

# 焼却施設の解体処理に伴う汚染防止技術の開発

亀田 茂\* 小西正郎\* 白石祐彰\*  
茂木正史\*\* 大河澄男\*\*\* 西田新一\*\*\*\*

## 1. はじめに

ダイオキシン類対策特別措置法が施行され、既設ごみ焼却場の改変及び建て替え工事が多くなることが予想される。解体工事では粉塵や洗浄水などが発生するが、特に既設焼却場の解体にはダイオキシン類を含む汚染物で環境を汚染する懸念がある。また、ダイオキシン類分析が容易にできないことから既設焼却場自体の汚染状況が把握できていないことや汚染物質の処理方法が確立されていないことが、ごみ焼却場解体工事の問題点となっている。そこで、著者らは「解体時に外部に汚染物質を出さない技術」、「作業環境改善技術」、「発生汚染物質の処理技術」、「解体構造物の汚染状況把握技術」に関して技術開発を行ってきた。その一環として粉塵制御、汚染物処理および汚染状況把握に関する基礎実験を実施し、各手法の効果や効率的な処理方法に関して種々の知見が得られたので報告する。

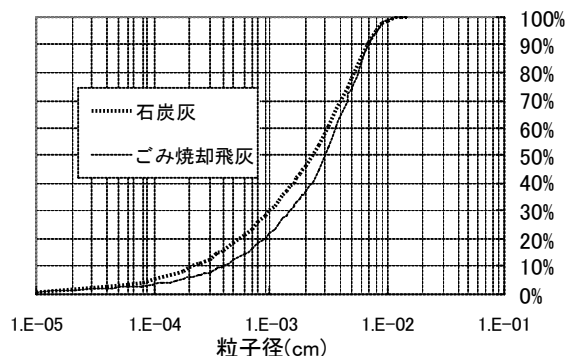


図-1 石炭灰とEP灰の粒度分布

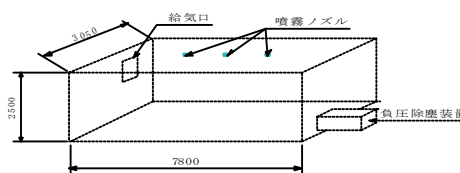


図-2 実験空間模式

## 2. 粉塵制御に関する検討

集積飛灰や付着した汚染物の除去を行う際、多量の粉塵発生懸念がある。そこで浮遊粉塵の発生を抑制するとともに、外部環境への粉塵の飛散を防止する手法を検討した。

粉塵制御試験としては作業区域内に極微粒子水滴（ミスト）を噴霧し、浮遊粉塵濃度の経時的変化を観測した実験と HEPA (High Efficiency Particulate Air) フィルターを装備した負圧除塵装置を稼働させて作業区域内を負圧に保ちながら集塵する効果についての実験を行った。

### 2.1 粉塵制御試験の方法

#### a. 実験設備および装置

粉塵試料には石炭灰 3kg を用いた。これは図-1に示すように試料の粒度分布とごみ焼却飛灰（都内焼却場の電気集塵飛灰）の粒度分布はほとんど同じ分布を示していることによる。但し、石炭灰の方がより小さな粒子が多く、 $10\mu\text{m}$  以下の粒子は 30 重量%含まれている。実験に用いた密閉空間 ( $3050\text{mm} \times 7800\text{mm} \times 2500\text{mm} = 59.5\text{m}^3$ ) を図-2、写真-1に示す。強制的に気流を発生させるために送風機を四隅に配置し、密閉空間上部に霧発生ノズルを

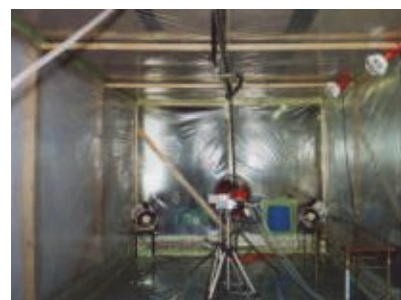


写真-1 実験室内部

ズルを 1.5m ピッチで3個取り付け付けた。空間内粉塵測定はレーザー粉塵計およびハイボリウム・エアサンプラーにて、HEPA フィルターからの排気はパーティクルカウンターにて各粒径の粉塵個数を測定した。

#### b. ミスト噴霧および負圧除塵試験の概要

浮遊粉塵を急速に低減させるには、粉塵粒径を大きくし沈降速度を高めることが重要と考えられることから、粉塵粒子と水粒子を衝突させることで粉塵粒子の粒径を大きくして沈降速度を高める事を試みた。この実験ではその効果を検証するとともに、一度沈降した粉塵の再浮遊防止効果も確認した。なお、粉塵と水粒子の衝突確率

\*土木研究室 \*\*環境研究室 \*\*\*東京支社土木部 \*\*\*\*東京支社機械部

を高めるために水粒子を空間に拡散浮遊させること、使用水量を極力抑えること、作業により発生する静電気を防止する必要があることから煙状の霧（粒径  $10\mu\text{m}$  以下）を噴霧し空間内の粉塵濃度変化を測定した。また、HEPA フィルター付き負圧除塵装置のみを稼働させた場合の粉塵濃度変化および排気粉塵量を測定し、負圧除塵装置の効果についても検証を行った。

給排気口の配置により作業空間内の空気の流れが変化し、集塵効果に差異が現れるものと考えられるため給排気口の位置と集塵効率について解析的検討を行った。

## 2.2 粉塵制御試験の結果

### a. ミストの効果

粉塵を気流にて空間内に拡散させ定常状態になった後、ミストを噴霧したときの粉塵濃度の経時変化を図-3に示す。実験結果より微粒水滴を噴霧することで浮遊粉塵が急激に減少すること、また噴霧時間が短ければ粉塵が再浮遊する可能性があることが確認された。また、ミストにより沈降した粉塵を真空掃除機にて除去したときの浮遊粉塵量を測定したが、浮遊粉塵量はほとんど増加せず、粉塵の再浮遊の懸念もなかった。

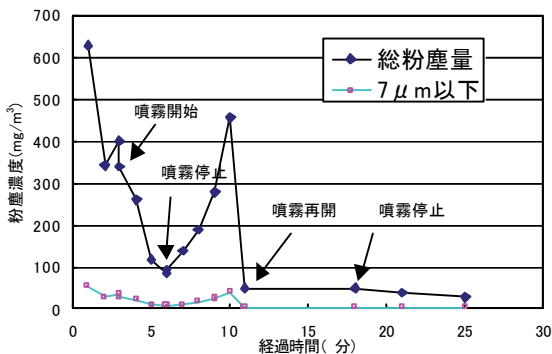


図-3 粉塵濃度変化

粉塵発生作業時における粉塵低減が可能かどうかを検討するため錆の出た鋼製鉄板を研磨したときのミスト噴霧ありなしの2ケースで浮遊粉塵低減効果を検証した。その結果を図-4に示す。噴霧により浮遊粉塵濃度は研磨時、研磨後ともに  $16\sim 17\text{mg}/\text{m}^3$  減少した。浮遊粉塵濃度低減量がほとんど変わらないことより、噴霧による浮遊粉塵抑制効果は浮遊粉塵を降下させる役割よりも浮遊粉塵の発生そのものを抑制する役割が大きいことが推察

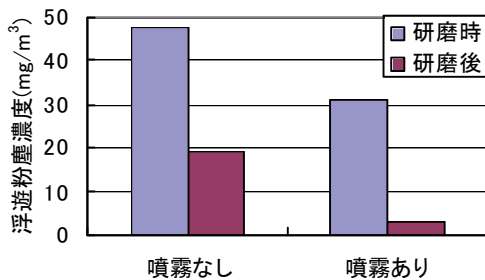


図-4 粉塵抑制効果

された。

### b. 負圧除塵装置の除塵効果

負圧除塵試験結果を図-5に示す。密閉空間  $60\text{m}^3$  内で吸引風量  $20\text{m}^3/\text{分}$  では差圧  $5\sim 10\text{Pa}$  の負圧空間を保持できた。密閉空間は約  $60\text{m}^3$  であることから3分で1回の空気交換ができ、7回換気で浮遊粉塵量が  $1/40$  になった。

負圧除塵装置からの排気に含まれる粒子数の測定結果より算出した粉塵量を表-1に示す。

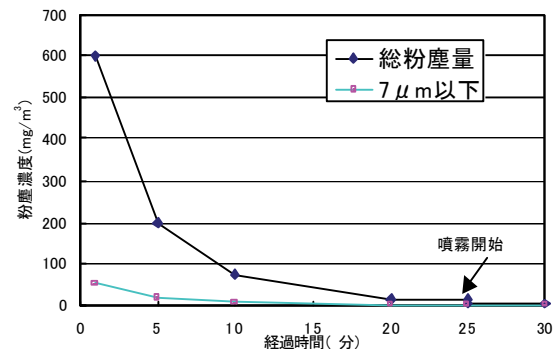


図-5 粉塵濃度変化

表-1 排気粉塵量

	粉塵量 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
粉塵発生時	$2.7 \times 10^{-2}$
霧発生時	$4.2 \times 10^{-2}$
粉塵除去時	$5.5 \times 10^{-2}$
一般オフィス空間	5.0
一般大気中	50.0

浮遊粉塵（焼却飛灰）のダイオキシン類濃度を  $15\text{ng-TEQ}/\text{g}$  として HEPA フィルター通過後のダイオキシン類濃度を計算すると  $6 \times 10^{-4}\text{pg-TEQ}/\text{m}^3$  程度となる。これはわが国の大気中ダイオキシン類濃度である  $0.55\text{pg-TEQ}/\text{m}^3$  の約  $1/1000$  程度の値である。

## 2.3 給排気口位置に関する解析的検討

給排気口の位置と集塵効率について気流解析を用いて検討を行った。給排気口の位置により、汚染物質濃度の減衰がどこまで完全拡散の場合の減衰に近づけるかが目標となる。

### a. 完全拡散を仮定した場合の濃度変化

第3種換気（自然給気、機械排気）において、外気濃度が0で粉塵の発生がなく汚染物質が完全に拡散した場合の濃度変化は次式で表される。

$$C_t = C_i e^{-nt} \quad (1)$$

ここで、

$C_t$  : 時間  $t$  での濃度

$C_i$  : 初期濃度

$n$  : 換気回数 (回/h)

(1)式による濃度変化を図-6に示す。換気回数が増えるに従って、集塵効率も上がり、初期粉塵を完全に除去

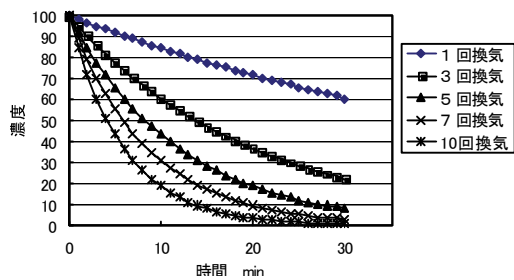


図-6 換気回数と濃度変化 (完全拡散)

するためには、10回換気で30分程度必要であった。

b. 気流解析

3次元汎用熱流体解析プログラム STREAM Ver. 211 (ソフトウェアクレイドル社製) を用い、給排気口位置による集塵効率を検討した。

解析モデルは以下とした。

解析対象室: 20m (W) × 20m (D) × 12m (H)

換気回数: 5回/h (基本とする)

換気量: 2400m<sup>3</sup>/h 初期濃度: 100

給気口総面積: 3.3m<sup>2</sup>

排気口総面積: 3.3m<sup>2</sup> (排気風速 2m/s)

給気口は自然流入条件、排気口は風速規定条件とする。

(第3種機械換気方式)

図-7に解析ケースを示す。給排気口面積を分割し配置を変えている。

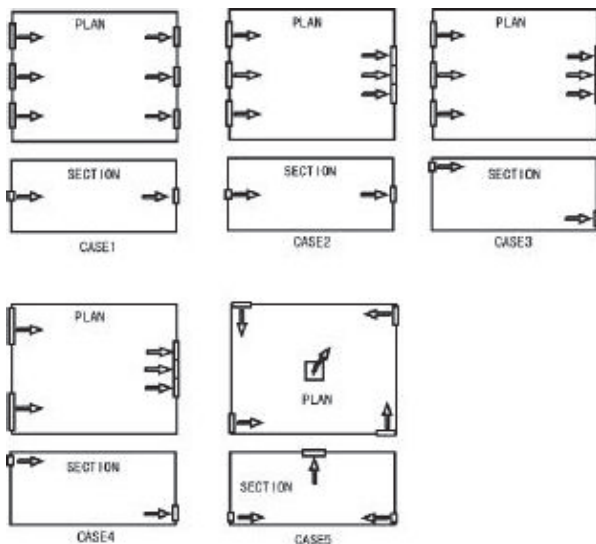


図-7 解析ケース

解析結果を図-8に示す。給排気口の距離を長くした方が集塵効率が高くなった。CASE5の集塵効率が最も良く、完全拡散を想定した計算結果と同等以上であった。

図-9にCASE5の風向風速と粉塵濃度分布を示す。渦流が形成されており、粉塵は中央に集中し上部排気口部に集塵されることが分かる。

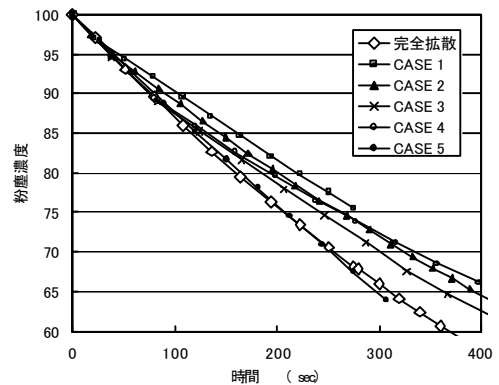


図-8 各ケースの濃度減

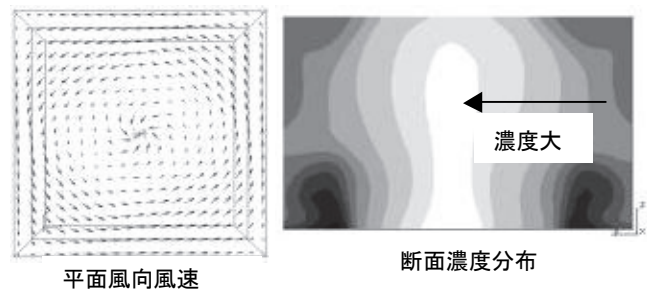


図-9 風向風速と粉塵濃度分布 (CASE5)

2.4 粉塵抑制方法に関するまとめ

粉塵抑制実験より HEPA フィルター付き負圧除塵装置を用いる手法は除塵能力が非常に高く、外部環境を汚染しない方法であることが確認できた。

密閉空間での除塵作業において発生する浮遊粉塵に対し、微粒水滴の噴霧による粉塵抑制が有効であることが確認できた。よって負圧除塵と微粒水滴噴霧を併用した準湿式除塵手法は、作業環境の向上、効率的集塵という観点から非常に適した方法であると考えられる。

給排気口の位置決定も集塵効率の大きなファクターとなり、給排気口間の距離を長くして渦流を生じるような配置とすることで完全拡散を仮定した場合よりも集塵効率が上がることが分かった。

3. 汚染物処理に関する検討

旧焼却場内部に堆積している飛灰などには高濃度のダイオキシン類 (DXN) が含まれている可能性が高い。このような場合には、遮断型処分場が判定基準に適合するように固定化処理等の中間処理をして管理型処分場に処分する必要がある。また除染作業で生じた発生有害物質に関しても同様な処理をする必要がある。ここでは除染作業で生じた廃棄物処理に関して、水処理と固形物処理 (残留飛灰や排水処理で発生した沈殿物など) に分類し検討した。

### 3.1 飛灰処理試験の方法

旧焼却場内部に堆積している飛灰の処理に関し、セメント固化による方法を検討した。

#### a. 配合

通常の飛灰処理プロセスでは焼却灰に少量のセメントを加えて混練処理されている。焼却灰処理の現状プロセスに準じた方法による適用性を確認することとし、次に示す配合で供試体を作製した。

#### ・飛灰混和量と水セメント比

(セメント+砂)/飛灰=30 wt%

W/C=170% 及び 250%

#### b. 溶出試験

溶出試験は、4 週まで恒温恒湿室内に封緘養生したセメント固化供試体 (W/C=170%、セメント/飛灰=30%配合のもの) と実飛灰および溶出水に枯葉から抽出したフミン質溶液 (枯葉抽出水) を用いたものを環境庁告示第 13 号法に準じて実施した。試験ケースは以下の 5 ケースとした。

- ・高炉セメント固化体粉砕物+精製水
- ・再生セメント固化体粉砕物+精製水
- ・普通セメント固化体粉砕物+精製水
- ・飛灰+精製水
- ・飛灰+フミン質溶液

### 3.2 飛灰処理試験の結果

溶出試験の結果を図-10 に示す。重金属については、溶出溶液中のアルキル水銀 (O-Hg)、総水銀 (T-Hg)、カドミウム (Cd)、鉛 (Pb)、有機リン (O-P)、六価クロム (Cr(VI))、砒素 (As)、全シアン (CN) の 8 元素の濃度を測定したが、鉛、六価クロム以外は、灰のみからの溶出を観察したコントロールで既に測定限界以下であり、固化材からの溶出液中でも未検出の結果となった。

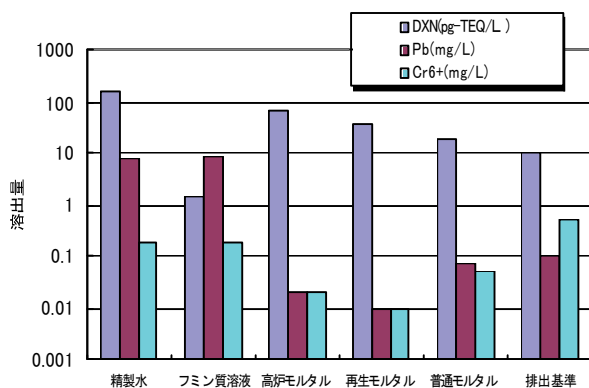


図-10 溶出試験結果

### 3.3 発生汚染物処理試験の方法

汚染物の除染には工事用水を用いて洗浄することが不可欠と考えられ、排水量の削減を目的に工事用水を循環使用するクローズドシステムを構築する。ここでは凝集沈殿及び簡易ろ過で濁度の低減を図り工事用水を再利用

する方法を考慮した。また、ダイオキシン類や重金属類は最終的な排水処理過程で処理することとした。排水の処理過程で発生した残留物に関してはセメント固化を基本に検討を行った。

#### a. 洗浄水処理実験

従来、排水のろ過処理や吸着処理ではろ過砂や活性炭が多く用いられてきたが、それ自体が汚染物となり汚染物質の削減という観点から好ましくない。本処理システムでは砂ろ過の代替にステンレスメッシュ膜による簡易ろ過を適用し、活性炭処理の代替に限外ろ過膜を用いた処理方法にて検討を行った。また、ダイオキシン類の酸化分解や重金属の還元という観点から光触媒による水処理検討も行った。

図-11 に示す汚染物処理フローに基づき基礎実験を実施した。なお、前述したように溶出液にフミン質溶液を用いた場合、著しく溶液中のダイオキシン類低減効果が見られたことから洗浄水としてフミン質溶液を用いている。コントロールとして洗浄水に精製水を用いた試験も実施した。

以下に洗浄水処理実験手順を示す。

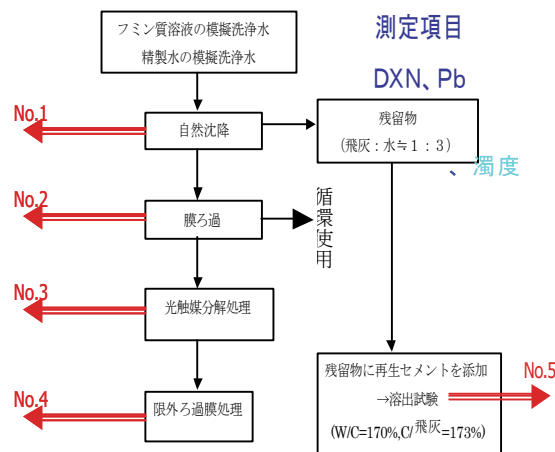


図-11 汚染物処理フロー及び試験水

- ・焼却飛灰(DNX 濃度 1.5ng-TEQ/g) 200g にフミン質溶液 (TOC 40mg-C/L) 4L を加えて模擬洗浄水を作成し 2 週間平行振とうを行った
- ・振とう終了後、模擬洗浄水を 30 分間自然沈降させ、うわ水を採水した。残留物 (飛灰≒170g、水≒500g) は残留物セメント固化処理実験に供した。このうわ水を No. 1 試験水とした
- ・残りのうわ水をステンレスメッシュ (300 メッシュ) ろ過し、そのろ過水を No. 2 試験水とした
- ・ステンレスメッシュろ過水を光触媒分解処理した TiO<sub>2</sub> の微粉末を 0.1g/L となるように添加し攪拌しながらブラックライト照射を 48 時間続けた。その処理水を No. 3 試験水とした

・光分解処理水を限外ろ過 (UF 膜) した。この処理水を No. 4 試験水とした

b. 残留物セメント固化処理実験

洗浄水処理時に発生した残留物に再生セメントまたは普通セメントを練り混ぜて供試体を作成し 4 週間恒温恒湿内で養生した後、粉碎し溶出試験に供した。この溶出液を No. 5 試験水とした。

c. 実験結果

濁度は凝集沈澱およびメッシュろ過で 1/500 (10000 から 20 に低減) になった。各排水処理過程で排水中に残留したダイオキシン類と鉛の残留率変化を図-12、図-13 に示す。

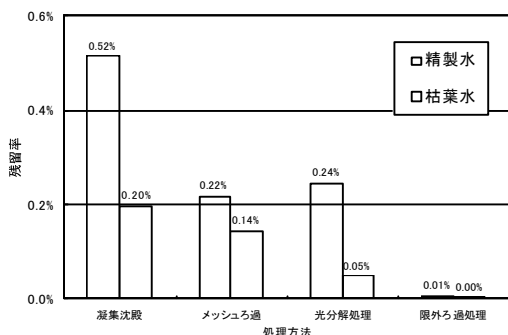


図-12 排水中の DXN 残留率変化

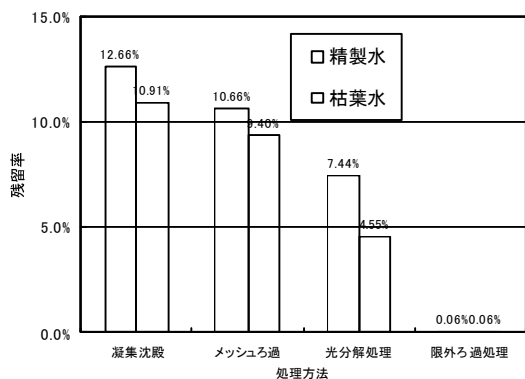


図-13 排水中の Pb 残留率変化

凝集沈澱処理でダイオキシン類および鉛とも大きく除去されている。また、限外ろ過処理をすれば 99.9%以上の除去が可能であった。光触媒によるダイオキシン類の分解については枯葉水を用いた場合に効果が見られた。

図-14、図-15 に No. 5 試験水 (残留物セメント固化溶出水) の分析結果を示す。ダイオキシン類および鉛の溶出がともに抑制されるのは混練水にフミン質溶液 (枯葉水) を用いた再生セメント固化であった。

3.4 汚染物処理に関するまとめ

飛灰の再生セメント固化によるダイオキシン類溶出量は、未処理の場合に比べ 1/4 程度になったが排水基準を満たすことはできなかった。鉛、六価クロムに対する不溶化は顕著な効果を示すことが分かった。

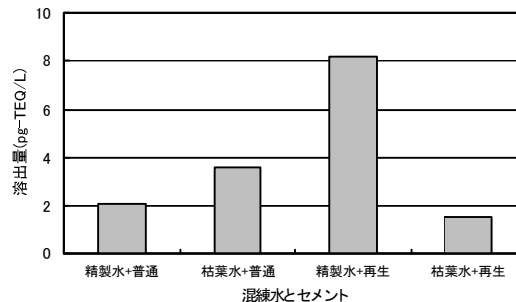


図-14 セメント固化処理溶出試験 (DXN)

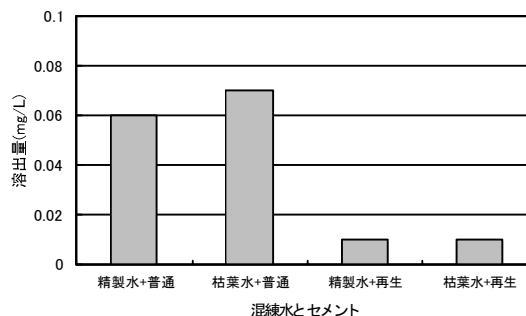


図-15 セメント固化処理溶出試験 (Pb)

溶出液にフミン質溶液を用いた場合、著しく溶液中のダイオキシン類低減効果が見られた。これはフミン質が高分子有機酸であり親水性と親油性を兼ね備えることから水相に存在する疎水性であるダイオキシン類を含む飛灰と結びつき、高分子である故の架橋作用と官能基による電気的中和作用で著しい凝集沈澱効果を示したものと考えられる。

工事中洗浄水の循環使用についてはメッシュろ過を行うことで再利用が十分可能であることが分かった。洗浄水処理で発生する汚染物の処理は、フミン質溶液と再生セメントによる固化処理が非常に有効であった。また、ダイオキシン類はろ過 (メッシュろ過、限外ろ過) により濁度低減をすれば大きく低減でき、鉛については光触媒処理および限外ろ過が有効であった。鉛の低減は光触媒反応によって鉛が光触媒表面に還元付着したと考えられるため排水中から鉛の除去率を上げるためには光触媒を回収することが重要である。

4. 汚染状況把握に関する検討

焼却施設内の汚染状況を把握するため、旧焼却場解体時に採取した試料と稼働焼却場から入手した電気集塵灰を用いて分析を行った。その結果に基づきダイオキシン類の汚染分布状況を概略的に把握する手法を検討した。

4.1 汚染状況把握試験の方法

a. ダイオキシン類分析

解体中の焼却場煙突の耐火レンガ表面およびコンクリート表面 (図-16 に示す位置) から試料を採取しダ

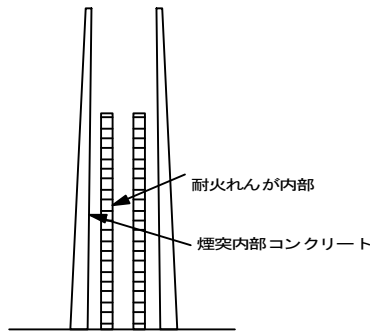


図-16 試料採取位置

イオキシソ類の分析を行った。また、同焼却場の焼却炉内に残留している焼却灰と稼働中の焼却場から得られた電気集塵灰についてもダイオキシソ類分析を実施した。

b. 含有元素の定性分析

ダイオキシソ類の検出に指標となる物質を探すため含有される元素に関して焼却灰と電気集塵灰に対しエネルギー分散型マイクロアナライザー (EDX) による定性分析を行った。

c. 含有重金属の定量分析

各試料中に含まれる重金属としてカドミウム (Cd)、鉛 (Pb)、クロム (Cr)、ヒ素 (As) を分析した。

4.2 汚染状況把握試験の結果

採取した試料のダイオキシソ類分析結果を表-2に示す。耐火れんがが表面および電気集塵灰の濃度が高い結果であった。

電気集塵灰と焼却灰の含有元素定性分析結果を図-17、図-18に示す。

電気集塵灰と焼却灰に含まれる元素のうち、塩素が特徴的な差異を示した。塩素が多く残っているほどダイオキシソ類濃度が高いと推察された。

カドミウム (Cd)、鉛 (Pb)、クロム (Cr)、ヒ素 (As) を結果を表-3に示す。

表-2 試料の分析 (DXN)

試料	実測濃度	毒性等価濃度
コンクリート表面	13ng/g	0.13ng-TEQ/g
耐火れんがが表面	190ng/g	2.1ng-TEQ/g
焼却灰 (炉内堆積)	1.8ng/g	0.036ng-TEQ/g
電気集塵飛灰	150ng/g	1.4ng-TEQ/g

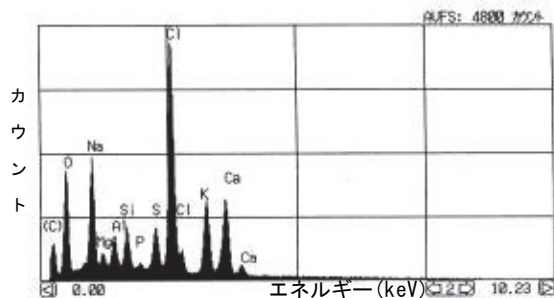


図-17 定性分析 (電気集塵灰)

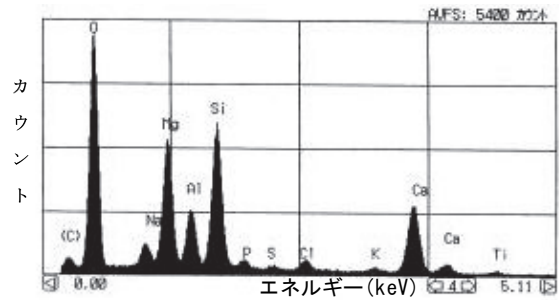


図-18 定性分析 (焼却灰)

表-3 試料の分析 (重金属含有量) 単位 (mg/kg)

試料	Cd	Pb	Cr	As
耐火れんがが表面	23	2770	21	12
焼却灰 (炉内堆積)	<10	30	183	21
電気集塵飛灰	55	1550	81	29

重金属含有量分析結果より焼却施設で発生する残留物には鉛の含有が高い。図-19に試料に含まれるダイオキシソ類の毒性等価濃度と鉛含有量の関係を示した。

4.3 汚染状況把握に関するまとめ

採取した試料についてダイオキシソ類と重金属類の含有量分析および含有元素の定性分析を行った結果、ダイオキシソ類毒性等価濃度と鉛含有量との間に強い相関関係が見られた。また、灰中の塩素量が多いほどダイオキシソ類の濃度が高い結果となった。ただし現状では分析した試料数が少ないため、今後多くの分析を実施してより確実な手法とするためのデータ蓄積が課題と考えている。

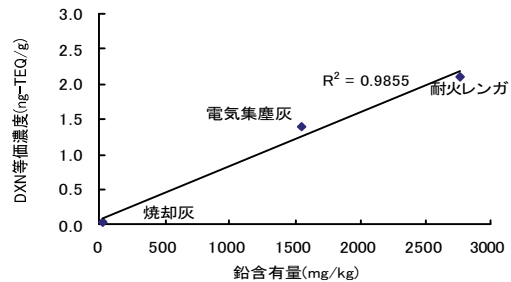


図-19 試料のDXNとPb

5. おわりに

今回は、特にダイオキシソ類にターゲットを絞って検討を行い、粉塵制御、汚染物処理および汚染状況把握に関する各手法の効果や効率的な処理方法に関する種々の知見が得られた。

最後に、今回の粉塵制御に関する実験に際し㈱トリムテックの多大なる協力を得た。また、メッシュろ過および限外ろ過に関してはダイセン・メンブレン・システムズ㈱の協力を得た。ここに感謝の意を表す。