

持続型環境技術による廃棄物の循環資源化

廃棄物焼却灰リサイクルの考え方と研究の取り組み

九州大学大学院工学研究院 教授 島岡 隆行

1. 利用した資源は自然界に返したい

廃棄物の多くは、天然資源を材料に製造された製品の廃物である。私は、出来ることなら廃棄物を大地へ、地表へ戻したい。有機物の生ごみは分解過程における環境汚染が懸念される。同じ有機物でも、木材などの分解速度は極めて小さい。さらに、プラスチックに至っては、分解を受け難い。公衆衛生上、またこれらの廃棄物埋立処分に伴う環境汚染のリスクなどを考えると、化学・生物学的な反応による安定化に依存することは、廃棄物排出量から判断しても間尺に合わない。その意味で、焼却による酸化分解（燃焼）は効率的であり、焼却技術は百年に及ぶ長い歴史を有し、技術的にも成熟している。焼却は、燃焼制御を一步間違うと、ガス化しない物質の濃縮工程であり、燃焼工程において有害な物質を意図せずに生成してしまうことになる。しかし、今の燃焼技術と、さらなる技術の改善で解決できる問題だと思っている。

図1は、九州日報（明治36年10月27日付）の広告記事である。「肥料用福岡市厨芥焼却灰販売、各種の作物草木に最も有効かつ廉価なり、ご入用の方は下記にお申し込みください。福岡市部葉院土手焼却場」とある。大変興味深い新聞記事である。ちょうど100年前にあたる明治36年（1903年）には、既に、川の土手で厨芥を焼却処理していたことがわかる。焼却灰の施肥は、肥料3要素を供給すると同時に、日本の土壌は酸性を示す傾向にあることから、土壌改良材（中和剤）の役割も果たしていたと想像される。先陣の知恵である。厨芥の焼却灰ではあるが、利用した資源を自然に返すことを実践していたのである。

2. 焼却灰は風化する

大量の焼却残渣を用いた長期間にわたる埋立実験を通して、焼却残渣は土壌化することを体感している。屋外に数年も放置された焼却残渣には、いつからとなく草木が繁茂する。色も土壌に似てくるし、手にとって臭いをかげば土の臭いがする。火山灰土に関する書物¹⁾に、「日本はいうまでもなく火山国で、重要な火山が167、噴火の記録や兆候のある活火山が77もある。噴煙物質は火口からの何10kmも遠方に達し、広い範囲の地表面をおおう。これが土壌化されて火山灰土となる。その面積は、日本の国土の約6分の1、全農耕地の27%、畑・樹園地の46%を占める。」とある。研究を通しての体験とこの一文をきっかけに、筆者はここ数年、焼却残渣（主に、焼却灰）の安定化（土壌化、風化、粘土化）についての研究に力を入れている。わが国の廃棄物の清掃工場（1,715施設、2000年度）を火山に例えると、焼却残渣は噴煙物質に相当する。埋立処分された焼却残渣の安定化機構、土木資材の有効利用をめざした利用先での環境影響評価のための焼却残渣の安定化を明らかにしたい。「焼却残渣の科学」なるものが体系かできればと思っている。

図2には、類推される廃棄物埋立地や有効利用先における風化のプロセスを示している。焼却灰の一度限りの土木材料としての利用では、地下資源の利用削減や自然破壊の歯止めには寄与するものの、埋立処分の先送りに過ぎない。繰り返し利用しながら環境に安全までに風化、土壌化させることが可能であれば素晴らしいと考えている。

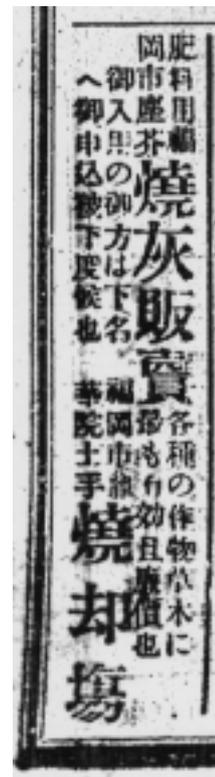


図1 肥料用厨芥焼却灰販売の新聞広告（九州日報、明治36年10月27日付）

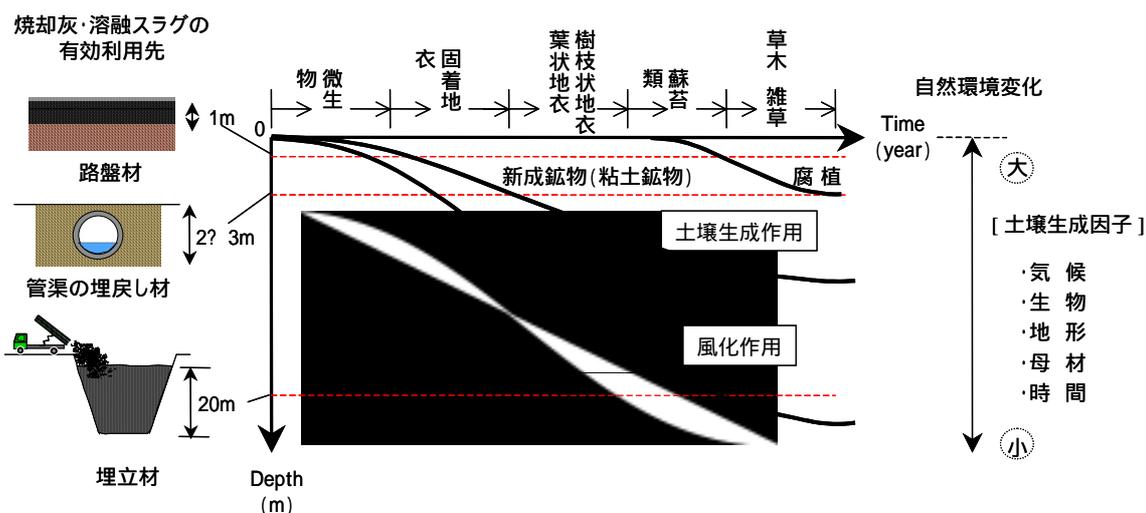


図2 焼却灰風化のプロセス

3. 清掃工場は骨材工場

焼却対象ごみは「原料」、焼却灰は「骨材（土木材料）」、そして飛灰は「有害物の抽出物」であるとの見方ができるのではないだろうか。焼却灰を骨材（土木材料）として積極的に有効利用すると決めれば、焼却灰骨材の品質を高める手だては多々あると考える。まずは、原料にあたる焼却対象ごみを制御することが考えられる。焼却する廃棄物が厨芥であれば、前述したように、焼却灰を肥料として有効利用できるであろう。収集形態の変更などによって厨芥、古紙、プラスチック類、金属、ガラス等の組成割合を変えることによって、物理・化学的に異なる性状を有する焼却灰を生産することができよう。骨材に要求される品質が一般廃棄物の焼却だけで得られなければ、必要な成分を含有する産業廃棄物を混焼させることも考えられる。次に、燃焼工程の制御が考えられる。炉内への廃棄物供給速度、燃焼温度、空気送量、炉内滞留時間などを制御することによって、様々な性状を有する焼却灰が発生し、焼却灰の有効利用の用途に応じた性状のものが得られるであろう。セメント工場は、セメントの燃料や原料の代替材として大量の産業廃棄物を受け入れている。廃棄物から土木材料（waste to material）の考えが、既に、ここでは実現されている。

4. 全国焼却灰の性状調査 有効利用の視点から

焼却灰の物理・化学的性状は、焼却対象廃棄物の質・量のみならず、燃焼方式・温度等にも大きく依存する。発生焼却灰の性状を十分に把握することが、焼却灰の有効利用のための第一歩であるといえる。そこで、全国の政令指定都市を中心とした10清掃工場より発生した焼却灰（ $d < 13\text{mm}$ ）の性状を調査することにした。物理・力学的性状として、密度、粒度分布、最大乾燥密度、最適含水比、修正 CBR を求めた。焼却灰間の物理・力学的性状の相異はあまり見られず、平均値は密度 2.331g/cm^3 、均等係数 13.3、最大乾燥密度 1.541g/cm^3 、最適含水比 19.8%、修正 CBR 66.6%であった。締め固めやすい骨材であり、修正 CBR も比較的高く、下層路盤材に求められる修正 CBR 20%を大きく上回り、十分な地盤支持力を発揮することが分かった。このように、焼却灰の物理・力学的性状からは、土木材料として有効利用する際の問題点は認められず、十分に利用できると判断された。

化学的性状として焼却灰中の土壤環境基準に示されている重金属について、含有量と溶出試験（環境庁告示 46 号法、JLT46）を行い、結果を表 1 に示す²⁾。鉛の溶出濃度が土壤環境基準値（ 0.01mg/l ）を超過する傾向を示し、10 施設中 8 施設で基準値を越えた。焼却灰の有効利用においては、この鉛の溶出に十分注意する必要がある。しかし、薬剤処理によって溶出濃度は土壤環境

表 1 全国 10 都市の精巢工場から排出された焼却灰の化学的性状

工場名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J _M	J _A	J _N	J _J	
重金属含有量	Cd (mg/kg)	6	9.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	4.1	8.7	6.2	11.7	<0.1
	Pb (mg/kg)	1060	663	1120	294	3330	1540	322	1330	555	1290	1610	1300	836
	Ce (mg/kg)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	T-Cr (mg/kg)	326	329	188	174	197	462	149	546	73.7	230	321	330	317
	As (mg/kg)	13.5	3.48	3.6	5.66	2.65	<0.1	1.87	2.43	3.6	4.94	4.86	3.95	3.37
	Zn (mg/kg)	-	3080	2900	2330	4160	7330	1310	3230	-	-	3380	4760	3000
	Hg (mg/kg)	0.476	0.419	<0.005	<0.005	0.24	3.91	0.239	0.37	0.4	<0.005	<0.005	<0.005	0.23
溶出試験	pH (-)	12.3	12.6	11.2	11.4	8.8	10.8	11.5	11.9	12.5	12	11.4	11.9	12.5
	Cd (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Pb (mg/l)	0.8	1.4	0.82	<0.01	<0.01	0.54	0.03	0.12	1.49	0.04	0.18	2.86	3.03
	Ce (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cr ⁶⁺ (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	As (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Hg (mg/l)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

Jの添字M,A,N,Jは、それぞれ5月、8月、11月、1月に採取したことを表す。

基準値を満足するとともに、一週間程度のエージング（焼却灰を湿潤状態で大気中に放置）で鉛は不溶化し、土壌環境基準値を満足することを確認した。

5. 骨材としての焼却灰有効利用の取り組み

現在、我が国の一般廃棄物の最終処分量は年間約 1,051 万トン（2000 年度実績）³⁾ にのぼり、最終処分場の残余容量不足はより深刻さを増している。埋立廃棄物の約半分を占める一般廃棄物焼却残渣を循環資源として有効利用することは、循環型社会の実現にとって不可欠であり、早急な対策が社会から要請されている。一方、我が国の総骨材需要量は、ここ数年、景気の影響で減少傾向にあるが、それでも約 8 億トン前後で推移している⁴⁾。発生焼却灰の全量を骨材として再利用しても、総需要量の 1%にも達せず、市場へ与える影響は小さいと考えられる。問題となるのは、やはり、焼却灰骨材の品質、特に重金属の溶出についてである。加えて、2003 年 2 月に施行された土壌汚染対策法では、新たに含有量基準値が設定されたことから、これまで以上に有効な資源化技術の確立が急務となっている。

ここでは、焼却灰有効利用の重金属不溶化を目的とした比較的簡易、かつ安価な方法として、(1)炭酸化処理、(2)高温・高圧処理を紹介する。

(1) 炭酸化処理⁵⁾

炭酸化とは、溶液中のカチオンが溶解した炭酸ガスと反応することによって炭酸塩化することである。生成した炭酸塩、例えば炭酸鉛等は難水溶性である。炭酸化処理で必要とする炭酸ガスは清掃工場から十分に供給されることから、実排ガスを有効利用した炭酸化処理が可能となれば、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できる。

ここでは、実際の清掃工場において、図 3 に示す処理フローで炭酸化処理実証試験を行った。実験に用いた焼却炉排ガスは、煙突入口より導入し、装置内での反応後、誘引通風機入口へ戻した（写真 1 参照）。

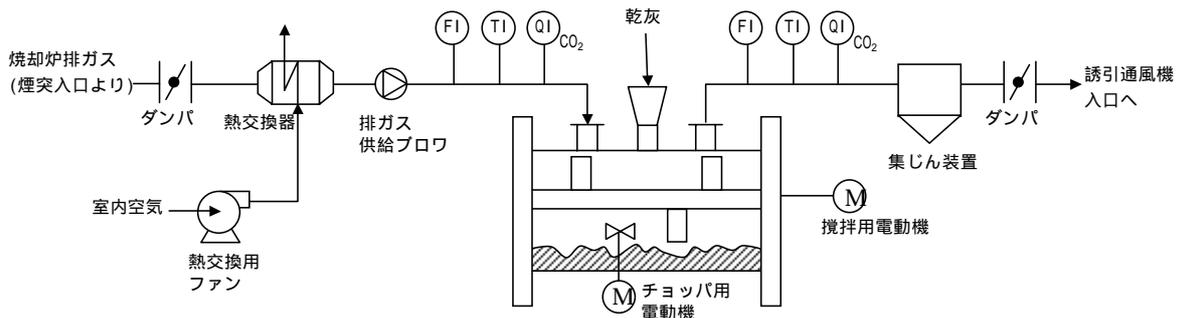


図 3 焼却灰の炭酸化処理実証装置フロー



写真1 焼却灰炭酸化実証装置本体（W450cm×L250cm×H200cm，内容積約50L）

実験では、乾燥させた焼却灰 6kg を装置本体に投入し、所定の水分を添加後、装置入口焼却炉排ガス流量を 400L/min、排ガス温度を約 30 に調整して焼却炉排ガスを通気し、炭酸化処理を行った。鉛の溶出濃度（JLT46）と炭酸化処理時間の関係を図 4 に示す。時間とともに処理灰の鉛溶出濃度は低下し、添加水分率 10% の場合は処理時間 30 分までに、添加水分率 5、15% の場合は処理時間 60 分までに、それぞれ土壤環境基準値（<0.01mg/L）を満足した。また、炭酸化処理装置入出口ガスについて分析した結果、炭酸化処理過程におけるガスの顕著な汚染は認められなかった。このように、実排ガスを有効利用した炭酸化処理は、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できる。

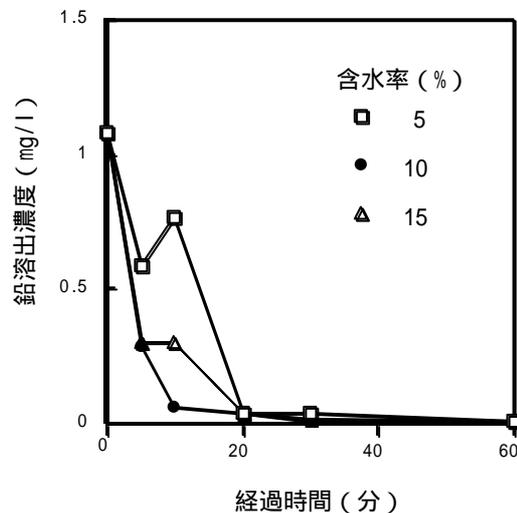


図4 炭酸化処理における鉛の溶出濃度の経時変化

(2) 焼却灰の湿潤・乾燥処理，高温・高圧処理⁶⁾

焼却灰もまた、土壤生成因子が作用することによって土壤化していくことが十分に期待される。湿潤・乾燥処理，高温・高圧処理は、焼却灰に水分，温度，圧力を変化させ，重金属の溶出を抑制させることを目的としている。

具体的に、実験結果の一例を紹介しよう。図 5 は、含水率 30% に調整した焼却灰試料を 60 ，または 110 で乾燥させ、再び含水率 30% にする操作を 1 工程とし、この工程を繰り返したときの溶

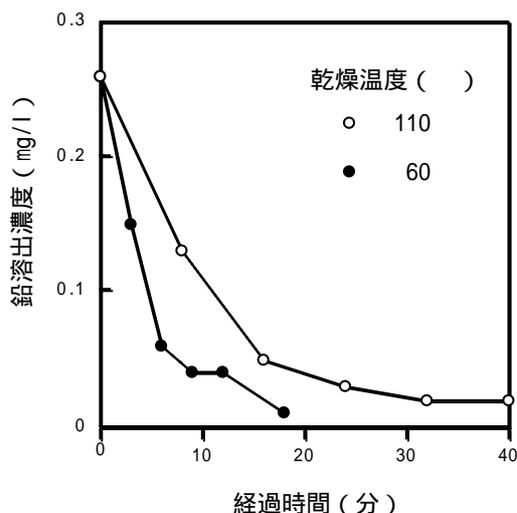


図5 湿潤・乾燥実験における鉛の溶出濃度の経時変化

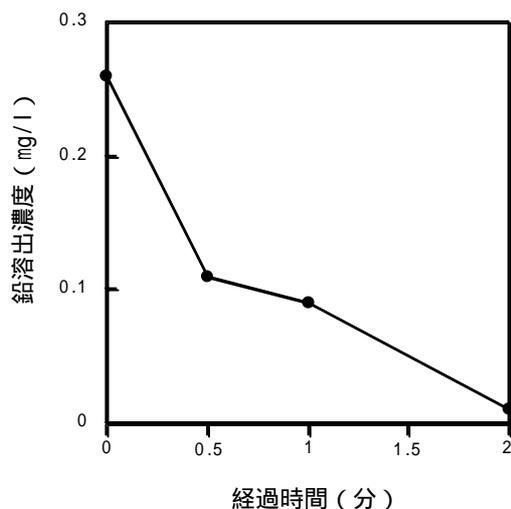


図6 高温・高圧実験における鉛の溶出濃度の経時変化

出試験 (JLT46) 結果を表す。湿潤・乾燥工程を繰り返すことによって、鉛の溶出濃度が減少し、特に、乾燥温度 110 °C では、6 時間の乾燥を 3 回繰り返した後、土壤環境基準を満たした。

次に、オートクレーブを用い、焼却灰を高温・高圧下に曝露した際の鉛溶出量 (JLT46) の経時変化を図 6 に示す。加熱・加圧時間の経過とともに鉛の溶出濃度が減少し、2 時間後に土壤環境準値以下となった。

清掃工場における高温・高圧蒸気を利用することによって、焼却灰を高温・高圧下に配置することが可能であることから、本法もまた、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できるといえる。

6. 既埋立廃棄物のセメント原料化 埋立地の再生と蘇生

我が国のセメント生産量は減少傾向にあるが年間 8,000 万トン程度であり⁷⁾、一方、一般廃棄物の焼却残渣発生量は年間約 600 万トンである。発生する焼却残渣の全量がセメント原料として有効利用されれば、焼却灰のセメント原料化は、極めて有効な焼却灰の有効利用方法となる。

ここでは、最終処分場を資源の循環基地ともいえる「Recyclable Landfill (循環型埋立地)」と捉える。すなわち、清掃工場から排出される焼却残渣を直ちに洗浄してセメント化するのではなく、埋立地に焼却残渣を持ち込み、洗浄水としての雨水を適切な方法で積極的に受け入れることによって、効率よく焼却灰中の塩素を溶脱させようとするのである。

図 7 は、埋立模型槽に焼却灰主体の廃棄物を充填し、約 3 年間、屋外暴露させたときの浸出水中の塩素濃度経時変化を表す⁸⁾。時間の経過とともに浸出水中の塩素濃度は減少した。また、埋立模型槽解体後の塩素含有量は平均で 0.05% 程度であり、初期塩素含有量の 98% が除去されていた。

次に、ストーカー炉焼却残渣、および 20 年が経過した実際の埋立処分場から採取した既埋立焼却残渣中の塩素含有量をそれぞれ表 2, 3 に示す⁹⁾。福岡県下の清掃工場から排出された直後の焼却残渣中の塩素含有量は、焼却灰で 0.9~5.2%、飛灰で 11.0~23.0% と非常に高かった¹⁰⁾ が、既埋立焼却残渣中の塩素含有量は、埋立深度によるが、0.03~0.41% であり、かなり脱塩が進行していたことがわかる。これらのことから、最終処分場を Recyclable Landfill と位置づけ、セメント工場で受け入れ可能な塩素含有濃度に達した時点で埋立地内の焼却残渣を掘削し、セメント原料として有効利用する。このことによって、埋め立てのスペースを再確保することが可能となり、繰り返して埋立空間を利用することができる。確保に困難を極めている最終処分場の延命化や規模縮小につながる事が期待される。

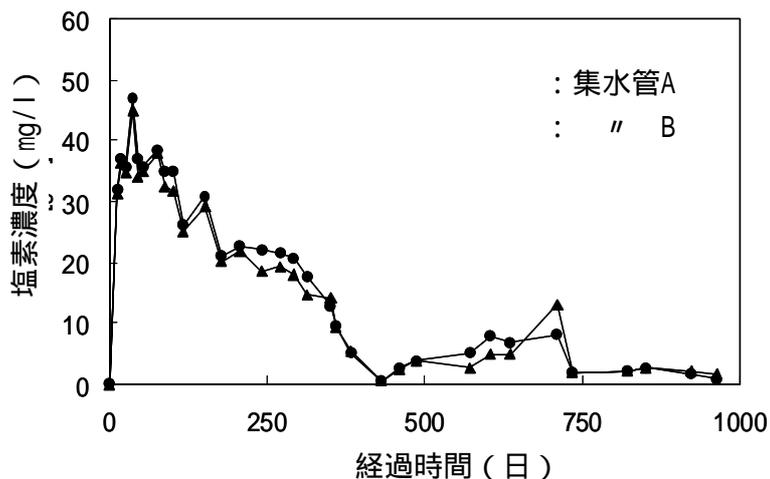


図7 浸出水中塩素濃度の経日変化

表2 ストーカー炉焼却残渣中の塩素含有量

試料	塩素含有量 (%)	
	A町	B町
焼却灰 1	1.040	4.429
" 2	1.071	1.288
" 3	1.005	0.762
" 4	0.999	0.870
" 平均	1.029	1.837
飛灰 1	12.56	15.89
" 2	11.47	14.85
" 平均	12.02	15.37

表3 既埋立焼却残渣中の塩素含有量

試料名	塩素含有量 (%)
焼却残渣 1	0.028
" 2	0.046
" 3	0.049
" 4	0.048
" 5	0.413
" 6	0.177
平均	0.127

7. 焼却灰有効利用に際しての課題

焼却灰有効利用に向けて解決すべき課題は多いが、日頃考えている課題を列挙すると以下のようになる。

(1) 利用先の環境モニタリング手法の確立 (安全性確保)

近々、資源が枯渇する中において、廃棄物を有効利用することを躊躇してはならない。長期的な安全性を予見することは難しい。しかし、現時点の技術レベルで安全であることが確認されれば、果敢に循環資源として利用すべきである。安全性が確保されるまでは、利用先でのモニタリングを継続し、またデータの蓄積に力を注ぐべきである。

(2) 焼却対象ごみの性状制御と燃焼方式の改善による焼却灰性状の安定 (品質保証)

焼却灰を土木資材として有効利用するには、安定した性状を有する質の高い焼却灰を排出することが求められる。そのためには、焼却する廃棄物、燃焼工程の精度高い制御が不可欠である。

(3) 用途規制と用途開発

総骨材需要量に対して、焼却灰の発生量は 1%未満と僅かな量である。焼却灰の性状を活かせる用途、市民の合意が得られる用途への有効利用に限るべきである。新たな用途開発のための努力も求められる。

(4) 情報管理と公開

いつ、どこに、どのような用途で、どれだけの量の焼却灰を有効利用したのかを記録に留め、情報を管理しておくことが大切である。有効利用された焼却灰を散逸させないために、またリサイクル（繰り返し利用）のためにも不可欠である。それらの情報も公開されるべきである。

(5) 焼却灰再利用に関連する法的整備

何と言っても、法的な整備がなされなければ、焼却灰の有効利用の全国展開は困難である。そのためにも、焼却灰の有効利用が環境面において問題がないことが科学的に明らかにされなければならない。(1)の環境モニタリングにも通じるが、欧州、特にオランダでは焼却灰の全量を有効利用しており、焼却灰有効利用の先進国からの情報を積極的に入手し、活用すべきである。日々、環境が劣化している中で、猶予してはならない。

最後に、米国では焼却のことを 'waste to energy' と言う、発電による廃棄物からのエネルギー回収 (thermal recycle) を意味している。資源消費大国の日本では、さらに進めて、焼却による 'waste to material' を実現したいものである。

[参考文献]

- 1) 日本土壌肥料学会編：火山灰土， 生成・性質・分類 ，博友社，1983
- 2) 福岡大学工学部土木工学科：全国一般廃棄物焼却灰の性状調査 土木資材への有効利用に向けて ，1999.3
- 3) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況について，2003.3
- 4) 経済産業省製造産業局窯業室編：砕石統計年報，2000
- 5) 島岡隆行，瀬戸俊之：埋立処分量削減を目的とした廃棄物処理残さの土木資材化と環境負荷低減化技術，平成 14 年度環境省廃棄物処理等科学研究費補助金研究報告書，2003.3
- 6) 中野彰子，崎田省吾，島岡隆行：人工的土壌生成因子の作用に伴う焼却残渣の鉛不溶化現象，第 13 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.841-843，2002
- 7) 通商産業大臣官房調査統計部編：生コンクリート統計年報，1997
- 8) 堀直子，崎田省吾，宮脇健太郎，島岡隆行：覆土膜構造を有する埋立地の安定化に関する研究，第 13 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.966-968，2002
- 9) 松田賢士，簗原伸二，島岡隆行：既埋立焼却残渣中の塩分の性状について，第 13 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.960-962，2002
- 10) 焼却残渣の循環資源化研究会（九州大学）：セメント工場を活用した焼却残渣の資源化技術成果報告書，2003
- 11) 太平洋セメント株式会社ゼロエミッション事業部：灰水洗システムを利用した都市ごみ焼却残渣のセメント資源化技術，都市と廃棄物，Vol.32，No.5，2002

本原稿は、月刊廃棄物（日報アイ・ビー，2003年10月号，pp.4-9）に掲載されたものである。