

ノート

外壁材の再生利用に係る安全性についての 基礎的調査研究について

佐藤邦彦, 柘植 亮*, 立野雄也, 奥山幸俊, 坂口貴啓, 谷村譲紀

A Basic Study on Safety of Outer Wall Recycling.

Kunihiko SATO, Ryo TSUGE*, Yuya TACHINO,
Yukitoshi OKUYAMA, Takahiro SAKAGUCHI and Yoshinori TANIMURA

建築物の外壁材は、廃棄物となった場合、土木資材等のリサイクル材として利用されることが想定される。しかしながら、外壁材には、近年、難燃性や保温性等の品質を高めるために多様な材質が使用されているにもかかわらず、リサイクル材として使用された場合の周辺環境に対する影響や汚染のリスクに関する知見が見当たらない。本研究では、外壁材が一般環境中で再生利用された場合の安全性について、有害物質の溶出、汚濁水および硫化水素の発生の観点から安全性試験を実施した結果、有害物質の溶出や汚濁水および硫化水素の発生の可能性について配慮すべき知見が得られた。

また、有効なリサイクル方法の方向性について検討するために物性調査を行ったところ、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 が主成分であったことからセメント原料への利用が有効であると考えられた。

キーワード：リサイクル材，外壁材，安全性試験，溶出試験，有効利用

はじめに

循環型社会の形成促進には、焼却や埋立されている未利用廃棄物や新たに排出される廃棄物の再生利用を促進する必要があるが、廃棄物は有用な成分以外に有害物質等を含むことがあることから、一般環境中で使用する場合の環境リスクを把握したうえで安全・安心が確保されたリサイクルが必要である。

近年、建築物の外壁材は、工法としてボード状の外壁材（サイディング）を利用する方法が多用されるようになったことから、難燃性や保温性等の性能を高めるために、繊維質、樹脂、セラミック、金属や軽量気泡コンクリート（ALC）等の多様な素材が多岐に使用されている。これらの外壁材は、今後、大量の廃棄物となり、これらが再生路盤材等土木資材原料として利用されることが想定される。しかしながら、これらの外壁材が、

再生利用された場合の周辺環境に対する影響や汚染のリスクに関する知見が見当たらない。

そこで、本研究では、これらの外壁材が、一般環境中で再生利用された場合の安全性について、有害物質の溶出、汚濁水および硫化水素の発生の観点から安全性試験を実施するとともに、有効なリサイクル方法の方向性について検討するために物性調査を実施したので報告する。

方 法

1. 対象サンプル

本研究で対象とした外壁材（サイディング）は、製造メーカーから提供された窯業系サイディングと ALC とした。

窯業系サイディングは、(1)木繊維補強セメント板系の木繊維混入セメント・けい酸カルシウム板 2 種類、(2)繊維補強セメント板系 1 種類、(3)繊維

* 現所属：三重県環境生活部大気・水環境課。

補強セメント・けい酸カルシウム板系の繊維混入セメント・石灰・けい酸カルシウム板と繊維混入セメント・けい酸カルシウム板各2種類の合計7種類を用いた。そのうち、(3)繊維補強セメント・ケイ酸カルシウム板系は有機系と無機系の塗料

の種類のみが違う各2種類を用意した。

ALCは、無筋、有筋タイプの2種類を用い、有筋タイプについては、鉄筋部分を除き、防錆材部分を削ぎ落とし試料に加えた。

試験試料の概要を表1に示す。

表1 試験試料の概要

試料	組成	塗料	
		有機系	無機系
窯業系サイディング			
(1)木繊維補強セメント板系			
木繊維混入セメント・けい酸カルシウム板	けい酸カルシウム硬化物,有機質繊維,無機質繊維,有機質混和材,無機質混和材	Y1	
木繊維混入セメント・けい酸カルシウム板	セメント質原料,木質系繊維,無機質系混和材,有機質系混和材,無機質系繊維	Y7	
(2)繊維補強セメント板系			
繊維補強セメント板系	普通ポルトランドセメント,けい酸質原料,無機質混和材,無機質軽量材,有機繊維	Y6	
(3)繊維補強セメント・けい酸カルシウム板系			
繊維混入セメント・石灰・けい酸カルシウム板	けい酸カルシウム化合物,有機質系繊維,有機質系混和材,無機質系混和材	Y2y	Y2m
繊維混入セメント・けい酸カルシウム板	けい酸カルシウム化合物,有機質系繊維,有機質系混和材,無機質系混和材	Y3y	Y3m
ALC(軽量気泡コンクリート)			
ALC		Am	Ay

2. 試験方法

1) 溶出試験および含有量試験

溶出試験は、「土壌の汚染に係る環境基準(平成3年8月23日環境庁告示第46号)」,(以下「環告46号法」という)により行った。

含有量試験は、「土壌汚染対策法における土壌含有量試験の試験方法(平成15年3月6日環境省告示第19号)」,(以下「環告19号法」という)により行った。

ただし、試験は試料を2mm以下に粉砕したものを検体とし、分析法はカドミウム、鉛、砒素はICP質量分析法、セレンはICP質量分析法または水素化物発生原子吸光法、シアンは4-ピリジンカルボン酸-ピラロゾン吸光光度法、六価クロムはジフェニルカルバジド吸光光度法、総水銀は還元気化原子吸光法、ふっ素はランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法、ほう素はICP発光分光分析法にて行った。なお、以下、特に記述のない場合の分析法は、これらの方法による。

2) 環境最大溶出可能量試験

環境最大溶出可能量試験は、「廃棄物関連試料の分析マニュアル(一社)廃棄物資源循環学会」¹⁾に準じて行った。試験フローを図1に示す。

試験は、「酸系列」,「アルカリ系列」の2系列、各2ステップで行い4検液が得られる。例として、酸系列の操作概要は次のとおりである。まず、ステップ1として、2mm以下に粉砕したものを乾燥後、ボールミルおよびめら乳鉢で微粉砕して125 μ mの篩にかけて通過した検体16gを量り取り、50倍量(液固比50(L/kg))の純水を加えて混合し、pHガラス電極をセットし、マグネチックスターラーで3時間攪拌する。開始から10分以降にpHが7.5を超える場合は硝酸を添加してpH6.5~7.5の範囲で3時間保持する。7.5未満の場合、pH調整は行わない。続いて溶液を遠心分離し、0.45 μ mメンブランフィルターでろ過を行い、ろ液を検液A1とする。続いて、ステップ2として、ステップ1の残さと50倍量の純水を混合し、攪拌を3時間継続する。開始から10分以降にpHが4.1以上の場合は硝酸を添加してpH3.9~4.1の範囲で3時間保持する。4.1未満の場合はpHの調整は行わない。3時間後、同様の方法でろ過を行い、ろ液を検液A2とする。

アルカリ系列は、pH調整試薬として水酸化ナトリウム溶液を用いる。

クロムの分析法はICP質量分析法にて行った。

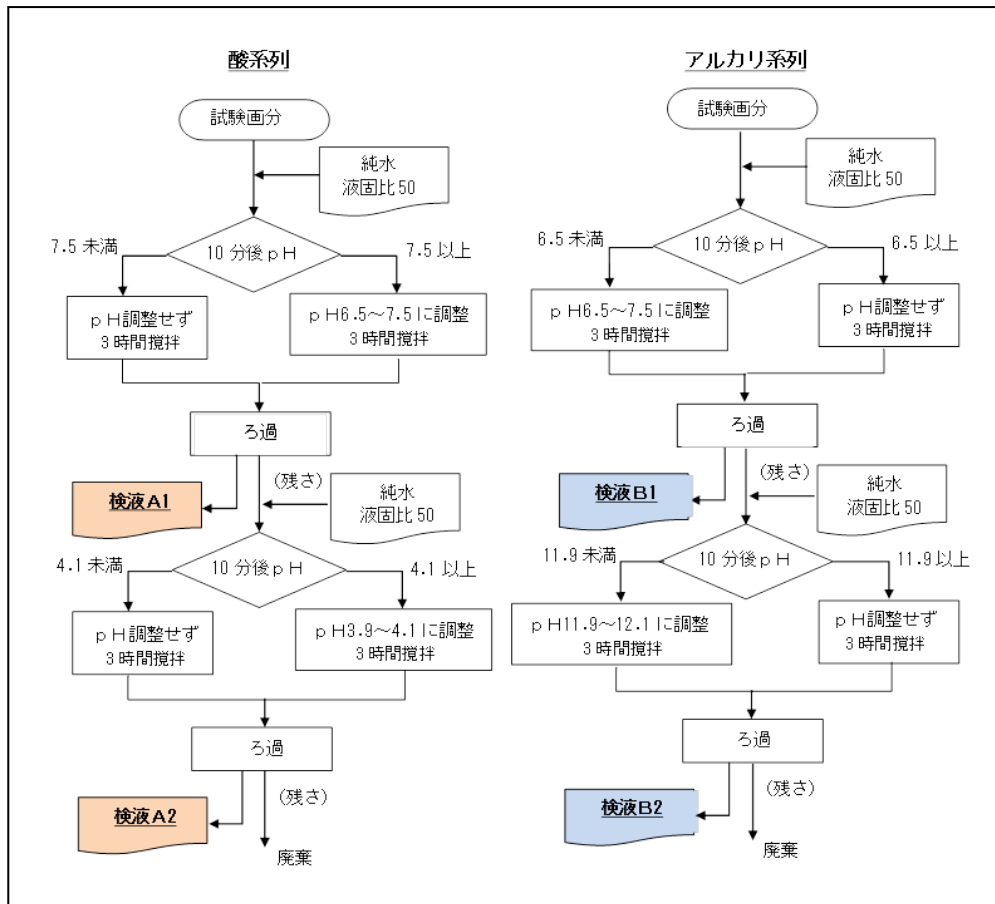


図1 環境最大溶出可能量試験の実施手順

3) 汚濁水および硫化水素の発生可能性調査

水質汚濁，硫化水素発生の可能性をみるために，前述の環告46号法にて前処理した溶出液を用いて，色相，色度，濁度，pH，生物化学的酸素要求量(BOD)，化学的酸素要求量(COD_{Mn})，全有機炭素(TOC)，硫酸イオン(SO₄²⁻)を分析した。

また，評価のための比較対象として2mm以下に破碎した石膏ボードも同様に分析した。分析法はTOCは全有機炭素計，SO₄²⁻はイオンクロマトグラフ法にて行った。

4) 物性調査

有効利用の方向性を検討するために三成分(水分，可燃分，灰分)，強熱減量および組成の分析を行った。

三成分は，「一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について」(環整95号)²⁾に従い，強熱減量は底質調査法³⁾に示す方法により実施した。また，評価のための比較対象として石膏ボードも同様に分析した。

組成分析は，灰化物(800℃)を微粉碎し，ガラスビード法により成型したものを試料とし，

波長分散型蛍光X線分析装置にてFP法による半定量分析を実施した。

調査結果および考察

1. 溶出試験および含有量試験の結果

地方自治体のリサイクル認定制度等において，用途が土壌と接したり，混合して使用される埋戻し材等の土木資材の安全性の確認については，環告46号法および環告19号法を準用し，判断していることが多いことから，これらの基準と比較し評価した。

溶出試験結果を表2に示す。窯業系サイディングにおいて，六価クロムについては，Y2yが基準値の1.2倍，ほう素については，Y2mが基準値の1.3倍とわずかながら基準を上回った。一方，ALCは，すべて基準値以下であった。

含有量試験結果を表3に示す。窯業系サイディングおよびALCともにすべて土壌含有量基準値以下であった。

また，窯業系サイディングにおける有機系塗料と無機系塗料の違いおよびALCにおける有筋，無筋の違いに有意な差は確認できなかった。

表 2 溶出試験の結果 (mg/L)

試験項目	窯業系サイディング							ALC		土壌環境基準値
	Y1	Y7	Y6	Y2y	Y2m	Y3y	Y3m	Am	Ay	
カドミウム	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	0.01
シアン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	検出されないこと
鉛	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
六価クロム	0.04	<0.04	0.04	0.06	<0.04	0.04	0.05	<0.04	<0.04	0.05
砒素	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
総水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
セレン	<0.002	<0.002	<0.002	0.004	0.008	0.007	0.010	<0.002	<0.002	0.01
ふっ素	0.20	0.09	0.13	0.16	0.09	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	0.8
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	0.8	1.3	0.3	0.2	<0.1	<0.1	1

表 3 含有量試験の結果 (mg/kg)

試験項目	窯業系サイディング							ALC		含有量基準値
	Y1	Y7	Y6	Y2y	Y2m	Y3y	Y3m	Am	Ay	
カドミウム	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	150
シアン	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	50
鉛	<15	38	24	63	27	32	31	16	19	150
六価クロム	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	250
砒素	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	150
総水銀	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	15
セレン	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	150
ふっ素	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	4000
ほう素	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	<400	4000

2. 環境最大溶出可能量試験の結果

環境最大溶出可能量試験は、固体試料（循環資源や再生製品）に含まれる有害物質が、環境中へ溶出しうる最大量を評価することを目的とする特性化試験であり、詳細評価を行うに際して注目すべき有害物質の絞り込み等を行うことが可能である。

環境最大溶出可能量試験結果を表 4 に示す。

今回の試験による溶出特性としては、すべての試料について、酸系列においてアルカリ系列より多く有害物質が溶出した。その中で、六価クロム、クロムおよびセレンについては、アルカリ系列においても酸系列と同程度の溶出量であった試料もみられた。外壁材の種類に特有な溶出傾向は認められなかった。また、窯業系サイディングにおける有機系塗料と無機系の違いに特徴的な傾向は認められなかった。

また、本試験は、結果により詳細評価の対象

物質を絞り込むため「廃棄物資源循環学会試験規格シリーズ案「再生製品の環境安全性評価試験」⁴⁾に提案されている土壌環境基準値の 10 倍値 (mg/kg 換算値) で評価した。

アルカリ系列（検液 B1+検液 B2）では、全ての試料において 10 倍値以下であった。酸系列（検液 A1+検液 A2）では、窯業系サイディングは、鉛、六価クロム、クロム、砒素、ふっ素、ほう素が、ALC は砒素が 10 倍値を超過した数値を示したことから、この 6 項目において溶出ポテンシャルがあると考えられた。このことから、これら外壁材を用いた再生製品が、酸性域から中性域の一般環境中において使用されることが想定される場合は、詳細評価として再生製品の性状、使用用途を考慮した溶出特性を把握するための溶出挙動試験を実施するなど、溶出ポテンシャルがある項目に着目することが必要と考える。

表 4 環境最大溶出可能量試験の結果 (mg/kg)

試料	カドミウム ¹⁾		鉛 ¹⁾		六価クロム ²⁾		クロム ²⁾	
	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列
Y1	0.21	<0.01	0.26	<0.01	2.4	1.1	3.9	1.3
Y7	<0.01	<0.01	0.064	<0.01	<1.0	1.0	0.50	0.68
Y6	0.63	<0.01	0.38	<0.01	7.3	1.8	7.4	1.9
Y2y	1.0	<0.01	0.93	<0.01	3.8	1.4	3.9	1.5
Y2m	0.59	<0.01	0.74	0.12	1.8	1.0	2.8	1.0
Y3y	0.79	<0.01	1.1	<0.01	1.1	<1.0	2.7	0.79
Y3m	0.60	<0.01	1.4	0.015	1.1	<1.0	2.7	0.58
Ay	0.15	<0.01	0.043	<0.01	<1.0	<1.0	0.63	0.48

試料	砒素 ¹⁾		セレン ¹⁾		ふっ素 ³⁾		ほう素 ⁴⁾	
	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列	酸系列	アルカリ系列
Y1	1.1	0.035	0.20	0.084	210	17	14	1.9
Y7	0.11	0.026	0.077	0.10	72	13	28	12
Y6	0.23	0.014	0.29	0.14	130	10	41	5.6
Y2y	1.0	0.060	0.32	0.14	210	11	110	19
Y2m	1.2	0.073	0.32	0.18	120	8.7	170	33
Y3y	1.8	0.16	0.38	0.28	77	2.7	51	11
Y3m	1.1	0.14	0.33	0.32	100	2.9	34	8.8
Ay	1.8	0.15	0.087	0.048	9.4	<1.0	9.8	2.5

1)土壌環境基準換算値(10倍値):1mg/kg, 2)同換算値(10倍値):5mg/kg, 3)同換算値(10倍値):80mg/kg, 4)同換算値(10倍値):100mg/kg

3. 汚濁水および硫化水素の発生可能性調査の結果

硫化水素の発生については、「廃棄物最終処分場における硫化水素対策検討会報告書(平成12年9月)」等^{5,6)}において、次の5つの条件が全て揃った場合に硫化水素が発生するとされている。

- ①硫酸イオン(SO₄²⁻)が高濃度で存在すること
- ②有機物(硫酸塩還元菌の炭素源)が存在すること
- ③嫌気性の環境であること(酸素が存在しない)
- ④埋立層内に水がたまっていたり、たまりやすい状況であること
- ⑤硫酸塩還元菌が存在すること

また、「安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染対策防止に関する研究(国立環境研究所報告第188号)」⁷⁾によると、前述の①から⑤に加えて

- ⑥発生した硫化水素と化合する物質が少ないの条件が示されている。

そこで、有機物と硫酸塩(S)に着目し、硫化水素発生ポテンシャルの指標項目としてTOC、SO₄²⁻について評価した。

また、工場・事業場からの排水は水質汚濁

防止法において排出規制されており、その規制項目の中で有機汚濁の指標項目として規定されているBOD、CODについて評価するとともにpHも測定した。

試験結果を表5に示す。

1) pH

石膏ボードがpH7.6と中性を示したのに対して、ALCはpH9.9、窯業系サイディングはpH10~12のアルカリ性を示した。

2) BOD, COD

有機汚濁指標であるBOD、CODについて、水質汚濁防止法の排水基準値(BOD、COD 160mg/L)と比較すると、ほとんどの窯業系サイディングは、同程度およびそれ以上の数値を示したことから、有機汚濁水の発生につながる可能性があると考えられ、この視点で再生製品を評価することが必要である。

3) TOC, SO₄²⁻

TOCについて、窯業系サイディングは、75~330mg/Lで石膏ボードと同程度もしくはそれ以上の数値を示した。一方、ALCは13mg/Lであった。小野ら⁸⁾によると一定の硫酸イオンの共存下でTOCが30mg/L以上の場合に硫化水素発生の可能性が高いことが報告されていることか

ら、これを前述②の指標とすると、窯業系サイディングは硫化水素発生原因の有機物源となる可能性があると考えられる。

SO₄²⁻について、ALCは1200mg/Lを示し、石

膏ボードと同程度の数値であったことから、これを前述①の指標とすると、硫化水素発生の硫酸塩(S)源となる可能性があると考えられる。

表5 汚濁水および硫化水素発生可能性試験の結果

試験項目	窯業系サイディング							ALC	石膏ボード
	Y1	Y7	Y6	Y2y	Y2m	Y3y	Y3m	Am	
色相	淡黄色	無色	無色	無色	無色	淡黄色	淡黄色	無色	無色
pH	11	12	12	11	12	11	10	9.9	7.6
BOD(mg/L)	320	210	95	160	160	300	280	11	140
COD(mg/L)	230	130	53	120	130	410	430	11	140
TOC(mg/L)	220	160	75	130	130	330	300	13	120
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	100	61	39	160	150	290	310	1200	1600
色度(度)	100	73	37	38	52	120	110	1.5	32
濁度(度)	0.10	0.058	0.55	1.3	2.3	7.0	3.5	0.18	0.051

4. 物性調査

有効成分等の測定分析を実施するために三成分および強熱減量を測定するとともに灰化物の組成分析を行った。

三成分(水分、可燃分、灰分)および強熱減量の試験結果を表6に示す。

窯業系サイディングは、石膏ボードと比較して可燃分が多かった。これは、配合されている木繊維、有機質繊維の有機物によるものと考えられた。

強熱減量について、ALCは5%をやや上回る値であったが、窯業系サイディングは13~18%

であった。セメントペーストに含まれる水和水は500℃程度で揮発することが報告⁹⁾されており、窯業系サイディングとALCは、セメントと同様の性状が主成分であることから、強熱減量分の一部については、水和水等の無機物が揮発したものであると考えられる。

三成分および灰化物の蛍光X線分析の結果から換算した試料の組成比を図2に示す。

窯業系サイディングおよびALCは、SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃が主成分(75~89%)であったことからセメント原料への利用が有効であると考えられた。

表6 三成分および強熱減量試験の結果

試験項目	窯業系サイディング							ALC	石膏ボード
	Y1	Y7	Y6	Y2y	Y2m	Y3y	Y3m	Am	
水分(%)	5.4	6.8	7.6	6.2	6.8	5.0	3.1	5.3	9.4
可燃分(%)	11	12	11	14	13	13	16	3	6
灰分(%)	84	81	82	80	80	82	81	91	84
強熱減量(%)	13	17	16	17	18	15	16	6	16

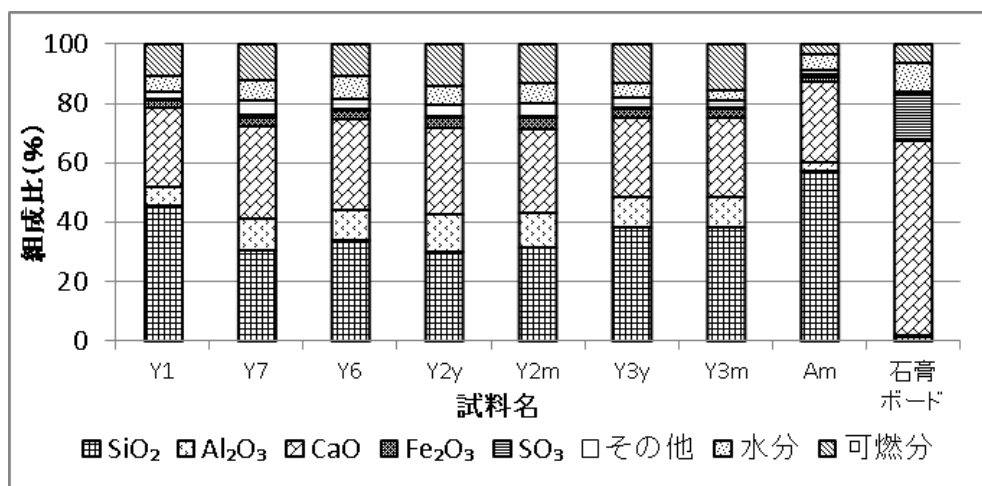


図 2 組成比

まとめ

外壁材が、一般環境中で再生利用された場合、有害物質の溶出や汚濁水および硫化水素の発生の可能性について、下記の配慮すべき知見が得られた。

- ・窯業系サイディングおよび ALC は、SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃ が主成分であったことからセメント原料への利用が有効であると考えられた。
- ・環告 46 号法の溶出量について、窯業系サイディングで、六価クロム、ほう素が土壤環境基準をわずかながら上回った試料があったが、環告 19 号法の含有量は基準値以下であった。
- ・環境最大溶出可能量試験の結果、酸系列において、窯業系サイディングはカドミウム、鉛、クロム、砒素、ふっ素、ほう素が、ALC は砒素が溶出ポテンシャルがあると考えられた。このことから、酸性域から中性域の一般環境下において使用されることが想定される場合は、詳細評価として再生製品の性状、使用用途を考慮した溶出特性を把握するための溶出挙動試験を実施するなど、溶出ポテンシャルがある項目に着目することが必要と考える。
- ・窯業系サイディングは、有機汚濁水の発生および硫化水素の発生の有機物源となる可能性があると考えられ、ALC は、硫酸塩 (S) 源となる可能性があると考えられた。

再生利用される外壁材は、建築物の解体廃棄物であること、実際に使用される再生製品の性状等は本研究で用いた試料とは同一でないことから、再生製品の性状、使用用途等を考慮した安全性試験を実施し、安全性を確認したうえで利用するとともに再生製品の製造段階での安全性管理が重要である。

文献

- 1) (一社)廃棄物資源循環学会：廃棄物関連試料の分析マニュアル，pp.365-370.
- 2) 一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について(昭和 52 年 11 月 4 日 環整 95 号；平成 2 年 2 月 1 日 衛環 22 号)。
- 3) 底質調査法 (昭和 63 年 9 月 8 日 環水管 127 号)。
- 4) 廃棄物資源循環学会試験規格シリーズ案「再生製品の環境安全性評価試験」廃棄物資源循環学会廃棄物試験検査法部会 HP
<http://jsmcwm.or.jp/wastest-group/files/2012/12/ca540ecd7f3dac6980d2fb51b69255ae.pdf>
- 5) 環境省廃棄物リサイクル部：廃棄物最終処分場における硫化水素対策検討会報告書 (2000)。
- 6) 旧厚生省：最終処分場における硫化水素対策検討会報告骨子
http://www.env.go.jp/recycle/kosei_press/h000906a.html
- 7) 国立環境研究所報告第 188 号：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染対策防止に関する研究。
- 8) 小野雄策、田中信寿：建設廃棄物埋立における硫化水素ガス発生の可能性と管理法に関する考察，廃棄物学会論文誌，14(5)，pp. 248-257 (2003)。
- 9) 笠井順一；セメント化学概論 (その 3)，コンクリート工学，21(11)，pp.100-106 (1983)。