

平成 2 6 年度
環境研究総合推進費補助金 次世代事業
総合技術開発報告書（研究論文編）

廃液晶ガラス・廃自動車ガラス等の高度
再資源化システムに関する研究
(3J123003)

1、ガラス再資源化システムの設計・評価

東京大学大学院工学系研究科
醍醐 市朗

2、セラミック系リサイクル原料の水熱養生における利用技術

東京工業大学大学院工学研究科
坂井研究室

3、自動車ガラス（廃ガラス）の回収リサイクルシステム構築の研究

中央大学
中央大学理工学研究所

平成 2 7 年 3 月

株式会社イースクエア

ガラス再資源化協議会

目次

1、ガラス再資源化システムの設計・評価・・・・・・・・・・・・・3

東京大学大学院工学系研究科

醍醐 市朗

2、セラミック系リサイクル原料の水熱養生における利用技術・・・・・・・・56

東京工業大学大学院工学研究科

坂井研究室

3、自動車ガラス（廃ガラス）の回収リサイクルシステム構築の研究・・82

中央大学

中央大学理工学研究所

ガラス再資源化システムの設計・評価

報告書

東京大学大学院工学系研究科

醍醐 市朗

1. 研究背景

廃製品から回収される廃ガラスのリサイクルにおける課題は、廃ガラスに混在する不純物濃度とリサイクル先の製品における不純物の許容濃度のミスマッチである。多くのリサイクル先において、許容濃度が低い一方で、混入する不純物を低く抑えることや不純物を取り除くことが困難であることが問題である。前者は、ガラスという素材の持つ特性上、技術開発によってクリアすることは困難であると考えられる。そのため、技術開発あるいは社会システムの開発の方向性としては、(1) 不純物の混在しない廃ガラスを提供するか、(2) 不純物の許容濃度の高い新しい用途を開発するかのどちらかになると考えられる。

(1) については、近年 ELV から廃ガラスを単体分離し、さらに中間膜や熱線を取り除く技術が開発されている。本プロジェクトにおいては、会宝産業、啓愛社、ヤマコー、リサイクルテック・ジャパン、ホンジョーらのプロジェクトメンバーが当該技術の開発を担っている。(2) については、ガラスタイルやガラス煉瓦等、近年、不純物の許容濃度の高い用途が開発されてきている。本プロジェクトにおいては、丸美陶料、クリスタルクレイらのプロジェクトメンバーが当該技術の開発を担っている。このような取組みにより、資源循環が促進される土壌が醸造されつつある。

そこで、本研究では、日本におけるガラスリサイクルシステムを鳥瞰的に把握し、全体最適や個別最適等の評価システムの構築を目的とする。

2. ガラスの種類と組成

様々な用途から発生する全ての廃ガラスを評価対象とするため、ガラスの用途を考慮し、ガラスを区別する種類を表 1 のように設定した¹。表 3 の設定に基づき、蛍光エックス線（ガラスビード法）による元素組成分析を行った。試料は、まず 105℃で乾燥してから必要に応じてタングステンカーバイド製容器に入れ振動ミルで微粉碎を行った。これを 1025℃で煅焼し、前後の重量変化から強熱減量を算出した。煅焼後の微粉末 0.5 g と四ホウ酸リチウム 5 g を熔融しガラスビードを作製した。このガラスビードを波長分散型蛍光エックス線分析装置

¹ ガラス再資源協会：プレゼンテーション資料より抜粋

（島津製作所，XRF-1700）で元素組成の分析を行った。結果を表 2 に示す。また、ガラスと一口に言っても用途により求められる特性がことなるため、表 3 のような多様な化学組成のガラスがある。

表 1 ガラスの用途と本研究で設定した各種類の略称

GMB	ビンガラス	GMA	建築ガラス	GMV	自動車ガラス
GMF	蛍光灯ガラス	GML	液晶板ガラス	GMO	光学ガラス
GME	電子管ガラス	GMM	医療用ガラス	GMP	工芸用ガラス
GMC	セラミックガラス	GMT	食器ガラス	GMFI	繊維ガラス
GMQ	石英ガラス	GMPV	太陽光パネル用ガラス		

表 2 ガラスの種類別元素分析結果（単位：％）

	ガラス												
	VSR	GMB	VR	VSF	NS	LO-SH	AG	EA-SH	GO-SH	EG-SA	EG	NG	AG
SiO ₂	72.27	72.86	72.28	70.82	71.25	61.07	63.83	65.60	60.41	65.82	65.89	71.00	63.82
Al ₂ O ₃	1.69	2.69	1.56	2.19	2.16	23.33	25.25	23.44	20.45	23.25	23.16	2.05	25.31
Fe ₂ O ₃	1.19	0.24	0.60	0.70	0.56	0.07	0.08	0.05	0.04	0.05	0.04	0.57	0.07
TiO ₂		0.06		0.07									0.12
MnO		0.03											0.02
CaO	8.14	11.03	8.89	8.66	9.00	4.21	10.21	8.16	0.52	8.08	7.99	8.58	9.96
MgO	4.64	1.04	4.62	4.17	4.65	2.77		1.79	4.25	1.85	1.95	4.26	
K ₂ O	0.58	0.94	0.38	0.44	0.88		0.24		3.29			0.22	0.24
Na ₂ O	11.30	10.86	11.40	12.08	11.34	0.12	0.10		10.69			11.99	0.29
BaO						6.77							0.00
SrO		0.02				1.40	0.02	0.74		0.74	0.72		0.02
ZrO ₂	0.01	0.01	0.01				0.02						0.02
NiO	0.06	0.01	0.01		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			0.01
CuO		0.01			0.01								
Cr ₂ O ₃		0.12											
SnO ₂						0.24	0.16	0.22	0.34	0.20	0.19		0.16
SO ₃	0.13	0.08	0.14	0.10	0.14							0.08	
Gd ₂ O ₃				0.02								0.06	
CeO ₂			0.11	0.76								1.05	
In ₂ O ₃											0.05	0.00	
total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 3 組成の違いによるガラスの種類

鉛	ソーダ石灰ホウ珪酸	ソーダ石灰
石灰アルミノホウ珪	アルミノ珪酸	アルミノホウ珪酸

酸		
珪酸塩	中性ホウ珪酸	ホウ珪酸
石英	無アルカリ	その他

3. リサイクルシステムの鳥瞰的最適化手法

3. 1 最適化モデル

循環利用においては、先述のような不純物濃度による制約とともに、マテリアルバランスが重要になる。例えば、使用済みガラスの発生量に対して、処理量に制約があったり、利用先用途の需要量が小さかったりすると、資源循環の促進は行き詰ってしまう。そのため、量と質の両面を考慮した上で需給がマッチする必要がある。量と質の両面を考慮した上で需給マッチングを最適化する評価ツールとして、醍醐らの開発したマテリアルピンチ解析がある²。マテリアルピンチ解析は、金属素材を対象に、その第一成分となる金属元素は単一金属元素である素材を対象とし、混入する不純物と生産物における不純物濃度の制約、ならびに発生量と需要量の物質収支を考慮した上で、リサイクル量が最大となる組み合わせ（全体最適解）を導出する手法である。一方で、本研究においては、不純物の混入だけでなく、ガラスという多成分系の素材を対象にすることより、新たなモデルの開発が必要となった。

本研究では、リサイクルシステムにおける全体（鳥瞰的）最適を目指した。本研究で評価の対象としたリサイクルシステムには、次節 3.2 において挙げられる候補素材のうち、3 章ならびに 4 章において評価に適さないと判断された素材を除き、さらに評価するためのデータが入手可能な素材を対象とした。最適化計算には、線形計画法を用いた。既存研究と同様に、リサイクル量がシステム全体で最大となる、つまり天然資源の消費量がシステム全体で最小となるリサイクルシステムを最適とし、線形計画における目的関数を天然資源消費量最小化とした。線形計画を実施するにあたって、物質収支による制約条件を付与した。物質収支による制約条件は、大きく 2 つに分けられた。1 つは、成分による制約である。もう 1 つは、供給量と需要量による制約である。考慮すべき成分要素については、次節 2.2 に詳述するが、不純物は成分として考慮はせず、素材を構成するために必須となる成分を考慮の対象とした。そのため、成分組成による制約では、組成は設定した上限値と下限値の間であることを条件とした。需要量に関する量的な制約では、需要量は過不足なく生産されなければならないものとし、等式による制約条件とした。供給量に関する量的な制約では、原料は評価したシステム外の用途も考えられるため、供給が過剰になっても良く、不等式による条件とした。以下に、それぞれを定式化したものを示した。

目的関数

$$O = X_{11} + X_{12} + \cdots X_{21} + X_{22} \cdots$$

² 醍醐市朗，藤巻大輔，松野泰也，足立芳寛：鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築，鉄と鋼，91(1)，pp. 171-178，(2005)

成分組成の制約条件

$$C_{jk}^m \leq \sum_i b_{ik} X_{ij} / \sum_i X_{ij} \leq C_{jk}^M$$

量的な制約条件（需要量）

$$\sum_i X_{ij} = M_j$$

量的な制約条件（供給量）

$$\sum_j X_{ij} \leq N_i$$

変数 X_{ij} は原料 i から生産素材 j への利用量である。目的関数は天然原料の利用量のみの総和とする。 b_{ik} は原料 i 中の成分 k の組成、 C_{jk}^M と C_{jk}^m は、それぞれの生産素材 j における成分 k の許容される最大と最良の組成を表している。 M_j は生産素材 j の需要量である。 N_i は原料 i の利用可能量であり、廃素材や副産物では発生量となり、天然原料には適用されない。

3. 2 評価対象

ガラスの成分組成である金属酸化物から構成される焼結体は、酸化物系セラミックスと呼ばれる。酸化物系セラミックスの主要な 1 つの素材であるガラスのカレットは、同様に酸化物系セラミックスの主要な 1 つの素材であるタイルを生産する際に、原料の一部として利用できていることが分かっている³。ガラスカレットをタイルの原料として利用すると、利用しない場合よりも低い温度での焼成が可能となり、二酸化炭素排出量の削減効果が得られる。ガラスカレットは、タイル以外にも、陶磁器やコンクリートへのリサイクルが検討されている。他にも、本研究におけるヒアリング⁴により、成分組成が酸化物系セラミックスに類似している高炉スラグが、ガラスの原料として利用されていることがわかった⁵。このように、ガラスをガラス素材に閉じてリサイクルするだけでなく、他の酸化物系セラミックス素材をガラス原料に、あるいは、カレットを他の酸化物系セラミックスの原料に利用できる可能性があることが分かってきた。そこで、本研究では、鳥瞰的な最適リサイクルシステムを目指すため、ガラスに成分組成の類似した酸化物系セラミックス全体を評価の対象とした。

酸化物系セラミックスには、多種の素材が含まれるため、評価の対象とする素材を以下のように選定した。まず、酸化物系セラミックスの主な原料となる

³ クリスタルクレイホームページ: <http://www.crystalclay.co.jp/>

⁴ 板硝子協会

⁵ Calumite Company, LLC ホームページ: <http://www.calumite.com/calumite-slag.aspx>

天然原料として、前年度に選定した石灰石、珪石・珪砂、長石、ドロマイト、粘土に加えて今年度はほう砂を追加した。そこで、表 4 に示す各原料の主要な用途となる素材を評価の対象の候補とした。ただし、一部の用途（例えば鉄鋼）では、これら原料は副原料であり、鉄鋼材そのものではなく、副産物のスラグとなることに留意が必要である。

表 4 酸化物系セラミックスの主な各原料の主要な用途

原料	主要な用途
石灰石	セメント、鉄鋼、ガラス、陶磁器、骨材、紙、肥料
珪石・珪砂	ガラス、耐火物、骨材、セメント、鉄鋼、研削砥石
長石	ガラス、陶磁器、釉薬、骨材、耐火物
ドロマイト	セメント、鉄鋼、ガラス、耐火物、肥料
粘土	陶磁器、ガラス、耐火物
ほう砂	ガラス、陶磁器、釉薬、肥料

これら原料は、主に 11 種類の金属系酸化物(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , MnO , P_2O_5 , および B_2O_3) を成分とする。酸化物系セラミックスに含まれる異種素材間でのリサイクルを考慮するにあたって、特異な物質を含む素材は、他の素材の原料としては適さない。その特異な物質が生産時に除去可能な物質であれば良いが、酸化物系セラミックスの生産工程は、そのほとんどが原料に含まれる不純物を除去することが困難な工程である。逆に、11 成分以外の成分を必要とする素材についても、その成分を含んだ原料を供給しなければならず、他の成分さえ満たされれば良いものではない。そのため、上記の用途の中から、主要な 11 種類の酸化物以外の成分をそれぞれ 1%以上含むものは評価の対象外とした。

(条件 1): 主要な 11 種類の酸化物(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , MnO , P_2O_5 , B_2O_3) 以外の成分をそれぞれ 1%以上含まないこと

また、生産量（生成量）のデータや二次資源としての発生量を文献から入手できるか、モデル等により推計できる素材は評価対象に含め、入手や推計が困難な素材は対象外とした。

(条件 2): 生産量や発生量のデータが入手可能であること

先述の 2 つの条件に基づく評価対象の選定結果を表 5 に示す。また、ガラスは表 1 の用途の違いに応じて区別した。なお、液晶板ガラスは、表 3 で記したようにガラス組成の違いにより、ソーダ石灰ガラスと無アルカリガラスに区別した。このうち、ソーダ石灰ガラスについては、液晶パネルの最終製品が多岐にわたっていること、海外から輸入される製品や半製品も多く製品別の使用量の

推計が困難なこと、TFT（Thin Film Transistor：薄膜トランジスタ）がアルカリ成分に弱く近年は無アルカリガラスが主流となってきたことから、評価対象としなかった。なお、液晶板ガラスが、ガラスの生産量に占める割合は 2% 程度（平成 24 年実績）であり、最適評価の結果に対しての影響は少ないと考えられた。

※本表の参考文献については、Appendix 1 に記した

表 5 評価対象の候補素材における生産量と 11 種類の酸化物以外の成分への条件適合用途

	素材あるいは副産物	生産量	11 種類の酸化物以外の成分
ガラス	ガラスびん GMB (透明)	適合	適合
	ガラスびん GMB (茶色)	適合	適合
	ガラスびん GMB (その他)	適合	適合
	建築ガラス GMA	適合	適合
	自動車ガラス GMV	適合	適合
	蛍光灯ガラス GMF	適合	適合
	液晶板ガラス GML (ソーダ石灰)	不適合	適合
	液晶板ガラス GML (無アルカリ)	適合	適合
	光学ガラス GMO	不適合	適合
	電子管ガラス GME	不適合	適合
	医療用ガラス GMM	不適合	適合
	工芸用ガラス GMP	不適合	不明
	セラミックガラス GMC	不適合	不適合 (Li_2O)
	ガラス食器 GMT	不適合	適合
	繊維ガラス GMFI (長)	適合	適合
	繊維ガラス GMFI (短)	適合	適合
	石英ガラス GMQ	不適合	適合
	太陽光パネル用ガラス GMPV	適合	適合
セメント		適合	不適合 (SO_3)
鉄鋼	高炉スラグ	適合	適合
	転炉スラグ	適合	不適合 (金属分)
	電気炉酸化スラグ	適合	不適合 (金属分)
	電気炉還元スラグ	適合	適合
陶磁器	飲食食器	不適合	適合
	磚子	不適合	適合

	タイル	適合	適合
骨材		適合	適合
紙		適合	不適合（セルロース等）
肥料		適合	不適合（硫酸化物等）
耐火物	アルミナ質耐火物	適合	適合
	塩基性耐火物	適合	適合
	アルミナ質耐火物（キャストブル）	適合	適合
	アルミナ質耐火物（吹付け）	適合	適合
	ジルコニア耐火物	不適合	不適合
研削砥石		不適合	不適合
釉薬		不適合	不適合（着色金属分等）

4. 鳥瞰的リサイクルシステムにおける生産物

4. 1 生産素材における品質（成分制約）

ガラスには、表 3 のような多様な化学組成のガラスがある。そのため、色つきのガラスびんが、透明のガラスびんの原料には利用できない等、他製品のガラスカレットを原料として受け入れられないものもある。一方で、表 6 で示した組成は平均的な組成であり、実際の生産においては、ある程度の成分の許容幅がある。例えば、板硝子協会では、自動車用板ガラスの原料としてのガラスカレットの受入基準として図 1 に示すような基準を技術情報として設定している。このような情報を、板ガラスに限らず、全ての廃ガラスの用途について設定することが望まれる。本章では、成分の制約について整理した。

- 国内板ガラス製造3社 共通（国内メーカー別回収は不要） - 不純物の混入について基準作成 - 色の混色は可能（※条件あり） - 合せガラスは透明部だけのシート状であること （強化は破碎状態で2mmΦ～100mmΦの大きさ）		※【混ぜてはいけないガラス】 ✓濃色ガラス（可視光線透過率70%未満） ✓黒セラ、デフォッガー等のプリントが付いたガラス ✓自動車窓ガラス用以外のガラス（ヘッドランプ、ビン等） ✓UVカットガラス	
不純物の種類	大きさ	許容量	備考
① 合わせガラスの中間膜、フィルム、紙、ステッカー、ゴム、プラスチック、糊、木片等の有機物、有機化合物（但し、金属が蒸着、ラミネートされているものを除く）	10mm以上	無いこと	
	10mm未満	20ppm以下	20g/トン以下
② 石、砂、セラミックス、セメント、等	0.5mm以上	無いこと	
	0.5mm未満	10ppm以下	10g/トン以下
③ 鉄くず （ステンレス等、ニッケルを含む特殊鋼を除く）	1mm以上	無いこと	
	1mm未満	10ppm以下	10g/トン以下
④ アルミニウム、非鉄金属、ニッケル化合物	全て	無きこと	

2006年 ガラスリサイクルワークショップ 旭硝子 環境室 資料 より

図 1 自動車用ガラス ガラス受入基準

板ガラスの許容幅は、板硝子協会へのヒアリングで得た。ガラスびんの許容幅は、板ガラスの許容幅を適用し、ガラスびん協会において妥当であることを確認した。ガラス短繊維は、約 900 度で溶解するガラス製品ならば成分組成に関係なく使用できる⁶とのことであったので、ガラス短繊維の許容幅は、板ガラスとガラスびんの上限值と下限値それぞれの成分の大きい方、小さい方を採用した。

鉄鋼向けの場合、多元系における組成のバランスや、カルシア/シリカ比等、

⁶ ガラスびんリサイクル促進協議会へのヒアリング

多元系状態図に依存する条件となり、単純に各成分の許容幅として設定できない。骨材（コンクリート）については、原料に求められる性能が成分だけではない（硬度や吸水性）ことと、アルカリ骨材反応の原因にならなければ良いことは成分にも関わるが、その鉱物相が問題であるため、単純に成分に関する条件ではないことから、各成分の許容幅として設定できない。耐火物については、大半が消費される製鉄用において、その求められる機能性の高さと、耐火物の成分によって直接的に鉄鋼製品の品質に影響することから、本研究で想定した 11 成分以外の成分の 1%未満の混入であっても問題となる。そのため、耐火物についても許容される成分組成を設定できなかった。ただし、アルミナ質耐火物の中で、区別したキャストブルと吹付については、製鉄現場において生産することもあり、交換等により回収したアルミナ質耐火物からのリサイクルの実績等がある⁷ため、生産素材となり得ると考えられた。

ここで、既に商用化されているガラス再資源化タイルについて、その組成が従来のタイルとは異なることから、生産素材として追加した。以上より、生産物として成分制約を設定できた素材について、その成分組成の許容幅を表 6 に一覧として示した。

⁷ 新日鐵住金ヒアリング

表 6 評価対象の成分組成の許容幅 (%)

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	B ₂ O ₃
GMB (透明) ⁸	上限	75.5	1	2.2	0.08	12.7	1.6	0.9	14.1	0.05	※	0
	下限	69.5	0	1.4	0	9.7	0	0.7	12.1	0	0	0
GMB (茶色) エラー! ブックマークが定義されていません。	上限	75.6	1	2.4	0.31	12	1.7	1.3	14.1	0.06	※	0
	下限	69.6	0	1.6	0.21	9	0	1.1	12.1	0.05	0	0
GMB (その他) エラー! ブックマークが定義されていません。	上限	74.9	1	2.4	0.2	12.1	1.8	1.4	14.1	0.05	※	0
	下限	68.9	0	1.6	0.1	9.1	0	1.2	12.1	0	0	0
GMA ⁹	上限	73	1	2.1	0.12	9.5	5.5	2.0	14	0.05	※	0
	下限	67	0	1.2	0.01	6.5	2.5	1.0	12	0	0	0
GMV エラー! ブック	上限	73	1	2.1	0.12	9.5	5.5	2.0	14	0.05	※	0
	下	67	0	1.2	0.01	6.5	2.5	1.0	12	0	0	0

⁸ 板硝子協会とガラスびんリサイクル促進協議会へのヒアリング

⁹ 板硝子協会へのヒアリング

クマ ーが 義 れ い ま せ ん。	限											
GMF	上 限	81	※	5.6	※	3	※	12	8	※	※	25. 5
	下 限	66	0	1.2	0	0.3	0	0.5	0.3	0	0	8
GML	上 限	70	※	20	※	16	9.1	※	※	※	※	1
	下 限	58	0	12.9	0	3.5	0	0	0	0	0	0
GMFI 長 織 維	上 限	56	1	16	1	25	5	1	1	※	※	10
	下 限	52	0	12	0	16	0	0	0	0		5
GMFI 短 織 維 エ ラー！ ブマ クが 義 れ い ま せ ん。	上 限	75. 6	1	2.4	0.31	12. 7	5.5	2	14. 1	0.0 5	※	25. 5
	下 限	67	0	1.2	0	6.5	0	1	12. 1	0	0	0
タ イ ル ¹⁰	上 限	75	※	25	※	※	※	3.7 6	2.6 4	※	※	0
	下 限	65	0	15	0	0	0	3.3 2	0.6 1	0	0	0
ガ ラ ス 再 資 源	上 限	72. 2	※	9.9	0.78	8.2	0.7	1.8	9.7	※	※	0
	下	71.	0	7.2	0.69	6.5	0.6	1.3	7.7	0	0	0

¹⁰ 丸美陶料株式会社とクリスタルクレイ株式会社へのヒアリング

化 タ 限 イル ¹¹	8					8					
アルミナ 質耐火物 (キャスト ブル)エラ ー！ブック マークが定 義されてい ません。	設定すべき成分値を入手（設定）できなかった										
アルミナ 質耐火物 (吹付け) エラー！ブ ックマーク が定義され ていません。	設定すべき成分値を入手（設定）できなかった										

※原料から意図せず混入する 微量ならば問題ないと判断したため上限を設け
なかった

4. 2 生産素材の生産量（需要量）

需要量については、将来の需要を予測するのは困難であるため、実際の需要量を用いた。評価においては、2012 年における各素材の需要量に基づいた評価を実施した。なお、ガラス再資源化タイルは、従来のタイルと同じ機能を果たすと考え、従来のタイルの需要量をガラス再資源化タイルとして生産するケースを設定した。

5. 鳥瞰的リサイクルシステムにおける原料

5. 1 リサイクル原料の化学組成

リサイクル原料として発生する使用済み各素材の組成を設定した。4 章で記したように生産素材の組成として、ある程度の許容幅は持っていることが考えられる。あるいは生産する各社により違いがあることも考えられる¹²。本モデルにおいては、文献等から得られる一般的な組成あるいは代表的な組成として、発生物の成分組成を一意に決定することとした。また、最適化においては、天然

¹¹ クリスタルクレイ株式会社へのヒアリング

¹² 板硝子協会ヒアリングならびにガラスびん協会ヒアリング

資源消費量を最小化することから、天然資源も同様に原料として投入する必要がある。天然原料も、採掘地等により組成が異なることが考えられるが、使用済み素材と同様の考えにより、天然資源の組成についても一意に決定した。また、使用済み素材の発生時には、素材が使用されている製品から他素材が混入することが考えられる。しかし、本研究では、不純物の混入に関する定量的な情報が得られなかったことから、各使用済み素材は単体分離され、不純物を巻込まずに回収され、利用できるものと想定した。特に、板ガラスについては、現在の多くの使用済みガラスが不純物を巻込んでいるものの、本プロジェクトにおいて分離プロセスを開発しており、将来的には不純物を巻込まずに単体分離されたカレットとして回収可能であると考えられた。

いくつかの素材については、その使い方により、単体分離して回収することを望むことが不可能なものがある。短繊維ガラスは、断熱材に用いられバインダーとしてフェノール樹脂等を添加されるため、樹脂分を除去することは困難である。骨材は、セメントとともにコンクリートとして回収されるため、リサイクル原料としてはコンクリートと同じく成分において不適合となる。4章で先述のようにアルミ耐火物は、キャストブルや吹付へのリサイクル実績があるためリサイクル原料として扱った。一方、キャストブルと吹き付けは、その後、回収されないものと考えた。タイルは、その使い方から回収時に土壌等の不純物の混入が避けられず、それらの除去は困難である。

ここで、天然資源の用途でないため考慮されてこなかったが、類似した成分系の副産物として、汚泥溶融スラグを供給物として追加した。以上より、供給物として平均組成を設定できた素材について、11種の天然原料とともに、その成分組成を表7に一覧として示した。

表 7 酸化物系セラミックスの平均組成 (%)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	B ₂ O ₃	その他
GMB(透明)	72.5	0	1.8	0.03	11.2	0.1	0.8	13.1	0	0	0	0.18
GMB(茶色)	72.6	0	2.0	0.26	10.5	0.2	1.2	13.1	0.01	0	0	0.09
GMB(その他)	71.9	0	2.0	0.15	10.6	0.3	1.3	13.1	0	0	0	0.41
GMA	70	0	1.7	0.1	8.0	4.0	1.5	13	0	0	0	0.4
GMV	70	0	1.7	0.1	8.0	4.0	1.5	13	0	0	0	0.4
GMF	72.7	0	3.1	0	1.2	0	4.5	4.3	0	0	14.1	0
GML	68.6	0	16.4	0	9.5	5.2	0	0	0	0	0	0
高炉スラグ	33.8	0	13.4	0.4	41.7	7.4	0	0	0.3	0.1	0	2.9
電気炉還元スラグ	18.8	0	16.5	0.3	55.1	7.3	0	0	1	0.1	0	0.09
汚泥溶融スラグ	30.4	0	12.9	11.2	17.1	2.64	2.16	1.05	0	15.8	0	2.6
アルミ質耐火物	0.9	0.2	92.7	0.1	0.8	5	0.1	0.1	0	0	0	0
塩基性耐火物	設定すべき成分値を入手（設定）できなかった											
珪砂	99.8	0.03	0.04	0.01	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0
長石	75.2	0.03	14.5	0.23	0.62	0.04	6.08	3.3	0	0	0	0
粘土	65.4	0.54	30.2	1.78	0.27	0.4	1.2	0.26	0	0	0	0
陶石	79.4	0.11	16.5	0.54	0.21	0.12	2.9	0.23	0	0	0	0
ロウ石	77.7	0.38	20.3	0.25	0.08	0.13	0.65	0.49	0	0	0	0

石灰石	1.0 2	0	0.3 4	0.1 7	97. 6	0.8 2	0	0	0	0.0 2	0	0
ドロマイト	0.6 7	0	0.0 9	0.0 8	63. 8	35. 3	0	0	0	0.0 4	0	0
滑石	65. 9	0	0.0 8	0.0 7	0.4 4	33. 5	0	0.0 1	0.	0	0	0
珪藻土	83. 8	0.1 5	10. 8	2.3	1.2 4	0.7 7	0.4 5	0.4 2	0.0 2	0.0 1	0	0
パーライト	76. 5	0.1	13. 7	1.0	0.6 6	0.1 3	4.0	3.8 8	0.0 3	0	0	0
ソーダ灰	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	30. 8	0	0	69. 2	0
ほう酸	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0

※本表の参照文献については、Appendix 2 に記した

5. 2 リサイクル原料の発生量

廃ガラス等のリサイクル原料の発生量について、実態を観測により把握することは困難である。それは、実際には ELV から発生した廃ガラスが ASR に含まれている等、他素材と混在して廃棄物となるケースなどのためである。そこで、動的マテリアルフロー分析による推計が有効である。動的マテリアルフロー分析により、過去から経年の各用途への消費量と、その用途における製品寿命分布を用いることで、当年に使用済みとなった製品に含まれるガラスの量が推計できる。発生量は以下の式で表すことができる

$$N_{out}(t) = \sum_{a=0}^{a_{max}} N_{in}(t-a)g(a)$$

ただし、 $N_{out}(t)$ は発生量、 $N_{in}(t)$ は投入量、 a は製品の使用年数、 a_{max} は製品の最大使用年数、 $g(a)$ は寿命分布、 t は評価年を示す。

今年度の研究では、GMB（ビンガラス）、GMA（建築ガラス）、GMV（自動車ガラス）の発生量を、上記手法を用いて推計した。動的マテリアルフロー分析において用いた製品の使用年数を表 10 - 13 に示した。ただし、GMB（ビンガラス）は、生産された年にほぼ使用済みになる¹³ため、 t 年の発生量は t 年の生産量と等しいとした。また無アルカリガラスについては、最終製品への投入量データ

¹³ ガラスびんリサイクル促進評議会でのヒアリング

を入手できなかったため、 t 年の発生量は t 年の生産量と等しいとした。GMPV（太陽光パネル用ガラス）については、2012 年の発生量を入手できなかった。ただし、2015 年以降の太陽光発電設備の排出見込量、1983 年から 2011 年までの太陽電池パネルのインベントリ調査結果などが既存の文献¹⁴で確認できたため、将来想定される GMPV 発生量の概算値を表 12 の欄外に付記した。

表 8 自動車の寿命分布とパラメータ

製造年	分布形状	形状母数	尺度母数
1980-1983	ワイブル分布	3.6	10
1984	ワイブル分布	3.6	10.3
1985-1986	ワイブル分布	3.6	10.5
1987	ワイブル分布	3.6	10.7
1988	ワイブル分布	3.6	11
1989	ワイブル分布	3.6	11.3
1990	ワイブル分布	3.6	11.5
1991-	ワイブル分布	3.6	12

表 9 建築物の寿命分布とパラメータ

構造	分布形状	パラメータ
木造	対数正規	平均:3.66, 標準偏差:0.633
鉄筋コンクリート造	正規	平均:40.7 標準偏差:12.2
鉄骨造	ワイブル	形状母数:6.75, 尺度母数:64.4, 位置母数:-28.4

表 10 蛍光灯ガラスの寿命分布とパラメータ

分布形状	パラメータ
ワイブル	形状母数:2.4, 尺度母数:3.3, 位置母数:0.0

表 11 自動車 1 台あたりのガラス使用量

製造年	一台あたりのガラス量 (kg/台)
-1982	22.0
1983-1985	25.8
1986-1988	27.7
1989-1999	26.3
1992-1996	30.0

¹⁴ 株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部「平成 24 年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務報告書」2013 年 3 月 25 日

1997-2000	31.1
2001-2004	31.9
2005-	32.5

過去から 2012 年までの消費量を用いた動的マテリアルフロー分析を実施した結果、2012 年においては表 12 の結果が、2000 年から 2010 年に関しては、図 2 の結果が得られた。また、2013 年から 2015 年の各用途へのガラス消費量が 2012 年と同じと想定した際に推計される 2015 年の結果も、図 2 に同様に示した。使用済みガラスの発生量としては、ガラスびんが多く、建築がその次に多いことが分かった。また、自動車から発生する廃ガラスは、5 つの用途の合計からすると、1 割に満たないことがわかった。また、時系列での変化を見ると、現在では、以前と比べて建築から発生する廃ガラス量が増えてきている一方で、ガラスびんからの発生量が減少してきていることが分かった。自動車から発生する廃ガラスは、評価した時期を通じて、ほぼ変わらなかった。

表 12 2012 年における使用済みガラスの発生量

使用済み素材	供給（発生）量
GMB(透明)	578 千 t
GMB(茶色)	557 千 t
GMB(その他)	130 千 t
GMA	626 千 t
GMV	188 千 t
GMF	37 千 t
GML	44 千 t

* 前述の文献「平成 24 年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル基礎調査委託業務報告書」において、パワーコンディショナを含めた太陽光発電設備について「排出見込量は 2015 年で約 7～9 万 t/年、2030 年で約 25～70 万 t/年と推計される。」としている。また、太陽電池パネルのインベントリ調査結果によると、太陽電池パネルに占めるガラスの割合は 1983 年から 2011 年までの平均で 62%としている。太陽電池モジュールとパワーコンディショナの重量比を 1：1 と仮定すると、GMPV の発生量は 2015 年で 20～30 千 t/年程度、2030 年で約 75～210 千 t/年程度となる。パワーコンディショナがごく軽量であると仮定して排出量のほぼ全量が太陽電池パネルとすると先述の 2 倍程度となると推計される。

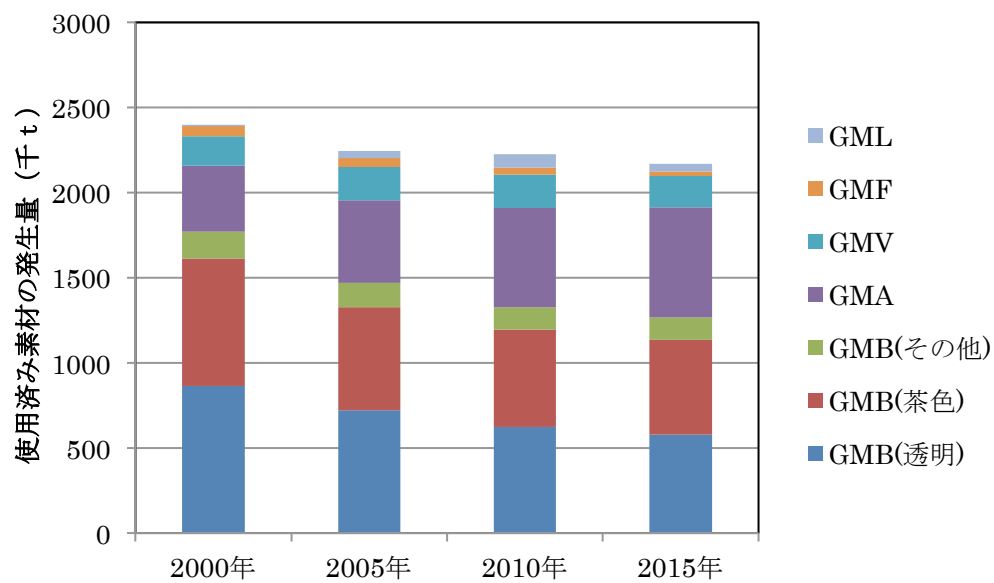


図2 使用済み素材の用途別発生推計量の時系列変化

6. 鳥瞰的リサイクルシステムにおける最適化評価結果

6. 1 最適リサイクルシステムの評価対象素材

3章2節において挙げたうち、成分と生産量から候補に適合したものを、4章と5章それぞれにおいて、生産素材としての成分制約と、リサイクル原料としての成分組成の設定の可否により、評価対象はさらに絞りこまれた。表13に、今までの情報をまとめた。

候補素材のうち、他素材のリサイクル原料となることが可能な素材をB群と、原料として許容される成分組成を決定することが可能な素材をC群とし、どちらにも該当する素材をA群として、3つのグループに分類した。また、そのどちらにも該当しない素材（液晶板ガラス（ソーダ石灰）、光学ガラス、電子管ガラス、医療用ガラス、工芸用ガラス、セラミックガラス、ガラス食器、石英ガラス、太陽光パネル用ガラス、セメント、転炉スラグ、電気炉酸化スラグ、飲食食器、碍子、骨材、紙、肥料、ジルコニア耐火物、研削砥石、及び釉薬）については、本評価においては対象外とせざるを得なかった。その分類に従って、評価の対象として選定された素材を表14に列記しなおした。

表13 評価対象の候補における最適化計算における分類

用途	素材（副産物）	生産素材	リサイクル原料	分類
ガラス	ガラスびん GMB（透明）	✓	✓	A 群
	ガラスびん GMB（茶色）	✓	✓	A 群
	ガラスびん GMB（その他）	✓	✓	A 群
	建築ガラス GMA	✓	✓	A 群
	自動車ガラス GMV	✓	✓	A 群
	蛍光灯ガラス GMF	✓	✓	A 群
	液晶板ガラス GML（無アルカリ）	✓	✓	A 群
	繊維ガラス GMFI（長）	✓		C 群
	繊維ガラス GMFI（短）	✓		C 群
鉄鋼	高炉スラグ		✓	B 群
	電気炉還元スラグ		✓	B 群
陶磁器	タイル	✓		C 群
耐火物	アルミナ質耐火物		✓	B 群
	塩基性耐火物		✓	B 群
	アルミナ質耐火物（キャストブル）	✓		C 群
	アルミナ質耐火物（吹付け）	✓		C 群

汚泥溶融	スラグ		✓	B 群
------	-----	--	---	-----

表 14 評価対象の候補素材の分類

区分	説明	対象素材（評価対象）	対象外（組成情報が設定できず）
A 群	リサイクル原料 & 生産素材	ガラスびん（透明）、ガラスびん（茶色）、ガラスびん（その他）、建築ガラス、自動車ガラス、蛍光灯ガラス、液晶板ガラス（無アルカリ）	陶磁器、太陽光パネルガラス
B 群	リサイクル原料	アルミナ質耐火物、高炉スラグ、電気炉還元スラグ、汚泥溶融スラグ	塩基性耐火物
C 群	生産素材	ガラス長繊維、ガラス短繊維、タイル	アルミナ質耐火物（キャストブル）アルミナ質耐火物（吹付け）

6. 2 評価に用いたデータの確認

最適化計算を実施するにあたって、現状の天然原料ならびにリサイクル原料の消費量を想定した際に、生産素材の成分制約の条件が満たされていることを確認することで、設定した成分制約の条件の確からしさを確認した。しかしながら、評価対象の生産素材の、現在における天然原料の消費量は、統計に記されていない（2002 年以降統計が整備されていない）。そこで、過去（1997 年から 2001 年の 5 年間）の統計値を用いて推計した。GMA、GMV、ガラス短繊維、ガラス長繊維、タイルは次の手法により推計した。素材製造に消費された天然原料の総量に対する各種天然原料の消費量の構成比を求めた。2012 年における対象素材の天然原料の総消費量¹⁵⁾に、それぞれの構成比を乗ずることで、各天然原料の 2012 年の消費量とした。GMB については、ガラスびんの LCA データ¹⁶⁾の各天然原料消費量を用いて同様の手法で推計した。GMF については、ホウ珪酸ガラス 9 製品の成分¹⁷⁾からホウ珪酸ガラスの平均組成を求め、主な天然原料であるけい砂、ソーダ灰、石灰石、ほう砂の使用割合に応じた製品組成が、平均組成に近似するような使用割合を設定し、2012 年の素材生産量に乗じて各天然原料の消費量とした。GML については、使用されている天然原料の種類や消費量データが入手できなかったことから、原料の種類を区別せず天然原料の消費量の総量が生産量と等しいとした。

推計した各天然原料の各素材への消費量ならびにリサイクル原料の消費量を用いて、GMF と GML を除く生産される各素材の成分制約の条件に合うことが確認された。表 16 に現状のリサイクルシステムを記した。現状、タイルを含めた場合では 186 万 t、タイルを除いた場合では 142 万 t の天然資源が使用されており、後掲の条件 1～5 の最適リサイクルシステムにおいては、この値と比較した際の天然資源削減量をひとつの評価指標とした。

また、天然資源削減量に加えて、最適リサイクルシステムによる CO₂ 排出削減量も評価した。CO₂ 排出削減量の算定には、カレットの利用に伴うプロセスでのエネルギー消費削減効果については①CO₂ 排出削減原単位、天然資源に対しては②CO₂ 排出原単位の 2 種類の原単位を用いた。①にはカレットの利用量を、②にはリサイクルによる消費削減量に乗じて。リサイクルした場合としなかった場合の差としての削減効果を算出した。CO₂ 排出削減量の算定に用いた原単位を表 16 に、これらの原単位を用いた現状の CO₂ 排出削減量及び CO₂ 排出量を表 17 に示す。現状のリサイクルにおいて、何もリサイクルしなかった場合と比較した

¹⁵⁾ 張玄庚、醍醐市朗、松野泰也、マテリアルフロー分析による日本におけるガラスのリサイクル可能性評価、日本 LCA 学会誌、6 (3), (2010) pp. 288-294

¹⁶⁾ 社団法人 産業環境管理協会：LCA 実務入門(1998) pp.97

¹⁷⁾ 山根正之：ガラス工学ハンドブック (1999) pp. 16

場合、プロセス側のガラスカレットの使用による CO_2 排出削減量は 29 万 t-CO_2 となり、原単位を取得した 6 種類（珪砂、長石、石灰石、ドロマイト、ソーダ灰、芒硝）の天然資源の消費に伴う CO_2 排出量は 24 万 t-CO_2 、天然資源消費削減による CO_2 排出削減量は 12 万 t-CO_2 となり、現行のリサイクルによる CO_2 排出削減量は 41 万 t となった。

表 15 現状のリサイクルシステム

単位：千 t

	GMB (透 明)	GMB (茶 色)	GMB (その 他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラ ス 長繊 維 ・短繊 維	タイ ル	天然 資源 使用 量
GMB(透明)	421	0	0	0	0	0	285	0	
GMB(茶色)	0	406	95	0	0	0		0	
GMB(その 他)	0	0	0	0	0	0		0	
GMA	0	0	0	0	0	0		0	
GMV	0	0	0	0	0	0		0	
GMF	0	0	0	0	0	0		0	
GML(無アルカ リ)	0	0	0	0	0	0		0	
高炉スラグ	0	0	0	0	0	0	0	0	
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	タイ ルを 含め た場 合： 1,863
珪砂	120	116	27	581	20.4	44	140	448	
長石	0	0	0	42	0.0		1		
粘土	0	0	0	0	0.0		0		
石灰石	17	17	3.9	11	1.5		0.4		
ドロマイト	0	0	0	81	0.0		3		
ソーダ灰	19	18	4.2	99	0.1		7		
芒硝	0.9	0.9	0.2	4.7	0.0		0.1	0	
ほう砂	0	0	0	0	5.9		12	0	
ほう酸	0	0	0	0	0.0		16	0	タイ ルを 除い た場 合： 1,415

合計	578	557	130	820	28	44	465	448	
----	-----	-----	-----	-----	----	----	-----	-----	--

表 16 CO₂ 排出削減量の算定に用いた原単位

資源		原単位 の種別	単位	値
再生 資源	ガラスカレット ¹⁸	排 出 削 減 原単位	kg-CO ₂ /kg-カレ ット（利用量）	0.237
	ガラス再資源化タイ ル ¹⁹			0.857
天 然 資 源	けい石	排出 原単位	kg-CO ₂ /kg（使用 量）	-
	けい砂 ²⁰			0.0137
	長石 ²⁰			0.0109
	粘土 ²⁰			0.379
	陶石			-
	ろう石			-
	石灰石 ²⁰			0.00411
	ドロマイト ²⁰			1.21
	滑石 ²⁰			0.0334
	珪藻土 ²⁰			0.0955
	パーライト			-
	ソーダ灰 ²¹			0.843
	芒硝 ²⁰			0.175
	ほう砂			-
	ほう酸			-

¹⁸ 醍醐市朗・張玄庚・松野泰也「使用済み自動車からの板ガラスリサイクルの環境性および事業採算性評価」日本 LCA 学会誌, 8

¹⁹ ガラス再資源化協議会「GReAT プロジェクト資料」p.53

²⁰ カーボンフットプリント制度試行事業 CO₂ 換算量共通原単位データベース ver. 4.01 (国内データ)

²¹ 株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部「平成 22 年度中小企業支援調査 諸外国の温室効果ガス排出抑制のための経済的手法が国内製造業の国際競争力に与える影響に関する調査報告書」平成 23 年 2 月 p. 2-18

表 17 現状の CO₂ 排出削減量及び CO₂ 排出量

①何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

資源	CO ₂ 排出削減量
カレット	286

②天然資源の消費に伴う CO₂ 排出量

単位：千 t-CO₂

天然資源	CO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量 タイルを含 めた場合	何もリサイクルしな かった場合と比較した CO ₂ 排出削減量
硅砂	14	14	13
長石	0.5	3	0.0
粘土	—	68	—
石灰石	0.2	0.2	0.4
ドロマイト	101	101	5
ソーダ灰	124	124	102
芒硝	1.0	1.0	1.0
合計	241	312	122

6. 3 最適リサイクルシステムの評価結果

1) ガラスに閉じた最適リサイクルシステムの評価結果

条件 1)として、評価対象には、ガラス製品と表 1 に記載したようにその原料のみとした。つまりタイル等の原料である滑石等は本条件においては原料として設定しなかった。ただし、ヒアリングで得られた高炉スラグは含めた。また、現状に近づけるため、使用済みの板ガラスには不純物の混入があり、ガラス繊維製品（ガラス長繊維及びガラス短繊維）にしか利用できないと限定した。タイルは再資源化ルートに含めないため、評価の指標となる天然資源削減量の基準は、現状のタイルを含めない場合の天然資源使用量 142 万 t とした。

表 18 に、最適計算の結果を示した。行項目に原料を、列項目に生産物を取り、各セルは、行に記された原料が列に記された生産物へ投入される量を示す。現状の天然資源投入量の内訳が不明であった素材については、現状の天然資源の総消費量から最適化リサイクルシステムによる天然資源の総消費量を減じた天然資源削減量の計を最下段に示した。天然資源削減量の合計にはこの値も含まれる。

天然原料の消費量は 86 万 t となり、現状と比較して 55 万 t 削減可能であると評価された。また、GMB が最適にリサイクルされれば、色着きの GMB や GMA、GMV へのリサイクル量が増加することにより、現状より 32 万 t 程度の天然原料を削減できる可能性が得られた。GMB は不純物除去技術や色選別技術が開発されており、さらに最適リサイクルに近づくことが期待される。

表 18 【条件 1】最適リサイクルシステムの評価結果

単

位：千 t

	GMB (透明)	GMB (茶色)	GMB (その他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラス 短繊維	ガラス 短繊維	天然資源 使用量	天然資源 削減量
GMB(透明)	355	0	0	223	0	0	0	0	—	—
GMB(茶色)	0	550	0	0	0	0	7	0	—	—
GMB(その他)	0	0	130	0	0	0	0	0	—	—
GMA	0	0	0	0	0	0	0	171	—	—
GMV	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
GMF	0	0	0	0	0	0	37	0	—	—
GML	0	0	0	0	0	0	44	0	—	—
高炉スラグ	39	7	0	11	2	17	124	43	—	—
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	864	551
硅砂	153	0	0	374	17	15	16	0		
長石	7	0	0	80	2	0	0	0		
粘土	0	0	0	0	0	11	17	0		
石灰石	0	0	0	0	0	0	0	0		
ドロマイト	0	0	0	54	0	0	0	0		
ソーダ灰	23	0	0	78	0	0	0	0		
芒硝	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	0		

ほう酸	0	0	0	0	7	0	7	0		
合計	578	557	130	820	28	44	252	214		

表 19 に最適化による CO₂ 排出削減量を示す。何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量は 36 万 t-CO₂ で、対現状比は 126%と示された。また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 20 万 t-CO₂ となった。この条件の最適化による CO₂ 排出削減量は 56 万 t となる。現行のリサイクルと比較した場合では、この条件の最適化による CO₂ 排出削減量は 15 万 t となる。

表 19 【条件 1】最適リサイクルシステムの CO₂ 排出削減量 単位：千 t-CO₂

①プロセス側の CO₂ 排出削減量

資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出削減量
カレット	360	73

②天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量

天然資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
珪砂	19	6
長石	0	- 1
粘土	-6	- 6
石灰石	1	0
ドロマイト	40	35
ソーダ灰	141	39
芒硝	2	1
合計	196	74

2) その他の酸化物系セラミックスも含めた最適リサイクルシステムの評価結果

条件 2)として、生産素材ならびに使用済み素材に、評価対象の全ての生産素材ならびにリサイクル原料を考慮した。また、タイルは、従来のタイルを想定し、従来の技術に基づき²²、廃ガラスを添加すると製造時の歩留まりや物性への悪影響があり、特にソーダガラスを入れると従来タイルの焼成温度（1250℃）では形状の不安定さが増すことから、リサイクル原料として廃ガラスを利用できないとした。使用済み板ガラスについて、条件 1)と同様の想定とし、使用済みの板ガラスには不純物の混入があり、ガラス短繊維にしか利用できないと限定した。

最適化の結果、天然原料の消費量は 66 万 t 削減可能と推計された。このように、条件 1)との比較において、ガラスに閉じたリサイクルシステムに対して、鳥瞰的リサイクルシステム（原料側と生産側にガラス以外の素材を考慮すること）により、天然原料の消費をより少なくできることが確認できた。また、成分組成の観点から、高炉スラグ以外のスラグも、ガラスの原料として少量ではあるが利用できると推計された。特に、汚泥溶融スラグは、ガラス化しているためカレットと同様の二酸化炭素回避効果を得ることもできると考えられ、リサイクル技術の開発が望まれる。

²² 丸美陶料：H24 年度本プロジェクト報告書

表 20 【条件 2】最適リサイクルシステムの評価結果

単位：千 t

	GMB (透 明)	GMB (茶 色)	GMB (その 他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラ ス 短繊 維	ガラ ス 短繊 維	タイ ル	天然 資源 使用 量	天然資 源 削減量
GMB(透 明)	185	0	0	393	0	0	0	0	0	—	—
GMB(茶 色)	0	477	0	0	0	0	7	73	0	—	—
GMB(その 他)	0	0	129	0	0	0	0	0	0	—	—
GMA	0	0	0	0	0	0	0	70	0	—	—
GMV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
GMF	0	0	0	0	0	0	37	0	0	—	—
GML	0	0	0	0	0	0	44	0	0	—	—
アルミ耐火 物	0	0	1	0	1	3	5	38	24	—	—
高炉スラ グ	14	0	0	31	0	12	124	7	0	—	—
還元スラ グ	0	23	0	0	0	0	0	10	0	—	—
污泥溶融 スラグ	1	0	1	5	5	11	0	16	118	—	—
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1, 20 5	658
珪砂	255	52	0	241	17	18	27	0	103		
長石	49	0	0	36	1	0	0	0	202		
粘土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
陶石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ロウ石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
石灰石	29	0	0	0	0	0	0	0	0		
ドロマイ ト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
滑石	0	0	0	52	0	0	0	0	0		
珪藻土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

パーライト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ソーダ灰	44	5	0	62	0	0	0	0	0		
芒硝	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう酸	0	0	0	0	5	0	7	0	0		
合計	578	557	130	820	28	44	252	214	448		

表 21 に最適化による CO₂ 排出削減量を示す。何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量は 34 万 t-CO₂ で、対現状比は 117%と評価された。また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 14 万 t-CO₂ となった。ただし、リサイクル先として追加したタイルは、現状の天然資源の消費量は、製品によりさまざまであり一意に決まらないもののおよその一般的な原料割合を得て²³、粘土と長石を 2 対 3 で消費し、ガラスカレットは使われてなかったものとした。

この条件の最適化により、何もリサイクルしなかった場合と比較した CO₂ 排出削減量は 66 万 t となり、現行のリサイクルと比較した CO₂ 排出削減量は 26 万 t となった。ただ、この条件では、汚泥溶融スラグが 16 万 t 消費され、このうち 12 万 t がタイルに消費された。カレットと同様に、ガラス化しており、カレットと同様に原料として利用することによりタイル生産プロセスにおける焼成温度の低温化に伴い二酸化炭素回避効果が期待される。しかし、この効果を評価した事例が過去にないため、それらの効果を計上できていない。リサイクル技術の開発とともにデータが整備されれば、鳥瞰的リサイクルシステムの環境影響面での優位性についても検証が進むものと考えられる。

表 21 【条件 2】最適リサイクルシステムの CO₂ 排出削減量 単位：千 t-CO₂, %

①何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量

資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出削減量
カレット	335	49

②天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量

天然資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
硅砂	18	6
長石	2	2
粘土	68	68
石灰石	1	0
ドロマイト	106	101

²³ 丸美陶料ヒアリング

滑石	-2	-2
ソーダ灰	133	31
芒硝	2	1
合計	329	207

7. 本プロジェクトで開発した技術の導入による効果量の評価

7. 1 本プロジェクトで開発した技術

1章でも述べたように、本プロジェクトでは(1)不純物の混在しない廃ガラスの提供、(2)不純物の許容濃度の高い新しい用途の開発について技術開発を実施している。これにより、資源循環が促進されることが期待されるからこそこの技術開発であるが、それら技術による資源循環性への貢献量を評価することが望まれる。さらには、資源循環性が向上することによるCO₂削減効果も大きく見込まれる。これはガラスの製造プロセスにおける特性に起因するものであり、ガラスの製造時に必要な温度がリサイクル原料を含めることにより低減でき、投入すべきエネルギー資源量が削減できるためである。

7. 2 不純物の混在しない廃ガラスの提供による効果量の評価

条件3)として、板ガラスは不純物の混入がないとし、GMBや板ガラスの原料として利用できるとした。ただし、使用済みの廃ガラスは、タイルへは利用できないとした。

天然原料の消費量は、現状と比較して143万t削減可能であると推計された。使用済み板ガラスのリサイクル原料としての利用が、大きな削減効果をもたらすことが分かった。板ガラスから板ガラスへの投入量が増加したことや、GMB(透明)からGMB(透明)への投入量が増えたことにより珪砂の投入量が、格段に減少したことが理由と考えられた。また、板ガラスからガラス短繊維へ投入されるよりは板ガラスから板ガラスへ投入された方が効果的であることが、最適化計算からも確認された。ただし、本結果は、現状のリサイクルプロセスと比較して、本プロジェクトで開発したプロセスにより不純物の混入が回避できることが前提であるとともに、リサイクル原料のコストが天然原料のコストに比べ安価であるかどうかは考慮していないことに留意が必要である。

表 22 【条件 3】最適リサイクルシステムの評価結果

単位：千 t

	GMB (透 明)	GMB (茶 色)	GMB (その 他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラ ス 短繊 維	ガラ ス 短繊 維	タイ ル	天然 資源 使用 量	天然資 源 削減量
GMB(透 明)	468	0	0	110	0	0	0	0	0	—	—
GMB(茶 色)	0	438	49	0	0	0	0	70	0	—	—
GMB(その 他)	0	0	77	0	0	0	0	53	0	—	—
GMA	89	0	0	537	0	0	0	0	0	—	—
GMV	0	42	0	146	0	0	0	0	0	—	—
GMF	0	0	0	0	24	0	13	0	0	—	—
GML	0	0	0	0	0	0	39	5	0	—	—
アルミ耐火 物	0	0	0	0	0	3	6	30	24	—	—
高炉スラ グ	19	0	5	26	0	12	134	40	0	—	—
還元スラ グ	0	23	0	0	0	0	0	0	0	—	—
污泥溶融 スラグ	1	0	0	1	3	11	0	15	118	—	—
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	438	1,425
珪砂	0	49	0	0	0	18	50	0	103		
長石	0	0	0	0	0	0	0	0	202		
粘土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
陶石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ロウ石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
石灰石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ドロマイ ト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
滑石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
珪藻土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

パーライト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ソーダ灰	0	5	0	0	0	0	0	0	0		
芒硝	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう酸	0	0	0	0	0	0	11	0	0		
合計	578	557	130	820	28	44	252	214	448		

表 23 に最適化による CO₂ 排出削減量を示す。何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量は 51 万 t-CO₂ で、対現状比は 179%と評価された。また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 43 万 t-CO₂ となった。この条件の最適化により、何もリサイクルしなかった場合と比較した CO₂ 排出削減量は 94 万 t となり、 現行のリサイクルと比較した CO₂ 排出削減量は 54 万 t となった。

表 23 【条件 3】最適リサイクルシステムの CO₂ 排出削減量

① 何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出削減量
カレット	512	226

②天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

天然資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
珪砂	25	12
長石	3	3
粘土	68	68
石灰石	1	0
ドロマイト	106	101
滑石	0	0
ソーダ灰	223	120
芒硝	2	1
合計	428	307

7. 3 シナリオ分析：タイルにおける廃ガラスの原料比率上昇技術

条件 4) として、タイルの原料の 60% に、使用済みの廃ガラスが利用できると仮定した。その他の条件は、条件 3) と同じ条件を想定した。

天然原料の消費量は、現状と比較して 143 万 t 削減可能であると推計された。最適化の結果、通常のタイルでは、原料として廃ガラスをまったく利用できない場合も、廃ガラスの利用を許容した場合も、天然原料の削減効果は同等であることが分かった。つまり、条件 3) における最適化の結果と全く同じ結果が得られた。タイルが廃ガラスを利用しなかった大きな理由として、 Na_2O と K_2O の成分制約が考えられた。タイルは、長石からこの 2 成分を供給している。ガラスは、長石以上にこの 2 成分を含んでいるため、廃ガラスを利用するとその 2 成分を薄める必要がある。そのため、廃ガラスをタイルの原料に使用すると、ナトリウムとカリウムの 2 成分をほぼ含有していない珪砂を、より多く消費してしまうため、タイルでは廃ガラスを利用しない方が最適と導出されたと考えられた。ただし、廃ガラスをタイルの原料にすることで、焼成温度低下による二酸化炭素回避効果が期待できるので、その面では、より多くの廃ガラスをタイル原料として利用することが望ましい。

表 24 【条件 4】最適リサイクルシステムの評価結果

単位：千 t

	GMB (透 明)	GMB (茶 色)	GMB (その 他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラ ス 短纖 維	ガラ ス 短纖 維	タイ ル	天然 資源 使用 量	天然資 源 削減量
GMB(透 明)	468	0	0	110	0	0	0	0	0	—	—
GMB(茶 色)	0	438	49	0	0	0	0	39	31	—	—
GMB(その 他)	0	0	77	0	0	0	0	53	0	—	—
GMA	89	42	0	495	0	0	0	0	0	—	—
GMV	0	0	0	188	0	0	0	0	0	—	—
GMF	0	0	0	0	24	0	13	0	0	—	—
GML	0	0	0	0	0	0	6	38	0	—	—
アルミ耐火 物	0	0	0	0	0	3	10	27	26	—	—
高炉スラ グ	19	0	5	26	0	12	142	42	0	—	—
還元スラ グ	0	23	0	0	0	0	0	0	0	—	—
污泥溶融 スラグ	1	0	0	1	3	11	0	16	105	—	—
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	438	1,425
珪砂	0	49	0	0	0	18	69	0	87		
長石	0	0	0	0	0	0	0	0	199		
粘土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
陶石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ロウ石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
石灰石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ドロマイ ト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
滑石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
珪藻土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

パーライト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ソーダ灰	0	5	0	0	0	0	0	0	0		
芒硝	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう酸	0	0	0	0	0	0	11	0	0		
合計	578	557	130	820	28	44	252	214	448		

表 25 に最適化による CO₂ 排出削減量を示す。何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量は 51 万 t-CO₂ で、対現状比は 179%となった。また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 43 万 t-CO₂ となった。この条件の最適化により、何もリサイクルしなかった場合と比較した CO₂ 排出削減量は 94 万 t となり、現行のリサイクルと比較した CO₂ 排出削減量は 53 万 t となった。

表 25 【条件 4】最適リサイクルシステムの CO₂ 排出削減量

① 何もリサイクルしなかった場合と比較したプロセス側の CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出削減量
カレット	512	226

②天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

天然資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
珪砂	25	12
長石	3	3
粘土	68	68
石灰石	1	0
ドロマイト	106	101
滑石	0	0
ソーダ灰	223	120
芒硝	2	1
合計	428	306

7. 4 シナリオ分析：セラミックタイルにおける廃ガラスの原料比率上昇技術

条件 5)として、生産素材のタイルを、従来のタイルからガラス再資源化タイルとした。その結果、天然原料の消費量は、現状と比較して 138 万 t 削減可能であると推計された。ガラス再資源化タイルのガラス利用率は 50%であった。条件 4 と比較すると廃ガラスの利用量が増加したにもかかわらず、天然資源消費の削減量は逆に減少したことがわかる。条件 4 と比較して、タイル向けの長石の消費量は減少したが、各ガラス向けの珪砂の消費量が増加したためであった。ただし、これは天然原料削減からの意見であり、二酸化炭素回避からの点で考えると、条件 5 の方がより多くの二酸化炭素回避効果が期待できる。また条件 3-5 では本来ガラスの原料である長石、石灰石、ドロマイトがガラス向けには利用されていなかった。これらは主に Al_2O_3 、 CaO 、 MgO を補う原料であり、使用済み素材を十分に活用すれば、これらの原料を使用せずにガラス類を製造可能という示唆を得た。

表 26 【条件 5】最適リサイクルシステムの評価結果

単位：千 t

	GMB (透明)	GMB (茶色)	GMB (その他)	GMA +GMV	GMF	GML	ガラス 短繊維	ガラス 短繊維	ガラス 再資源化 タイル	天然 資源 使用 量	天然資 源 削減量
GMB(透明)	357	0	0	120	0	0	0	0	101	—	—
GMB(茶色)	0	434	0	0	0	0	0	0	123	—	—
GMB(その他)	0	10	120	0	0	0	0	0	0	—	—
GMA	178	0	0	448	0	0	0	0	0	—	—
GMV	0	0	0	188	0	0	0	0	0	—	—
GMF	0	0	0	0	1	0	0	36	0	—	—
GML	0	0	0	0	0	0	0	44	0	—	—
アルミ耐火物	0	0	0	0	1	3	11	29	30	—	—
高炉スラグ	24	7	5	30	0	12	146	43	7	—	—
還元スラグ	0	21	0	0	0	0	0	0	0	—	—
汚泥溶融スラグ	1	0	1	2	5	11	0	17	27	—	—
珪石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	480	1,383
硅砂	19	76	5	32	16	18	82	35	123		
長石	0	0	0	0	0	0	0	0	34		
粘土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
陶石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ロウ石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
石灰石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ドロマイ ト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

滑石	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
珪藻土	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
パーライト	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ソーダ灰	0	9	0	0	0	0	0	0	4		
芒硝	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう砂	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ほう酸	0	0	0	0	5	0	13	10	0		
合計	578	557	130	820	28	44	252	214	448		

表 27 に最適化による CO₂ 排出削減量を示す。プロセス側の CO₂ 排出削減量は 71 万 t-CO₂ で、対現状比は 247%となった。ガラス再資源化タイルによる CO₂ 排出削減量は 25 万 t-CO₂ となった。また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 42 万 t-CO₂ となった。

また、天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量は 42 万 t-CO₂ となる。この条件の最適化により、何もリサイクルしなかった場合と比較した CO₂ 排出削減量は 113 万 t となり、現行のリサイクルと比較した CO₂ 排出削減量は 72 万 t となった。

表 27 【条件 5】最適リサイクルシステムの CO₂ 排出削減量

① プロセス側の CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

資源／製品	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
カレット	706	420

②天然資源の消費削減に伴う CO₂ 排出削減量

単位：千 t-CO₂

天然資源	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出量
珪砂	23	10
長石	3	3
粘土	68	68
石灰石	1	0
ドロマイト	106	101
滑石	0	0
ソーダ灰	219	116
芒硝	2	1
合計	422	300

8. 評価結果のまとめ

条件 1 と 2 の比較により、より多くの素材を同時に考慮しリサイクルを考えた方がより大きなリサイクルによる天然資源の消費削減効果が期待できることが分かった。また条件 2 と 3 の比較により不純物の混入がない板ガラスカレットは、天然原料消費量削減に多大なインパクトを持つことが分かった。最後に条件 4 と 5 の比較により、ガラス再資源化タイルは、今回の最適化の条件下では、天然資源の消費削減の効果はなく、二酸化炭素排出量の削減の効果が見込まれるだけであることがわかった。ただ、不純物元素の混入等、今回考慮できなかった要因を考慮することで、タイルの原料としての廃ガラスの利用の重要性は評価されるものと考えられる。評価システムとしての今後の課題であろう。

表 28 条件 1 から 5 のまとめ

	条件の概要	天然資源消費削減可能量	何もリサイクルしなかった場合と比較した CO ₂ 排出削減可能量	現行のリサイクルと比較した CO ₂ 排出削減可能量
条件 1	ガラス類の原料・使用済み素材を対象(現状の最適化) ただし板ガラスは不純物の混入を考慮	55 万 t	56 万 t	15 万 t
条件 2	ガラス以外の酸化物セラミックスも対象 ただし板ガラスは不純物の混入を考慮	66 万 t	66 万 t	26 万 t
条件 3	板ガラスの不純物の混入を考慮しないかつタイルのガラス利用率 0%	143 万 t	94 万 t	54 万 t
条件 4	板ガラスの不純物の混入を考慮しないかつタイルのガラス利用率 60%以下	143 万 t	94 万 t	53 万 t
条件 5	板ガラスの不純物の混入を考慮しないかつガラス再資源化タイルのガラス利用率 60%以下	138 万 t	113 万 t	72 万 t

9. 今後の課題

9. 1 不純物の混入過程ならびに混入量の調査

今年度の研究では、太陽光パネル用ガラス（GMPV）について、量や組成のデータが不十分で評価の対象とできなかった。しかし、近年の大量の太陽光パネルの設置から、将来的には一時的に多くの太陽光パネル用ガラスが廃棄されることが予想され、そのリサイクル先を考慮する必要があると考えられる。太陽光パネル用ガラスについても調査を進め、本研究の枠組みのような酸化物系セラミックスも含めた鳥瞰的なリサイクルシステムを評価するモデルにおいて、最適なりサイクルシステムを設計することが望まれる。

9. 2 不純物の混入過程ならびに混入量の調査

廃ガラスへの不純物の混入が、現状リサイクルが進まない要因であるため、不純物の混入が、どの使用済み製品からの回収時に、どの程度の量混入するかを明らかにする必要がある。ただし、そのような情報はいままで、データとして収集されてこなかった。今後、調査を実施する等して、不純物の混入の実態を情報として整備する必要があると考えられる。

9. 3 立地も考慮したコスト最適化

ガラスや酸化物系セラミックスのリサイクルにおいては、発生地と需要地が必ずしも一致せず、場合によっては長距離の輸送が必要となることが考えられる。そのため、発生地と需要地の立地情報も重要な要素となる。しかしながら、今年度は、各地点から発生するリサイクル原料の発生量ならびに、それら需要先の立地情報について、詳細なデータを収集することが困難であったため、本評価では考慮しなかった。

Appendix 1

表 2 に示した各素材の生産量と成分の参照文献一覧

用途	素材（副産物）	生産量（生成量）	10 種類の酸化物以外の成分
ガラス	ガラスびん（透明）	ガラスびんリサイクル促進協議会へのヒアリング	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】（2002）pp. 446
	ガラスびん（茶色）	ガラスびんリサイクル促進協議会へのヒアリング	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】（2002）pp. 446
	ガラスびん（その他）	ガラスびんリサイクル促進協議会へのヒアリング	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】（2002）pp. 446
	建築ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 34	板硝子協会へのヒアリング
	自動車ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 34	板硝子協会へのヒアリング
	蛍光灯ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 481-483
	液晶板ガラス（ソーダ石灰）	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 34	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 504
	液晶板ガラス（無アルカリ）	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 504
	光学ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 531-534
	電子管ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 481-483
	医療用ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 474
	工芸用ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	不明
	セラミックガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 581
	ガラス食器	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	山根正之：ガラス工学ハンドブック（1999）pp. 468
	繊維ガラス	平成 24 年 窯業・建材統計年報（pdf）pp. 35	セントラルグラスファイバー株式会

	ラ ス (長)	計年報 (pdf) pp. 34	社ホームページ〈入手先 : http://www.centralfiberglass.com/jp/glass_fiber/outline/ 〉
	繊維 ガ ラ ス (短)	平成 24 年 窯業・建材統 計年報 (pdf) pp. 34	ガラスびんリサイクル促進協議会へ のヒアリング
	石 英 ガ ラ ス	平成 24 年 窯業・建材統 計年報 (pdf) pp. 35	ガラスの種類辞典(ホームページ)〈入 手先 : http://www.glass-dictionary.com/tainetu/04/ 〉
	太 陽 光 パ ネ ル 用 ガ ラ ス	不明	山根正之: ガラス工学ハンドブック (1999) pp. 16
セ メ ン ト		平成 24 年 窯業・建材統 計年報 (pdf) pp. 36	九州大学大学院工学府ホームペー ジ: 入手先九州大学 工学部 地球環境 工学科 建設都市工学コース 建設材 料システム工学研究室ホームページ 〈 入 手 先 : http://www.doc.kyushu-u.ac.jp/zai-ryo/doc/mat2010fall-02.pdf 〉
鉄 鋼	高 炉 ス ラ グ	鉄鋼スラグ協会 鉄鋼 スラグ統計年報(平成 24 年度実績)〈入手先 : http://www.slg.jp/pdf/fs-136.pdf 〉	鉄鋼スラグ協会ホームページ: 鉄鋼 スラグについて 鉄鋼スラグの化学的 性質〈入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html 〉
	転 炉 ス ラ グ	鉄鋼スラグ協会 鉄鋼 スラグ統計年報(平成 24 年度実績)〈入手先 : http://www.slg.jp/pdf/fs-136.pdf 〉	鉄鋼スラグ協会ホームページ: 鉄鋼 スラグについて 鉄鋼スラグの化学的 性質〈入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html 〉
	電 気 炉 酸 化 ス ラ グ	鉄鋼スラグ協会 鉄鋼 スラグ統計年報(平成 24 年度実績)〈入手先 : http://www.slg.jp/pdf/fs-136.pdf 〉	鉄鋼スラグ協会ホームページ: 鉄鋼 スラグについて 鉄鋼スラグの化学的 性質〈入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html 〉
	電 気 炉 還 元 ス ラ グ	鉄鋼スラグ協会 鉄鋼 スラグ統計年報(平成 24 年度実績)〈入手先 : http://www.slg.jp/pdf/fs-136.pdf 〉	鉄鋼スラグ協会ホームページ: 鉄鋼 スラグについて 鉄鋼スラグの化学的 性質〈入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html 〉

陶磁器	飲食食器	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 37	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 66
	碍子	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 37	経済産業省ホームページ：政策について 政策一覧 ものづくり/情報/流通・サービス ものづくり産業振興住宅産業窯業建材 総合骨材需給表(pdf) <入手先 : http://www.meti.go.jp/policy/jyutaku/stat/files/18shinzai.pdf >
	タイル	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 37	丸美陶料株式会社へのヒアリング
骨材		経済産業省ホームページ：政策について 政策一覧 ものづくり/情報/流通・サービス ものづくり産業振興住宅産業窯業建材 総合骨材需給表(pdf) <入手先 : http://www.meti.go.jp/policy/jyutaku/stat/files/18shinzai.pdf >	JIS コンクリートポータルサイト(ホームページ)：コンクリート骨材 <入手先 : http://www.jsa.or.jp/report/concrete2/kotsuzai.html >
紙		日本製紙連合会ホームページ：製紙産業の現状 紙・板紙 <入手先 : http://www.jpa.gr.jp/states/global-view/ >	財団法人紙の博物館：紙ができるまで pp. 1-8
肥料		農林統計協会：ポケット肥料要覧(2010) pp. 4-5	農林水産省 肥料の特性 <入手先 : http://www.maff.go.jp/j/seisan/kanryo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/sdojo20.pdf >
耐火物	アルミナ質耐火物	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	新日鐵住金へのヒアリング
	塩基性耐火物	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 822-825
	アルミナ質耐	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	新日鐵住金へのヒアリング

火物(キャスタブル)		
アルミナ質耐火物(吹付け)	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	新日鐵住金へのヒアリング
ジルコニア耐火物	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 822-825
研削砥石	平成24年 窯業・建材統計年報 (pdf) pp. 39	井上孝二：ビトリファイド研削砥石，セラミックス 43 (2008)，No. 8，pp. 666-668
釉薬	不明	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 745

Appendix 2

表7に示した酸化物系セラミックスの平均組成の参照文献一覧

	参照文献
GMB(透明)	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 446
GMB(茶色)	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 446
GMB(その他)	日本セラミックス協会：セラミック工学ハンドブック【応用】(2002) pp. 446
GMA	板硝子協会へのヒアリング
GMV	板硝子協会へのヒアリング
GMF	山根正之：ガラス工学ハンドブック (1999) pp. 16
GML	無アルカリガラス 公開番号：W0 2012063643 A1 特許出願人：日本電気硝子 < 入 手 先 : https://www.google.com/patents/W02012063643A1?cl=ja&hl=ja > 無アルカリガラスの製造方法 公開番号：W0 2013084832 A1 特許出願人：旭硝子 < 入 手 先 : http://www.google.com/patents/W02013084832A1?cl=ja >

高炉スラグ	鉄鋼スラグ協会ホームページ：鉄鋼スラグについて 鉄鋼スラグの化学的性質 < 入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html >
電気炉還元スラグ	鉄鋼スラグ協会ホームページ：鉄鋼スラグについて 鉄鋼スラグの化学的性質 < 入手先 : http://www.slg.jp/slag/character.html >
汚泥熔融スラグ	高岡昌輝 武田伸夫 長谷川明巧：下水汚泥焼却灰熔融時の灰分組成が重金属の挙動に与える影響 土木学会論文集 vol. 601, 7-8, (1998), pp 59-71
アルミ質耐火物	新日鐵住金へのヒアリング
塩基性耐物	設定すべき成分値を入手（設定）できなかった
硅砂	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 91-128
長石	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 132-133, 138-151, 156-171
粘土	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 183-214, 218-251, 262-263, 764
陶石	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 352-385
ロウ石	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 406-433
石灰石	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 442-567
ドロマイト	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 575-582
滑石	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 584-585
珪藻土	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 622-630
パーライト	工業技術連絡会議窯業連合部会：日本の窯業原料 (1992) pp. 643-653
ソーダ灰	
ほう砂	Mineralogy Database < http://www.webmineral.com/ > Borax Mineral Data < http://www.webmineral.com/data/Borax.shtml#_VJ5-J14gM >

平成 26 年度研究報告

セラミックス系リサイクル原料の水熱養生における利用
技術開発に関する共同研究

平成 27 年 2 月 27 日

東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻

坂井研究室

1. 研究目的

セラミックス系リサイクル原料の水熱養生プロセスによる建材への利用の可能性について検討する。セラミックス系原料としては、分別回収した廃ガラスや廃タイルなどがあるが、これらサイクル原料を用いて配合条件や反応時間などを変化させ生成物について検討し、オートクレープ養生気泡コンクリートへのリサイクル原料の利用の可能性について明らかにする。

2. 既往の研究

石灰ケイ酸系の水熱反応では微量元素の影響について様々な研究が行われている^{1)~4)}。出発原料のスラリー合成により Al、アルカリ、石膏などの添加による報告がある。Al の添加では Si ⇄ Al 固溶置換により tobermorite への結晶化は促進される傾向にあるが、過剰添加により生成する hydrogarnet は強度低下や tobermorite の生成を律速するなどの影響がある。この固溶限界は 15~20% であるとされている³⁾。またアルカリの添加は微量であればシリカの溶解度を増大し反応を促進する傾向があるが、過剰添加ではかえって反応が遅延するなどの影響がある¹⁾。石膏についても同様の影響が確認されており、過剰添加は tobermorite の生成を妨げる⁵⁾。固化体の水熱合成においては、フライアッシュで原料のケイ石を 25% 置換することにより tobermorite の生成量が増大することが報告されている⁶⁾。しかし、フライアッシュの粉末度が大きい場合には tobermorite の生成に効果的ではなくなる場合がある⁷⁾。また、フライアッシュは採取方法及び採取された火力発電所によって化学組成やガラス化率などの諸物性が大きく異なる。ガラス化率の高いフライアッシュを多量に用いる場合、固化体の強度低下が懸念される⁸⁾。使用した JIS のフライアッシュ IV 種ではフライアッシュの粉末度に上限値が設定されておらず、粗粒を選択的に入手することが難しい⁷⁾。既に述べたとおり、原料中のガラス組成やガラス化率が tobermorite の生成に及ぼす影響は大きく、使用する原料の評価は極めて重要である。

3. 各種ガラス系リサイクル原料の影響

3.1 原料の化学組成

普通ポルトランドセメント（以下 OPC）、ケイ石粉末（ブレーン比表面積値 3430 cm²/g、3740 cm²/g）、ガラス系リサイクル原料であるタイルセルベン(PW)、液晶ガラス(GML)、ガラス瓶(GMB) 及び比較検討のために用いた火力発電所で発生するフライアッシュ(FA)の化学組成を Table3-1 に示す。また、Bogue 式より算出した鉱物組成を Table3-2 に示す。ガラス系リサイクル原料は、粉末度による影響を考慮し、平均粒径約 10 μm に粉砕されたものを利用した。

Table3-1 Chemical composition of raw materials

Materials	Chemical composition /mass%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	B ₂ O ₃
OPC	21.31	5.09	3.16	65.44	1.01	2.02	<0.1	<0.1
Silica Powder	93.6	1.7	1.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PW	73.2	16.3	1.12	0.90	<0.01	<0.1	1.53	0.03
GML	62.8	18.7	0.06	4.23	<0.01	<0.1	0.09	2.75
GMB	71.1	1.87	0.33	10.8	<0.01	<0.1	13.6	0.05
FA	59.2	25.4	5.31	2.86	0.46	<0.1	0.62	<0.1

Table3-2 Mineral composition of OPC

Materials	Mineral composition /mass%				Ig.loss
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
OPC	60	16	8	10	0.71

3.2. 出発物質の解析

(1)比表面積の測定

ガラス系リサイクル原料については、ゲーリュサック型比重瓶を用いて密度を測定した後、JIS R 5201-1997比表面積試験に従い、ブレーン空気透過装置を用いて比表面積を測定した。

(2)強熱減量の測定

アスピレーター中で 24 時間減圧乾燥した OPC、ケイ石粉末、FA およびガラス系リサイクル

原料をアルミナるつぼに約 1g 量りとった。電気炉で 1000℃に保持し、30 分ごとに恒量になるまで質量測定を繰り返した。焼成前の粉体質量に対する質量減少分を強熱減量(ig.loss)とした。

(3) 各試料の粉末 X 線回折

結晶相の同定として、X 線回折装置(リガク 製 全自動水平型多目的 X 線回折装置 Smart Lab 以下 XRD)を用いた。測定条件は、K- β フィルターにより遮光した CuK α 線を 40kV、30mA で用い、ステップスキャン法(ステップ幅=0.02° スキャニングスピード=10° /min)とし、ケイ石粉末、各ガラス系リサイクル原料、特級試薬の石英及び非晶質シリカを測定し、結

晶相を同定した。

(4) XRD による鉱物組成定量に用いる試料の調製

ケイ石粉末、FA および PW の鉱物組成については、CaF₂を内部標準物質とした XRD 内部標準法により α -quartz および mullite の検量線を作成した。但し、FA はボールミルでメディア径 5 μ m 程度になるまで粉砕した。一般的にフライアッシュ粒子は中心部分に結晶質が多く、外側がガラス相に覆われた構造として知られている。そのため X 線が外側のガラス相に吸収され内部の結晶質に届く線量が少なくなる傾向にある。この影響を軽減するため、粉砕を行った。検量線作成用のマトリクス試料として特級の沈降製非晶質シリカを使用した。石英、ムライト、CaF₂は特級試薬を使用した。これらの試料は 105℃で 24 時間乾燥したものを検量線用の試料とした。試料の配合割合として石英は 20、40、60、80、100mass%、ムライトは 1、2、4、6、8、10mass%になるように非晶質シリカと混合し、各試料は内割りで 10mass%のフッ化カルシウムを加えアルミナ乳鉢でアセトンを用いた湿式混合 10 分、乾式混合 10 分を行い、105℃で 24 時間乾燥した。鉱物組成を算出するガラス系リサイクル原料についても、同様の処理条件で 10mass%の CaF₂を混合した。

(5)結晶相の定量およびガラス化率の決定

ステップスキャン法(ステップ幅=0.0072° スキャニングスピード=2° /min)により(3)で調

整した試料の α -quartz(20.8°)、mullite(16.4°)、fluorite(28.3°)相を測定し、ピーク面積をフィッティング法により求め、fluorite 相に対する比率を算出した。石英、ムライトの混合割合に対する fluorite とのピーク面積比をプロットし、線形近似を行って α -quartz および mullite の検量線とした。作成した検量線からケイ石粉末、PW および FA の α -quartz、mullite 含有率を求めた。これらの値と ig.loss を除いた分をガラス相とした。

3.3 試験体の作製

OPC、ケイ石粉末を質量比 1:1 とし、水粉体質量比は 0.8 とした。セメントペーストの材料

分離を防ぐため増粘剤として花王ビスコトップを 2mass%加えて練り混ぜた後、流し込み成形を行った。その後、室温から 72℃まで 4 時間の湿空養生を行った後に脱型(前養生)し、多量のアセトン中で水和停止した。硬化体を压力容器に入れ、180℃飽和水蒸気圧(10atm) 下で水熱養生(オートクレーブ養生)を 12 時間行った後に水和停止し、アスピレーターによる減圧乾燥

を 24h 行った。同様の実験を、ケイ石に対する質量比で 25%置換し、各リサイクル原料を用い

て行った。

3.4 試験体の解析

(1)XRD による生成物の同定及びトバモライト生成量の評価

原料反応への影響を評価するため、ケイ石粉末のみ(S100)と、ケイ石を 25%置換したフライアッシュ(FA25)、タイルセルベン(PW25)、液晶ガラス(GML25)、ガラス瓶(GMB25)の系について、それぞれ原料混合粉(S)、前養生後(N)、オートクレーブ養生 12 時間(12h)

を特級試薬の酸化マグネシウムを内部標準試料とし、XRD 試験を行った。硬化体試料は篩を用いて 150 μ m 以下まで粉碎し、内割で 10mass%の酸化マグネシウムを加え、メノー乳鉢でアセトンを用いた湿式混合 10 分、乾式混合 10 分を行い、アスピレーター中で 24h 減圧乾燥した。ステップスキャン法(ステップ幅=0.0072°、スキャンニングスピード=2°/min)により $2\theta=5\sim70^\circ$ を測定した。各ピークから反応生成物質を同定し、tobermorite 相が確認された場合 periclase に対する tobermorite のピーク面積比を算出した。

3.5 結果と考察

3.5.1 原料粉末の特性

OPC、ケイ石粉末、フライアッシュ(FA)及びガラス系リサイクル原料(PW、GML、GMB)の密度、比表面積を Table3-3 に示す。また、各原料及び特級試薬の石英、沈降性非晶質シリカ(AS)の XRD 測定結果を Fig.3-1 に示す。FA 及び PW では α -quartz 相、mullite 相が確認された。GML、GMB については結晶相が確認されず、20℃付近に非晶質なブロードのピーク(ハロー)が確認された。但し、AS、FA、PW、GML、GMB のいずれにおいても出現したハローの位置が異なるため、ガラス相の構造が異なると考えられる。Fig.3-2 に作成した α -quartz 及び mullite の検量線を示す。これを用いて、ケイ石粉末、FA 及び PW の鉱物組成を算出した

結果を Table3-4 に示す。ケイ石粉末の α -quartz 含有量は 90.3%であった。PW は FA に比べて α -quartz 量が多く、mullite 量が少ない。またガラス化率 80 程度であり、大部分は非晶質である。原料中のガラス組成を化学組成及び鉱物量から算出した結果を Table.3-6 に示す。ガラス相組成では、PW 及は同種の結晶相を含み、Al 量は異なるものの化学組成、ガラス組成については類似点が多くみられる。

3.5.2 結晶相の同定及び定量

ケイ石粉末使用(S-100)での原料混合粉(S)、前養生(N)、オートクレーブ養生(12h)の XRD 結果を Fig.3-3 に示す。原料中に含まれる alite などのセメント中の鉱物及び α -quartz は前養生によって減少し、portlandite(以下 CH)が生成した。オートクレーブ養生後では alite 相は確認されず、反応によって全て消費された。次に、各種原料で置換した系での前養生時(N)及びオートクレーブ養生時(12h)の XRD 結果を Fig.3-4 及び Fig.3-5 に示す。前養生においては CH の生成量や生成物に大きな変化は見られなかった。オートクレーブ養生後の FA25 では tobermorite 相が低角側にシフトし、tobermorite 生成量は増大した。この結果は、原料中の Al が tobermorite 中に固溶($\text{Al} \leftrightarrow \text{Si}$ 型の固溶置換)し安定化されることで tobermorite の結晶化が促進されるとしている既往の研究(引用)と一致している。PW25 では FA25 と同じ傾向が見られ、tobermorite ピークの低角シフト及び生成量の増大が確認された。一方で、GMB25 では S100 に酷似した回折ピークが得られたが、 7.5° 及び 29.4° での差異が顕著であるため、tobermorite 相ではなく類似のカルシウムシリケート水和物(以下 C-S-H)が生成したと考えられる。GML25 おいても同様の傾向が確認された。但し、 7.5° でのピーク面積は $\text{GML} < \text{GMB}$ であるのに対し、 29.4° では $\text{GMB} < \text{GML}$ である。原料中には Na_2O や B_2O_3 が含まれることから、原料の非晶質部分の構造が異なるため、生成した水和物の構造ないし結晶成長の方向が異なることが原因と推察される。内部標準法による tobermorite/periclase の強度比を Table.2-6 に示した。タイルセルベンを使用した系での tobermorite 生成量が最も多かった。

2.4 結論

(1)タイルセルベンは α -quartz を 15%、mullite を 2%含有し、81%はガラス相であった。液晶ガラス、ガラス瓶は鉱物を含まないガラスであり、XRD でのハロー位置がそれぞれ異なることから非晶質体の構造が異なると考えられる。

(2)ガラス系リサイクル原料 3 種を用いてケイ石を 25%置換し比較した結果、タイルセルベンの使用によってトバモライト生成量は増大することが確認された。また、その際低角側へのピークシフトを伴ったが、Al の Si 固溶置換だと考えられる。

(3)液晶ガラス及びガラス瓶を用いた置換では、tobermotite とは別種の結晶性 C-S-H が生成したと考えられる。これは、ガラス質の構造及び Na_2O や B_2O_3 の影響と推察される。

Table 3-3 Fineness and density

Materials	ブレーション/cm ² ・g ⁻¹	Density/g・cm ⁻³
OPC	3430	3.16
ケイ石粉末	2370	2.67
タイルセルペン	4530	2.46
液晶ガラス	3570	2.60
瓶ガラス	3180	2.86
フライアッシュ	3510	2.28

Table3-4 Mineral composition of glass materials

Materials	Mineral composition /%			
	ig.loss	α -quartz	Mullite	glass
Silica Powder	0.70	90.3	0.0	9.0
PW	0.85	15.4	2.4	81.4
FA	2.03	3.2	4.5	90.2

Table2-5 Chemical composition of glass phase in PW , FA

Materials	Chemical composition of glass/mass%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
ケイ石粉末	37	18.8	16.6	<0.1				
PW	70.2	20.0	1.38	1.11	0.77	<0.01	1.88	4.52
FA	62.3	24.3	5.31	2.86	1.21	0.46	0.62	1.4

Table2-6 Area intensity ratio of tobermorite/periclase

	Ratio
S100	0.157
PW25	0.247
FA25	0.204

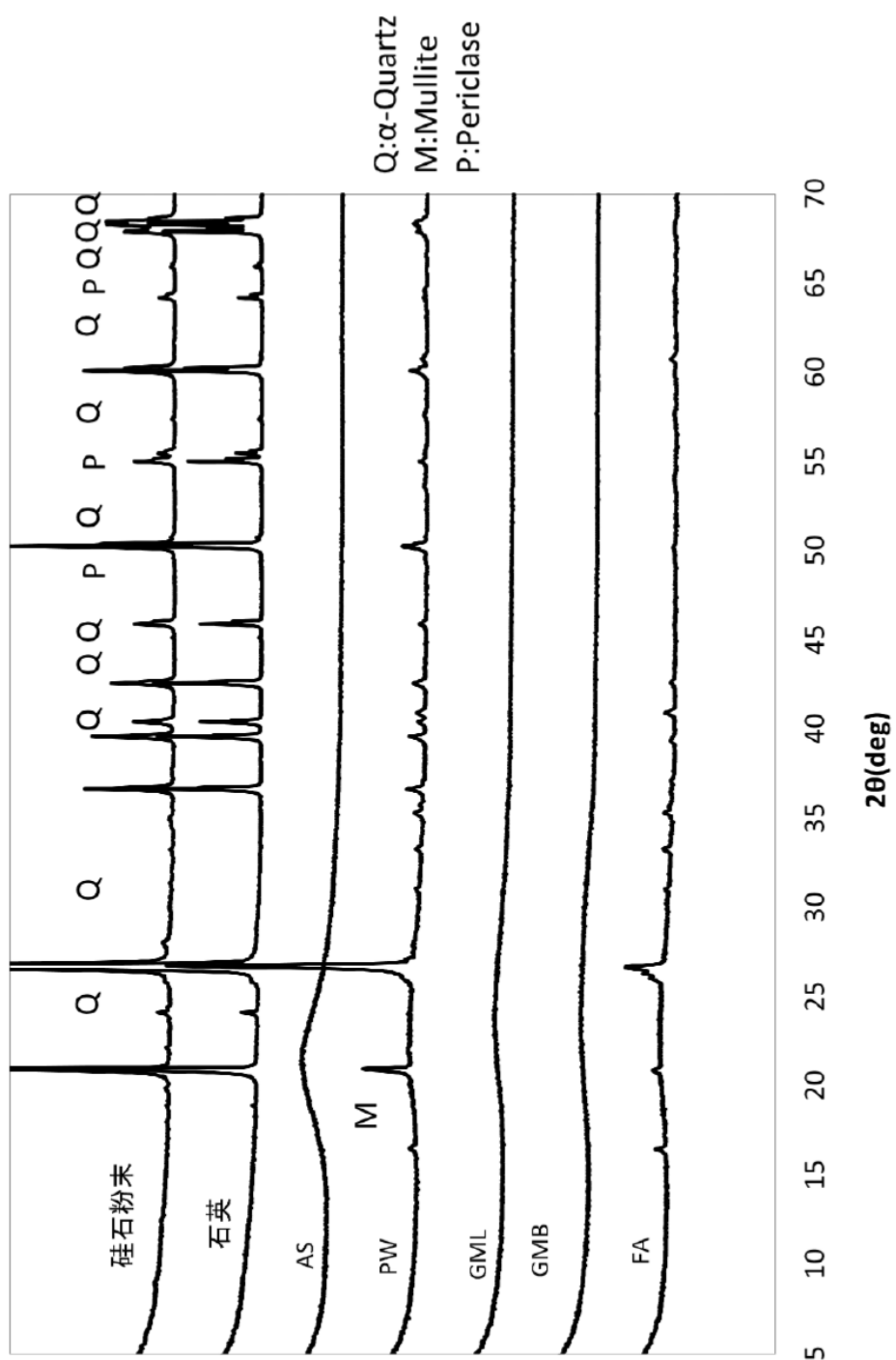


Fig.3-1 XRD pattern of glass materials

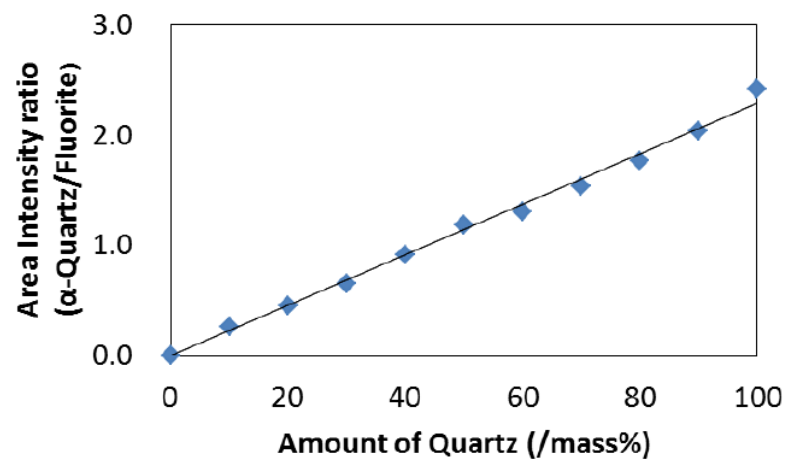
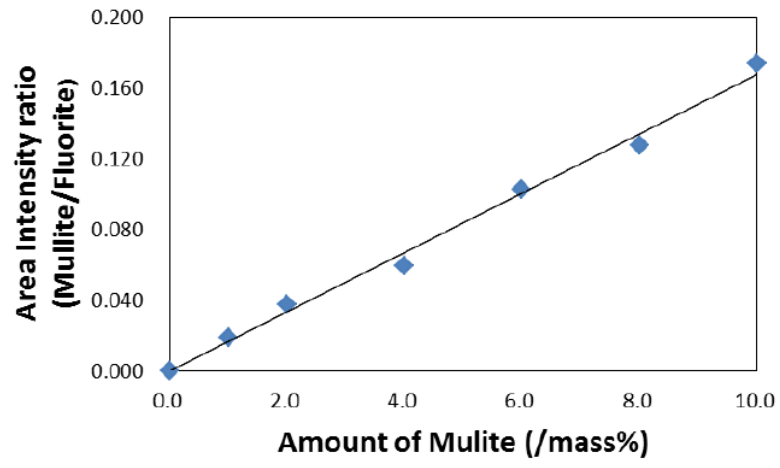


Fig.3-2 Standards carves for α -quartz and mullite

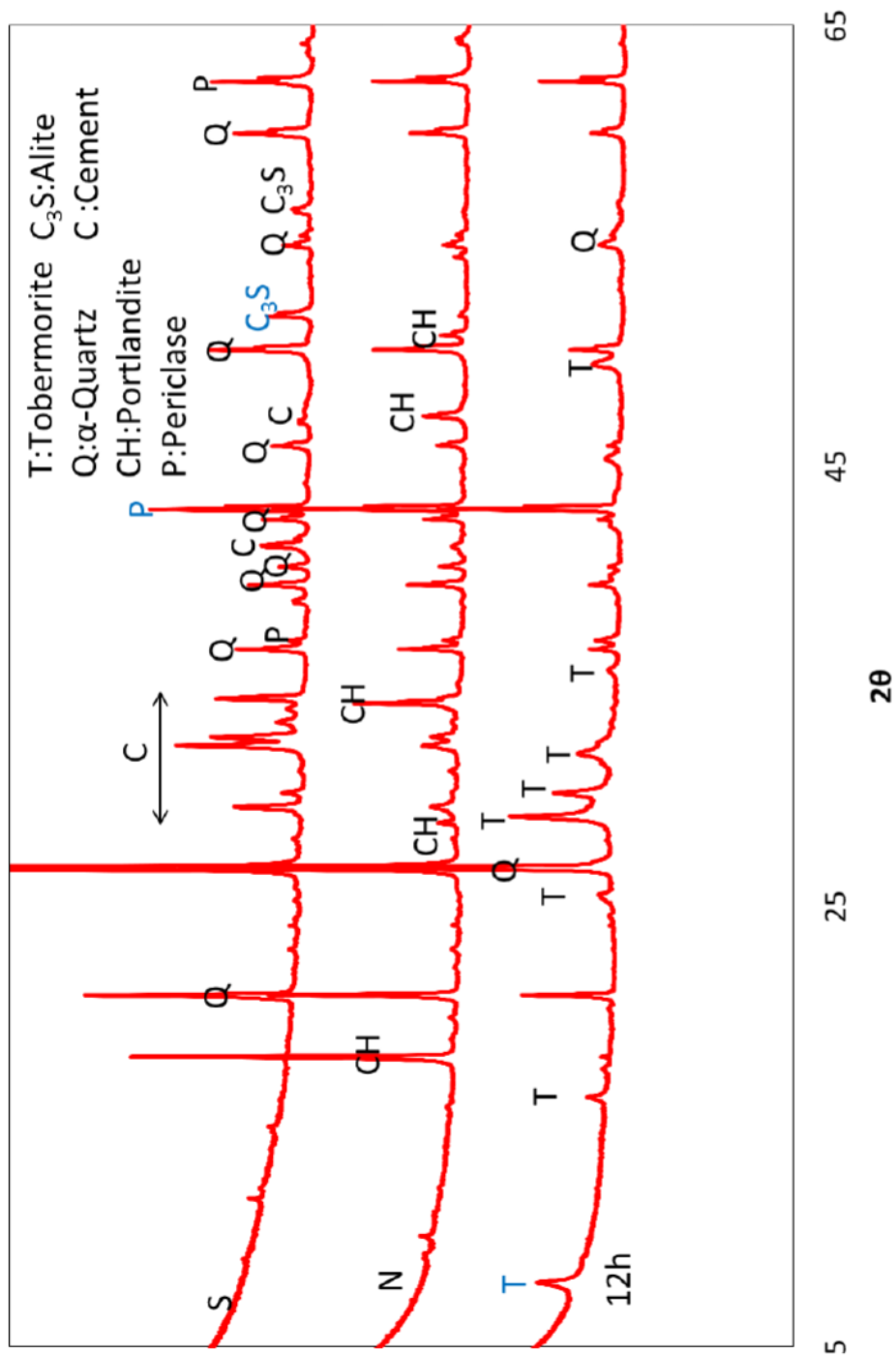


Fig.3-3 XRD pattern of S-100

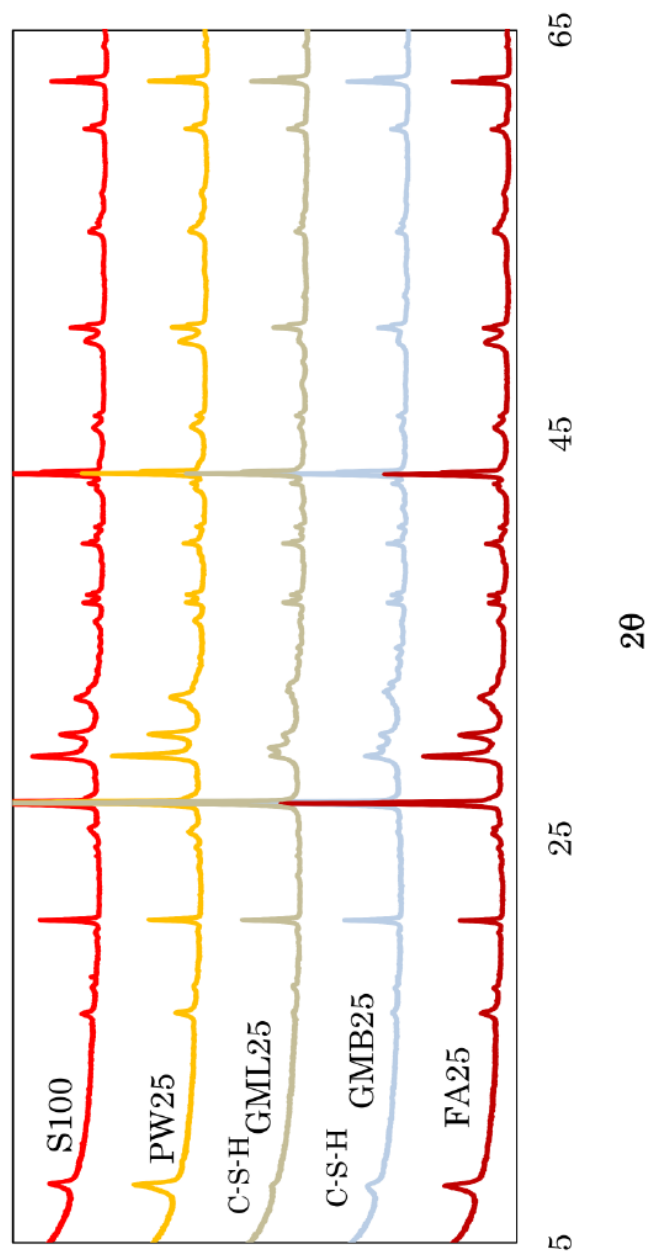


Fig.3-4 XRD pattern of autoclaved 12 hours

参考文献

- 1) 近藤連一,大沢栄也,松丸裕,北村勝,加東高明:石灰けい酸系水熱反応,セメント技術年報,**21**,92,(1967)
- 2) Kiyoshi ASAGA, Manabu SASAKI, Sang-Heul, Masaki DAIMON:Effect of KOH and $\text{Al}(\text{OH})_3$ on the Morphology of Tobermorite,**196**,140,(1985)
- 3) 光田武,村知幹夫,引地康夫:Al-Si gel を出発原料に用いた Al-tobermorite の水熱合成,セメント技術年報,**25**,35,(1971)
- 4) 光田武,村知幹夫:Lime-Zeolite の熱水反応生成物について,セメント技術年報,**25**,82,(1971)
- 5) 井上憲弘,恒松修二,原尚道:フライアッシュの水熱反応と硬化特性,セメント技術年報,**37**,49,(1983)
- 6) 三田卓,大塚拓,大宅淳一,坂井悦郎:フライアッシュを利用した高強度ケイ酸カルシウム水和物固化体の水熱合成,セメント・コンクリート論文集,**62**,108,(2008)
- 7) 坂井悦郎:オートクレーブ処理高強度・高耐久軽量建材,無機マテリアル学会,**18**,364,(2011)

4. タイルセルペンの置換率の影響

4.1 実験方法

4.1.1 試験体の作製

前章で用いた OPC、ケイ石粉末及びタイルセルペンを用いて、同じ条件で前養生及びオート養生を行った。ガラス系材料は、石英に比べて低温での溶解度が Fig.4-1 に示すように大きく、安定な C-S-H を生成して、トバモライトの生成に不利に作用する可能性があり、最適な置換率を見出すことを目的とした。作製した試験体の原料混合比は、OPC とケイ石粉末を質量比で 1:1(S100)としたものと、ケイ石に対する置換率を 25,50,75,100%(PW25,50,75,100)とした。またそれぞれオートクレープ養生を 4,8,12 時間行った。PW75,100 については 24 時間養生の試験体も作製した。

4.1.2 試験体の解析

(1)XRD による結晶相の同定及び定量

前養生及びオートクレープ養生により得られた硬化体は粒径 $150\mu\text{m}$ 以下まで粉砕した。各試料の原料混合粉、粉砕した硬化体の粉末に対して内部標準試料としてフッ化カルシウムを 10 mass%用いた XRD 内部標準法による測定を行った。定性分析は $2\theta=5\sim70^\circ$ 、ステッ

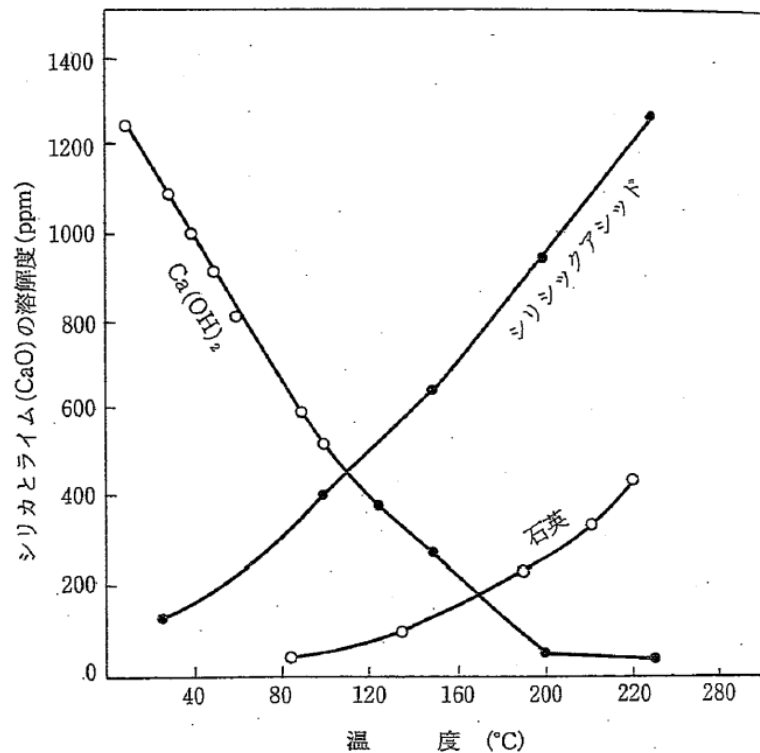


Fig.4-1 Solubility of Lime and Silica

幅 0.02、スキャンスピード 10° /min とした。結晶相の定量については、tobermorite(2 θ =7.8)、 α -quartz(20.8)、fluorite(27.8)及び alite(=51.7)のピーク面積をステップ幅 0.0072、スキャンスピード 2° /min として測定し、Fluorite に対するピーク面積比として算出した。但し、結晶相の定量精度を高めるため、各試料は 3 回測定し、ピーク面積値はその平均値として用いた。また、各ピーク面積値を試料の強熱原料を測定し無機物量を算出することで補正した。 α -quartz については 2 章で作成した検量線を用いて α -quartz 残存量を定量した。また、前養生後及びオートクレーブ養生 4、8、12、24 時間において、alite の反応率を原料混合粉における alite/fluorite 相のピーク面積に対する比率として算出した。

(2) 走査型電子顕微鏡による硬化体破断面の形態観察

SW100、PW25~100 のオートクレーブ養生 12 時間後の硬化体をニップ破断し、走査型電子顕微鏡(キーエンス製 VE-9800、以下 SEM)による結晶相の形態観察を行った。チャージアップ防止のため、試料台及び試料表面にオスミウム薄膜を蒸着した。この際、オスミウムコーター(メイワフォーシス製 Neoc-STB 以下 Os コーター)を使用した。チャンバー内に試料を入れ、2Pa まで減圧した後オスミウムガスを 9Pa まで充填し、10mA で 10 秒間蒸着を行った。この後、破断面及び空隙内部の結晶相を SEM により 5000 倍での観察を行った。

(3)EDS による水和物組成分析

S100 及び PW100 の前養生後及びオートクレーブ養生 12 時間後の試料の水和物組成を測定するため、SEM に外付けしたエネルギー分散型 X 線分析装置(EDAX JAPAN 製 EDAX、以下 EDS) 装置による元素分析を行った。試料は硬化体を約 1cm 角の立方体状にニップ破断し、樹脂(丸本ストリングス製エポフィックス樹脂)中に埋め込んだ。この際、樹脂は含浸性を高めるため、湯煎し 40℃に保持したまま硬化剤を加えて二分間混合した。型枠に硬化体を置き、気泡を巻き込まないように樹脂を流し込んだ。その後、アスピレーターで脱気して内部の気泡を抜き、約 8 時間おき硬化させた。硬化後、研磨紙を用いて破断面を研磨した。研磨は#240 で面出しを行い、#500、#1000、#1500、#2000、#4000、#8000 の番手で研磨した。#500 までは試料表面を露出させないよう顕微鏡観察を適宜行い、慎重に研磨した。(3)で使用した Os コーターで 8 秒間、約 5nm の薄膜を蒸着させた。元素分析は、試料研磨面の反射電子像をもとに水和物部分を同定し、点分析を行った。水和物中の Ca/Al 比及び Si/Al 比をプロットし、最小二乗法で得られた近似直線の傾きを Ca/Si 比(以下 C/S)とした。この際加速電圧は 20kV とし、高い検出光強度を得るためスポット径は 13 とした。前養生後では倍率を 1000 倍、オートクレーブ養生後では 500 倍とし、1 試料あたり 200 点程度(各試料においてで 8 か所、30 点ずつの点分析)を実地した。この際、粒子部分の点分析結果は除外し水和物部分のみの組成とした。

(4)水銀圧入法による空隙分布の測定

前養生及びオートクレーブ養生を行った試験体を約 5mm 角の直方体に破断し、アセトンで洗浄した後アスピレーター中で 24 時間の減圧乾燥を行った。水銀圧入式ポロシメーター(カンタクローム製 PoreMaster GT)により硬化体中の空隙分布を測定した。

4.3 結果と考察

各組成でのオートクレーブ養生 12 時間後の XRD 定性分析結果及び 7.8° 付近のピーク拡大図を Fig.4-2 に示した。置換率 75%まではオートクレーブ養生によって CH が全て消費されるが、PW100 においては残存した CH が確認された。また、 7.8° 付近のピーク位置がそれぞれ異なった。S100 に対して PW25 ではピーク位置は左にシフトしており、これは第二章で記述した $\text{Al} \rightleftharpoons \text{Si}$ 型の置換固溶によるものと考えられる。一方、PW50、75、100 では置換率の増大に伴いピーク位置が高角側にシフトした。このことは Fig.4-3 に示したオートクレーブ養生 4h 及び 8h の系においても確認された。更に、置換率の上昇に伴ってトバモライト生成の前駆体とされる(引用)29.4° の非晶質な C-S-H のハローが減少した。また、PW100 においては低 Ca/Si の水和生成物である C-S-H(II)の生成が顕著であった。これらの結果から、PW50 及び PW75 についても、PW100 で確認された C-S-H に類似した水和物が生成しており、 7.8° 付近のピークが高角側にシフトしたと考えるのが妥当と思われる。

Fig.4-4 に、 α -quartz 量を定量した結果を示した。どの置換率においてもオートクレーブ養生 12 時間後では α -quartz は 10~20mass %程度残存している。また、S100 においては原料粉中に存在した α -quartz がオートクレーブ養生 12 時間までに約 25%消費されているのに対し、置換率の増大に伴って α -quartz の消費割合は低下した。PW100 では α -quartz の量は数 mass%しか反応していない。

alite 相の反応率を Fig.4-5 に示した。S-100 及び PW25 においては、alite の消費速度はほぼ同一であり、8 時間で alite 相は全て反応で消費された。一方、PW50 及び PW75 においては 12 時間後に alite 相が全て反応しており、alite の反応は遅延していた。PW100 では 24 時間後でも未反応の alite 相が残存していた。 7.8° 付近で確認された結晶相の定量結果を Fig.4-6 に示した。tobermorite 相が生成した S100、PW25 では 8 時間で生成量が一定になった。一方で、tobermorite 相とは別種の C-S-H が生成したと見られる PW50,75,100 では 12 時間後にも生成量の増大が見られ、alite の消費に伴い反応が進行していると考えられる。走査型電子顕微鏡を用いて破断面及び空隙内部の結晶相を観察し、結晶相の形態についての傾向を観察した。Fig.4.7~11 に観察部分の代表的な結晶相を示した。全体の傾向として、破断面よりも空隙内部の結晶が著しく成長していた。空隙内部の空間部分において結晶相がよく成長することは広く知られている。S100 では針状結晶が大半であるが、PW25 では針状結晶の他に短冊状の太い結晶も散見された。PW50 では短い乱雑な結晶相が大半であり、一部に針状結晶が点在する様子であるが、空隙内部などではよく成長した針状結晶や板状の結晶が確認できた PW75、PW100 では短い針状結晶が大半を占めており、よく成長した結晶相はほとんど確認できなかった。

エネルギー分散型 X 線分析による点分析による水和物の組成解析結果を Fig.4-12 に示した。PW100 では前養生及びオートクレーブ養生後で C/S は約 0.6 であり、変化していない。一方で、S-100 においては前養生時には C/S=1.4 であり、オートクレーブ養生後には水和物中の C/S は 0.6 まで低下し、出発原料の C/S 比と同程度となった。前養生においてガラス相が多く存在する PW100 では多量の非晶質 SiO_2 が反応した為に系全体での C/S が低下したと考えられる。一方で、Si 源の大部分をケイ石粉末が担う S100 では、反応速度が α -quartz の溶解により律速

されていると推察できる。この結果は、CH とケイ石粉末、非晶質シリカを用いて行われたスラリー合成による報告 4) と一致する。

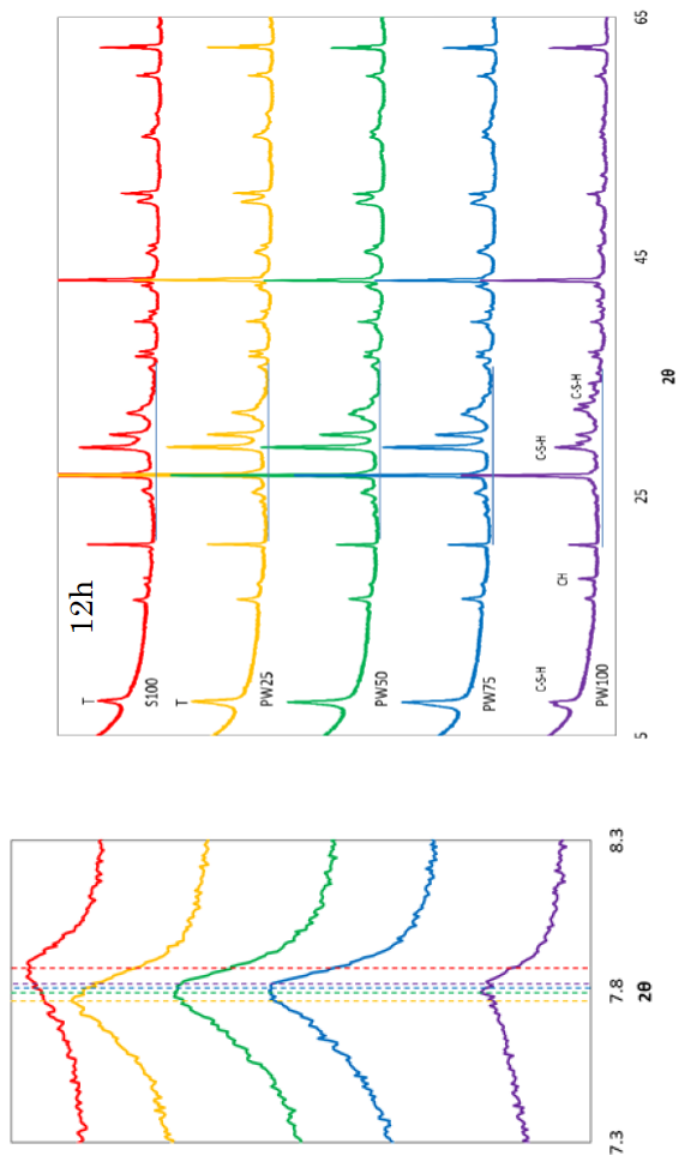


Fig.4-2 XRD pattern of 12h autoclaved samples

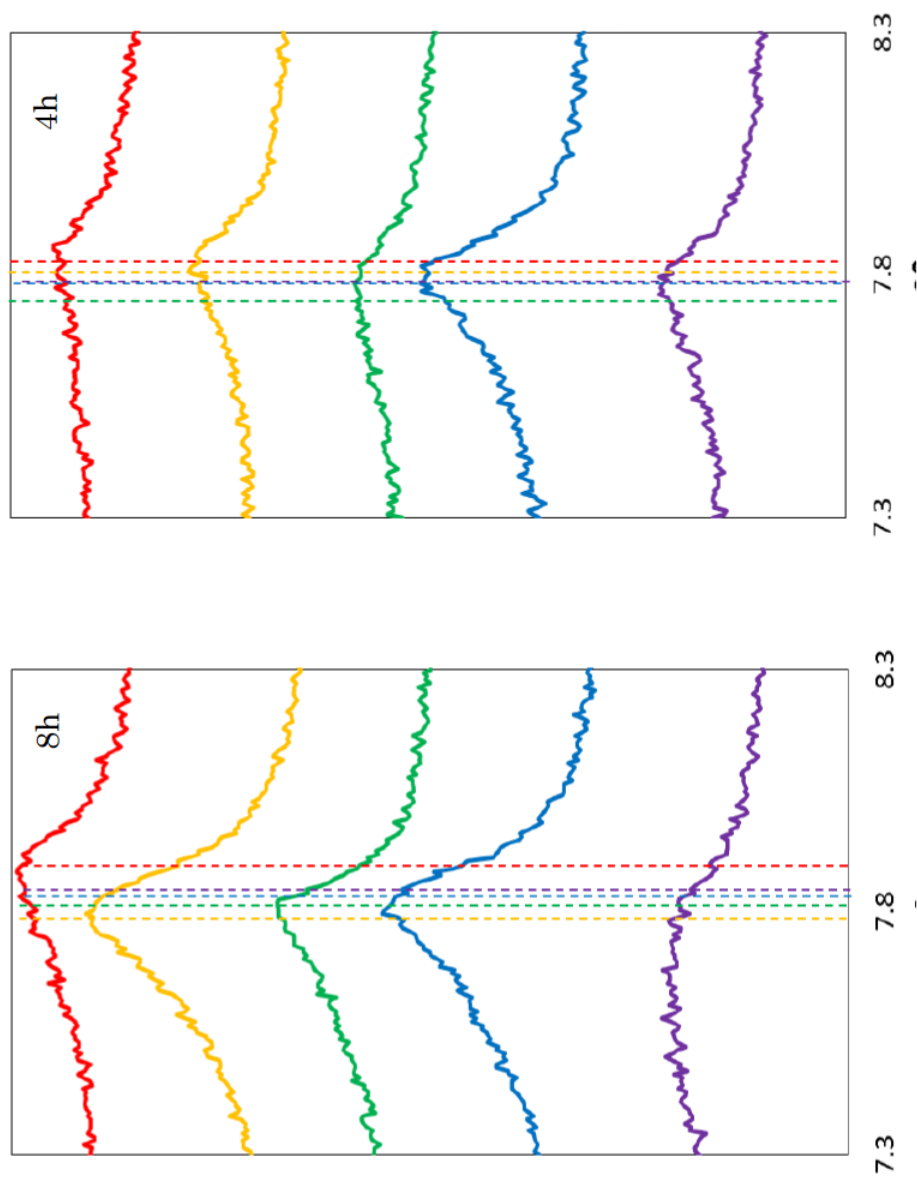


Fig.4-3 7.8° XRD pattern of 4h and 8h samples

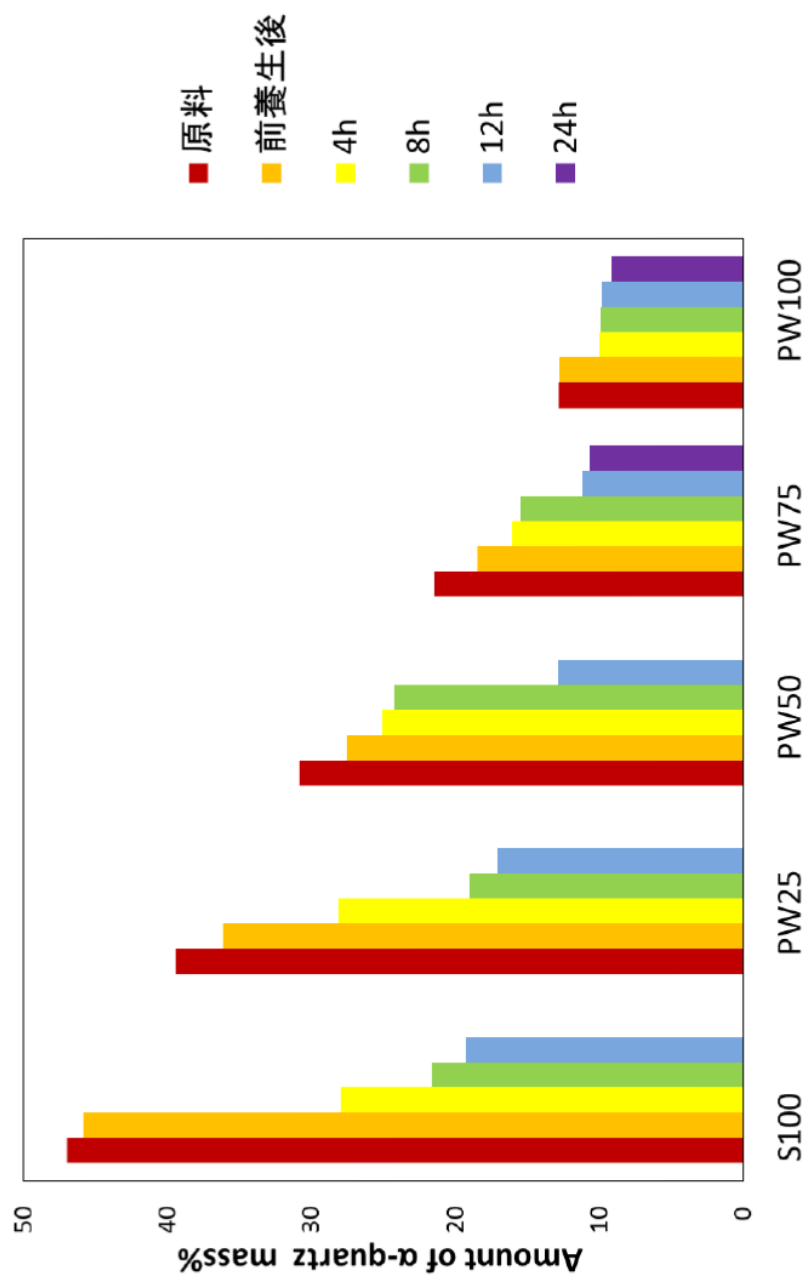


Fig.4-4 Amount of α -quartz

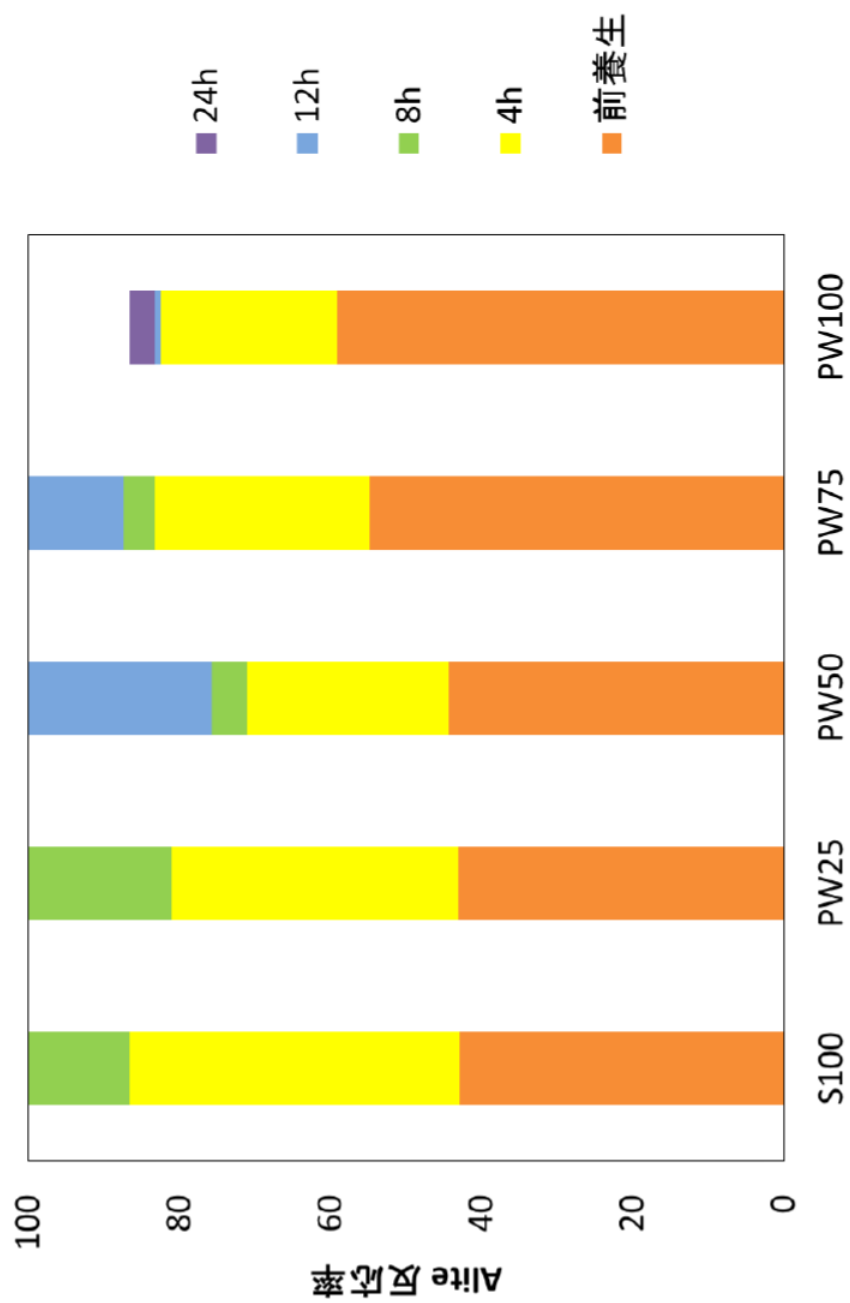


Fig.4-5 Reaction ratio of alite

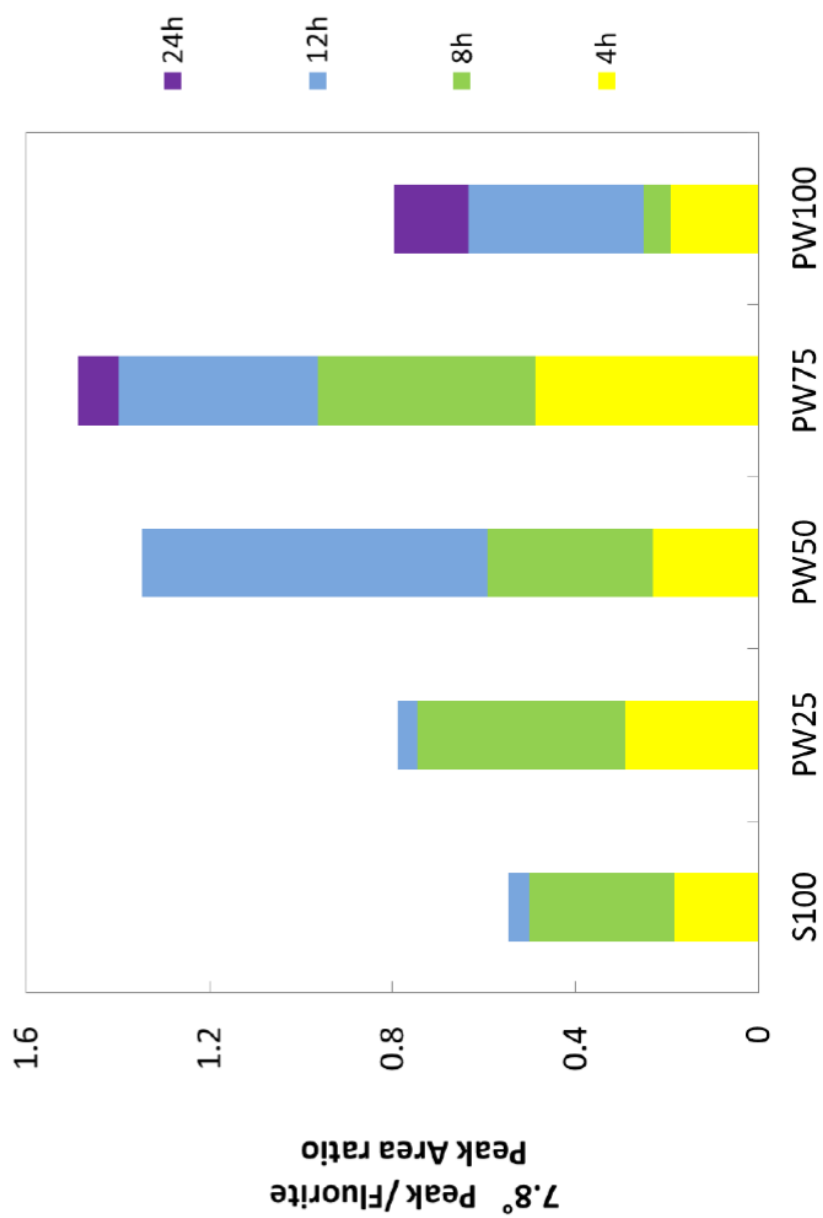


Fig.4-6 Area ratio of 7.8° peak

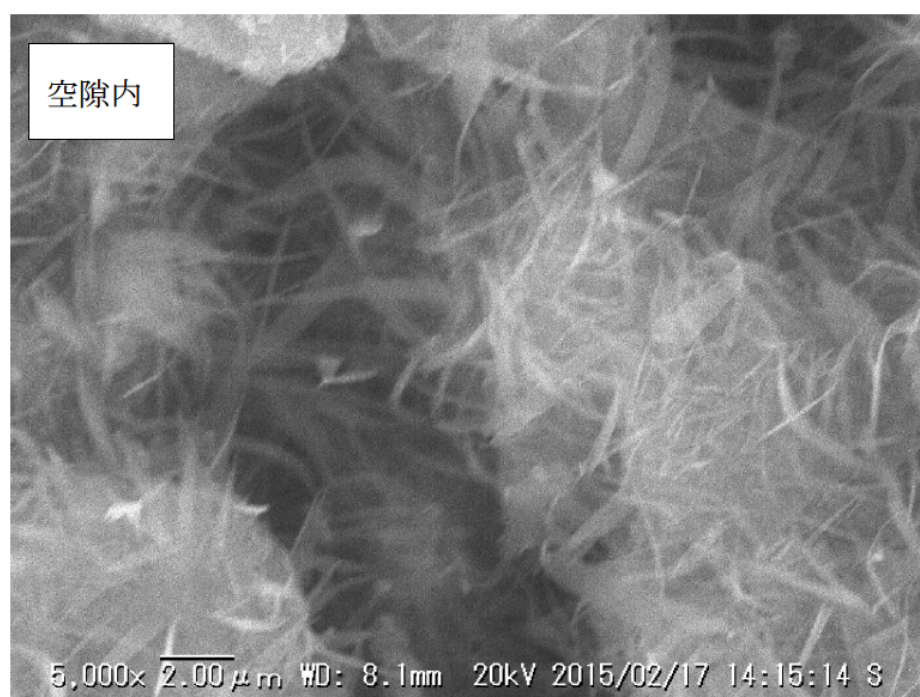


Fig.4-7 SEM photographs of S100

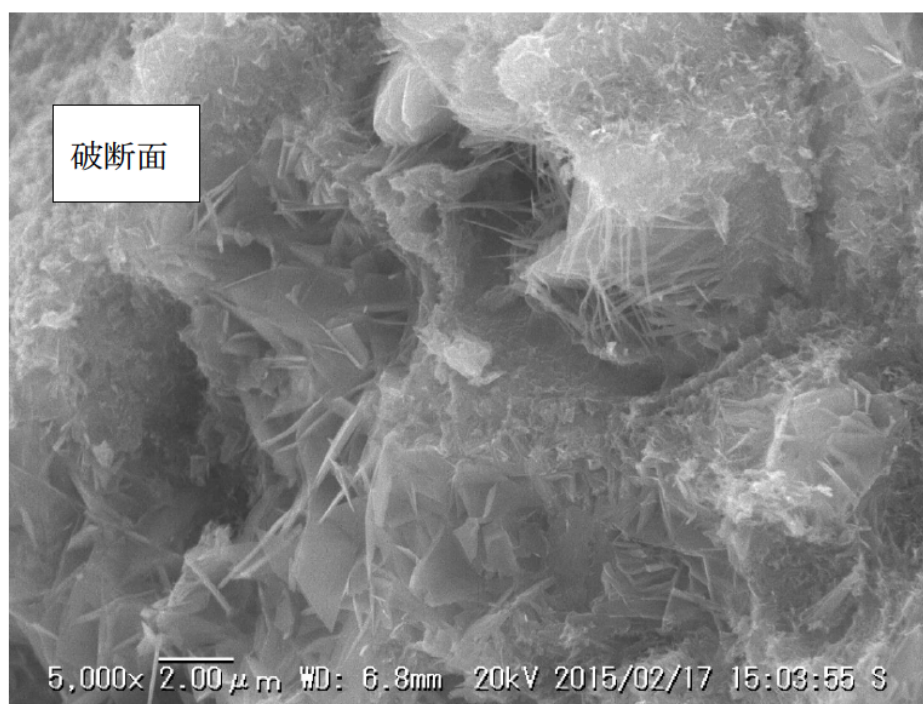


Fig.4-8 SEM photographs of PW25

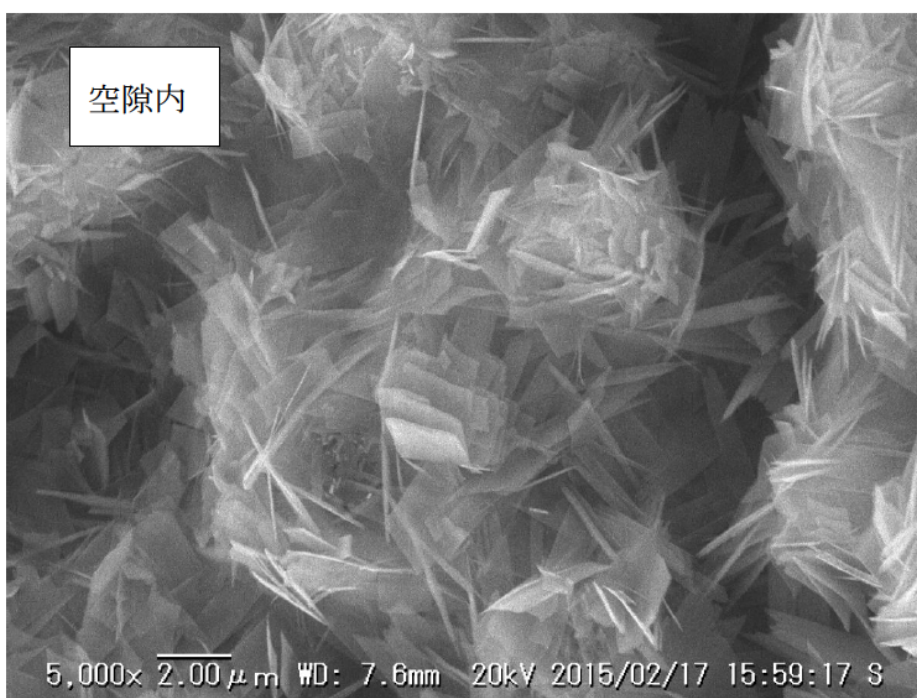
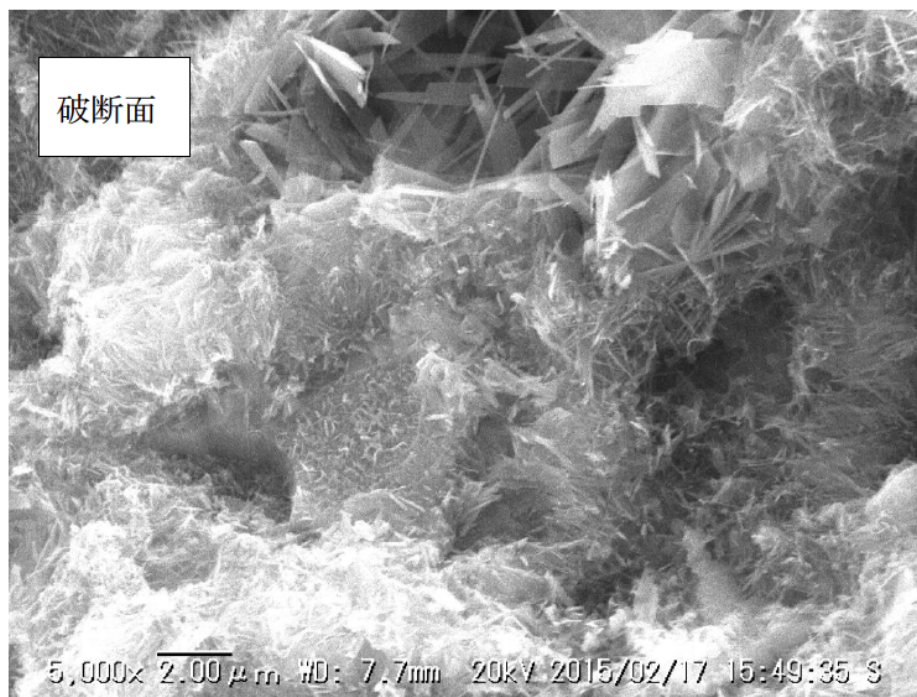


Fig.4-9 SEM photographs of PW50

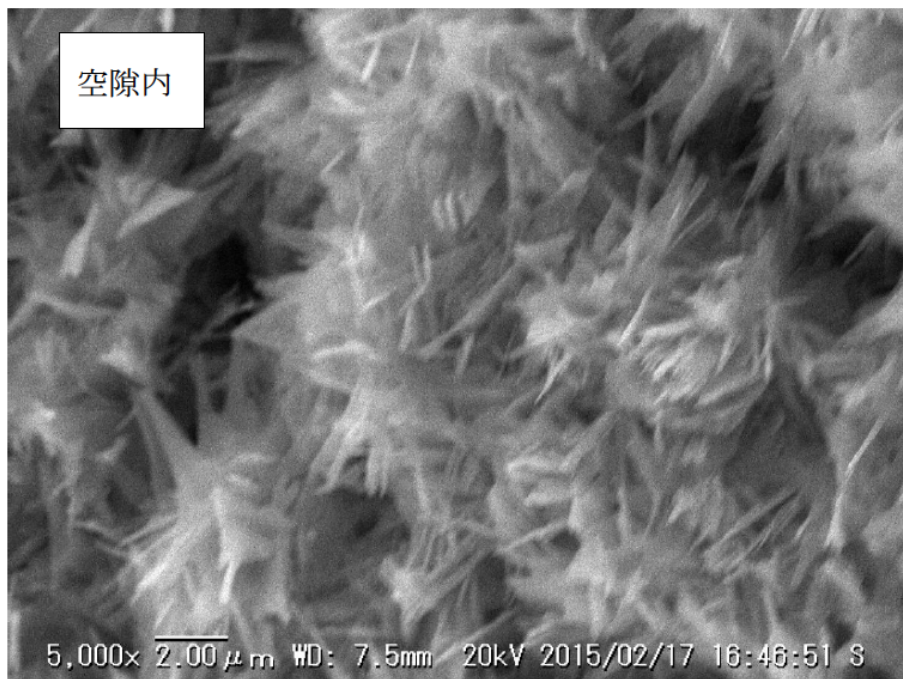
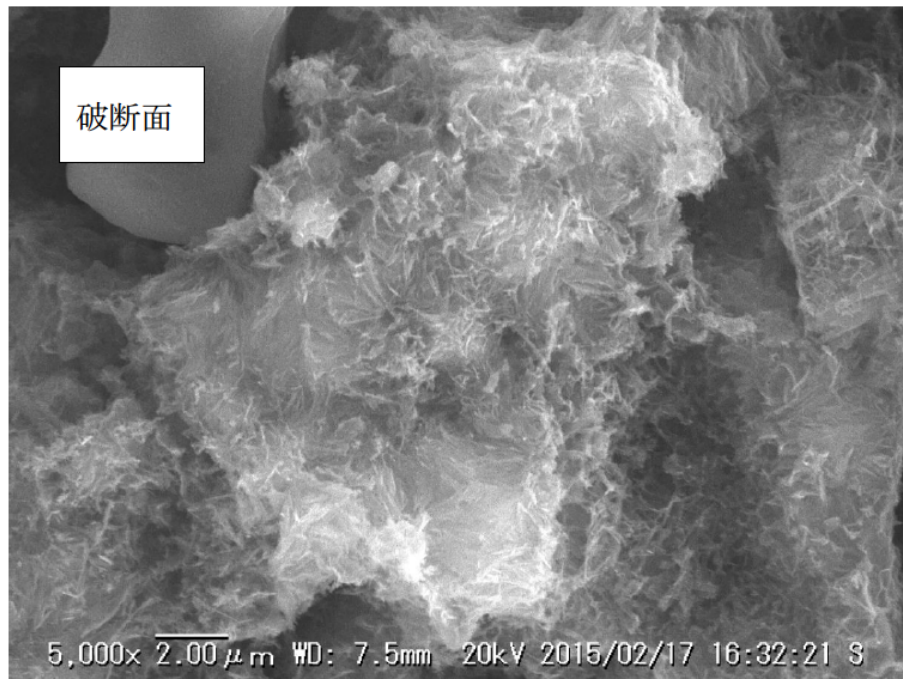


Fig.4-10 SEM photographs of PW75

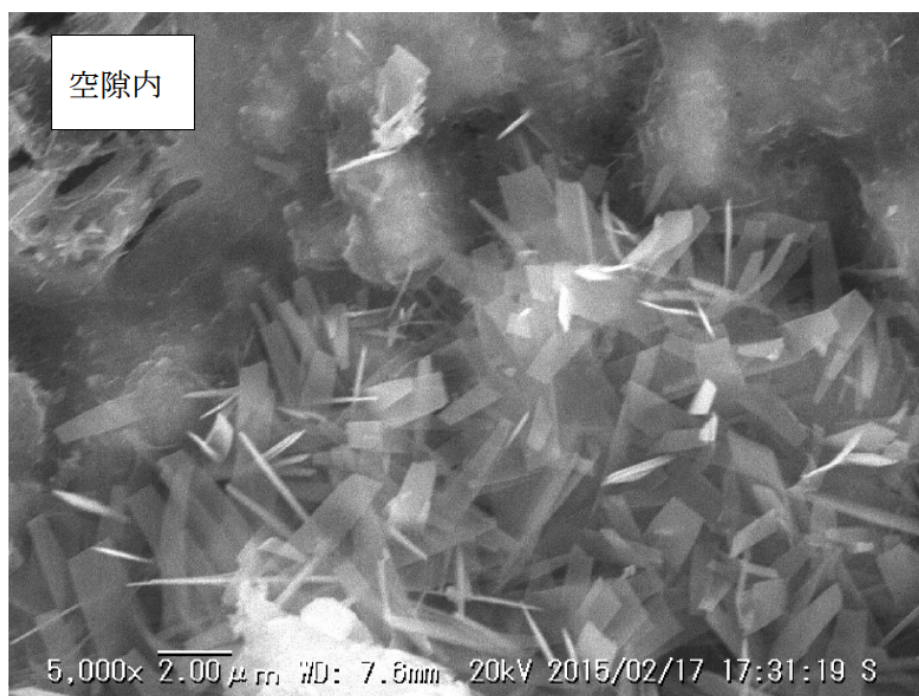


Fig.4-11 SEM photographs of PW100

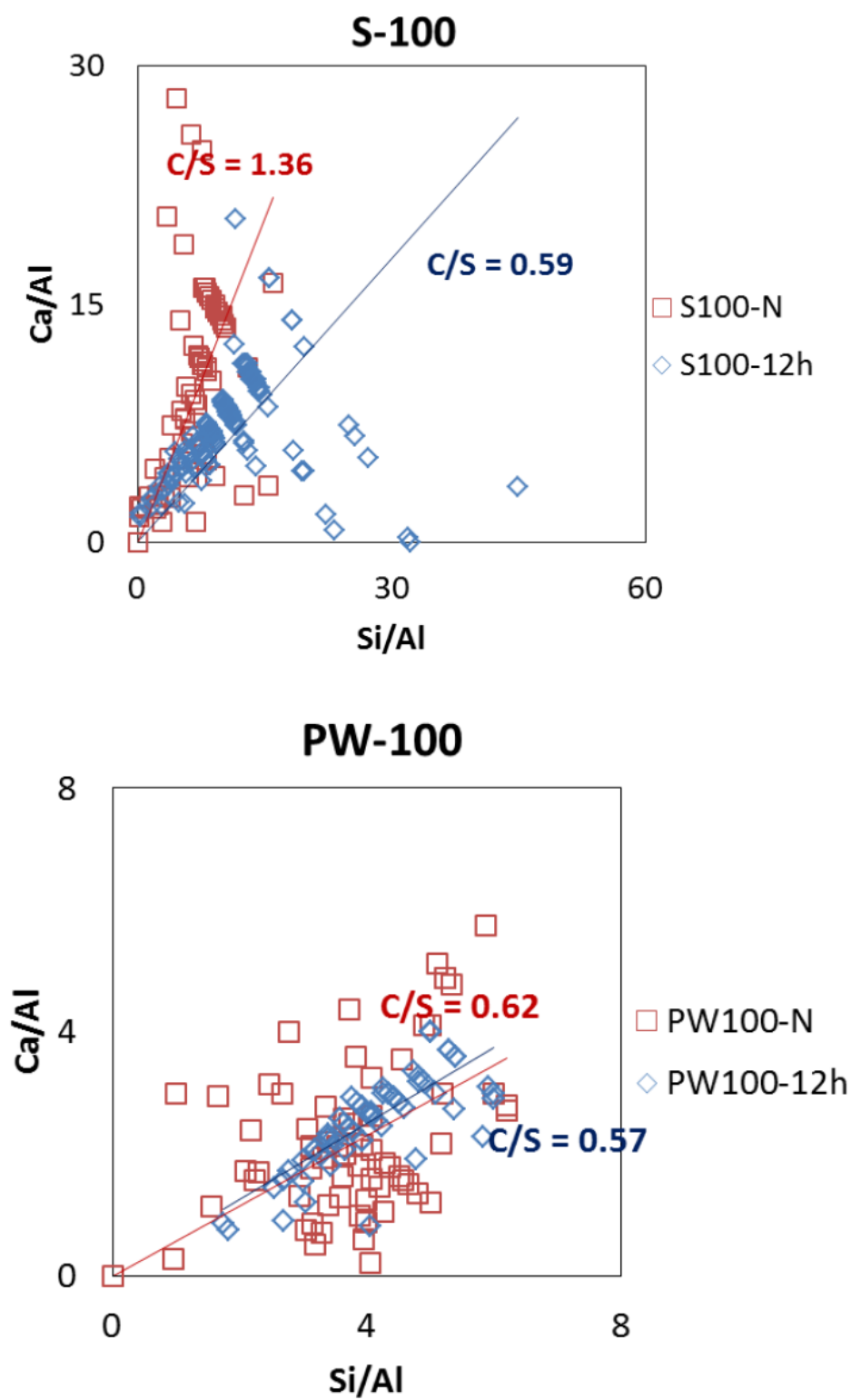


Fig.4-12 Ca/Si ratio in hydrate products by EDS-spot analyze

水銀圧入法により測定した硬化体の空隙分布を Fig.4-13 に示す。前養生での測定結果は点線、オートクレーブ養生では直線で示した。前養生においては、空隙径の分布は $3\sim 7\mu\text{m}$ に集中していた。オートクレーブ養生後によって空隙径分布は一定の傾向を持って変化した。S100 では $0.05\mu\text{m}$ 付近にピーク位置が存在し、置換率の増加に従って $0.07\mu\text{m}$ 、 $0.10\mu\text{m}$ 、 $0.13\mu\text{m}$ 、 $0.90\mu\text{m}$ と変化した。また、気孔率分布を Fig.3-14 に示した。オートクレーブ養生後の気孔率は $55\sim 60\%$ で同程度である。一方で、空隙径 $0.10\sim 1.0\mu\text{m}$ において各置換率での差異が顕著だった。PW25、50 は S100 と比較して約 $0.3\mu\text{m}$ 以上の空隙量が非常に少なく、緻密化した。その反面 PW75、PW100 では緻密化を阻害していた。いずれの系においても気孔率が同程度であることから、PW25 及び PW50 においてはオートクレーブ養生後には微細な空隙が数多く存在し、S100 よりも緻密化されていた。一方、PW75 では粗大化し、PW100 では $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙が約 25% を占めていた。

4.4 結論

- (1) 使用原料によって反応の機構及び生成物が変化した。ケイ石粉末のみの使用では、前養生時の水和物中の Ca/Si 比は 1.4 と高く、水熱処理によって 0.6 まで低下し、tobermorite が生成した。一方で、タイルセルベンのみを使用した場合前養生時の C/S は既に 0.6 であり、水熱処理後も変化しなかった。易反応性の非晶質ガラス部分が反応初期に多量に反応することで低 C/S の C-S-H を安定化し、tobermorite の生成には至らなかったと推察される。
- (2) ケイ石をタイルセルベンで 25 および 50% 置換した系では組織が緻密化した。従って、タイルセルベンのケイ石を一部置換して利用することは硬化体の性能向上が期待できる。
- (3) タイルセルベン 75%、100% 使用した系では置換による結晶相の反応の遅延、組織の粗大化が確認された。多量の非晶質が反応初期に生成し、安定化することで tobermorite の生成を阻害したと推察される。
- (4) タイルセルベン 25% 置換によって tobermorite 生成量が増大するだけでなく、組織が緻密化した。安定性のみならず強度発現性の観点においてもタイルセルベンの使用による硬化体の性能向上が期待できることから、この置換率が最適であると考えられる。

自動車ガラス（廃ガラス）の
回収リサイクルシステム構築の研究

研究報告書

2015 年 2 月

学校法人中央大学
中央大学理工学研究所

1. 実態把握

1.1 自動車ガラス回収の実態把握

国内で処理されている使用済み自動車に装着されているガラスの総量は約 9.5 万 t (平均 36kg/台)であり、現在は ASR としてそのほとんどが処理されているが、一部は A プレスとして電炉に投入されている。

ASR リサイクルの代表的な手法としてサーマルリサイクルがある。ASR は灰分(無機物)が約 40%と高いのが特徴であり、焼却時にガラス等の低融点物質を主体とする付着物により熱回収部に閉塞が生じ易いため、ASR 中のガラス含有量(約 1 割程度)を低減させる必要がある。一方、破碎業者においては、ガラスによるクラッシャーの摩耗が生じる問題、また A プレスの電炉投入時にもガラス含有による操業トラブルやコスト増の問題を抱える電炉メーカーが多く、自動車解体工程におけるガラスリサイクルの進展が望まれている。

自動車ガラスは、飛散防止のための中間膜処理や、プリント処理が施されており、リサイクルを行うためにはガラス成分とそれ以外のものとの分別が必要である。このためリサイクルされる自動車用ガラスの量はわずかである。近年、自動車ガラスの中間膜やプリントの分離技術が発展し、自動車ガラスの 2/3～3/4 の回収が技術的に可能になっていることから、今後リサイクル率の向上が見込まれる。

解体事業者における自動車ガラスの回収状況はアンケートより、ほとんどの事業者で行われていないという結果が得られた。回収を行う部位については、フロントガラス、サイドガラスが多く回収されていた。(表 1-1、1-2 参照)

回収を行っている事業者には回収理由についてヒアリングを行ったところ、処理先の受入条件にガラスは取り外すよう定められている、シュレッダーダストの燃料化を行う上でガラスを除去する必要があるとの回答が得られた。

表 1-1 自動車ガラスの回収状況

	通常の自動車解体	全部再資源化自動車解体
アンケート対象事業者数	135 社	26 社
回収を行っている事業者数	5 社 (3.7%)	1 社 (3.8%)

(出典：ELV リサイクル解体事業者アンケートを元に作成)

表 1-2 自動車ガラスの部位別回収割合

部位名	回収割合	備考
フロントガラス	83.3%	
リアガラス	50.0%	
サイドガラス	83.3%	
その他	16.7%	ルーフガラス

(出典：解体事業者へのアンケートを元に作成)

また、アンケート結果より得られた自動車ガラスの処理方法は、そのほとんどが埋立などの処理であった。1 社のみ、ガラスメーカーに試験的のフロート板ガラスの原料として供給しているとの回答が得られた。有価で売却しているとの回答は得られなかった。

2. リサイクル技術概要

2.1 自動車ガラスのリサイクル技術

自動車ガラスのうちフロントガラスは、ガラスが破損した際に飛散を防止するため、ガラスとガラスの間にフィルム(PVB：ポリビニールブチラール)を挟んだ合わせガラスである。そのため、自動車リサイクルを行う際、はじめにガラス部分とフィルム部分の分離を行う必要がある。分離後、ガラス部分については、カレット化又は発泡化しリサイクルされ、フィルム部分については、マテリアル・サーマルリサイクルする手法が開発されている。(図 2-1 参照)

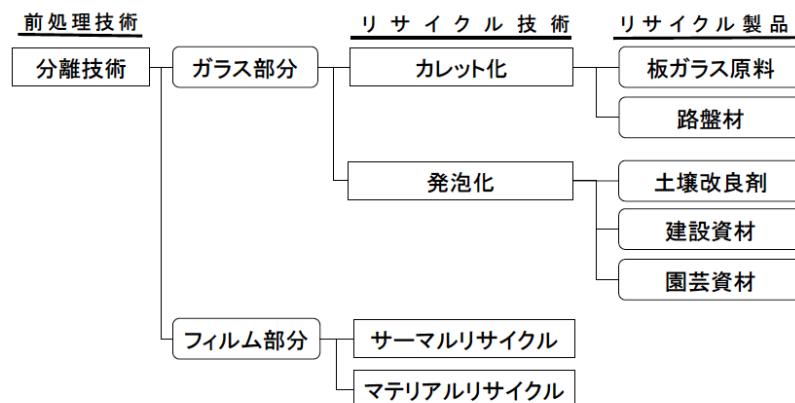


図 2-1 フロントガラスのリサイクル手法

フロントガラスの分離技術は、整備工場などで自動車ガラス取替えの際に発生する廃自動車ガラスの減容化を目的として、ガラスメーカーなどで開発が進められてきており、約 20 程度の特許が確認できる。分離技術は、主に以下の特徴に分類可能である。

表 2-1 合わせガラス分離技術の分類

	第 1 工程	第 2 工程	第 3 工程
①	クラック	浸漬	剥離・分離
②	加熱	燃焼・分解・蒸発	－
③	薬品浸漬	溶解	－
④	低温破碎	－	－
⑤	クラック	(浸漬)	引き伸ばし

(出典：「合わせガラスのリサイクル用技術開発」、
中小企業庁・関東経済産業局・千葉県(平成 17 年 3 月)より作成)

薬品などを利用せずに機械装置のみで低コスト処理が可能であることから⑤の技術が最も多く利用されている。しかしながら、この技術の場合、フィルムにガラス分の付着が残るため、フィルムのマテリアルリサイクルが困難になってしまう。

近年では、自動車リサイクル率の向上を目的として、ガラスメーカー、解体事業者などで合わせガラスの剥離処理を行い、ガラスとフィルムのリサイクルを行う技術の開発が進められている。(表 2-2 参照)

表 2-2 自動車ガラスリサイクル技術一覧

技術保有事業者	ガラス リサイクル手法	フィルム リサイクル手法
旭硝子株式会社 (ガラスメーカー)	フロート板ガラス原料	サーマルリサイクル
三光株式会社 (ガラスリサイクルメーカー)	建材(軽量骨材、外装材など)	発泡化の焼成熱源として利用
廃ガラスリサイクル事業協同組合 (ガラスリサイクル組合)	建材(装飾用タイル、断熱外装材など)	燃料(RPF 原料、セメント原燃料)
株式会社ツルオカ (解体事業者)	グラスウール又はガラス原料(ガラスメーカーにて)	接着剤や塗料原料、樹脂製タイル
ガラス・リソーシング株式会社 (リサイクル事業者)	自然砂代替製品	セメント原燃料、電炉燃料

また、リアガラスにはセラミックプリントなどが付着していることから、リサイクルにあつたては、異物除去を行う必要がある。異物除去を行ったリアガラスとサイドガラスのリサイクル手法としては、通常のガラスリサイクルが利用可能であると考えられる。

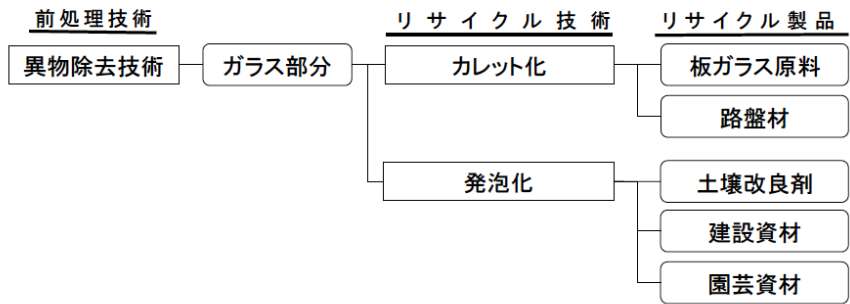


図 2-2 その他自動車ガラスのリサイクル技術

2.2 自動車ガラスのリサイクル可能事業者の検討

自動車ガラスのリサイクル事業を行っている事業者はない。(旭硝子が 2005 年末に愛知県にリサイクル施設を稼動予定)実際に、解体事業者から発生する自動車ガラスを回収しリサイクルを進めていく場合、解体事業者または、回収拠点において分離処理を行った後に、ガラス及びフィルムについてそれぞれのリサイクル事業者へ委託を行う必要がある。

前処理後の自動車ガラスのリサイクル先としては、廃ガラスリサイクル事業者が最も有望であると考えられる。自動車ガラスの場合、過去に製造されたものの中に鉛を含むものがあることから、リサイクルを委託する際にはこの点について確認が必要である。

廃ガラスリサイクル事業者の多くは、そのほとんどが使用済みガラスビンのリサイクルを行っていることから容器包装リサイクル協会から再資源化事業者として認定を受けているガラスリサイクル事業者が有望であると考えられる。しかしながら、複数のガラスリサイクル事業者にヒアリングを行った結果、前処理後の自動車ガラスを有価で買取可能な事業者はなく、10～20 円/kg の処理費が必要という結果が得られた。

3. アンケートによる廃ガラスの回収状況

3.1 アンケート調査目的

使用済み自動車の解体工程から発生する廃ガラスについては、回収、リサイクルの実情がほとんど明らかにされていない。

このため、本調査では、入廃ガラスの回収量、処理委託状況などを調査し、自動車解体工程から発生する廃ガラス実態を把握することを目的とした。

3.2 自動車ガラスの回収状況

自動車ガラスの回収状況について質問したところ、いずれも事業規模に関係なく、回収していないと回答した事業者がほとんどであり、回収を行っている事業者の数は廃ガラスの中で最も低い数値となった(図 3.1)。これは、自動車ガラスの有価取引が困難であることが大きな要因と考えられる。にもかかわらず取り外しを行っている事業者に、取り外す理由についてヒアリングを行ったところ、処理先の受入条件にガラスは取り外すよう定められているとの回答が得られた。

回収部位については、フロント、リア、サイドガラスを取り外すとの回答が得られ(図 3.2)た。1社あたりの取り外し量を示す。処理方法についても自社処理を行う事業者は少なく、取引単価は処理費として 7.5 円/kg との回答が 1 件あった(図 3.3)。自社処理を行っている事業者のうち、1社では燃料化を行う上でガラスを除去する必要があり、破砕処理等を行っているとの回答が得られた。

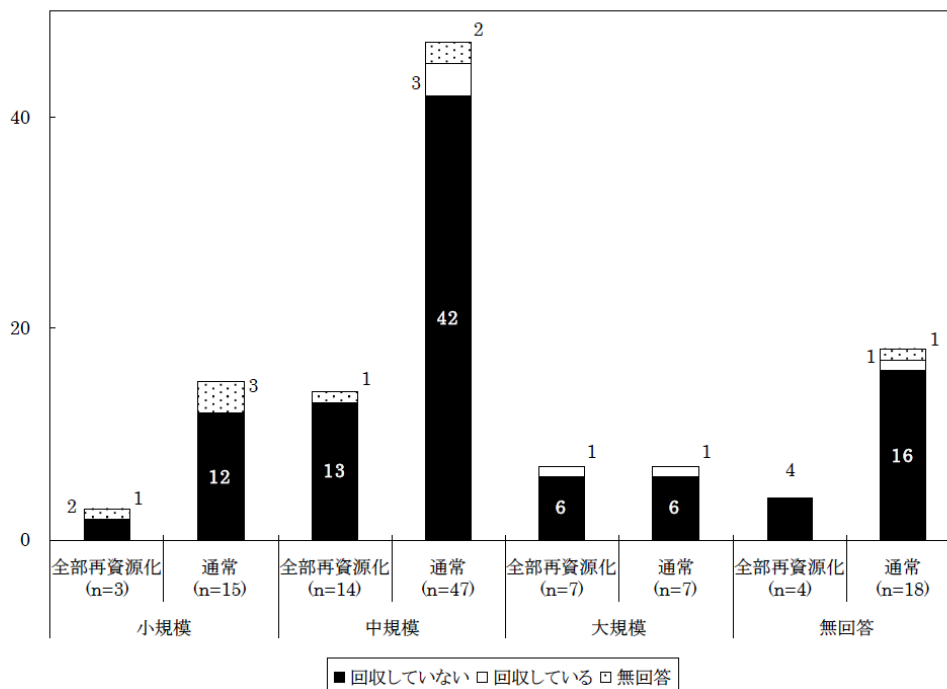


図 3.1 自動車ガラスの回収状況

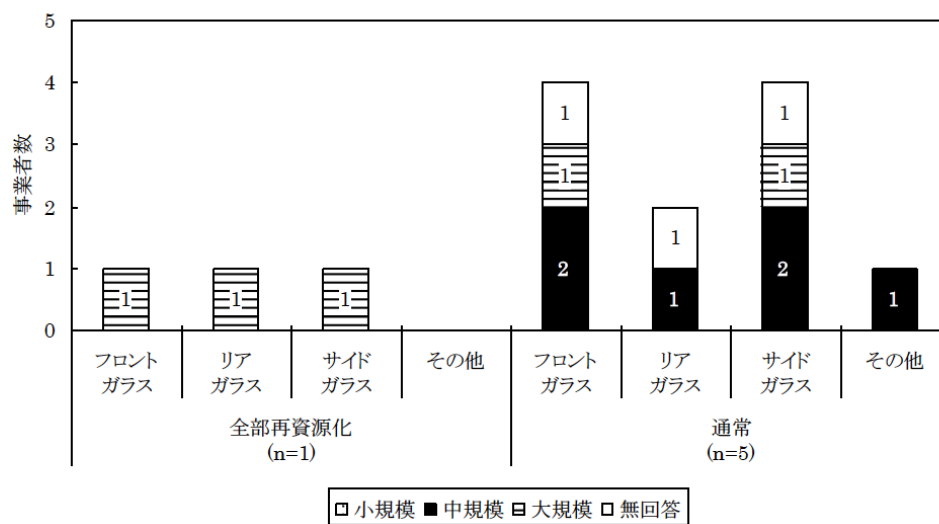


図 3.2 自動車ガラスの取り外し部位

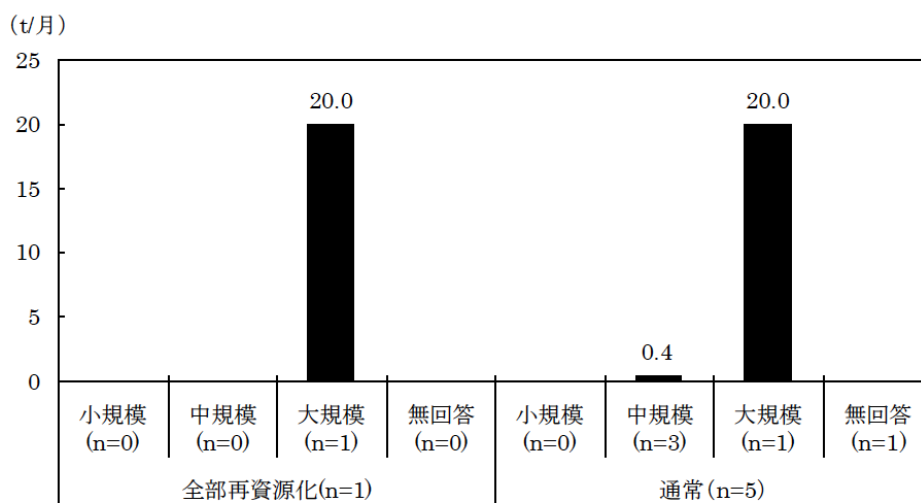


図 3.3 廃ガラスの 1 社あたりの月間取り外し量

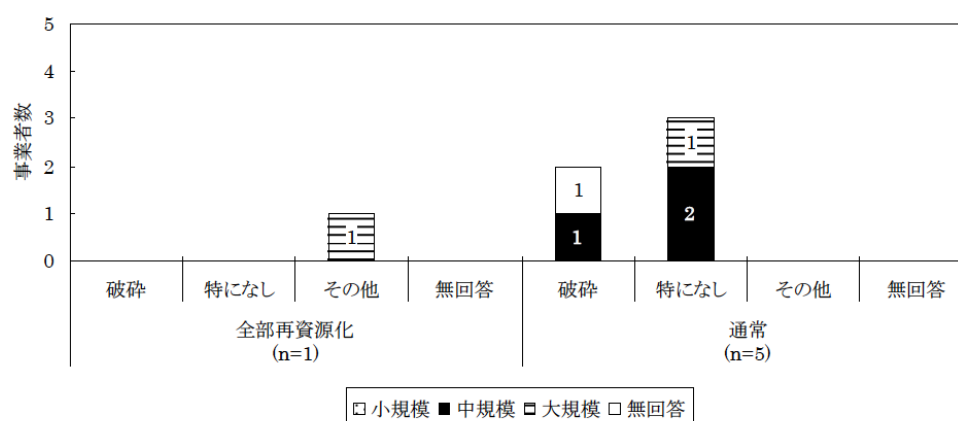


図 3.4 回収した自動車ガラスの処理方法

3.3 廃ガラスリサイクルの課題

解体業を行っているすべての事業者に、廃ガラスのリサイクルに関する課題を質問したところ、全部再資源化の登録事業者では、「副産物が少量しか発生しない」と「設備や人力的に回収が不可能」に2割以上の回答が得られた(図 3.5 参照)。未登録事業者では、「廃ガラスが少量しか発生しない」、「リサイクル先の情報が不足」、「設備や人力的に回収が不可能」、「リサイクルより廃棄物処理法が経済的」に3割以上の回答率が得られた。いずれも、コスト増や人手不足、リサイクルに関する情報不足を課題視していることがわかった。

その他の意見として、「自動車が入ってこない」と回答した事業者が11件あった。

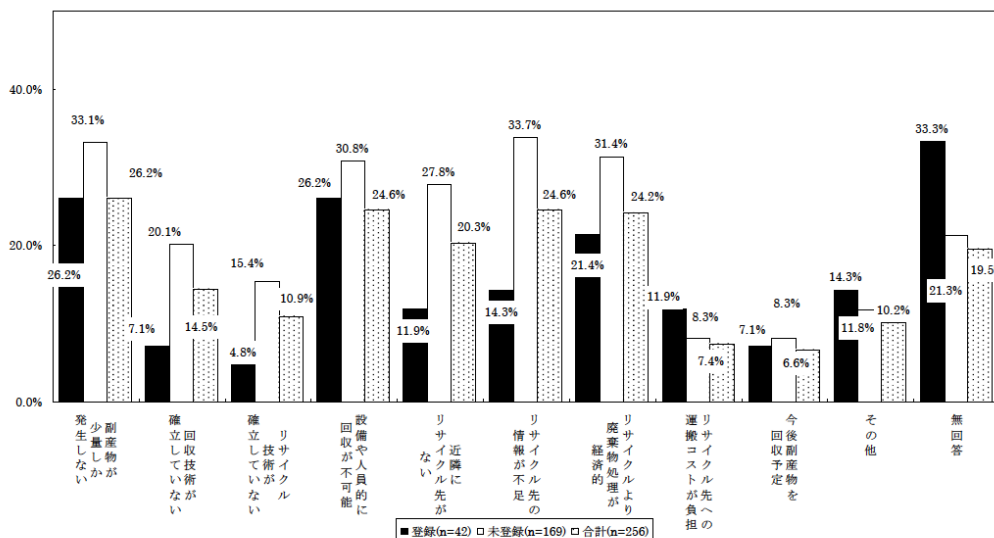


図 3.5 ガラス等のリサイクルにおける課題

3. 4. 使用済み自動車における副産物リサイクルに関する自動車解体業者の意見

すべての事業者を対象に、使用済み自動車におけるリサイクルに関する自動車解体業者の意見を伺ったところ、以下のような回答が得られた。

表 3.1 使用済み自動車における副産物リサイクルに関する自動車解体業者の意見

要求内容	意見(自由記述)
入庫台数の減少	自動車販売店及び一般モーターズは自動車販売時に発生する下取り車の中に再販不能な車でも使用済自動車ではなく中古車として引き取って、その車は全部解体事業者に丸投げで処理しているため、一部解体業を通過していないのが現状のため、入庫が少ない(まったくない)。
	(他、入庫台数の減少に対する意見 4 件)

要求内容	意見(自由記述)
回収に関する こと	ガラス・廃プラ等がリサイクルにまわせるのであれば出すが、経済的負担をすべて解体業者に押し付けるのは反対である。今でもダッシュボードやF・R ガラスは取り外しているが、解体終了後にまた車の中に戻してシュレッダー業者に出している。まずはリサイクルルートの確立が先。
	廃ガラスの場合は、大量にためつつコンパクト化しないと売れないので、保管が困る。また、共同で排出しようと思っても、共同で組む相手との距離があり、運搬コストがかかるので、うまくいっていない。メーカー側の精緻に解体したガラを積極的に買いに出るという姿勢がもういまひとつはつきり出てこないで、いつも中途半端に終わっている。
	解体作業工程上廃ガラスを取り出すことは可能だが、利益が出ないのであれば、これ以上手間をかけたくない。廃ガラスを買い取り回収してくれるのであれば取り外す手間賃も出るので実施する。(同案 4 件)
	現在の処分料等では廃ガラスを回収するのは技術等においても難しい。設備や人力的に回収が不可能で、廃棄物処理が経済的である。(同案 5 件)
	自動車ガラスの受入先が乏しい。(同案 7 件)
リサイクル システム	最終シュレッダーまでいって初めて永久抹消にするため、時間がかかりすぎる。解体業者が車輛を解体した時に永久抹消とすべきである。最終シュレッダー業者に自動車ガラが搬入されるまで時間がかかる。
	長年小規模でも自動車リサイクルにまじめに取り組み、リサイクル法に合わせて設備投資もして環境に付加をかけない作業を行っている小規模事業者に使用済自動車が入ってこない事態をなんとか改善する方法はないものか。
法による対応	使用済自動車と中古自動車の線引きをはっきりさせてほしい。引取事業者以外の使用済自動車受け取りを取り締まってほしい。(同案 2 件)
情報不足	自動車ガラスリサイクルはきちんと確立するのか。分別してもどこへ持っていくのか、取りにくるのか。回収した費用はどちらが負担するのか。大手解体業はどのように分別しているのか。
	何でも大事にしていきたいので、情報があれば知らせてほしい。(同案 2 件)
その他	解体するスペースが少ない。
	リサイクルに関する手続きが非常に面倒くさい、特に入力が面倒くさい。

4. 使用済自動車由来のガラスリサイクルシステムの検討

4.1 使用済自動車由来のガラスリサイクルシステムの検討

個別の解体事業者から回収可能な自動車ガラスは、少量であり、前処理や自動車ガラスの運搬をした場合、収益はあまり見込まれない。収益を見込むためには、前処理や運搬を効率的に行い、コストを削減する必要がある。そこで、拠点となる事業者複数の事業者からルート回収で自動車ガラスを収集し、前処理を行うシステムで自動車ガラスリサイクルシステムを検討するものとする。(図 3-1 参照)

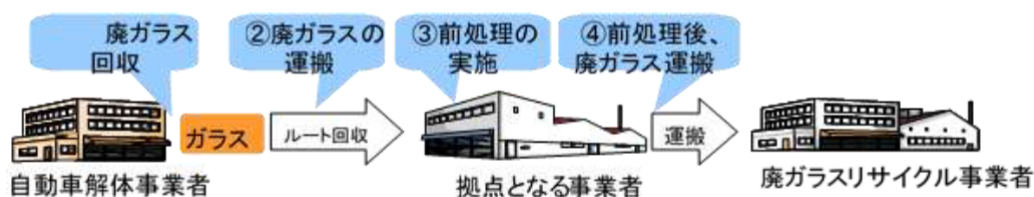


図 4-1 自動車ガラスリサイクルシステムイメージ図

自動車ガラスリサイクルシステムの概要を以下に示す。

① 自動車ガラスの回収

解体事業者において、事前処理、有価パーツの回収などを行った後、自動車ガラスの回収を行う。回収の技術は、通常の有価パーツ解体時の技術などが利用可能であると考えられる。このため、使用済み自動車からの副産物回収は、解体事業者のノウハウにより容易に行えるものと考えられる。

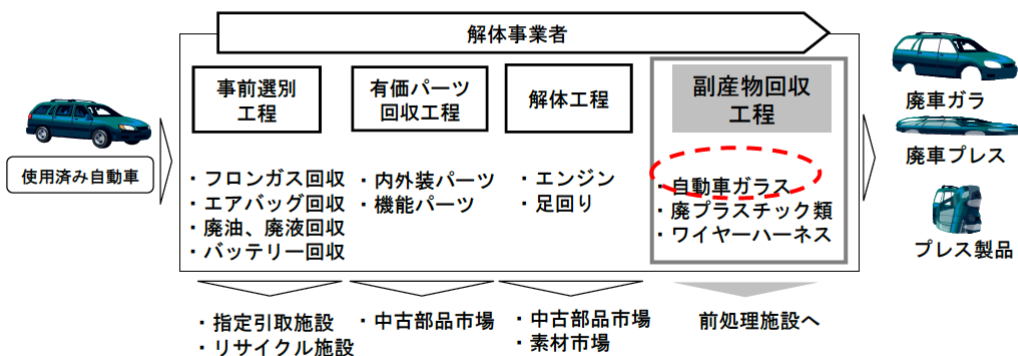


図 4-2 解体事業者の解体工程における廃ガラス回収工程

② 自動車ガラスの運搬

解体事業者で前処理を行い、廃ガラスを業者に渡し運搬を行う。この際、1社当たりの廃ガラスの回収量は、少量であることから1社からの運搬では、非効率でありコスト高となる。また1社当たりの回収量が多い場合でも保管場所が問題になり、新たな保管場所を準備できない、保管場所が狭いなどの問題が発生すると考えられる。複数事業者からのルート回収を行うことで、運搬効率性の向上、保管問題の解決を行う。

③ 自動車ガラスの前処理

前処理を行う事業者において、解体事業者から収集した副産物の前処理を行う。副産物の前処理として以下のことが必要であると考えられる。

・自動車ガラス

自動車ガラスは、大きく分けてフロントガラス、リアガラス、ドアガラスの3つがある。フロントガラスには中間膜が含まれていることから、剥離処理を行う必要がある。リアガラスには熱線などが含まれている場合があることから異物除去が必要である。また、運搬及びリサイクルを行うときのハンドリング向上のために破碎を行う必要がある。

4.2 自動車ガラスのリサイクルシステムに係るコストの把握

4.2.1 前提条件

自動車ガラスのリサイクルシステムのコスト把握のための前提条件の設定を行った。解体時の自動車ガラス回収にかかる人件費については、複数の解体事業者にヒアリングを行った結果、副産物回収は、中古パーツの回収と同様の手間であることから、人件費の設定が困難であったため、コスト把握は行わないものとした。高コストの場合(シナリオ1)と低コストの場合(シナリオ2)の2つのシナリオを設定し、副産物の運搬コスト、前処理コスト、前処理後のコストについて把握を行った。(図3.3)

また、アンケートの結果より解体事業者の平均的な処理台数は月間150台程度であった。そこでコスト把握に際しては、回収を行う事業者数を1社、3社、5社、10社、20社、30社から副産物回収を行うものとして回収規模に関する比較検討も行った。



図 4-3 コスト把握の対象範囲

各工程での前提条件を以下に示す。

① 自動車ガラスの回収

解体時の廃ガラス回収にかかる人件費については、複数の解体事業者にヒアリングを行った結果、通常の解体時に比べて手間がかからないことから、人件費の設定が困難であったため、コスト把握は行わないものとした。自動車ガラスの回収の際の対象部位と回収量の前提条件を以下に示す。

表 3-1 回収副産物の前提条件

項目	自動車ガラス
対象部品	フロントガラス、リアガラス、ドアガラス
対象部品重量	36kg/台
自動車ガラス回収率 ^{※1}	91.3% ^{※2}
平均回収量 ^{※5}	32.9 kg/台

※1：自動車ガラス回収率＝1－中古パーツ回収率

※2：フロントガラスの中古パーツとしての回収率 8.7%(出典「自動車解体業における部品などの回収・流通に関する実態調査」国立環境研究所、2004 年 3 月)より試算

※3：平均回収量＝対象部品重量×ガラス回収率

② 自動車ガラスの運搬

自動車ガラスの回収には10t車(1日45,000円)を利用するものとした。自動車ガラスの運搬の前提条件を表に示す。シナリオ2は、シナリオ1に比べて回収頻度を多くした。(解体事業者での保管量が少ない場合を想定)

表 4-2 自動車ガラスの運搬の前提条件

項目		自動車ガラス
シナリオ1	回収頻度	1社当月1回、 1日1台当たり 最高5社まで回収
	1社	27.4
	3社	9.1
	5社	5.5
	10社	5.5
	20社	5.5
	30社	5.5
シナリオ2	回収頻度	1社当月2回、 1日1台当たり 最高5社まで回収
	1社	54.8
	3社	18.3
	5社	11.0
	10社	11.0
	20社	11.0
	30社	11.0

③ 自動車ガラスの前処理

自動車ガラスの前処理に関する前提条件を表 1 に示す。シナリオ 2 では、シナリオ 1 に比べて作業効率が低いことを想定した。

表 4-3 前処理前提条件

項目	自動車ガラス
前処理方法	剥離・破砕処理
前処理装置	剥離・破砕装置
装置価格	8,000 千円
処理量	30 枚/h
人件費※1	50 円/枚(平均 5.6 円/kg)
ユーティリティー費	1.2 円/kg
減価償却費※2	0.3~17.4 円/kg (処理量によって変動)
処理量	15 枚/h
人件費※1	50 円/枚(平均 5.6 円/kg)
ユーティリティー費	2.4 円/kg
減価償却費※2	0.6~34.8 円/kg (処理量によって変動)

※1：作業員人件費 12,000 円(実働 8h)として試算

※2：7 年償却(残存簿価 10%)定率法で試算

④ 前処理後自動車ガラスのリサイクル事業者への運搬

前処理後自動車ガラスのリサイクル事業者への運搬には 10t 車(1 日 45,000 円)を利用するものとした。前処理後副産物のリサイクル事業者への運搬に関する前提条件を表に示す。シナリオ 2 では、シナリオ 1 に比べて積載量を低い場合を想定した。

表 4-4 廃ガラスの運搬の前提条件

(単価：運搬コスト(円/kg))

項目		自動車ガラス
シナリオ 1	積載量	8.0t/台
	1 社	27.4
	3 社	9.1
	5 社	5.5
	10 社	5.5
	20 社	5.5
	30 社	5.5
シナリオ 2	積載量	6.0t/台
	1 社	54.8
	3 社	18.3
	5 社	11.0
	10 社	11.0
	20 社	11.0
	30 社	11.0

以上の前提条件をもとにコスト及び利益の算出を以下の式をもとに行った。

- ・コスト＝人件費＋ユーティリティー費＋減価償却費＋収集運搬費
- ・利益＝副産物売却費－コスト

4.2.2 自動車ガラス回収に係るコスト把握

自動車ガラス回収に係るコスト把握を行った結果、前処理後も売却が困難なことから、ここでは、回収に係るコストのみ把握を行った。

・シナリオ 1

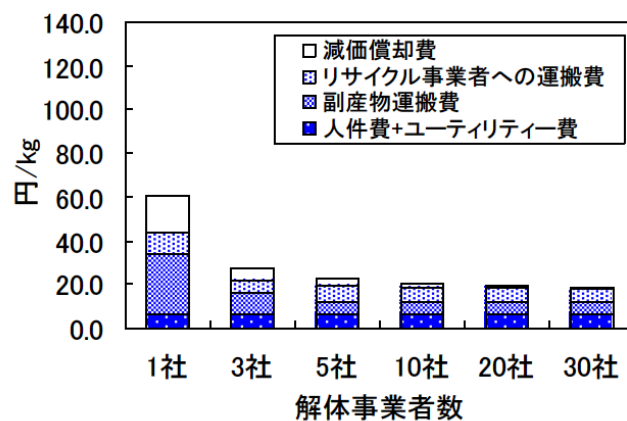


図 4-4 自動車ガラス回収に係るコスト(シナリオ 1)

シナリオ 1 の前提条件の下で試算を行った結果、19～61 円/kg のコストがかかる。複数の事業者から回収を行うことで、40 円/kg 程度のコストダウンが可能である。

・シナリオ 2

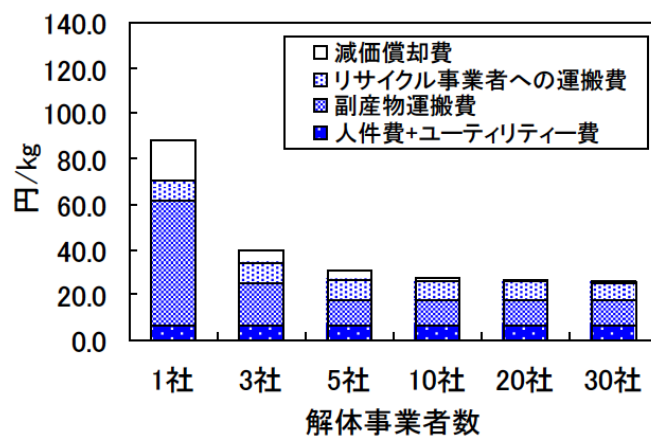


図 4-5 自動車ガラス回収に係るコスト(シナリオ 2)

シナリオ 2 の前提条件の下で試算を行った結果、26～88 円/kg のコストがかかる。複数の事業者から回収を行うことで、60 円/kg 程度のコストダウンが可能である。

以上の結果から、自動車ガラス回収にかかるコストは 19～88 円/kg であった。複数の事業者でルート回収を行うことにより、回収コストを抑えることが可能である。自動車ガラス回収を行うためには、自動車ガラスの売却価格が最低でも 20 円/kg 以上である必要があるが、現在自動車ガラスは有価での売却は困難であることから、現状では 3R システムの運用は難しいと考えられる。

4. 廃ガラスの3Rシステムの検討

4.3 回収方法の検討

使用済み自動車解体工程から発生する廃ガラスの3Rシステム構築については、一社から発生する廃ガラスでは、非常に量が少ないため、前処理設備を導入する経済的メリットがない。そのため複数社から廃ガラスのルート回収などを行い、一定量集めた上で前処理を行いリサイクル事業者へ搬入する仕組みづくりが必要である。そのため、アンケート結果などから考えられた複数の回収方法を検討した。

4.3.1 解体事業者を中心とした回収方法の検討

本回収方法は、複数の解体事業者間でネットワークを構築し、廃ガラスの共同販売を行うものである。特定の解体事業者に前処理設備を共同で設置し、前処理を行い、副産物をリサイクル先へ搬入する方法である。

表 4-5 解体事業者を中心とした回収方法のメリット・デメリット

	概要
メリット	・ 解体事業者間でのノウハウ共有などの連携が可能であるため、展開しやすいシステムであると考えられる。 ・ リサイクル事業者との直接取引が可能のため、有価物に関しては、高値での取引が可能。
デメリット	・ 解体事業者で前処理設備を保有する必要があるためイニシャルコスト、ランニングコストが発生。

4.3.2 収集運搬事業者を中心とした回収方法の検討

本回収方法は、収集運搬事業者を中心とした回収システムである。車載式の破碎機などを利用して、収集と前処理を同時に行い、副産物リサイクル先搬入するシステムである。現状、ハーネスの回収実態もリサイクル手法は、海外輸出であるが、これに近い形のシステムであると考えられる。

表 4-6 収集運搬事業者を中心とした回収方法のメリット・デメリット

	概要
メリット	・ 解体事業者にイニシャルコストが発生しない。 ・ 地域を選ばずシステム展開が可能。
デメリット	・ 車載型の装置は、ある程度簡易な装置になってしまうため、解体事業者にも異物除去などの前処理作業が発生する。 ・ 車載型の装置では、設備に限界があるため、副産物リサイクル先が限定さ

	れる可能性がある。(例：バンパーの塗膜分離処理は車載型装置では困難)
--	------------------------------------

4.5 回収に係るコストの把握

4.5.1 回収方法別の前提条件の検討

4.4 で挙げた回収方法別のコスト把握のための前提条件を表 4-7、4-8、4-9 に整理した。また、アンケートの結果、解体事業者の平均的な処理台数は月間 150 台程度であった。そこでコスト把握に際しては、回収を行う事業者数を 1 社、3 社、5 社、10 社、20 社、30 社から副産物回収を行うものとして回収規模別のコスト把握を行った。

なお、解体時の副産物回収にかかる人件費については、複数の解体事業者にヒアリングを行った結果、通常の解体時に比べて手間がかからないことから、人件費は発生しないものとし、収集運搬には、10t 車(45,000 円/日)を利用するものとした。

表 4-7 副産物別前提条件及び前処理前提条件

項目	自動車ガラス
対象部品	フロントガラス、リアガラス、ドアガラス
対象部品重量	36kg/台
副産物回収率	91.3%※1
平均回収量※4	32.9 kg/台
前処理	剥離・破碎処理
装置価格	8,000 千円
処理量	30 枚/h
コスト	6.8 円/kg
人件費※5	50 円/枚(平均 5.6 円/kg)
ユーティリティー費	1.2 円/kg
減価償却費※6	0.3~17.4 円/kg (処理量によって変動)

※1：フロントガラスの中古部品としての回収率 8.7%(出典「自動車解体業における部品などの回収・流通に関する実態調査」国立環境研究所、2004 年 3 月)より試算

※2：平均回収量＝対象部品重量×回収率

※3：作業員人件費 12,000 円(実働 8h)として試算

※4：7 年償却(残存簿価 10%)定率法で試算

表 4-8 収集運搬コストに関する前提条件(単位：円/kg)

回収 事業者数	自動車ガラス		廃プラスチック類		ワイヤーハーネス	
	副産物 の回収※1	リサイクル事業者 への搬入※3	副産物 の回収※2	リサイクル事業者 への搬入※3	副産物 の回収※2	リサイクル事業者 への搬入※3
1 社	9.1	9.1	52.5	52.5	65.1	65.1
3 社	6.1	6.1	17.5	17.5	21.7	21.7
5 社	5.5	7.3	10.5	10.5	13.0	13.0
10 社	5.5	6.4	10.5	10.5	13.0	6.5
20 社	5.5	5.9	10.5	7.9	13.0	6.5
30 社	5.5	5.8	10.5	7.0	13.0	6.5

※1：1 社あたり月 3 回、1 日 5 社の回収を行うものとして試算

※2：1 社あたり月 1 回、1 日 5 社の回収を行うものとして試算

※3：1 日 1 回の運搬として試算

4.6 自動車ガラスのリサイクルシステム構築

使用済み自動車解体工程から発生する自動車ガラスのリサイクルシステム構築については、一社の解体事業者から発生する自動車ガラスでは、非常に量が少ないため、前処理設備を導入する経済的メリットがない。そのため複数社から自動車ガラスのルート回収などを行い、一定量集めた上で前処理を行いリサイクル事業者へ搬入する仕組みづくりが必要である。そのため、二つの回収方法を検討した。

4.6.1 解体事業者を中心とした回収方法の検討

本回収方法は、複数の解体事業者間でネットワークを構築し、自動車ガラスの配送を行うものである。特定の解体事業者に前処理設備を共同で設置し、前処理を行い、自動車ガラスリサイクル先へ搬入する方法である。



図 4-6 解体事業者を中心とした回収方法イメージ図

解体事業者を中心とした自動車ガラスリサイクルシステムは、解体事業者のみで事業を行うため、解体事業者の組合などを利用した運用が可能である。また、解体事業者同士の連携であることから、自動車ガラスの回収方法などのノウハウを共有しやすいリサイクルシステムであると考えられる。

4.6.2 収集運搬事業者を中心とした回収方法の検討

本回収方法は、収集運搬事業者を中心とした回収システムである。車載式の破碎機などを利用して、収集と前処理を同時に行い、自動車ガラスリサイクル先搬入するシステムである。

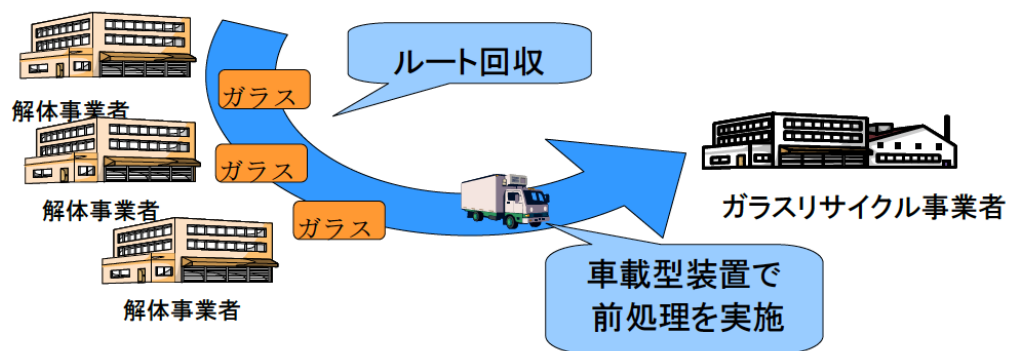


図 4-7 収集運搬事業者を中心とした回収方法イメージ図

収集運搬事業者を中心とした自動車ガラスリサイクルシステムは、収集運搬事業者の新たな事業としての位置づけが考えられる。収集事業者は、解体事業者から自動車ガラスを回収することにより、自動車ガラスのリサイクルを進めると共に、新たな収集運搬ルートを構築することにより収集運搬利益が得られる。

4.6 リサイクルシステム導入のための課題とまとめ

自動車ガラスは、シュレッダーダストの約 1 割近くを占めていることから、2015 年のシュレッダーダストリサイクル率 70%（自動車リサイクル率 95%）の達成を考えた場合、リサイクルシステムの導入は、非常に効果的であると考えられる。

しかしながら、シュレッダーダスト中に含まれる自動車ガラスは、最終的にスラグとして処理されることが多く、スラグの有効活用方法は、路盤材など限定的であり、リサイクルルートが確立されているとはいいがたい。リサイクルシステムを確立し、建材などの新たなリサイクルルートを確立することも必要であると考えられるが、自動車ガラスは有価売却が困難なため、回収を行ったとしても解体事業者の収益源になる可能性は低く、リサイクルシステムの運営は困難である。そのため、リサイクルシステム運営のためには、自動車リサイクル法上の解体事業者へのインセンティブやメーカーからの支援などが必要不可欠である。現在、ガラス再資源化協議会では、2014 年度の **G**lass **R**ecycling **A**dvanced **T**echnolgy(以下 GReAT2)での取り組で、ガラスの高度リサイクル技術開発を運搬、解体、分別、分離、原料化の分野で行っている。さらに、GReAT プロジェクトでは、運搬から製品化まで各異業種が協働し新たなリサイクルシステム導入を検討している段階である。

今後は、自動車ガラスだけでなく廃プラスチック類についても、運搬、解体の部分で、検討を加え、自動車リサイクル率向上に大きな影響を及ぼすと考えられる。同様に解体事業者へのインセンティブやメーカーからの支援なども検討されることが必要不可欠であるとする。