

モルタル骨材としての CIS 系廃太陽光パネルの環境安全性評価

土手 裕^{a)}・原田秀樹^{b)}・関戸 知雄^{c)}

Environmental Safety Evaluation of Waste CIS Photovoltaic Panels as Aggregate for Mortar

Yutaka DOTE, Hideki HARADA, Tomoo SEKITO

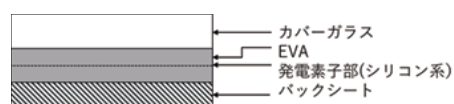
Abstract

To evaluate the environmental safety of waste CIS photovoltaic panels mainly consisted of substrate glass as aggregate for mortar, the JIS A 5011-1 leaching and content tests were conducted for the aggregate and use-simulated samples of waste CIS photovoltaic panels. Use-simulated samples were prepared by replacing sand in the mortar by waste CIS photovoltaic panels: replacement rates by waste CIS photovoltaic panels were 0, 0.1, 1, 10 and 100%. In addition, the possibility of landfill disposal of waste CIS photovoltaic panels was investigated by using JLT13. The JIS content test results showed that waste CIS photovoltaic panels satisfied environmentally sound quality standard of all harmful items for aggregate and all use-simulated samples. The JIS leaching test results showed that aggregate and a use-simulated sample 100% replaced by waste CIS photovoltaic panels did not satisfy environmentally sound quality standard of selenium. However, use-simulated samples less than or equal to 10% replacement rate by waste CIS photovoltaic panels satisfied environmentally sound quality standard of leaching concentration of selenium. These results indicated that waste CIS photovoltaic panels could be used as aggregate for mortar under the conditions of less than or equal to 10% replacement rate by waste CIS photovoltaic panels. It was found that the mixing of waste CIS photovoltaic panels with cement might cause acceleration of selenium leaching from waste CIS photovoltaic panels during the leaching and content tests. Waste CIS photovoltaic panels could not be disposed of in a Controlled final landfill site without intermediate treatment because the selenium leaching concentration of the waste CIS photovoltaic panels were 0.36mg/L, which did not satisfy the landfill standard of 0.3mg/L.

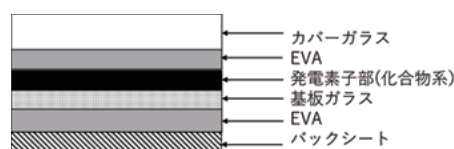
Keywords: CIS solar panels, Recycling, Selenium, Aggregates, Environmental safety, mortar

1. はじめに

近年、太陽光発電は二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーとして注目されており、2012年に固定価格買取制度が制定されて以降太陽光パネルの導入容量は急激に増加し、2014年の8.4GWをピークに2016年以降年間約5GWを現在まで維持している¹⁾。一方、太陽光パネルは耐用年数が20~30年とされているため、将来的には太陽光パネルが大量に廃棄され、太陽光パネル廃棄量は世界では2030年に170万トン²⁾、2050年には6000~7800万トン³⁾、日本では2030年代後半に年間約50~80万トン⁴⁾に上ると推定されている。2030年代後半に廃棄されると予測される太陽光パネル80万トンを全て埋め立てると仮定し、その廃棄量を令和元年度の産業廃棄物最終処分量(916万トン)⁵⁾と比較すると約8.7%に相当し、最終処分場の容量



a) シリコン系太陽光パネル



b) 化合物系太陽光パネル

図1. 太陽光パネルの構造.

を大きく圧迫すると予想される。よって、最終処分場の延命化を図るためには、太陽光パネルのリサイクルが必要である。

太陽光パネルにはシリコン系と化合物系の2種類がある。図1に太陽光パネルの構造を示す。シリコン系太陽光

a) 土木環境工学プログラム教授

b) ソーラーフロンティア株式会社

c) 土木環境工学プログラム准教授

パネルは、カバーガラス、EVA（封止剤、エチレン酢酸ビニル）、発電素子部（シリコンを含む）、バックシートを層状に組み合わせた構造であり、化合物系太陽光パネルは、カバーガラス、EVA、発電素子部、基板ガラス、EVA、バックシートを層状に組み合わせた構造である⁶⁾。シリコン系太陽光パネルには有害物質であるPb、Sbが、化合物系太陽光パネルにはCd、Pb、Se、Sbが多く含まれている⁷⁾。以上より、太陽光パネルは有害物質であるPb、Cd、As、Sb、Seを含んでいるので、リサイクルする場合、太陽光パネルに含まれている有害物質についての環境安全性評価をすることが重要である。

有害物質を溶出させずに太陽光パネルをリサイクルする方法の一つとして太陽光パネルをコンクリート用骨材として利用する方法がある。太陽光パネルを用いた細骨材でコンクリートを製造すると、セメントによる不溶化により有害物質の溶出抑制が期待される。汚染土壌のセメント処理においてFについては、カルシウムとフッ化カルシウム（CaF₂）の生成による沈殿^{8、9)}やエトリンサイト（Ca₂Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂・26H₂O）のSO₄²⁻基、OH⁻基とF⁻の置換¹⁰⁾による不溶化の報告がある。CdについてはC-S-H（3CaO・2SiO₂・3H₂O）のSiO₂基との結合¹¹⁾やCaCO₃のCa²⁺とCd²⁺のイオン交換、不溶性のCdCO₃の生成¹²⁾による不溶化との報告がある。Pbについては3PbCO₃・2Pb(OH)₂・H₂Oの沈殿¹³⁾、水酸化鉛Pb(OH)₂としての沈殿¹⁴⁾、C-S-H表面への吸着¹⁵⁾による不溶化の報告がある。CrについてはC-S-Hへの吸着^{16、17)}やエトリンサイト中のSO₄²⁻とCrO₄²⁻の置換¹⁸⁾、モノカーボネート水和物（Ca₄Al₂(OH)₁₂・CO₃・5H₂O）中の炭酸イオンとクロム酸イオンの置換¹⁹⁾による不溶化の報告がある。Seについては、C-S-H、モノサルフェート水和物（3CaO・Al₂O₃・CaSO₄・12H₂O）、エトリンサイト、水酸化カルシウムへの吸着による不溶化の報告がある¹⁶⁾。Asについては、Ca₃AsO₄・xH₂OやCaNaAsO₄・7.5H₂Oの生成による不溶化²⁰⁾、Sbについては、C-S-Hゲルへの吸着²¹⁾による不溶化の報告がある。

太陽光パネルを骨材として用いた例として、化合物系太陽光パネルを粉砕したものを細骨材の20%まで代替して作製したコンクリートの圧縮・曲げ強度について検討した事例において、TCLP試験によるPb、Se溶出濃度が定量限界（50μg/L）以下との報告があるが²²⁾、海外の報告であるため日本の基準に適合するか不明である。日本においては一瀬が、Si系太陽光パネルについてカバーガラスを除いた部材から湿式分離により有価物が回収された残渣とカバーガラスの混合物を100%細骨材代替としたコンクリートからの有害物質の溶出について、セメントと混合することによる不溶化や希釈効果により環境基準を満足することを示した²³⁾。しかし、化合物系太陽光パネルについては検討されていない。

そこで本研究では化合物系太陽光パネルのうち、有害物質であるSeを多く含むCIS系太陽光パネルについてカバーガラス・EVA・CIS・バックシートと基板ガラスを分離し、

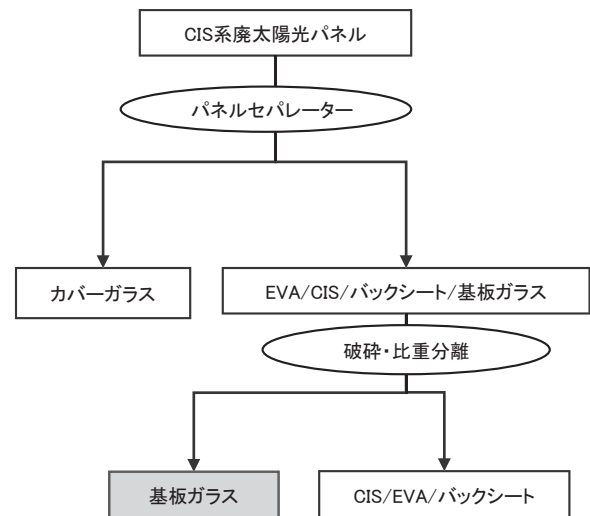


図2. CIS系太陽光パネルの処理/

回収された基板ガラスをモルタル用骨材として利用した場合の環境安全性評価を目的とした。さらに、太陽光パネルの埋め立て処分の可能性についても検討した。

2. 実験方法

2.1 試料と粒度調整

実験に用いた試料はソーラーフロンティア株式会社国富工場においてCIS系太陽光パネルからフレームを取り外した後、パネルセパレーターでカバーガラスとEVA・発電素子部・バックシート・基板ガラス（以後剥離残渣と呼ぶ）に分離し、さらに剥離残渣を破砕、比重選別を行うことでCIS・EVA・バックシートを除去した残渣である基盤ガラス（以後残渣基板ガラスと呼ぶ。概ね2mm以下）が提供された（図2参照）。ただし、残渣基板ガラスには未分離のCIS・EVA・バックシートが混入している。提供された残渣基板ガラスから2mm以上の物を取り除いてから、試料をJIS A 5011-1 付属書Cに準拠して廃太陽光パネル骨材としての溶出試験・含有量試験のための粒度調整および、廃太陽光パネル利用模擬試料作成のための骨材として用いた。

2.2 モルタル供試体の作製と粒度調整

廃太陽光パネル利用模擬試料（以後、SFSSと呼ぶ。）の溶出試験用および含有量試験用供試体作製のために5cmφ×10cmの円柱モールド2本を使用した。供試体作製のための普通ポルトランドセメント、水、砂、廃太陽光パネル骨材の配合を表1に示す。廃太陽光パネル骨材と砂の置換率は廃太陽光パネル骨材置換率0%（表中のM0-0）の砂に対する置換した廃太陽光パネル骨材の体積百分率である。廃太陽光パネル骨材の密度は実測した見かけ密度（1520kg-dry/m³）を用いた。なお、M0-0の配合は既往の研究²⁴⁾におけるプレーンモルタルの配合に従った。表1に

表 1. 廃太陽光パネル利用模擬試料とモルタル試料の配合条件.

	試料 ID	砂と廃太陽光パネルの置換率 (%)	セメント (g)	水 (g)	砂 (g)	廃太陽光パネル骨材 (g)		
廃太陽光パネル利用 模擬試料	SFSS-0.1	0.1	306	153	669	0.38		
	SFSS-1	1			663	3.8		
	SFSS-10	10			603	38		
	SFSS-100	100			0	380		
モルタル試料	MO-0	0			306	153	670	0
	MO-0.1	0.1					669	
	MO-1	1					663	
	MO-10	10					603	
	MO-100	100					0	

示している配合条件に従って、材料を混合用ボウルに加え、混練り機（マルイ、MIC-362-1）にセットし 1 回 2 分を 3 セット混練りを行った。打設方法は円柱モールド 2 本にボウル内容物を 3 回に分けて気泡を抜きながらモールドに充填し重量を測定した。その後モールド上面をラップで覆い、輪ゴムで止めて 1 週間養生した。

1 週間養生した利用模擬試料を脱型した後、ブレーキクラッシャー（マルイ、MIC-198-0-02 型）で粗粉碎し、必要に応じてブラウン横粉碎機（マルイ、MIC-189-0-11 型）で粉碎し、さらに乳鉢を用いて微粉碎し、溶出試験・有量試験のための粒度調整を行った。

セメント中の有害物質の影響を評価するために、セメントと水、砂を用い、利用模擬試料の配合条件から廃太陽光パネル骨材を除いたモルタル（以後、MO と呼ぶ。）を作成した。打設方法、養生方法、粒度調整は利用模擬試料と同じ方法で行った。

2.3 溶出試験

2.3.1 JIS 溶出試験

JIS A 5011-1 付属書 C に準拠し、試料の溶出量試験を行った。材質がポリプロピレンの容器（容量 1.6L）に試料 100g を取り蒸留水 1000mL を添加し、200rpm で 6 時間攪拌を行った後 10 分ほど静置し、上澄みを 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP-AES、ICP-MS 分析用試料としてろ液を 100mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.5mL 加えた。F 分析用試料としてろ液を 100mL 取り、冷蔵庫に保存した。最後に、残った上澄み液を用いて pH と EC を測定した。溶出試験の繰り返し回数は 1 回とした。

2.3.2 13 号溶出試験

環境庁告示 13 号に準拠して溶出試験を行った。ただし、試料は 50g とし、蒸留水 500ml を 1L のポリプロピレンのポリ瓶に入れて行った。200rpm で 6 時間振とう後に約 10 分間静置し、上澄みをガラス繊維濾紙（Whatman、GF/B）を用いて吸引ろ過し、分析試料を得た。残った上澄みの pH と EC を測定した。溶出試験で得られたろ液は ICP-AES、ICP-MS 用に 100ml 採取してポリ瓶に入れ、濃硝酸 0.5ml を加えて保存し、F、T-Cr 分析用に 50ml 採取し、

保存した。溶出試験は繰り返し 1 回行った。

2.4 含有量試験

JIS A 5011-1 付属書 C に準拠し、試料の含有量試験を行った。T-Cr 以外の物質については、材質がポリプロピレンのポリ瓶 500mL に試料 6g を取り 1mol/L の塩酸 200mL を添加し、200rpm で 2 時間振とうを行った後 10 分ほど静置し、上澄み 150mL 程度をビーカーに取って 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した。T-Cr に関しては、炭酸ナトリウム 0.53g 及び炭酸水素ナトリウム 0.84g を量り採り、蒸留水 1L で完全に溶解させた六価クロム用溶出溶媒を用いて試料 6g に対して溶媒 200mL 加えて 200rpm で 2 時間振とうを行った後 10 分ほど静置し、上澄みを 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP-AES、ICP-MS 分析用試料としてろ液を 50mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.25mL 加えた。F 分析用試料として 50mL ろ液を取り、冷蔵庫に保存した。含有量試験の繰り返し回数は 3 回とした。

2.6 分析方法

B、Al、Fe、Co、Ni、Cu、Zn は ICP（SHIMADZU、ICPS-8100）により、Cd、Pb、T-Cr、As、Sb、Se は ICP-MS（アジレント・テクノロジー、Agilent7850）により分析した。F はイオンクロマトグラフ（日本ダイオネクス（株）製 ICS-1100、カラム AS4A-S、溶離液 Na₂CO₃1.8mol/L/NaHCO₃1.7mol/L）により分析した。F の含有量試験試料に関しては、比色管に試料を 1mL 取り、蒸留水を 9mL、200g/L 硝酸銀を 1mL 加え、よく攪拌した後に 10 分ほど放置した後に 0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過したろ液を分析に用いた。

3. 結果と考察

3.1 粒度調整結果

溶出試験用試料の粒度調整結果を表 2 に示す。廃太陽光パネル骨材は提供された試料が 2mm 以下であったので 2.5mm 以下の割合が 100% となった。それ以外の試料は粒径が 40~20mm の割合が少ないが、粒径が 20~5mm の割合と合わせると 70±10% を満たした。MO-100 は粉碎しすぎて粒径が JIS の規定より細くなってしまったが、特定の粒度

表 2. 溶出試験用試料粒度調整結果 (%) .

試料 ID	40~ 20mm	20~ 5mm	5~ 2.5mm	2.5mm 以下
廃太陽光パネル 骨材試料	0	0	0	100
SFSS-0.1	0	70	10	19
SFSS-1	0	66	12	22
SFSS-10	0	70	11	20
SFSS-100	0	74	6	20
MO-0	0	65	12	23
MO-0.1	0	68	10	22
MO-1	0	68	11	21
MO-10	0	72	10	17
MO-100	1	16	47	35
JIS 粒度基準	30±5	40±5	10±5	20±5

注: 特定の粒度区分の試料が不足する場合は, より大きい粒度区分の試料を破碎して追加してもよい.

表 3. 含有量試験用試料粒度調整結果 (%) .

試料 ID	2.36~ 0.6mm	0.6~ 0.15mm	0.15mm 以下
廃太陽光パネル 骨材試料	45	29	26
SFSS-0.1	53	27	21
SFSS-1	56	24	21
SFSS-10	50	30	20
SFSS-100	50	30	20
MO-0	53	27	20
MO-0.1	50	30	20
MO-1	54	26	20
MO-10	52	28	21
MO-100	53	26	21
JIS 粒度基準	50±5	25±5	25±5

表 5. モルタル試料の有害物質含有量 (mg/kg) .

試料名	平均								標準偏差							
	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
MO-0	<150	<4	14	<40	<4	<4	<4	<4	-	-	0.1	-	-	-	-	-
MO-0.1	<150	<4	10	<40	<4	<4	<4	<4	-	-	0.1	-	-	-	-	-
MO-1	<150	<4	10	<40	<4	<4	<4	<4	-	-	0.2	-	-	-	-	-
MO-10	<150	<4	10	<40	<4	<4	<4	<4	-	-	0.1	-	-	-	-	-
MO-100	<150	<4	28	50	<4	<4	<4	<4	-	-	0.03	1	-	-	-	-
環境安全 品質基準	4000	45	150	4000	250*	150	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*: 六価クロムとしての基準

表 4. 廃太陽光パネル骨材試料の有害物質含有量 (mg/kg) .

試料名	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
廃太陽光パ ネル骨材試 料	<150	<4	<4	<40	<4	<4	<4	<4
環境安全品 質基準	4000	45	150	4000	250*	150	150	-

*: 六価クロムとしての基準

区分の試料が不足する場合は, より大きい粒度区分の試料を破碎して追加してもよいので基準を満たしている。含有量試験用試料の粒度調整結果を表 3 に示すが, すべての試料で粒度基準を満たしていた。

3.2 JIS 含有量試験結果

表 4 に廃太陽光パネル骨材試料の有害物質の含有量試験結果を示す (3 回の平均)。すべての有害物質の含有量は定量限界以下で, 含有量試験の環境安全品質基準を満たした。

表 5 にモルタル試料の含有量試験結果の平均値と標準偏差を示す。いずれの置換率においても, すべての有害物質含有量は環境安全品質基準を満足した。Pb が比較的高い含有量を示した。

表 6. 廃太陽光パネル利用模擬試料の有害物質含有量 (mg/kg) .

試料名	F	Cd	B	T-Cr	As	Sb
SFSS-0.1	<150	<4	<40	<4	<4	<4
SFSS-1	<150	<4	<40	<4	<4	<4
SFSS-10	<150	<4	<40	<4	<4	<4
SFSS-100	<150	<4	<40	<4	<4	<4
環境安全 品質基準	4000	45	4000	250*	150	-

*: 六価クロムとしての基準

表 6 に Se と Pb を除いた有害物質についての廃太陽光パネル利用模擬試料の含有量試験結果を示すが, すべての有害物質において定量下限値以下であった。また, 図 3 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Pb の含有量試験結果を示す。Pb はすべての置換率で定量下限値である 4mg/kg を超えたが, 環境安全品質基準を満足した。置換率が 100%では含有量が約 15mg/kg あり, 置換 10%での含有量は置換率 100%の場合の 2/3 倍に減少し, それ以下ではほぼ一定であった。図 4 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 含有量を示す。Se 含有量は置換率が 0.1%, 1%の試料は定量下限である 4mg/kg 以下であったので含有量は 0 とプロットした。置換率が 100%では含有量は 95mg/kg であり環境安全品質基準を満足した。置換率が低下するにつれて含有量も低下

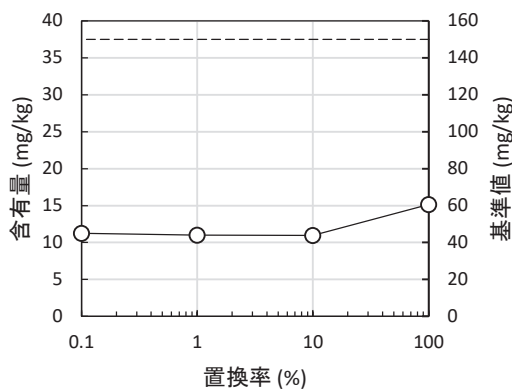


図 3. 廃太陽光パネル利用模擬試料の Pb 含有量 (点線：環境安全品質基準値)。

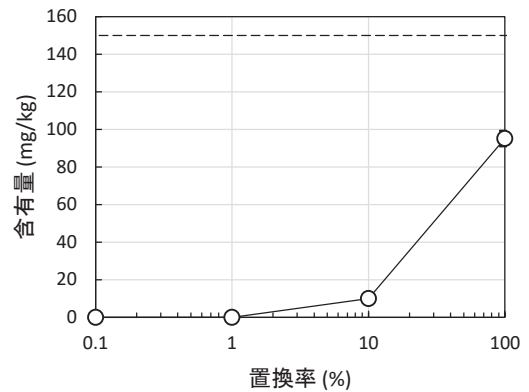


図 4. 廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 含有量 (点線：環境安全品質基準値)。

表 7. 廃太陽光パネル骨材試料の有害物質溶出量 (mg/L)。

試料名	溶出液 pH	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
廃太陽光パネル骨材試料	8.35	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.049	0.25	<0.001	<0.001
環境安全品質基準	-	0.8	0.003	0.01	1	0.05*	0.01	0.01	0.02**

*：六価クロムとしての基準，**：公共用水域の要監視項目の指針値

陽光パネル骨材含有量が定量限界にもかかわらず、廃太陽光パネル利用模擬試料から検出された理由として、廃太陽光パネル骨材をセメントと混合することにより、含有量試験での何らかの溶出促進効果が生じた可能性が考えられた。なお、ICP-MS 分析試料中の共存物質による Se 分析への干渉がないことを標準添加法により確認した。

図 5 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Pb 含有量に対するセメント・水・砂の希釈指標と置換率の関係を示す。希釈指標とは含有量の実測値に対する希釈効果を想定した含有量の予測値として定義した。予測値は利用模擬試料を作成する際の配合条件の合計重量に対するセメント・水・砂の合計の重量比および廃太陽光パネル骨材の重量比をモルタル試料および廃太陽光パネル骨材の含有量にそれぞれ乗じて合計したものである。利用模擬試料の含有量が希釈効果による場合は希釈指標が 1 となる。希釈指標が 0.9~1.0 の範囲にあり 1 に近いことから利用模擬試料の Pb 含有量はセメント・水・砂の希釈効果のみの影響を受けることがわかった。

以上より含有量試験の観点から評価すると、廃太陽光パネル骨材試料および廃太陽光パネル利用模擬試料はすべての有害物質の含有量が環境安全品質基準を満足したので、廃太陽光パネルはモルタル用骨材として利用可能であると言えた。

3.3 JIS 溶出量試験結果

表 7 に廃太陽光パネル骨材試料の有害物質の溶出試験結果を示す。pH は弱アルカリ側であった。Se 溶出量は環境安全品質基準の約 25 倍である 0.25mg/L であった。これは CIS 系太陽光パネルの発電素子部に Se が多く含まれて

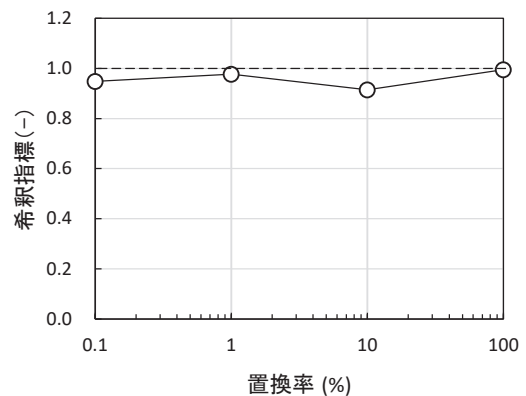


図 5. 廃太陽光パネル利用模擬試料の Pb 含有量に対するセメント・水・砂の希釈効果。

いることが原因と考えられる。T-Cr 溶出量は六価クロムの環境安全品質基準に近い値を示した。それ以外の有害物質溶出量は定量下限以下であった。

表 8 にモルタル試料の有害物質の溶出試験結果を示す。pH はすべての置換率において 12 を超えていた。T-Cr についてはいずれの置換率でも 0.01~0.03mg/L 程度で一定であった。F と Pb、B については置換率 100%で定量下限以上であったが、いずれも環境安全品質基準を満足した。それ以外の置換率では溶出量は定量下限以下だった。Cd、Se、As、Sb の溶出量はすべての置換率で定量限界以下だった。

表 9 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 以外の有害物質の溶出試験結果を示す。pH はすべての置換率で 12 を超えたが、これはセメントと混合したことによる。T-Cr についてはいずれの置換率でも 0.015mg/L 程度で一定であ

表 8. モルタル試料の有害物質溶出量 (mg/L) .

試料名	溶出液 pH	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
MO-0	12.68	<0.5	<0.001	0.001	<0.01	0.020	<0.001	<0.001	<0.001
MO-0.1	12.65	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.017	<0.001	<0.001	<0.001
MO-1	12.66	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.015	<0.001	<0.001	<0.001
MO-10	12.64	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.012	<0.001	<0.001	<0.001
MO-100	13.14	0.6	<0.001	0.002	0.01	0.032	<0.001	<0.001	<0.001
環境安全品質基準	-	0.8	0.003	0.01	1	0.05*	0.01	0.01	0.02**

* : 六価クロムとしての基準, ** : 公共用水域の要監視項目の指針値

表 9. 廃太陽光パネル利用模擬試料の有害物質溶出量 (mg/L) .

試料名	溶出液 pH	F	Cd	Pb	B	T-Cr	As	Sb
SFSS-0.1	12.69	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.015	<0.001	<0.001
SFSS-1	12.83	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.017	<0.001	<0.001
SFSS-10	12.78	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.014	<0.001	<0.001
SFSS-100	12.83	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.013	<0.001	<0.001
環境安全品質基準	-	0.8	0.003	0.01	1	0.05*	0.01	0.02**

* : 六価クロムとしての基準, ** : 公共用水域の要監視項目の指針値

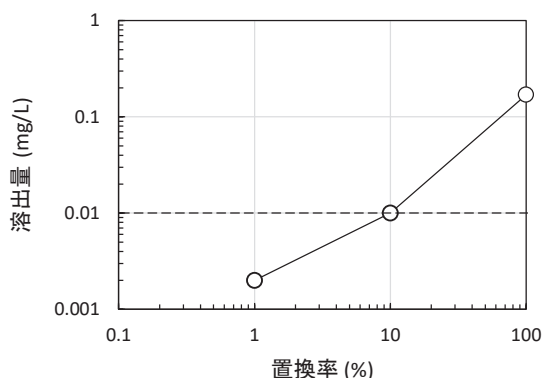


図 6. 廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 溶出量 (点線 : 環境安全品質基準値) .

った。F、Cd、Pb、B、As、Sb の溶出量はすべての置換率で定量限界以下であった。図 6 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 溶出量を示す。Se は置換率 100%では環境安全品質基準の 17 倍の 0.17mg/L 溶出した。廃太陽光パネル利用模擬試料の Se は廃太陽光パネル骨材由来であると考えられる。置換率 10%では環境安全品質基準である 0.01mg/kg であった。置換率 1%では環境安全品質基準を満足し、置換率 0.1%では定量下限以下であった。

図 7 に廃太陽光パネル利用模擬試料の T-Cr 溶出量に対するセメント・水・砂の希釈指標と置換率の関係を示す。溶出量の希釈指標は、含有量の希釈指標の計算の含有量を溶出量に置き換えて同様に計算した。T-Cr は置換率が 0.1~10%までは希釈指標が 0.9~1.1 の範囲にあり 1 に近いことから利用模擬試料の Pb 含有量はセメント・水・砂の希釈効果のみの影響を受けているが、置換率 100%の場合

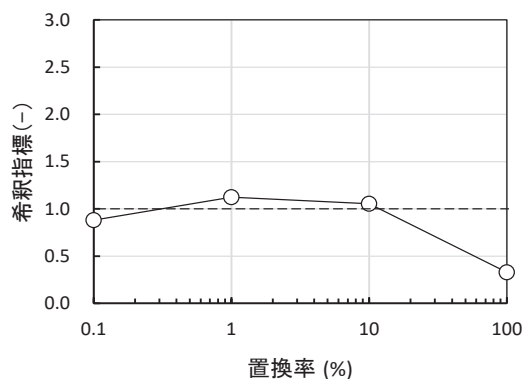


図 7. 廃太陽光パネル利用模擬試料の T-Cr 溶出量に対するセメント・水・砂の希釈効果.

は希釈指標が 0.32 で 1 よりも小さいことからセメントと混合することで溶出抑制が見られた。これは、セメント生成物による吸着¹⁶⁾や置換¹⁹⁾作用によると考えられた。

図 8 に廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 溶出量に対するセメント・水・砂の希釈効果を示す。Se は 0.1%以外の置換率で希釈指標が 1 を超えており、希釈効果以上に Se が溶出した。これは含有量と同様にセメントと混合することにより、溶出試験で何らかの溶出促進効果が生じた可能性が考えられた。

以上より、溶出試験の観点から評価すると、廃太陽光パネル骨材試料の Se 溶出量が環境安全品質基準を満足しなかったが、置換率 10%以下の利用模擬試料で満足したことから置換率 10%以下の条件で廃太陽光パネルはモルタル用骨材として利用可能であると言えた。

表 10. 廃太陽光パネル骨材試料の 13 号溶出試験結果 (mg/L) /

試料名	溶出液 pH	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
廃太陽光パネル骨材	8.37	<0.5	<0.001	<0.001	0.02	0.001	0.36	<0.001	<0.001
埋め立て基準	-	-	0.09	0.3	-	1.5	0.3	0.3	-

3.4 13 号溶出試験結果

表 10 に 13 号溶出試験による廃太陽光パネル骨材試料の溶出試験結果を示す。pH はアルカリ側であった。Se は埋め立て基準である 0.3mg/L を超え、廃太陽光パネルは何らかの中間処理を行わない限り管理型最終処分場に処分することができないことが分かった。なお、CIS 系廃太陽光パネルモジュールすべてを対象とした環境庁告示 13 号溶出試験による溶出濃度として 1.07mg/L の報告があるが²⁵⁾、本研究での Se 溶出濃度はこの約 1/3 倍であった。

4. まとめ

本研究では CIS 系太陽光パネルについてカバーガラス・EVA・CIS・バックシートと基板ガラスを分離し、回収された基板ガラスをモルタル用骨材として利用した場合の環境安全性評価と太陽光パネルの埋め立て処分の可能性について検討した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) CIS 系廃太陽光パネル骨材試料および CIS 系廃太陽光パネル利用模擬試料はすべての有害物質の含有量が環境安全品質基準を満足していたので、含有量の観点から CIS 系廃太陽光パネルはモルタル用骨材として利用可能であると言えた。
- (2) CIS 系廃太陽光パネル骨材試料の Se 溶出量が環境安全品質基準を満足しなかったが、置換率 10%以下の利用模擬試料で満足したことから置換率 10%以下の条件で CIS 系廃太陽光パネルは溶出量の観点からモルタル用骨材として利用可能であると言えた。以上より、含有量と溶出量の観点から置換率 10%以下の条件で CIS 系廃太陽光パネルはモルタル用骨材として利用可能であると言えた。
- (3) CIS 系太陽光パネル骨材をセメントと混合することにより、含有量試験および溶出試験において CIS 系廃太陽光パネル骨材からの何らかの Se 溶出促進効果が生じた可能性が考えられた。
- (4) Se の溶出濃度は埋め立て基準である 0.3mg/L を超え、CIS 系廃太陽光パネルは何らかの中間処理を行わない限り管理型最終処分場に処分することができないことが分かった。

謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務により得られたものである。本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学生の萩元偉琉君の協力を得た。

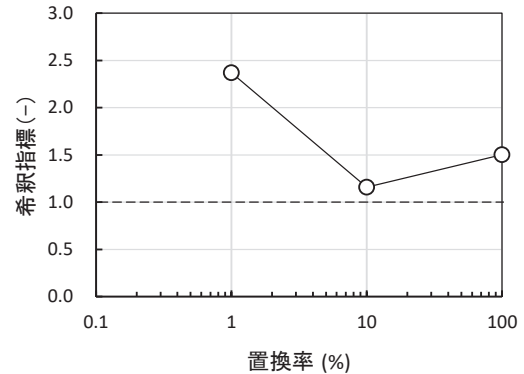


図 8. 廃太陽光パネル利用模擬試料の Se 溶出量に対するセメント・水・砂の希釈効果。

参考文献

- 1) 一般社団法人、太陽光発電協会：太陽光発電の現状と自立化・主力化に向けた課題、第 71 回調達価格等算定委員会 員 会 https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/071_01_00.pdf (閲覧日 2024. 4. 22)
- 2) S. Weckend, A. Wade, and G. Heath: End of life management solar photovoltaic panels, International Renewable Energy Agency, 2016.
- 3) R. Ferroukhi, J. Sawin, and F. Sverisson: Rethinking energy 2017, International Renewable Agency, 2017.
- 4) 島村安俊：欧州における使用済み太陽電池モジュールの回収・リサイクル・適正処分、廃棄物資源循環学会誌、Vol. 30、No. 6、pp. 403-407、2019.
- 5) 環境省：産業廃棄物の排出・処理状況等 (令和元年度実績)、<https://www.env.go.jp/press/110498.html> (閲覧日 2024. 4. 22)
- 6) 瀬川昇：使用済み太陽光システムのリユースおよびリサイクル事業、廃棄物資源循環学会誌、Vol. 30、No. 6、pp. 393-402、2019.
- 7) 環境省：太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書、http://www.env.go.jp/council/03recycle/2015/10/21/ref03_2.pdf (閲覧日 2023. 4. 22)
- 8) Y. Zhao, Y. Zhang, Z. Zhao, X. Maa, and Y. Caia: Solidification performances of contaminants by red mud-based cementitious paste filling material and leaching behavior of contaminants in different pH and redox potential environments, Water Science & Technology, Vol.85, No.3, pp.731-745, 2021.
- 9) Y. Da, T. He, C. Shi, M. Wang, and Y. Feng: Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal, Journal of Hazardous Materials,

- Vol.403, pp.1-13, 2021.
- 10) 亀井健史、蓬萊秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発、地盤工学ジャーナル、Vol. 4, No. 1, pp. 91-98, 2009.
 - 11) M. Liu, Y. Zhao, Z. Yu and Z. Cao: Impact of Ni (II) and Cd (II) on the hydration and microstructure of cement pastes for immobilization: C-A-S-H composition and binding characteristic Construction and Building, Materials, Vol.310, 2021.
 - 12) W. Li, J. Qin, and Y. Yi: Carbonating MgO for treatment of manganese- and cadmium- contaminated soils, Chemosphere, Vol.263, 2021.
 - 13) W. Li, J. Qin, and Y. Yi: Treating Pb-contaminated clay slurry by three curing agents, Chemosphere, Vol.303, 2022.
 - 14) V.R. Ouhadi, R.N. Yong, and M. Deiranlou: Enhancement of cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay, Journal of Hazardous Materials, Vol.403, 2021.
 - 15) Y. Wang, W. Ni, S. Zhang, J. Li, and P. Suraneni: Optimal mixture designs for heavy metal encapsulation in municipal solid waste incineration fly ash, Applied Sciences, Vol.10, 6948, 2020.
 - 16) 橋本敦美、伊藤靖、佐藤道生、羽原俊祐：合成したセメント水和生成物による微量元素(六価クロム、ヒ素、セレン、ホウ素、フッ素およびアルミニウム)の固定化について、セメント・コンクリート論文集、Vol. 66、pp. 71-78、2012.
 - 17) M. Quina, J. Bordado, and R. Quinta-Ferreira: Treatment and use of air pollution control residues from msw incineration: An overview, Waste Management, Vol.28, pp. 2097-2121, 2008.
 - 18) O. Peyronnard, M. Benzaazoua, D. Blanc, and P. Moszkowicz: Study of mineralogy and leaching behavior of stabilized/solidified sludge using differential acid neutralization analysis Part I: Experimental study, Cement and Concrete Research, 39, pp.600-609, 2009.
 - 19) 依田侑也、大場陽子、坂井悦郎：高炉スラグを多く含むセメント系材料による六価クロムの固定、セメント・コンクリート論文集、Vol. 64, pp. 42-47、2010.
 - 20) G. Cornelis, C. Johnson, T. Gerven, and C. Vandecasteele: Leaching mechanisms of oxyanionic metalloids and metal species in alkaline solid wastes: A review, Applied Geochemistry, Vol.23, pp.955-976, 2008.
 - 21) Y. Li, W. Ni, W. Gao, S. Zhang, P. Fu, and Y. Li: Study on solidification and stabilization of antimony-containing tailings with metallurgical slag-based binders, Materials, Vol.15, 1780, 2022.
 - 22) C. Pavlopoulos, M. Kelesi, D. Michopoulos, K. Papadopoulou, T. Lympelopoulou, A. Skaropoulou, S. Tsivilis, and G. Lyberatos: Management of end-of-life photovoltaic panels based on stabilization using Portland cement, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Vol.27, 2022.
 - 23) 土手裕、原田秀樹、関戸知雄：シリコン系太陽光パネルセルのコンクリート用細骨材としての環境安全性評価、廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 34, pp. 23-29, 2023.
 - 24) 川畑勇輝、李春鶴、塩盛弘一郎、原田秀樹：異なる成分の太陽光パネル廃ガラスを用いたモルタルの性能評価に関する研究、第75回セメント技術大会講演要旨、pp. 96-97、2021
 - 25) 環境省：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン 第二版、<https://www.env.go.jp/content/900512721.pdf> (閲覧日 2024. 4. 22)