

都市ゴミ焼却灰を焼成した骨材の有効利用

住友金属鉱山株式会社

I 背景

我が国では減容化と衛生上の観点から、可燃性廃棄物に関しては積極的な焼却処理が行なわれている。また近年、単なる減容化ではなく、ごみをエネルギー源として捉えたサーマルリサイクルや焼却残渣中の金属類のリサイクルが検討・実用化されている。しかしながら焼却や溶融といった高温処理を行なった場合、問題となるのが飛灰の適切な処理である。

廃棄物中には鉛やカドミウム等の有害金属が混入しており、高温処理を行なった場合、これらは揮散して飛灰とともに集塵される。また焼却により発生したダイオキシン類は、その80%は飛灰中に取り込まれると言われており、埋め立て後の重金属やダイオキシンによる環境汚染が懸念されている。加えて廃棄物は単に無害化問題に留まらない。昨今の最終処分場の確保難から、減容化のみならず、有効利用が求められている。

このような背景の下、当社は焼却飛灰等重金属含有ダストを無害化するとともに有効利用を図る、将来の循環型社会における新しい飛灰処理技術として焼成法を開発した。

II 焼成法

1. 技術の概略

焼成法は非鉄製錬技術を応用したもので、焼却飛灰を高温焼成して

- ・ 重金属は揮発除去して溶出を防止
- ・ ダイオキシンは加熱分解して
- ・ 無害化された飛灰そのものは人工骨材等へ
- ・ 重金属は二次飛灰として回収、製錬原料へ

-----飛灰を無害化

-----有効利用

-----金属リサイクル

する、二次廃棄物がほとんど発生しない飛灰処理の総合プロセスで、大きく分けて以下の2つのプロセスで構成される。

(1) 焼成プロセス

重金属揮発分離 飛灰の骨材化 ダイ
オキシンの分解・再生防止

(2) 二次飛灰処理プロセス

二次飛灰中の鉛・亜鉛の回収（製錬原料
化）

処理プロセスを図1に示す。

2. 焼成技術の特徴

- 1 重金属の無害化に関し、長期信頼性が高い。
固定化ではなく、揮発除去により鉛やカドミウムをほとんど除去するため、有害金属の

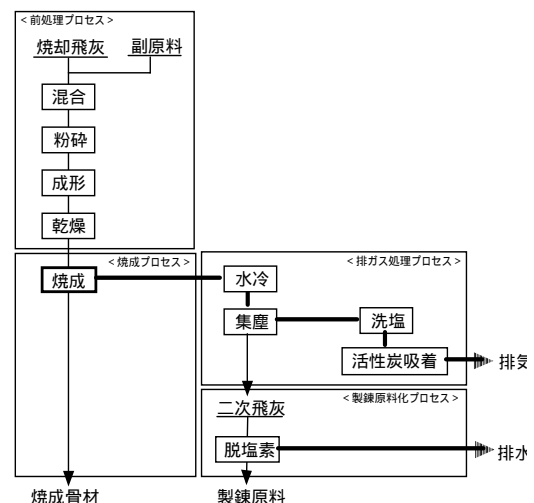


図1 焼成プロセス

[連絡先] 〒105-8716 東京都港区新橋5丁目11番3号

住友金属鉱山株式会社 エネルギー・環境事業部 環境・化学部 坂本雄三

TEL 03-3436-7955 FAX 03-3436-7738 E-mail Yuuzou_Sakamoto@ni.smm.co.jp

溶出に関して長期信頼性が高い。

2) ダイオキシン類が無害化できる

焼成温度が 1100 前後と、ダイオキシン類を分解するのに十分な温度である。

3) 有効利用性が高い

焼成法は用途に応じた焼成骨材（大きさ、形状、比重等）にすることが可能で、有効利用性が高い。

4) 重金属が資源としてリサイクルできる

揮発分離した鉛・亜鉛等は既設の製錬所で地金として再資源化できる。

5) 二次廃棄物がほとんど発生しない

非鉄金属のみならず、非金属の資源化（骨材化）も図るため、埋め立てる物がほとんどない。

3. 技術開発

福岡県の自治体の協力を得て、平成 12 年 4 月～平成 15 年 3 月まで、250 回以上の実証試験を行い（図 2 参照）、以下の通り焼成技術による無害化効果を実証した。

(1) 重金属類に関して土壤の環境基準を満足

1) 重金属溶出（環告 46 号による）

- ・鉛・カドミウムとも 0.01mg/l 以下
- ・クロムは 0.5mg/l 以下
- ・砒素、セレンも 0.01mg/l 以下

2) 重金属残留

- ・鉛は 100ppm 以下
- ・カドミウムは 9ppm 以下。

(2) ダイオキシン類

焼成ペレット中のダイオキシンは 0.001ng-TEQ/g 以下と、環境基準値を満足し、また排ガス中のダイオキシン濃度も 0.1ng-TEQ/Nm³ 以下を満足し、飛灰中のダイオキシン類を 99.5%分解できることが確認できた。

(3) 強度ある焼成骨材が得られる

焼却飛灰に副原料を加え、組成を調整することにより、圧潰強度が 50kg 前後の焼成骨材が安定して得られる（図 3 参照）。



図 2 実証試験設備（処理能力 100kg/h）



図 3 焼成骨材例

Ⅲ 共同研究

本焼成骨材の有効利用に関し、「コンクリート骨材としての用途開発」の共同研究を福岡県リサイクル総合研究センターに提案、平成 13 年 11 月から平成 15 年 3 月まで共同研究（FAD 研究会）を行い、コンクリート骨材としての総合評価を行った。

1. 共同研究の目的

コンクリート骨材としての福岡県での技術認証の取得。

2. 共同研究体制

事務局 -----リ総研
 研究会座長 -----九州大学 松下教授
 安全性評価 -----福岡県保健環境研究所
 コンクリート評価-----福岡大学 椎葉教授、九州芸術工科大学 大久保教授
 ブロック試作 -----㈱野田ブロック工業
 焼成骨材製造 -----住友金属鉱山㈱
 認証取得に関するアドバイス-----（財）福岡県建設技術情報センター

3. 焼成骨材

共同研究には、A市の供試飛灰（ストーカ炉、EP灰、石灰吹き込み無）を用い、処理能力 100kg/h の実証試験炉で 1041～1128 で焼成して得られた焼成骨材を使用した。共同研究に使用した焼成骨材の製造条件及び一軸圧潰強度を表 1 に示す。

表 1 焼成体の製造条件と一軸圧潰強度（単位：kgf）

Lot No	配合割合（%）		原料組成（%：計算値）							焼成温度 （℃）	一軸圧 潰強度
	飛灰	石灰灰	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na	K	Cl		
サンプル1	60.2	23.5	24.9	12.6	6.0	11.5	4.5	4.5	7.8	-	44.3
サンプル2	58.5	30.4	28.3	13.8	6.0	11.6	4.5	4.4	7.6	1,080	57.5
サンプル3	50.9	30.0	26.5	18.1	6.0	10.3	4.0	3.9	6.6	1,079	81.4
サンプル4	50.9	30.0	26.5	18.1	6.0	10.3	4.0	3.9	6.6	1,080	61.2
サンプル5	50.9	30.0	26.5	18.1	6.0	10.3	4.0	3.9	6.6	-	71.8
サンプル6	46.9	25.3	25.9	17.2	9.0	9.9	3.9	3.6	6.1	1,056	65.0
サンプル7	36.0	36.0	26.7	12.0	6.0	24.2	3.1	2.9	4.7	1,160	90.5
サンプル8	43.3	17.3	23.3	13.0	14.6	12.7	3.3	3.2	5.6	1,041	65.6
サンプル9	70.4	18.3	24.1	12.9	5.7	16.7	5.1	5.1	9.2	1,128	64.8
サンプル10	70.4	21.8	26.0	13.6	6.0	14.2	5.2	5.2	9.2	1,108	34.0

4. 安全性評価

焼成骨材の安全性に関して福岡県保健環境研究所で検討した結果、焼成骨材が環境中で有効利用されることを考慮して、環境庁告示 46 号（環告 46 号）による重金属溶出試験及び土壌汚染対策法に基づく重金属の含有量試験に加えて、福岡県では降り始めの雨は pH4 と酸性度が高いことから¹⁾、pH4 の水溶液を循環する還流溶出試験も行うこととした。試験試料は、ごみの性状が季節によって変化する

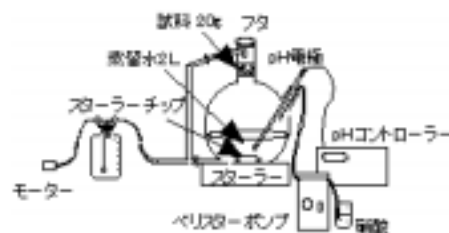


図 4 還流溶出試験装置

ことを考慮して、4 シーズン（春夏秋冬）に採取した飛灰で製造した 4 種の焼成骨材を使用した。同研究所で検討した還流溶出試験装置を図 4 に示す。環告 46 号による溶出試験結果を表 2 に、還流溶出試験結果を表 3 に示す。飛灰の焼成骨材は、測定した全ての項目について、土壌の環境基準を満

足した。溶出試験で pH を 4 に下げると鉛の溶出量が数十倍に増えることが報告されているが²⁾、焼成骨材の場合大きな増加は見られない。その理由としては、焼成骨材中に数十 mg/kg 残留している鉛の形態が金属や酸化物ではなく、溶出しにくい安定した形態になっているためと考えられる。

表 2 環告 46 号による溶出試験結果（単位：mg/l）

	春	夏	秋	冬
Pb	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr()	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
As	<0.0010	<0.0010	0.0011	<0.0007
Se	<0.0003	<0.0003	0.0003	0.0003
T-Hg	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005

表 3 pH4 還流溶出試験結果（単位：mg/l）

サンプル 項目	春	夏	秋	冬	
	前処理無	前処理無	前処理無	前処理無	粉碎
Pb	0.006	0.003	0.007	<0.001	<0.001
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr()	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
As	<0.0003	0.0006	0.0028	<0.0003	0.0001
Se	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
T-Hg	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005

また平成 15 年 2 月に施行された土壌汚染対策法で、汚染の基準値として設けられた重金属類の含有量について、同法に基づく試験方法(1N-HCl による抽出)による評価結果を表 4 に示す。4 試料とも汚染の基準値を大きく下まわり、焼成骨材がこれらの項目について環境中で使用可能であることが示された。

表 4 土壌汚染対策法に基づく含有量試験結果(単位: mg/kg)

	春	夏	秋	冬	土壌汚染の基準
Pb	18.3	2	9.9	7.2	150
Cd	0.03	<0.02	0.02	0.13	150
Cr()	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	250
As	2.7	0.42	0.83	2	150
Se	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	150
T-Hg	<0.0016	<0.0016	<0.0016	<0.0016	15

5. コンクリート試験

焼成骨材はコンクリート骨材としての有効利用を目指していることから、焼成プロセスでは焼成骨材の一軸圧潰強度が 50kgf 以上になるよう、原料組成や焼成条件を管理している。共同研究では様々な条件で焼成した焼成骨材(表 1 参照)を用いてコンクリート骨材としての評価を行ない、焼成条件とコンクリート強度の関係を調査した。

表 5 骨材物性評価結果

	圧潰強度(kgf)	密度(g/cm³)		吸水率(24h%)	単位容積質量(kg/L)	実積率(%)	粗粒率	塩化物量NaCl(%)
		総乾	表乾					
サンプル1	44.3	1.69	2.04	20.3	0.948	56.1	6.40	0.001
サンプル2	57.5	1.56	1.81	13.7	0.905	57.2	6.18	0.001
サンプル3	81.4	1.69	1.97	16.2	1.049	53.2	6.43	0.001
サンプル4	61.2	1.73	1.94	12.8	1.039	60.1	6.59	0.001
サンプル5	71.8	1.72	2.01	17.0	1.008	58.6	6.69	0.001
サンプル6	65.0	1.81	2.13	17.8	1.007	55.6	6.37	0.001
サンプル7	90.5	2.50	2.52	1.0	1.579	63.2	6.08	0.001
サンプル8	65.6	2.04	2.34	14.8	1.151	56.4	6.30	0.001
サンプル9	64.8	1.75	1.89	8.1	1.015	58.0	6.17	0.006
サンプル10	34.0	1.79	2.03	14.4	1.016	56.8	6.22	0.005

骨材物性評価結果を表 5 に示す。また粗骨

材として 100%焼成骨材を用いたコンクリート強度の測定結果を表 6 に示す。コンクリートの調合条件は水セメント比 50%、細骨材率 50%とし、スランプは 8±1cm になるように単位水量を調節した。また比較用として、市販の人工軽量骨材と砕石も使用した。養生条件は、φ10×20cm の試験体を材齢 1 日まで恒温恒湿器(温度 20±1、湿度 90%)内で養生し、脱型後所定材齢まで水中養生(20±1)を行った。

表 6 コンクリート強度測定結果(砕石比: %)

調合条件 Lot No	W/C: 50%, S/a: 50%									
	圧縮強度(N/mm²)					引張強度(N/mm²)		曲げ強度(N/mm²)		
	7日強度	砕石比	28日強度	砕石比	91日強度	砕石比	28日強度	砕石比	28日強度	砕石比
サンプル1	29.2	96	38.2	91	42.3	92	2.4	80	-	-
サンプル2	30.1	99	41.0	98	44.1	95	2.6	87	4.7	82
サンプル3	29.9	98	37.8	90	41.5	90	3.0	100	4.5	79
サンプル4	32.8	108	37.3	89	42.4	92	3.1	103	4.8	84
サンプル5	29.1	96	37.1	89	38.3	83	2.2	73	4.2	74
サンプル6	28.7	94	38.8	93	41.5	90	2.3	77	4.5	79
サンプル7	32.7	108	44.2	105	45.7	99	2.6	87	-	-
サンプル8	30.0	99	41.3	99	49.0	106	3.0	100	4.8	84
サンプル9	34.1	112	45.8	109	48.5	105	2.3	77	5.2	91
サンプル10	28.8	95	36.4	87	42.1	91	3.3	110	4.9	86
砕石	30.4	100	41.9	100	46.2	100	3.0	100	5.7	100
軽量骨材	31.5	104	43.3	103	49.4	107	3.1	103	4.7	82

一般的にコンクリート強度は材齢 28 日の圧縮強度で代表されるが、評価した焼成骨材の圧潰強度が 34kgf から 90kgf まで 3 倍近い差があるのに対し、コンクリートの 28 日圧縮強度は 36.4~45.8N/mm² と、圧潰強度ほどの違いは見られない。引張強度、曲げ強度も同様である。この理由は圧潰強度が局部的に荷重されるのに対し、コンクリートでは「焼成骨材の表面全体が荷重を受ける」ためと考えられる。これまで焼成プロセスでは「より大きな圧潰強度」を目指してきたが(コストアップにつながる)、今回の試験によりコンクリート強度は圧潰強度よりもむしろ吸水率との間の相関が高いことが分かった。このため、焼成コストの低減化にもつながることから、焼成プロセスでの管理基準の見直しを進めている。

なお評価した 10 サンプルの圧縮強度はどれもプレキャストコンクリートの強度規格(18N/mm² 以上)を満足するものであり、焼成骨材は普通コンクリート用骨材として十分に使用できることが確認された。

また「現在の焼成骨材は比較的単粒度のため使いづらいが、有効利用を促進するためには使用者側の使い勝手が重要」との指摘を受け、連続粒度にするための設備仕様の変更を焼成プロセスにフィードバックした。有効利用にも、商品として磨き上げるマーケットインの思想が必要である。

6. 焼成骨材と JIS

焼成骨材は比重が軽いことから、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の規格との比較検討を行った。JIS A 5002の規定と焼成骨材の実測データを表7に示す。

その結果、飛灰の配合割合の低い焼成骨材は、比重が 2.0 以上となり規格を外れるが、配合割合が 50% 以上では JIS に規定されている軽量骨材の規格をすべて満足することが分かった。すなわち、焼成骨材は軽量コンクリート骨材の HB-421 に該当する。

また軽量骨材にはアルカリ骨材反応に関する規定はないが、モルタルバー法による試験の結果、無害であることも確認された。

表7 JIS A 5002 の規格と焼成骨材

項 目	構造用軽量コンクリート骨材 (JIS A 5002)	焼成ベレット (実測値)	備 考
1. 種類・区分			
種類	膨張けつ岩、膨張粘土、焼成フライアッシュなど	飛灰、主灰、石炭灰等	
比重による区分	L: < 1.0, M: < 1.5, H: < 2.0	1.53 ~ 1.84	Hに該当
実積率 (%)	A: > 60%, B: 50 ~ 60%	53.2 ~ 63.2	Bに該当
圧縮強度 (N/mm ²)	4: > 40, 3: > 30, 2: > 20, 1: > 10	42.7 ~ 59.5	4に該当
コンクリートの単位容積質量 (kg/L)	15: < 1.6, 17: < 1.8, 19: < 2.0, 21: > 2.0	> 2.0	21に該当
2. 組成・物性			
強熱減量	< 1%	0.32 ~ 0.76	JIS規格を満足
三酸化硫黄	< 0.5%	0.09 ~ 0.23	JIS規格を満足
塩化物	< 0.01%	0.001 ~ 0.006	JIS規格を満足
有機不純物	標準色液より薄いこと		JIS規格を満足
粘土塊量	< 1%		
細骨材の微粒分量	< 10%		
3. 粒度分布 (15 ~ 5)			JIS規格を満足
< 15mm	90 ~ 100%	100%	
< 10mm	40 ~ 70%	43 ~ 66%	
< 5mm	0 ~ 15%	0 ~ 3%	
< 2.5mm	-	0%	
4. その他			

7. ブロック試作

焼成骨材は、前述したように「比重が 1.8 前後と、砕石の 2.6 に比べて軽い」という性質のほか「多孔質で吸水性を有す」という特徴がある。そこでこれらの特徴を生かしたコンクリート二次製品を試作・評価した。

1) 道路用コンクリートブロック

道路用コンクリートブロックとして「車止め」や「縁石」を試作し、施工業者を調査した結果、「砕石の場合より 10% 強軽量化され、作業能率向上、運搬費の低減等メリットあり」との評価が得られた。

2) 環境保全型護岸ブロック

焼成骨材は保水性を有し、比較的単粒度であることから、表面に焼成骨材のポーラスブロックを貼り付けた護岸ブロックを試作・評価した結果、水際には草が生えることが確認できた。また表面にバクテリアが繁殖しやすく、水質浄化が期待できることも分かった。

国土交通省は今後の河川工事に当たっては、ポーラスコンクリートを中心とした多自然型工事の採用を打ち出しており、大きな需要が期待できることから、今後はポーラスコンクリートに関してさらに検討を進めたい。



車止



縁石



空洞ブロック

以上のように、焼成骨材にはユーザーメリットや他の機能を付加できる事が確認できた。

8. NETIS への登録

国土交通省は新技術の普及促進を目的として、新技術情報提供システム (NETIS) を整備し、登録された技術をインターネットで広く国内に紹介している。そこで共同研究で取得したデータをまとめ、平成 14 年 11 月に焼成骨材を用いたコンクリートブロックの登録を申請し、翌 12 月に承認され、平成 15 年 1 月からインターネットにより「軽量リサイクルブロック」の名称で全国に紹介されている。このような制度では、一般的にデータの客観性が問われるが (特に安全性)、今回の申請には自社のデータに加えて第三者により取得されたデータを用いたことから、速やかに承認が得られたものと思われる。

IV まとめ

今回の福岡県リサイクル総合研究センターとの共同研究により、以下の成果が得られた。

- 1) 焼却飛灰の焼成骨材は、環告 46 号による試験のみならず、pH4 の水溶液での溶出試験でも重金属溶出は土壌の環境基準値を満足した。このことから「焼成骨材の長期安全性は高い」と推定された。
- 2) 土壌汚染対策法に基づく含有量試験でも土壌汚染の基準値を大きく下回った。
- 3) 原料を適切に配合した焼成骨材は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の HB-421 に該当し、またアルカリ骨材反応も無害であった。
- 4) 砕石を 100% 焼成骨材に代替したコンクリートは、軽量化された分、圧縮強度は低下するが、プレキャストコンクリートの強度規格を満足し、軽量骨材として使用できることが分かった。

5. 今後の計画

以上の通り、非鉄製錬技術を適用した、都市ごみ焼却飛灰の焼成プロセスは、ダイオキシン類の分解、重金属の溶出防止といった無害化のみならず、飛灰中の有価金属が回収でき、さらには無害化された飛灰そのものの有効利用が可能な見通しが得られた。本プロセスは飛灰以外の廃棄物にも適用可能で、有価金属のみならず、汚泥等の再資源化も促進でき、最終処分場の延命化等に大きく貢献できるものと考えられる。今後の進め方としては

代替副原料として主灰等、他の廃棄物活用による処理コストの低減化

コンクリートブロックの試験施工等を行ない、用途開発を推進

等に注力する。

参考文献

- 1) 大石興弘、宇都宮彬：九州北部地域における降雨・降雪の成分濃度及び組成と気象との関係、福岡県保健環境研究所年報、56 - 61、1994
- 2) 貴田晶子、酒井伸一：一般廃棄物焼却灰溶融スラグ中の鉛の形態と溶出、第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、474 - 476、1998