

灰溶融スラグの特性と利用

The Property and Recycling of Ash-melted Slag

明石 哲夫	環境開発部 開発推進グループ 統括スタッフ
勝呂 洋次	環境技術部 燃焼機器設計室 主査
平岡 英伸	環境技術部 燃焼機器設計室 統括スタッフ
藪田 和哉	基盤技術研究所 無機工学チーム 主査
中原 啓介	エンジニアリング研究所 水システム研究部 部長
山本 浩	エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員

Tetsuo Akashi
Yoji Suguro
Hidenobu Hiraoka
Kazuya Yabuta
Keisuke Nakahara
Hiroshi Yamamoto

ごみ焼却残渣の溶融固化処理は、生成物であるスラグ、メタル、溶融飛灰の利材化、資源化により、最終処分を解消できる資源循環システムとして期待される。NKK 電気抵抗式灰溶融炉は、独自の溶融方法により、鉛など有害金属の少ない安全で均質なスラグを生成できる。この良質なスラグは細骨材、粗骨材、路盤材などの土木建設資材として広く利用される。本稿では、スラグの多彩な加工技術、利用技術を紹介する。

It is expected that vitrification of the residues from a municipal solid waste incinerator would be resource recovery method in which products of slag, metal, dust could be used as resources or changed into another useful products, resulting in no need of landfilling. Safe and uniform slag containing low concentration of heavy metals is produced from NKK electric-resistance ash melting furnace with an original melting method. The good quality slag is widely utilized for construction use such as crushed stone drain material, concrete aggregate and roadbed materials. In this paper, various processing and utilizing technologies for the slag from this melting furnace will be described.

1. はじめに

ごみ焼却残渣の溶融固化処理は、最終処分を解消できる処理方法として普及しつつある。当社は、長年にわたる溶融固化処理技術の開発により、無害化、資源化に優れたNKK 電気抵抗式灰溶融プロセスを商品化した¹⁾。

当社は、処理能力 24 t/d の実証プラントによる溶融試験を重ね、プラントの操業安定性ととも、スラグの高い安全性と利材性を獲得した。NKK 電気抵抗式灰溶融プラントは、八王子市（1998 年竣工、処理能力：18 t/d×2 基）、横浜市（2001 年竣工、処理能力 60 t/d×1 基）において順調に稼働を続け、長期の操業安定性を実証している^{2),3)}。これらのプラントの生成スラグは、土木資材として利用されている。

低価格で重量物である土木資材は、地域により需要品種が限定される。このため、スラグが円滑に利用されるには、地域特性に応じたスラグ製品を供給する必要がある。溶融スラグの冷却固化における空冷方式では塊状スラグ、水砕方式では砂状スラグが生成される。灰溶融炉の多くは水砕方式が採用されるが、NKK 電気抵抗式灰溶融炉は、炉内に溶融スラグを滞留するため、スラグの用途に合わせて、空冷方式、水砕方式を選択できる。

さらに、スラグの加工コストの低減、利材性の向上のため

め、均一粒度の細骨材を容易に製造できる間接冷却方式を新たに開発した⁴⁾。また、スラグを砕石相当の色調、強度にするため、スラグ組成や冷却速度の制御によるスラグの結晶化技術も開発している。

土木資材としての利用のほか、インターロッキングブロック、コンクリート製空洞ブロック、タイル、ロックウールなどへの利用についても実用試験により有用性を実証している。

本稿では、NKK 電気抵抗式灰溶融炉の生成スラグの特徴を示すととも、土木資材利用、スラグの間接冷却方法、結晶化スラグの製造方法を示し、スラグの各種用途への利用展開を述べる。

2. NKK 電気抵抗式灰溶融炉

NKK 電気抵抗式灰溶融炉は、溶融状態のスラグに電流を流し、発生する抵抗熱で溶融スラグ上に浮遊する供給灰を溶融させる方式である（図 1）。

NKK 電気抵抗式灰溶融炉は、溶融スラグ層を覆う供給灰層、深い溶融スラグ層、溶融スラグ層に直結したスラグ排出口、還元雰囲気炉内など独自の炉構造を有する。スラグに関わる特徴を次に示す。

(1) 安全性の高いスラグ

独自の還元溶融の原理により、焼却残渣に含まれる亜鉛、

鉛、カドミウムなどの重金属は溶融スラグから分離され、溶融飛灰として回収される⁵⁾。このため、スラグに含まれる重金属濃度は低く、有害金属に関わる安全性は極めて高い。

(2) 組成の自由度が高いスラグ

溶融スラグは溶融スラグ層下部に設けた専用口からヘッド圧を利用して排出され、高粘性が許容できるため、副資材の添加による溶融スラグの粘性低減を必要としない。

また、溶融スラグを炉内に滞留させるため、スラグの成分、組成の制御が容易であり、用途に合わせたスラグを製造することもできる。

(3) 高品質なスラグ

炉内における比重分離と専用口排出により、スラグに焼却残渣、メタルが混入することはなく、均質で高品質なスラグを製造することができる。

(4) スラグの高い利材性

溶融スラグの冷却法として空冷方式、水砕方式を採用でき、スラグの用途に合わせて冷却方式を選択することにより、地域需要に合わせたスラグ製品を製造できる。

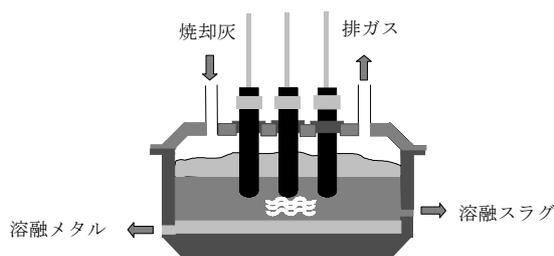


図1 NKK電気抵抗式灰溶融炉

3. スラグの安全性

スラグの安全性は、有害金属の含有濃度と溶出量から評価される。

3.1 スラグの重金属濃度

NKK電気抵抗式灰溶融炉の溶融スラグ層は強還元状態にあり、重金属は還元されて金属として揮発あるいは溶融メタルに移行する。溶融過程における重金属の移行挙動を表1に示す。カドミウム、亜鉛、鉛は溶融飛灰に移行し、銅、鉄などはメタルに移行する。このため、スラグが含む重金属濃度は、表2に示す分析例のように低い。

3.2 スラグの重金属の溶出

八王子市戸吹清掃工場、ならびに横浜市金沢清掃工場で生成したスラグについて、「一般廃棄物の溶出固化物の再生利用に関する指針」に基づく溶出試験の結果、スラグの安全性は定期的に土壤環境基準に適合していることが確認された。

スラグの安全性をさらに評価するため、スラグを振動ミルで0.1 mm以下に粉碎し、微粉スラグの溶出試験を実施した³⁾。

表1 金属元素の物質収支

単位：%			
元素	溶融飛灰	メタル	スラグ
Cd	100	0.0	0.0
Zn	90.4	5.6	4.0
Pb	90.3	9.6	0.1
Cu	0.19	98.8	1.0
Fe	0.13	93.2	6.7

表2 スラグの化学組成

元素	単位	スラグ
Cd	mg/kg	<0.5
Zn	mg/kg	175
Pb	mg/kg	<10
Cu	mg/kg	120
Fe	mg/kg	12900

土壤環境基準の判定方法（環告46号）に準拠した溶出試験の結果を表3に示す。鉛以外の有害金属の溶出は検出されず、鉛の溶出濃度も土壤環境基準である0.01 mg/lを大きく下回る0.001 mg/lであった。このように、スラグを利用する際にスラグが微粉化しても、有害金属の溶出はほとんどなく、スラグ製品の高い安全性が確認された。

表3 スラグの溶出試験結果（粒径0.1mm以下）

元素	単位	溶出濃度	土壤環境基準
Hg	mg/l	<0.0005	0.0005
Pb	mg/l	0.001	0.01
Cd	mg/l	<0.005	0.01
Cr ⁶⁺	mg/l	<0.04	0.05
As	mg/l	<0.005	0.01
Se	mg/l	<0.005	0.01

4. 空冷スラグの土木資材への利用

4.1 空冷スラグの力学的性状試験

八王子戸吹清掃工場から生成する空冷スラグについて、破碎・粒度調整しない状態での土木資材としての力学的性質を、表4にまとめて示す。空冷スラグの粒子強度は、点荷試験から推定される一軸強度は、55~60MPaであり、中硬岩の20~80MPaと同程度であった。すり減り減量は、38%程度であり、アスファルト舗装要綱のクラッシュラン製鋼スラグ規格に適合し、上層路盤材としての規格を満足する。損失量は、11.4%であり、アスファルト舗装要綱の表層・基層および上層路盤材に求められる碎石の耐久性の品質基準を、コンクリート標準示方書の粗骨材として耐凍害性から求められる損失量の品質基準を満足する値となった。破碎率は、3.1%と低く、盛土後の圧縮沈下に特別な留意を必要としない材料である。

表 4 破碎・粒度調整をしない空冷スラグの力学的性状試験結果

区分	試験名	特性値	単位	スラグ A	スラグ B	品質基準
粒子強度	点載荷試験	一軸圧縮強度	MPa	60	55	< 50 (上層路盤) < 30 (表層・基層) < 50 (クラッシュラン製鋼スラグ) < 30 (単粒度製鋼スラグ)
	すり減り摩擦試験	すり減り減量	%	37.6	38.6	< 12% (コンクリート用粗骨材) < 12% (表層・基層用砕石) < 20 (上層路盤用砕石)
	安定性試験	損失量	%	11.4	—	
	破碎試験	破碎率	%	3.1	—	
力学的性状	締固め試験	最大乾燥密度	g/cm ³	1.882	1.931	
	修正 CBR 試験	修正 CBR 値	%	57.0	45.0	> 80 (上層路盤材) > 30 (下層路盤材) > 10 (上部路床材) > 5 (下部路床材)
	三軸圧縮試験	水浸膨張比	%	0.0	0.0	< 1.5% (鉄鋼スラグ路盤材)
		粘着力	MPa	0.05	0.06	
		せん断抵抗角	度	36.2	36.3	
	透水試験	透水係数	cm/s	9.4×10 ⁻¹	—	

締固め試験の結果、最大乾燥密度は、1.88～1.93 g/cm³であり、修正 CBR は、57%と 45%であった。日本道路協会舗装試験法便覧の修正 CBR 概略値から、「砂利・切り込み砂利」（修正 CBR 値 20～60%）に相当する。今回の試験では、破碎・粒度調整処理を実施しない結果であるが、適切な粒度調整と角をとる破碎処理を併用することで、修正 CBR の値は、90～110%まで、向上させることができる。三軸試験による内部摩擦角（せん断抵抗角）は、36 度程度であった。これは、スラグ粒子がガラス質で粒子表面のすべり抵抗が少ないこと、角張った粒子がせん断時に応力集中によって破壊されるためと考えられる。また、透水係数は、10⁰ cm/s オーダーであり、透水性が高く、清浄な礫と同等である。

4.2 空冷スラグの道路用路盤材長期試験

当社 R&D センターの処理能力 24 t/d の溶融炉で製造した空冷スラグを、破碎・粒度調整、丸み付け処理を行い、C-40 の規格スラグを作製した。

上層路盤用には、通常の再生路盤材 RM-40 に、下層路盤用には、RC-40 に空冷スラグ C-40 をそれぞれ 50% 配合した。さらに、C-40 スラグを篩分けし、5～13 mm の単粒度スラグを作製し、このスラグを 15% 配合した再生密粒度アスファルトコンクリートを製造した。

上層路盤用、下層路盤用材料の室内試験結果を表 5 に示す。スラグを配合することによって最適含水比は低くなり、最大乾燥密度は高い値となった。修正 CBR は、スラグを配合することで増加し、塑性指数はすべて NP となり、規格を満足した。

スラグを配合したアスファルト混合物の最適アスファルト量は、通常の配合より僅かに少なくなるが、マーシャル安定度は十分に基準を満たした。

表 5 路盤材の修正 CBR 試験

項目	上層路盤			規格値
	再生路盤材 RM-40	スラグ 50% RM-40		
最適水分比(%)	11.0	7.1		—
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.982	2.193		—
CBR 値 (%)	17 回	45	73	—
	42 回	102	127	—
	92 回	157	224	—
修正 CBR 値(%)	95	108		80 以上
塑性指数(%)	NP	NP		4 以下
項目	下層路盤			規格値
	再生路盤材 RC-40	スラグ 50% RC-40		
最適水分比(%)	10.5	5.6		—
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.967	2.163		—
CBR 値 (%)	17 回	27	45	—
	42 回	75	99	—
	92 回	136	170	—
修正 CBR 値(%)	66	84		30 以上
塑性指数(%)	NP	NP		6 以下

*NP は、計測不能で規格値を満足することを示す。

試験施工は、公道において 1995 年 12 月（以下、工区 I と略記する）と 1996 年 12 月（以下、工区 II と略記する）で、前述した空冷スラグを配合した試験舗装を実施した。

工区 I は、L 交通量の公道で、片側 2.5 m、延長 40 m の総面積 100 m² を 4 分割し、3 区画（B, C, D 区画）については、上層路盤、下層路盤、表層アスファルトコンクリートの内 1 材料にスラグを配合した材料を試験施工した。他の 1 区画（A 区画）は通常の再生材料で施工した（図 2）。

工区 II は、B 交通量の公道で、幅員 4.0 m、延長 120 m の総面積 480 m² の内 90 m（B 区画）について上層路盤と下層路盤に空冷スラグを配合した材料を試験施工した。他の 1 区画（A 区画）は通常の再生材料で施工した（図 3）。



図2 工区 I における試験施工要領

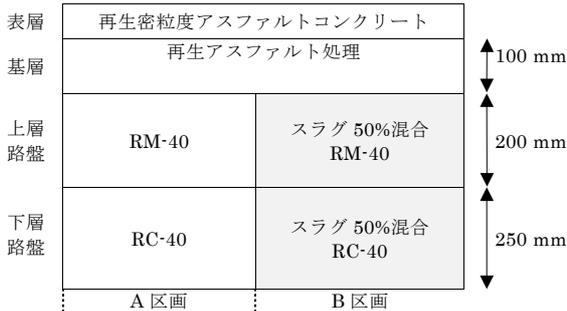


図3 工区 II における試験施工要領

試験施工後の3年間の追跡調査を実施した。工区 I における路面の横断形状測定値の推移を表6に示す。通常の材料を用いたA区画と、スラグを配合したB, C, D区画で差は認められなかった。施工直後からの変化量は1~3 mm程度で小さく、道路維持補修要綱の維持修理要否判定目標値の30~40 mmを大きく下回る結果となった。

すべり抵抗値は、施工直後にBPN値で68~72であるが、徐々に低下し、15ヶ月後以降では、約60の値となった。通常の再生密粒アスファルトコンクリートと、空冷スラグを15%配合した施工区画で差が認められなかった。

表6 路面の横断形状測定値の推移 (工区 I)

混合物の種類 上段/表層 中段/上層 下段/下層	測定位置	測定値 (mm)				施工直後から 37ヶ月までの 変化量 (mm)	
		施工直後	3ヶ月後	15ヶ月後	37ヶ月後		
再生密粒 RM-40 RC-40	A区画	1	1.5	1.5	1.5	1.0	-0.5
		2	4.0	4.0	5.0	4.5	0.5
		3	4.0	4.0	7.0	7.0	3.0
再生密粒 スラグ 50%混合 RM-40 RC-40	B区画	1	4.5	4.5	5.5	5.5	1.0
		2	6.0	6.0	7.0	6.5	0.5
		3	4.0	4.0	4.0	5.0	1.0
再生密粒 RM-40 スラグ 50%混合 RC-40	C区画	1	6.0	6.0	7.5	7.0	1.0
		2	2.5	3.0	4.0	3.0	0.5
		3	6.0	6.0	8.0	9.0	3.0
スラグ入再生密粒 RM-40 RC-40	D区画	1	5.0	5.5	6.0	6.0	1.0
		2	1.5	1.0	3.0	2.5	1.0
		3	4.0	4.0	6.5	5.0	1.0

37ヶ月経過後、全区画においてひび割れの発生はなく、微少クラックも発生していなかった。

工区 II についても、38ヶ月後までの追跡調査を行い、横断形状やすべり抵抗、ひび割れの状況など、工区 I と同様の結果が得られた。

以上のように、空冷スラグ路盤材は、通常材料と遜色ない利用が可能であることが確認できた。

4. 熔融スラグの間接冷却技術

4.1 双ロール式スラグ間接冷却

都市ごみ焼却灰熔融スラグを細骨材として再利用する場合には、空冷スラグを粉砕しても材質的には利用可能ではあるが、粉砕に要するコストが多くなり、望ましい方法ではない。一般に細骨材は、熔融スラグを噴射水で急冷固化させる方法で作製され、得られる砂状スラグは水砕スラグと呼ばれている。この方法では、噴射水の処理、水砕スラグに混入する針状スラグの処理が必要であり、プラントの設置スペースが多くなっている。

当社では、新しいスラグ冷却方法として、双ロール式間接冷却技術を開発した。この方法は、冷却媒体で間接冷却した金属ロールに熔融スラグを接触・凝固させる技術であり、ロールを介して熔融スラグの顕熱を冷却熱媒体に吸収できる。さらに、スラグと水が直接接触することがないために水処理・排水設備も不要であり、大幅に設置スペースを減じることができる。

写真1には、当社R&Dセンターの処理能力24 t/dの熔融炉のスラグ排出口に設置した双ロールの外観を示す。炉で熔融したスラグを、耐熱樋で双ロールに導き、1350℃程度の温度で金属製ロールに注入した。ドラムに巻き上げられたスラグは板状となり、半凝固の900℃でロールから剥離し、さらに空冷することで間接冷却スラグを得た。

スラグは、ロールから剥離した状態では、厚さ3~5 mm程度の板状であるが、冷却による収縮割れで分割され、10~50 mm程度、厚さ3~5 mmのフレック状となった。



写真1 双ロール冷却試験

4.2 間接冷却によるスラグの顕熱回収

双ロール冷却によるスラグ顕熱の回収率を、伝熱理論解析により評価した。スラグ顕熱回収には、双ロールの冷却媒体による熱回収と剥離した 600℃程度の板状スラグからの熱回収に大別される。

詳しい計算諸元などは割愛するが、双ロールによって、1350℃の供給スラグが、厚さ 4 mm のスラグとして 900℃で剥離するまでを計算機を用いてシミュレーションした。この結果、双ロールの回転数によって熱回収比率が異なるが、10 rpm で 13%、5 rpm で 20%程度の熱回収が可能であることが算出された。

一方、剥離した 600℃程度の板状スラグからの熱回収は、小さな熱交換器を想定し、向流式移動層炉を仮定した。受入灰の予備乾燥や、二次燃焼空気として溶融プラント内で利用可能である 450℃の熱風を得ることとして熱回収の試算を実施した。この結果、両者の熱回収率を総計すると、約 4 割のスラグ顕熱を回収することが可能であることがわかった。

4.3 細骨材としての緒特性

(1) 細骨材作製するための加工電力の比較

ごみ焼却灰溶融スラグを細骨材として利用することを念頭に、空冷スラグ、間接冷却スラグ、水砕スラグの 3 種を用いて、JIS A 5005「コンクリート用砕石および砕砂」に記載されている粒度に粉碎し、加工に必要なエネルギーを比較検討した。

水砕スラグと間接冷却スラグでは、インペラブレードによる 1 段の粉碎で所定粒度まで粉碎が可能であるが、空冷スラグから細骨材を製造する場合には、粗粉碎機としてジョークラッシャが必要となる。表 7 には、既存の粉碎機を用いて、各種スラグを粉碎したときの電力と試験に用いた粉碎機による粉碎能力を示した。

水砕、間接冷却ともに、粉碎機の負荷を示す電力量はほとんど変わらないが、初期粒度が大きい間接冷却スラグでは、再粉碎するリターンが多い分だけ破砕能力が小さい傾向となった。これを、スラグトン当たりの加工電力量に換算すると、水砕に対して、15%程度大きい。また、間接冷却では、ジョークラッシャを省略できるため、空冷スラグから細骨材を製造するのに比べて、約 7 割の加工電力を削減する効果がある。

表 7 スラグ種類と破砕電力・破砕能力例

スラグ種	破砕電力 (kW)	破砕能力 (t/h)
水砕スラグ	11.3	27.6
間接冷却スラグ	11.3	23.9
空冷スラグ	13.0	18.4

(2) 細骨材の基本特性

前述した 3 種類の冷却方法の異なるスラグから作製した、JIS 砕砂の基礎特性調査を実施した結果を表 8 に示す。どの冷却方法であってもガラス質であるため、冷却方法によらず、吸水率は 1%以下と小さい値となる。また、単位容積質量、実績率は、水砕スラグが小さく、間接冷却、空冷スラグが大きい値を示した。これは、水砕スラグの粒径が均一であるために生じたものと考えられる。

表 8 灰溶融スラグ細骨材の基礎特性

項目	単位	水砕	間接冷却	空冷
表乾密度	g/cm ³	2.85	2.89	2.88
絶乾密度	g/cm ³	2.84	2.89	2.87
吸水率	%	0.17	0.17	0.32
単位容積質量	kg/l	1.80	1.86	1.88
実績率	—	63.4	64.6	65.3

(3) モルタル骨材試験

土木学会基準「スラグ微粉末を用いたセメントの物理試験法」を準用し、ミニスランプコーンによるスランプ値を用いて性能評価を行った。スラグ細骨材/セメント比を 2.5 (質量比) とし、ミニコーンによるスランプ値の判定条件は、9±0.5 cm を満足する水セメント比を試験により求めた。比較試料として、天然の山砂を合わせて評価した結果を表 9 に示す。

各スラグ間に差はほとんどなく、同等の流動性を示したが、天然砂と比べると水セメント比が大きな値となった。これは、スラグ細骨材が角張った形状であるため、流動性が低下しているためである。したがって、天然砂と同一の水セメント比でモルタルを得るためには、減水剤などを添加する必要がある。

表 8 で示したモルタルフロー試験で求めた水セメント比で配合したモルタルに対し、JIS A 1123 に準拠した方法でブリーディング試験を行った。この結果を、表 10 に示す。

表 9 灰溶融スラグ細骨材のモルタルフロー試験結果

項目	単位	水砕	間接冷却	空冷	天然砂
水セメント比	%	53.7	54.3	53.5	47.6
スランプ値	cm	9.3	8.7	8.8	9.1

表 10 灰溶融スラグ細骨材のブリーディング試験結果

項目	単位	水砕	間接冷却	空冷	天然砂
ブリーディング量	cm ² /cm ²	1.033	0.694	0.551	0.237
ブリーディング量	%	14.1	9.1	7.4	3.4

今回の試験では、細骨材として灰溶融スラグを 100% 使用しており、大きなブリーディング量を示すことから、実際にモルタルとして使用する場合には、増粘剤の併用や天然砂との混合利用する必要がある。一方、水砕スラグと間接冷却スラグを比較すると、間接冷却スラグの方がブリーディングが小さく、利用する上で有利である。

5. スラグの改質技術

5.1 スラグの結晶化

前述した灰溶融スラグのフロー特性、ブリーディング特性が、天然砕石と比較して劣る最大の理由は、スラグがガラス質であるためと言われており、スラグを結晶化させることが有効であることが以前より知られている。スラグ組成制御や冷却方法を工夫することでスラグを結晶化することが試みられている。

そこで、組成と冷却速度をパラメータとして広範なスラグを作製し、結晶化領域を明らかにするとともに、熱力学解析ソフト Chem-Sage を用いて、結晶化領域の理論的な裏付けを行った⁶⁾。

5.2 組成の異なるスラグの作製方法

全連続焼却式ストーカ炉の焼却灰を R&D センターにある実証炉で溶融してスラグを作製した。このスラグを 1 mm 以下に粉碎し、CaO/SiO₂ が 0.50 から 1.05 まで、Al₂O₃/SiO₂ が 0.33 から 0.65 となるように、特級試薬の CaO, Al₂O₃ を添加し、カーボンるつぼに入れ、窒素雰囲気下で 1500℃まで 10℃/min で昇温し、1 時間保持後、500℃まで所定の冷却速度で制御冷却し、500℃以下では炉冷とした。

得られたスラグをるつぼから取り出し、ハンマーで打撃することで破面を形成し、目視で結晶化度を 4 段階評価した。4 段階評価で最も結晶化している破面(3)は、天然砕石と区別できない試料であり、逆に、最下位の破面(0)は、ガラスを割ったときに生じる破面である。

図 4 には組成と冷却速度を制御して作成したスラグの破断面観察結果を示した。冷却速度が低い方では結晶化領域が広がっていることがわかる。

10℃/min の冷却速度で得られたスラグでは、Al₂O₃ の量に関係なく塩基度 0.75 以上で結晶化が進行するが、0.70 以下ではほとんどガラス状態となる。冷却速度が低くなるに従って、塩基度 0.5 で Al₂O₃/SiO₂ が高い方から徐々に結晶化してくることがわかる。また、3℃/min で冷却したスラグの Al₂O₃/SiO₂ が 0.65 の試料では、塩基度が 0.5 程度でも結晶化するが、塩基度 0.6, 0.65 ではガラス状態であり、塩基度 0.7 を超えると再び結晶化する挙動が認められる。

一方、塩基度 0.5~0.55, Al₂O₃/SiO₂ が 0.33~0.40 の試料では、0.5℃/min の冷却速度であっても結晶化しないことがわかった。X 線回折の結果より、図 4 に示した結晶化領域が 2 つの領域に区分されることがわかった。すなわち、

冷却速度：0.5℃/min

Al ₂ O ₃ /SiO ₂ \ CaO/SiO ₂	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05
0.333	0	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0.350	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0.400	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3
0.450	1	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3
0.500	2	2	2	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0.550	3	2	2	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0.600	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

冷却速度：3℃/min

Al ₂ O ₃ /SiO ₂ \ CaO/SiO ₂	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05
0.333	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
0.350	0	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0.400	0	0	0	0	1	1	2	3	3	3	3	3
0.450	0	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3
0.500	0	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3
0.550	1	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3
0.600	2	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3
0.650	2	1	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3

冷却速度：10℃/min

Al ₂ O ₃ /SiO ₂ \ CaO/SiO ₂	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05
0.333	0	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3	3
0.350	0	0	0	0	1	1	2	2	2	3	3	3
0.400	0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3
0.450	0	0	0	0	0	2	3	3	3	3	3	3
0.500	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3
0.550	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3
0.600	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3
0.650	1	0	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3

図 4 スラグの破断面観察結果

塩基度 0.75 以上の領域では、メリライト相（ゲーレンナイトの固溶体）が析出する領域であり、冷却速度 3℃/min 以下で認められる低塩基度、高アルミナ領域での結晶化は、アノーサイト固溶体の結晶化領域となる。したがって、メリライト相の析出領域では、結晶化速度が高いために冷却速度によって結晶化領域に差がほとんどなく、アノーサイト相は結晶化速度が低いために冷却速度依存性があると考えられる。

5.3 スラグ組成と結晶化挙動

図 4 の結晶化領域は、SiO₂-CaO-Al₂O₃ の状態図では説明することができない。そこで、熱力学解析ソフト Chem-Sage を用いて解析することを試みた。

Chem-Sage では、SiO₂-CaO-Al₂O₃-Na₂O で構成される液相のモデルとして GAYE のモデルを適用し、各スラグ組成から初晶として析出する結晶相の種類、温度を計算により求めた。Na₂O/SiO₂ を 0.077 とし、CaO/SiO₂ が 0.50 から 1.05 まで、Al₂O₃/SiO₂ が 0.33 から 0.65 の領域について計算を行い、その結果を図 5 に示した。アノーサイトの初晶温度曲線が、図 4 で示した冷却速度を変更して作製した結晶化領域の分布図と非常に良い一致をみた。

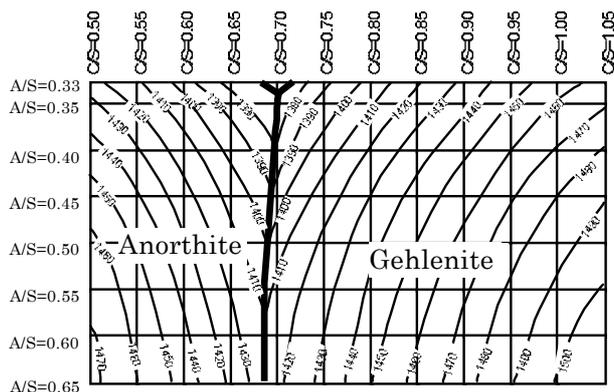


図 5 各スラグ組成から初晶として析出する結晶相の種類・温度

5.4 スラグの結晶化と土木材料としての性質

R&D センターにある実証炉を用いて、焼却灰に石灰を添加して、図 4 示した結晶化領域に組成制御し、空冷にて結晶化スラグを作製した。この結晶化スラグの M-40 の粒径に粉砕し、吸水率、すり減り減量、修正 CBR 試験を実施した。比較のために、ガラス状スラグの結果を合わせて表 11 に示す。

スラグの結晶化により、すり減り減量、修正 CBR 値が大幅に改善できることがわかった。

表 11 結晶化スラグ、ガラス状スラグの吸水率、すり減り減量、修正 CBR 試験結果

項目	単位	ガラス状スラグ	結晶化スラグ
単位容積質量	kg/l	2.14	2.28
実績率	%	80.2	80.8
吸水率	%	0.10	1.34
すり減り減量	%	37.4	24.5
安定性	%	0.2	0.4
修正 CBR	%	102	169

6. おわりに

本稿では、灰溶融スラグの土木用途への利用に限って説明し、土木材料としての基礎特性、路盤材としての舗装試験結果、新しい冷却方法による細骨材、結晶化によるスラグ改質について説明した。

当社では、スラグの窯業原料分野へ利用についても、インターロッキングブロックや空洞ブロックへの利用⁷⁾、ロックウール原料化⁸⁾、軽量骨材化⁹⁾などを検討し、積極的に社外発表している。本稿では、紙面の都合で割愛する。

なお、4.項の研究は、経済産業省からの地球環境保全関係産業技術開発促進費補助金を受け、(財)国際環境技術移転研究センター(ICETT)との共同研究の一環として1999年度から2000年度に実施したものです。

参考文献

- 1) 藤澤能成ほか. “ごみ焼却残渣の電気抵抗式灰溶融プロセス”. NKK 技報. No.159, pp.26-30(1997).
- 2) 富岡淳ほか. “横浜市環境事業局金沢工場における電気抵抗式灰溶融炉稼動状況”. 第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II. 2001. pp.835-837.
- 3) 松井征男ほか. “空冷スラグの土木資材としての基礎特性”. 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 I 2000. pp.523-525.
- 4) 明石哲夫ほか. “溶融スラグの間接冷却技術”. 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II 2000. pp.855-857.
- 5) 中原啓介ほか. “ごみ焼却残渣の溶融処理と重金属資源の循環”. NKK 技報. No.170, pp.8-14(2000).
- 6) 藪田和哉ほか. “都市ごみ焼却灰溶融スラグの結晶化条件”. 第 21 回全国都市清掃研究発表会講演論文集 2000. pp.148-150.
- 7) 明石哲夫ほか. “都市ごみ焼却灰溶融スラグの有効利用技術”. 第 21 回全国都市清掃研究発表会講演論文集 2000. pp.151-153.
- 8) 藪田和哉ほか. “都市ごみ焼却灰溶融スラグを用いたロックウール”. 第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 I 2001. pp.543-545.
- 9) 藪田和哉ほか. “都市ごみ焼却灰溶融スラグから作製した中空粒子”. 日本鉄鋼協会講演論文集. 材料とプロセス第 141 回春季講演大会. Vol.14, No.1, 2001. p.137.

<問い合わせ先>

環境開発部 開発推進グループ

Tel. 045 (505) 7531 明石 哲夫

E-mail address : akashit@eng.tsurumi.nkk.co.jp