



太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての
環境安全性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2023-11-01 キーワード (Ja): キーワード (En): Solar panels, Hazardous heavy materials, Fine aggregates, Environmental safety 作成者: 土手, 裕, 原田, 秀樹, 関戸, 知雄 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/0002000279

太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての環境安全性

土手 裕^{a)}・原田秀樹^{b)}・関戸 知雄^{c)}

Environmental Safety of Solar Panel Components Used as Fine Aggregate for Concrete

Yutaka DOTE, Hideki HARADA, Tomoo SEKITO

Abstract

In order to evaluate the environmental safety of solar panel components as fine aggregate for concrete, the leaching tests and content tests of hazardous heavy metals were conducted about etched and un-etched samples. In the un-etched samples, the leaching concentrations and contents of F and Pb didn't satisfy the Environmental Quality Standards for Soil Pollution. In particular, the leaching concentration of Pb from battery cell was 4500 times higher than the Standards. Although an etching treatment was effective in reducing the leaching concentrations and contents, the concentrations and contents of Pb after etching could not satisfy the Standards. The leaching concentrations of Pb and Se from some of etched samples which satisfied the Leaching Standards before etching could not satisfy the Standards. It was considered that mixing etched solar panel components with cement might satisfy the Standards owing to the insolubilization and dilution effect of mixing with cement when the components were used as fine aggregate.

Keywords: Solar panels, Hazardous heavy materials, Fine aggregates, Environmental safety

1. はじめに

太陽光発電が一般家庭に本格的に導入されるようになったのは1990年代頃からで、地球温暖化対策として再生可能エネルギーへの期待が高まったことや、2012年に制定された固定価格買取制度(FIT法)が開始されたことから、導入量が増加し¹⁾、2018年には全国で約55.5GW、2019年には約61.8GWの太陽光パネルが設置されている²⁾。太陽光パネルの耐用年数は約20~30年とされており³⁾、今後寿命を迎えた使用済みの太陽光パネルが大量に廃棄され、2040年度には廃棄量が年間約80万トンにもなると推測されているが⁴⁾、この廃棄量は2018年の日本全体の産業廃棄物最終処分量の約8.6%に相当する。また、不法投棄の懸念⁵⁾や自然災害による廃棄物の増加も問題となっている⁶⁾。そのため、適正かつ環境安全性を考慮したリサイクル方法の確立が重要な課題である。

太陽光パネルには発電素子部の素材によって、主にシリコン系と化合物系の2種類がある⁶⁾。図1に太陽光パネルの構造を示す。シリコン系太陽光パネルは主にカバーガラス、封止材(エチレン酢酸ビニル共重合樹脂(Ethylene Vinyl Acetate Copolymer)、EVAと表記する)、発電素子

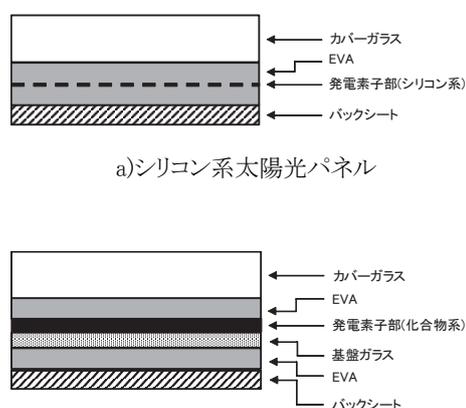


図1 太陽光パネルの構造。

部、バックシートから構成され、発電素子部の素材がシリコンである。化合物系太陽光パネルは主にカバーガラス、EVA、発電素子部、基板ガラス、バックシートから構成され、化合物系の発電素子部では主にCIS(銅、インジウム、セレン)が用いられている。シリコン系、化合物系の両方の部材となっているカバーガラスは太陽光パネルの6~7割を占めており、シリコン系のカバーガラスにはAsやSbといった有害物質が含まれる⁷⁾。EVAは加熱・加圧するこ

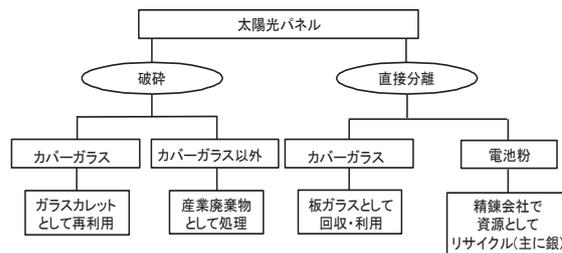
a) 土木環境工学プログラム教授
b) ソーラーフロンティア株式会社
c) 土木環境工学プログラム准教授

とで発電素子部、ガラス、バックシートと接着させているため、発電素子部とEVAを分離することは極めて困難である。バックシートは耐候性、電気絶縁性、耐薬品性、EVAとの接着性などが要求され、PETなどの有機フィルムを多積層させたものとなっている⁸⁾。含有量については、素子部の電極に10,000mg/kg以上の含有量としてCu、Zn、Agの有価物が、有害物質としてハンダ由来するPbが含まれ、1,000-10,000mg/kgの含有量として、シリコン系・化合物系ともガラス・EVA・結晶・バックシート混合物にPb、Sb、シリコン系のカバーガラスにSbが含まれ、化合物系のガラス・EVA・結晶・バックシート混合物に100-1,000mg/kgのSe、Cdが含まれるとの報告がある⁷⁾。溶出試験により、シリコン系の素子部の電極からPbが埋立基準(0.3mg/L)を大きく超える500mg/Lの溶出濃度や、化合物系の素子部からSeが埋立基準(0.3mg/L)を超えないが、0.06mg/Lの溶出濃度が報告されている⁷⁾。以上のように、太陽光パネルには有害な重金属が含まれ、リサイクルに際して環境汚染を引き起こす可能性がある。

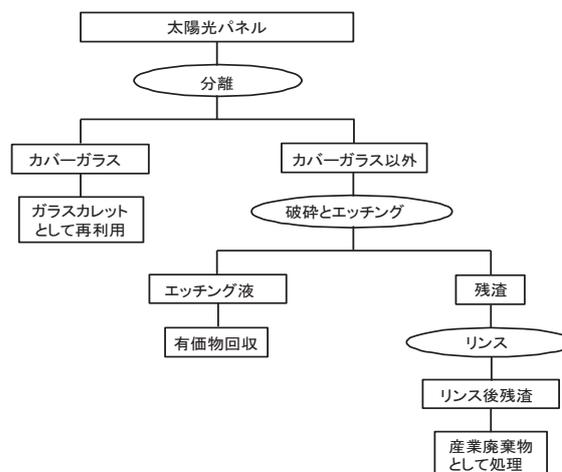
太陽光パネルをリサイクルする上で、部材別に分離することが必要である。図2に太陽光パネルの分離フローを示す。シリコン系太陽光パネルの場合は、部材別に分離する方法として破碎と直接分離の2種類がある。破碎処理の場合、太陽光パネルを破碎・湿式比重選別し、分離されたカバーガラスはガラスカレットとして再利用され、カバーガラス以外は産業廃棄物として処分される。分離処理の場合は、金属ブラシを用いてバックシート・EVA・素子部の順に削りとり、カバーガラスは板ガラスとして回収・利用され、カバーガラス以外は精錬会社で資源としてリサイクルされる⁶⁾。化合物系太陽光パネルの場合は、加熱等によって、カバーガラスを太陽光パネルから分離し、分離されたカバーガラスはガラスカレットとして再利用される。カバーガラス以外は破碎とエッチングを行い、エッチング液から有価物を回収し、残渣はリンスを行い、産業廃棄物として処理される⁹⁾。

このように、太陽光パネルの様々なリサイクル技術の開発が進められているが、まだ実用化には至っておらず、実証中である。その理由として、有価物としての回収対象にはならないカバーガラス以外(EVA・素子部・基盤ガラス)について有害物質の溶出が懸念されるからである。そのため、環境に配慮したリサイクル技術を開発する必要がある。

回収物のリサイクル方法の1つとしてコンクリート細骨材代替が考えられる。太陽光パネルリサイクル残渣のコンクリート細骨材代替利用における環境安全性についての研究は報告されていない。一方、汚染土壌をセメントを用いて不溶化する研究が行われており、その不溶化メカニズムとして、Cd、Pb、Cr(VI)、Se、Asはそれぞれ、 CdCO_3 ¹⁰⁾、 Pb(OH)_2 や PbCO_3 ¹¹⁾、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCrO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ¹²⁾、



a)シリコン系太陽光パネル



b)化合物系太陽光パネル

図2 太陽光パネルの分離フロー。

$\text{CaSe}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、や $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SeO}_4)_2 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ¹³⁾、 $\text{Ca}_4(\text{OH})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ¹⁴⁾といった不溶化物を生じることで不溶化することが報告されている。また、Fはエトリンサイト($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)生成段階で OH^- 基や SO_4^{2-} 基と置換し、エトリンサイト内部に F^- がイオン交換して取り込まれて不溶化する報告がある¹⁵⁾。BとSbの不溶化メカニズムの報告は見られなかった。

本研究の目的は、化合物系の太陽光パネル(SF系)とシリコン系太陽光パネル(Si系)のエッチング後の太陽光パネル部材をコンクリート用細骨材として利用した場合の細骨材としての環境安全性を評価することを目的とした。そのために、エッチング後部材を対象に土壌環境基準に関する溶出試験、含有量試験を行った。また、エッチング前の太陽光パネル部材も同様に試験を行い、エッチング効果についても検討した。

2. 実験方法

2.1 用いた試料について

表 1 用いた試料.

太陽光パネルの種類	エッチングの有無	部材	試料 ID	提供日
SF 系	無し	カバーガラス	SF-CG	2020/9/14
		EVA	SF-EVA	2020/10/19
		基板ガラス	SF-SG	2020/9/14
		バックシート	SF-BS	2020/10/19
	有り	カバーガラス	SF-CG-E	2020/11/26
		EVA	SF-EVA-E	2020/11/30
		基板ガラス	SF-SG-E	2020/11/26
		バックシート	SF-BS-E	2020/12/22
Si 系	無し	カバーガラス	Si-CG	2020/11/30
		電池セル	Si-CEL	2020/12/7
	有り	カバーガラス	Si-CG-E	2020/12/25
		電池セル	Si-CEL-E	2020/12/25

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から破碎された状態で提供された。実験に用いた試料は表 1 に示すように、化合物系の太陽光パネル(SF 系)とシリコン系太陽光パネル(Si 系)である。ソーラーフロンティア株式会社は化合物系太陽光パネルを生産していることから SF 系の部材には不純物は含まれていないが、Si 系パネルは他社の太陽光パネルから各部材を回収したため、Si 系の部材には EVA やバックシートが含まれていた。そのため、実験に用いる前に Si 系の試料は目開き 1.1mm の篩を通過した試料を用いた。また、バックシートについては目視で 1cm 以上のものを取り除いた。エッチング処理もソーラーフロンティア株式会社で行われ、部材を 60%硝酸に浸漬後に吸引ろ過で固液分離を行い、水洗浄後に自然乾燥させたものがエッチング処理物として提供された。エッチング後の試料は水分を含んでいたが、各種試験には乾燥せずに用いた。なお、エッチング処理物の含水率を表 2 に示す。ガラス系の試料は 10%未満であったが、プラスチック系の試料(EVA、バックシート、電池セル)は 20%台であった。

2.2 試験方法

2.2.1 溶出試験

土壤汚染対策法に基づく環境省告示 18 号試験に準拠し、試料の溶出量試験を行った。材質が PP のポリ瓶 1L に試料 50g を取り蒸留水 500mL を添加し、200rpm で 6 時間振とうを行った後 10 分ほど静置し、上澄み 400mL 程度をビーカーに取った。EVA とバックシートは上澄みを取るのが困難なため、プラスチック製のざる(目開き横 3mm×縦 1mm)を用いて予備ろ過を行い、400mL 程度をビーカーに取った。これらを 0.45 μ m のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP 分析用試料はろ液を 50mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.25mL 加えた。As、Se、Sb 分析用試料はろ液を 100mL 取り、有害重金属測定用濃塩酸を 0.5mL 加えた。F、Cr 分析用試料は 50mL 取り、何も加えなかった。ろ液は冷蔵庫に保存した。最後に、ビーカーに残った上澄み液を用いて、pH と EC を測定した。

表 2 エッチング後試料の含水率.

試料 ID	含水率 (%)	乾燥温度 (°C)	乾燥日数
SF-CG-E	6	100	1 日
SF-EVA-E	27	60	3 日
SF-SG-E	3	100	1 日
SF-BS-E	24	60	3 日
Si-CG-E	4	100	1 日
Si-CEL-E	22	60	3 日

2.2.2 含有量試験

土壤汚染対策法に基づく環境省告示 19 号試験に準拠し、試料の含有量試験を行った。材質が PP 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た。Cr 用サンプルに関しては、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た。EVA とバックシートは上澄みを取るのが困難なため、溶出試験で用いたものと同じざるを用いて予備ろ過を行い、150mL 程度をビーカーに取った。これらに対して 0.45 μ m のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP 分析用試料はろ液を 50mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.25mL 加えた。As、Se、Sb 分析用試料、F 分析用試料は 50mL、Cr 分析用試料は 100mL ろ液を取り、何も加えなかった。ろ液は冷蔵庫に保存した。

2.2.2 分析方法

Na、K、Ca、Mg は原子吸光光度法(HITACHI、Z-2000)により分析をした。分析試料 10mL に対して、ランタン溶液を 0.5mL 添加した。B、Al、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Si は ICP(SHIMADZU、ICPS-8100)により分析した。ただし、溶出試験の Cd、Pb、T-Cr はフレームレス分析法により分析した。As、Se、Sb は予備還元した試料を水素化物発生装置(HVG-1)を用いて、5mol/L 塩酸と 0.4%(w/v)水素化ホウ素ナトリウム水溶液で水素化し、ICP(SHIMADZU、ICPS-8100)により分析した。予備還元の方法として、As

表3 エッチング前試料の有害重金属の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.42
SF-EVA	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.012
SF-SG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.013	<0.005	<0.007	<0.007
SF-BS	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.011
Si-CG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	0.006	<0.007	0.16
Si-CEL	2.0	<0.001	45	0.05	<0.001	<0.005	<0.007	0.009
土壌環境基準	0.8	0.003	0.01	1	0.05	0.01	0.01	0.02*

注：灰色の欄は基準値を超過している。

*：Sb は要監視項目

表4 エッチング前試料の有害重金属以外の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	pH	EC(mS/m)	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG	10.42	13.6	19	0.1	9.0	1.5	0.02	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	26
SF-EVA	9.75	3.73	1.8	0.1	5.8	0.16	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	2.0
SF-SG	10.36	11.2	14	0.9	6.6	1.3	0.05	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	17
SF-BS	9.33	2.40	0.6	<0.1	4.3	0.07	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.57
Si-CG	10.39	9.75	11	<0.1	5.7	1.6	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	28
Si-CEL	7.89	4.18	1.1	<0.1	3.6	0.11	0.01	2.4	<0.01	<0.01	0.06	0.02	0.87

は比色管に試料を加え、蒸留水で 15mL 程度に調製し、5%w/v ヨウ化カリウム+5%w/v L-アスコルビン酸混合溶液 2.5mL、濃塩酸 2.5mL を加えた。その後、70°Cのウォータースバスで約 4 分間加温し、室温で放冷した後に、蒸留水で 25mL にメスアップした。Se は比色管に試料を加え、蒸留水で 20mL 程度に調製し、濃塩酸 2.5mL を加えた。その後、比色管立てごと金属の容器に入れて、100°Cの湯浴で約 10 分間加温し、室温で放冷した後に、蒸留水で 25mL にメスアップした。Sb は比色管に試料を加え、蒸留水で 15mL 程度に調製し、濃塩酸 5mL、チオ尿素溶液(0.1mol/L)を 3mL を加えた。その後、蒸留水で 25mL にメスアップした。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 Na₂CO₃ 1.8mol/L/NaHCO₃ 1.7mol/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 エッチング前試料の溶出試験結果

表 3 にエッチング前試料の有害重金属の溶出濃度を示す。なお、T-Cr は基準値を超えなかったため Cr(VI)は測定していない。基準値を超過した欄を灰色で示すが、SF 系および Si 系のカバーガラスの Sb が環境基準を超過し、それぞれ環境基準の約 20 倍、約 8 倍であった。ガラスの

透明度を上げるために用いられる消泡剤に Sb が含まれるため⁷⁾、本研究で用いたカバーガラスの消泡剤から Sb が溶出したと考えられた。電池セルの F と Pb が基準値を超過し、それぞれ基準値の約 2.5 倍、約 4500 倍であった。電池セルにはハンダが用いられているため、ハンダが Pb の溶出源と考えられた⁷⁾。

表 4 にエッチング前試料の有害重金属以外の溶出濃度を示す。pH は約 8~10 のアルカリ性であり、特にカバーガラスや基板ガラスのガラス系の pH が高かった。全体的に溶出濃度は低い、カバーガラスや基板ガラスのガラス系の Si 溶出濃度は比較的高かった。

3.2 エッチング前試料の含有量試験結果

表 5 にエッチング前試料の有害重金属の含有量を示す。電池セルの Pb のみが基準値を超過し、基準値の約 20 倍であった。溶出試験と同様に電池セルの中に鉛がハンダとして含まれていることが原因である⁷⁾。溶出試験で基準値を超えていた F と Sb は含有量試験では基準値以下であった。表 6 にエッチング前試料の有害重金属以外の含有量を示す、全体的に含有量は少ないが、Fe は全試料で多く、電池セルに Al が非常に多く含まれていた。

3.3 溶出濃度に対するエッチングの効果

表 7 にエッチング後試料の有害重金属の溶出濃度を示す。なお、T-Cr は基準値を超えなかったため Cr(VI)は測定していない。SF 系および Si 系のカバーガラスとバックシートの Sb が環境基準を超過し、

表5 エッチング前試料の有害重金属の含有量(mg/kg).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG	<20	<0.4	0.6	2.1	<0.4	<4	<4	<4
SF-EVA	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
SF-SG	<20	<0.4	0.5	1.7	<0.4	<4	<4	<4
SF-BS	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
Si-CG	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
Si-CEL	<20	<0.4	2,800	3.3	<0.4	4	<4	<4
土壤環境基準	4000	45	150	4000	250	150	150	-

注：灰色の欄は基準値を超過している。

表6 エッチング前試料の有害重金属以外の含有量(mg/kg).

試料 ID	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	150	3.4	96	19	520	4.9	<0.4	6.9	0.5	1.7	18
SF-EVA-E	14	2.7	49	2.8	150	2.5	<0.4	1.3	<0.4	12	3.8
SF-SG-E	120	11	73	20	430	6.7	<0.4	6.6	0.6	1.5	15
SF-BS-E	1.7	1.3	23	0.76	48	1.5	<0.4	<0.4	<0.4	1.7	3.3
Si-CG-E	57	4.1	19	7.4	130	10	<0.4	3.9	<0.4	2.3	8.2
Si-CEL-E	26	15	56	1.9	360	21,000	<0.4	3.9	35	44	130

表7 エッチング後試料の有害重金属の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG-E	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.16
SF-EVA-E	0.6	<0.001	<0.001	<0.01	0.003	0.007	<0.007	<0.007
SF-SG-E	<0.5	<0.001	0.002	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	<0.007
SF-BS-E	<0.5	<0.001	0.34	<0.01	<0.001	0.018	<0.007	0.075
Si-CG-E	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.002	0.020	<0.007	0.042
Si-CEL-E	<0.5	<0.001	42	0.02	0.021	0.019	<0.007	<0.007
土壤環境基準	0.8	0.003	0.01	1	0.05	0.01	0.01	0.02*

注：灰色の欄は基準値を超過している。

*：Sbは要監視項目

それぞれ環境基準の約8倍、約2倍、約4倍であった。バックシートのSbの由来は分からなかった。バックシートと電池セルのPbが環境基準を超過し、それぞれ環境基準の約30倍、約4000倍であった。バックシートのPbの由来は分からなかった。バックシートとSi系のカバーガラス、電池セルのSeが環境基準を約2倍超過した。これらの部材のSeの由来は分からなかった。エッチング前試料の溶出試験で基準を超えたものについての除去率を表8に示すが、Sbは除去率が60~70%程度であったが、エッチング後も環境基準を満足しなかった。Fは除去率が80%で、エッチングにより溶出基準を満足した。Pbは除去率が7%で、エッチングによる除去効果は低かった。また、SF系のバックシートのPbとSbについてはエッチングすることで基準値を超過した。よって、エ

表8 エッチング前試料で基準を超えたものについての除去率(%)

	試料 ID	F	Pb	Sb
溶出濃度	SF-CG	-	-	62
	Si-CG	-	-	74
	Si-CEL	80	7	-
含有量	Si-CEL	-	71	-

ッチング処理はPb以外の物質について溶出濃度を低減することに効果があると言えるが、基準値を満足できない試料もあることが分かった。また、エッチングにより溶出濃度が基準を超過する場合もあった。

表9にエッチング後試料の有害重金属以外の溶出

表9 エッチング後試料の有害重金属以外の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	pH	EC (mS/m)	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	9.65	6.1	7.3	0.3	3.5	0.66	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	35
SF-EVA-E	1.73	0.64	1.2	0.2	2.0	0.26	1.1	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.9
SF-SG-E	9.27	2.4	5.1	0.3	2.7	0.53	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	8.8
SF-BS-E	2.31	200	0.6	0.2	0.5	0.18	0.41	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.76
Si-CG-E	8.83	4.3	6.2	<0.1	1.7	0.47	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	3.0
Si-CEL-E	4.87	94	1.3	0.5	2.3	0.36	0.77	530	<0.01	0.02	2.2	0.14	4.9

表10 エッチング後試料の有害重金属の含有量(mg/kg).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG-E	<20	<0.4	0.5	0.4	<0.4	<4	<4	4
SF-EVA-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	4	<4	<4
SF-SG-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
SF-BS-E	<20	<0.4	0.4	<0.4	<0.4	13	<4	<4
Si-CG-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	12	<4	<4
Si-CEL-E	<20	<0.4	800	0.5	<0.4	14	<4	<4
土壤環境基準	4000	45	150	4000	250	150	150	-

注：灰色の欄は基準値を超過している。

表11 エッチング後試料の有害重金属以外の含有量(mg/kg).

試料 ID	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	81	3.7	75	15	160	2.2	<0.4	2.3	0.5	3.2	27
SF-EVA-E	9.5	2.1	4.5	2.0	12	0.41	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	9.0
SF-SG-E	25	4.1	9.7	4.6	60	2.0	<0.4	1.3	<0.4	<0.4	9.9
SF-BS-E	3.7	1.8	<0.4	1.4	4.7	1.6	<0.4	<0.4	<0.4	0.5	6.3
Si-CG-E	65	4.7	33	9.6	35	2.6	<0.4	1.5	<0.4	<0.4	8.4
Si-CEL-E	19	6.5	32	5.8	39	12,000	<0.4	0.9	89	3.4	110

濃度を示す。pHはカバーガラスや基板ガラスと言ったガラス系がpH8.8~9.7と高く、プラスチック系はpH1.7~4.9と低かった。全体的にエッチング前試料よりも溶出濃度は低いが、電池セルのAl溶出濃度はエッチング処理により非常に高くなった。

3.4 含有量に対するエッチングの効果

表10にエッチング後試料の有害重金属の含有量を示す。電池セルのPbのみが基準値の約5倍を超過した。除去率Pbの除去率も表8に示すが、71%であり、エッチング前試料の含有量より低くなったが環境基準を満足しなかった。表11にエッチング後の有害重金属以外の含有量を示すが、溶出濃度同様にエッチング前試料の含有量よりも含有量は少なく、エッチング前試料で含有量が比較的多かったFeは大きく減少し、電池セル中のAlもエッチング前試料の1/2に減少した。

3.5 考察

エッチングによってF溶出濃度は基準以下になったが、SbやPb、Seの溶出濃度およびPbの含有量が基準値を超過することから、エッチング後の部材をコンクリート用細骨材として用いる場合にはSbとPb、Seについて注意が必要である。セメントと混合することにより、PbとSeについてはそれぞれ $PbCO_3$ および $Pb(OH)_2$ ¹¹⁾、 $CaSeO_3 \cdot H_2O$ および $Ca_6[Al(OH)_6]_2(SeO_4)_3 \cdot 26H_2O$ ¹³⁾として不溶化することが知られており、エッチング後の試料を細骨材として用いた場合のコンクリートが溶出・含有量基準を超過しない可能性がある。Sbについては、セメント処理による不溶化は期待できないが、最大で溶出基準の約8倍の超過であることから、細骨材としての使用率を下げることによる希釈効果で溶出基準を満足する可能性がある。

4. おわりに

本研究では、SF系とSi系のエッチング後の太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての環境安全性を評

価することを目的として、溶出試験、含有量試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) エッチング前試料の溶出濃度は、SF系およびSi系のカバーガラスのSbと電池セルのFとPbで環境基準を超過した。特にPbについては環境基準の4500倍であった。
- (2) エッチング前試料の含有量は、電池セルのPbが環境基準を約20倍超過した。
- (3) エッチング処理はSbやFの溶出濃度やPbの含有量を減少させる効果はあったが、エッチング処理後の試料ではこれらの物質のうちF以外は溶出基準、含有量基準を満足せず、エッチング処理による有害物質除去は不十分であった。また、Pb、Se、Sbについては、エッチング前には環境基準以下の溶出濃度であった試料をエッチングすることにより、溶出基準以上の溶出が見られた試料もあった。
- (4) エッチング後の試料を細骨材として用いた場合のコンクリートからの有害物質の溶出については、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可能性があると言えた。

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。また、社会環境システム工学科学生の石田泰隆君には実験の協力を得た。

参考文献

- 1) 佐川龍郎：太陽電池モジュールのリユース・リサイクルと環境省のガイドライン，廃棄物資源循環学会誌，Vol. 30, No. 6, pp. 365-370, 2019.
- 2) IRENA: Renewable Energy Statistics 2020.
- 3) 砂田達輝，乗超晃，狩野公俊：廃太陽光パネルのリサイクルシステムの構築，第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，pp. 287-288, 2018.
- 4) 環境省：使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書(2015)
- 5) 村上進亮，豊田晟史：使用済み太陽光パネルの発生量と処理フロー，廃棄物資源循環学会誌，Vol. 30, No. 6, pp. 371-378, 2019.
- 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 www.env.go.jp/press/files/jp/27519s.pdf (閲覧日 2023年2月1日)
- 8) (株)東レリサーチセンター：バックシート https://www.toray-research.co.jp/businesses/analysis-evaluation/ana_011.html (閲覧日 2023年2月1日)
- 9) 日経 XTECH：使用済み CIS パネルのリサイクルに道，低コスト・高収率で材料を分離・回収 <https://xtech.nikkei.com/dm/atcl/feature/15/327680/030500007/?P=3> (閲覧日 2023年2月1日)
- 10) G. Voglar, and D. Lestan: Equilibrium leaching of toxic elements from cement stabilized soil, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 246-247, pp. 18-25, 2013.
- 11) 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.
- 12) 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, No. 1, pp. 71-78, 2012.
- 13) D. H. Moon, D. G. Grubb, and T. L. Reilly: Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, pp. 944-951, 2009.
- 14) J. V. Bothe Jr., and P. W. Brown: Arsenic immobilization by calcium arsenate formation, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 33, No. 21, 1999.
- 15) 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.