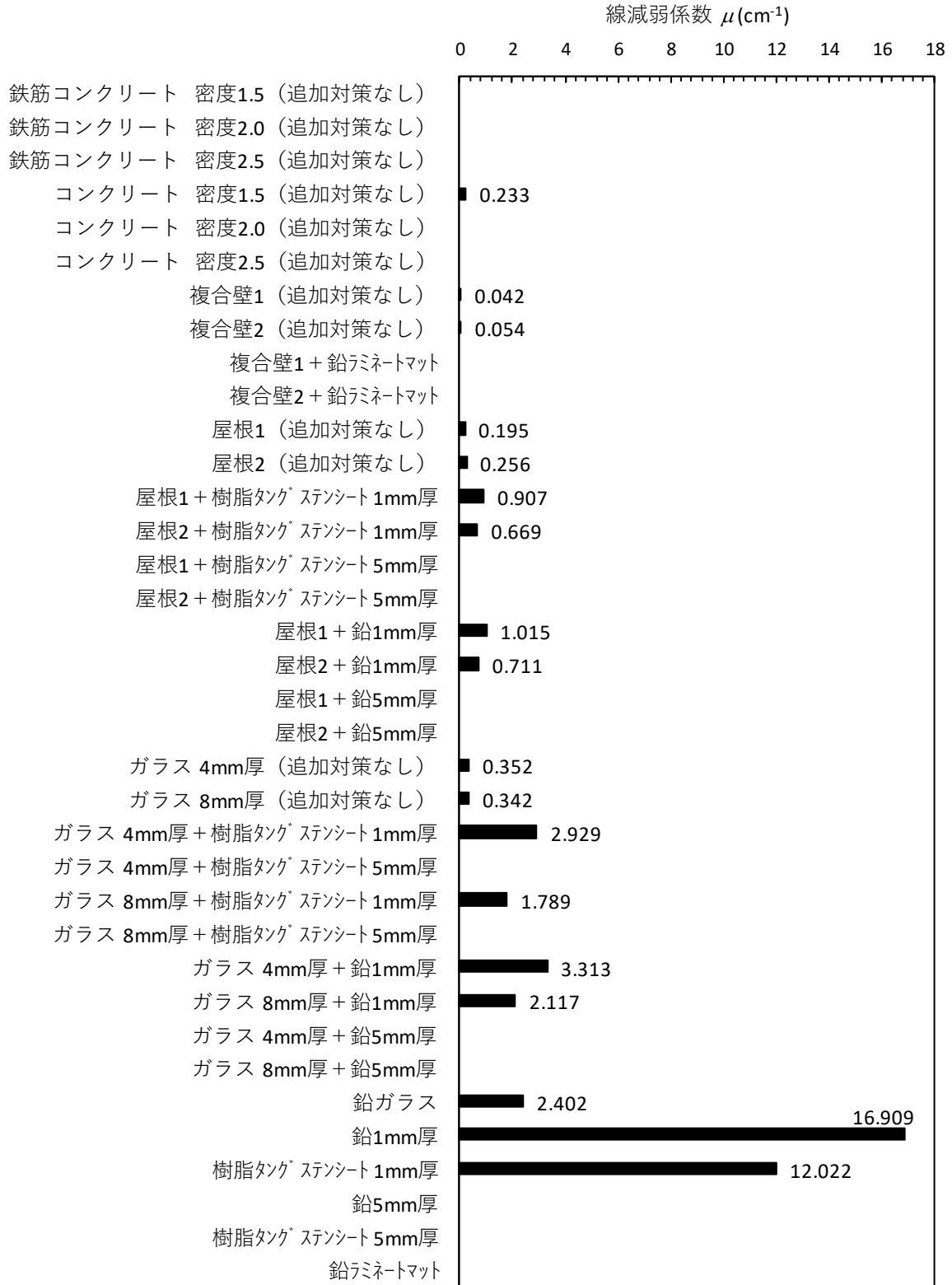


図5 X線の線減弱係数

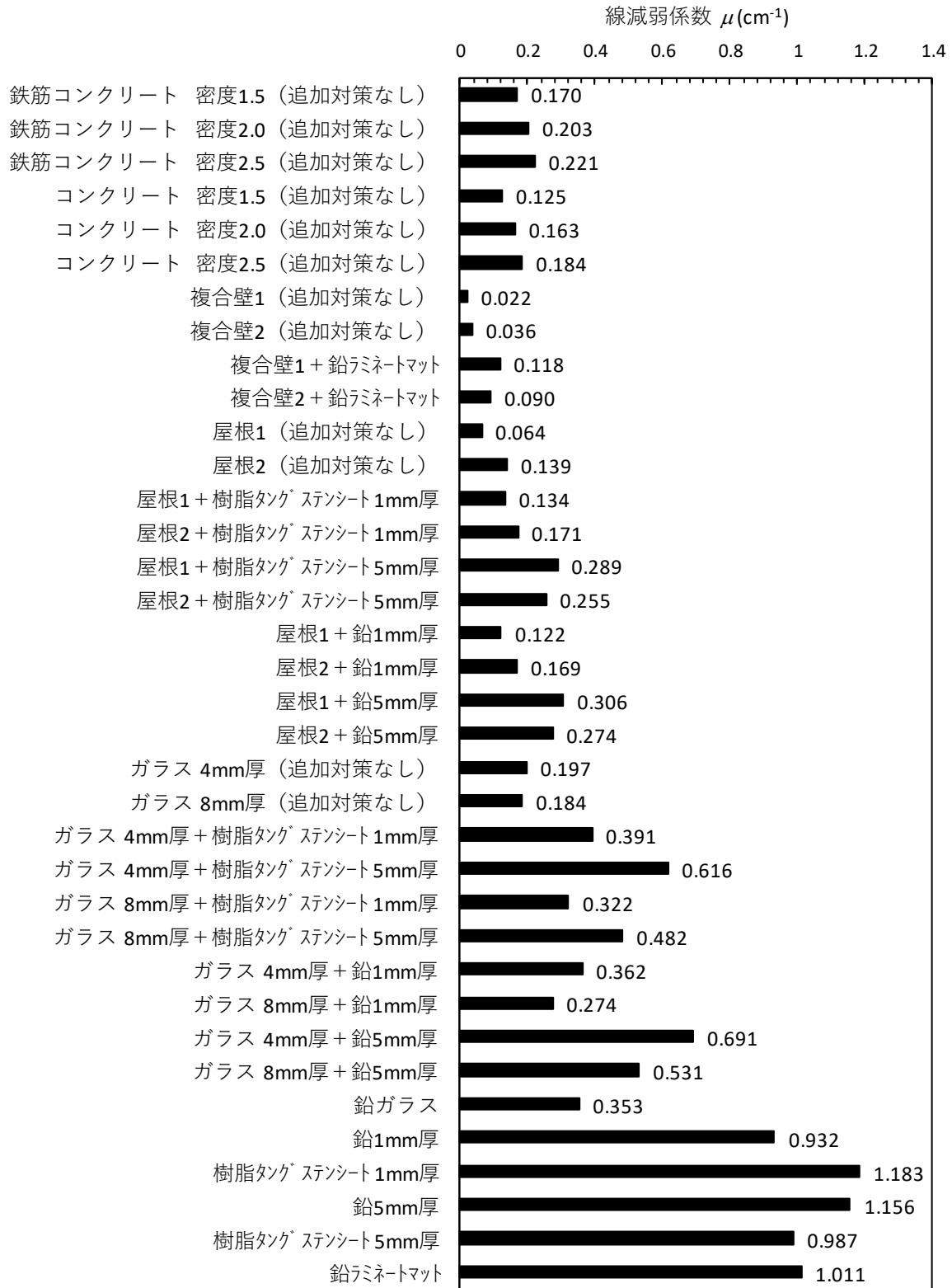


図6 <sup>137</sup>Cs ガンマ線の線減弱係数

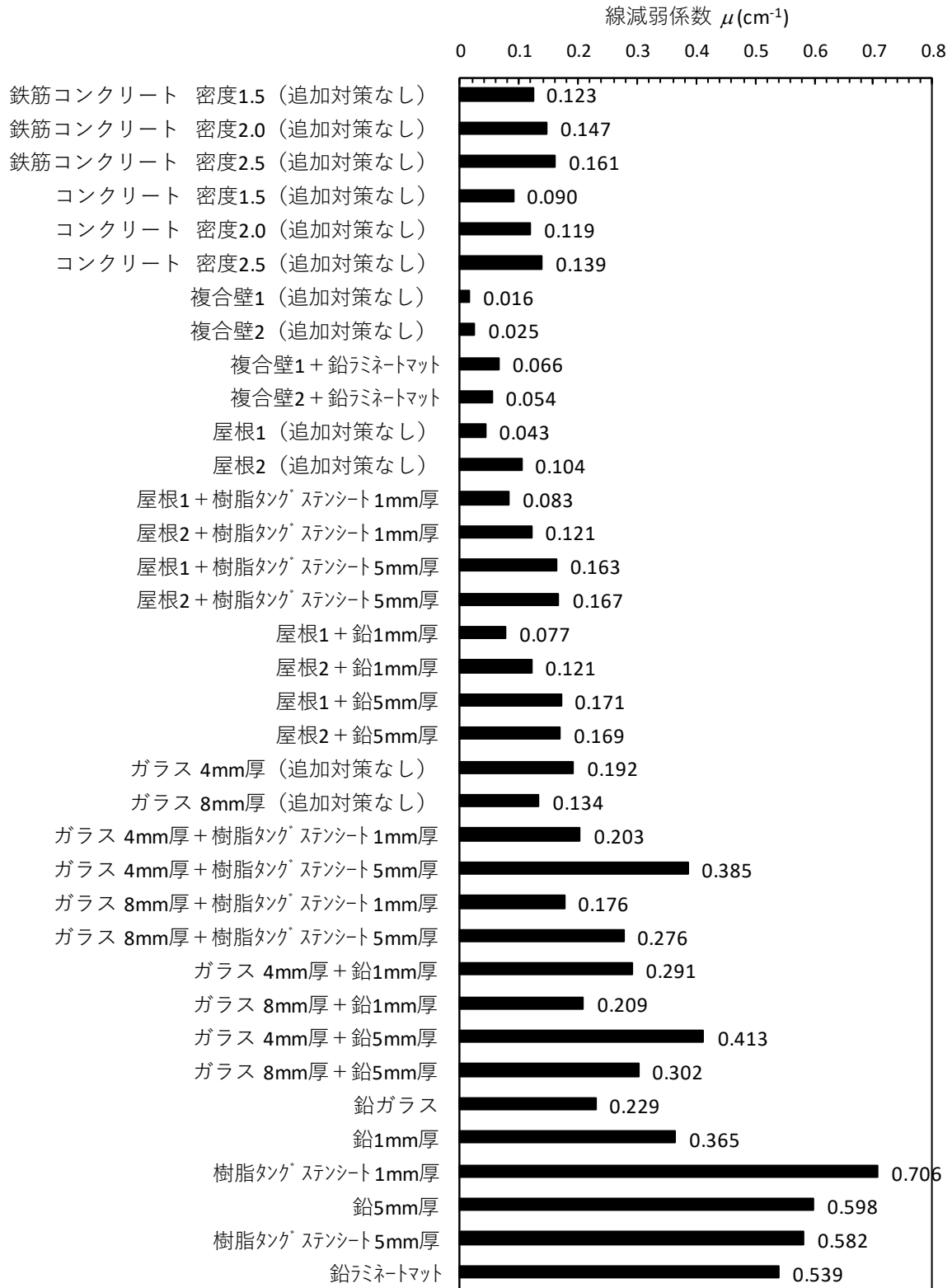


図7  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線の線減弱係数



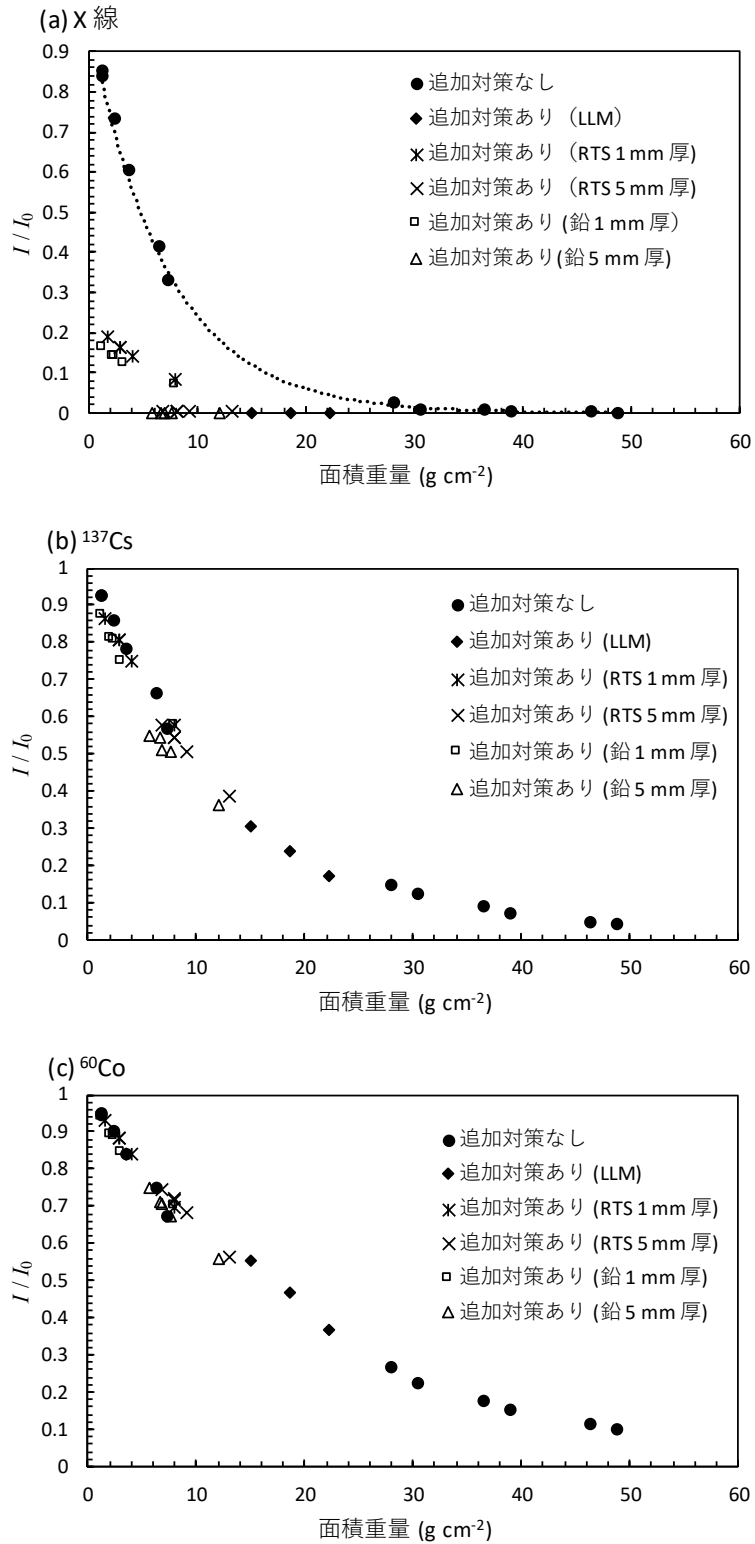


図 8 透過率と面積重量との関係

LLM、RTS はそれぞれ鉛ラミネートシート、樹脂タングステンシートを指す。

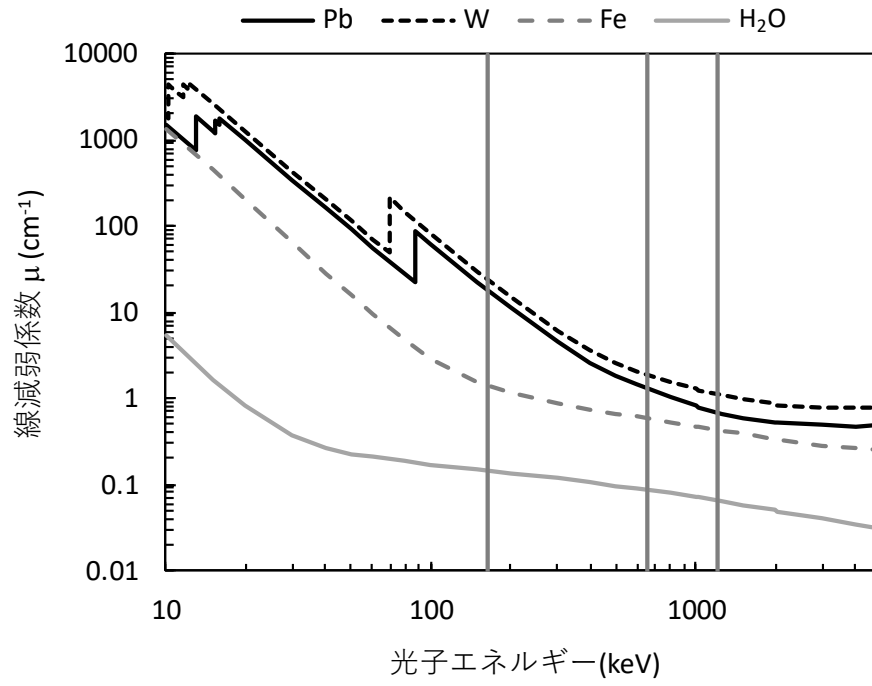


図9 光子エネルギーと吸収の関係

謝辞

本研究調査は内閣府「平成 28 年度 一時退避施設等の放射線防護策に係る技術的知見の整備」及び内閣府「平成 29 年度 原子力防災研究事業」の中で実施した建築材料照射試験の成果を取りまとめたものである。

## 参考文献

- 1) 原子力災害対策指針, 原子力規制委員会, available from <http://www.nsr.go.jp/data/000024441.pdf> (accessed 2018-12-04).
- 2) 山口恭弘, 南賢太郎, 原子炉事故時における日本の典型的な家屋の放射線遮へい効果、保健物理, Vol. 24, pp. 11-17, 1989.
- 3) Demir, F., Budak, G., Sahin R., Karabulut, A., Olutul, M., and Und, A., Determination of Radiation Attenuation Coefficients of Heavy Weight and Normal-Weight Concretes Containing Colemanite and Barite for 0.663 MeV  $\gamma$ -Rays, *Ann. Nucl. Energy*, Vol.38, No.6, pp. 1274-1278, 2011.
- 4) Al-Humaiqani, M. M., Shuraim, A.B., and Hussain, R. R.,  $\gamma$ -Radiation Shielding Properties of High Strength High Performance Concretes Prepared with Different Types of Normal and Heavy Aggregates, *Asian Trans. Eng.*, Vol. 3, No.2, pp.18-28, 2013.
- 5) Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., and Mavi, B., The Shielding of  $\gamma$ -Rays by Concretes Produced with Barite, *Prog. Nucl. Energ.*, Vol. 46, No.1, pp. 1-11, 2005.
- 6) Ikraiam, F. A., El-Latif, A. A., Elazziz, A. A., and Ali, J. M.:” Proceedings of the ninth radiation physics and protection conference”, Effect of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties and gamma-Ray Attenuation for Ordinary Concrete Used in El-Gabal El-Akhdar Area in Libya for Radiation Shielding Purposes, *Arab journal of Nuclear Sciences and Applications*, Vol. 42, pp.287-296, 2009.
- 7) Gencil, O., Bozkurt, A., Kam, E., and Korkut, T., Determination and Calculation of Gamma and Neutron Shielding Characteristics of Concretes Containing Different Hematite Proportions, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 38, No.12, pp. 2719-2723, 2011.
- 8) International Atomic Energy Agency, “Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency”, IAEA-TECDOC-1162, 2000.
- 9) United States Environmental Protection Agency, “The effectiveness of sheltering as a protective action against nuclear accidents involving gaseous releases”, Protective action evaluation part 1, 1978.
- 10) 別府克俊, 丸山一平, “セシウム-137 から生ずるガンマ線に対する各建築材料の遮蔽データベース”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.72, pp.1089-1095, 2014.
- 11) 環境省, 建築時期別二重サッシまたは複層ガラスの窓の有無, available from <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/result5/detail5-17.html> (accessed 2018-12-04).
- 12) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2013 report to the General Assembly with scientific annexes, United Nations, New York, 2013, 311p.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電位	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バトン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベクレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

