

# 焼却場解体処理技術に関する基礎実験

## －粉塵抑制技術と除染水処理技術－

亀田 茂\* 小西正郎\*  
秋吉敏二\*\* 西田新一\*\*\*

### 1. はじめに

焼却施設の解体工事では、各種汚染物が発生することから発生した汚染物による除染従事者への暴露低減や環境中への漏出防止の観点から管理区域を定めた湿式による除染方法が除染の基本的工法となっている。発生汚染物で暴露や漏出の可能性が高いものとして除染時の発生粉塵と汚染排水が挙げられる。

以上のことから焼却施設の解体処理技術として発生粉塵の抑制技術とダイオキシンを含む排水の効率的な処理技術が重要になってくる。本稿では、薬剤を添加した微粒子ミストによる粉塵抑制技術および光触媒と膜分離によるダイオキシン含有排水処理について種々の基礎実験を実施したので報告する。また、実現場での水処理技術の適用結果についても報告する。

### 2. 微粒子ミストによる粉塵抑制技術

焼却施設の解体に際しては厚生労働省による解体マニュアルが作成されており、その中で管理区域が規定されている<sup>1)</sup>。除染従事者への暴露低減や環境中への漏出防止、また作業効率という観点からも作業空間内の粉塵濃度を低減させることが非常に重要になってくる。また、施設の運転・点検時の作業改善においても粉塵濃度の低減化は重要な課題である。

建屋内には大量の焼却に伴って生じた飛灰が蓄積しており、これらの飛灰にはダイオキシン類が含まれていると考えられる。この集積飛灰や付着した汚染物の除去を行う際、真空掃除機や研磨機を用いられる場合が多く、これらは粉塵発生源となる。

著者らはすでに水道水を微粒子水滴にして利用する浮遊粉塵抑制手法を開発している<sup>2)</sup>。しかしながら噴霧時間が多くなると視界が低下することや沈降した粉

塵が乾燥とともに再浮遊する問題があった。そこで視界低下を引き起こす粒径の大きさや噴霧時間との関係を把握するとともに、微粒子水滴に薬剤を添加することで粉塵の再浮遊を防止する効果について実証実験を実施し検証を行った。

#### 2.1 薬剤噴霧による粉塵沈降速度改善

粉塵の沈降速度が遅い原因は、粉塵粒子表面が撥水性であるため噴霧した水と粉塵粒子が付着しにくく、粒子が大きくなりにくいと考えられる。そこで界面活性性能を有する薬剤をミストに添加する手法が有効と思われるため、実証実験にてその効果を確認した。

##### a. 実験方法

粉塵は、ミスト発生ノズルを 1.5m ピッチで3つ取り付けた密閉空間 (3.5m×7.8m×2.5m=68.25 空<sup>3</sup>) 内で発生させ、負圧除塵装置を動作させながら空間内粉塵測定を行った。粉塵量はろ紙捕集により測定した。

表-1に粉塵沈降速度改善に使用する薬剤成分を記す。

表-1 薬剤基本組成

薬剤種類	沈降速度改善用薬剤 (白色)	
成分 (%)	石油系エマルジョン	10
	グリセリン	3
	界面活性剤	1
	水	86
	防腐剤	微
粘度 (mPa·s)	3.17 (水:2.70)	
乾燥残留物 (%)	8.4	

##### b. 実験結果

図-1にミストを噴霧しなかった場合の捕集粉塵量と水ミストおよび薬剤ミストを噴霧した場合の空気中の捕集粉塵量を示す。

ミストを噴霧することで空気中の捕集粉塵量が大きく低減している。

\*技術研究所 \*\*東京支社土木部 \*\*\*東京支社機械部

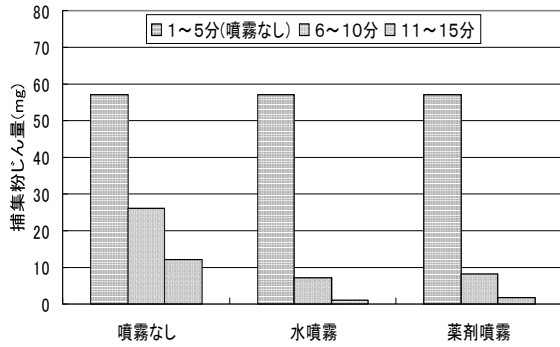


図-1 捕集粉塵量

ミスト噴霧をしない場合は、浮遊粉塵量が5分間で約半分程度であるが、ミスト噴霧を1回（1分間）すれば浮遊粉塵量は5分間で1/5~1/7程度になっている。これは、噴霧によって浮遊粉塵の沈降速度が急速に高まり、空気中の粉塵量が低下したためと考えられる。ただ、薬剤を添加する効果については明瞭に観察できなかった。薬剤を添加した場合には、表面張力が低減し発生する微粒子水滴径が水道水噴霧に比べ小さくなり過ぎたことが影響したと思われる。

2.2 噴霧による有視界距離の低下

微粒子水滴の噴霧時間が長くなると有視界距離（視界が良好な距離）が低下することが懸念されるため噴霧時間と視界の関係を調べた。

a. 有視界距離の測定方法

有視界距離の測定方法は一辺300mmの白紙に太さ5mmの二重線の十字を描き、目視にてその十字線がはっきり見える距離とその時の噴霧時間を計測した。

b. ミスト水滴の粒径

本実験では水圧0.2MPa、空気圧0.3MPaを噴霧ノズルに与える噴霧条件でミストを発生させた。今回のノズルではこの条件で水量140ml/min、空気量90l/minが放出されるので、気水体積比は642となり図-2によるとミスト水滴の平均粒径は約20μmとなった。

有視界距離の測定結果を表-2に示す。

表-2 有視界距離と噴霧時間

	5 m	4 m	3 m
水噴霧 (秒)	190	270	405
薬剤噴霧 (秒)	110	130	170

有視界距離については水噴霧の場合は400秒以上噴霧しても3m以上の有視界距離を確保できるが薬剤を用いた場合は170秒の噴霧で有視界距離が3m以下に

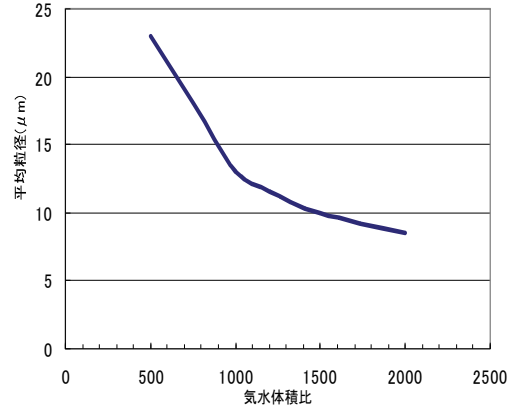


図-2 気水体積比と発生ミスト径

なった。これは薬剤を噴霧した場合、粒子径が水道水に比べ小さくなっており沈降速度が遅くなっているためと考えられる。水滴の粒子径は表面張力と大きく関係があるので薬剤の表面張力を測定し、任意の粒子径発生方法を検討した。

c. 表面張力測定

薬剤には界面活性剤が添加されているので表面張力が小さくなり、水道水と同じ噴霧条件（水圧0.2MPa、空気圧0.3MPa）では水道水に比べより小さな水滴となると考えられる。そこで薬剤の表面張力を毛管上昇法で測定した。

内径0.5mmと1mmのガラス管を用いて水道水と薬剤の毛管上昇高さを測定した。その結果を表-3に示す。

表-3 毛管上昇測定

ガラス管	内径0.5mm	内径1.0mm
水道水	55mm	30mm
薬剤	28mm	15mm

この結果より薬剤の毛管上昇高さは水道水の約半分であることから、表面張力も水の半分の値である $36 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 程度であることが分かった。

d. 薬剤ミストの粒径

同じ飽和水蒸気圧下では表面張力が半分になれば水滴の半径も半分になることから今回使用した薬液ミスト水滴の大きさは水道水の約半分程度と考えられる。

ストークスの式では粒子の沈降速度は粒子径の2乗に反比例するので、薬剤を使用した場合には水道水に比べ4倍程度の沈降時間を要することになる。

すなわち、薬液を使用した場合は水道水を使用した場合に比べミスト状態が4倍永続することになるので有視界距離に大きな差が生じ、表-2のような結果が得られたと考えられる。

薬剤を噴霧した場合、平均粒径を 20 μm 程度にするためには気水体積比（空気量/水量）を小さくすれば表面張力が半分程度でも水道水と同程度の粒径のミストが発生できると思われる。今回の場合は水圧 0.2MPa、空気圧 0.2MPa とすればノズル性能より水量 182ml/min、空気量 60 l/min が放出されるので図-2 のグラフより気水体積比は 300 程度となり、薬剤をこの条件下で噴霧すれば平均粒径が 20 μm 程度のミストを発生させることができると考えられる。

2.3 薬剤噴霧による粉塵再浮遊抑制

沈降した浮遊粉塵や堆積粉塵が集塵作業などで再浮遊しないようにするためには、堆積している粉塵表面に衝撃を与えないで被膜を形成させることが効果的と考えられる。そこで、高分子系の薬剤をミスト状にして空間に噴霧し堆積粉塵表面に皮膜を形成させ粉塵の再浮遊抑制の効果を現場で検証した。

a. 実験方法

廃炉となった旧焼却場建家内部で可搬式ミスト発生機（写真-1）を用いて薬剤添加ミストを噴霧した場合と噴霧しなかった場合について、発生粉塵量を測定し粉塵の再浮遊について検討した。

測定は建家内に人が入らない場合（無人）と人が入って動き回った場合（有人）の粉塵カウントを粉塵計にて行った。実証実験の様子を写真-2に示す。



写真-1 ミスト発生機



写真-2 実験状況

表-4に粉塵再浮遊抑制に使用する薬剤成分を記す。

表-4 薬剤基本組成

薬剤種類	再浮遊抑制用薬剤（無色）	
成分(%)	PVA(ポリビニルアルコール)	10
	グリセリン	3
	界面活性剤	1
	水	86
	防腐剤	微
粘度 (mPa・s)	14.9	
乾燥残留物(%)	12.0	

b. 実験結果

建家内に人が入らない場合（無人）と人が入って動き回った場合（有人）の浮遊粉塵発生量の比を薬剤添加ミストを噴霧しない場合と噴霧した場合について散布一週間後に測定した結果を図-3に示す。薬剤を噴霧しなかった場合、人が建家内に入り動き回る（5分間）と浮遊する粉塵量が急激に上昇するが薬剤を噴霧した場合は、人が入って動き回ってもほとんど浮遊粉塵量の増加は見られないことが確認できた。これは堆積粉塵表面に形成された薬剤被膜が粉塵の浮遊を防止したものと考えられる。

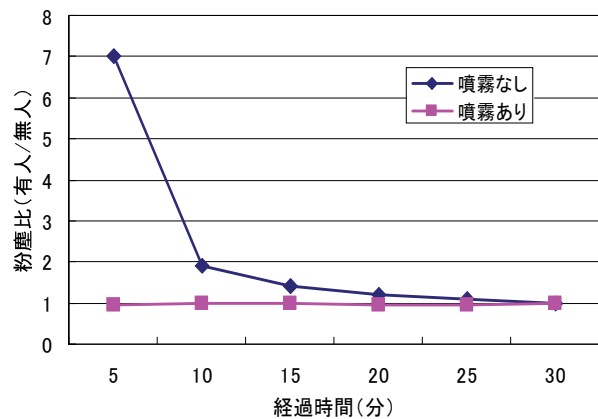


図-3 浮遊粉塵比

しかしながら、その被膜そのものは非常に薄いものなので集塵作業時には被膜が壊され、再浮遊防止効果もなくなる懸念がある。

本薬剤がどの程度飛灰に浸透するかを試験したところ、本薬剤 1ml で飛灰 1g に浸透することがわかり、これを今回の実証実験での薬剤浸透深度に換算すると 0.035mm となった。堆積粉塵に薬剤をすべて浸透させて集塵作業を実施するには大量の薬剤と時間が必要であるため、ミストの散布方法を工夫する必要があると思われる。

### 3. 除染水重金属処理に関する基礎検討

著者らは既設焼却場解体時において除染時に発生するダイオキシン類を含んだ排水をメッシュ膜を利用して処理する膜分離水処理法を開発している。これは、除染時に発生するダイオキシン類を固形物の微粒子（排水中の浮遊物質）を低減、すなわち濁度を低減させる方法である。しかしながら、焼却過程で消石灰を利用する事が多いため焼却物は高アルカリになり両性金属である鉛などが除染水中に多く溶出するおそれがある。これら重金属類は、溶出に関して pH の依存性が高く、濁度を低減させるだけでは処理できないことが予想されるため、その検討を行った。

重金属処理に関する検討として光触媒表面での析出量を紫外線の照射時間をパラメータにした実験（析出試験）、活性炭での処理実験、イオン交換樹脂処理実験を実施した。対象とした重金属類は鉛(Pb)、カドミウム(Cd)、6価クロム(Cr<sup>6+</sup>)、ヒ素(As)である。

#### 3.1 重金属析出試験

処理時間（紫外線照射時間）と溶液中の重金属濃度の関係を実験にて把握することを目的とする。

##### a. 試験方法

光触媒は酸化チタン ST-01（石原産業製 粒径7nm 比表面積 340m<sup>2</sup>/g）を使用した。

実験は飛灰洗浄排水を模擬するため石灰水を用い高アルカリ側の重金属溶液を調整した。

調整方法は、精製水 1 l 中に水酸化カルシウムを溶かし石灰水を作成し、この石灰水に重金属標準液（Pb:100mg/l, Cr:100mg/l, Cd:100mg/l, As:100mg/l）を各々20ml/l 添加して攪拌した。光触媒を 0.1g/l 添加し紫外線ランプ（ブラックライト ピーク波長 360nm）を照射し、30 分ごとに pH 測定するとともに溶液を採水し、0.45 μm のメンブレンフィルターを過後、原子吸光度計にて重金属濃度を測定した。

##### b. 試験結果

試験結果を図-4に示す。

光触媒表面に紫外線を照射することによって、光触媒表面で強力な酸化還元反応が生じる<sup>3)</sup>。一般的に重金属は還元体の電子エネルギーが低く、イオンの電子受容能が高いため溶液中のイオン化した重金属は光触媒表面で還元され析出すると考えられる。試験結果を見ると6価クロム以外の重金属は30分以内で重金属

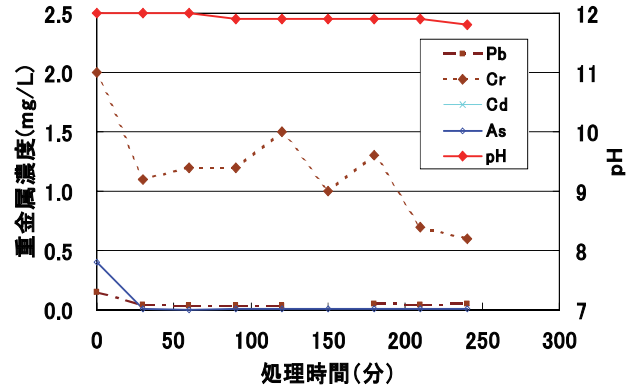


図-4 重金属析出試験

濃度が低減した。6価クロムの低減が進まなかったのは、Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>という形の6価クロムから3価のクロムには還元され易いが3価のクロムは還元され難いことが理由と考えられる。

#### 3.2 活性炭処理試験

粉末活性炭はダイナミック膜処理の分離に都合がよいことからイオン化した重金属を活性炭にて吸着処理できるかを検討した。

##### a. 試験方法

粉末活性炭は白鷺 CW50（武田薬品）を用いた。重金属溶液は重金属析出試験と同様な方法で調整した。

この重金属溶液に粉末活性炭を 1 g/l 添加攪拌後、溶液を採水し 0.45 μm のメンブレンフィルターを過後、原子吸光度計にて重金属濃度を測定した。

##### b. 試験結果

試験結果を表-5に示す。

表-5 活性炭吸着

粉末活性炭添加	
pH	12.1
Pb (mg/l)	0.07
Cr (mg/l)	0.7
Cd (mg/l)	ND
As (mg/l)	ND

6価クロム以外の重金属は活性炭によく吸着されることが分かった。

#### 3.3 イオン交換樹脂処理試験

イオン交換樹脂にイオン化した重金属を通し、処理量と処理効果を検討した。

##### a. 試験方法

陽イオン交換樹脂はアンバーライト IRC748（Rohm and Hass 社製）を使用した。重金属溶液は重金属析出試験と同様な方法で調整した。

カラムにイオン交換樹脂 2g を充填し、このカラムに重金属溶液を通して 50ml 毎に原子吸光度計にて重金属濃度を分析した。

b. 試験結果

試験結果を図-5に示す。

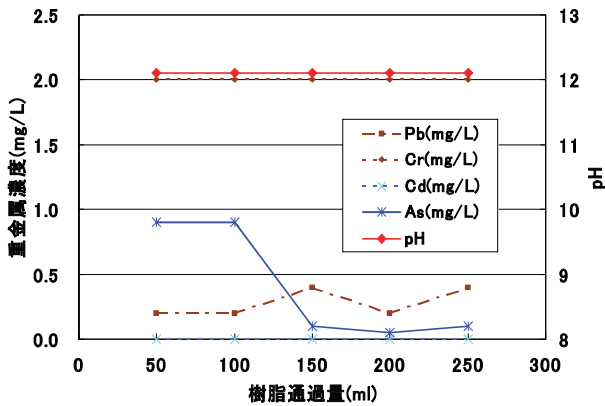


図-5 イオン交換樹脂試験

6価クロムとヒ素がイオン交換樹脂で処理しにくかった。これは6価クロムやヒ素はマイナスイオンとして振る舞うことが影響しているものと考えられる。

3.4 重金属処理に関するまとめ

6価クロムの処理がどの手法でも困難であった。このため6価クロムを処理する場合は、3価のクロムに還元させて水酸化物として沈殿回収するか陰イオン交換樹脂を用いて除去するなどの手法を用いなければならないと考えられる。またクロムは物理的処理（活性炭吸着）によってもある程度処理が可能であるので活性炭を併用することも有望と思われる。いずれにしても6価クロムが除染水中に検出された場合は注意を要することが確認された。

4. 実現場における除染水処理

廃焼却施設の解体実現場にてメッシュ膜ろ過（ダイナミック膜ろ過）と光触媒・限外ろ過膜ろ過を用いて除染水の処理を行い、処理水の再利用や放流水の水質などの検討を行った。

4.1 除染水ろ過処理の原理

焼却施設解体現場では、壁面や管路の内表面に付着した汚染物を高压洗浄にて除去を行うのが一般的である。ここで発生した排水にはダイオキシン類や重金属類に汚染されている浮遊懸濁物質が多く含まれている。

このような排水の処理は固液分離が基本となるが、従来の凝集沈殿法では濁度を 10 度以下に低減させることが困難でありダイオキシン類の排出基準(10pg-TEQ/l)を満たさないことが想定されるため後段に砂ろ過や活性炭ろ過の処理工程を追加している。この方法では、設備が大きくなるばかりでなくろ過砂や活性炭も汚染物になり汚染物の増大につながる。そこで、固液分離性能が良く、設備的にもコンパクトになるダイナミック膜ろ過を基本とし、より高度処理が可能である光触媒・限外ろ過膜ろ過を組み合わせたシステムを開発した。除染水処理フローは、図-6に示すようにダイナミック膜ろ過処理にて除染水の再利用を図り、高度処理にて最終放流するものである。

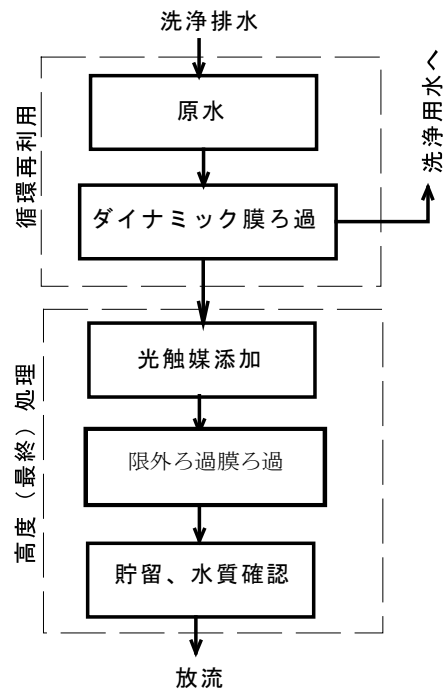


図-6 除染水処理フロー

a. ダイナミック膜ろ過

図-7に示す濁水のろ過現象のうちケーキろ過現象を利用したろ過手法である。本システムで用いる炉材は平均 33 μm 前後の孔径を有するステンレスメッシュ膜である。このろ過膜の外側から内側に排水を水頭差（ろ過圧力）を低くしながら通過させることにより、排水中の浮遊懸濁物質を利用して膜面にケーキ状の層を形成させて、これを膜面にして排水中の濁度を低減させる手法をダイナミック膜ろ過と呼んでいる。

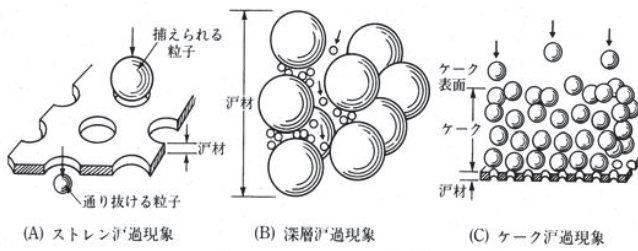


図-7 ろ過現象

b. 光触媒・限外ろ過膜ろ過

光触媒による処理とは、太陽光や蛍光灯などから出る近紫外線（380nm 以下）のエネルギーによって光触媒表面で発生する強力な酸化力と還元力を利用し、難分解性有機物の処理を行うものである。ここでは光触媒として微粉末の酸化チタンを用い、これを処理水中に懸濁させ、紫外線ランプを一定時間照射して処理するシステムとしている。イオン化した重金属類も光触媒表面上で発生する強力な還元力により還元析出されて処理される。

限外ろ過膜処理は、15万分画の中空糸膜を用いて懸濁している光触媒微粒子を回収することを目的としている。

4.2 実現場における除染水の処理

焼却施設解現場で発生した除染水を再び高压洗浄に使用できる程度まで濁度を低減させて再利用することが、汚染水量の低減からも重要である。

本現場では、図-6のフローに基づいて循環再利用と高度最終処理を行い、その処理効率（透過流束）や処理水質の検討を行った。

実現場にて除染水の処理を実施した結果、単位時間当たりの処理量とメッシュ膜面積より、本システムでの透過流束は10m/d (10m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day) の値が得られた。

表-6 処理水の水質

	ダイオキシン類 (pg-TEQ/l)	鉛 (mg/l)	濁度 (NTU)
除染水	200	0.05	75
ダイナミック膜処理水	0.099	0.05	3.9
高度処理水	0.0055	0.005 未満	2.3

処理水の水質については表-6に示すようにダイナミック膜ろ過のみでも排出基準（ダイオキシン類は10pg-TEQ/l、鉛は0.1mg/l）を満足している。また、

濁度も大きく低減し、高压洗浄水として再利用が十分可能であった。高度処理した場合は、その1/20程度までダイオキシン類の低減が図れた。

また、他の実現場での処理結果でも同程度の低減率(25000pg-TEQ/l→12pg-TEQ/lと99.95%の除去)が得られており、本システムの有効性が確認できたとともに以下の知見も得られた。

- i. 除染されたダイオキシン類や重金属類はイオン化せずSSとともに排出されるため固液分離を主とするダイナミック膜ろ過が有効である
- ii. ダイナミック膜ろ過でダイオキシン類の除去率99.95%の値が得られ、ダイナミック膜ろ過のみで排出基準を満足させるには原水のダイオキシン類濃度20,000pg-TEQ/lが一つの基準となる

5. まとめ

焼却施設解体処理技術の要素技術として発生粉塵の抑制技術と除染排水の処理技術について基礎実験、実現場での実証を行った。薬剤を添加した微粒子ミストによる粉塵抑制技術については粉塵の再浮遊に大きな効果が確認できた。コンパクトな装置を用い、低コストで行える技術であるので実現場での採用を積極的に提案していきたい。また、ダイナミック膜ろ過と光触媒・限外ろ過膜によるダイオキシン含有排水処理については多くの実現場で実証を行い、より効率的な除染水処理方法や濃縮汚泥の処理方法について検討を行い、完成された処理システムを目指していきたい。

焼却場解体技術として開発してきた粉塵抑制技術については(株)トリムテック、川口薬品(株)の協力を得ながら実施してきた。また、ダイナミック膜ろ過処理についてはダイセン・メンブレン・システムズ(株)の多大なる協力を得た。ここに感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 厚生労働省化学物質調査課、「ダイオキシン類ばく露防止対策要綱の解説」、中災防、p. 34、2002
- 2) 亀田茂他、「焼却施設の解体処理に伴う汚染防止技術の開発」、奥村組技術研究年報、No.27、pp. 31-32、2001
- 3) 村澤貞夫、「酸化チタン光触媒とその応用」、色材、Vol. 69、No. 7、pp. 444-454、1996