

# 造粒焼成技術を用いた焼却灰再資源化システムの開発(その2)

江口 信也\* 荒井 正英\*  
中村 州一\*\* 田中 靖之\*\*\*

## 要 旨

全国で大量に排出される焼却灰は、大部分が廃棄物処分場に最終処分されている。焼却灰の再資源化技術には熔融固化(スラグ化)があるが、処理コストが高く、またリサイクル材の用途が骨材等に限定されるため、より有効な技術の確立が望まれている。

本システムは、焼却灰につなぎ材と還元剤を添加して砂礫状に造粒し、1,000～1,100℃で焼成処理して安全かつ強固なセラミック粒子(リサイクル材)を製造する技術である。リサイクル材は外観や手触り、物理特性が自然砂礫と同等で、建設資材や植生土壌など、「土」として広く利用することが可能である。

本稿では、平成14、15年度環境省次世代廃棄物処理技術基盤整備事業及び廃棄物研究財団廃棄物処理技術開発支援事業として実施された本システムの実証試験に関して、前年度報告(リサイクル材の製造方法)に引き続き、総括的に試験結果を報告する。

## 1. はじめに

我が国においては、一般廃棄物の焼却灰は年間600万トン発生し(1997年度)、そのほとんどが埋立処分されている。産業廃棄物に関しては、「もえがら」及び「ばいじん」の発生量(1997年度)は年間約1,100万トンあり、このうち約350万トンが埋立処分されている。廃棄物処分場の残余年数は一般廃棄物で12.3年、産業廃棄物で3.7年(2000年4月)と逼迫した状況にあり、焼却灰については発生抑制や減容化とともに、リサイクルの促進が求められている。

五洋建設では、熔融技術に次ぐ次世代型の焼却灰再資源化技術として、平成12年度より「造粒焼成技術を用いた焼却灰再資源化システム」の開発を実施してきた。

本稿では、前年度の途中経過報告に引き続き、本システムの実証試験(平成15年4月～11月実施)について、主にシステムの運転特性とリサイクル材の建設資材適用性を中心とした総括的な結果報告を行う。表-1に報告内容の一覧を示す。

表-1 報告内容

項目	内容	
本技術の概要	本システムの処理フローと設備構成	
実証試験	試験概要	100日間の試験運転内容と実証項目 実証施設の設備規模と構成 対象焼却灰の性状とリサイクル材の配合
	施設の処理性能	運転バッチ毎の処理能力と排ガス性状 リサイクル材の重金属類含有、溶出、DXNs、pH 物質収支
	リサイクル材の資材有用性	土質特性と力学特性 植生土壌適性 建設資材規格適合性と資材適用事例



写真-1 処理状況

## 2. 本技術の概要

本システムによる焼却灰処理状況を写真-1、処理フローを図-1に示す。本システムは造粒技術と焼成技術を基幹とし、適切な前処理設備と排ガス処理設備を組み合わせたシステム技術である。焼却灰の造粒には建設汚泥リサイクル等で実績のある特殊ミキサを使用し、自然砂礫と同等の粒度に造粒する。造粒物の焼成にはロータリーキルンを用い、1,000～1,100℃で加熱処理する。造粒物は焼結作用により強固なセラミック質となり、重金属類は揮発分離あるいは不溶化される。またダイオキシン類はほぼ完全に熱分解される。加熱処理を還元雰囲気下で行うことで、焼結作用の促進、六価クロムの還元促進(三価クロムの酸化防止)、鉛の揮発分離促進を図っている。リサイクル材は自然砂礫と同等の外観と物理特性を有しており、主に建設分野を中心として幅広い用途に利用することが可能である。

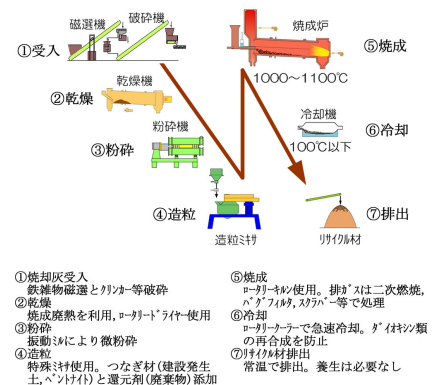


図-1 造粒焼成処理フロー

\* 本社環境事業部 \*\* 横浜支店 \*\*\*技術研究所

### 3. 実証試験概要

#### 3.1. 試験概要

表-2 に実証試験概要を示す。稼動中の一般廃棄物処理施設に隣接して実証施設を建造し、100 日間以上の運転(30 日間×24 時間連続を含む)を実施して、施設の処理能力、安全性、安定性を検証した。また製造したリサイクル材については、安全性、土質特性、建設資材規格適合性を検証し、実工事及び試験施工で材料適用して建設資材特性を確認した。

表-2 実証試験概要

試験概要	実証内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証施設の定格処理能力</li> <li>・施設の安全性と安定性(30日×24h連続を含む100日運転)</li> <li>・リサイクル材の安全性と土質特性</li> </ul>
	運転期間	平成15年4月～平成15年11月
施設概要	定格処理能力	受入焼却灰1t/日
	設備面積	197m <sup>2</sup> (9.9m×19.9m)



写真-2 実証施設

#### 3.2. 実証施設

写真-2 に実証施設を、表-3 に使用設備一覧を、図-2 に焼成炉(ロータリーキルン)の構造図を示す。また図-3 に実証施設のシステムフローを示す。実証施設の設計処理能力は、焼成設備を1t/24h、前処理及び造粒設備を1t/8h以上としている。

表-3 使用設備一覧

処理	設備名	能力・仕様	処理	設備名	能力・仕様	
前処理 (焼却灰受入)	原灰ホッパー	1.2m <sup>3</sup>	造粒	スクリューコンベア5		
	原料定量供給スクリューフィーダー			造粒ミキサー	50L	
	原料搬送ベルトコンベア			造粒物簡易乾燥室		
	磁選機			造粒物搬送ワイヤコンベア		
前処理 (乾燥)	振動篩	□20mm	造粒物 簡易乾燥	造粒物貯留ホッパー	1.5m <sup>3</sup>	
	破砕機	0.5t/h		造粒物定量供給ベルトフィーダー		
	ベルトコンベア1			造粒物搬送ベルトコンベア1		
	雑物除去灰ホッパー			造粒物搬送ベルトコンベア2		
	乾燥機定量スクリューフィーダー	1.5m <sup>3</sup>		焼成	定量供給二段フィーダー	4.4L
	ローリードライヤー	125kg/h			ローリーキルン	42kg/L
微粉回収サイクロン	15g/m <sup>3</sup>	ローリーケーター	100kg/h			
スクリューコンベア1		製品搬出	製品搬送ベルトコンベア			
ベルトコンベア2			振動篩		□10mm	
乾燥機貯留ホッパー	2.0m <sup>3</sup>		排ガス処理		排ガスファン	40m <sup>3</sup> /min
スクリューコンベア2				二次燃焼室	850℃	
振動篩ミル	125kg/h			減温塔		
スクリューコンベア3				バグフィルター	40m <sup>3</sup> /min	
密閉型円形振動篩	□0.5mm	スクラパー		40m <sup>3</sup> /min		
ベルトコンベア3		清掃		乾燥灰用バグフィルター		
スクリューコンベア4			乾燥灰用活性炭脱臭塔			
前処理 (粉砕)	粉砕灰貯留ホッパー	2.0m <sup>3</sup>		環境集塵機	90m <sup>3</sup> /min	

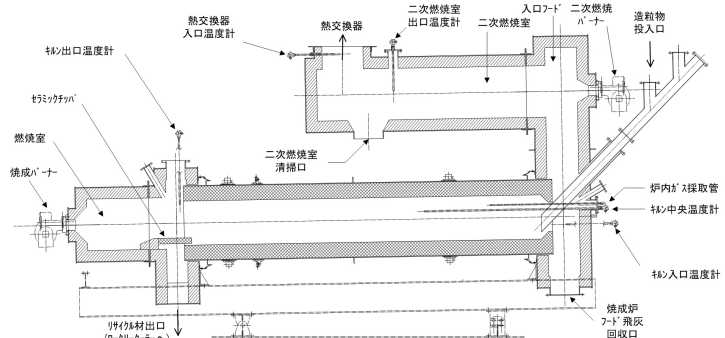


図-2 ローリーキルン構造図

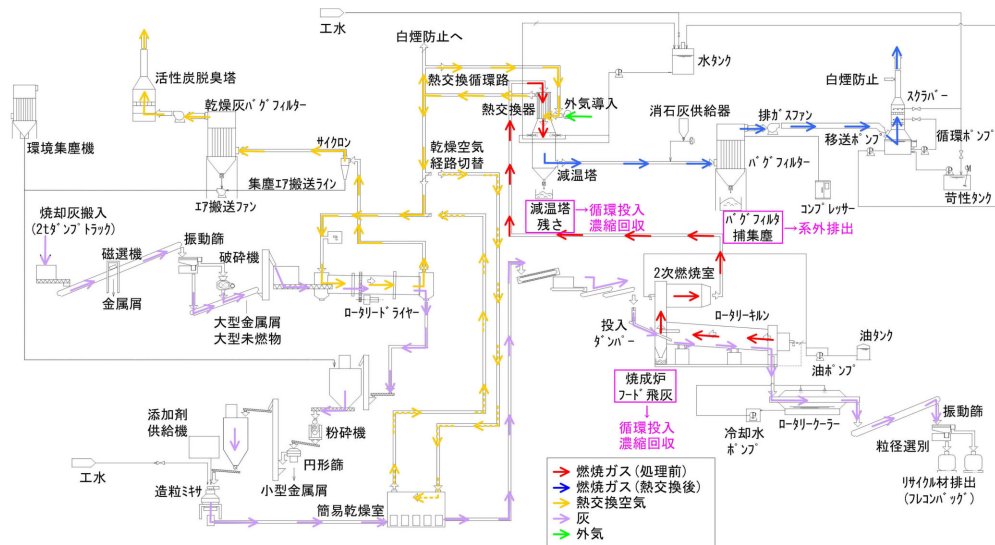


図-3 実証施設の処理フロー

前処理設備は鉄系雑物の選別設備とクリンカー等の破砕設備とし、手選別工程と併用した。また二次燃焼後の焼成排ガス処理設備はバグフィルタとスクラバーとし、受入焼却灰の乾燥ガス処理はバグフィルタと活性炭脱臭塔とした。受入灰の乾燥工程では熱交換器で回収した焼成廃熱を利用し、また施設水も循環使用とすることで、施設全体のエネルギー効率向上を図っている。施設内には環境集塵機を設置し、捕集したダスト類は乾燥ガス処理用バグフィルタの回収灰とともに原料ラインに戻している。また、運転残さの一部も原料として一定期間循環処理し、重金属類を濃縮して効率的に系外に排出している。

### 3.3. 処理対象焼却灰

試験では、複数の一般廃棄物焼却施設から排出される3種類の主灰と1種類の飛灰を個別に処理した。表-4、5、6に焼却灰の排出施設と灰性状を示す。焼却灰は平均含水率が40%以上と水分が多い。また受入日毎の含水率変動が大きく、同じ受入量でも乾燥重量は大きくばらついた。焼成温度域における強熱減量は、乾燥灰の9%程度(受入灰の4.9%)と大きい。重金属類は概して鉛、六価クロム、ふっ素の溶出量と鉛の含有量が、土壌に関する基準値と同程度か、あるいは超過している。飛灰のダイオキシン類濃度は4.6ng-TEQ/gと、土壌環境基準及び排出基準を超過した。

表-4 焼却灰排出施設と焼却灰

排出施設			試験対象灰	
施設名	炉形式	炉規模	灰種	搬入状態
施設A	機械パッチ式 固定床炉	4.7t/日	主灰A	受入時含水率25~45%
			飛灰A	焼却後トナリ袋に数日保管
施設B	機械パッチ式 固定床炉	5t/日×2基	主灰B	受入時含水率45~60%
施設C	乾留式 固定床炉	4.7t/日	主灰C	受入時含水率25~55%
				焼却後トナリ袋に数ヶ月保管

表-5 焼却灰の平均性状

灰分 (強熱減量除)	水分	強熱減量 (1050℃)	大型金属 <sup>※1</sup>	大型未燃物 <sup>※2</sup>	合計
49.5	43.9	4.9	0.9	0.8	100

単位：重量%

※1 前処理工程(磁選機及び手選別)で除去  
※2 前処理工程(手選別)で除去

表-6 焼却灰汚染度(基準超過項目のみ)

重金属類/DXNs	灰種	項目	試験値	基準値	基準(試験法)	
重金属類	溶出 (mg/l)	主灰A	Pb	0.01~1.18	0.01以下	土壌環境基準 (環告46号)
		主灰B	Cr(VI)	0.12~0.27	0.05以下	
		主灰C	Cr(VI)	0.01~0.13	0.05以下	
	飛灰A	F	0.40~1.50	0.8以下		
		Pb	0.01~0.13	0.01以下		
		F	0.86~2.00	0.8以下		
含有 (mg/kg)	主灰A	Pb	53~214	150以下	土壌汚染 対策法 (環告19号)	
	主灰C	Pb	100~170	150以下		
	飛灰A	Pb	65~300	150以下		
DXNs	含有 (ng-TEQ/g)	飛灰A	PCDDs, PCDFs, Co-PCB	4.6	1.0以下	土壌環境基準
					3.0以下	排出基準

### 3.4. リサイクル材の基本配合

表-7に造粒時の基本配合を、写真-3に得られたリサイクル材を示す。造粒用のつなぎ材にはベントナイトの他、浚渫粘性土等の建設発生土を有効利用することが可能である。

表-7 造粒時の基本配合

灰種	つなぎ材	添加率	コンシステンシー等(%)				還元剤 添加率
			細粒分 含有率	液性 限界	塑性 限界	塑性 指数	
主灰 A, B, C	ベントナイト	10	99	325	40	285	-
	建設発生土 (浚渫粘土)	10				100以上	5~10
		40	80~90	107	45	70 ~100	
		80				70以下	
飛灰A	ベントナイト	10	99	325	40	285	-

※添加率は乾燥灰100に対する乾燥重量比



主灰 100:ベントナイト 10:還元剤 10



主灰 100:浚渫土 80:還元剤 10



飛灰 100:ベントナイト 5:還元剤 10

写真-3 リサイクル材

#### 4. 実証施設の処理性能

##### 4.1. 焼却灰処理能力

図-4 に焼却灰処理状況と処理能力の推移を、表-8 に運転パターン毎の処理能力を示す。30日×24hの連続運転において、設計比1.04倍の処理能力を安定して発揮している。また処理日数1～10日間の断続運転では、昇温期間を含む平均処理能力で、連続処理を想定した設計値に対し0.5～1.02倍の能力を発揮した。また、リサイクル材の品質維持と排ガスの適正処理を条件とした最大能力運転では、2.34倍の処理能力を得た。連続運転中も施設として処理能力を低下させるトラブルは生じておらず、焼却灰処理施設として断続運転性能、連続運転性能ともに良好と言える。

##### 4.2. 炉内温度・ガス濃度変化と施設排ガス性状

図-5 に通常焼成時の焼成炉～熱交換器における温度、炉内ガス濃度、炉圧、煙突排出ガス量の計測例を示す。

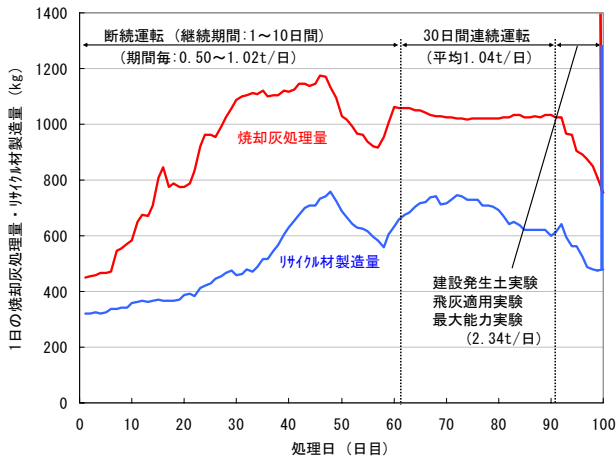


図-4 焼却灰処理状況

表-8 運転パターン毎の処理能力

名称	運転状況 処理条件	処理能力 (t/日)	
		処理日毎	処理期間平均 (昇温期間を含む)
連続運転	30日×24h連続運転 (焼成処理: 14h/日程度)	1.0~1.1	1.04
断続運転	昇温/焼成/消火/降温の繰返し (焼成処理: 1~10日間, 累計70日)	0.4~1.2	0.50~1.02
最大能力 運転	焼成処理: 28h連続	2.34 (24h換算, 昇温期間含まず)	

還元雰囲気下での焼成のため炉内CO濃度は大きく変動するが、低O<sub>2</sub>濃度で安定した処理が可能である。またCO濃度の変動についても、焼成排ガスは二次燃焼時に燃焼バーナー用エアと混合され完全燃焼するため、煙突排出時には問題とならない。

表-9 に排ガス性状を示す。本施設から排出されるダイオキシン類は、煙突出口で試験期間を通じて常時0.1ng-TEQ/m<sup>3</sup>N未満であった。また、排ガス中のばいじん、重金属類、特定悪臭物質等の濃度も十分低く、大気汚染防止法、ダイオキシン類特別措置法に適合している。

塩素分と硫黄分が主灰の10倍程度含まれる飛灰の処理時についても、排ガス中の硫黄分濃度が主灰処理時より上昇(0.05m<sup>3</sup>N/h)したが、東京都特別区の排出基準(K値1.17、0.06m<sup>3</sup>N/h)以内の値であった。

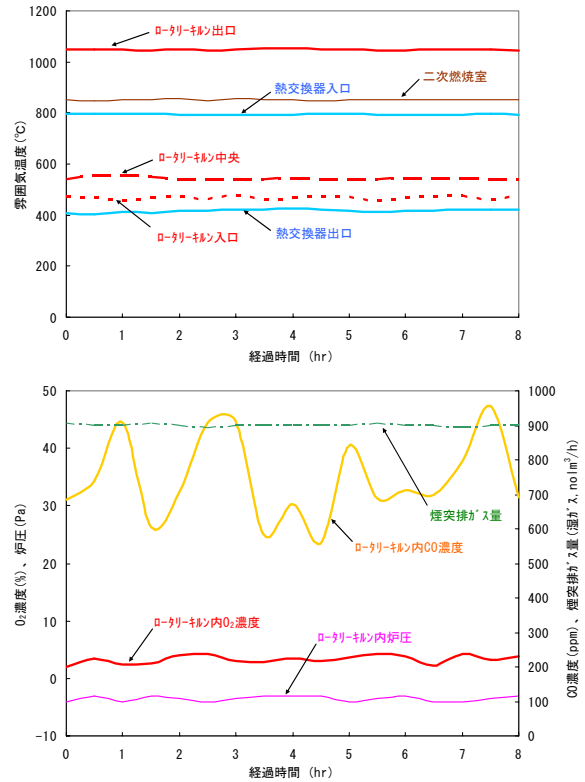


図-5 焼成時の温度、ガス濃度、炉圧、排出ガス量

表-9 排ガス性状

測定位置	DXNs (ng-TEQ/m <sup>3</sup> N)	煤塵 <sup>※1</sup> (g/m <sup>3</sup> N)	SOx <sup>※1</sup> (volppm)	NOx <sup>※1</sup> (volppm)	HCl <sup>※1</sup> (mg/m <sup>3</sup> N)	ガス量(m <sup>3</sup> N/h)		CO <sup>※1</sup> (volppm)	CO <sub>2</sub> <sup>※1</sup> (%)
						湿	乾		
煙突出口	0.019~0.097	0.001未~0.005	0.9未	29~44	3.1未	770~860	600~750	5未	7.7~13.5
脱臭塔出口	0.002未~0.074	0.005未~0.037	6.9未	35~51	23未	490~600	460~510	120~330	18.7~19.4
参考 <sup>※2</sup>	-	0.04	-	250	700	-	-	-	-

※1 12%O<sub>2</sub>換算値、※2 参考基準: 廃棄物焼却炉(大防法。新設かつ4t/h以上)

測定位置	Mg	F	CN	B	Cd	Pb	Cr	Cr(VI)	As	Se
煙突出口	0.002未	0.32~0.94	0.2未	0.3未	0.01未	0.01未	0.01未~0.02	0.01未	0.02未	0.02未
脱臭塔出口	0.002未	0.19~0.75	0.2未	0.3未	0.01未	0.01未	0.01未~0.02	0.01未	0.02未	0.02未

### 4. 3. リサイクル材の安全性

表-10 に公定法によるリサイクル材の重金属類含有・溶出量、表-11 にダイオキシン類含有量、表-12 にアペイラビリティ試験 (NEN7341) による重金属類溶出量の試験結果を示す。リサイクル材は灰種配合を問わず、試験期間を通じて全項目土壌に関する基準値を満足している。また、ダイオキシン類はほぼ完全に熱分解される。より溶出傾向の強いアペイラビリティ試験でも、溶出量は全項目土壌環境基準値未満である。これらの性状は灰種によらずほぼ一様で安定しており、リサイクル材は安全であると言える。

また、焼成直後のリサイクル材は、焼却灰から pH が 2 ほど低下して弱アルカリ性 (pH10 程度) を示す。リサイクル材の pH は気中の CO<sub>2</sub> と反応して漸減するが、簡便な水浸処置により排水基準である pH8.6 程度まで、効果的に低減が可能で

表-10 リサイクル材の重金属類  
(検出限界値超過項目のみ)

項目	項目	試験値	基準値	基準(試験法)
溶出量	Cd	ND~0.001	0.01 以下	土壌環境基準 (環告46号)
	Cr(VI)	ND~0.017	0.05 以下	
	As	ND~0.008	0.01 以下	
	F	ND~0.60	0.8 以下	
	B	0.02~0.41	1 以下	
含有量 mg/kg	Cu	57~98	125 以下	土壌汚染 対策法 (環告19号)
	Cd化合物	ND~0.41	150 以下	
	Cr(VI)化合物	ND~1.8	250 以下	
	Pb化合物	ND~140	150 以下	
	As化合物	ND~4.4	150 以下	
	F化合物	ND~48	4000 以下	
B化合物	80~230	4000 以下		

表-11 リサイクル材のダイオキシン類

ダイオキシン類濃度	試験値	単位
	0.0000~0.00620	ng-TEQ/g

表-12 リサイクル材のアペイラビリティ試験

項目	Cd	T-CN	Pb	Cr(VI)	As	T-Hg	Se	F	B
参考基準	0.01 以下	未検出	0.01 以下	0.05 以下	0.01 以下	0.0005 以下	0.01 以下	0.8 以下	1 以下
試験値	ND	ND	ND	ND	0.002	ND	ND	ND	ND~0.11

参考基準は土壌環境基準、単位:mg/l

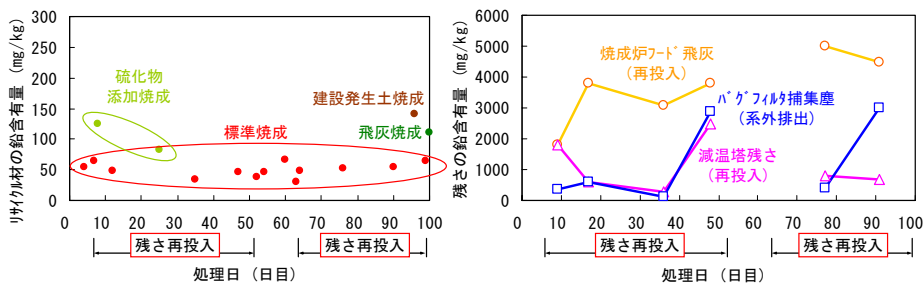


図-7 鉛含有量の推移(底質調査法)

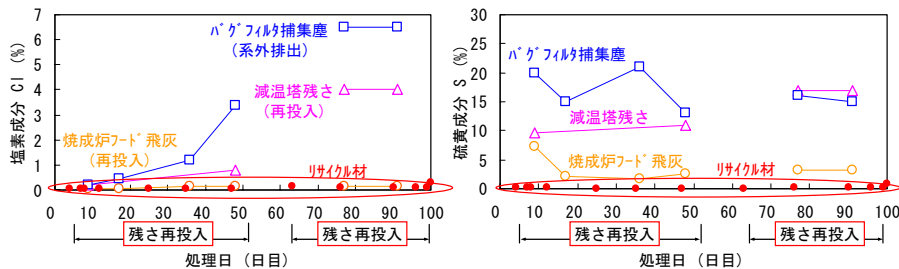


図-8 塩素分・硫黄分の推移

ある(図-6)。リサイクル材の pH が問題となる場合、実用施設に pH 低減用の水浸槽を設置することは有効であると言える。なお、pH 低減前後でリサイクル材の重金属類の含有・溶出量に有意な変化は認められなかった。

### 4. 4. 運転残さの循環処理

焼成処理に伴い本施設から排出される残さは、焼成炉と二次燃焼室の間で沈降捕集される焼成炉フード飛灰、減温塔内でスクラバー洗煙水を散水蒸発させ排ガスを冷却する際に沈降捕集される減温塔残さ、バグフィルタで捕集されるバグフィルタ捕集塵、の三種である。焼成炉フード飛灰とバグフィルタ捕集塵は、焼成により揮発した鉛を高濃度で含有している。本試験では、焼成炉フード飛灰と減温塔残さを原料ラインに再投入して循環処理した。

図-7 に試験期間中のリサイクル材と運転残さの鉛の推移を、図-8 に同じく塩類含有量の推移を示す。延べ 81 日間

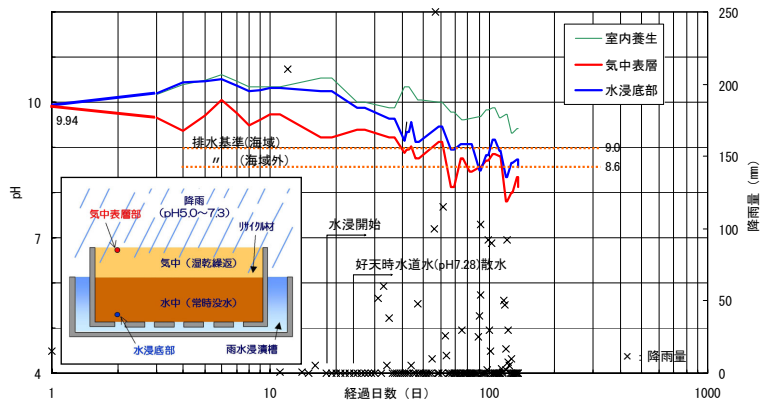


図-6 リサイクル材の pH 低減

(処理日数 45 日間と 36 日間の 2 回)の循環処理において、リサイクル材は、鉛、塩素分、硫黄分のいずれも濃縮傾向を全く示さない。減温塔残さとバグフィルタ捕集塵は、循環処理サイクル中期以降に鉛の濃縮が顕著であり、サイクル終了後は濃度が低下する。塩素分と硫黄分については、循環処理の影響は明確ではないが、減温塔残さとバグフィルタ捕集塵の濃度が高い。

バグフィルタ捕集塵の排出量は 10~15kg/日であり、1.5~2kg/日の焼成炉フード飛灰や減温塔残さより多い。また排ガスも減温塔入口は鉛と塩素分が増加するのに対し、煙突出口は終始計測限界値未満であり、造粒物に集積される鉛と塩素分が循環処理によって効率的に系外排出されていることが分かる。本試験のケースでは、連続 40 日程度の残さ循環処理は特に問題ないと判断される。

このように、運転残さや施設使用水の濃縮傾向(特に鉛)を把握し、適切な循環処理サイクルを設けることで、系外排出量の効果的削減が可能である。なお、循環処理中に排出されるバグフィルタ捕集塵は特別管理廃棄物であり、不溶化処置を行って管理型処分場に処分する。

#### 4. 5. 物質収支

表-13 に試験全体での物質収支を示す。誤差 2.5%の収支計測において、焼却灰のリサイクル率は 90.9%である。

また 30 日間の連続運転では、各種重金属類及び塩素分、硫黄分に関しても収支計測を行った。図-9 に代表例として鉛の収支を示す。収支誤差は重金属種類により 2~55%とばらついたが、いずれも大部分がバグフィルタでの捕集とリサイクル材への残留で占められた。鉛については、本試験では焼却灰含有量の 60%程度を揮発分離して捕集し、40%程度がリサイクル材に残留した。また塩素分、硫黄分に関しても、重金属類と同様の傾向を示した。

表-13 焼却灰の全体重量収支

項目	kg	備考
① 受入焼却灰	湿潤 86135	搬入量実測
② 受入焼却灰	乾燥 49597	実測値(搬入、雑物、含水率)から計算
③ 造粒時添加剤	13593	添加量実測
④ 造粒物加熱減量	6278	実験値と実測投入量から計算
⑤ 苛性ソーダ	1125	投入量実測
⑥ バグフィルタ捕集塵	1890	搬出量実測
⑦ 焼成炉フード飛灰	99	〃 (循環サイクル終了期間)
⑧ 減温塔残さ	85	〃 (〃)
⑨ 煙突ばいじん	10	ガス測定値と稼働時間より計算
⑩ リサイクル材	57439	搬出量実測
⑪ 受入総量(乾燥)	58037kg	②+③-④+⑤
⑫ 排出総量(乾燥)	59523kg	⑥+⑦+⑧+⑨+⑩
	収支計測誤差: 2.5 %	(⑫-⑪)/⑫×100
	焼却灰リサイクル率: 90.9 %	⑩/(②+③)×100

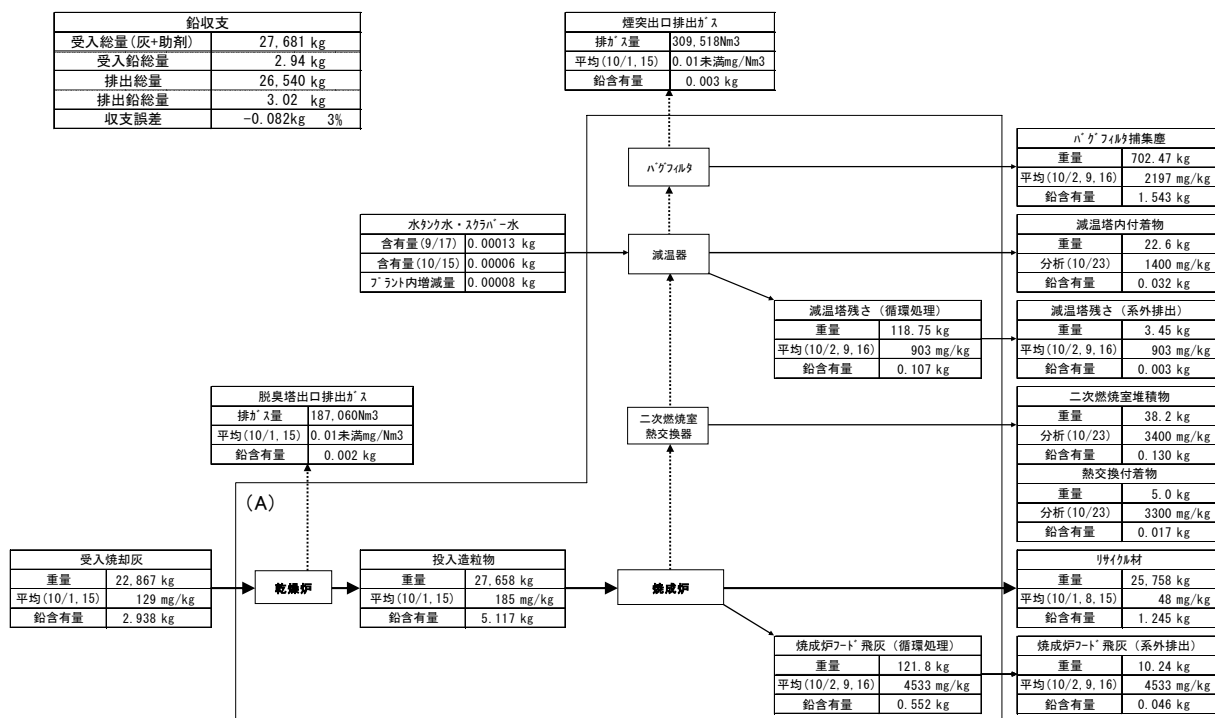


図-9 重金属類収支例(鉛、30日連続運転)

## 5. リサイクル材の資材有用性

### 5. 1. リサイクル材の土質特性

図-10 にリサイクル材の粒度分布を示す。粒度は建設工事で使用される自然砂礫の範囲にあり、かつ造粒ミキサの運転条件により左右にシフトが可能である。

図-11 にリサイクル材の粒子圧壊試験結果(粒子の一軸圧縮試験、JIS Z 8841 粒径補正有り)を示す。自然環境における粒子の劣化有無を確認するため、スレーキング試験、繰り返し凍結融解試験、長期暴露による pH 低減試験を行った粒子についても、併せて強度を調査した。粒子圧壊強度は 50~1,000N/cm<sup>2</sup> の範囲にあり、90%以上が 100N/cm<sup>2</sup> を超える。また平均圧壊強度は粒径によらず 250N/cm<sup>2</sup> 以上と、セメント固化処理系の造粒再生材より大きく自然砂礫領域にある。長期暴露や湿乾あるいは凍結融解を繰り返した後も、粒子圧壊強度は低下しない。

表-14 にリサイクル材の土質特性を示す。自然砂礫と比べて土粒子密度は 3 程度と大きいが、粒子内に微細空隙を有するため単位容積質量は  $\gamma_t=1.0\sim 1.4\text{g/cm}^3$  と軽量盛土材程度である。また砂礫としての良好な透水性と、20%程度の吸水率を両立する。地盤強度は  $\phi=40\sim 45^\circ$  と自然砂礫と同等以上であり、別途実施した造成地盤の平板荷重試験でも、地盤反力係数  $K=103.9\text{MN/m}^3$  の地耐力を有している。

### 5. 2. リサイクル材の植生事例

リサイクル材を植生土壌として使い、多種類の植物を栽培してその成長に与える影響の有無を確認した。図-12 に植生調査ケースを示す。

苗木栽培	種子栽培
ミニマリア ボト ワイルドストロベリー パッションフルーツ	ミニマリア マリゴ アガオ ミトマ アゼカスラ

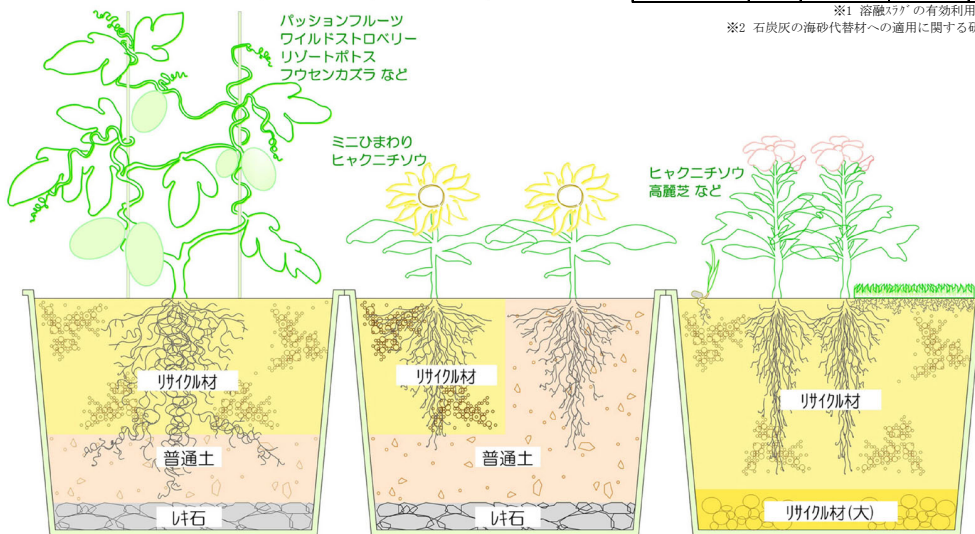


図-12 植生調査実験模式図

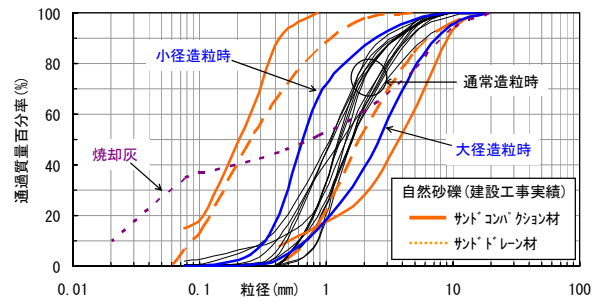


図-10 リサイクル材の粒度分布

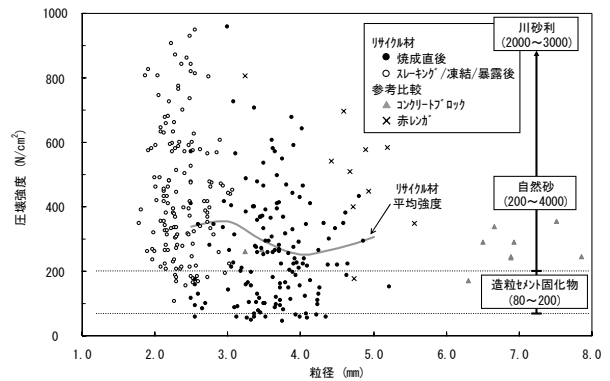


図-11 リサイクル材の粒子圧壊強度

表-14 リサイクル材の土質特性

項目	単位	リサイクル材	自然砂	参考 <sup>※1, ※2</sup>	
				溶解 スラグ材	石灰セメント 造粒固化工材
土粒子材料密度	g/cm <sup>3</sup>	2.9~3.1	2.6~2.7	-	1.81
土粒子表乾密度	g/cm <sup>3</sup>	2.0~2.4	-	2.77	-
土粒子飽和密度	g/cm <sup>3</sup>	1.5~2.0	-	2.74~2.89	-
単位容積質量	g/cm <sup>3</sup>	1.0~1.4	1.4~1.8	1.66	1.70
表積率	%	60~68	65程度	59.9	-
最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.11~1.84	-	1.48~1.87	-
最適含水比	%	0.0~2.2	-	2.8~20.0	-
内部摩擦角	deg.	40~45	30~40	-	45~48
修正CBR値	%	20~30	8~40	6.4~39.4	-
すりへり抵抗	%	25程度	-	-	-
スレーキング率	%	0.1程度	-	-	0.4
透水係数	cm/s	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-4</sup>	-	1.3×10 <sup>-3</sup>
吸水率	%	20程度	2.5程度	1.8~4.4	16.4
吸水膨張率	%	0.01程度	-	-	-

※1 溶解スラグの有効利用に係わるガイドライン(案), 2003  
 ※2 石灰セメントの海砂代替材への適用に関する研究, 五洋建設技術年報, 1999

### 5. 2. 1. 高麗芝による植生調査事例

原地盤を 20cm 掘り込み、普通土、普通土+リサイクル材の混合土、リサイクル材の三種類の土壌を造成して高麗芝(適性 pH6~7)を張った。写真-4 と表-15 に 140 日経過時の育成状況を示す。土壌の透水性と保水性の違いから根張状況が異なるが、上草部に普通土との差異はなく、根色も白く新鮮で順調に育っている。

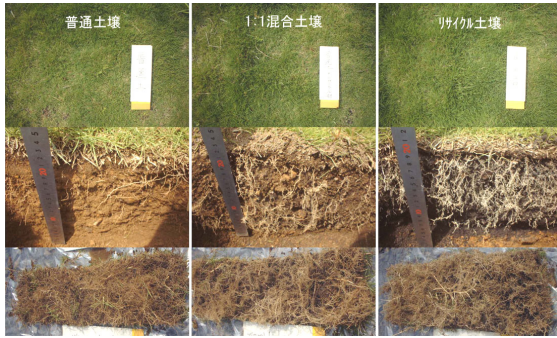


写真-4 上草及び根張状況

表-15 土壌 pH と根張状況

土壌	項目	土壌 pH			140 日目の根張状況				
		芝張時	50 日目	140 日目	土壌含水比 (%)	主根		枝根	
						平均径 (mm)	平均長 (mm)	根量	平均長 (mm)
普通土		6.0	6.0	6.0	30.3	1.7	140	普通	160
1:1混合土		-	-	8.2	27.7	1.6	97	やや多い	194
リサイクル材		11.0	9.8 (9.2)	8.6	21.9	1.6	127	多い	100

カッコは非張域

### 5. 2. 2. パッションフルーツによる植生調査事例

写真-5 にリサイクル材土壌での栽培状況を、表-16 に収穫した果実の重金属類含有量を示す。果実分への有意な重金属類蓄積は認められない。前述のアベイラビリティ試験結果も良好であり、長期暴露による重金属類の溶出及び植物への影響の可能性は低いと言える。



写真-5 栽培状況

表-16 栽培果実の重金属類含有量

項目	Cd	Pb	Cr(VI)	As	T-Hg	Se	F	B	CN	T-Cr
皮、果肉、種子(果実分)の含有量 <sup>※1</sup>	0.01 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.5 未満	0.02 未満	0.5 未満	6 未満	13 <sup>※2</sup>	1 未満	0.3 未満
基準値 <sup>※1</sup>	果実0.05 精米0.2 食塩0.5	果実0.1 穀類0.2 食塩2.0	-	食塩0.5	食塩0.1 魚類0.5~0.1	-	-	-	-	-

※1 試験法、基準値は国際食品規格Codex Alimentarius(案)による。単位: mg/kg  
 ※2 植物に元来含まれる微量要素(例: 茶葉20~30)

### 5. 3. リサイクル材の建設資材適合性

表-17 にリサイクル材が規格適合する主たる砂礫系建設資材を示す。リサイクル材はサンドコンパクション材、サンドドレーン材、路床材及び下層路盤材、人工軽量骨材に適合する。また材料としての明確な規格はないが、内部摩擦角が大きく軽量で透水性にも優れるため、土圧低減を期待する擁壁背面の裏込材等にも適している。

吸水率が大きいため、本試験で得られたリサイクル材については、JIS 規格上コンクリート細骨材には不適という結果を得た。表-18、19 に、プレウェッティングしたリサイクル材を使用したコンクリート供試体の圧縮強度と中性化試験の結果を示す。自然砂とリサイクル材を 1:1 配合で細骨材に使用した場合、供試体重量、圧縮強度ともに通常材料使用の供試体と同等の性能を有している。また中性化深さも通常範囲にあり、力学的には細骨材使用は可能であると考えられる。

表-17 建設資材規格適合性

資材	試験項目	規格・望ましい値 <sup>※1</sup>	リサイクル材
サンドコンパクション材	最大粒径 (mm)	40~50以下	10~20
	細粒分率 (%)	3~5 (10~15以下)	1未満
	粒度分布	図-5	図-5
	透水係数 (cm/s)	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-2</sup>
	内部摩擦角 (deg)	30~35以上	40~45
	粒子圧縮強度 (N/cm <sup>2</sup> )	160以上	250程度
サンドドレーン材	粒度分布	図-5	図-5
	透水係数 (cm/s)	10 <sup>-3</sup> 程度以上	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-2</sup>
路盤/路床 (アスファルト、簡易舗装)	修正CBR (%)	20以上/10以上	20~30
	最大粒径 (mm)	50以下/50以下	10~20
	細粒分率 (%)	-/10以下	1未満
人工軽量細骨材	飽和密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.60~1.75	1.5~2.0

※1 軟弱地盤対策工法, 軟弱地盤対策工法編集委員会, 1990

表-18 供試体配合と圧縮強度

試料名	使用骨材		配合		フレンジ試験			圧縮強度	
	細骨材	粗骨材	w/c (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/L)	7日 (N/mm <sup>2</sup> )	28日 (N/mm <sup>2</sup> )
普通コンクリート	自然砂	砂利	55	160	10.5	5.2	2.227	23.2	35.5
リサイクル材使用コンクリート	リサイクル材 自然砂 <sup>※</sup>	砂利	55	160	13.5	4.0	2.225	21.3	34.0

※ リサイクル材と自然砂は容積比1:1で混合

表-19 中性化促進試験

コンクリート鉄筋かぶり (mm)	26週促進終了時 中性化深さ (mm)	
	普通コンクリート	リサイクル材コンクリート
25	12	16

### 5. 4. リサイクル材の建設資材適用事例

リサイクル材を実工事あるいは試験施工に資材適用し、資材特性を確認した。

#### 5. 4. 1. 透水性軽量裏込材への適用例(民間建築工事)

壁面土圧の低減と集雨水の排水を目的とし、構造物の裏込土中間層として施工した(施工延長 22.5m)。図-13 に施工断面を、写真-6 に施工状況を示す。現地は国内有数の降雨地域であるが、良好な排水性が確認されている。



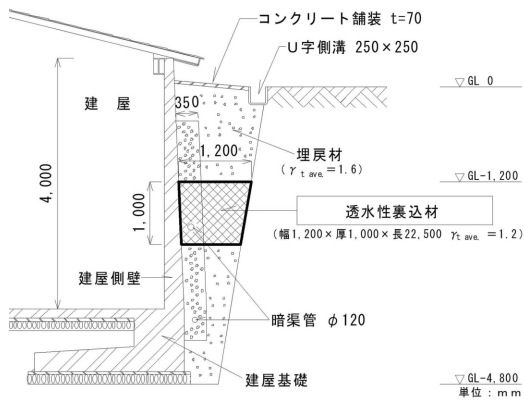


図-13 施工断面図



写真-6 施工状況

#### 5. 4. 2. モルタル骨材への適用例(公共土木工事)

法面保護工の法尻部水叩被覆工として、リサイクル材を細骨材使用したモルタルを施工した(施工延長 13m×2箇所)。図-14 に施工断面を、表-20、21 に施工条件と現場配合による強度試験結果を、写真-7 に施工状況を示す。モルタル練りは現地ミキサーで行ったが、リサイクル材のみを使用した

場合でも、初バッチで調整した加水量にその後変化はなかった。打設直後から水の引きが顕著で、ブリージング水はほとんど発生しない。またモルタルの表面粗度は通常より若干粗い。リサイクル材と自然砂を混合使用した場合は、表面の粗粒感が少なく、ブリージング水も普通モルタル同様に生じる。打設 120 日目においても両ケースともクラック等の劣化は認められず、被覆モルタルとして良好な状態を保っている。モルタル骨材としての適性は良好であると言える。

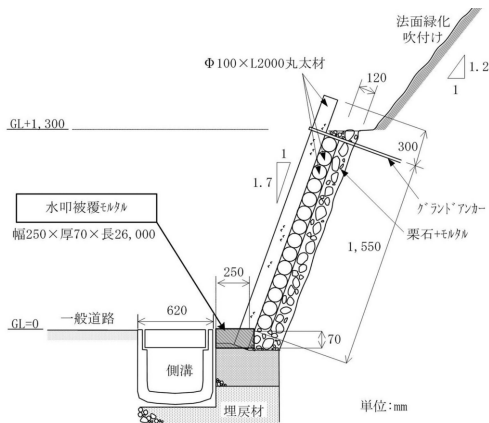


図-14 施工断面図

表-20 施工条件

施工時 天候	使用 セメント	練混	使用骨材	施工断面	施工延長
小雨	普通 ポルトランド	小型ミキサ 現場練り	①リサイクル材 ②自然砂+リサイクル材	幅25cm 厚7cm	①13m ②13m

表-21 現場供試体強度

ケース	使用 骨材	セメント (kg)	加水量 (L)	使用量(kg)		圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
				リサイクル材	普通砂	7日	28日
①	リサイクル材	147	50	296	0	36.8	41.9
②	リサイクル材 自然砂	150	57	168	180	28.7	36.3

材料含水比：リサイクル材17.1%、自然砂12.1%

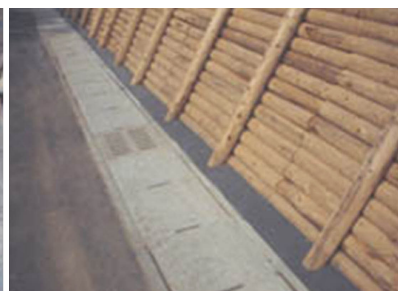


写真-7 施工状況

### 5. 4. 3. 路床・路盤材への適用例(模擬道路試験施工)

室内材料試験結果を用い、B 交通路として断面設計(ケース①～③)。①は通常自然材料のみ使用した模擬道路を造成した。またケース③と同じ層厚構成で、下層及び上層路盤をリサイクル材に置換した断面も施工した(ケース④)。図-15 に施工断面を、表-22、23 に施工ケースと平板載荷試験結果を示す。また図-16 に上層路盤転圧前後の粒度分布を、図-17 に大型車両による繰返し動的載荷試験結果を示す。リサイクル材は路床材及び下層路盤材として、通常材料と同

等以上の強度性能を有している。また転圧による細粒分の増加はなく、粒子破碎による透水性の低下は生じないと考えられる。なお施工時の締固特性上、路盤材を使用する場合は重量比 10～20%の普通土と混合することが望ましい。

砂質粘土 25%と混合して上層路盤材に使用した場合、荷重強度 55.5N/cm<sup>2</sup> の静的載荷では通常材料断面と同等の沈下量を示した。また大型車両(159kN)による繰返し動的載荷試験でも、路面の沈下動向に通常材料との差異は認められなかった。

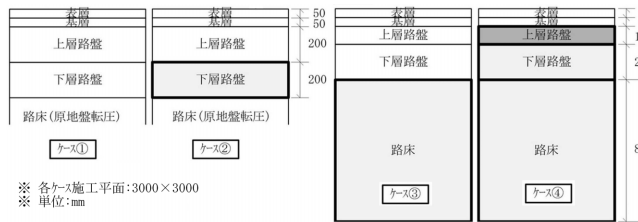


図-15 施工断面図

**表-22 施工ケース**

ケース	ケース① 標準断面 (自然材使用)	ケース② 下層路盤 評価用	ケース③ 路床 評価用	ケース④ 上層路盤 評価用
材料/層厚	B交通路として設計施工 密粒度/スファルト合材/粗粒度/スファルト合材			参考施工
使用材料	上層路盤 粒度調整砕石(80)	下層路盤 切込砕石(20~30)	路床 転圧原地盤(6~8)	リサイクル材※1
設計層厚(mm)	200	200	50/50	100
			800※2	

※1:砂質粘土25%と混合、※2:施工性確認用の層厚、キョウ内は修正CBR値

**表-23 平板載荷試験**

ケース	未舗装 (上層路盤施工後)		舗装後(たわみ性舗装)	
	K <sub>30</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	K <sub>30</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	路面沈下量 <sup>※1</sup> (44.1kN載荷時) (mm)	
ケース①	166.6	204.8	2.71	
ケース②	189.1	221.5	2.51	
ケース③	204.8	275.4	2.02	
ケース④	103.9 <sup>※2</sup>	197.0	2.82	

※1荷重強度55.5N/cm<sup>2</sup>(φ30cm載荷)  
※2上層路盤のみ砂質粘土25%混合

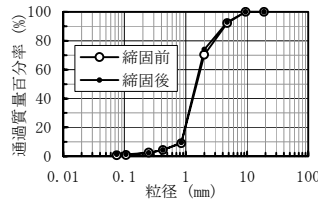


図-16 転圧前後の粒度分布

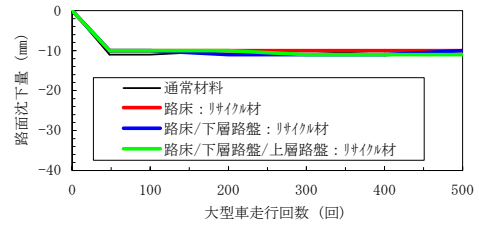


図-17 大型車両による繰返動的載荷試験



写真-8 施工状況

## 6. まとめ

本実証試験の結果をまとめると、以下の通りである。

- ①100 日間の実証運転により、本システムの運転特性を把握し、運転安定性・安全性・リサイクル材品質を実証した。
- ②造粒時のつなぎ材として建設発生土が有効利用できることを実証し、飛灰適用性についても確認した。
- ③建設工事及び試験施工で実際にリサイクル材を使用し、その資材有用性を確認した。

本試験を通じて本システムの実用化に向けた最終検討を行い、焼却灰再資源化技術としての有用性を確認した。

実運用施設の処理能力は数トン～50t/日規模を想定しており、概算ランニングコストは受入焼却灰トン当たり、例えば 50t/日で 20,000 円程度、20t/日で 25,000 円程度と試算され、従来の再資源化技術からのコストダウンが期待できる。

今後は更なるコストダウン策を検討するとともに、実運用を通じてシステム性能の向上を図り、循環型社会の形成に少しでも貢献できればと考えている。

## 参考文献

- 1)(財)廃棄物研究財団;スラッグの有効利用マニュアル、1999
- 2)軟弱地盤対策工法編集委員会;軟弱地盤対策工法、1990
- 3)藤原俊一郎、安西徹郎、加藤哲郎;土壌診断の方法と活用、1996

## 謝辞

本研究開発の実施においてご指導頂いた開発支援専門委員各位、ご協力頂いた自治体関係者各位、並びに(株)アクトリー殿に深く感謝の意を表します。