

ナノ材料の管理方法について

本資料では、ナノ材料の一般環境への主な放出経路と推測される下記の 4 種類について、現状の環境汚染防止関連の規則、汚染防止技術等を整理し、ナノ材料への適用性について検討した。

- 事業場からの排気によるナノ材料の一般大気環境への放出
- 事業場からの排水によるナノ材料の公共用水域への放出
- 製品の使用に伴うナノ材料の公共用水域への放出及びその他の使用時の放出
- ナノ材料を含む廃棄物の処理に伴うナノ材料の一般環境への放出

1. 事業場からの排気に関する管理技術

(1) 大気環境汚染防止関連の規則

工場及び事業場における事業活動並びに建築物等の解体等に伴う大気汚染物質の規制は大気汚染防止法に規定されている。その対象施設及び対象物質の概要は下記のとおりである。

表 1-1 大気汚染防止法の規制対象の概要

対象施設	対象物質	規制の概要
ばい煙発生施設 (ボイラーやディーゼル機関等) (産業廃棄物焼却施設を含む)	NO _x 、SO _x 、ばいじん 有害物質 (5 種類)	左記の項目に関する排出濃度規制
揮発性有機化合物排出施設	揮発性有機化学物質 (VOC (注 1))	VOC の排出濃度に関する規制
一般粉じん発生施設 (コークス炉、破砕機を含む)	(粉じん)	施設の構造や取扱に関する規定
特定粉じん発生施設	石綿 (石綿の取扱事業場)	石綿の敷地境界濃度に関する規定
特定粉じん排出等作業	石綿 (建築物の解体作業)	解体作業時の囲い込みや集塵装置 の設置等の措置等の規定
指定物質排出施設	ベンゼン、トリクロロエチレン、 テトラクロロエチレン、 ダイオキシン類	抑制基準 (排出濃度) に関する規定

注 1) トルエン、キシレン等の多種多様な物質

大気汚染防止法の規定においてナノ材料に関連する事項は下記のとおりである。

- 大気汚染防止法の対象物質として特製された化学物質としては、ナノ材料としてはもちろん、素材としても本検討会で対象とした 19 種類のナノ材料はいずれも該当しない。
- ばいじんは化学成分が規定されたものではなく、その意味ではナノ材料も該当するが、対象施設はいわゆるボイラーやディーゼル機関等のばい煙発生施設で、

ナノ材料の製造施設からの排気等による放出は含まれない。なお、ばいじんの測定に用いられるろ紙は0.3-0.5 μ mの粒子の捕集効率で定められている。

- 岩石の破碎等に用いられる一定規模以上の破碎機やコークス炉といった施設については、「一般粉じん発生施設」として防護装置等の措置が規定されている。
- 石綿に関連した製造施設等では敷地境界濃度が、また解体作業では集塵装置の設置等の措置が規定されている。
- なお、後述の廃棄物焼却施設はばい煙発生施設及び指定物質排出施設（ダイオキシン類）に含まれる。

(2) 排気中の粒子状物質の除去技術

1) ばい煙発生施設でのばいじんの除去技術

集じん機には表1-2のような種類のものがあるが、大容量の産業用機器として一般的に用いられているものは、ろ過集じん（バグフィルターを含む）、遠心力集じん、洗浄集じん、電気集じんである（下図参照）。

表1-2 集じん機の種類

重力集じん機
遠心力集じん機（サイクロン等）
電気集じん機（湿式、乾式）
慣性力集じん機（除塵部への衝突等による方式）
ろ過集じん機（バグフィルターを含む）
洗浄集じん機（スクラバー等）

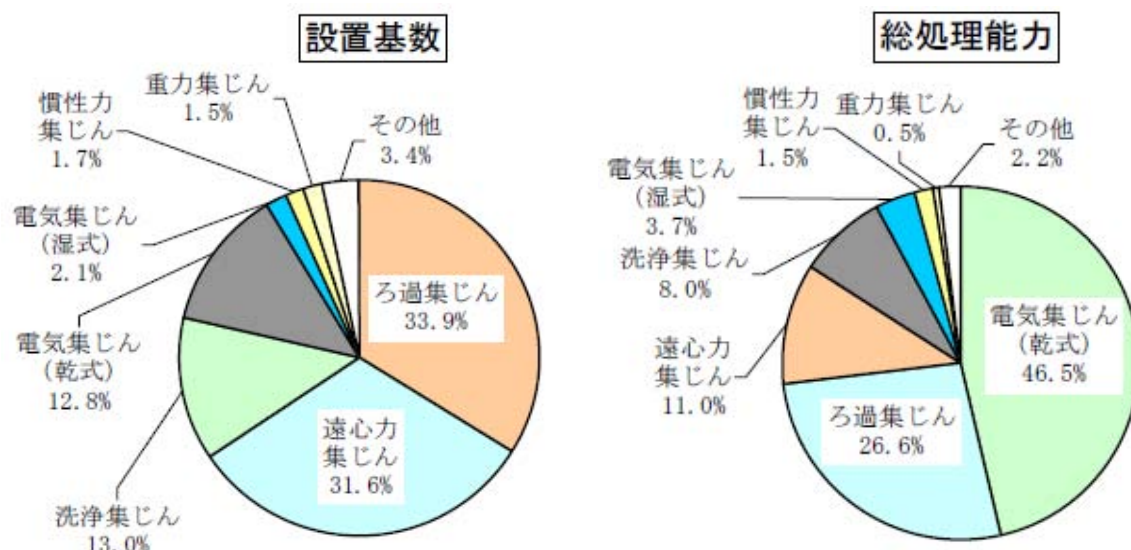


図1-1 ばい煙発生施設での集じん機の使用状況

(環境省資料「平成16年度大気環境に係る固定発生源状況調査(結果概要)」から引用(平成14年度末の状況))

電気集じん機は火力発電所等での使用事例が多く、集じん効率は90%以上で、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子も効率よく捕集でき、ナノレベル（例えば50nm以下）の粒子も捕集できるとした機器がある。ただ、電気集じん機についてはダイオキシン類が発生するとされたことから、その使用基数が低下し、処理ガス温度の低下装置等とあわせた技術検討が進められている。

ろ過集じん機では筒状の布製のフィルターを用いるバグフィルターが一般的である。通常のフィルターでは $0.1\mu\text{m}$ 程度以上の粒子に対応可能で、捕集効率は90%以上とした機器がある。

遠心力集じん機はいわゆるマルチサイクロン方式と呼ばれるもので、一般に $5\mu\text{m}$ 以上といった大きい粒子の捕集に用いられることが多い。捕集効率としては、 $5\mu\text{m}$ 以上で70-90%以上といった機器があるが、粒子径が小さくなると捕集効率は低下する。

2) 作業環境における除じんの除去技術

上記のような大容量のばいじん除去装置に対して、より低容量の排気装置におけるばいじんの除去については、例えば室内の空気清浄機や掃除機といったもので、上記のようなろ過式、遠心力式、電気式の装置があり、近年ではウィルスサイズ（ $0.1\mu\text{m}$ 以下）を対象としたものも存在する。

一方、労働安全衛生法に基づく粉じん障害防止規則では、使用すべき除じん方式（又は同等以上の性能の方式）として下記のような規定を定めているが（第13条）、もっとも一般的に用いられる除じん装置はHEPAフィルター等によるろ過方式である。

- ・粉じんがヒュームの場合： 濾過除じん方式、
電気除じん方式
- ・粉じんがヒューム以外の粉じんの場合： サイクロンによる除じん方式、
スクラバによる除じん方式、
濾過除じん方式、
電気除じん方式

ろ過式の除じん装置（エアフィルター）の性能はJIS B9908で規定された方法で計測されることとされており、その概要は表1-3のとおりである。

これらから明らかなように、現状ではナノレベルの大きさの粒子の除去を目途にしたフィルターはない。

表 1-3 除じん装置（エアフィルター）の性能等

（化学工学便覧及び JISB9927 から作成）

適用フィルター	粗じん用 (プレフィルター)	細じん用 (中性能 フィルター)	粉じん用 (高性能 フィルター)	クリーンルーム用
規格粉じん 及び 粒径範囲	JIS8 種(関東ロー ム $D_{p50}=8\mu\text{m}$) 0~80 μm	大気じん0~5 μm または JIS11種(関東ロー ム $D_{p50}=2\mu\text{m}$) 0~50 μm	JIS13 種 (0.3 μmDOP) 0.3 μm	CMD: 0.21-0.32 μm
測定方法 (効率値)	質量法 (質量基準)	比色法 光散乱積 算法 (投影面積基準)	計数法 (個数基準 (粒径別))	光散乱式自動 粒子計数器 0.1 または 0.12 μm 以 上を測定できるもの

3) フィルターによるナノ材料の捕集効率について

ナノ材料を扱う事業場等に使用できる除じん装置については、現状ではナノ材料への適合を意図した除じん装置等はないものの、現状の HEPA フィルターがナノ材料の除去効果があるとした以下のような報告がある。

- 2-200 nm の粒子は、サイズが小さくなるほどフィルターの効果は高くなる。これは 200 nm 以下の粒子は非常に拡散しやすいため、フィルターの通過時にフィルターの繊維に衝突して吸着するためと考えられる（ドイツ BAuA (2007)）。
- 「現状の知見では、HEPA フィルターを用いた高効率集塵機がナノ粒子に有効」とされている（米国 NIOSH (2006)）。
- NIOSH は Pui and Kim(2006)の報告（下記）に基づき、「マスクが期待されるレベルでの防御を提供することを確認した」とされている（厚労省第 4 検討会（平成 20 年 5 月 30 日）資料 5）。
- 直径 3-20nm の銀ナノ粒子を用いて下記の 4 種類のグラスフィルターの粒径別の捕集効率を確認し、過去の試験例とあわせてみて 100nm 以下の粒子で透過率が小さくなった（図 1-2）。また 3nm までは熱反発（フィルター性能が低下する）は認められなかったとの報告がある（Pui and Kim(2006)）。
- 2 種類の車内に銀ナノ粒子を放出し、フィルター（Viledon HVAC filter）の除去効果（循環ろ過）を試験した結果、数分後にナノサイズの粒子が除去されたとした報告がある（図 1-3）（Pui et. al. (2008)）。

表1-4 試験に使用されたフィルターの種類 (Pui and Kim(2006)から作成)

フィルター (※)	HE1073	HE1021	HF0031	HF0012
DOP 透過率 (平均%) ($0.3 \mu\text{m}$ at 5.3cm/s)	12.8	39	45.8	79.9
有効繊維径 (μm)	1.9	2.9	3.3	4.9
有効孔径 (μm)	8.8	13.4	16.1	26.2

※: HE, HFはある会社のろ紙の規格記号で、HEは小さい粒子サイズに対応するHEPA領域に近いものであり、HFは標準的なHVACシステムと同程度のものである。

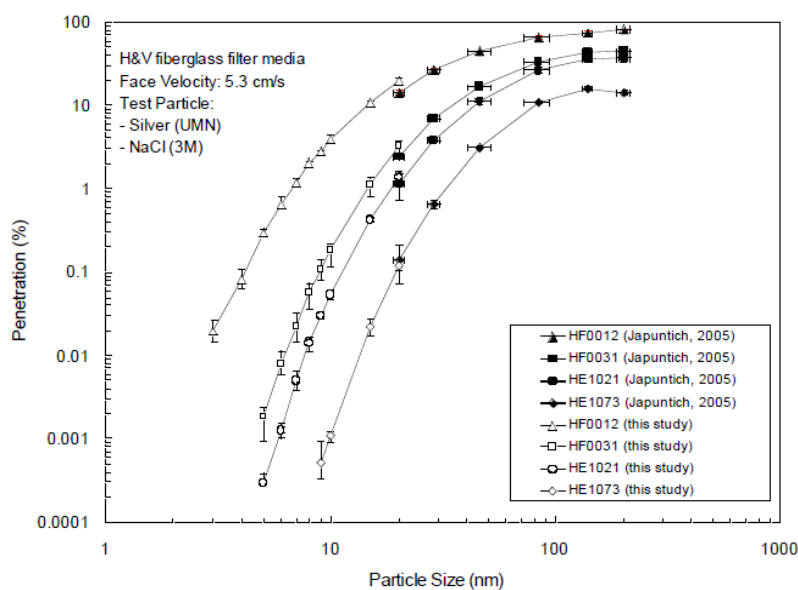


図1-2
粒径別の透過率
(Pui and Kim(2006)
から引用)

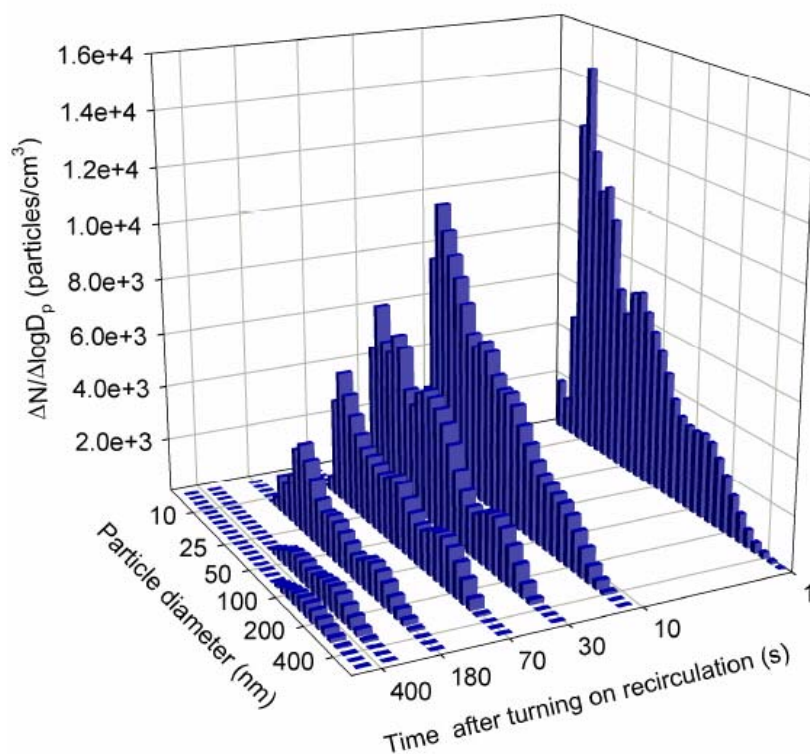


図1-3
車内での循環フィルターによるナノ粒子の除去効果
(Pui et. al. (2008)
から引用)

(3) ナノ材料の除去技術としての有効性

焼却施設等に設置される集じん機については、現状で使用事例の多いバグフィルターも含めナノ材料の捕集効率に関する資料はなく、管理技術としての有効性は確認できない。

一方、HEPA フィルターがナノ材料の捕集に有効であるとした報告があり、厚生労働省が 2008 年 11 月にとりまとめた「ヒトに対する有害性が明らかでない化学物質に対する労働者ばく露の予防的対策に関する検討会報告書」では、「通常のコナマテリアルに対しては HPA フィルターの捕集効率は十分であると思われる」とし、排気装置のフィルターについては、「排気からナノマテリアルが放出されないよう、ナノマテリアルを保守できる高性能フィルターを局所排気装置等に設けることが必要である。」とし、使用すべきフィルターについては、「調査のうえ捕集可能な適切なフィルターを選定する」あるいは「調査を行わない場合には HEPA フィルターまたはこれと同等の性能を有するフィルターを設置する必要がある」としている。

以上のことから、ナノ材料を扱う事業者からの排気における除じん装置においては HEPA フィルターの使用が有効であるとの一定の評価を得ていると考えられる。

2. 事業場からの排水に関する管理技術

(1) 事業場からの排水に伴う水環境汚染防止関連の規則

我が国において、工場及び事業場から公共用水域に排出される水の排出及び地下に浸透する水の浸透は水質汚濁防止法で規制されている。その対象施設及び対象物質の概要は下記のとおりである。

表 2-1 水質汚濁防止法の規制対象の概要

対象施設	対象物質	規制の概要
特定施設 (業種、施設、排水量等で規定)	健康項目（重金属等 27 種類） 一般環境項目（pH 等 15 種類）	左記の項目に関する排水濃度規制 (一律排水基準、上乘せ排水基準)
(上記のうちの) 有害物質使用特定施設	健康項目（重金属等 27 種類）	特定施設の地下浸透水（特定地下浸 透水）の濃度規制
指定地域特定施設	汚濁負荷量（COD, N, P）	上記に加え、左記物質の負荷量の規 制

水質汚濁防止法の規定においてナノ材料に関連する事項は下記のとおりである。

- ナノ材料自体は対象項目とはなっていないが、素材として対象項目になっているものは、生活環境項目での亜鉛、鉄、銅、また健康項目でのカドミウムやセレンがある(量子ドットで一部に使用される)。
- SS（浮遊物質）は化学成分が規定されたものではなく、その意味ではナノ材料も該当するが、SS の測定に用いられるガラス繊維ろ紙は孔径 1 μ m の捕集効率を持つもので、このろ紙を通過したものは溶存態と扱われるため、少なくとも凝集していないナノ材料は実質的に対象にならない。
- 生物化学的あるいは化学的に分解される可能性のあるものは、BOD あるいは COD の対象になるが、現状ではナノ材料の分解に関する知見はない。
- 一般廃棄物の焼却施設は特定施設に該当する。
- 廃棄物の処理施設では廃酸、廃アルカリ処理施設等の施設については、特定施設に該当する。

(2) 排水の管理技術

1) 排水管理技術の概要

製造業等における排水処理施設の普及状態は図 2-1 のとおりで、活性汚泥処理及び凝集沈殿（浮上）といった方法が主体になっている。

普及率の高い活性汚泥処理（浮遊式）¹、凝集沈殿（浮上）、及びろ過による排水処理技術の概要を表 2-2 にまとめた。

¹ 接触酸化式は微生物をろ材に固定した方法で原理等は浮遊式とほぼ同等。

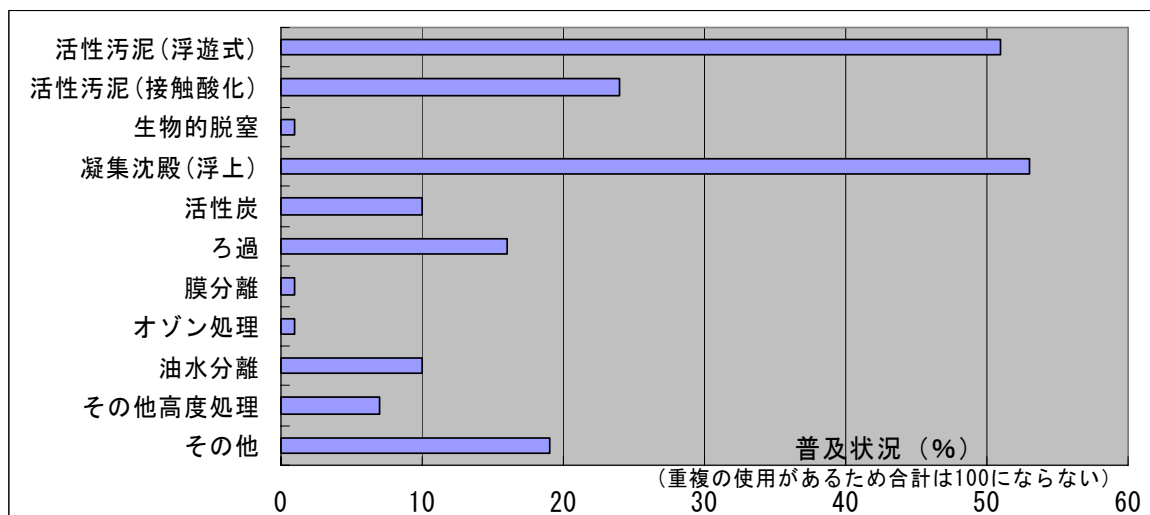


図 2 - 1 製造業等における排水処理施設の普及状態 (平成 18/1/18 のデータ)
(環境省資料「排水処理技術の実態について」から作成)

表 2 - 2 主な排水処理技術の概要

(環境省資料「排水処理技術の実態について」から作成)

処理方式	活性汚泥法 (浮遊式)	凝集沈殿法 (※1)	ろ過法
原理等	<ul style="list-style-type: none"> 凝集性の微生物からなる活性汚泥フロックを懸濁状態で利用する処理法。 微生物により有機物の一部が酸化分解される。 ばっ気槽が沈殿槽を兼ね回分式処理を行うものもある。 	<ul style="list-style-type: none"> 微細な懸濁物質、場合によっては溶解性の汚濁物質を化学薬品 (凝集剤) の添加により凝集させ、この凝集物を沈殿させることにより除去する方法。 	<ul style="list-style-type: none"> 砂等のろ過層中に排水を浸透流下させ、懸濁物質をろ過層内に抑留させ、清澄水を得る方法。(※2) 溶存性有機物の濃度は低いですが微細な懸濁物質が含有されている場合に除去効果が高くなる。
主な除去対象物質	<ul style="list-style-type: none"> BOD (COD) 嫌気・好気条件の組合せで窒素の除去も可能。 	<ul style="list-style-type: none"> SS COD りん 	<ul style="list-style-type: none"> 微細な懸濁物質 (COD、窒素、りん)
薬品等使用	活性汚泥構成微生物の増殖に必要な窒素とりんが不足している場合には窒素・りん剤を添加する	凝集剤 : <ul style="list-style-type: none"> 無機凝集剤 (アルミニウム塩、カルシウム塩、鉄塩等) 高分子凝集剤 (アニオン系、カチオン系、ノニオン系等) 	特になし
備考	りん等の除去を目的に、活性汚泥槽末端に凝集剤が添加されることがある。	<ul style="list-style-type: none"> 凝集効果は排水中の汚濁物質の種類と濃度、共存成分の種類と濃度、排水の pH や温度の影響を受ける。 一般に無機性排水の処理に用いられることが多く、有機性排水の処理としては 3 次処理として組み合わせられることが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 処理とともにろ材の閉塞が起こる。 ろ過法を単独で用いることは少なく、他の処理施設との組み合わせにより処理システムの最終段階で用いることが多い。

※1 : 凝集後も沈降性が劣っている場合に微細気泡による浮上分離処理方法もある。

また、一般的な水処理プロセスでの対象粒子の大きさは下図のように示されている
(最新吸着技術便覧 (1999))。

なお、砂ろ過による急速ろ過法では1 μ 以上の大きさの粒子に有効とされている。

		粒子径						
nm	mm	1 10 ⁻⁶	10 10 ⁻⁵	10 ² 10 ⁻⁴	10 ³ 10 ⁻³	10 ⁴ 10 ⁻²	10 ⁵ 10 ⁻¹	10 ⁶ 1
対象物質	溶解性物質	溶解性物質						
	コロイド粒子	コロイド粒子						
参考径	マイクログロブス<2nm	マイクログロブス<2nm						
	ミソポア2~50nm	ミソポア2~50nm						
	マクロポア<50nm	マクロポア<50nm						
	炭素骨格のC結合 0.13~0.15nm	炭素骨格のC結合 0.13~0.15nm						
	Caイオン径 0.2nm	Caイオン径 0.2nm						
	I ₂ 分子径 0.5nm	I ₂ 分子径 0.5nm						
	メチレンブルー吸着ポア 1.5~1.9nm	メチレンブルー吸着ポア 1.5~1.9nm						
	100 dalton分子径 0.6nm	100 dalton分子径 0.6nm						
	1,000 dalton分子径 1.3 nm	1,000 dalton分子径 1.3 nm						
	10,000 dalton分子径 2.9 nm	10,000 dalton分子径 2.9 nm						
100,000 dalton分子径 6.2 nm	100,000 dalton分子径 6.2 nm							
800~3,000 dalton分子径 1.5~1.9 nm (フルボ酸, フミン酸相当)	800~3,000 dalton分子径 1.5~1.9 nm (フルボ酸, フミン酸相当)							
処理プロセス	イオン交換	イオン交換						
	逆浸透膜 (RO・NF)	逆浸透膜 (RO・NF)						
	電気透析	電気透析						
	活性炭吸着	活性炭吸着						
	生物処理	生物処理						
	膜ろ過 (UF)	膜ろ過 (UF)						
	凝集沈殿ろ過	凝集沈殿ろ過						
	精密ろ過 (MF)	精密ろ過 (MF)						
	遠心分離	遠心分離						
	自然沈降	自然沈降						
スクリーン	スクリーン							

図2-2 水処理プロセスの対象サイズ

(最新吸着技術便覧 (1999) から引用)

2) 排水中の懸濁物質の除去技術

次に、表 2-2 で水中の微細な懸濁物質の除去に一般に使用されている凝集沈殿法の概要を以下に示す。

凝集沈殿による水処理では、水中のイオン（重金属やリン酸）を溶解積の小さい炭酸塩や硫化物あるいは金属塩として除去する方法と、微細な懸濁物質（コロイド等）を電気的に中和して凝集させる方法に大別され、さらに高分子でフロック化し易くさせる方法が用いられている。

凝集剤としては、無機系の凝集剤として硫酸バンド（硫酸アルミニウム）、ポリ塩化アルミニウム（PAC）、塩化第二鉄、キトサン等が、有機系の凝集剤としてジメチルジアリルアンモニウムクロライド、キトサンといったものがある。表 2-3 に数種の無機系凝集剤の特性を示す。

表 2-3 無機系の凝集材の種類と特徴

(大下(2007)から作成)

種類	有効pH	特徴	
		長所	短所
硫酸バンド Al ₂ (SO ₄) ₃ 液体品: Al ₂ O ₃ 8% 市販: 水処理用	有効pH: 5~7.2 使用pH域: 3.5~11	安価である 除濁性が高い 腐食性、 刺激性が少ない	フロックが軽い pH8以上で効果低い
PAC ポリ塩化アルミニウム 液体品: Al ₂ O ₃ 10~11% 市販: 水処理用	有効pH: 5.2~7.3 使用pH域: 4~10	凝集性が硫酸バンド より良い 中和剤(アルカリ)が 少なくてよい (または不要)	硫酸バンドより高価 フロックが軽い pH8以上では効果低い
塩化第二鉄 FeCl ₃ 38%溶液・工業用	有効pH: 5~11 使用pH域: 3.5~12	フロックが重い (沈降圧密良) アルカリ性域でも有効	中和剤(アルカリ) を多く必要とする 腐食性高い やや高価

(3) ナノ材料の除去技術としての有効性

現状では、排水中のナノ材料に対する水処理技術事例は見当たらないが、資料 3 に示すように、ナノ材料は水中で凝集しやすいとされることから、排水中のナノ材料も同様の挙動を示すと思われる、凝集沈殿といった処理技術で除去される可能性が高いと考えられる。ただし、その除去効果については十分なデータが現状では得られておらず²、また、ナノ材料の用途や環境媒体中の濃度によっても異なることから、ナノ材料を扱う事業者が測定等により確認することが望まれる。

² スイスの研究者によれば、実験室でのモデル排水処理過程で最大 6%程度の酸化セリウム (200nm 未満) が処理後の排水中に含まれていたとする報告がある (Limbach, L. K. et al. (2008) Environmental Science & Technology. 42(15).)

排水処理で除去された金属等は、回収・再利用される以外は、汚泥とともに廃棄処分されるが、その際に実施される固化あるいは覆土による再飛散防止は環境放出の管理技術としては有効である。金属ナノ材料はサイズとしてはナノレベルであるが、凝集沈殿等の除去技術によって汚泥として除去されるナノ材料についても有効であろうと推測される。

3. 使用時に関する管理技術

ナノ材料を含む製品の使用時の環境放出の管理技術として、下水処理過程での管理技術を整理するとともに、その他の使用時の管理技術について若干の検討を加えた。

(1) 下水排水の管理技術

1) 下水排水管理関連の規則

工場等以外から公共用水に流出する排水の多くは下水処理場（終末処理場）で処理された後公共用水域に放流される。下水道終末処理場は特定施設に規定されており、その放流水は、2. に示した水質汚濁防止法による排水基準の対象となっている。また、下水道法に基づく技術上の基準により、雨水量の多い場合の措置等も規定されている。したがって、対象項目は工場等からの排水と同等であり、ナノ材料に関連する事項も前記とほぼ同様である。

2) 下水排水の管理技術

下水処理施設は一般に図3-1のような構造になっており、その処理工程は主に下記の3つの工程からなる。なお、下記の工程の一部で、凝集剤を添加して凝集沈殿を促進するといった措置がとられる場合もある。

- ・一次処理：最初沈殿池で水中の沈殿物を除去する段階
- ・二次処理：生物反応槽で生物（活性汚泥）によって水中の有機物を除去する段階
- ・高次処理（三次処理）：二次処理までで除去が困難なりん等の除去を目的として実施される処理で、好気性条件と嫌気性条件を組み合わせた生物処理で除去する技術が一般に用いられている（下図には含まれていない）。

なお下水処理施設で発生した汚泥は、産業廃棄物の扱いとなるが、2004年度の状況では排出量約7,500万トンのうち、97%にあたる約7,270万トンが中間処理減量化（焼却処理）されている（（社）下水道協会資料）

3) ナノ材料の除去技術としての有効性

現状では下水処理におけるナノ材料に対する適用例は見当たらないが、環境中の銀の物質フローの検討例において、下水処理場での除去率は 85-99%と想定されている（ナノサイズ以外も含むもの）(Blaser et. al. (2008))。

処理技術としては、凝集剤による凝集沈殿により高効率で除去される可能性が高いものと思われる。

下水処理汚泥については、上記のようにほとんどが焼却による減量化処理が実施されている。

焼却処理の場合は、炭素系のナノ材料は分解の可能性は高いと考えられる。

一方、金属系のナノ材料については分解しない。ただ、焼却による大きさの変化等は現状では不明である。また、焼却施設の集じん機による除去効率等についても不明である。

(2) その他の使用時の管理技術とその有効性

化粧品に含まれるナノ材料のように使用時（使用后）に下水へ放出されると思われるもの以外では、スプレー等に含まれるもの、及び塗料に含まれるものが考えられる。

スプレーに含まれるナノ材料は、スプレー使用時に放出されるため、除去装置のある閉鎖空間等での使用でない限りは、環境中への放出に対する有効な管理技術はない。

塗料に用いられている可能性のあるナノ材料は、光触媒としての二酸化チタンであるが、剥離片の大きさや挙動（大気粉じんへの寄与）についての情報は乏しい。資料3に示した東京都内でのPM2.5の成分分析事例では、チタンは最大数十ng/m³の濃度であるとされているが、ナノ材料由来のものがどの程度であるかについては不明である。

剥離防止技術としては、吹き付け石綿の剥離防止のための表面を覆うフィルムや接着剤といった技術がある。しかし、対象とする塗料が大気と接することで発揮できる機能（光触媒機能）が期待されていることを考慮すると、上記のような表面のコーティング技術は適していないと考えられる。

最新のバインダー技術等は不明であるが、二酸化チタンが本来持つ光触媒効果により、塗料の基材が劣化するという現象は古くから知られており、いわゆるクレター型の劣化によって二酸化チタン粒子を中心に基材が消失し、粒子そのものが放出される可能性もある。

4. 廃棄物の処理に関する管理技術

我が国における廃棄物の処理に関する技術基準等は廃棄物処理法及び関連法で定められている。以下にその概要を示す。

(1) 廃棄物の処理状況（中間処理及び最終処分）の概要

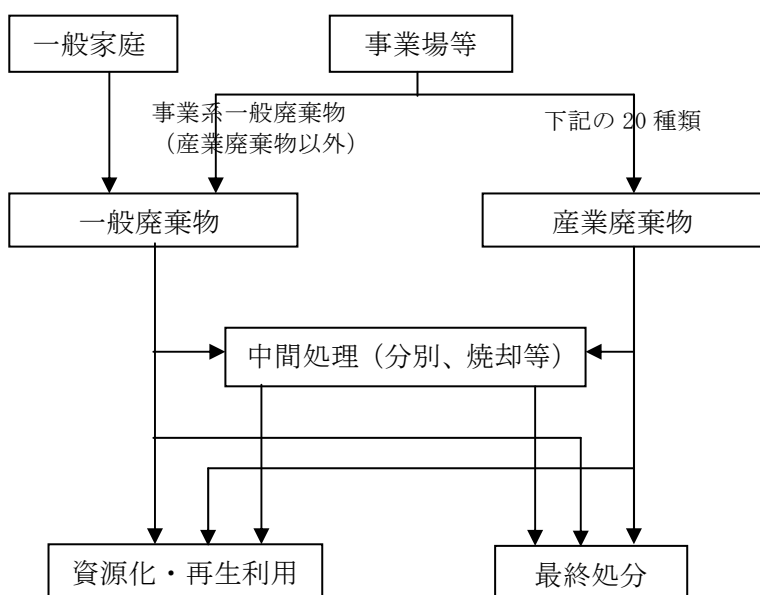
廃棄物の処理フローの概要は図4-1に示すとおりで、中間処理（焼却を含む）を施した後、資源化、再生利用又は最終処分（陸上埋立）することとなっている（図では特別管理廃棄物は記載していない）。

<排出場所>

<廃棄物の種類>

（下記参照）

<廃棄物の流れの概要>



産業廃棄物

(1)燃え殻、(2)汚泥、(3)廃油、(4)廃酸、(5)廃アルカリ、(6)廃プラスチック類、(7)紙くず、(8)木くず、(9)繊維くず、(10)動植物性の固形状不要物、(11)動物系固形不要物、(12)ゴムくず、(13)金属くず、(14)ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くず、(15)鉱さい、(16)がれき類、(17)動物のふん尿、(18)動物の死体、(19)ばいじん、(20)これらを処分するために処理したもの。

図4-1 我が国における廃棄物処理フローの概要

一般廃棄物及び産業廃棄物の処理状況は図4-2。4-3のとおりである。産業廃棄物の全体の約75%は中間処理がされており、また、全体の約52%は再生利用され、埋立地へ最終処分される量は全体の約6%である。さらに、産業廃棄物の種類別の処理状況は図4-4に示すとおりである。

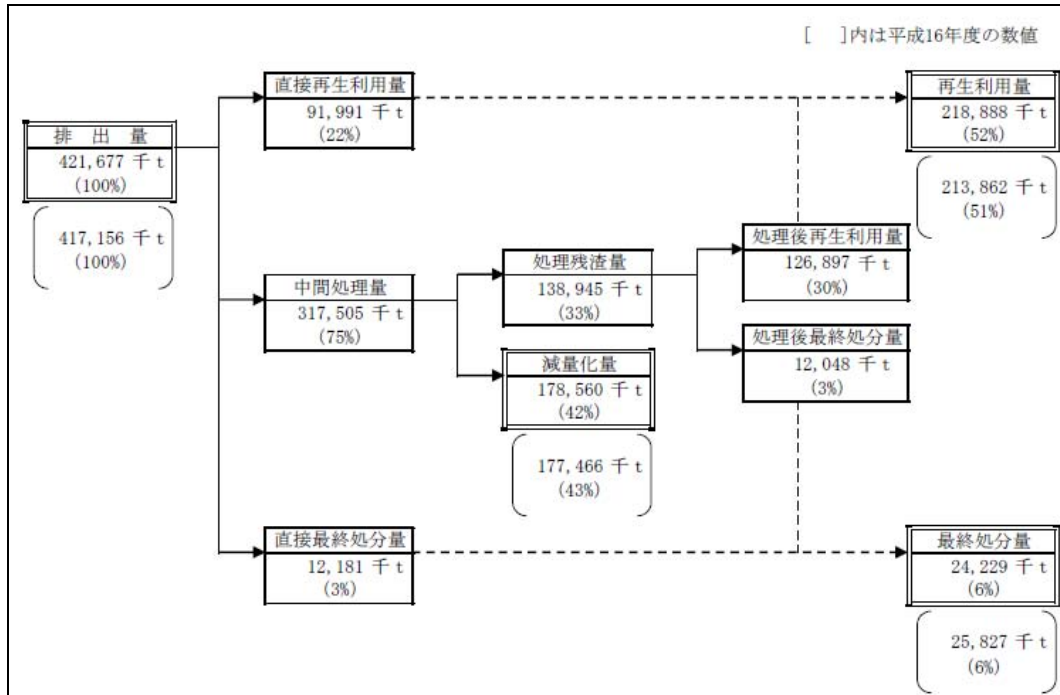


図 4 - 2 産業廃棄物の処理の状況 (平成 17 年度)

(環境省資料「産業廃棄物の排出・処理状況について」から引用)

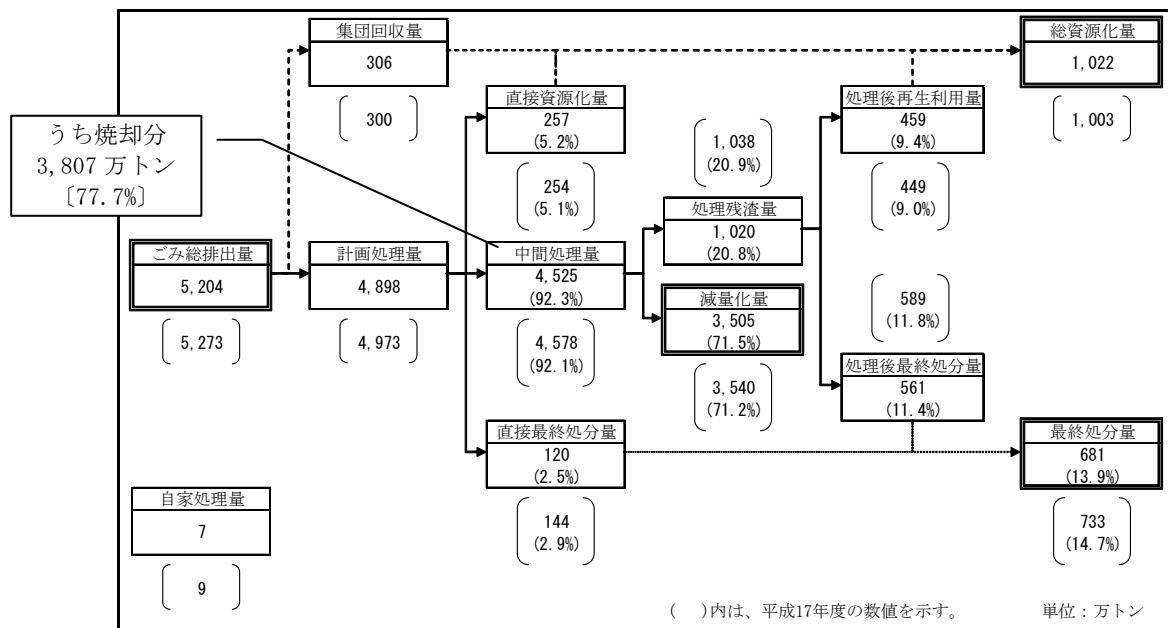


図 4 - 3 一般廃棄物の処理の状況 (平成 18 年度)

(環境省資料「一般廃棄物の排出及び処理状況等 (平成18年度実績) について」から引用)

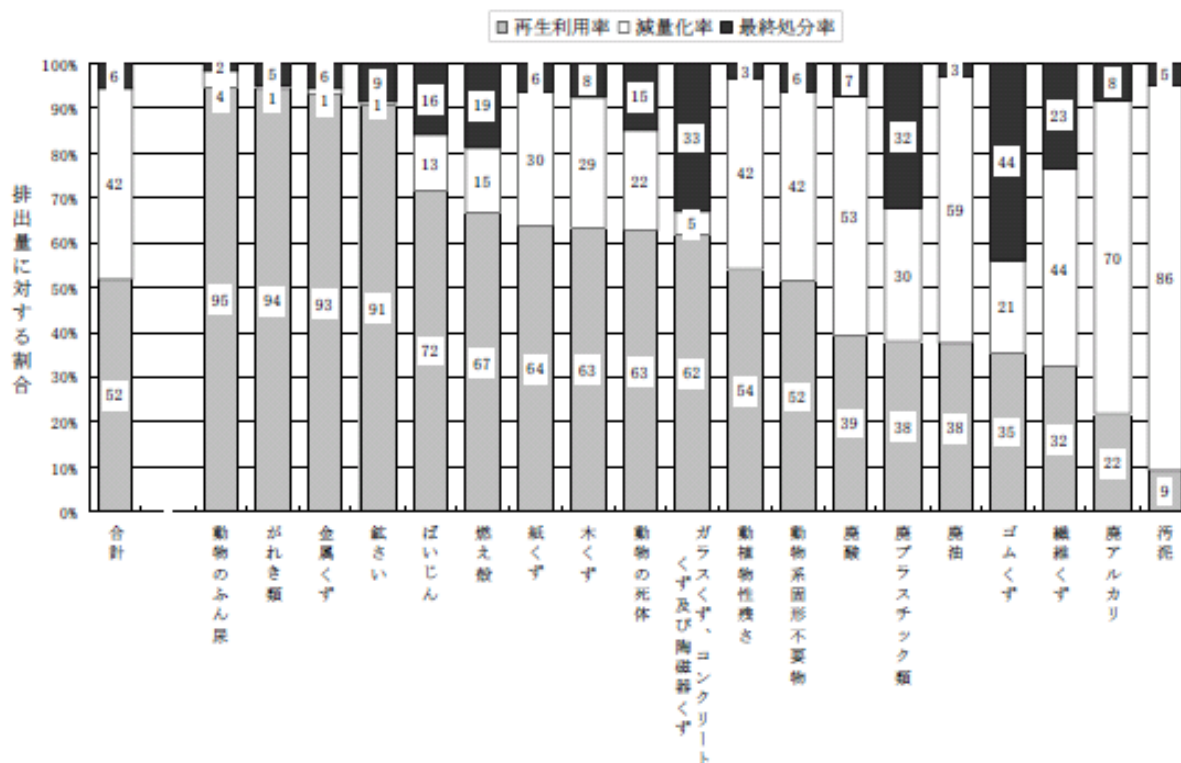


図4-4 産業廃棄物の種類別の再生利用率等
 (環境省資料「産業廃棄物の排出・処理状況について」から引用)

ナノ材料に関連すると思われる産業廃棄物である紙類、廃プラスチック類について、再生利用率等は表4-1のようになっている。なお、減量化については主に焼却処分によるものであると考えられる。

表4-1 ナノ材料に関連すると思われる廃棄物の種類別の再生利用率等(産業廃棄物)
 (環境省資料「産業廃棄物の排出・処理状況について」から作成)

廃棄物の種類	含まれる可能性のあるナノ材料	再生利用率 (%)	減量化率 (%)	最終処分率 (%)
紙類	ポリスチレン アクリル微粒子 二酸化チタン	64	30	6
廃プラスチック類	ポリスチレン フラーレン 多層カーボンナノチューブ 二酸化ケイ素	38	30	32

(2) 廃棄物の処理過程における環境管理技術

1) 焼却処理における環境管理技術

前述のように、廃棄物焼却施設はばい煙発生施設及び指定物質排出施設（ダイオキシン類）に含まれ、大気汚染防止法によりばいじんに関する排出規制が課せられている。

また、廃棄物処理法（平成9年改正）及びダイオキシン類対策特別措置法（平成11年）によって、廃棄物焼却炉の規制が強化され、一定の規模の廃棄物焼却炉については「燃焼ガスの温度が800℃以上の状態で2秒以上滞留」といった維持管理に関する規定が定められている。

なお、廃棄物焼却施設から排出されるばいじん及び燃え殻は、ダイオキシン類対策のため、下記のような扱いとなっており、いずれの場合においても、飛散・流出防止のための措置がなされているものと考えられる。

- 一般廃棄物焼却施設からのばいじんは特別管理一般廃棄物として、熔融、焼成、セメント固化される（特別管理一般廃棄物又は特別管理産業廃棄物を処分又は再生したことにより生じた廃棄物の埋立処分に関する基準）
- 廃棄物焼却施設から排出されたばいじん、燃え殻（一般廃棄物焼却施設にあつては燃え殻）で、ダイオキシン類の含有量あるいは有害物質の溶出量が一定以上のものは、上記と同様に特別管理廃棄物（特別管理産業廃棄物あるいは特別管理一般廃棄物）として扱われ、上記と同様に固化等される。
- 上記二者以外のばいじん及び燃え殻は、産業廃棄物として管理型の最終処分場に埋立処分されるが、覆土等により飛散防止措置及び浸出水の管理が行われる（後述）。

ナノ材料のうち炭素系のものは高温で分解される可能性があり、現状ではカーボンナノチューブについて、下記のように高温での焼却処分により分解の可能性を示す情報がある。

- 多層カーボンナノチューブ及び単層カーボンナノチューブは約500℃以上では大気中で容易に酸化する（(独)物質・材料研究機構 web site 資料）。
- 多層カーボンナノチューブの焼却条件については、2008年5月にイギリスが公表した下記の情報がある（ENVIRONMENT AGENCY INTERIM ADVICE on Wastes containing unbound Carbon Nanotubes）。
 - ・ この簡易シートは非結合カーボンナノチューブ（※）を含む廃棄物の分類及び取り扱いについて注意を喚起するためのものである。
（※：媒体中に固着せず吸入される可能性のあるもの）
 - ・ CNTを含む廃棄物（非結合の場合）は廃棄物リストの「160303：有害な成分を含む無機廃棄物」に分類され、有害廃棄物とされるべきと考えた。物質はアスベ

ストの性質と類似の物理的特徴を示すと思われ、その閾値である 0.1%（重量比）が適当と思われる。この点については検討中である。

- ・ 利用可能な情報に基づけば、廃棄物は 850℃で最低 2 秒間の燃焼、あるいは物質の毒性に関与するナノ次元の構造を破壊するような科学的措置で無害化される。現状の知見によれば、有害廃棄物の高温焼却が適当な方法と想定しているが、廃棄物を無害化できることが立証されれば他の方法も適用できる。

2) 埋立処分（最終処分）における環境管理技術

廃棄物処理法においては、産業廃棄物は廃棄物の種類によって、安定型、管理型、遮断型の 3 種類のいずれかの最終処分が実施される。また、一般廃棄物は管理型の最終処分場に埋立処分される。

廃棄物の区分は表 4-2 に示すとおりである。また、3 種類の最終処分場の構造等は図 4-5 のとおりである。

表 4-2 廃棄物の種類でみた最終処分場の種類

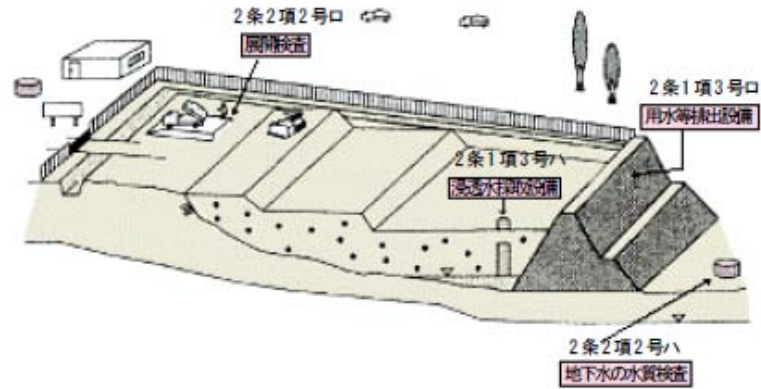
（廃棄物処理法等から作成）

廃棄物の種類		処分可能な最終処分場のタイプ
産業 廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 性質が安定している産業廃棄物 ・ 下記の安定 5 品目が処理可能とされている。 ー 廃プラスチック類 ー 金属くず ー ガラス陶磁器くず ー ゴムくず ー がれき類 	安定型
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安定型処分場で処理する区分以外の産業廃棄物 ・ 産業廃棄物とは下記のことをいう。（※） (1) 燃え殻、(2) 汚泥、(3) 廃油、(4) 廃酸、(5) 廃アルカリ、 (6) 廃プラスチック類、(7) 紙くず、(8) 木くず、(9) 繊維くず、 (10) 動植物性の固形状不要物、(11) 動物系固形不要物、(12) ゴムくず、 (13) 金属くず、(14) ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くず、(15) 鉱さい、(16) がれき類、 (17) 動物のふん尿、(18) 動物の死体、(19) ばいじん、(20) これらを処分するために処理したもの。 	管理型
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重金属や有害な化学物質などが基準を超えて含まれる産業廃棄物を処分。 	遮断型
一般 廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一般廃棄物の全て（一般廃棄物焼却施設からの燃え殻及びばいじんを含む） 	管理型

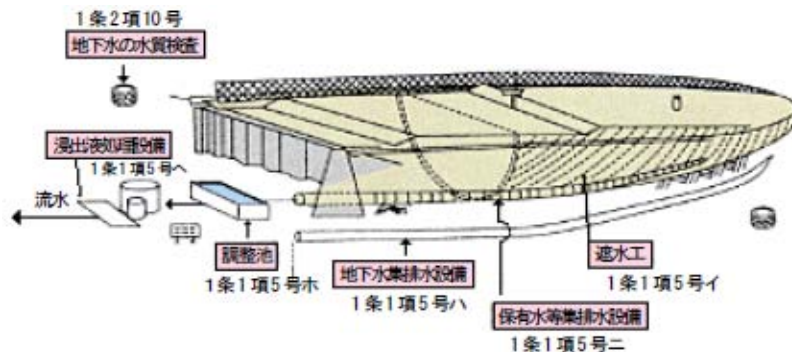
※：廃酸、廃アルカリは埋立処分が禁止されている

産業廃棄物あるいは一般廃棄物が埋立処分される管理型の最終処分場では、覆土等による飛散防止措置及び放流水の水質検査が実施される。しかし、法定の水質検査項目にナノ材料に関する項目はない。

- 安定型— 地下水との遮断なしで直接埋め立て
 (飛散防止のための覆土、囲い程度。遮水施設無)
 (地下水(周辺)及び浸透水(敷地内)のモニタリング)



- 管理型— 地下水とは遮断、雨水等の浸出水を管理し放流する。
 (飛散防止のための覆土、囲い。遮水・浸出水集積施設、浸出水処理施設)
 (地下水(周辺)及び放流水のモニタリング)



- 遮断型— 地下水と遮断する(雨水の流入も防止)
 (遮水施設、屋根・覆い等、通常コンクリート囲い)
 (地下水(周辺)のモニタリング)

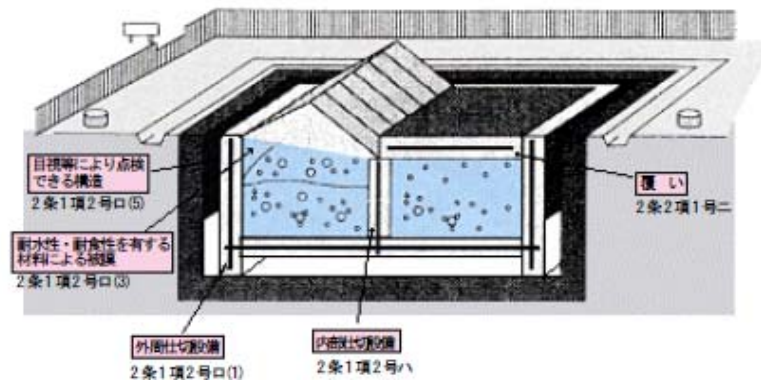


図4-5 最終処分場のタイプ別の概要

3) 処理施設

産業廃棄物処理施設は、下記のような規制対象となっている。

- 産業廃棄物処理施設のうち、下記のような施設については水質汚濁防止法上の特定施設に該当し、同法に基づく排水規制が課せられる。
 - ・一定規模以上の汚泥の脱水施設
 - ・一定規模以上の汚泥（PCB 汚染物及び PCB 処理物であるものを除く。）の焼却施設
 - ・一定規模以上の廃油の油水分離施設
 - ・一定規模以上の廃油（廃 PCB 等を除く。）の焼却施設
 - ・一定規模以上の廃酸又は廃アルカリの中和施設
 - ・一定規模以上の廃プラスチック類（PCB 汚染物及び PCB 処理物であるものを除く。）の焼却施設
 - ・一定規模以上の汚泥、廃酸又は廃アルカリに含まれるシアン化合物の分解施設
- 産業廃棄物焼却施設で一定の要件を満たすものは大気汚染防止法上のばい煙発生施設に該当し、同法に基づく排出規制が課せられる。
- 産業廃棄物処理施設の排水処理で生じた汚泥は産業廃棄物であり、特別管理産業廃棄物（有害物質の溶出量が一定量以上のもの）は遮断型に、それ以外は管理型の最終処分場で埋立処分される。
- 焼却施設から排出される燃え殻、ばいじんは産業廃棄物であり、特別管理産業廃棄物（有害物質の溶出量が一定量以上のもの）は熔融等の固化処理の後埋立処分され、それ以外は管理型の最終処分場で埋立処分される。
- なお、厚生労働省が 2008 年 11 月に取りまとめた「ヒトに対する有害性が明らかでない化学物質に対する労働者ばく露の予防的対策に関する検討会報告書」によれば、リサイクル作業に従事する労働者等も対象とし、作業環境管理の実施を求めている。

(3) ナノ材料の廃棄に関するその他の情報

ナノ材料を含む製品の廃棄処分時の扱いに関する情報は上記のイギリスのもののみであるが、取扱事業場での廃棄物の扱いについては以下のような情報がある。

いずれも指針であるが、ナノ材料を含む廃棄物の区分、密封容器での保管、ラベル等が記載されている。

- 米国のDOEが 2007 年 6 月に公表した資料³では、研究所からの廃棄物の扱いについて下記のように記載されている。
 - ・ナノ材料を含む廃棄物は他の廃棄物と区別

³ Approach to Nanomaterial ES & H (DOE 所属の 5 つの研究所に対して示した指針)

- ・密閉容器に収納
 - ・廃棄物の収納容器にはラベルを添付
 - ・有害物は RCRA や州の関連法令に準じる
- イギリスの規格協会が 2007 年 12 月に公表した資料⁴では、事業場からの廃棄物の扱いについて下記のように記載されている。
- ・他の廃棄物との混合防止
 - ・汚染物は除染
 - ・漏洩しない廃棄容器あるいは密閉できる袋に保管
 - ・廃棄容器、袋にはラベルをつける
 - ・有害廃棄物に関する規則に係わるものはそれに準じる
- 厚生労働省が 2008 年 2 月に示した「ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について（基発第 0207004 号）」では、事業場からの廃棄物の扱いについて下記のように記載されている。
- ・清掃に用いた布は袋に封入し適切に廃棄、
 - ・使用した保護手袋を廃棄する場合は袋に封入し適切に廃棄
 - ・ナノ材料の付着した保護衣は事業場外に持ち出さない

(4) 廃棄物中のナノ材料の環境放出防止技術としての有効性

廃棄物として放出されたナノ材料の扱いを以下のように区分して適用可能な環境放出防止技術を検討した。

- ・中間処理（破砕処理）
- ・焼却処分（ばいじんや燃え殻の処理を含む）
- ・埋立処分（飛散、放流水（管理型最終処分場の場合）を含む）
- ・廃棄物処理施設からの排水（汚泥を含む。）
- ・廃棄物の運搬

1) 破砕処理時

粗大ゴミ等の廃棄物の中間処理過程では、破砕処理が実施されることが多い。破砕時に製品中に含まれるナノ材料が飛散する可能性については不明であるものの、一定規模の破砕機は一般粉じん発生施設に該当することも考慮すると、破砕時におけるナノ材料の飛散は無視し得ないものと考えられる。

このような飛散を防止する技術としては、既に非飛散性の石綿製品の扱いに関して、

⁴ PD-6699-2 Nanotechnologies-Part2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials

湿潤化等の措置が実施されており、ナノ材料にも適用は可能であるものと考えられる。

2) 焼却処分時（ばいじんや燃え殻の処理を含む）

焼却施設に設置されている集じん機のナノ材料の捕集効率は不明である。したがって、焼却により分解しない金属系のナノ材料が大気中に放出される可能性はある。

ただし、現行の規定に則った高温焼却により焼結してより大きな粒子になり、大気への飛散量が少なくなることも考えられる。一方、炭素系のナノ材料は、フラーレンについては知見が不十分であるものの、カーボンナノファイバーのように分解される可能性が高いと考えられる。

焼却後の燃え殻及び集じん機から排出されるばいじんは、熔融、セメント固化等により飛散は防止されるため、その後の大気への放出は少ないと考えられる。

3) 埋立処分時（再飛散、放流水の管理（管理型最終処分場の場合）を含む）

埋立地からの再飛散は、上記のように覆土等の措置によりほとんどないものと考えられる。

最終処分場からの浸出水は排水処理がなされた後、公共用水域に放流されるが、ナノ材料自体は水質検査項目にないため、現状は不明である。

ナノ材料の土壤中での挙動についてはほとんど知見がないため、埋立処分の有効性（浸出水への混入防止）は不明である。

4) 廃棄物処理施設からの排水処理時（汚泥を含む）

廃棄物処理施設の排水は水質汚濁防止法の対象になり、重金属等の沈殿のために凝集沈殿といった措置が実施されている可能性も高いと思われるが、現時点ではその点を確認できる情報はなく、下水処理場の事例と同様に、管理技術としての有効性は不明である。

なお、排水処理に生じた汚泥は産業廃棄物として処理され、上記のように埋立処分に当たっては固化あるいは覆土等により飛散防止措置が施されることから、環境中への放出の可能性は乏しいものと考えられる。

5) 廃棄物の運搬時

上述のばいじんや燃え殻といった飛散しやすい廃棄物はもちろん、乾燥汚泥や、不要となったナノ材料そのものを運搬する場合において、運搬方法によっては大気中に飛散する可能性がある。

この点については、既に飛散性の廃石綿の運搬における措置事例等（密閉化）があり、ナノ材料が多量に含まれると考えられる、製造事業場での使用済みフィルターや清掃に用いられた紙類や布類、不要となったナノ材料等について、これらの措置は有効と考えられる。

5. 環境管理技術に関するまとめ（案）

以上の内容を下記に取りまとめた。これらは、現状の管理技術の有効性についてまとめたものであり、その有効性の判定には多くの不確実性が含まれていることに留意すべきであり、ナノ材料の用途の拡大等がなされた場合には再度検討する必要がある。

(1) 管理技術の有効性のまとめ

○ 集じん機：

現状で使用事例が多いバグフィルターをはじめとする、焼却施設等に設置される集じん機について、ナノ材料の捕集効率に関する資料はなく、管理技術としての有効性は不明である。

○ 除じん装置：

ナノ材料を扱う事業者からの排気における除じん装置としては HEPA フィルターが有効と考えられる。

○ 排水処理：

現状では、排水中のナノ材料に対する水処理技術事例はないが、ナノ材料の水中の凝集しやすい性質を考慮すると、凝集沈殿といった処理技術で除去される可能性が高い。

ただし、その除去効果については十分なデータが現状ではないので、ナノ材料を扱う事業者において確認を行うことが望まれる。

○ 破砕処理：

破砕処理時のナノ材料の放出については情報がないが、非飛散性の石綿製品に関して用いられている湿潤化といった措置の適用が有効であると考えられる。

○ 焼却炉での分解等：

炭素系の一部のナノ材料では高温焼却時に分解するという報告があり、我が国で稼動している焼却施設（800℃以上、2秒以上）では、炭素系のナノ材料は分解する可能性が高い。

しかし、金属系のは焼却処分においては分解しないことが明らかであり、大きさや化学組成が変化する可能性もあるが、現状では不明である。

○ 排水処理汚泥の処理：

排水処理で汚泥中に移行した金属等は、汚泥が回収・再利用される以外は直接又は中間処理を経て埋立処分されることとなるが、その際に実施されている固化あるいは覆土といった飛散防止対策はナノ材料の環境放出の管理技術としては有効である。

一方、下水処理汚泥は一般的にコンポスト化又は焼却処分されており、焼却処分においては、炭素系のナノ材料は分解すると考えられるが、金属系のナノ材料は分解せず、また集じん機による除去効率も不明である。

○ 燃え殻、ばいじんの処理：

焼却後の燃え殻及び集じん機から排出されるばいじんは、熔融、セメント固化、等により飛散は防止され、管理技術としては有効である。

- 埋立処分（放流水の管理（管理型最終処分場の場合）を含む）
埋立地からの飛散防止対策としての覆土等の措置は、管理技術として有効である。ただし、ナノ材料の土壌中での挙動についてはほとんど知見がなく、浸出水への流出の可能性については不明である。
- 製品及び廃棄物等の運搬時の措置
製品としてのナノ材料及びばいじん、汚泥、使用済みフィルターや清掃に用いた紙類、布類、さらには不要となったナノ材料そのものの運搬では、飛散性の廃石綿に適用されている密閉化が最も有効である。
- 製品（塗料、スプレー等）の使用時の管理技術
なお、使用時（塗料、スプレー等）の管理技術については現状では適用可能な管理技術がなく、今後の技術動向を踏まえて再検討することが必要である。

（２）管理技術の今後の課題

資料２に示したばく露の可能性も考慮して、管理技術の有効性の検討において課題となる事項を以下のように抽出した。

① 排水処理技術

ナノ材料を取り扱う事業所においては、排水を通じて環境中へ放出される可能性があるが、材料としてできる限り無駄のないように用いられると想定されることから、その量及び頻度は低いものと推測される。ただ、これらが凝集沈殿処理等で除去される可能性は高いが、効果は材料によって異なることから、今後、排水への混入が懸念されるような用途が拡大した場合には、排水からの除去に関する技術開発が必要であろう。

② 焼却時のナノ材料の挙動及び集じん機による捕集効率

焼却処分分解されない金属ナノ材料については、焼却炉での処理の結果、どのような性状に変化し、また、ばいじん、燃え殻等のような媒体に移行するのか、挙動は知られていない。このため、焼却時の挙動解明も検討が必要であろう。

③ 破砕処理におけるナノ材料の挙動確認

破砕処理でのナノ材料の飛散については、基材への固着状況も含めて情報が無い。破砕処理はプラスチック製品等の廃棄処理において多く実施されることから、その実態把握が必要であろう。