

# 論文 廃ブラウン管ガラスカレットを用いた積層モルタル板の放射線遮蔽効果の検討

江藤 優馬\*1・高海 克彦\*2・駒田 弘明\*3

**要旨：**東日本大震災によって、放射線に汚染されたがれきの処理方法が問題となっている。そこで、地上波アナログテレビジョン放送終了によって大量に廃棄されている、鉛を含有したブラウン管テレビのガラスを放射線遮蔽モルタル構造に使用するため、使用材料、混合割合、寸法および構造等の検討を行った。がれき処理のみならず病院建屋等の X 線防御を考慮するために、放射線として  $\gamma$  線と X 線を用いた。その結果、細骨材に密度の大きい製鋼酸化スラグと廃ブラウン管ガラスカレットを使用したモルタル板と廃ブラウン管ガラスカレットをパラフィンで封入して形成した積層構造が、放射線遮蔽効果が高いことが分かった。

**キーワード：**ブラウン管破碎カレット, 放射線, 遮蔽, 鉛, モルタル

## 1. はじめに

2011年3月我が国は東日本大震災によって原子力発電所事故が起こり、放射線に汚染されたがれきの処理方法が問題になっている。また2011年7月に、地上波アナログテレビジョン放送の終了に伴い、大量のブラウン管の処理が必要となった<sup>1)</sup>。

本研究では、このブラウン管テレビのガラスに着目し、これを粉砕してモルタル細骨材として利用し、含有されている鉛によって放射線遮蔽効果を向上させるために、ガラス混合率、モルタル厚さおよびモルタル構造等種々の検討を行った。



図-1 粉砕した廃ブラウン管ガラス

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、密度  $3.16\text{g/cm}^3$  の普通ポルトランドセメントを使用した。

ブラウン管には、スクリーン部分を構成するパネルガラスと本体部分を構成するファンネルガラスとがある。本研究では、ファンネルガラスのみを粉砕したものを廃ブラウン管ガラス細骨材として用いる(図-1)。

他の細骨材には、福岡県玄界灘長間礁沖産の海砂および海砂より密度の大きい製鋼酸化スラグを使用した。

### 2.2 物性試験

本研究では、廃ブラウン管ガラスの骨材としての特性を知るため、物性試験として以下の試験を実施した。また、構成成分を分析するために試料を蛍光 X 線元素分析装置を用いた SQX 分析によって組成試験を実施した。

- ・ ふるい分け試験 (JIS A 1102)
- ・ 微粒分量試験 (JIS A 1103)
- ・ 密度・吸水率試験 (JIS A 1109)
- ・ 組成試験(成分分析)

### 2.3 モルタル試験

細骨材として使用する海砂を廃ブラウン管ガラスに部分置換したモルタルに対して以下の試験を実施した。

- ・ モルタル圧縮試験 (JIS R 5201)
- ・ モルタル曲げ試験 (JIS R 5201)

配合表を表-1 に示す。置換率として 0, 30, 60, 100% の 4 種類、養生期間として 7, 14, 28 日間の 3 種類とし、12 通りの供試体を 3 本ずつ計 36 本作製した。水セメント比は 50% とし、セメント砂比は 33% とし、打設を行った。

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (学生会員)

\*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 工博 (正会員)

\*3 日本コンベヤ 装置システム部部长

表-1 モルタル試験での配合

W/C (%)	C/S (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			C	W	S	廃ブラウン管ガラス
50	33	0	161	254	586	0
		30	161	254	410	152
		60	161	254	234	305
		100	161	254	0	508

## 2.4 鉛の溶出試験

廃ブラウン管ガラスは鉛を含有している。しかし、鉛の溶出量は環境省によって規制されている。その為、本研究では環境省告示 13 号に準拠した溶出試験を実施した。供試体として、モルタル試験で用いたモルタル供試体を粉砕し、呼び寸法 5mm ふるいにすべて通過するものを使用した。

## 2.5 放射線透過試験

モルタル供試体を作製し、X 線およびγ線を照射して、透過試験を実施した。

### (1) モルタル供試体

モルタル供試体は、ベースの細骨材を海砂の場合と製鋼酸化スラグの場合とし、これらの細骨材を廃ブラウン管ガラスに置換して作製した。モルタル供試体の配合を表-2 および表-3 に示す。

表-2 海砂を用いた場合の配合

W/C (%)	C/S (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	海砂	廃ブラウン管ガラス	混和剤
50	37.5	0	521	250	1489	0	10
		30	551	265	997	472	11
		60	551	265	570	944	11

表-3 製鋼酸化スラグを用いた場合の配合

W/C (%)	C/S (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	製鋼酸化スラグ	廃ブラウン管ガラス	混和剤
50	37.5	0	551	265	1738	0	11
		30	551	265	1217	472	11
		60	551	265	695	944	11

モルタル供試体の大きさは、全て縦横 300mm×300mm であり、構造形式によりモルタル単板構造と積層構造とし、供試体名とその特性を表-4 および表-5 にまとめた。表-4 中の各供試体名は、記号の順に廃ブラウン管ガラスを GL と表記し、その後の数字が置換率、ベースを海砂とする場合を Sa、製鋼酸化スラグをベースとする場合を Sg と表記し、最後の数字は供試体厚さを表す。また積層構造とする表-5 中の供試体は、表-4 中の厚さ 30mm のモルタル単板 2 枚の間に中性子の遮蔽能力があるとされているパラフィン層を挟んだ構造である。パラフィン層は、厚さ 10mm のアクリル板で内寸法 300mm×300mm、厚さ 20mm の容器を作製し、その中に流動パラフィン(密度 0.86g/cm<sup>3</sup>)のみを満たしたものと、廃ブラウン管ガラスを充填した後に流動パラフィンを流し込

んだもの 2 種類作製し、供試体名として前者を PL、後者を Bg と表記する。積層構造を図-2 に示す。パラフィン層は、アクリル板の厚さだけ外側のモルタル単板より大きくなっている。



図-2 パラフィン供試体を挟む積層構造

表-4 放射線透過試験での単板供試体一覧

供試体名	母材	置換率(%)	厚さ(mm)	構造
GL60-Sa-200	海砂	60	200	単板
GL30-Sa-200	海砂	30	200	単板
GL0-Sa-200	海砂	0	200	単板
GL60-Sa-100	海砂	60	100	単板
GL30-Sa-100	海砂	30	100	単板
GL0-Sa-100	海砂	0	100	単板
GL60-Sa-50	海砂	60	50	単板
GL30-Sa-50	海砂	30	50	単板
GL0-Sa-50	海砂	0	50	単板
GL60-Sa-30	海砂	60	30	単板
GL30-Sa-30	海砂	30	30	単板
GL0-Sa-30	海砂	0	30	単板
GL60-Sg-200	製鋼酸化スラグ	60	200	単板
GL30-Sg-200	製鋼酸化スラグ	30	200	単板
GL0-Sg-200	製鋼酸化スラグ	0	200	単板
GL60-Sg-100	製鋼酸化スラグ	60	100	単板
GL30-Sg-100	製鋼酸化スラグ	30	100	単板
GL0-Sg-100	製鋼酸化スラグ	0	100	単板
GL60-Sg-50	製鋼酸化スラグ	60	50	単板
GL30-Sg-50	製鋼酸化スラグ	30	50	単板
GL0-Sg-50	製鋼酸化スラグ	0	50	単板
GL60-Sg-30	製鋼酸化スラグ	60	30	単板
GL30-Sg-30	製鋼酸化スラグ	30	30	単板
GL0-Sg-30	製鋼酸化スラグ	0	30	単板

表-5 積層構造の供試体一覧

供試体名	母材	置換率(%)	厚さ(mm)	積層構造
GL60-Sa-PL	海砂	60	100	パラフィン
GL30-Sa-PL	海砂	30	100	パラフィン
GL0-Sa-PL	海砂	0	100	パラフィン
GL60-Sa-Bg	海砂	60	100	廃ブラウン管ガラス
GL30-Sa-Bg	海砂	30	100	廃ブラウン管ガラス
GL0-Sa-Bg	海砂	0	100	廃ブラウン管ガラス
GL60-Sg-PL	製鋼酸化スラグ	60	100	パラフィン
GL30-Sg-PL	製鋼酸化スラグ	30	100	パラフィン
GL0-Sg-PL	製鋼酸化スラグ	0	100	パラフィン
GL60-Sg-Bg	製鋼酸化スラグ	60	100	廃ブラウン管ガラス
GL30-Sg-Bg	製鋼酸化スラグ	30	100	廃ブラウン管ガラス
GL0-Sg-Bg	製鋼酸化スラグ	0	100	廃ブラウン管ガラス

(2) X線透過試験方法<sup>2)</sup>

X線透過試験方法は、図-3に示すように、R社製のX線発生装置から330mm離れた位置に放射線測定器が来るように、供試体を設置して、測定する方法を採った。X線発生装置への入力電力は95000Vで照射時間は12秒とした。このときのX線のエネルギーは60keVであった。この入力電力と照射時間は、最もX線を透過しないと想定した供試体で放射線が測定でき、かつ放射線の散乱が最小となるようにキャリブレーションして決定した値である。

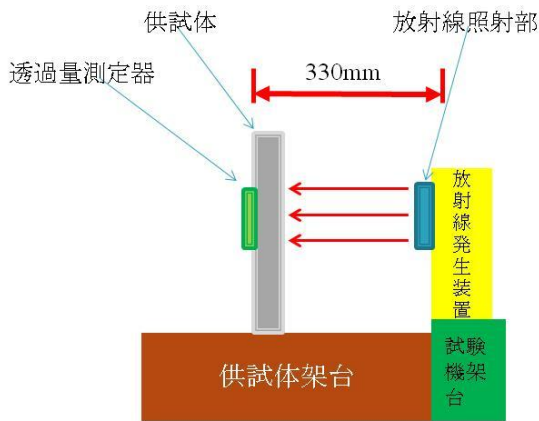


図-3 X線の透過試験概略図

(3) γ線透過試験方法

γ線透過試験方法はX線透過試験と同様にγ線発生装置から330mm離れた位置に供試体を設置し、透過させ放射線測定器によって測定した。照射時間は9秒とした。γ線の線源はイリジウムで、放射線量は102.26GBqであった。

上記(2)と(3)の透過試験では、透過線量をH社製の個人線量計を3台用いて測定し、その平均値を照射時間における線量当量 (mSv) とした。

3. 実験結果

3.1 物性試験結果

組成試験より得た、廃ブラウン管ガラスの構成成分を表-6に示す。

表-6 成分分析(組成試験)結果

成分名	SiO <sub>2</sub>	PbO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	その他
分析値 (mass%)	60.58	15.84	6.52	5.29	11.80

表-6より、酸化鉛(PbO)を約16%含有していることがわかる。他の文献資料においても、廃ブラウン管ガラスには20%程度の鉛が含有されているとの報告<sup>1)</sup>もある。海砂と製鋼酸化スラグおよび廃ブラウン管ガラスの

物性試験結果を表-7に示し、粒度分布を図-4に示す。

図-4での上限および下限は標準粒度の範囲を表す。

表-7 物性試験結果

試料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	0.075mm以下の質量 (%)
海砂	2.60	1.19	2.81	
廃ブラウン管ガラス	3.00	0.14	3.52	2.10
製鋼酸化スラグ	3.16	0.01	3.52	7.00

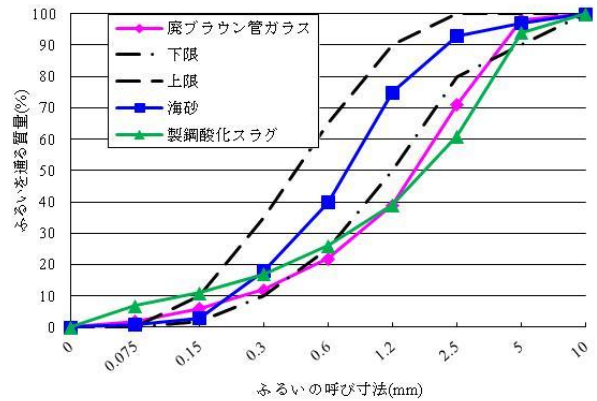


図-4 粒度分布

表-7より、密度の大きさは、製鋼酸化スラグ、廃ブラウン管ガラス、海砂の順になった。廃ブラウン管ガラスは、鉛を含有するため、通常ガラスの密度2.5g/cm<sup>3</sup>より大きい。また、廃ブラウン管ガラスと製鋼酸化スラグは吸水率が低いという結果となった。また、粒度分布は図-4より、廃ブラウン管ガラスは、0.3~1.2mmを通る質量が標準粒度分布と比較して少ない結果となった。これは、ブラウン管を破砕する際に、2.5~5mmの大きさの粒子の混入が比較的多く、0.3~1.2mmのものが少なかったためと考えられる。

3.2 モルタル試験

モルタル圧縮強さ試験の結果を図-5に示す。

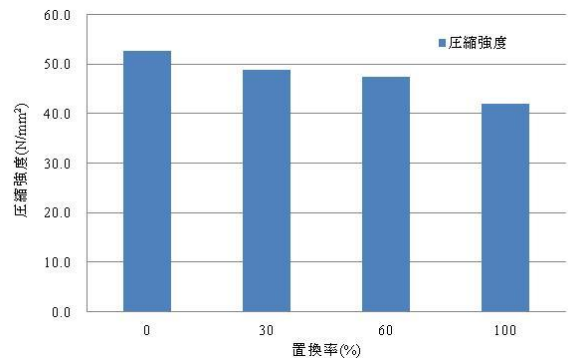


図-5 モルタル圧縮試験結果

図-5より廃ブラウン管ガラスの置換率を増やすごとに強度が低くなるという傾向がみられた。廃ブラウン管

ガラスには、粒形が鋭利なものが多く、また表面が海砂に比べて滑らかな故、ブリーディングが多く生じた為、強度が低下したと考えられる。また、モルタル曲げ試験結果も、グラフは割愛したが、圧縮試験と同様に置換率を増やすと、曲げ強度は低下していくという結果であった。

### 3.3 鉛の溶出試験

鉛の溶出試験の結果を表-8に示す。

表-8 鉛の溶出試験結果

	鉛溶出量 (mg/l)		
	7日間養生	14日間養生	28日間養生
30%置換	3.0	4.4	3.9
60%置換	6.8	8.6	16.0
100%置換	14.0	28.0	19.0

土壌汚染対策基本法<sup>1)</sup>では、鉛の溶出試験の基準値は、0.01mg/L未滿となっている。表-8より、廃ブラウン管ガラスを使用した場合では置換率30%の配合でも基準値を大幅に上回る結果となってしまった。そのため、鉛の溶出の防止が大きな課題であるといえる。

### 3.4 放射線透過試験

まず、細骨材母材を海砂と製鋼酸化スラグとし、廃ブラウン管ガラスの置換率を0%、30%および60%としたときの供試体厚さによるX線透過試験の結果を図-6、図-7および図-8に示す。

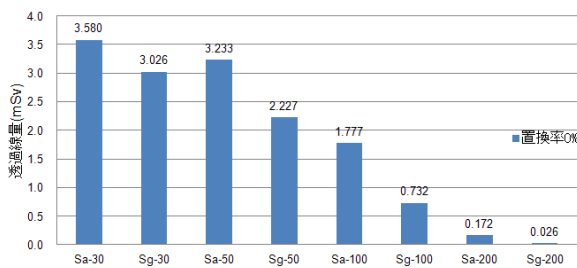


図-6 X線透過試験での置換率0%の結果

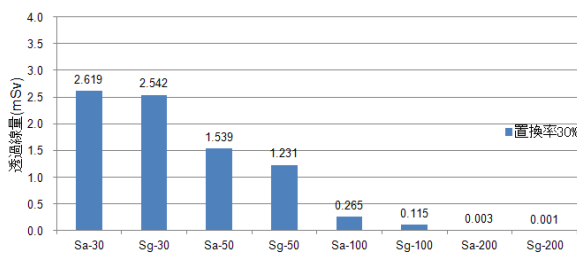


図-7 X線透過試験での置換率30%の結果

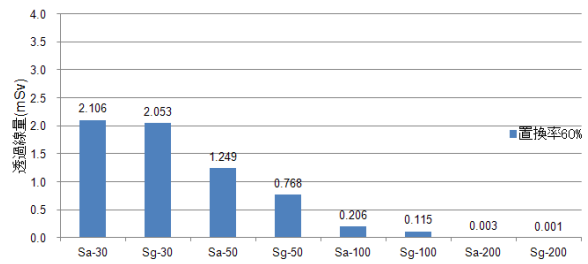


図-8 X線透過試験での置換率60%の結果

以上の3つのグラフから、いずれの置換率でも供試体の厚さを大きくするにつれて透過線量を抑制できることがわかる。また、使用する細骨材母材は海砂(Sa)より製鋼酸化スラグ(Sg)を用いた方が、透過線量を抑制できていることが分かる。これは製鋼酸化スラグの密度が、海砂より大きいことと考えられる。ただし、置換率を上げる、すなわち密度の大きい廃ブラウン管ガラスの割合が増加すると、母材が海砂の場合と酸化製鋼スラグの場合の供試体の平均密度の差異が小さくなるため、母材の違いによる透過線量の減少の割合は小さくなる。今回の実験では供試体の厚さを200mmにするとX線をほぼ遮蔽することが分かった。

次に先の図-6、図-7および図-8の結果を、供試体の厚さごとにまとめなおし、細骨材母材と、廃ブラウン管ガラスの置換率の差異によるX線透過線量を示したものを、図-9、図-10、図-11および図-12に示す。

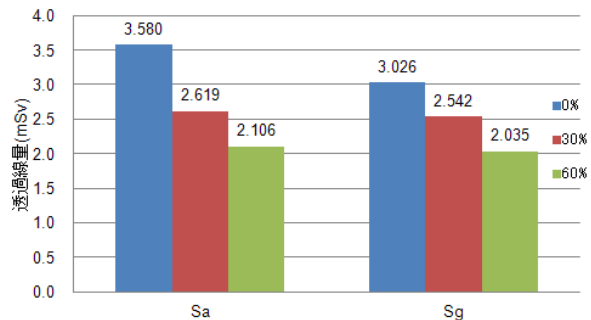


図-9 厚さ30mmの供試体のX線透過試験結果

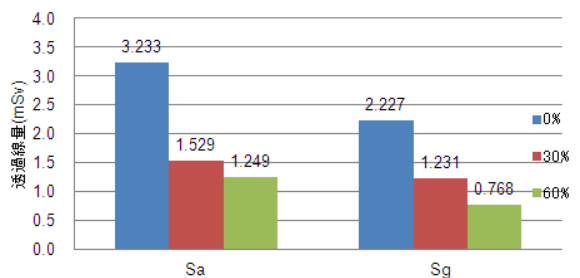


図-10 厚さ50mmの供試体のX線透過試験結果



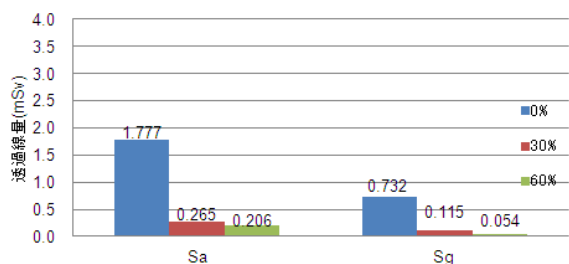


図-11 厚さ 100mm の供試体の X 線透過試験結果

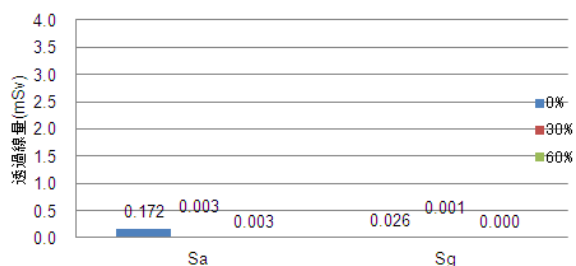


図-12 厚さ 200mm の供試体の X 線透過試験結果

これらのグラフより、いずれの供試体厚さでも、廃ブラウン管ガラスの置換率を上げると透過線量を抑制できている。ただし、廃ブラウン管ガラスを全く混入しない、すなわち置換率 0%から置換率 30%にすると透過線量が大きく低下しているのに対し、置換率 30%から 60%に増加しても透過線量の抑制効果は比例しないことがわかる。

以上の結果からモルタル供試体で遮蔽効果を上げるためには、モルタル供試体の厚さをある程度厚くする必要があることが分かった。

そこで、遮蔽構造の厚さを薄くするために、パラフィンと廃ブラウン管ガラスを一体とした層を考え、これを上記のモルタル版との積層構造とした一連の供試体(図-2)の X 線遮蔽実験を行った。

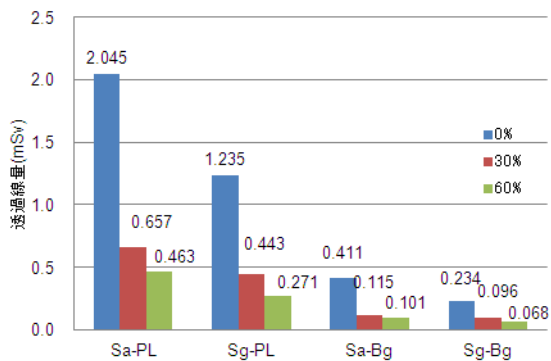


図-13 パラフィン供試体の X 線透過試験結果

パラフィンを含む層は、前述のようにパラフィン単体層(PL)とパラフィン層中に廃ブラウン管ガラスを封入し

た層(Bg)である。X 線遮蔽試験に用いた積層供試体は、30mm 厚のモルタル単体板 2 枚の間にパラフィン層を挟んだものである。積層板ごとに置換率が 0%、30%および 60%としたときの X 線透過量を図-13 に示す。上図より、パラフィン供試体では廃ブラウン管ガラスを満たした層(Bg)を挟んだ方がパラフィン供試体そのまま(PL)よりも透過線量を抑制できるという結果を得た。図-6 より細骨材母材が海砂とした置換率 0%の供試体の結果をみると透過線量が 0.732mSv であったのに対し、廃ブラウン管ガラスを満たしたパラフィン供試体の積層構造のものは厚さが同じにも関わらず 0.411mSv と約 60%まで低下している。さらに、廃ブラウン管ガラス置換率 30%および 60%では、より遮蔽率が大きくなっていくという結果となった。

以上の結果から X 線透過試験では、廃ブラウン管ガラスを満たしたパラフィン供試体をガラス置換率 30%の供試体で挟んだ積層構造が最も効果的であるといえる。

次に、X 線透過試験と同じように、細骨材母材を海砂と製鋼酸化スラグとし、廃ブラウン管ガラスの置換率を 0%、30%および 60%としたときの供試体厚さによる  $\gamma$  線透過試験の結果を図-14、図-15、図-16 に示す。なお、遮蔽物の無い場合の透過線量は、0.304mSv であった。

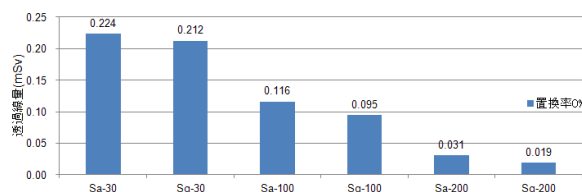


図-14  $\gamma$  線透過試験での置換率 0%の結果

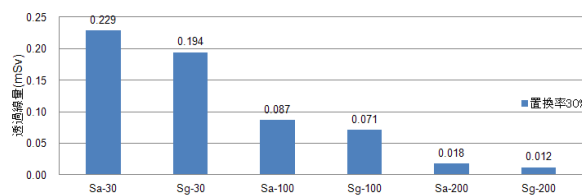


図-15  $\gamma$  線透過試験での置換率 30%の結果

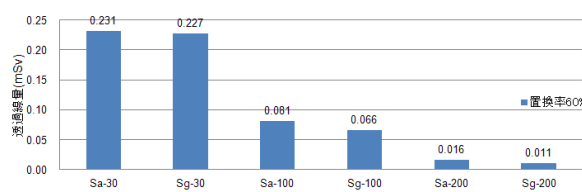


図-16  $\gamma$  線透過試験での置換率 60%の結果

図-14、図-15 および図-16 から、X 線透過試験結果と同じく全置換率で供試体の厚さを大きくするにつれて透過線量を抑制できているという結果となった。また、

使用する細骨材は海砂(Sa)より製鋼酸化スラグ(Sg)を用いた方が、透過線量を抑制できていることが分かる。しかし、厚さ 200mm の供試体での透過量は、図-12 に示す X 線透過試験結果と比較して、大きい。これは、 $\gamma$  線の方が X 線よりもエネルギーが大きく透過性が強かったためだと考えられる。

次に供試体の厚さごとの結果を図-17、図-18 および図-19 に示し、廃ブラウン管ガラスの置換率による  $\gamma$  線透過線量を比較考察する。

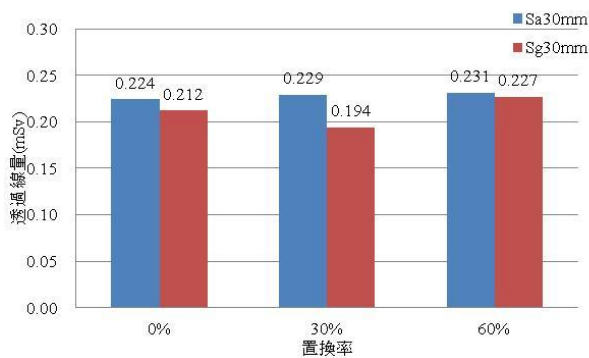


図-17 厚さ 30mm の供試体の  $\gamma$  線透過試験結果

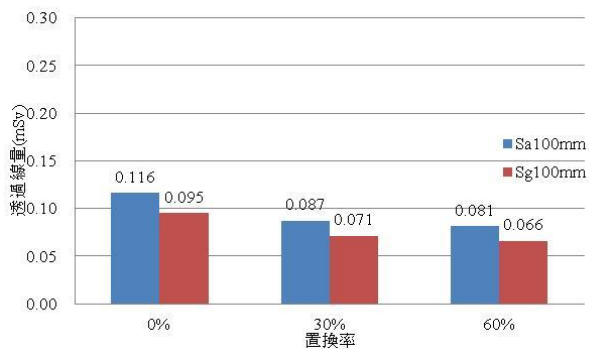


図-18 厚さ 100mm の供試体の  $\gamma$  線透過試験結果

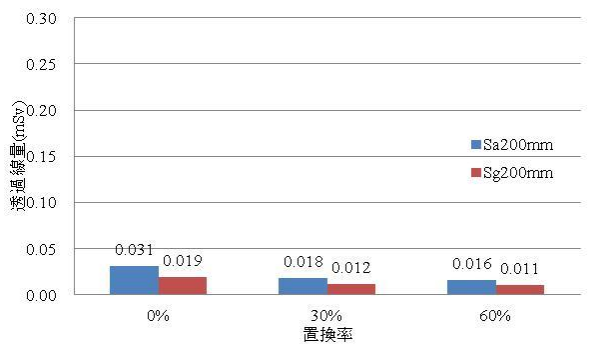


図-19 厚さ 200mm の供試体の  $\gamma$  線透過試験結果

以上のグラフより  $\gamma$  線透過試験では X 線透過試験の結果と比較して廃ブラウン管ガラスの置換率による透過

線量の影響が小さいことがわかる。

また  $\gamma$  線透過試験でもパラフィン供試体を挟んだ積層構造のパターンの試験を行った。

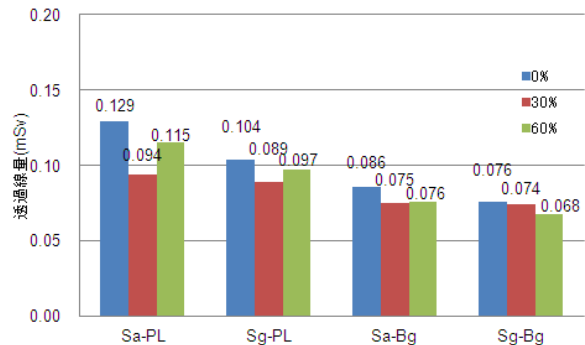


図-20 パラフィン供試体の  $\gamma$  線透過試験結果

図-20 のグラフは積層構造のパラフィン供試体の実験結果を廃ガラスの置換率別にまとめたものである。最も透過線量が小さいのは、スラグ入りで廃ガラス入りパラフィン供試体を用いた積層構造の供試体となった。やはり、 $\gamma$  線の結果でも廃ブラウン管ガラスを満たしたパラフィン供試体を挟むと透過線量を抑制できるという結果となった。

#### 4. 結論

大量に廃棄される廃ブラウン管ガラスを放射線遮蔽モルタルへ利用するため、その物性およびモルタルへの混合割合ならびに遮蔽構造について検討を行った。得られた結果を求めると次のようになる。

- (1)廃ブラウン管ガラスを混入したモルタルの強度は、混合率を上げると低下する。これは廃ブラウン管ガラスの粒形、ブリーディング特性が影響していると思われる。
- (2)廃ブラウン管ガラスを混合したモルタルの鉛溶出量は、規制値よりかなり大きく、有効な抑制対策をとることが必要である。
- (3)モルタル細骨材母材として、海砂よりも製鋼酸化スラグを使用した方が放射線を低減するが、廃ブラウン管ガラスの置換率を上げるとその差異は小さくなる。
- (4)放射線透過量の低減には、廃ブラウン管ガラスを混入したモルタル板単体より、パラフィンに当該ガラスを封入させたパラフィン層との積層構造が有効である。

#### 5. 参考文献

- 1) 経済産業省産業構造審議会：ブラウン管ガラスカレットのリサイクル・処分に係る技術検討会取りまとめ案，平成 23 年 3 月
- 2) 水谷義弘：最新非破壊検査の基本と仕組み，秀和システム，平成 22 年 10 月