廃棄物学会

「廃棄物試験・検査法研究部会」

1997 年度報告書

1998 年 3 月

はじめに

廃棄物学会「試験・検査法研究部会」は、平成８年５月２８日の廃棄物学会総会の日に発会式を行い、以来２年近く活動を行ってまいりました。

本研究部会は、廃棄物に係わる試験法、検査法、評価法について実務的な検討を長期的に実施していこうという考えの下に設置されました。当初、様々な様式で把握されているごみ質を利用しやすい形にとりまとめることを検討する「ごみ質サブ研究会」と、廃棄物の分析法とりわけ溶出試験法を検討する「化学性状サブ研究会」を発足させましたが、平成 10 年度には、新たに「バイオアッセイサブ研究会」を発足させようとしています。

「バイオアッセイサブ研究会」では、各分野で検討が進められているバイオアッセイを廃棄物管理及び廃棄物処理施設の管理に適用することを目的として、その適用方法、結果の評価方法等について、知見を集積し、情報発信することを目的としています。

このように、本研究部会はそれぞれ内容の異なる３つのサブ研究会を擁しようとしておりますが、本報告書では、平成９年度の活動成果として、「化学性状サブ研究会」における活動をとりまとめております。具体的には、①平成９年度の第８回研究発表会時に行った小集会での発表を再整理した論文、及び②溶出試験の文献レビューから構成されております。

ご一読いただき、活動に対して建設的なご意見をお寄せいただければと思っております。また、他の２つのサブ研究会の活動につきましても順次報告していく予定にしております。ご期待下さい。

試験・検査法研究部会
代表　河村清史
（国立公衆衛生院廃棄物工学部）

廃棄物学会「廃棄物試験・検査法研究部会」

１９９７年度報告書

目次

１．廃棄物の溶出試験に関する考え方 ―――――――――――――――――――――――― 1

１－１　溶出試験方法の今日的動向 ―――――――――――――――――――――――― 1
（京都大学　酒井伸一）

１－２　土木分野における再利用に関する溶出試験 ―――――――――――――――― 10
（建設省土木研究所　尾崎正明）

１－３　廃棄物管理におけるリスク管理と溶出試験の意義 ―――――――――――――― 18
（国立公衆衛生院　大迫政浩）

２．廃棄物の溶出試験に関する文献レビュー ―――――――――――――――――――― 35

参考資料　廃棄物の溶出試験に関する文献集 ―――――――――――――――――――― 49

１．廃棄物の溶出試験に関する考え方

「溶出試験方法の今日的動向
ー欧州におけるHarmonizationの動きを含めて」

京都大学　酒井　伸一

要　旨

循環型社会形成を推進していくためには、二次資源、再生資源の使用原則を考えなければならない。そして、通常は一次資源を用いた製品より化学組成が多様になる二次資源利用に伴う環境影響に、より配慮を要する状況が予想される。つまり、二次資源利用と環境汚染の未然防止という二途を追わなければならないのである。一方、溶出試験は廃棄物を取り扱う行政担当者、分析担当者、研究者などにとってなじみの深い問題であり、また日々頭を悩ませることも多い。これまで、溶出試験に関する比較的多くのデータや解釈が報告されているが、これらが体系的に整理、論述されることは少なかった。また、広域的な酸性雨問題や埋立処分における塩類問題など、溶出試験が前提とすべき環境条件も変化してきている。こうした点をふまえ、本報告ではまず欧米各国の溶出試験方法の比較と解釈から、最近の欧州におけるHarmonizationの動向、そして粒状物と成型物の評価体系の考え方について考える。

1. はじめに
2. 欧米各国の溶出試験方法とその解釈

   廃棄物学会誌,7[5],383-393(1996)
3. アベラビリティ試験とpH依存性試験

   廃棄物学会論文誌,6[6],225-234(1995)
4. EUにおけるHarmonizationの動向

   WASCON'97, 資料①
5. 粒状物と成型物の評価体系の考え方

   環境庁告示46号条件、アベイラビリティ条件下での

   <2mm, 10-30mm, 20-50mmの比較、資料②

資料①

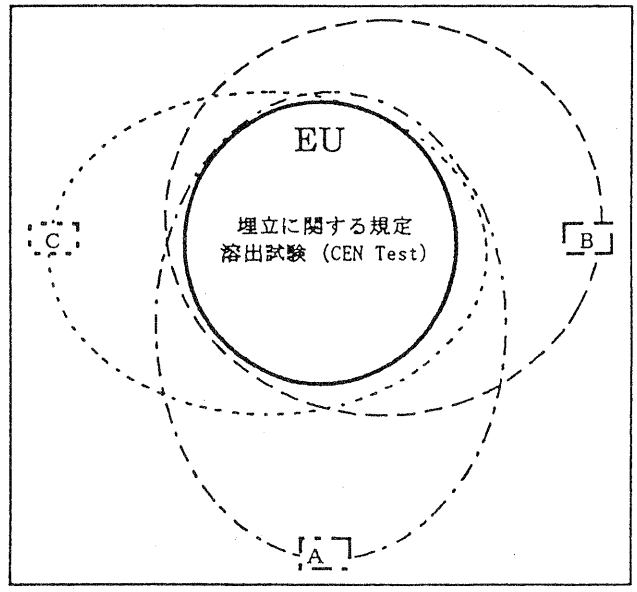
CEN testの今後の動向と溶出試験の統一化（harmonization）について

京大環境保全センター

近年EUでは，政治的，経済的な政策を統一していく動きが進みつつあるが，廃棄物の分野についても例外ではない。特に廃棄物の溶出試験に関しては，EU全体で統一した試験方法を採用するための技術的検討委員会が結成され，議論が進められている。ここでは，その統一法として考えられているCENテストの概要を述べる。またそれと平行して，廃棄物の溶出試験に関するこれまでの研究から，さまざまな廃棄物に対する既存の溶出試験／抽出試験を統一させることが出来るのではないか，という動きもある。こちらは溶出試験の統一化（harmonization）と呼ばれているが，こちらについても入手可能であった情報についてまとめた。

EUでの廃棄物に関する共同の動き

EUは廃棄物に関するさまざまな規定（埋立に関する基準，溶出試験方法など）を統一する意志を持っており，それへ向けて審議も進んでいる。ただしそこで決定される基準は，EU全体のあくまでも最低限の基準であり，各国がさらに独自の事情により，そこへ上乗せ基準，横出し基準を設定する，という形になるだろうと言われている。例えばMoは，オランダでは重視されており，オランダ国内での基準は設定されるが，EU全体の基準項目には含まれないであろうとのことであった。



CENテストとTC292

EUの中には，現在さまざまな技術検討委員会があるが，廃棄物の溶出試験に関しては，技術検討委員会TC292で議論されている。TCとはTechnical Committeeの略であり，292は廃棄物管理に関して検討している委員会の番号である。なおCENとは，European Committee for Standardization（欧州標準化委員会）のオランダ名（Comite Europeen de Normalisation）の省略形である。

技術委員会TC292は，焼却や埋立といった処分される廃棄物のみならず，再利用可能な廃棄物についても対象とし，それらの最終処分後のあるいは，再利用後の無機有害物質の環境影響を把握するための溶出試験について検討している。具体的な対象物質は，石炭火力発電所や廃棄物焼却炉からの飛灰や主灰，あるいは多くの種類のスラグなどである。

この技術委員会では，異なる環境により使い分けるために以下の３つのタイプの溶出試験を検討している。

- 規制試験（copliance test）：規制値（limit value）を満足しているかをあらかじめ知るための試験
- 特性化試験（characterization test）：調査する物質に関する広い知識を与える試験
- 現場確認試験（on site verification test）：埋立地での受入時に，廃棄物が事前の報告と一致しているかを把握する簡易試験

①

はじめの２つの試験は，２つのWG（WG2とWG6）によって検討されている。この両試験の目的は，ある物質の溶出特性の完全な調査についても一旦しっかりとした特徴付けをしておけば，短時間で比較的簡単な規制試験を利用することにより，環境影響を完全にチェックできるような試験方法を決定することである。いずれのWGにおいても，異なるプロセス（浸透，拡散，溶解など）によって支配されている溶出がおこる物質に対しては，別の試験方法を用意すべきであるとされており，その試験の枠組みは，主な溶出の支配機構によって異なっている（浸透試験やカラム試験　対　タンクリーチング試験）。

規制試験に関しては，WG2が検討している。現在標準化法として提案されている溶出試験は粉末廃棄物（granular material）に対する規制試験：（prEN 12457）のみである。この試験は，３つの異なる試験法，すなわち１．L/S＝２の振とう試験，２．L/S＝10の振とう試験，３．L/S＝２および８の２段階バッチ振とう試験　があり，利用者は状況に応じて使い分けることとされている。抽出溶媒にはイオン交換水（demineralized water）を用いる。この規格を背後から後押しするものとして，廃棄物の埋立に関するヨーロッパの指令（European Directive on the landfill of waste）がある。

また拡散に支配された溶出挙動を示す廃棄物からの溶出試験として，モノリス状廃棄物に対する規制試験が現在検討されているところである。ガイドラインとして公表されるべく，現在ヨーロッパの標準法案（European Prestandard (ENV)）として準備中であり，今年の終わり頃にドラフト（methodology document 及びexperimental standard）が提出される予定である。このガイドラインの中では，廃棄物の実際の溶出挙動を模擬する試験と，特定のパラメータが溶出挙動に与える影響を見るための試験とが区別されている。試験方法としては前者に関しては，減圧加速を用いた促進タンクリーチング試験（蒸留水を溶媒として，２，８，25時間後に溶媒を入れ替えるもの）が議論されており，後者に関しては，pH stat型の溶出試験として，ANC-type（TCLPのように一定量の酸度を有する溶液を抽出溶媒に用いるもの）とpH stat-type（アベイラビリティ試験のように，pHの目標値を設定し，酸の添加量は考慮しないもの）が，またカラム試験としてsatulated with up-flow（アップフローにより試料が完全に溶媒で覆われるもの）とnot satulated with down-flow（ダウンフローにより，溶媒以外に空気の触れる余地があるもの）等が検討されているようである。

一方これとは別にTC292の中には，WG6というワーキンググループもある。こちらは，廃棄物の特性化のための溶出試験について検討している。WG6が目指しているCharacterization testの一例は，右に示すようなものであり，廃棄物からの溶出現象を正確に把握するために，最低限必要な試験の組み合わせになっているが，規制試験と比べて複雑になっている。今後，この試験方法がどこまでcompliance testに反映されるようになるかは，WG6のメンバーの努力次第，との話であった。

<u>characterization test</u>
L/S＝２　(own pH)
L/S＝10　(own pH)
L/S＝10　pH　8　stat
L/S＝10／50　pH　4　stat
測定項目：金属，pH，Eh
DOC，TDS

なお，ここで検討されている標準化溶出試験は，無機成分の溶出に限って適用されるものであり，有機成分の溶出に関しては，標準法を確立するには更なる多くの研究が必要であるとされている。

EUにおけるharmonizationの現状について

現在EUでは，溶出試験の標準化のための技術検討委員会として，次の表のものが機能している。

母体	委員会	検　討　対　象
ISO	TC 190	土壌
CEN	TC 292	廃棄物の特性化
CEN	TC 308	汚泥の特性化
CEN	TC　51	セメント及び建築用石灰
CEN	TC 104	コンクリート
CEN	TC 154	骨材
CEN	TC 164	上水道
CEN	TC　38	木材と関連製品の耐久性
CEN	TC 309	履き物（Footwear）

ISO/TC 190 (Soil Quality)

土壌の場合には，溶出試験で溶媒として用いた液体によりもたらされる非常に異なる２つの問題を調整する必要がある。一つの問題は，植物による栄養分（neutrients）の最大吸収可能量であり，もう一つは，環境的に有害な成分のアベイラビリティ，すなわち（汚染された）土壌から地下水への実際の溶出である。現在，異なる溶媒と異なる因子を有する，アベイラビリティを求めるためのいくつかの試験方法について，標準法としての妥当性が検討されている。

国際的な標準的な溶出試験としては，以下の溶媒を用いた４つの試験についてのdocumentが現在準備中である。

$CaCl_2$: 0.01 mol/L

$NaNO_3$: 0.1 mol/L

NH_4NO_3 : 1 mol/L

DTPA (Lindsay and Norvell method) ：ドラフト ISO/CD 14870-1として公表されている。

CEN/TC 308 (Characterization of Sludges)

この委員会では，汚泥及び汚泥からの製品，特に

・都市排水収集システム，都市廃水処理ﾌﾟﾗﾝﾄ及び類似の産業排水（EC指令91/271で定義されたもの）

・上水道処理プラントや排水システムからの汚泥。これらの汚泥は鉱物からなる製品であり，固体の粉末廃棄物に似ている。それらの抽出／溶出挙動は処理プロセスや試験条件に大きく依存している。

CEN/TC 51 (Cement and Building Limes)

CEN/TC 104 (Concrete)

この２つの委員会は，コンクリートの品質に関するDG#XIIによって資金援助された予備標準法（pre-normative）に関するプロジェクトで協力している。CEN/TC 164が開発している溶出試験については，溶媒に脱イオン水とイオン水（mineralized water）のどちらを使用すべきかについての議論

がなされている。最近，両溶媒を用いた試験での差異はそれほど大きくないことが明らかになりつつある。

CEN/TC 154 (Aggregates)

この委員会は，まもなく，骨材に関するcompliance試験を開発するための議論を始めるであろう。

CEN/TC 38 (Durability of Wood and Derived Materials)

この委員会は，溶出試験に関して２つの標準法を公表している。

・EN84（1989）：生物試験に先立って行う促進エージング試験－木材の防腐剤の溶出試験

・ENV 1250-2（1994）：防腐処理木材からの水および海水への防腐剤の溶出試験法

CEN/TC 309 (Footwear)

靴の廃棄物に関する溶出試験を標準化するためのCEN/TC 309による第一歩として，CEN/TC 292との議論が行われている。CEN/TC 309は，彼ら自身で溶出試験を標準化する代わりに，CEN/TC 292が開発した試験方法に従うことを決定した。粉末廃棄物に対するcompliance leaching test-(prEN 12457）は靴の廃棄物に対しても適用可能ではあるが，靴への適用の可能性に関しては，懸念がある。製品の物質（皮）はほとんどが有機物であり，埋立後には非常に速やかに生物による分解を受け，その結果，全く異なる溶出挙動を示すことになる。このことが，なぜ，製品そのものに対して溶出試験を行うのか，また分解プロセスを考慮すべきなのではないかという，もっともな疑問をもたらしている。

以上のようなさまざまな分野に関する検討委員会が発足し，議論がなされており，お互いの間で情報交換はなされているようである。しかしながら，実際に溶出試験法を統一して行くにはもう少しの時間を要するものと思われる。

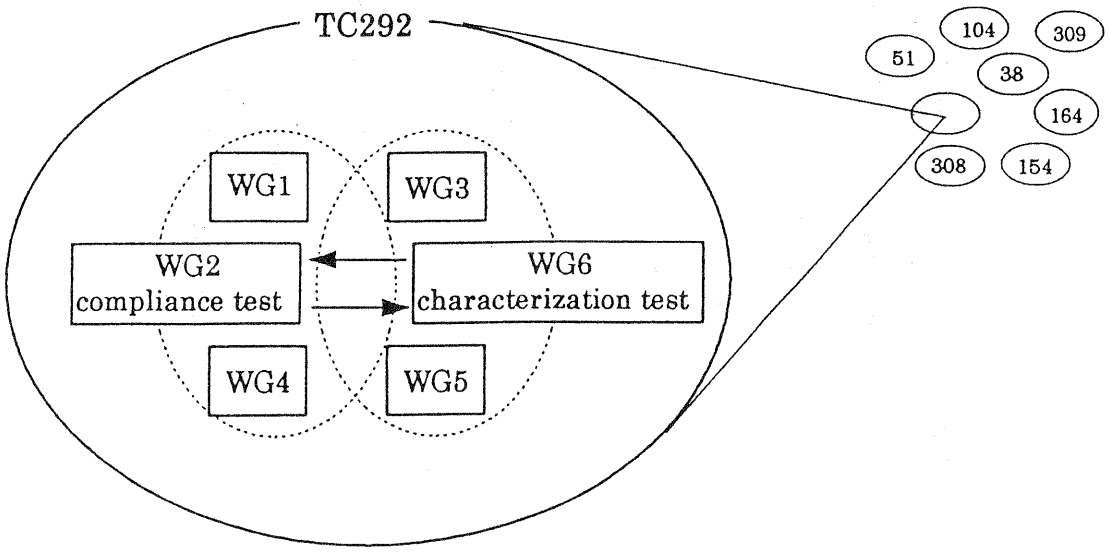


Table 1. Investigation Samples

No	Sample	Sort	Shape
1	Portland cement (using waste)	Regenerated product	Powder
4	Asphalt	Existing product	Solid
5	Lime	Existing material	Powder
13	Road marking paint (Yellow)	Existing product	Powder
18	Steel slag (electric furnace)	Existing material	Powder
26	Interlocking block	Existing product	Solid
33	Lead glass	Existing product	Solid
35	Permeable block (made of incineration ash)	Regenerated product	Solid
40	Slow cooled slag	Regenerated product	Solid
42	Improved slag	Regenerated product	Solid

Table 2. Analyzed Leaching Tests

Test	Environment Agency Notification No.46 (JLT-46)	Availability Test (NEN7341)	Environment Agency, Revised Notification No.46	CO_2 Saturation Method (Open system)	CO_2 Saturation Method (Closed system)	Low-pH Stat Test
Container for leachate	1L polyethylene bottle	1L glass beaker	1L polyethylene bottle	1L glass beaker	1L polyethylene bottle	1L glass beaker
Sample	< 2 mm	< 125 μm	10 – 30 mm or 20 – 50 mm	10 – 30 mm or 20 – 50 mm	10 – 30 mm Uncrushed	10 – 30 mm or 20 – 50 mm
Sample mass	50 g	16 g	50 g	100 g	50 g	16 g or 160 g
Solvent	Distilled water (adjusting to pH 5.8-6.3 by HCl)	Distilled water or nitric acid (at the 1st extraction, maintaining pH 7, and at the 2nd time, maintaining pH 4)	Distilled water (adjusting to pH 5.8-6.3 by HCl)	CO_2 gas saturated water (pH 4)	CO_2 gas saturated water (pH 4)	Distilled water or nitric acid (at the 1st extraction, maintaining pH 7, and at the 2nd time, maintaining pH 4)
Liquid to solid ratio	10 : 1	50 : 1	10 : 1	10 : 1	10 : 1	50 : 1 or 5 : 1
Leaching frequency	1	2 (see footnote)	1	1	1	2 (see footnote)
Leaching method	Horizontal shaking (200 times/m, amplitude: 4-5 cm)	Stirrer	Horizontal shaking (200 times/m, amplitude: 4-5 cm)	Sample being on the net and stirring, or impeller mixing (200 rpm)	Horizontal shaking (200 times/m, amplitude: 4-5 cm)	Sample being on the net and stirring, or impeller mixing (200 rpm)
Leaching time	6 h	3 h x 2	6 h	24 h	6 h or 24 h	3 h x 2
Filtration	After 20 min-centrifugal separation at 3000 rpm, suction filtration with 0.45 μm MF	Suction filtration with 0.45 μm MF	Suction filtration with 0.45 μm MF	Suction filtration with 0.45 μm MF	Suction filtration with 0.45 μm MF	Suction filtration with 0.45 μm MF
Temperature	Ordinary	Ordinary	Ordinary	Ordinary	Ordinary	Ordinary

Note: New solvent is added to filter residues and the leaching test is repeated.

Table 3. Composition Analysis

No	Sample	Pb	Cd	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Na	K	P	S
1	Portland cement (using waste)	52	10 >	7190	20700	394000	69	564	14600	62	45	534	1380	3930	600	9390
4	Asphalt	20 >	10 >	6070	13000	26400	999	528	21200	82	26	96	770	3510	257	3140
5	Lime	20 >	10 >	4370	1360	618000	17	41	302	10 >	10 >	23	129	142	100	1700
13	Road marking paint (yellow)	7750	10 >	477	196	242000	1150	10 >	56	10 >	10 >	24	223	62	30 >	430
18	Electric furnace slag	120	15	14700	82600	112000	10 >	10 >	48800	10 >	10 >	10 >	191	9100	5200	520
26	Interlocking block	20 >	10 >	14000	30600	156000	10 >	1360	14400	10 >	10 >	10 >	900	3050	300	880
33	Lead glass	536000	10 >	36	453	1960	12	10 >	170	10 >	39	16	4700	15600	30 >	30 >
35	Permeable brick	197	10 >	12200	65100	148000	391	328	35200	119	309	792	31600	5400	3370	750
40	Slow cooled slag	20 >	10 >	11400	76000	15200	122	944	11700	10 >	73	120	32500	9700	180	580
42	Improved slag	20 >	10 >	32700	99500	199000	529	432	6700	67	81	10 >	29600	50	191	3910

Table 4. Particle Size and Leaching Concentration (mg/l)

No.	Sample	Leaching Test	pH	Pb	Cd	Cr^{6+}	T-Hg	As	Se
4	Asphalt	JLT-46	9.7	0.01 >	0.01 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (10-30)	6.8	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		JLT-46 (20-50)	7.0	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.002	0.01 >
		Av	7 → 4	0.16	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	7.8	0.027	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	7.9	0.046	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
26	Interlocking block	JLT-46	12.6	0.037	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (10-30)	12.1	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		JLT-46 (20-50)	12.0	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av	7 → 4	0.11	0.005 >	0.02 >	1.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.006	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.006	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	7.7	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	7.8	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
33	Lead glass	JLT-46	8.9	1.01	0.01 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (10-30)	7.1	0.18	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		JLT-46 (20-50)	6.9	0.188	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.002	0.01 >
		Av	7 → 4	277	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.102	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.108	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	7.7	0.203	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	7.5	0.141	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
35	Permeable brick (manufactured from fry ash)	JLT-46	9.3	0.005 >	0.01 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (10-30)	7.1	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		JLT-46 (20-50)	7.1	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av	7 → 4	0.02	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.006	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.006	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	10.9	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	9.1	0.005 >	0.001 >	0.02 >	0.0005 >	0.001 >	0.01 >
40	Slow cooled slag	JLT-46	9.8	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46(10-30)	9.3	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46(20-50)	9.0	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av	7 → 4	0.018	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	6.2	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	6.4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
42	Improved slag	JLT-46	11.7	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (10-30)	10.5	0.005 >	0.005 >	0.04 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		JLT-46 (20-50)	10.5	0.005 >	0.005 >	0.04 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av	7 → 4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (10-30)	7 → 4	0.006	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		Av L/S100 (20-50)	7 → 4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (10-30)	8.4	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >
		CO_2 (open, 24 h) (20-50)	8.3	0.005 >	0.005 >	0.02 >	0.0005 >	0.01 >	0.01 >

下水汚泥焼却灰、溶融スラグ及びそれらの再生資材からの重金属類の溶出特性

Characteristics of Heavy Metal Release from Incinerated Ashes, Melted Slags and their Re-Products of Sewage Sludge

渡部春樹*、尾崎正明*、野崎眞司**
Haruki WATANABE, Masa-aki OZAKI, Shinji NOZAKI

ABSTRACT; Several Leaching Tests were applied to incinerated ashes, melted slags and their re-products of sewage sludge for investigating their release characteristics.
It was found that final pH after leaching tests was affected by major components of samples, such as CaO, K_2O, MgO and Na_2O, and also affected by CO_2 condition during leaching test periods. The lower the final pH of leachates after leaching tests for incinerated ashes became, the higher the As and Se concentrations were observed. The concentration of other heavy metals in leachates was also measured and found to be very low. The 10 kinds of re- products made from incinerated ashes and melted slags by sintering, cement consolidation, crystallization and so on were examined by several leaching tests. The release of heavy metals from re-products was found to be much lower than those of raw materials.
KEYWORDS; Leaching Test, Release, Heavy Metal, Incinerated Ash, Melted Slag, Re-Product, Sewage Sludge, pH, CO_2

1．はじめに

下水道の着実な普及にともなって、発生する汚泥量は年々増加の一途をたどっており、その汚泥を最終的にどのように処分・利用するかというのが大きな課題になっている。このため、近年は下水汚泥の建設資材利用が大・中都市を中心に注目されており、既に地方公共団体や民間等で実用化が進められている。しかし、それらの再生資材の品質についてはそれぞれの製造者が一定の基準を定めて管理しているのが実態である。特に、再生資材からの重金属等の溶出については、統一的な試験方法等が定められていないため、ガイドライン等の作成が望まれている。

廃棄物を最終処分する場合には土壌や地下水を保全するため様々な規制があり、その中の１つとして溶出試験については、既に各国で公的な方法が定められている。例えば、わが国の環境庁告示第１３号（環告法）[1]、米国の方法[2),3),4)]、ドイツ標準溶出試験[5)]、スイス溶出試験[6)]などが知られている。金子[7)]は各種溶出試験方法の特徴等についてとりまとめ紹介している。Shively等[8)]やConner等[9)]は安定化処理を施した後の廃棄物を対象にして、その溶出特性を調べている。

焼却灰からの重金属類の溶出特性についてはThomas等[10)]やFrancis等[11)]の報告がある。溶融スラグからの溶出特性については、金子等[12)]の報告がある。しかし、下水汚泥焼却灰や溶融スラグを原料とした再生資材について、それらの溶出特性を調べた報告はほとんどみあたらない。

本研究は、下水汚泥焼却灰、溶融スラグ及びそれらを原料にして製造された再生資材を対象にして、種々

* 建設省土木研究所、 Public Works Research Institute, Ministry of Construction
** 岐阜県、 Gifu Prefectural Government

の溶出試験方法を適用し、重金属類の溶出量と、pHやイオンバランス等との関係を明らかにしたので報告するものである。

2. 実験方法

2.1 試料

下水汚泥焼却灰や溶融スラグを原料として焼成レンガやインターロッキングブロックなどが再生資材として製造されている。本実験で溶出試験のために用いた試料は、表－1に示したようにAからJまで延べ10種類の原料と製品である。原料としては、石灰等の無機凝集剤を用いて脱水し焼却して生成した灰（石灰系焼却灰）、高分子凝集剤を用いて脱水し焼却して生成した灰（高分子系焼却灰）、融液を空気中で徐冷すると生成するスラグ（空冷スラグ）及び融液を水中で急冷すると生成するスラグ（水砕スラグ）の4種類である。焼却炉としては階段ストーカ式が1ヶ所、流動床式が5ヶ所で採用されている。溶融炉では、コークスベッド式と表面溶融式が各1ヶ所、旋回流式が2ヶ所で採用されている。再生資材としては各種原料からそれぞれ特徴のある建設資材が製造されており、パイロットスケールで製造されているものを含めてできるだけ重複をさけ選択した結果、埋戻材、改良土、結晶化スラグ、焼成レンガ、路盤材が各1種類、インターロッキングブロックが3種類である。なお、試料FとIは、原料としてこの2種類を用いて透水性ブロックを製造しており、製品としては1種類となる。

表－1 溶出試験試料

試料	原料		製品	
	種類	炉形式	種類	加工方法
A	石灰系焼却灰	階段ストーカー式	埋戻材	
B	石灰系焼却灰	流動床式	改良土	焼却灰、生石灰添加
C	高分子系焼却灰	流動床式	結晶化スラグ	成分調整、結晶化
D	高分子系焼却灰	流動床式	焼成レンガ	成型、焼成
E	高分子系焼却灰	流動床式	インターロッキングブロック	セメント固化
F	高分子系焼却灰	流動床式	透水性ブロック	成型、焼成
G	空冷スラグ	コークスベッド式	路盤材	粒度調整
H	空冷スラグ	旋回流式	インターロッキングブロック	セメント固化
I	水砕スラグ	旋回流式	透水性ブロック	成型、焼成
J	水砕スラグ	表面溶融式	インターロッキングブロック	セメント固化

2.2 溶出試験方法

溶出試験方法として5種類を設定した。その条件の概要を表－2に示す。環告法①－aは、環境庁告示13号に準拠した方法である。ただし、製品の溶出試験では0.45μmと1μmのGF/Bろ紙を用いて行い両者の結果を比較した。環告法変法①－bとは、環告法にほぼ準拠しながら試料の性状、溶出時間及び攪拌方法について異なる条件設定で行った方法である。すなわち、試料は粉砕せず有姿のまま用い、溶出時間は24時間、攪拌はテフロン攪拌棒で約200回／分とした。US－EPA変法②とは、米国EPAが定めた溶出試験[2]にほぼ準拠しながら、攪拌方法を転倒式からテフロン攪拌棒での攪拌へ変更したものである。

CO_2飽和法③とは、脱イオン水1ℓに対して0.2ℓ／minの割合で二酸化炭素ガス（CO_2）を20分間吹き込んだ溶液（CO_2飽和液）を溶出液として用い、その他の条件は環告法変法に準拠した溶出試験方法である。CO_2飽和液のpHはほぼ4.0になる。CO_2連続法④とは、CO_2飽和法と同じ条件で溶出試験を開始するが、溶出時間中もCO_2を溶出液1ℓに対して0.2／minの割合で連続して吹き込む点が異なる。

表－2 溶出試験方法の概要

	環告法 ①－a	環告法変法 ①－b	US－EPA変法 ②	CO2飽和法 ③	CO2連続法 ④
試料性状	5mm以下に粉砕	有姿のまま	比表面積3.1cm2/g以上 または粒径9.5mm未満	有姿のまま	有姿のまま
溶 媒	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	CO2飽和水 (初期pH=4.0)	CO2飽和水 (初期pH=4.0)
pH値	溶出試験中は未調整	溶出試験中は未調整	0.5N酢酸を添加 pH=5 (最大添加量=4ml/g)	溶出試験中は未調整	CO2ガスを連続吹込み
溶媒／試料比 (体積重量比)	10:1	10:1	20:1	10:1	10:1
溶出時間	6時間連続振とう 常温, 常圧	24時間連続攪拌 常温, 常圧	24時間連続攪拌 常温, 常圧	24時間連続攪拌 常温, 常圧	24時間連続攪拌 常温, 常圧
ろ 過	GF／Bろ紙 1.0μm 製品：1.0,0.45μm	GF／Bろ紙 0.45μm	GF／Bろ紙 0.45μm	GF／Bろ紙 0.45μm	GF／Bろ紙 0.45μm
攪拌方法	水平振とう 約200回／分	攪拌棒(テフロン) 約200回／分	攪拌棒(テフロン) 約200回／分	攪拌棒(テフロン) 約200回／分	攪拌棒(テフロン) 約200回／分

2．3　分析方法

原料及び製品中の主要成分の含有量測定はＪＩＳ　Ｒ５２０２に準拠して行った。分析項目は強熱減量（Ig-Loss）、アルミニウム（Al_2O_3）、カルシウム（CaO）、鉄（Fe_2O_3）、カリウム（K_2O）、マグネシウム（MgO）、ナトリウム（Na_2O）、リン（P_2O_5）、ケイ素（SiO_2）、イオウ（SO_3）の１０成分である。微量成分については、マイクロウェーブを用いて原料及び製品中の金属等の可溶化処理を行った後、ＩＣＰ発光分光分析計を用いて定量した[3]。

溶出試験後の溶出液中の成分分析は、表－３に示す方法で行った。原子吸光光度計で分析した鉛（Ｐｂ）、カドミウム（Ｃｄ）、水銀（Ｈｇ）、セレン（Ｓｅ），ヒ素（Ａｓ）の定量限界値はそれぞれ0.001mg/ℓ，0.001mg/ℓ，0.0005mg/ℓ，0.001mg/ℓ，0.001mg/ℓである。ジフェニルカルバジド吸光光度計で測定した六価クロム（Ｃｒ（VI））の定量限界値は0.005mg/ℓである。分析値がこれらの定量限界値以下の場合にはＮＤとして示す。

表－3　溶出液中の成分分析

分析装置	分析項目
ICP発光分光分析計（パーキンエルマー製，OPTIMA3000）	Na, K, Ca, Mg他
原子吸光光度分析計（パーキンエルマー製，5100PC）	Pb, Cd, Hg, Se, As
ジフェニルカルバジド吸光光度計（SHIMADZU製，UV－160）	Cr(VI)
イオンクロマト分析計（Dionex製、DX－100）	Cl-, SO4 2-, PO4 3-

3．　実験結果と考察

3．1　溶出試験におけるろ紙の比較

表－２に示した環告法では1μmのＧＦ／Ｂろ紙を使用するが、その他の方法では0.45μmを使用している。ろ紙の差異が測定結果に影響を与えるかについて、再生資材の溶出試験を実施する際に検討した。その結果、再生資材の溶出試験に環告法を適用する場合に、ろ紙の違いはほとんどみられなかったことから、再生資材に環告法を適用する場合には0.45μmＧＦ／Ｂろ紙を用いることにした。

3．2　主要成分の分析結果

下水汚泥中の主要成分は、下水道の排徐方式、水処理方式、汚泥処理方式等によって大きく影響され、処理場毎に異なると考えられる。表－４は９種類の原料について、その主要成分分析の結果を示している。SiO_2が32.2％～48.7％、ＣａＯが7.54％～27.8％、Al_2O_3が7.09％～25.4％、Fe_2O_3が2.30％～12.5％、P_2O_5が2.03％～6.07％、K_2Oが0.47％～1.81％、ＭｇＯが0.56％～1.00％、Na_2Oが0.84％～1.59％、SO_3が0.51％～4.41％となっている。これらの主要成分にＩｇ－Ｌｏｓｓを加えると92.0％～98.0％に達しており、下水汚泥焼却灰や溶融スラグの主要構成成分はこれらでほとんど説明できるといえよう。

表－4　原料中の主要成分含有量

（単位：wt％）

試料	Al2O3	CaO	Fe2O3	K2O	MgO	Na2O	P2O5	SiO2	SO3	Ig-loss	計
A	7.09	27.80	12.50	0.47	0.84	0.84	2.99	32.20	1.47	5.80	92.00
B	14.10	24.80	4.57	0.87	0.78	1.05	2.03	40.60	4.41	1.10	94.31
D	24.70	9.58	4.04	1.81	0.90	1.36	6.07	42.50	1.36	1.10	93.42
E	24.70	8.68	5.64	0.92	0.99	1.23	4.72	47.50	1.05	0.80	96.23
F	25.40	8.26	9.33	1.67	0.73	1.16	5.96	43.20	0.90	1.40	98.01
G	19.20	25.60	2.30	0.49	0.56	0.98	2.55	41.90	0.74	0.80	95.12
H	25.00	8.37	7.72	1.05	0.90	1.59	3.64	44.80	0.51	1.10	94.68
I	23.20	7.54	7.00	1.76	0.89	1.23	3.63	45.60	0.67	1.60	93.12
J	24.20	9.43	4.54	1.59	1.00	0.84	3.54	48.70	1.24	0.50	95.58

これらの主要成分が各種溶出試験によってどの程度溶出してくるかをＩＣＰ発光分光分析計で測定した。その結果、原料及び製品ともＳｉ、Ｆｅ、Ａｌについてはその含有量に比べると微量しか溶出せず、それぞれＮＤ～84.7mg/ℓ、ＮＤ～1.21mg/ℓ、ＮＤ～11.6mg/ℓであった。その他の成分については、溶出条件によって、溶出量が大きく影響されることがわかった。

3．3　重金属類の溶出量と含有量

環告法による溶出試験を原料と製品に適用して、Ａｓ、Ｓｅ、Ｐｂ、Ｃｄ、Ｃｒ（VI）の溶出量と含有量の関係を示したのが図－１と図－２である。原料のＡｓとＳｅを除けば、溶出液中からはほとんど検出されなかった。また、Ｈｇの分析結果については図示していないが、すべての分析値がＮＤであったためである。

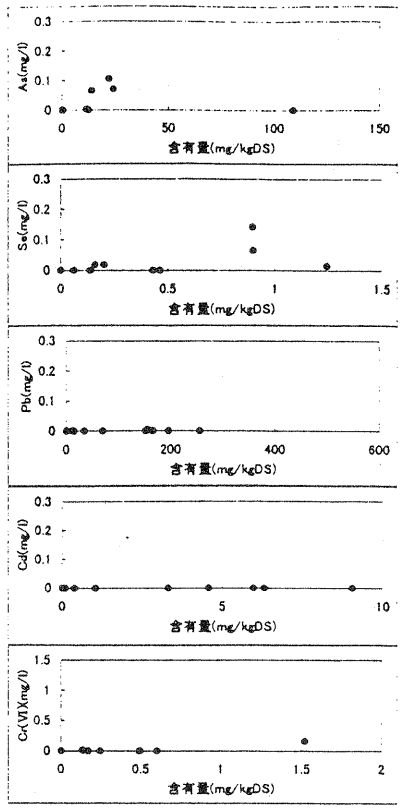
図－１のＡｓとＳｅについてみると、溶出量と含有量には明確な相関関係があるようには認められなかった。ここでは結果を示していないが、その他の溶出試験においても，Ａｓ、Ｓｅの溶出量と、含有量に良い相関はなかった。

３．４　重金属類の溶出量と最終pH

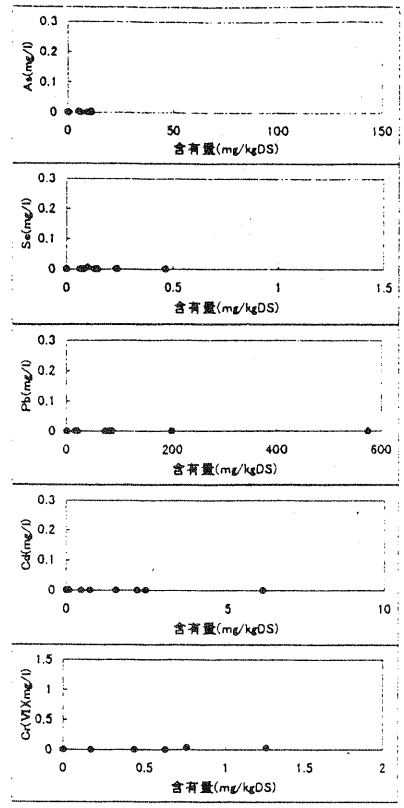
原料と製品について表－２に示した５種類の溶出試験方法を適用し、重金属類の溶出量と最終pHとの関係を示したのが、図－３と図－４である。ここで最終pHは、溶出時間経過後の溶出液のpHである。原料のＡｓとＳｅについてみると、pHが低くなるほど溶出量が大きくなる傾向が認められるものの、最終pHが４付近になってもほとんど溶出しないケースもある。最終pHが４付近でもほとんど溶出しないのはスラグ試料であった。原料のＣｒ（Ⅵ）ではCO_2連続法を適用した場合、最大0.668mg/ℓ検出されたものがあった。

また、製品ではＡｓがＵＳ－ＥＰＡ変法で最大0.095mg/ℓ、CO_2飽和法で最大0.067mg/ℓ、CO_2連続法で最大0.178mg/ℓ検出されたものがあった。

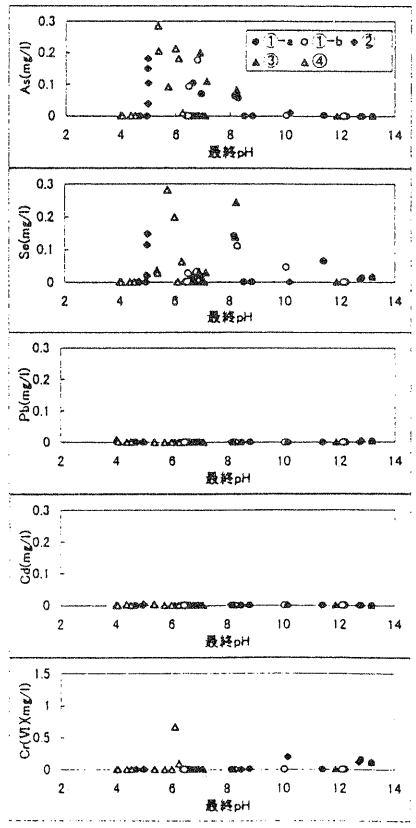
図－３と図－４の比較から明らかなように、比較的溶出し易いＡｓとＳｅにおいても、製品として加工することによって溶出量が大幅に減少することが認められる。Ｐｂ、Ｃｄ、Ｃｒ（Ⅵ）の溶出量は、それぞれＮＤ～0.007mg/ℓ、ＮＤ～0.005mg/ℓ、ＮＤ～0.099mg/ℓであった。Ｐｂ、Ｃｄ、Ｃｒ（Ⅵ）の含有量がそれぞれ600mg/kg・DS以下、10mg/kg・DS以下、1.5mg/kg・DS以下であれば、今回の溶出条件下では「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」に定められている下水汚泥に係る基準値に比べると大幅に低い値であった。水銀についてはいずれの試料についても溶出液中の濃度がＮＤであった。



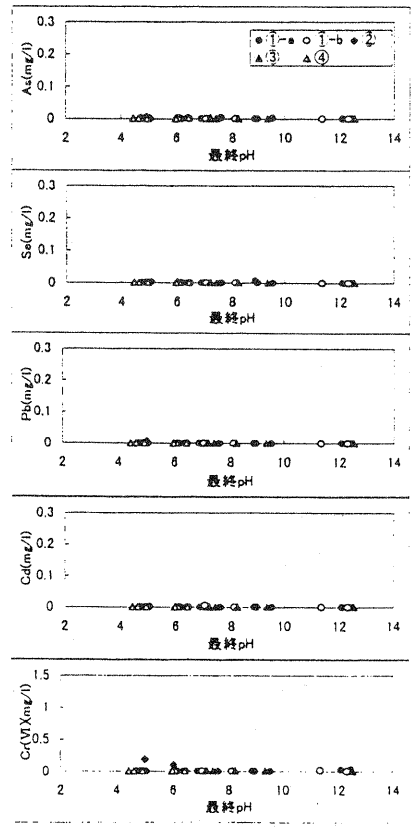
図－１　環告法による溶出液中の溶出量と含有量の関係（原料）



図－２　環告法による溶出液中の溶出量と含有量の関係（製品）



図－３　溶出量と最終pHの関係（原料）



図－４　溶出量と最終pHの関係（製品）

３．５　溶出液のイオンバランスと最終pH

図－３から明らかなように、焼却灰からのＡｓやＳｅの溶出はpHが低くなるほど溶出量が大きくなる傾向が認められることから、溶出液の最終pHがどのような因子によって影響されているかを検討した。ここで、ＵＳ－ＥＰＡ変法については0.5Ｎ酢酸を添加して強制的にpHを５にする操作がなされるため、ここでは検討対象からはずし、表－２の①－ａ、①－ｂ、③、④の変法について検討することとした。

（１）溶出液pHとＣＯ₂の関係

溶出時間中におけるＣＯ₂ガスの連続吹き込みや空気中のＣＯ₂の取り込みによって、溶出液のpHは影響を受ける。

$$CO_2+H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^++HCO_3 \rightleftarrows 2H^++CO_3^{2-} \quad \text{反応式（1）}$$

空気中のＣＯ₂が脱イオン水に飽和状態で溶解すると、水溶液のpHは5.6になるが、通常の脱イオン・蒸留水の精製ではそのpHが６付近になる。このため、溶出試験方法①－ａと①－ｂでは脱イオン水を溶出液として直接使用している。

ＣＯ₂ガスを脱イオン水に連続的に吹き込むと、pHはさらに低下する。溶出試験方法④のように連続的にＣＯ₂ガスを吹き込んで試験する場合には、反応式（１）でみると反応が右側へ進み、溶出条件は酸性側になることがわかる。

（２）主要成分の溶解

実験に用いた試料は下水汚泥を酸化条件下で焼却又は溶融しているため、主要成分はSiO_2、ＣａＯ、Al_2O_3、Fe_2O_3、P_2O_5、K_2O、ＭｇＯ、Na_2O、SO_3の形態で存在していると仮定する。
この内、SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3はＩＣＰ発光分光分析計の測定結果からほとんど溶出しないことが明らかになったので、主要成分の溶解については次のように考えることができる。

塩基成分の溶解

$$CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+}+2OH^- \quad \text{反応式（2）}$$

$$K_2O+H_2O \rightarrow 2KOH \rightarrow 2K^++2OH^- \quad \text{反応式（3）}$$

$$MgO+H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \rightarrow Mg_2^++2OH^- \quad \text{反応式（4）}$$

$$Na_2O+H_2O \rightarrow 2NaOH \rightarrow 2Na^++2OH^- \quad \text{反応式（5）}$$

酸成分の溶解

$$P_2O_5+H_2O \rightarrow 2HPO_3 \quad \text{反応式（6）}$$

$$HPO_3+H_2O \rightarrow H_3PO_4 \rightarrow H^++H_2PO_4^-$$
$$\rightleftarrows 2H^++HPO_4^{2-} \rightleftarrows 3H^++PO_4^{3-} \quad \text{反応式（7）}$$

$$SO_3+H_2O \rightarrow H_2SO_4 \rightarrow 2H^++SO_4^{2-} \quad \text{反応式（8）}$$

塩の溶解

$$CaCl_2 \rightarrow Ca^{2+}+2Cl^- \quad \text{反応式（9）}$$

$$KCl \rightarrow K^++Cl^- \quad \text{反応式（10）}$$

$$MgCl_2 \rightarrow Mg^{2+}+2Cl^- \quad \text{反応式（11）}$$

$$NaCl \rightarrow Na^++Cl^- \quad \text{反応式（12）}$$

（３）溶出液のイオンバランスと最終pH

溶出液中の主要成分測定結果からカチオン当量とアニオン当量を算出する。ただし、通常0.01mol/ℓ以下の濃度の希薄溶液は活量係数を１で近似できることから、ここでは活量係数を１と仮定した。従って、カチオン当量とアニオン当量は反応式（２）から（12）までのように電解すると仮定すると次の式で計算される。

$$\text{カチオン当量} = 2\times Ca^{2+}+K^++2\times Mg^{2+}+Na^+$$

$$\text{アニオン当量} = 3\times PO_4^{3-}+2\times SO_4^{2-}+Cl^-$$

ここで、

カチオン当量：ミリ当量（m eq/ℓ）

アニオン当量：ミリ当量（m eq/ℓ）

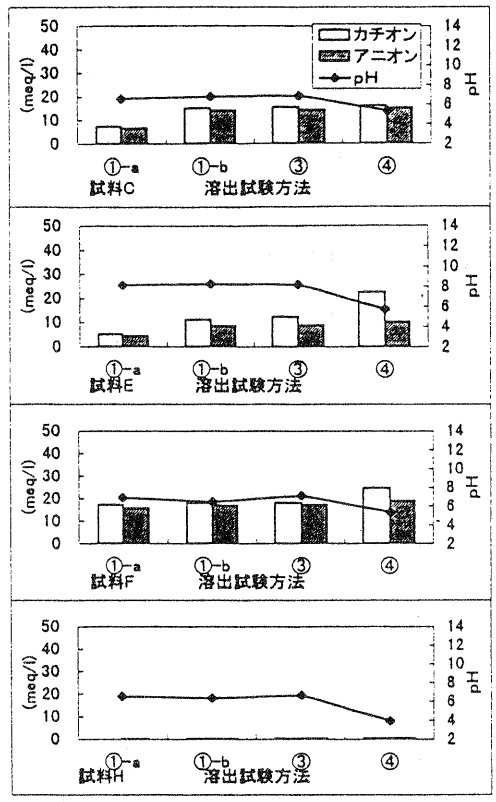
Ca^{2+}、K^{+}、Mg^{2+}、Na^{+}：ミリモル濃度（m mol/ℓ）

PO_4^{3-}、SO_4^{2-}、Cl^{-}　：ミリモル濃度（m mol/ℓ）

図－５は、カチオン当量とアニオン当量の両方についてデータが得られた原料Ｃ、Ｅ、Ｆ、Ｈの結果を示している。試料によって溶出量にかなり差があり、試料Ｈのようなスラグでは溶出量が極端に小さくなる。溶出試験方法①－ａでは、溶出時間中CO_2供給がそれほどなく、溶出液中のカチオン当量とアニオン当量のバランスがとれている場合には、試料Ｃ、Ｅ、Ｆのように溶出液の最終pHがほぼ中性付近に保持されることがわかる。

溶出液中のｐＨは一義的には主要構成成分の溶出特性によって決まるが、カチオン当量とアニオン当量のバランスがとれている場合には、①－ｂや③のように溶出試験中に空気中からCO_2の供給があるような条件下でも、ほぼ中性付近になることがわかる。

④のように溶出試験中に強制的にCO_2供給がある場合には、反応式（１）のように溶出液のpHは酸性側になる。この時、カチオンの溶出も進行し、試料Ｅ、Ｆの例にみられるように、カチオン当量とアニオン当量のバランスは崩れ、明らかにカチオンの溶出の方が多くなっている。

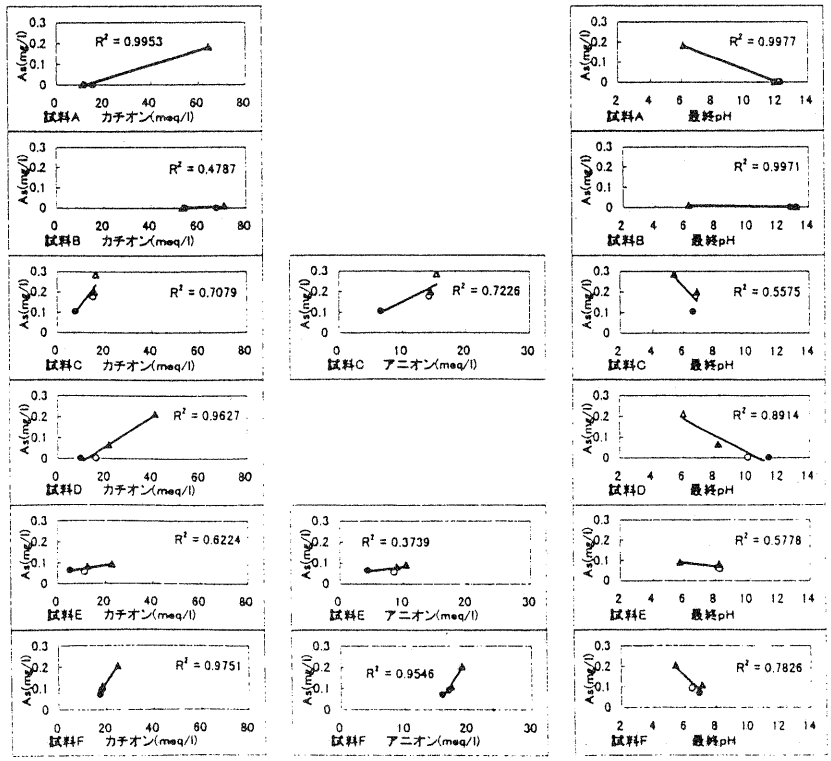


図－５ 溶出液中のイオンバランス（原料）

石灰系焼却灰の試料ＡとＢに溶出試験①－ａ、①－ｂ、③を適用すると、CO_2の供給が限られているため、反応式（１）よりも反応式（２）が進行し、最終ｐＨは12.0～12.5になった。溶出試験④を適用すると、反応式（１）の進行によってｐＨは低下し、最終ｐＨは6.3～6.5になった。この時、反応式（２）も進行し、カチオンの溶出量は溶出試験①－ａ、①－ｂ、③を適用した場合よりも大きくなった。

３－６　原料中のＡｓ、Ｓｅの溶出特性

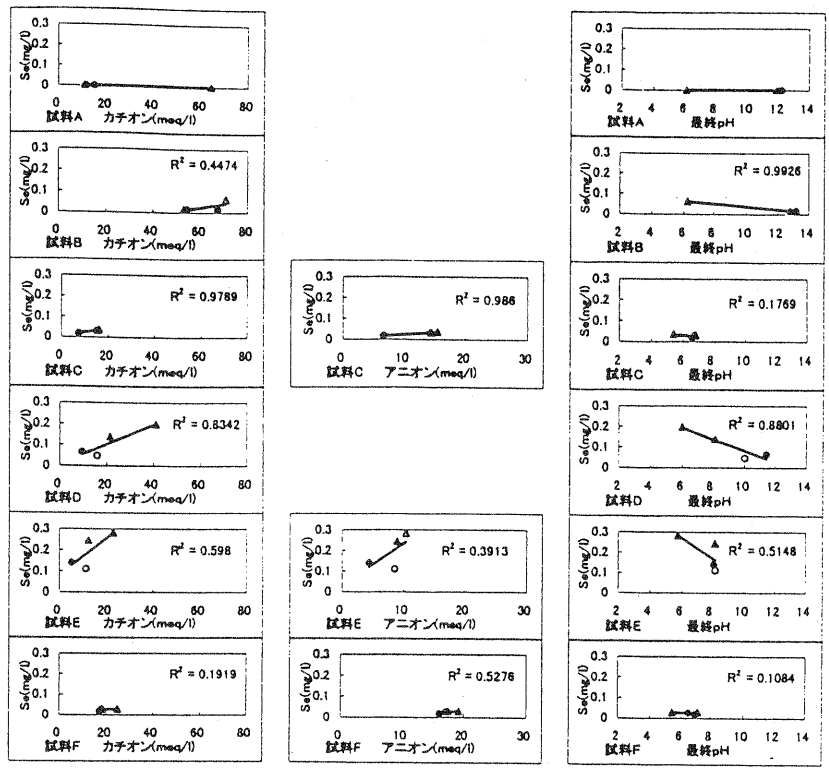
図－３にみられるように原料が焼却灰の場合には、Ａｓ、Ｓｅの溶出量は最終pHが低くなる程大きくなる傾向が認められる。溶出試験①－ａ、①－ｂ、③、④を適用してＡｓ及びＳｅ溶出量と、カチオン当量、アニオン当量、最終pHとの関係を調べた



図－６ 原料中のAsの溶出特性　（● ①-a、○ ①-b、▲ ③、△ ④）

のが図－６、図－７である。全体的にみて最も相関の高いのがカチオン当量である。カチオン当量には、水に対する成分の溶出特性と、図－５にみられるような溶出液の最終pHの影響が、同時に反映されていると考えられることから、アニオン当量や最終pHに比べて良い相関が得られたものと考えられる。

しかし、同図から明らかなように、試料毎に相関式の傾きは大きく異なっている。このことは、試料毎に溶出特性が違うことを意味しており、カチオン当量から一般的なＡｓやＳｅの溶出量を予測することは難しいことを示している。



図－７ 原料中のSeの溶出特性 （● ①-a、○ ①-b、▲ ③、△ ④）

３-７　ＵＳ－ＥＰＡ変法によるＡｓ、Ｓｅの溶出特性

原料が焼却灰の場合について、ＵＳ-ＥＰＡ変法を適用しＡｓ、Ｓｅの溶出量を調べた結果を示したのが表－５である。石灰系焼却灰である試料ＡとＢは、最終ｐＨがアルカリ側になっているがその他の試料はすべて最終ｐＨが５になっている．試料ＡとＢのカチオン当量は図－６、図－７に比べて大きな値を示しているが、これは0.5N酢酸の添加によってＣａ$^{2+}$が大量に溶出したことによるものである。ＡｓやＳｅ溶出量は小さな値を示している。このことは、ＵＳ－ＥＰＡ変法が他の溶出試験と異なる特性を有していることを示している。

表－５ US－EPA変法によるAs、Seの溶出量

原料	最終pH	カチオン当量 (meq/l)	As溶出量 (mg/l)	Se溶出量 (mg/l)
A	10.2	139	0.011	ND
B	12.7	161	ND	0.010
C	4.99	12.2	0.181	0.019
D	4.99	32.4	0.039	0.114
E	5.00	16.7	0.104	0.148
F	4.98	14.2	0.150	0.021

また、高分子系焼却灰であるＣ、Ｄ、Ｅ、Ｆについて、カチオン当量と、Ａｓ及びＳｅ溶出量との関係を図－６及び図－７の関係と比べると、相関式からずれているものもあり、ＵＳ－ＥＰＡ変法は①－ａ、①－ｂ、③、④　とやや異なる溶出特性を示す試験法であるといえる。

なお、溶融スラグが原料であるＧ、Ｈ、Ｉ、Ｊについては，ＡｓとＳｅの溶出量はＮＤであった。

４．　まとめ

下水汚泥焼却灰、溶融スラグ及びそれらを原料にして製造された再生資材を対象にして、環告法、環告法変法，ＵＳ－ＥＰＡ変法、CO_2飽和法、CO_2連続法を適用して、重金属の溶出特性を調べた。その結果をまとめると以下のようになる。

（１）下水汚泥の主要構成成分はSiO_2、ＣａＯ、Al_2O_3、Fe_2O_3、P_2O_5、K_2O、ＭｇＯ、Na_2O、SO_3、Ｉｇ－Ｌｏｓｓで、全体の92%～98%になる。

（２）重金属の含有量と溶出量には明確な相関関係が認められなっかった。

（３）焼却灰中のＡｓとＳｅについては、溶出試験後の最終ｐＨが低いほど溶出量が多くなる傾向がみられ

た。溶融スラグからのＡｓとＳｅの溶出はほとんどなかった。また、焼却灰と溶融スラグからのＰｂ、Ｃｄ、Ｃｒ（VI)、Ｈｇの溶出量は、総理府令の判定基準値に比べると非常に小さい値であった。

（４）焼却灰や溶融スラグが焼成、セメント固化、結晶化等を施されて製品化されると、重金属の溶出量は原料に比べてさらに少なくなった。

（５）溶出試験における最終ｐＨは、一義的には試料中の主要構成成分の溶出特性によって決まる。溶出液中のカチオン当量とアニオン当量がほぼバランスしている場合には、ｐＨがほぼ中性付近に保持されることがわかった。CO_2を強制的に吹き込む連続法は、溶出液のｐＨが酸性側に傾き、同時にカチオンの溶出量が多くなることがわかった。

（６）焼却灰中のＡｓやＳｅ溶出量は、溶出液のカチオン当量と高い相関があった。しかし、相関式の傾きは個々の試料毎に異なることがわかった。

（７）ＵＳ－ＥＰＡ変法は、環告法、環告法変法、CO_2飽和法、CO_2連続法と異なる溶出特性を示すことがわかった。

参考文献

1）環境庁環境法令研究会編、産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法（環境庁告示１３号）、環境六法、中央法規出版（平成８年）

2） U.S.Environmental Protection Agency,Test Methods for Evaluating Solid Waste/Physical Chemical Methods/SW-846/2nd Edition,(1982)

3） ASTM,Standard Test Method for Shake Extraction of Solid Waste with Water,Annual Book of ASTM Standards, Vol.11.04 (1995)

4） ASTM,Standard Test Method for Sequential Batch Extraction of Waste with Water,Annual Book of ASTM Standards, Vol.11.04 (1995)

5） Institut fuer Normung Berlin, DIN 38414 S4: German Standard Procedure for Water,Waste water and Sediment Testing-Group S (Sludge and Sediment):Determination of Leachability (S4) (1984)

6） Schweizerische Bundesrat,Technische Verordnung ueber Abfaelle/814.015,(1993)

7）金子栄広、溶出試験方法の現状と展望、廃棄物学会誌、Vol. 3、No. 3、pp182-191 (1992)

8） William Shively, Paul Bishop, David Gress, Todd Brown, Leaching tests of metals stabilized with Portland cement, Jour. WPCF, Vol.58, No.3, pp234-240 (1986)

9） J.R.Conner,J.M.Huffman, Comparison of U.S. and Foreign Test Protocols on Stabilized Hazardrous Wastes, 87th Annual Meeting and Exhibition of Air and Waste Management (1994)

10） Thomas L. Theis, Lawrence E. Padgett, Factors affecting the release of trace metals from municipal sludge ashes, Jour. WPCF, Vol.55, No.10, pp1271-1279 (1983)

11） C.W.Francis, G.H.White, Leaching of toxic metalsfrom incinerated ashes, Jour. WPCF, Vol.59, No.11, pp979-986 (1987)

12）金子栄一、桃井清至、原田春樹、根岸達夫、都市ゴミ焼却灰溶融スラグの重金属溶出特性、土木学会第５０回年次学術講演会第２部（Ｂ）、pp1206-1207、（平成７年）

13）渡部春樹、尾崎正明、平山孝弘、北村友一、下水汚泥及びその溶出水中の重金属の分析、土木技術資料、Vol. 37、 No. 8、 pp38-43 (1995)

廃棄物管理におけるリスクの制御と溶出試験の意義
－廃棄物最終処分場を例として－

大迫政浩
国立公衆衛生院廃棄物工学部

１．はじめに

廃棄物最終処分場におけるリスク管理あるいはリスク制御にとって、溶出試験法は処分前のフロントチェックとして重要な役割をもっている。溶出試験法が有効に機能するためには、リスクの発生メカニズムを最終処分場及びそれを取り巻く周辺環境を含めた場で空間的かつ時間的に明確にして、他のリスク制御技術との有機的な連携の中で適用していくことが重要である。

本稿では、最終処分場におけるリスク制御のあり方を論じ、その中での溶出試験法の意義について考えてみたい。

２．リスク管理のためのマルチバリアコンセプト

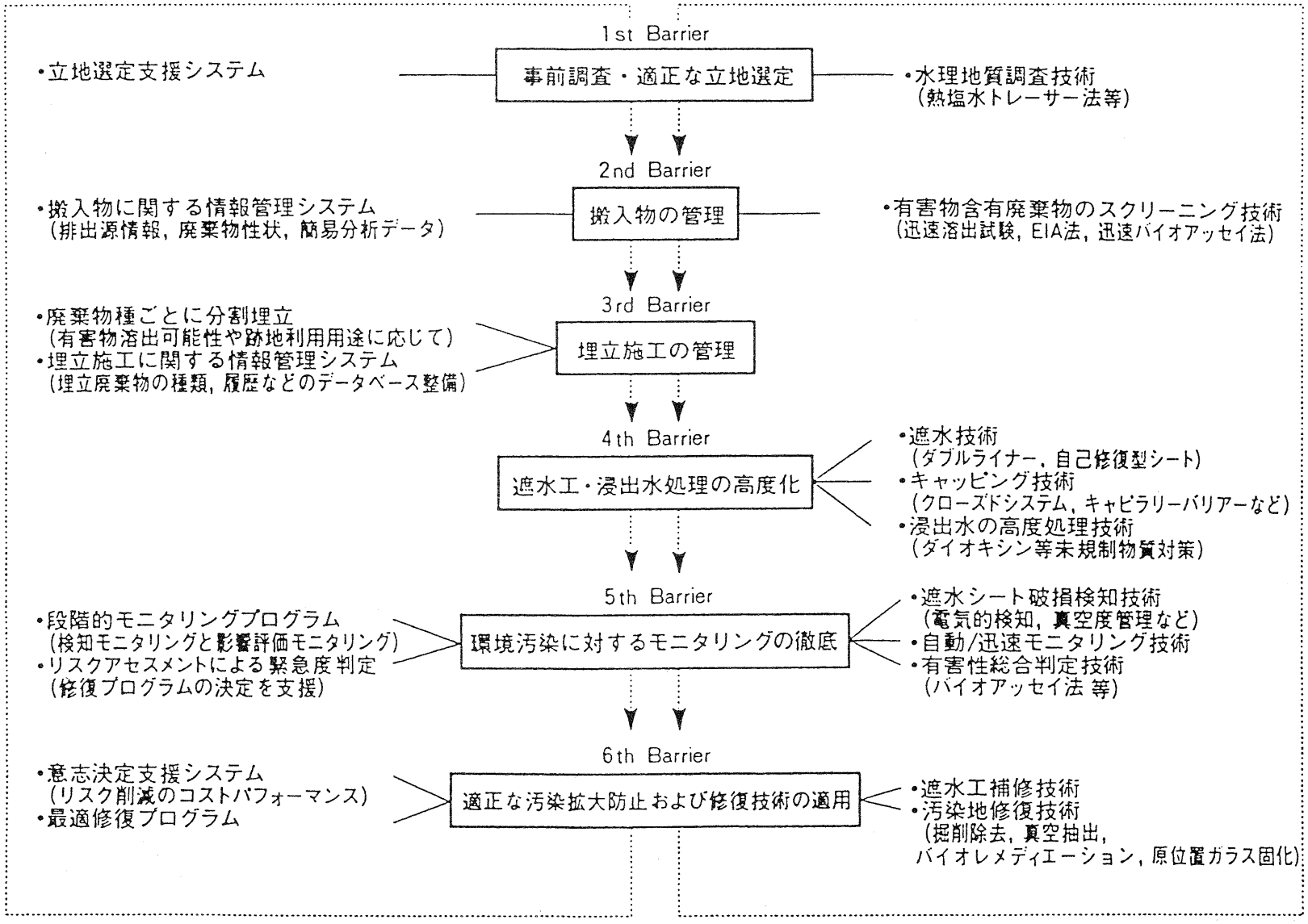
最終処分場における効率的なリスク管理を行うためには、リスク管理に関わる様々な要素技術が有機的に結合し総合化されたシステムを構築することが重要である。筆者ら[1)2)]はそのようなシステムをマルチバリアと呼び、図－１のコンセプトを提案している。すなわち、リスク管理の段階を事前調査・適正な立地選定、搬入物の管理、埋立施工の管理、遮水工・浸出水処理の高度化、環境汚染に対するモニタリングの徹底、適正な汚染拡大防止及び修復技術の適用の６段階に分け、それぞれがリスク管理のための要素技術から構成され、各段階の要素技術が重層的かつ有機的に結合した総合システムである。要素技術には、ハードウェアだけでなくソフトウェアも含まれ、相互に有機的に補完し合う。

筆者らは、図中に示す要素技術を網羅的に研究しており、溶出試験法等もマルチバリアの中に位置づけられ、検討が進められている。

３．長期的スパンにおけるリスク管理の重要性

最終処分場の効率的かつ総合的なリスク管理のためには、立地選定段階から埋立施工、埋立終了後の長期的な維持管理段階における環境モニタリング及び異常時対応までを含めた処分場の全ライフサイクルにわたるリスク管理技術の適用が必要である。リスク管理のパフォーマンスは、これらの技術が有機的に結合し機能することによって最も高くなる。

リスク管理を長期的スパンで考える場合、最終処分場の全ライフサイクルにおけるリスクポテンシャルとリスク制御機能の時間的推移を的確に把握することが重要である。図－２に管理型処分場の例を示した。廃棄物処理法の下で管理されている期間においては、遮水機能や浸出水処理機能、環境モニタリング機能によって、リスクは制御、回避されてお



図—1　マルチバリアによる

廃棄物最終処分場リスク管理システムの概念

り、リスクポテンシャルが十分低下した時点で処分場としては廃止され、跡地管理に移行することになる。廃止後を一般の土壌環境とみるか汚染サイトとみるかでリスク管理のレベルは異なるが、いずれにしても、廃止時に当初のリスク管理機能が担保できない状態（遮蔽機能の低下、浸出水処理機能の停止、モニタリングの停止及び簡略化など）を想定して、処分場内廃棄物がその段階でどのような性状もっていればよいかの評価を含む廃止要件の明確化と、溯って受入時の溶出試験等によるモニタリングの方法論を考えなければならない。

現行の遮断型及び管理型処分場の構造・維持管理基準を踏まえると、リスク管理レベルは表－１のように整理できよう。

遮断型は、処分場内におけるエージング（ここでは、時間的推移とともに、無害化・安定化してくることを意味している）は期待していない。また、半永久的に生物圏と隔離できる構造と維持管理が求められる。

管理型に対しては、エージングも期待しているが、土壌への還元まで可能かについては明確ではない。処分場としてリスク管理しなければならない期間においては、構造・維持管理レベルとして有機汚濁（BOD など）に対する遮蔽機能と発生浸出水処理機能が求められる。有害物質に対しては、環境漏洩しても希釈及び吸着を考えれば問題無いレベルの廃棄物を受け入れている。

以上のような各処分場のリスク管理レベルを前提に、図－２の中で示した搬入管理、施設機能管理、周辺環境監視の機能のあり方が検討されるべきである。

4.長期的スパンにおけるリスク管理プログラムとモニタリング

4.1　最終処分場の段階管理

前節で長期的スパンでのリスク管理の重要性を指摘し、廃棄物のもつリスクポテンシャルの推移に応じたリスク制御の必要性について述べた。しかし、リスクポテンシャルの長期的な推移を正確に予測評価することは極めて困難であり、時々刻々と変わるリスクポテンシャルに応じたリスク管理プログラムを確定することは難しい。

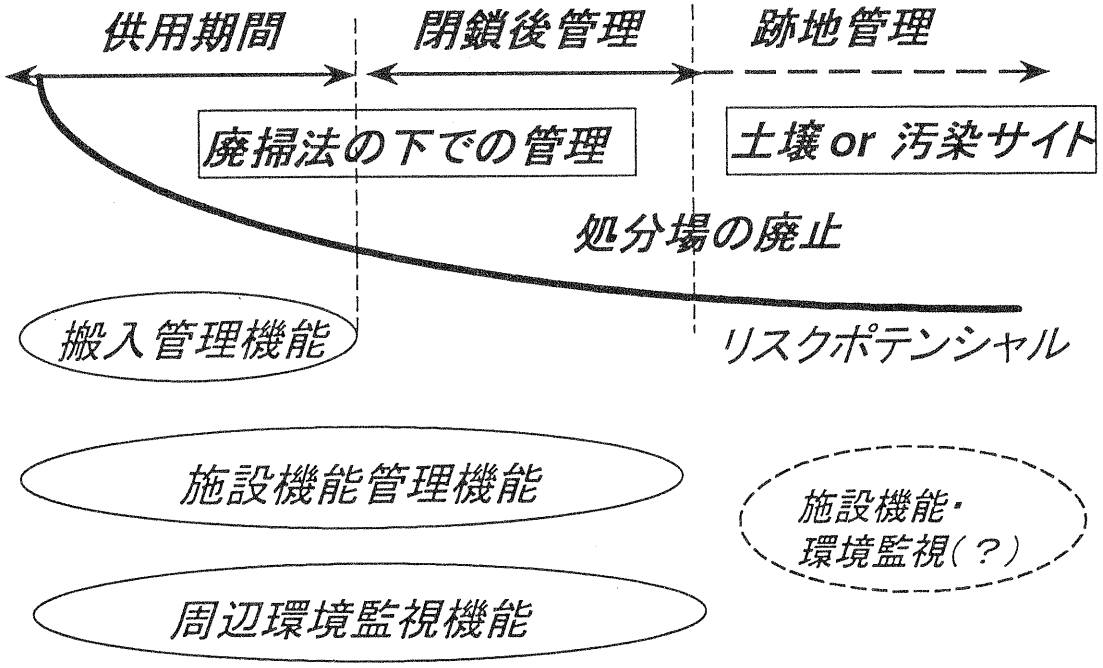
したがって、最終処分場の長期的なリスク管理プログラムの構築を考える場合は、図－３（管理型処分場の場合）のようなリスク発現事象を想定した段階管理の概念を導入することが妥当であろう。

第１段階は処分場として管理されている段階であり、第２段階は汚染サイトのレッテルが貼られた状態でリスクポテンシャルに応じた管理が行われる。両段階で想定するリスク発現事象は、遮蔽機能に障害が生じた場合の漏水による水環境の汚染、あるいは誤った土地利用による人との接触である。第３段階は一般の土壌環境と見なされ、特別な管理を要せず土地利用も自由になるため、もし十分にエージング（無害化・安定化）していなければ、様々な土地利用に伴う人との接触がリスク発現事象となり得る。

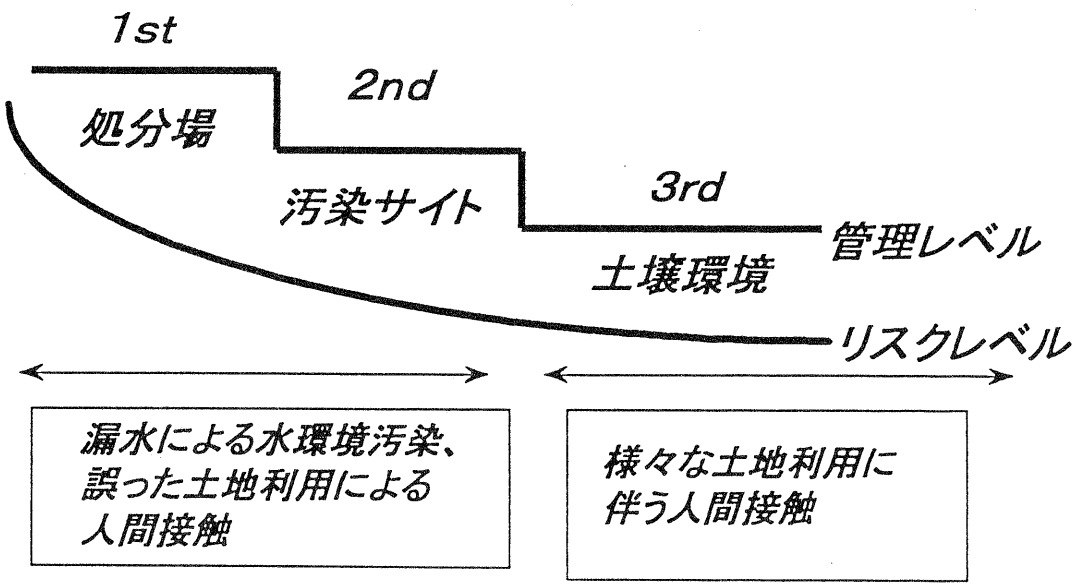
リスク管理プログラムは、このような段階管理の中で位置づけられるべきであり、リス

表－1　長期的スパンでの遮断型と管理型処分場のリスク管理レベル

埋立ﾀｲﾌﾟ	リスク管理期間	廃棄物のｴｰｼﾞﾝｸﾞ	リスク管理機能(構造維持管理)
遮断型	半永久的	エージングによる有害性の低減は期待していない	半永久的に生物圏から隔離できる構造と維持管理レベルを要求
管理型	数十年～数百年	エージングを期待。管理期間終了時に土壌還元まで想定（？）	管理期間において有機汚濁に対するシール機能を要求 有害物質に対しては、環境漏洩しても希釈及び吸着を考えれば問題無いレベルの廃棄物を受入



図－2　全ライフサイクルにおけるリスクポテンシャルとリスク制御機能の時間的推移(管理型処分場の場)



図－3　管理型最終処分場の段階管理における
リスク発現事象

ク発現事象を制御できるように、搬入物管理、施設機能管理、周辺環境モニタリングのシステムがそれぞれの段階に応じて構築されなければならない。

4.2　管理型処分場における段階毎のモニタリング

管理型処分場を例として、ここでは段階管理におけるモニタリングのあり方に焦点を絞り議論する。各ステージごとのモニタリングのイメージは以下の通りである。

1）処分場としての管理段階

前出の図－2のように、処分場の段階は大きく供用期間と閉鎖後管理期間に分けられる。

供用期間中には搬入管理として受入廃棄物の有害性等のモニタリング、遮水工や浸出水処理機能など施設機能のモニタリング、汚水の漏洩による周辺環境の汚染のモニタリングが必要である。これらの中で、どのモニタリング技術のレベルを最も高度化すべきかといった点について明確な解答を得るには、今後十分な科学的知見の集積を踏まえた議論が必要であるが、「フェイル・セーフ（fail safe）」及び構造基準とセットでリスク制御方法を考えた場合の「コスト・パフォーマンス」などの概念で整理すべきであろう。

最終覆土で閉鎖した後の管理期間中は、当然搬入管理は必要ないが、施設機能及び周辺環境のモニタリングは継続しなければならない。ただし、リスクポテンシャルは低下していると考えられることから、閉鎖後ある時点からモニタリングのレベル（頻度、測定項目など）は軽減できると考えられる。

2）汚染サイトとしての管理段階

処分場としての廃止要件を満足すれば、以後、汚染サイトとして管理すべきであると考えられる。廃止後は、遮水工の機能を担保する必要性はなく、浸出水処理施設も停止可能とすべきであろう。しかし、廃止後もある程度の遮水性は保たれるので、集排水機能は維持されるべきである。ただし、雨水浸透防止のためのキャッピングを施工した場合には必要ない。

以上のような状況を想定して廃止要件は決められ、土地利用制限により内部が攪乱されないことを条件に、モニタリングデータなどで安定的に環境保全上問題がないことを確認することが適切である。

処分場廃止後の汚染サイトとしてのモニタリングには、前述の廃止要件を踏まえれば、周辺環境のモニタリング、集排水機能のモニタリング、キャッピングが施された場合の雨水浸透防止機能のモニタリングなどが考えられる。

3）土壌環境としての段階

汚染サイトが一般的な土壌環境まで果たしてエージングされるのか、されるとしてもどの程度の期間がかかるのかを明確に予測評価することは極めて困難である。当然、一般土壌環境と同等と評価されれば、自由な土地利用を許される。もしエージングが不完全であ

れば人への接触等により影響を招くこともありうるので、いかなる跡地利用をしても環境保全上問題がないことを確認する方法論が重要であり、前段階までのモニタリングデータとのリンケージが必要になってこよう。

5．モニタリング要素技術としての溶出試験法の意義

5.1 溶出試験の適用目的

モニタリング技術としての溶出試験には様々な方法があり、評価の目的に応じて使い分けられることが望ましい。廃棄物分野における溶出試験の適用目的には、主に表－2に示すようなものがあるが、種々の目的をカバーするオールマイティな唯一の方法は現段階では存在しない。ここでは、溶出試験を政策的に位置づけていくために今後議論すべきいくつかの論点について述べることにする。

5.2　最終処分場の段階管理と溶出試験スキーム

前述で提案した段階管理において、モニタリングプログラムとしての溶出試験のスキームは、図－4のようなイメージが考えられる。すなわち、溶出試験を短期的評価と長期的評価に分けて考え、搬入時の溶出試験は汚染サイトの第2段階までを想定して評価を行う。第2段階から第3段階（土壌環境）への移行時には、埋立層（汚染サイト）内部の物が長期的にみても問題がないことを溶出試験により評価、確認する。

短期的及び長期的な評価のための溶出試験方法は当然異なった考え方で行われるべきであり、試験操作あるいは溶出基準の考え方も異なってくる。搬入時に長期的評価を行う考え方もあるが、廃棄物の性状から長期間経過後の土壌環境を予測することが必要になり、科学的な不確実性が増大する。第2段階までは遮蔽機能、環境監視機能等でリスクが管理されている前提に立てば、第3段階の移行時に評価しても遅くはないし、より土壌環境に近いマトリックスをもつ状態で長期的な推移を予測評価でき、不確実性は少なくなるであろう。

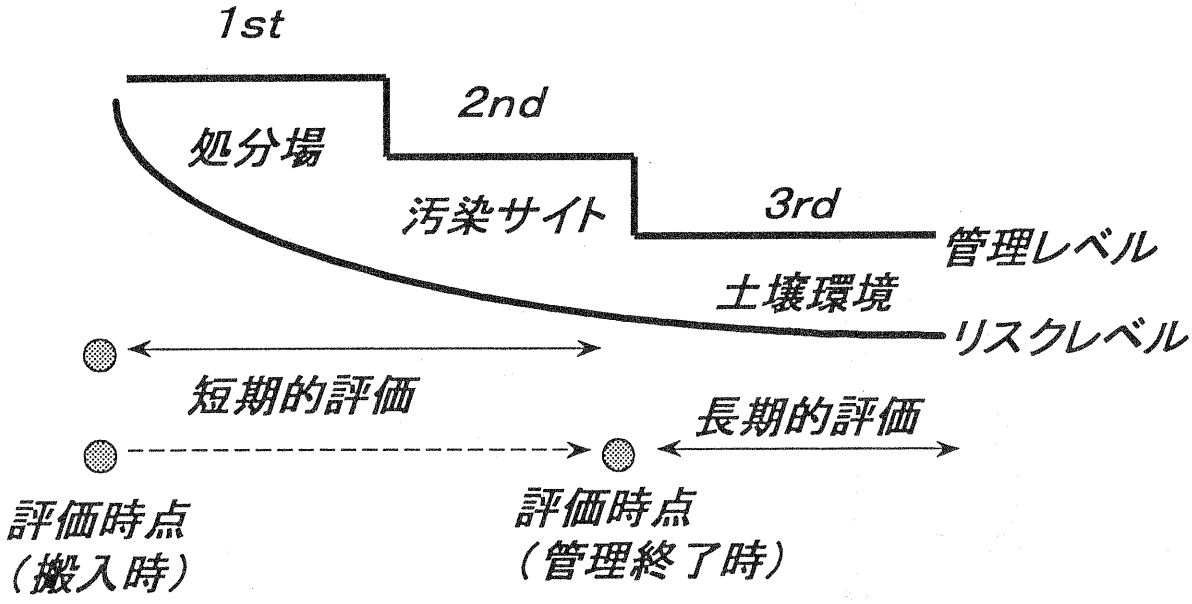
5.3　溶出基準のクライテリア

規制のための各種基準は、基本的には図－5に示すようなリスクアセスメントによる許容レベル、バックグラウンドレベル、実用的測定可能レベル、技術的な達成可能レベルを総合的に勘案して設定されるが、最も基本となるべきものはリスクアセスメントであろう。

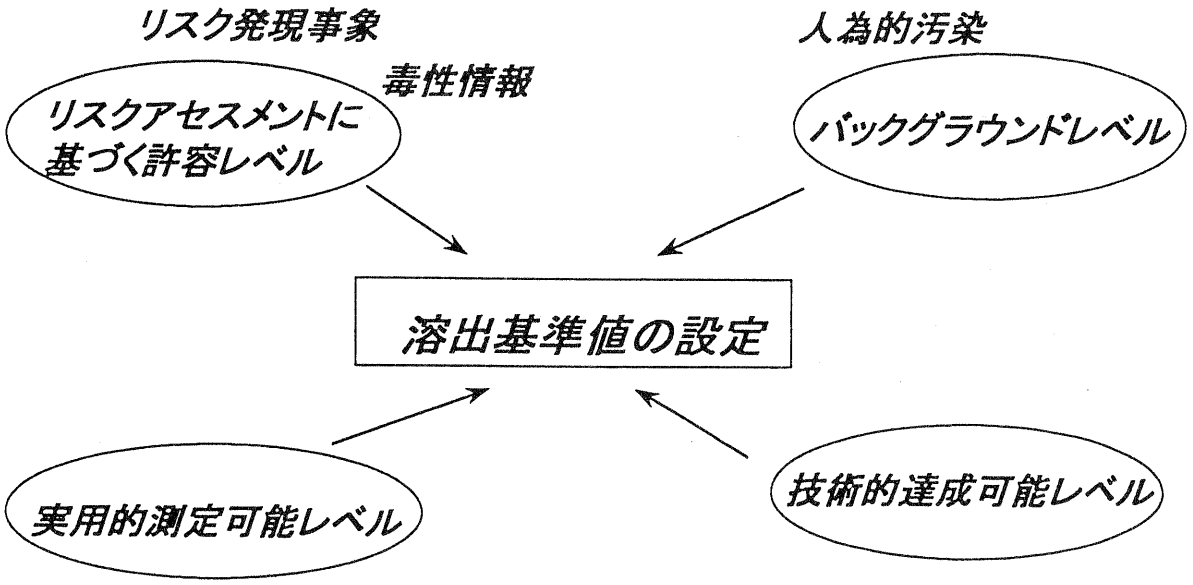
図－6[3)4)]に各国の埋立判定に係る鉛（Pb）とカドミウム（Cd）の溶出基準値を示すが、基準値は各国間でかなり異なっていることがわかる。溶出試験は廃棄物の溶出毒性を評価する方法であり、溶出基準のクライテリアも慢性毒性に関する動物試験のデータなどを基に設定されるべきである。各国間で根拠としている毒性データに大きな違いはないと考えられることから、図－6のような各国間の基準の違いは、気象や地質・水理などの自然条件や埋立構造などの施設条件などの相違、またそれらとも関連して、リスクアセスメント

表－2　廃棄物分野における溶出試験の適用目的

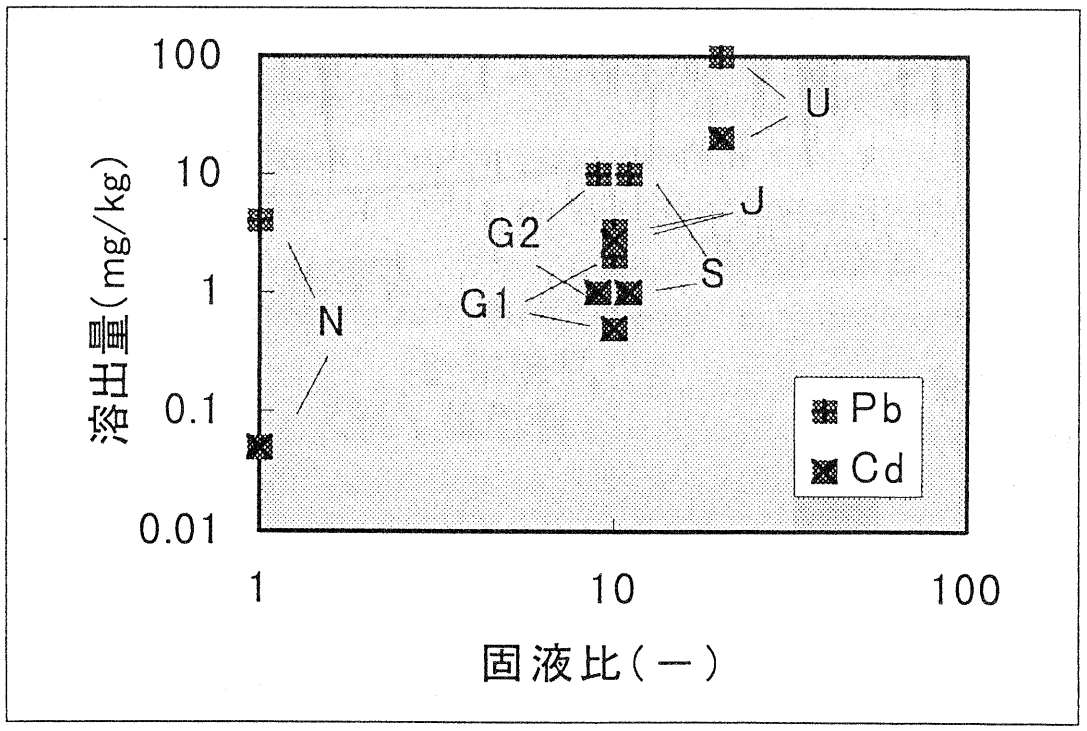
- 産業廃棄物の管理型埋立 or 遮断型埋立の判定
- 有害廃棄物の無害化・安定化処理の効果判定
- 汚染土壌の調査・浄化効果判定
- 廃棄物あるいはその処理物の環境影響面からみた有効利用可能性の判定



図－4　管理型最終処分場の段階管理と溶出試験スキーム



図－5　溶出基準設定の考え方



図－6　各国の埋立判定に係る溶出基準値

において想定するリスク発生シナリオの相違などに由来していると考えられる。

例えば、図－６は横軸に固液比をとっているが、オランダ（図中のＮ）は埋立層の最上部にキャッピング構造を設けており、雨水の浸透を抑制していることから、固液比を１としてカラム試験により評価している。米国（Ｕ）は、固液比は 20 でありかつ酢酸酸性溶液でのバッチ試験により評価しており、嫌気性下での有機物の生物分解に伴う有機酸の生成を想定している。スイス（Ｓ：残渣処分）では、炭酸ガス平衡下での溶出能をバッチ試験により評価しており、ドイツ（Ｇ１：クラスＩ、Ｇ２：クラス２）では、ほぼ日本（Ｊ：環境庁告示 13 号法）と同様の方法で評価している。

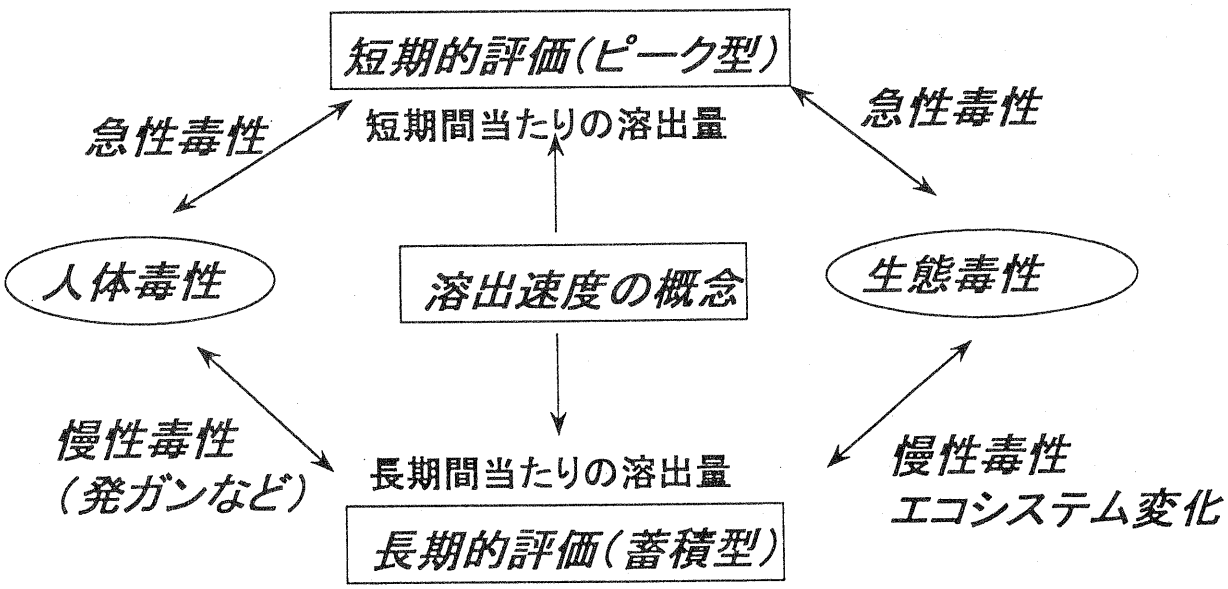
しかしながら、各国の溶出基準のクライテリアの考え方においても、リスクを考える場合の時間軸の設定と、設定時間軸における有害性（毒性）とのリンケージは、必ずしも明確な議論を行っていないように思える。先に最終処分場の段階管理を提案し、溶出試験においても短期的評価と長期的評価の二種類を考えるスキームを提案した。そのスキームとの対応で、さらに有害性とのリンケージを整理したイメージが図－７である。短期的評価は、短期間当たりの溶出量を評価し、その意味からはピーク型の有害性、例えば急性、亜急性の毒性を対象に評価する系と考えることができる。また、長期的評価は、長期間当たりの溶出量を評価し、慢性毒性などの蓄積型の毒性を対象にする。また、両評価ともに人体影響だけでなく、今後生態系への影響も加味する必要があろう。

しかし、上述の短期的評価においては、処分場としての廃止あるいは汚染サイトとして管理が終了する時点までを評価することになり、短期的評価といっても数十年以上の時間的スパンを対象にすることから、人の寿命のライフスパンから考えると短期的評価においても実際には慢性毒性をベースに考えるべきであろう。

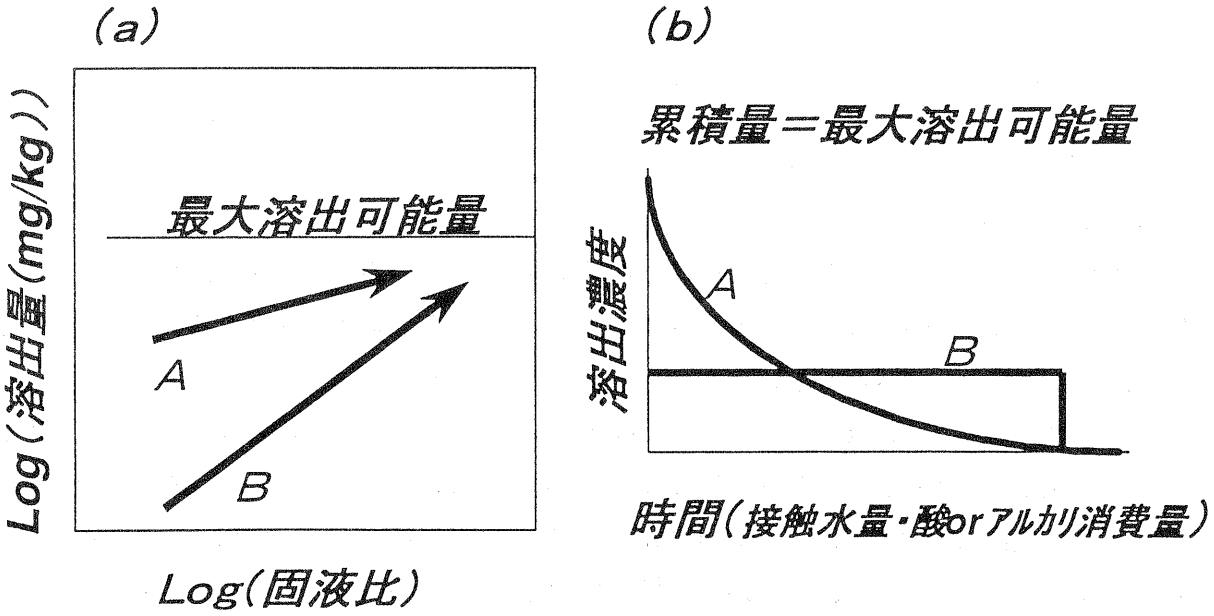
5.4　溶出試験による長期的評価

欧州では、長期的評価として最大溶出可能量を評価するためのアベイラビリティテストが提案されている。長期的にみれば酸性雨の影響も無視できないとの考えから、中性域と酸性域の両方で溶出させるバッチ溶出試験を採用しており、固液比も高く設定している（固液比 100）ことから、最も過酷な環境条件を想定した方法とされている。

長期的評価においては、溶出速度の時間的な推移をどのように解釈するかも重要である。最大溶出可能量と溶出速度の関係を時間軸に位置づけると、図－８のようなイメージになる。バッチ溶出試験においては、時間軸に相当するものは固液比であり、固液比と溶出量の関係を図－8(a)のように仮定すると、時間（接触水量・酸あるいはアルカリ消費量）を横軸にとった場合の溶出濃度の変化は図－8(b)のようになる。短期的評価と長期的評価を考える場合、Ｂのパターンで溶出濃度が推移する場合には、短期的評価と長期的評価は同時に行えるが、Ａのパターンの場合には分ける必要がある。長期的評価の場合には、溶出濃度よりも累積量が問題になり、毒性評価の時間的スパンとの対応の中で、どの程度の評価時間当たりの累積量（溶出速度）を想定するかが重要なポイントとなる。



図－7　溶出試験スキームにおける有害性とのリンケージ



図－8　長期的評価における最大溶出可能量と溶出速度

なお、アベイラビリティ試験が長期的な評価手法として最大溶出可能量を推定する方法であるといっても、どの程度の時間的スパンにおける溶出可能量を指しているのかは、廃棄物が置かれる環境条件等によっても大きく変化するため、その意味づけは必ずしも明確ではない。長期的にみて廃棄物からの重金属の溶出に関わるファクターも、図－9[5]に示すように様々である。筆者ら[6]は、埋立廃棄物から酸溶媒の種類を変えて逐次抽出することによって各金属の収着形態別分画を行い、長期的挙動を明らかにする試みを行っている。図－10の概念図に示すように、各金属の収着形態別の含有量が長期的にどのように変化するかを把握しようとするもので、逐次抽出法とアベイラビリティテストを併用することで、アベイラビリティテストで評価している最大溶出可能量がどの部分の収着形態までを網羅しているのか、といった最大溶出可能量に意味づけを与える検討も行った。研究は緒についたばかりであるが、長期的評価の意味を考えながら実用的な評価試験系の構築を検討していきたい。

5.5　溶出試験による評価スキーム

今後の溶出試験による評価スキームのイメージを図－11に示す。わが国では、廃棄物に関連して政策的に位置づけられている溶出試験は、環境庁告示13号及び46号法しかないが、欧州などでは多くの試験系が提案され、オランダでは複数の方法（カラムテスト、アベイラビリティテスト、タンクリーチングテストなど）が公定法化され、目的に応じて適用されている。わが国でも、今後多くの試験系のメニューを用意し、それらを評価スキーム全体の中にどのように位置づけて適用していくかを検討しなければならない。図－11は種々の溶出試験系の位置づけを、特性化試験と規制試験に分けて構成するスキームである。実際の規制試験としては、可能な限り簡単な方法で行うが、含有量試験、シリアルバッチ試験、pH依存性試験、逐次抽出試験、カラム試験などの様々な特性化試験の方法で、廃棄物の種類ごとに事前に特性化し、規制試験及び規制基準などをそれぞれの適用目的に応じて意味付けしていく方向が妥当ではないだろうか。

5．溶出試験に関わるその他の課題

1）リサイクルの評価基準と溶出基準値のあり方

循環型システムの構築を命題とした場合の廃棄物の適正処理とリサイクルの評価基準の整合性、及び評価基準に関わる溶出試験のあり方にについての議論が必要である。廃棄物から有効利用するために製造されるリサイクル製品は、生活環境に対しては開放系で使われることを前提にし、環境汚染可能性を適正に評価しなければならず、リサイクルの適否を判断するための溶出試験法の確立と基準設定の考え方を明確にしていくことが緊急な課題となっている。

その場合、処理処分とリサイクルのリスク管理レベル及びコストをどのようにバランスさせるかが重要である。図－12は、例えば有害廃棄物の溶融スラグの埋立処分あるいは土

木材料等への有効利用などを考えた場合の、受入及び利用基準レベルとリスク管理コストについて概念的に示したものである。

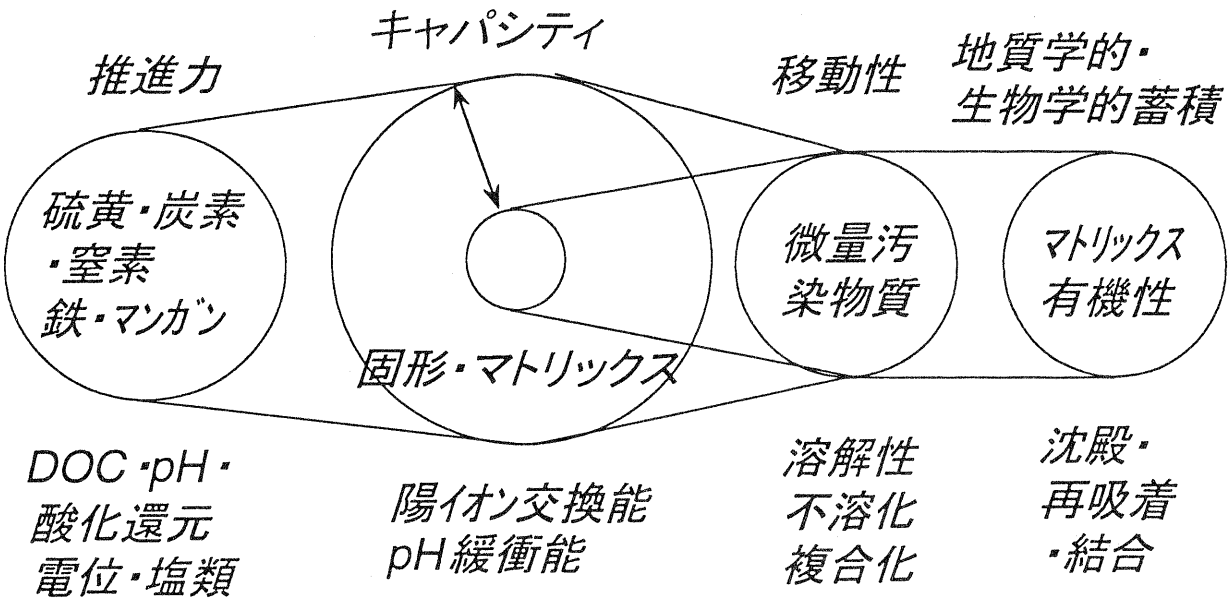
すなわち、廃棄物が有償・無償を問わずリサイクルされる場合には、環境に対しては開放系で使われることを前提にしなければならない。その意味では、同じ廃棄物を処理処分するための有害性判定基準よりもリサイクルするための基準の方が、環境インパクトに対しては厳しい基準にすることが原則である。有償であるからといって、環境へのインパクト評価を軽視してはならない。逆に、開放系での利用が認められた性状をもつものが、市況の関係で逆有償になったからといって管理型処分場に埋め立てられるのも不合理な話である。しかしながら、構造基準・維持管理基準を含めた総体としての管理基準を厳しくすることが、リサイクルへの誘導を促すことも否定できない。要は、リサイクルは開放系利用で制御できない系であるため入口で厳しくし、処理処分は入口は緩めにするがその他の維持管理基準・構造基準を厳しくしてリスクを管理することが重要である。処理処分の適正なリスク管理のためのコストが高くなれば、経済的インセンティブによってリサイクルが促進されることになる。

上述の受入及び利用基準に対する適否判定は、溶出試験により行われる。例えば、廃棄物及び焼却残さの溶融スラグやのセメント固化物の土木資材への利用などを考えた場合、埋立判定のための環境庁告示 13 号法や土壌環境基準への適合をみるための 46 号法の適用がなされている。現行の溶出試験方法をそのまま準用してよいのかといった技術的な議論（オランダのタンクリーチングテストのように有姿形をいかした試験方法を適用すべきとの指摘）も一方で活発に行われているが、いずれにしても、試験方法の特性を十分踏まえた上で、適正処理とリサイクルの評価基準の整合性を図る必要がある。

2）精度管理と国際的ハーモナイゼーション

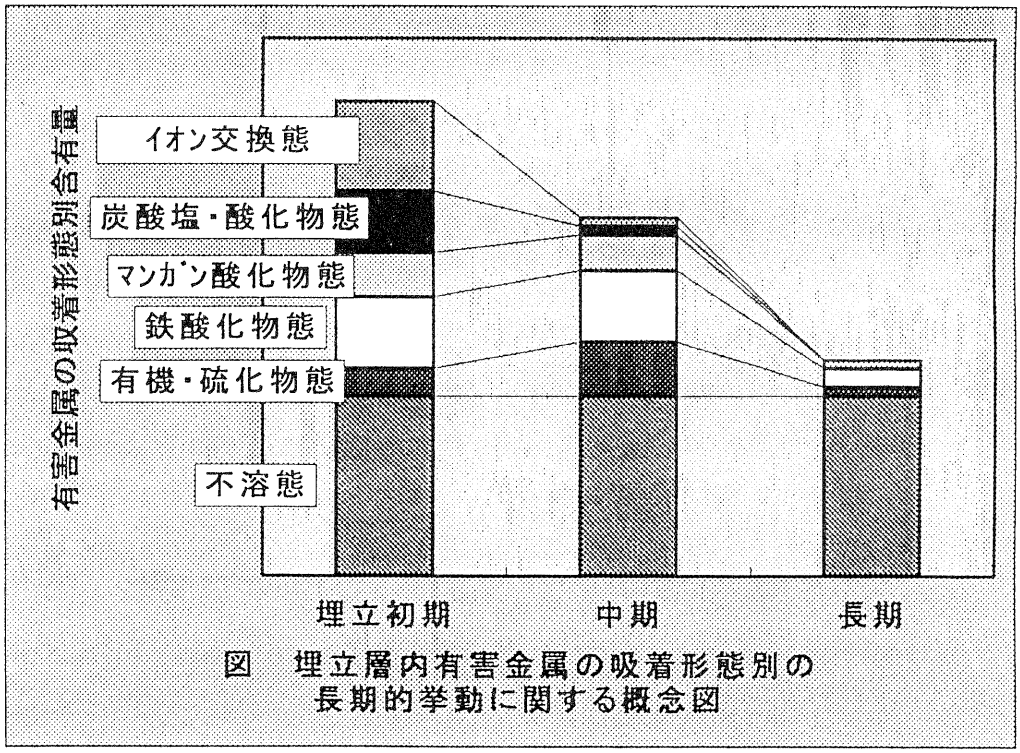
先進諸国においては、試験・分析法に関する精度管理が厳密であり、分析データに関する品質管理／保証の考え方が浸透している。わが国においても、試験分析法自体の精度については、JIS 化や公定法化されるときには評価されるが、試料採取から分析、データの評価・管理に至るすべての段階を含めたシステム全体での精度管理の考え方、および試験分析機関間の誤差などを含めた国全体の外部精度管理の仕組みなどに関する議論は十分ではない。国際標準化への流れが進む中で、民間ベースでは品質保証に関する ISO9001 取得の動きも活発であり、ダイオキシンのような超微量有害化学物質などの新たな物質の規制が進む中で、公定法における精度管理方法の具体化や国レベルでの外部精度管理の仕組みづくりが求められている。

また、測定分析法の国際的ハーモナイゼーションと標準化への対応も今日的課題である。溶出試験法やダイオキシン分析法などは、少なからず各国で異なっており、同じ測定値でもその意味はかなり異なる場合がある。このような相違には、国ごとの種々の条件及び考え方の違いなども一部関係しているが、いずれにしても、国際間取り引きにおける不公平

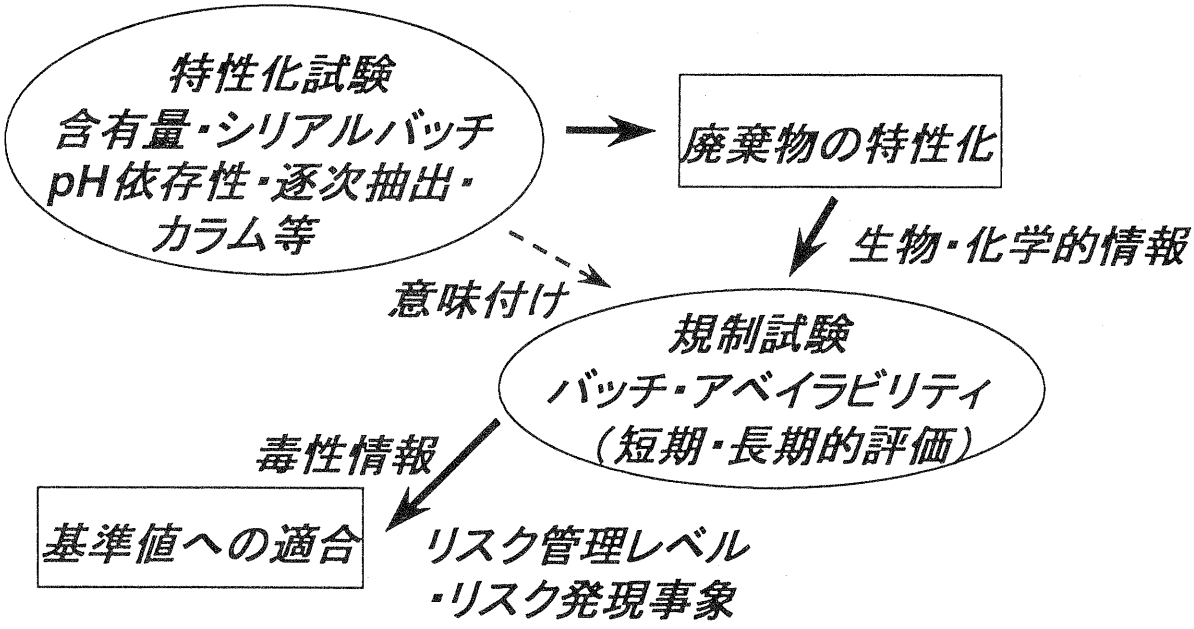


（サルモンス教授による地球化学サイクルコンセプト）

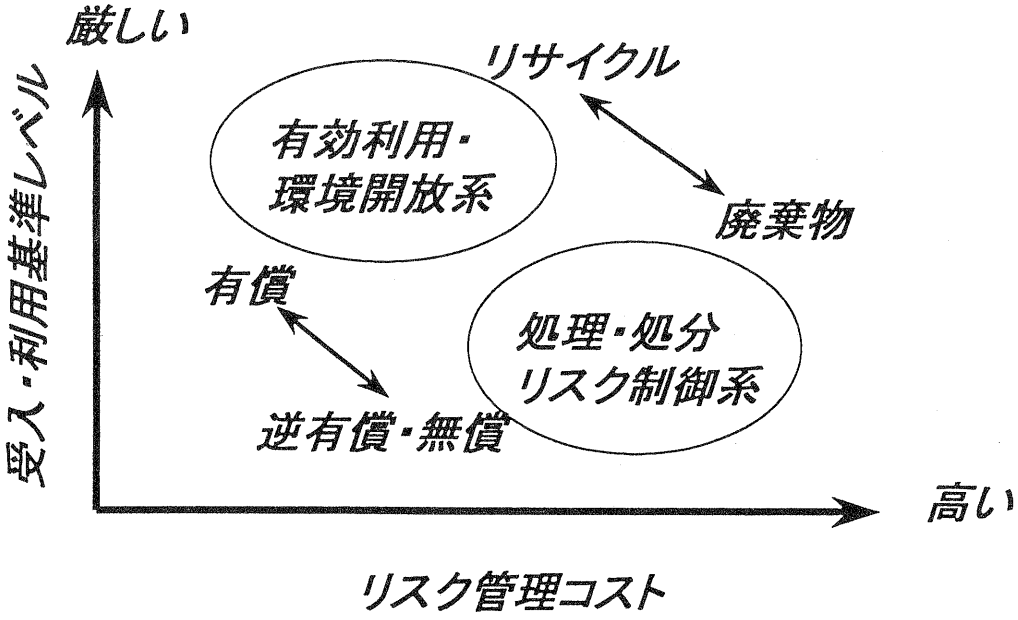
図－9　廃棄物中有害金属の長期的挙動に対する影響要因



図－10　埋立層内有害金属の収着形態別の長期的挙動（概念図）



図－11　溶出試験による評価スキーム



図－12　廃棄物の適正処理とリサイクルに
関する基準の整合性

等を招く恐れがあり、将来的には各国間の調和を図り世界共通の評価方法への統一を意識しておく必要がある。EU などでは溶出試験法の統一の議論がさかんであり、将来的にはわが国の各種評価方法も整合をとる必要性に迫られよう。

6．おわりに

以上、モニタリングを目的とした溶出試験の適用の在り方から踏み込んで、溶出試験による評価の全体スキームの問題についても議論した。筆者自身も曖昧な点が多く、議論が終始整合がとれたものであるか自信はないが、関係各位との活発な意見交換を今後行っていきたいと思っている。

昨年の6月に廃棄物処理法が改正され、今般（1998 年6月 17 日施行）、最終処分場の構造・維持管理に関する技術上の基準も出された。法律改正に関わる一連の動きの中で、溶出試験法の方法論及び適用のあり方に関する議論は特になかったが、いずれ何らかの見直しが必要であることは、実務者及び研究者等誰しもが持っている共通の認識である。廃棄物学会を中心にして、廃棄物分野における研究成果及び他国における議論等の情報集積を図り、わが国としてのスキームを示していかなければならない。

参考文献

1）田中 勝他：最終処分場のリスク管理のための監視及び修復技術の総合化に関する研究，総合研究プロジェクト別環境保全成果集，9-1～9-27，環境庁企画調整局環境研究技術課編（1996）

2）田中 勝他：最終処分場のリスク管理のための監視及び修復技術の総合化に関する研究，総合研究プロジェクト別環境保全成果集，10-1～10-26，環境庁企画調整局環境研究技術課編（1997）

3）Sakai,S., Sawell,S.E., Chandler,A.J., Eighmy,T.T., Kosson,D.S., Vehlow,J., van der Sloot,H.A., Hartlen,J. and hjelmar,O.: World Trends in municipal Solid Waste Management, Waste Management, Vol.16, Nos 5/6, pp.341-350(1996)

4）van der Sloot,H.A.: Present Status of Waste Management in the Netherlands, Waste Management, Vol.16, Nos 5/6, pp.375-383(1996)

5）U.Forstner: Waste Treatment: Geochemical Engineering Approach, 155-182, R.Reuther(Ed.): Geochemical Approaches to environmental Engineering of Metals, Springer

6）王 寧、欧陽 通、岩島 清、大迫政浩：廃棄物試料中の有害無機物質の溶出ポテンシャル評価方法－埋立管理とモニタリング（1）－、用水と廃水、39(7)、pp.11～19（1997）

２．廃棄物の溶出試験に関する文献レビュー

２．廃棄物の溶出試験に関する文献レビュー

化学性状サブ研究会

化学性状サブ研究会では，平成８年度に溶出試験に関する文献（主に1990～1996年に発表されたもの）約200資料を収集した。それらの文献レビューをここに示す。ここでは項目ごとにまとめ約70の論文を参考文献としてあげたが，収集した200の全論文は別表に最後に示した。

ここでは対象廃棄物として放射性廃棄物を，また対象物質として有機化合物を除外した。放射性廃棄物は異なるシナリオの規制方法を持つためであるが，日本でも海外でも詳しい研究がなされており，非放射性廃棄物の溶出を考える際の，特に，ガラス系固化体，高温での溶出，長期の溶出，表面溶出のメカニズムのなどの有用な情報が得られる。有機化合物を含めなかったのは，溶出機構が異なることやあまり多くの情報がまだ提出されていないことによる。

２－１　各種の溶出試験方法

我が国の溶出試験方法

我が国の廃棄物の分析方法は昭和４８年に環境庁告示第１３号として公布された。その後の変更，改正については，淡路[1)]が経緯や問題点，またその間環境庁で行われた研究を概説している。この方法の解説書は最近「産業廃棄物分析マニュアル」[2)]として出版されている。廃棄物の溶出試験が制定された当時は時代の要請から行政的な意味合いが強く，環境中の汚染物として有害性の有無や環境影響の程度を推定することが中心であった。有害性に関する廃棄物管理を目的に，比較的簡易なバッチ試験やカラム試験による規制有害物質の溶出量を報告した例や溶出操作上の問題点を検討した例が多かった。

我が国の基準は水道水源の汚染を未然に防ぐことを目的として，水道水の基準をもとに決められている。溶出試験による溶出量の基準値を表１に示す。溶出試験は指定された廃棄物を管理型埋立地か遮断型埋立地のどちらに処分することができるかを決めるための方法であり，廃棄物が環境中でどれだけの負荷を与えるかを示す量を知るための方法ではない。環境汚染に関して汚染土壌の判定に同様の溶出試験（環境庁告示第４６号）があり，これらと共に環境影響の量を表すものとして，また有効利用の評価に採用されることがあり，本来の目的以外のために試験法だけが用いられることに対する疑問が示されている[3, 4)]。

海外の溶出試験方法

海外の溶出試験の操作上の比較を表２に示す。コンセプトや操作方法の違いは酒井[3]やvan der Sloot ら[5],金子[6]により詳しく述べられているが，概略を表３に示す。最も多くの規制法をもつオランダは４種の方法を規定している[5]。カラム試験は小さい液固比(L/S=0.1 ～ 10)で初期溶出を，繰り返しバッチ試験では L/S=20 ～ 100 で中期的あるいは平均的な溶出量を，アベイラビリティ試験では L/S=100 で最大溶出可能量を求める試験である。固化成型物にはタンクリーチング試験(L/S=20 ～ 100)を適用し，溶媒を定期的に替えて，溶出総量を表面積当たりで表す。いずれも pH4 の硝酸溶液が用いられている。これら４種の方法以外に，溶媒を水（日本やドイツ等），酢酸系（アメリカ，カナダ），炭酸系（スイス，イタリア）とした試験法が多くの研究者の検討対象となっている。

酢酸系溶媒を用いるアメリカ法(TCLP,Toxicity Characteristic Leaching Procedure)は，生ごみと混合埋立したとき有害物質が溶出するかどうかを決めるための評価方法だからである。生ごみの分解によって生じる pH5 の酢酸溶液を最悪のシナリオと考えて選定されている。　オランダや北欧では酸性雨を想定して酸性水（pH4 の硝酸）を用いている。一般廃棄物焼却灰や石炭灰等６試料による詳細な比較が行われた結果[5],一般的に有害物質の溶出量はアベイラビリティ試験≧ TCLP ＞ドイツ法であったと報告されている。

炭酸系では試料あるいは元素によって異なるが，As や Mo が多く溶出する場合もある[5, 7]。埋立地を想定すると炭酸ガスの接触は表面だけであり規制法としての疑問も提起されている[5]が，アルカリ性廃棄物ではライシメータ試験の pH がカラム試験より低い[8, 9]。この理由の一つに炭酸ガスの影響が推定されている[10]。下水道汚泥焼却灰や溶融スラグを建設資材として利用する際の安全性評価基準方法として，日本でも最近炭酸ガスによる方法が検討されている[7]。国際鉄鋼連盟の行った４種の鉄鋼関連廃棄物の比較例[11]でも，規制法による溶出量の評価が難しいことが述べられ，廃棄物の特性化や有効利用のためには単一の試験方法では不十分であることは一般的な認識となっている。

ｐＨ依存性試験は環境中のｐＨ変化に対する溶出量の変化をみるバッチ試験である。比較的簡単な試験であり溶出挙動の把握に重要であることから，次節で述べるように報告が増えてきている。ライシメータ試験は最終処分場で自然降雨を想定した現場試験を擬したものである。

廃棄物の化学的特性を知るためには，多様な溶出試験が必要ではあるが，多様な規制法溶出試験を統一化することも現実的な課題となってきた。欧州ではヨーロッパ共同体に移行することに伴い，政治経済的統一化のみならず，有害廃棄物の管理体制も一定の

表1 廃棄物中の有害物質の基準

物質名	判定基準値（mg/l）				（参考）水質環境基準値（mg/l）	（参考）排水基準値（mg/l）
	燃え殻，ばいじん	汚泥	廃酸 廃アルカリ	鉱さい		
カドミウム又はその化合物	0.3	0.3	1	0.3	0.01	0.1
シアン化合物	—	1	1	—	ND	1
有機リン化合物	—	1	1	—	—	1
鉛又はその化合物	0.3	0.3	1	0.3	0.01	0.1
六価クロム化合物	1.5	1.5	5	1.5	0.05	0.5
ヒ素又はその化合物	0.3	0.3	1	0.3	0.01	0.1
水銀又はその化合物	0.005	0.005	0.05	0.005	0.0005	0.005
アルキル水銀化合物	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PCB	—	0.003	0.03	—	ND	0.003
ジクロロメタン	—	0.2	2	—	0.02	0.2
四塩化炭素	—	0.02	0.2	—	0.002	0.02
1,2-ジクロロエタン	—	0.04	0.4	—	0.004	0.04
1,1-ジクロロエチレン	—	0.2	2	—	0.02	0.2
シス-1,2-ジクロロエチレン	—	0.4	4	—	0.04	0.4
1,1,1-トリクロロエタン	—	3	30	—	1	3
1,1,2-トリクロロエタン	—	0.06	0.6	—	0.006	0.06
トリクロロエチレン	—	0.3	3	—	0.03	0.3
テトラクロロエチレン	—	0.1	1	—	0.01	0.1
1,3-ジクロロプロペン	—	0.02	0.2	—	0.002	0.02
チウラム	—	0.06	0.6	—	0.006	0.06
シマジン	—	0.03	0.3	—	0.003	0.03
チオベンカルブ	—	0.2	2	—	0.02	0.2
ベンゼン	—	0.1	1	—	0.01	0.1
セレン又はその化合物	0.3	0.3	1	0.3	0.01	0.1

廃酸，廃アルカリを除き，溶出試験（L/S＝10）による濃度規制

表2 各国のバッチ式溶出試験の比較[3)]

国名（試験名称）	日本		ドイツ DIN 38414 S4	フランス AF NOR X31-210	米国/カナダ		スイス TVA	オランダ	
	環境庁告示13号	環境庁告示46号			TCLP	EP		Serial Batch	Availability Test
試料粒径	<5 mm	<2 mm	<10 mm	<4 mm	<9.5 mm	<9.5 mm	最終処分の形状	<3 mm	<125 μm
溶媒	蒸留水＋HCl	蒸留水＋HCl	脱イオン水	脱イオン水	酢酸又は同緩衝液	脱イオン水＋酢酸	CO_2 飽和溶液	脱イオン水	脱イオン水＋HNO_3
pH	5.8～6.3	5.8～6.3			2.88/4.93	≦5(維持)	(5.6)	4	7, 4(固定)
試料量(g)	>50	>50	100	150	100	100	100～200	40	16
液固比(ml/g)	10	10	10	10	20	16	10	20	100
温度(℃)	常温	常温	—	恒温槽水浴	22.3±3	20～40	—	—	—
抽出容器	—	—	2 l フラスコ	1.5 l フラスコ（径 100 mm）	ポリエチレン瓶	ポリエチレン瓶	瓶	1 l ポリエチレン容器	ビーカー
抽出方法	平行振り混ぜ	平行振り混ぜ	転倒振り混ぜ	縦回転 60 rpm	回転 30±2 rpm	連続かくはん	CO_2 100 ml/分	振り混ぜ	かくはん
抽出時間(h)	6	6	24	16	18	24	24	24×5 段階	3×2 段階
抽出回数	1	1	1～2	1～3	1	1	1～2	1～5	1～2
固液分離法†	1 μm GFF	遠心分離 3000 rpm ×20 分＋0.45 μm MF	0.45 μm MF	0.45 μm MF 又は遠心分離 >2000 G	加圧沪過 0.6～0.8 μm GFF	0.45 μm MF	0.45 μm MF	0.45 μm MF	0.45 μm MF
備考					溶媒は前試験により決定	0.5 M 酢酸の添加量の上限は 4 ml/g			
長所	• 物質の性質が溶出性を決定する • 再現性が良い • 操作が簡便				• 有機酸との接触を考慮		• 空気接触時の炭酸塩化の影響が把握できる	• 長期的な溶出を短時間で把握可能	• 溶解度の影響小 • 陰イオンを適切に評価
短所	• 陽イオンを低く評価する場合がある • 実際の埋立地の状況と関連づけるのが困難 • pH 変動に弱く，長期的な影響は不明				• 陰イオンを低く評価する場合がある		• 埋立地の状況を必ずしも反映していない	• 付加的な情報が限定されている	• 溶出濃度が低い

† GFF：ガラス繊維沪紙　MF：メンブランフィルター

表3 主な溶出試験方法の種類と特徴

溶出試験の種類	溶媒系	試料性状	最大溶出量	試料重量	溶出試験の特徴と得られる情報
規制バッチ試験	水，硝酸，酢酸，炭酸	粒状物	×	50～200 g	特定条件下の溶出量，有害廃棄物の分類，安定化処理の効果の確認
pH 依存性試験	水，硝酸，塩酸，酢酸，炭酸，NaOH	粒状物	○可能	不定（5～50 g）	pH を因子とした溶出量の変化
アベイラビリティー試験	硝酸	粉体	◎可能	16 g	最大溶出量
カラム試験	水，硝酸，NaOH	粒状物	△可能	不定（30 g～20 kg）	初期溶出量，長期溶出量，溶出パターン，最終処分場のシミュレーション
ライシメーター試験	水，硝酸	粒状物	△可能	不定（10～1000 kg）	初期溶出量，溶出パターン，最終処分場のシミュレーション
タンクリーチング試験	硝酸	成形体	×	40 mm 以上の立方体	固化成形体の拡散による溶出量
逐次溶出試験	$MgCl_2$, NaOAc-HOAc, NH_2OH, H_2O_2，王水，HF	粒状物	○可能	不定（数 g）	イオン交換性，炭酸塩，酸化物，有機物結合型等の分類

共通性が要求されており，最近溶出試験の統一化を目指した論文集が出版された[12]。各国によって有害廃棄物や有効利用に関する評価基準とその試験方法が異なると，廃棄物の適正な管理に障害がでてくることが予想され，政策決定のためにもヨーロッパ諸国では基本的考えをまとめることが必要とされている。この論文集は 1991，1994，1997 年と開催された土木建築系で使用される廃棄物の環境影響と技術開発の国際会議(The International Conference on Environmental Implication of Construction Materials and Technology Development)の発表論文の一部であり，Studies in Environmental Science シリーズとして出版されている[13]。ヨーロッパでは廃棄物の有効利用を積極的に進める立場をとり，環境影響を予測する合理的，現実的，あるいは長期予測できる試験方法の確立を模索し，ヨーロッパ技術委員会試験（CEN 試験）が提案された[3, 12, 13]。これは溶媒を水とする２段階バッチ試験（L/S=2 と 8 で最終的に L/S=10 として混合）で，異なる溶出試験の架け橋と考えられる。Lewin [14]の結果では，ドイツ法と CEN 試験の溶出量は Ba 及び Pb 以外は変わらないと報告されている。このような統一化の動きはあるものの，現実に各国は独自の公定法溶出試験を変更するのは難しく，全体的な有効利用の評価フローは各国の公定法を基本にして作成される。例えば北欧では独自の推奨法[16]を検討しており，カナダでは従前どおり US-EPA の TCLP をベースに検討されている[15]。

一般廃棄物焼却灰については国際的なワーキンググループ(IAWG)が 1989 年から５年間の詳細な研究結果を報告書[17]にまとめており，溶出に関する記述もまとまっている。溶出に関する考え方は上記以外にも報告されている[18, 19]。

なお寺島[20]は埋立地浸出水に関連した総説においてカラム試験やライシメータ試験の情報を集めており参照されたい。

２－２　廃棄物の溶出に影響を与える因子

多くの研究者が指摘しているが[3-6, 17-20]，大別して①試料（不均一性，粒径等），②溶出条件（溶媒 pH，L/S，溶出時間等），③溶出方法の種類（バッチ，カラム，ライシメータ等），に分けられ，特に②と③の検討結果が多く報告されている。

溶出の物理的化学的メカニズムについては IAWG の報告書[17]が詳しい。これによれば廃棄物の特性化に必要な実験情報は，対象元素の全濃度（HF を含む酸による分解），最大溶出可能量（アベイラビリティ量），pH 依存性溶出量，異なる L/S の溶出量である。しかし現在のところ，これら全部を含む論文はまだ少ない。次の段階は各元素の化合形態あるいは鉱物種の情報である。主成分との関連により全体的な溶出挙動の解明や熱力学的モデル化が可能となる。元素によっては酸化還元状態の変動や炭酸ガスとの接

触等埋立地で起こりうる条件による実験情報も重要となる。なお溶出量の単位は，L/Sが変動する各種試験による比較のために，濃度ではなく廃棄物重量単位あたりの溶出量(release, 単位 mg/kg)で記述する[13, 17]ことが推奨されている。

２－２－１　試料の代表性

試料の不均一性は廃棄物を分析する際には避けられない。400 試料の一般廃棄物焼却飛灰の鉛溶出量の変動係数は 78%であったのに対し，焼却灰では 190%という例[21]が示すように試料の質の変動は大きい。IAWG の報告書[17]では，例えばある施設の一般廃棄物焼却灰の代表性を得るためには，施設の運転管理の特徴を考慮して，採取日，採取回数，採取時間，採取量を決める必要があることを述べている。

試料粒径については，一般廃棄物焼却灰[22]と鉄鋼スラグ[23]で，粒径が小さいほど溶出量が多い結果が報告されているが，逆に建設系の廃棄物では中間的な粒径粒子で溶出量が多くなる例[24]も報告されている。

試験法の精度管理に関して，1996 年に一般廃棄物焼却飛灰を対象に行われた全国の精度管理調査[25]では，Cd,Pb,Cu,Zn,Cr 溶出濃度の変動係数は 50%程度（約 67%の値がある範囲の最小と最大の比は３倍）であり，均一な試料でもこの程度の変動がある。ヨーロッパのグループは新しい試験法を導入するにあたって，標準試料の作成[26],溶出試験の精度管理[27]を行っており，焼却灰のセメント固化物のタンクリーチング試験における溶出量の変動は小さいと報告している。

２－２－２　溶出条件の影響

溶媒ｐＨ

pH は溶出量に大きく影響する因子である。環境の変化で pH 変動が起こった場合の溶出量を推定する方法として pH 依存性試験が採用され，石炭灰やスラグ[28],一般廃棄物焼却灰及び飛灰[19, 29, 30, 31]やクロム鉱石汚染土壌[32]の特性化，飛灰処理物の効果[33]の確認，種々の廃棄物の比較[4, 33],また鉄鋼関連の廃棄物の比較[11]等の例がある。基本的には元素毎に pH 依存性溶出パターンは類似性があることが，一般廃棄物焼却灰（底灰，飛灰）及びそのセメント固化物，石炭灰，下水汚泥添加土壌，シュレッダー廃棄物の比較[34],焼却灰，鉱滓，汚泥等産業廃棄物と一般廃棄物焼却灰の比較[4]等により示されている。そのパターンは更に溶存有機物や塩素イオンの共存によって変化することも指摘されている[17, 19]。IAWG の報告書[17]は各種規制溶出試験による焼却灰の溶出量

と溶出液 pH との関係は元素特有の pH 依存性溶出曲線上にあることを示しており，そのパターンを pH の 6 次式で近似している。またカルシウム化合物と灰の pH 依存性を比較し，化合形態との関係を調べた例もある[30, 35]。その他多くの論文で pH と溶出量との関係が述べられている[10, 12, 13, 18, 20, 23, 25, 27, 36-39]。

液固比

液固比(L/S)は埋立地では時間と対応し，累積溶出量との関係図から，溶出のメカニズムが推定される。バッチ試験においては溶解度が制限因子となる場合に重要であり，高アルカリの一般廃棄物焼却飛灰では溶解度による制限がなくなるのは L/S が 100 以上必要であること[36]，pH12 の溶出可能量は L/S=300 で一定になるが pH4 では 1000 以上必要であることが示されている[37]。アベイラビリティ試験は pH4 を持続する L/S=100 の溶出量として，最大溶出可能量を示すと考えられているが，Pb はアルカリ域の方が溶出量が大きい場合もあり，アルカリ域でのアベイラビリティ試験も提案されている[37]。一般に L/S を大きくすると最大溶出量に近づくが，繰り返しバッチ試験でも固化成型物のタンクリーチング試験でも，更にカラム試験のような L/S の小さい試験でも同様であり，そのパターンや最大溶出可能量との比較により溶出量のメカニズムが検討され，オランダの４種の溶出試験の組み合わせが廃棄物の特性化に適していることが示されている[18, 19, 28]。Reardon ら[38]は L/S=3 と 6 の 2 組の溶出試験から，Na,K,Cl,B の溶出は化合物や鉱物の溶解度に支配されないが，Ca,Sr,SO_4,Al,Si,As,Se は特定の鉱物の溶解度に支配されると推定している。カラム試験の L/S が実際の埋め立て後の時間経過に対応するかどうかについては疑問もあり，カラム試験による溶出後の廃棄物のアベイラビリティ量は予測される量よりかなり大きく，風化した廃棄物の溶出可能量をもとの廃棄物から予想することが難しいことが指摘されている[39]。

酸化還元状態

還元状態での溶出の例をあげると，焼却灰と土壌の混合物の実験では，Cd は変化しないが，As は還元状態での溶出が増加すること[40]，汚染土壌では，還元状態又はアルカリ状態で As の溶出量が増加し[41]，鉄鋼スラグでは Zn と Cr の溶出が減少すること[23]，石炭灰固化物では As,Cr,Pb,V,Fe が還元性で溶出しやすく Cr が酸化性で溶出しやすいこと[42]，一般廃棄物焼却飛灰からの As と Se の溶出にはヒドロキシルアミン還元性で溶出する FeOH との関連が強いこと[43]等が報告されている。逆に酸化状態での試験も試みられており，鉄鋼スラグ，一般廃棄物焼却灰，木系焼却灰の酸化条件のアベイラ

ビリティ試験では，酸化状態で Cr,Cu,V の溶出量は増加するが，他の元素は増加減少傾向が試料によって一定せず，pH の方が溶出量への影響が大きい[23]ことが報告されている。

２－２－３　カラム試験とライシメータ試験

長期の溶出パターンをみる場合と初期のそれをみる場合がある。欧州では降雨量が400mm/年と少なく，オランダではカラム試験は規制法に用いられ，初期溶出量を推定している。ライシメータ試験では，数 100kg の廃棄物を用いた場合，L/S=1 で数 100L の溶媒が必要となるため，初期溶出の結果しか得られないことが多い。石炭灰のライシメータ実験では，溶出液 pH は高く，B,As,Mo,Cr 等の陰イオンが高い濃度で検出されており，カラム試験の溶出量とほぼ等しい結果が得られている[44]。キュポラダスト[45]，石炭灰と排ガス処理残渣[46]，石炭灰[46]でも同様の結果が得られている。以上の例は溶媒を pH4 硝酸溶液としているが，NaOH 水溶液を溶媒として用いたライシメータ試験[48]，酢酸系の人工浸出水によるカラム実験[49]もある。埋立地のチャネリング効果を考慮したカラム実験も行われ[50]，中心部に比べカラム壁の液量は多く，主成分元素の溶出量の差はあるものの微量元素の溶出濃度は中心部と変わらないと報告されている。長期の溶出をみた例では，陰イオンで溶出する Cr,B のような元素は，L/S=300 ではバッチ試験よりもかなり溶出量が増える[51]。またカラム試験による推定は現実とは異なるという指摘もある[39]。

２－２－４　その他の溶出試験

海水を溶媒とした例がいくつかある。海水を用いた汚泥の pH 依存性試験では，中性域で Cd,Cu,Zn の溶出量が増加している[4]。雨水と海水による焼却灰のカラム試験とバッチ試験では，Cd,Cu,Pb,Zn は雨水より海水の方が溶出量が増加し，As,Se,Cr,Hg は変化していない[52]。石炭灰セメント固化物を海水に長期浸漬した後の表面の鉱物種変化をみた例もある[53]。

土壌学では形態別溶出がよく用いられており，最近廃棄物への適用がみられる。一般廃棄物焼却灰の酸化還元状態の As,Pb,V,Cr 等の溶出[43]，皮革業汚泥からの Cr の溶出[54]，一般廃棄物焼却灰の Pb,Cr,Cd 等[55, 56]，焼却飛灰の 10 元素[57]，Pb 鉱滓や Pb 化合物[58]等の例がある。土壌のマトリックスでほぼ一定であるのに対して，廃棄物では大きな幅があり，土壌のように決まった逐次溶出法を用いることはできない。例えば焼却飛灰等のように可溶性物質を多く含む廃棄物に対して，$CaCl_2$水溶液による溶出は意味

をなさない。IAWG の報告書[17]では逐次溶出は，易溶出性，酸溶出性，還元性，非溶出性の分類によることを提案しているが，環境影響量を把握する目的では適当と考えられる。

２－２－５　溶出試験結果のモデル化

MINTEQA2(鉱物種の化学平衡計算)等の熱力学モデルにより溶出データの比較検証が行われており，一般廃棄物焼却灰[17, 29, 34, 59]や石炭灰[47]の pH 依存性溶出量に対して溶解度を支配する鉱物を推定している。いずれも 10 以上の主成分元素と微量元素を取り扱っている。これらは次節のＸ線回折等による鉱物種の解析と共に検討されることが多い。

２－２－６　廃棄物中の元素の化合形態

溶出試験結果のモデル化や溶出機構を把握するために，機器分析による元素の状態分析が行われている。一般廃棄物焼却飛灰のＸ線回折（ＸＲＤ），Ｘ線光電子分光分析（ＸＰＳ），オージェ分光分析（ＡＥＳ），二次イオン質量分析により，25 元素について，存在する可能性のある化合形態が Eighmy ら[29]により報告され，飛灰の水抽出前後の比較，例えば Pb の形態変化をＸ線光電子分光分析のスペクトル分析で明らかにする等興味ある情報が提供されている。一般廃棄物焼却灰と飛灰のＸＰＳによる Na 等主成分元素の化合形態や表面に多量に存在する元素の特定した[30]の例もある。一般廃棄物焼却灰のＸＲＤ分析例として，磁性や比重で分離した画分の同定[54]，風化後の灰との比較[59]，水抽出に関連した例[60]等がある。鉱業廃棄物の pyrrhotite(FeS)から硫酸が生成する過程を分析走査電子顕微鏡（ＳＥＭ－ＥＤＳ），ＸＰＳ，ＡＥＳで解明した例[61]，廃鉱石等の Pb や As の溶出に関連した詳細なＸＲＤ分析例もある[62]。セメント等の固化物で溶出前後の表面濃度をＳＥＭ－ＥＤＳで測定した例[63, 64]によれば，溶出後，Ca は除かれるが Si はほとんど,Al,Fe は部分的に残っていること，Mg は表面に多くなること，SO_4は Ca より深く浸食されていること，25 年河川水中暴露で表面から約 2mm が変化したこと等が明らかにされてきた。また汚染土壌や廃棄物をリン酸系の薬剤で処理し，処理効果を詳細なＸＲＤ分析，ＳＥＭ，透過型電子顕微鏡（ＴＥＭ）で分析した[65]もある。

２－２－７　その他

以上の分類項目にいれられないが，溶出に関して興味ある方法をいくつか紹介する。

自作の拡散チューブにより放射性元素を用いて固化物表面からの拡散による物質移動を調べた例[63]では Na の移動速度が最も早く，Mo は Zn や As より比較的早いことが示されている。

健康影響（人体への有害物質の取り込み(Bioavailability)）の観点から別の溶出シナリオが考えられ，胃酸等体内条件を想定した溶出(HCl+NaCl 等)が鉱滓や汚染土壌等に適用され，鉱山や精錬所付近での粉塵や土壌を経口摂取するリスク評価のために，Pb や As の取り込み量の推定が行われている[58, 66]。

廃棄物を水や酸などで抽出し無害化する方法は一般廃棄物焼却飛灰の処理に用いられてるが，微生物培養による金属の抽出も可能である。微生物がグルコースを栄養としクエン酸やシュウ酸を生成することを利用して一般廃棄物焼却飛灰から Cd,Zn,Cu 等の金属を抽出した例[66]や，アルミ精錬の赤泥から Al を回収した例[68]がある。

廃棄物の溶出液の毒性評価の研究もあるが[69],適用にあたって課題や問題点があり[70]，これからの課題と考えられる。マイクロトックスによる毒性評価を規制基準にもつ国ではそのデータが報告されている[71]。

参考文献

1)環境庁水質保全局海洋汚染・廃棄物対策室監修：産業廃棄物分析マニュアル，(1995), 日本環境測定分析協会.

2)淡路宣男：廃棄物学会誌，7，317(1996).

3)酒井伸一，水谷聡，高月紘：廃棄物学会誌，7，389(1996).

4)貴田晶子，野馬幸生：廃棄物学会誌，7，410(1996).

5)H.A.van der Sloot, D.Hoede, P.Bonouvrie：Netherlands Energy Research Foundation ECN, ECN-C-91-082(1991).

6)金子栄廣：廃棄物学会誌，3, 182(1992).

7）A.M.Fallmann, B.Aurell：Sci. Total Environ., No.178, 71(1996).

8)金谷健，寺島泰：廃棄物学会論文誌，6，39(1995).

9)松藤敏彦，田中信寿，宮脇健太郎：土木学会第 48 回年次学術講演会講演論文集,

1152(1993).

10)渡辺春樹，尾崎正明，野崎眞司：下水道汚泥焼却灰，溶融スラグ及びそれらの再生資材からの重金属類の溶出特性，環境工学研究論文集，33,1(1996).

11)J.A.Philipp, R.Endell, J.Raguin, O.Dechelette: ASTM Spec.Tech.Pub. No.933, 7(1986).

12)H.A. van der Sloot, L.Heasman, Ph. Quevauviller(Ed.)：Harmonization of Leaching/Extraction Tests(Studies in Environmental Science 70) (1997), Elsevier.

13)J.J.J.M.Goumans, H.A.van der Sloot(Ed.)：Waste Materials in Construction(Studies in Environmental Science 48)(1991), Elsevier(Waste Mater. Constr.)； Environmental Aspects of Construction with Waste Materials(Studies in Environmental Science(1994), Elsevier(Environ. Asp. Constr. Waste Mater.).

14)K.Lewin：Sci. Total Environ., No.178, 85(1996).

15)J.A.Stegemann, P.L.Cote ：Sci. Total Environ., No.178, 103(1996).

16)M.Wahlstrom：Sci. Total Environ., No.178, 95(1996).

17)International Ash Working Group: An International Perspective on Characterisation and Management of Residues from Municipal Solid Waste Incineration, Final Document(1995).

18)G.L.de Groot, H.A.van der Sloot：Hazard. Waste, No.1123, 149(1992).

20)寺島泰：廃棄物学会誌，7，148(1996).

21)野馬幸生，貴田晶子，児玉學，山下俊之，神頃貢，古川義久：第 10 回全国都市清掃研究発表会，167(1989).

22)J.A.Stegemann, J.Scheider：Waste Mater. Constr., 135(1991).

23)A-M.Fallman, J.Hartlen：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 39(1994).

24)D.Goets, W.Glaseker ：Waste Mater. Constr., 283(1991)

25)環境庁企画調整局環境研究技術課編：平成８年度環境測定分析統一制度管理調査に関する中間報告(1996).

26)F.K.M.Lamers, G.L.de Groot ： Waste Mater. Constr., 375(1991).

27)H.A.van der Sloot, G.L.J.van der Wegen, D.Hoede, G.L.de Groot：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 63(1994).

28)H.A.van der Sloot: Waste Manage.& Res., 8, 215(1990).

29)T.T.Eighmy, J.E.Krazanowski, D.S.Domingo, D.Staempfli, J.R.Martin, P.M.Erickson：Environ. Sci. Technol., 29, 629(1995)

30) A.Kida,Y.Noma, T.Imada：Waste Manage., 16, 527(1996).

31)酒井伸一，水谷聡，高月紘，岸田拓郎：廃棄物学会論文誌, 6, 225(1995).

32)C.H.Weng, C.P.Huang, H.E.Allen, A.H-D.Chen, P.F.Sanders：Sci. Total Environ., No.154, 71(1994)

33)T.Uchida, I.Ito, K.Harada ： Waste Manage., 16, 475(1996).

34)H.A.van der Sloot, R.N.J.Comans, O.Hjelmar：Sci. Total Environ., No.178, 111(1996)

35)R.N.J.Comans, J.A.Meima：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 103(1994).

36)金子栄廣，山口稔：廃棄物学会論文誌，5, 45(1994).

37)S.Mizutani, T.Yoshida, S.Sakai, H.Takatsuki：Waste Manage., 16, 537(1996).

38)E.J.Reardon, C.A.Crank, C.J.Warren, R.Dayal, H.M.Johnson：Waste Manage. & Res., 13, 435(1995).

39)M.Janssen-Jurkovicova,G.G.Hollman, M.M.Nass, R.D.Schuiling：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 161(1994).

40)C.Zevenbergen, W.F.Hoppe：Waste Mater. Constr., 369(1991).

41)P.H.Masscheleyn, R.D.Delaune, W.H.Patrick,Jr.,：Environ. Sci. Technol., 25, 1414(1991)

42)D.C.Dusing, P.L.Bishop, T.C.Keener：J. Air Waste Manage. Assoc., 42, 56(1992)

43)E.E.van der Hoek, R.N,J.Comans: Environ. Sci. Technol., 30, 517(1996).

44)O.Hjelmar: Waste Manage. & Res., 8, 429(1990).

45)H.Belvi, D.M.Stampfli, P.Baccini: Waste Manage. & Res., 10, 153(1992)

46)M.Wahlstrom, J.Ranta, P.Lindroos: Waste Manage. & Res., 8, 451(1990)

47)R.Garavaglia, P.Caramuscio：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 87(1994).

48)J.A.Stegemann, J.Schneider, B.W.Baets, K.L.Murphy：Waste Manage. & Res., 13, 149(1995)

49)P.Kjeldsen, T.H.Christensen: Waste Manage. & Res., 8, 277(1990).

50)D.L.Chichester, S.Landsberger：J. Air & Waste Manage., 46, 643(1996).

51)貴田晶子：都市清掃, 41, No.164, 17(1989).

52)O.Hjelmar, E.A.Hansen, K.J.Andersen, J.B.Andersen, E,Bjornestat： Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 137(1994)

53)D.E.Hockley, H.A.van der Sloot: Environ. Sci. Technol., 25, 1408(1991).

54)C.S.Kirby, J.D.Rimstidt: Environ. Sci. Technol., 27, 652(1993).

55)S.E.Tisdell,V.T.Breslin: J. Environ. Qual., 24, 827(1995).

56)P.Prudent, M.Domeizel, C.Massiani: Sci. Total Environ., No.178, 55(1996).

57)佐藤正光, 山岡康宏：水処理技術, 36, 549(1995).

58)U.G.Gasser, W.J.Walker, R.A.Dahlgren：Environ. Sci. Technol., 30, 761(1996).

59)C.Zevenbergen, R.N.J.Comans：Environ. Asp. Constr. Waste Mater., 179(1994)

60)C.S.Kirby, J.D.Rimstidt: Environ. Sci. Technol., 28, 443(1994).

61)A.R.Pratt, H.W.Nesbitt , I.J.Muir：Geochim. Cosmochim. Acta, 58, 5147(1994).

62)A.Davis, J.W.Drexler, M.V.Ruby, A.Nicholson：Environ. Sci. Technol., 27, 1415(1993).

63)H.A.van der Sloot, G.L.Groot, J.Wijkstra：ASTM Spec. Tech. Pub., No.1033, 125(1989).

64)K.Y.Chen , P.P.Bishop: PB report, PB-94-155249,(1994).

65)Q.Y,Ma, S.J.Traina, T.J.Logan: Environ. Sci. Technol., 27, 1803(1993).

66)M.V.Ruby, A.Davis, R.Schoof, S.Everle, C.M.Sellstone：Environ. Sci. Technol., 30,

422(1996).

67)P.P. Bosshard, R. Bachofen, H. Brandl: Environ. Sci. Technol, 30, 3066(1996).

68)P.Vachon, R.D.Tyagi, J-C.Auclair, K.V.Wilkinson：Environ. Sci. Technol, 28, 26(1994).

69)池田太，金子栄廣：廃棄物学会論文誌，8, 107(1997).

70)金子栄廣：廃棄物学会誌，7，394(1996).

71)A.Andres, J.A.Irabien: Waste Manage. & Res., 12, 429(1994).

（文責　貴田）

						No. 1
著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	出版社
Ed. by H.A. van der Sloot, L.Heasman,	Harmonization of Leaching/Extraction Tests(Studies in				+(1997)	Elsevier
and Ph. Quevauviller:	Environmental Science 70)					
International Ash Working Group:	An International Perspective on Characterisation and				(1995)	
	Management of Residues from Municipal Solid Waste					
	Incineration, Final Document					
Ed.by J.J.J.M.Goumans, H.A.van der Sloot and	Environmental Aspects of Construction with Waste(Studies				+(1994)	Elsevier
and Th.G.Aalbers	in Environmental Sceince 60)					
Ed.by J.J.J.M.Goumans, H.A.van der Sloot and	Waste Materials in Construction(Studies in Environmental				+(1991)	Elsevier
and Th.G.Aalbers	Science 48)					
H.A.van der Sloot, D.Hoede and	Comparison of Different Regulatory Leaching Test	Netherlands Energy Resea	ECN-C-91-08	2	+(1991)	
P.Bonouvrie	Procedures for Waste Materials and Construction Materials					
H.A.van der Sloot, G.L.Groot and J.Wijkstra:	Leaching Characteristics of Construction Materials and	ASTM Spec.Tech.Pub.	No.1033,	125-149	(1989)	
	Stabilization Products Containing Waste Materials,					
J.A.Philipp, R.Endell, J.Raguin and O.Dechel	Leaching Test Characterization of Iron and Steel Industry Was	ASTM Spec.Tech.Pub.	No.933	7-27	+(1986)	
	Waste					
K.J.Perry, N.E.Prange and W.F.Garvey:	Long-Term Leaching Performance for Commercially	ASTM Spec.Tech.Pub.	No. 1123,	242-251	(1992)	
	Stabilized Waste,					
S.A.Peterson, J.C.Greene and W.E.Miller:	Toxicological Assessment of Hazardous Waste Samples Extracted	ASTM Spec. Tech. Publ.,	No.1062,	107-129	(1990)	
	Extracted with Deionized Water of Sodium Acetate(TCLP)					
	Leaching Media,					
W.E.Shively and M.A.Crawford:	Extrachtion Procedure Toxicity and Toxicity Character-	ASTM Spec. Tech. Publ.,	No.1033,	150-169	(1989)	
	istic Leaching Procedure Extractions of Industrial and					
	Solidified Hazardous Waste,					
D.J.Hassett:	Innovative Leaching for the Prediction of Environmental	DOE Rep.,	DOE-METC-9(	565-576	(1989)	
	Effects of Coal Conversion Solid Waste Disposal,					
T.Bramryd:	Leaching of Heavy Metals from Solid waste Incinerator	Energy Recovery Waste Co	mbust.,	326-329	(1988)	
	Ashes,					
A-M.Fallman and J.Hartlen	Leaching of Slags and Ashes-Controlling Factors in Field	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	39-54	+(1994)	
	Experiments versus Laboratory Tests					
H.A.van der Sloot, G.L.J.van der Wegen,	Intercomparison of Leaching Tests for Stabilized Waste	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	63-76	+(1994)	
D.Hoede and G.L.de Groot						
R.Garavaglia and P.Caramuscio	Coal Fly Ash Leaching Behaviour and Solubility	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	87-102	+(1994)	
	Controling Solids					
R.N.J.Comans and J.A.Meima	Modelling Ca-Solubility in MSWI Bottom Ash Leachants	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	103-110	+(1994)	
T.T.Eighmy, J.D.Eusden,Jr., K.Marsella,	Particle Petrogenesis and Speciation of Elements in MSW	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	111-136	+(1994)	
J.Hogan. D.Domingo, J.E.Krzanowski and	Incineration Bottlm Ashes					
D.Stampfli						
O.Hjelmar, E.A.aHansen, K.J.Andersen,	An Approach to the Assessment of the Environmental	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	137-160	+(1994)	
J.B.Andersen and E.Bjornestad	Impacts of Marine Applications of MunicipalSolid Waste					
	Combustion Residues					
M.Janssen-Jurkovicova,G.G.Hollman,	Quallity Assessment of Granular Comustion Residues by a	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	161-178	+(1994)	
M.M.Nass and R.D.Schuiling	Standard Column Tests: Prediction Versus Reality					
P.J.C.Bloem, F.L.M.Lamers and L.Tamboer	Leaching Behaviour of Building Materials with Byproducts	Environ. Asp. Constr. Wa	ste Mater.,	195-204	+(1994)	
	under Practical Conditions					

著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	No. 2 出版社
G. A. Rood, M. H. Broekman and T. G. AAlbers:	Investigating a Leaching Test for PCBs and Organo-	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		255-270	(1994)	
	chlorine Ppesticides in Waste and Building Materials					
D. S. Kosson, B. A. Clay, H. A. van der Sloot	Utilization Status, Issues and Criteria Development for	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		293-304	+(1994)	
T. T. Kosson	Municipal Waste Comfustor Residues in the United States					
G. L. de Groot and D. Hoede	Validation of Dutch Standard Leaching Tests Using	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		305-314	+(1994)	
	NEN-ISO 5725					
K. H. Karstensen	Burning of Hazardous Wastes as Co-Fuel in a Cement Kiln	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		433-452	+(1994)	
H. A. van der Sloot, D. S. Kosson, T. T. Eighmy,	Approach towards International Standardization: A Concise Sc	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		453-466	+(1994)	
, R. N. J. Comans and O. Hjelmar	Scheme for Testing of Granular Waste Leadhablity					
E. E. van der Hoek and R. N. J. Comans	Speciation of As and Se during Leaching of Fly Ash	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		467-476	+(1994)	
H. A. van der Sloot, D. Hoede and	The Influence of Reducing Properties on Leaching of	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		483-490	+(1994)	
R. N. J. Comans	Elements from Waste Materials and Construction Materials					
J. J. Steketee, J. C. M. de Wit. G. L. Rossum	Role of Facilitated Transport in the Emissions of	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		507-518	+(1994)	
and L. G. C. M. Urlings	Secondary Raw Materials					
T. T. Eighmy and H. A. van der Sloot:	A Unified Approach to Leaching Behavior of Waste Materials,	Environ. Asp. Constr. Waste Mater.,		979-988	(1994)	
P. P. Bosshard, R. Bachofen, H. Brandl:	Metal Leaching of Fly Ash from Municipal Waste	Environ. Sci. Technol.,	30(10),	3066-3070	(1996)	
	Incineration by Aspergillus niger,					
M. Kersten:	Aqueous Solubility Diagrams for Cementitious Waste	Environ. Sci. Technol.,	30(7),	2286-2293	(1996)	
	Stabilization Systems. 1. The C-S-H Solid-Solution System,					
U. G. Gasser, W. J. Walker, R. A. Dahlgren,	Lead release from Smelter and Mine Waste Impacted	Environ. Sci. Technol.,	30(3),	761-769	(1996)	
R. S. Borch and R. G. Burau:	Materials under Simulated Gastric Conditions and					
	Relation to Speciation,					
E. E. van der Hoek and R. N, J. Comans:	Modeling Arsenic and Selenium Leaching from Acidic Fly	Environ. Sci. Technol.,	30(2),	517-523	(1996)	
	Ash by Sorption on Iron (Hydr)oxide in the Fly Ash					
	Matrix,					
M. V. Ruby, A. Davis, R. Schoof, S. Everle	Estimation of Lead and Arsenic Bioavailability Using a	Environ. Sci. Technol.,	30(2),	422-430	(1996)	
and C. M. Sellstone:	Physiologically Based Extraction Test,					
T. T. Eighmy, J. E. Krazanowski, D. S. Domingo,	Comprehensive Approach toward Understanding Element	Environ. Sci. Technol.,	29(3),	629-646	(1995)	
D. Staempfli, J. R. Martin and P. M. Erickson:	Speciation and Leaching Behavior in Municipal Solid					
	Incineration Electrostatic Precipitator Ash,					
R. Milacic and J. Stupar:	Fractionation and Oxidation of Chromium in Tannery Waste	Environ. Sci. Technol.,	29(2),	506-514	(1995)	
	and Sewage Sludge-Amended Soils,					
V. Laperche, S. J. Traina, P. Gaddam and	Chemical and Mineralogical Characterizations of Pb in a	Environ. Sci. Technol.,	29(2),	506-514	(1995)	
T. J. Logan:	Contaminated Soil: Reactions with Synthetic Apatite:					
G. Heron, C. Crouzet, A. C. M. Bourg and	Speciation of Fe(II) and Fe(III) in Contaminated Aquifier	Environ. Sci. Technol.,	28(9),	1698-1705	(1995)	
T. H. Christensen:	Sediments Using Chemical Extraction Techniques:					
P. Vachon, R. D. Tyagi, J. -C. Auclair and	Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red	Environ. Sci. Technol.,	28(1),	26-30	(1994)	
K. V. Wilkinson:	Mud,					
C. S. Kirby and J. D. Rimstidt:	Interaction of Municipal Solid Waste Ash with Water,	Environ. Sci. Technol.,	28(3),	443-451	(1994)	
C. S. Kirby and J. D. Rimstidt:	Miniralogy and Surface Properties of Municipal Solid	Environ. Sci. Technol.,	27(4),	652-660	(1993)	
	Waste Ash,					

著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	No. 3 出版社
Q. Y. Ma, S. J. Traina and T. J. Logan:	In Situ Lead Immobilization by Apatite,	Environ. Sci. Technol.,	27(9),	1803-1810	(1993)	
A. Davis, J. W. Drexler, M. V. Ruby and A. Nicholson:	Micromineralogy of Mine waste in Relation to Lead Bioavailability, Butte, Montana,	Environ. Sci. Technol.,	27(7),	1415-1425	(1993)	
Q. Y. Ma, S. J. Traina and T. J. Logan:	In Situ Lead Immobilization by Apatite,	Environ. Sci. Technol.,	27(9),	1803-1810	(1993)	
P. H. Masscheleyn, R. D. Delaune and W. H. Patrick, Jr.:	Effect of Redox Potential and pH on Arsenic Speciation and Solubility in a Contaminated Soil,	Environ. Sci. Technol.,	25(8),	1414-1419	(1991)	
D. E. Hockley and H. A. van der Sloot:	Long Term Processes in a Stabilized Coal-Waste Block Exposed to Seawater,	Environ. Sci. Technol.,	25(8),	1408-1414	(1991)	
S. B. Oblath:	Leaching from Solidified waste Forms Under Saturated and and Unsaturated Conditions,	Environ. Sci. Technol.,	23(9),	1098-1102	(1989)	
V. Albino, R. Cioffi, B. de Vito, and L. Santoro:	Evaluation of Solid Waste Stabilization Processes by Means of Leaching Tests,	Environ. Technol. (Lett),	17(3),	309-315	(1996)	
H. Chen:	Reduction Leaching of Ocean Nodules with Waste Residue in Ammonia-Ammonium Solutions,	Eszmetall.,	49(3),	204-206	(1996)	
S. E. Tisdell, and V. T. Breslin:	Characterization and Leaching of Elements from Municipal Solid Waste Compost	J. Environ. Qual.,	24(5),	827-833	(1995)	
R. B. Heimann, D. Conrad, L. Z. Florence, M. Neuwirth, D. G. Ivey, R. J. Mikula and W. W. Lam:	Leaching of Simulated Heavy Metal Waste Stabilized/ /Solidified in Different Cement Matrices,	J. Hazard. Mater.,	31(1),	39-57	(1992)	
Y. Gong and D. W. Kirk:	Behaviour of Municipal Solid Waste Incinerator Flyash. I: General Leaching Study,	J. Hazard. Mater.,	36(3),	249-264	(1994)	
K. Y. Cheng, P. Bishop and J. Isenburg:	Leaching Boundary in Cement-Based Waste Forms,	J. Hazard. Mater.,	31(3),	285-295	(1992)	
D. L. Chichester and S. Landsberger:	Determination of the Leaching Dynamics of Metals from Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash Using a Column Test,	J. Air Waste Manag. Assc	46(7),	643-649	(1996)	
K. Y. Chen and P. L. Bishop:	Leaching Boundary Movement in Solidified/Stabilized Waste Forms,	J. Air Waste Manag. Assc	42(2),	164-168	(1992)	
D. C. Dusing, P. L. Bishop and T. C. Keener:	Effect of Redox Potential on Leaching from Stabilized/ Solidified Waste Materials,	J. Air Waste Manag. Assc	42(1),	56-62	(1992)	
A. R. Pratt, H. W. Nesbitt and I. J. Muir:	Generation of Acids from Mine Waste: Oxidative Leaching of Pyrrhotite in Dilute H2SO4 Solutions at pH3.0,	Geochim. Cosmochim. Acta	58(23),	5147-5159	(1994)	
G. L. de Groot and H. A. van der Sloot	Determination of Leaching Characteristics of Waste Materials Leading to Environmental Product Certification	Hazard. Waste	No. 1123	149-170	+(1992)	
R. C. Krueger, R. K. Ham and W. C. Boyle:	The Variability of Ferrous Foundry Waste Leaching Characteristics and Comparison to Landfill Unsaturated Zone Leachate Quality,	Proc. Ind. Waste Conf.,	43rd(1988),	605-616	(1989)	
M. B. Chang, F-Y Tseng, and S-R Ku:	Effects of Ash Physical Properties on Leaching Behavior of Heavy Metals from Municipal Solid Waste Incineration,	Proc. Annu. Meet. Air Wa	95-RA132.0	1-16	(1995)	
H. C. Lee and K. J. Lee:	An Experimental Study on the Leaching of Borate Waste and Psent Resin Waste Forms in a Simulated Sea Water,	Proc. Int. Top Meet. Nuc	Vol. 3,	1805-1810	(1994)	
A. Applewhite-Ramsey:	Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) Testing of Defense Waste Processing Facility(DWPF) Projectid Glass Compositions,	Proc. Int. Top Meet. Nuc	Vol. 3,	1703-1708	(1994)	

著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	No. 4 出版社
K. Y. Chen and P. P. Bishop:	Metals Distribution in Solidified/Stabilized Waste Forms after Leaching,	PB Rep. ,	PB-94-1552	12p	(1994)	
S. Kullberg and A-M. Faellman:	Leaching Properties of Natural and Stabilized Fluegas Cleaning Residues from Waste Incineration,	PB Rep.,	PB-92-1746	3B. 21-37	(1992)	
D. S. Kosson, H. A. van der Sloot, T. T. Holmes and C. C. Wiles:	A Comparison of Solidification/Stabilization Processed Treatment of Municipal Waste Combustor Residues. Part II Leaching Properties,	PB Rep.,	PB-93-1241	103-117	(1992)	
D. S. Kosson, H. van der Sloot, T. T. Holmes and C. C. Wiles:	A Comparison of Solidification/Stabilization of Processes for Treatment of Municipal Waste Combustion Residues Part II Leaching Properties,	PB Rep.,	PB-92-1212	12p	(1991)	
P. Prudent, M. Domeizel and C. Massiani:	Chemical Sequental Extraction as Decision-making Tool: Application to Municipal Solid Waste and Its Individual Constituents,	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	55-62	(1996)	
A. M. Fallmann and B. Aurell	Leaching Tests for Environmental Assessment of Inorganic Substances in Waste, Sweden	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	71-84	(1996)	
K. Lewin	Leaching Test for Waste Compliance and Characterisation: Recent Practical Experiences	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	85-94	+(1996)	
J. A. Stegemann, P. L. Cote	A Protocol for Evaluation of Solidified Wastes	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	103-110	(1996)	
M. Wahlstrom:	Nordic Recomendation for Leaching Tests for Granular Waste Materials	Sci. Total Environ.	178(1/3),	95-102	+(1996)	
C. H. Weng, C. P. Huang, H. E. Allen, A. H-D. Chen and P. F. Sanders	Chromium Leaching Behavior in Soil Derived from Chromite Ore Processing Waste	Sci. Total Environ.	154	71-86	+(1994)	
H. A. van der Sloot, R. N. J. Comans and O. Hjelmar:	Similarities in the Leaching Behaviour of Trace Contaminants form Waste, Stabilized Waste, Construction Materials and Soils	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	111-126	(1996)	
P. Prudent, M. Domeizel and C. Massiani:	Chemical Sequental Extraction as Decision-making Tool: Application to Municipal Solid Waste and Its Individual Constituents,	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	55-62	(1996)	
T. Sterckeman, A. Gomez and H. Massiani:	Soil and Waste Analysis for Environmental Risk Assessment in France,	Sci. Total Environ.,	178(1/3),	63-70	(1996)	
H. A. van der Sloot:	Systematic Leaching Behaviour of Trace Elements from Construction Materials and Waste Materials	Waste Mater. Constr.		19-36	+(1991)	
D. S. Kosson, H. A. van der Sloot T. Holmes and C. Wiles	Leaching Properties of Untreated and Treated Residues Tested in the USEPA Program for Evaluation of Treatment and Utilization Technologies for Municipal Waste Combustor Residues	Waste Mater. Constr.		119-134	+(1991)	
J. A. Stegemann and J. Scheider	Leaching Potential of Municipal Waste Incinerators Bottom Ash as a Function of Particle Size Distribution	Waste Mater. Constr.		135-144	+(1991)	
D. L. Gress, X. Zhang, S. Tarr, I. Pazienza and T. T. Eighmy	Municipal Solid Waste Combustion Ash as an Aggregate Substitute in Asphaltic Concrete	Waste Mater. Constr.		161-176	+(1991)	
M. Wahlstrom, B. Talling, J. Paatero, E. Makela and M. Keppo	Utilizaiton and Disposal of Solidified and Stabilized Contaminated Soils	Waste Mater. Constr.		197-206	+(1991)	
J. L. Vazquez, A. Roca, A. Lopez-Soler, J. L. Fernandez-Turiel, X. Querol and M. T. Felipo	Physico-Chemical and Mineralogical Characterization of Mining Wastes used in Construction	Waste Mater. Constr.		215-224	+(1991)	

著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	No. 5 出版社
R. N. J. Comans, H. A. van der Sloot, D. Hoede ar	Chemical Processes at a Redox/pH Interface Arising from	Waste Mater. Constr.		243-254	+(1991)	
and P. A. Bonouvrie	the Use of the Steel Slag in the Aquatic Environment					
D. Goets and W. Glaseker	Effect of Particle Size Distribution on Leaching	Waste Mater. Constr.		283-292	+(1991)	
	Propeties of Building Materials					
M. Hinsenveld	Towards a New Approach in Modelling Leaching Behaviour	Waste Mater. Constr.		331-340	+(1991)	
D. E. Hockley and H. A. van der Sloot	Modelling of Interactions at Waste-Soil Interfaces	Waste Mater. Constr.		341-352	+(1991)	
F. K. M. Lamers and G. L. de Groot	Standard Sample Preparation and Reference Samples as a	Waste Mater. Constr.		375-378	+(1991)	
	Tool for Determination of the Environmental Quality of					
	Building Materials					
C. Zevenbergen and W. F. Hoppe	Leaching Tests and the Influence of Oxidation-Reduction	Waste Mater. Constr.		369-370	+(1991)	
	Process					
S. Abe, F. Kambayashi and M. Okada	Ash Melting Treatment by Rotating Type Surface Melting	Waste Manage.	16(5/6)	431-444	+(1996)	
	Furnace					
I. Kawakami, M. Esaki, I. Tetsuyama and	Immobilization of Fly Ash from MSW Incinerators and Ash	Waste Manage.	16(5/6)	483-490	+(1996)	
M. Sumitomo	Melting Furnaces					
H. Katuura, T. Inoue, M. Hiraoka and S. Sakai	Full-Scale Plant Study on Fly Ash Treatment by the Acid	Waste Manage.	16(5/6)	491-500	+(1996)	
	Extraction Process					
T. Uchida, I. Ito and K. Harada	Immobilization of Heavy Metals Contained in Incinerator	Waste Manage.	16(5/6)	475-482	+(1996)	
	Fly Ash by Application of Soluble Phosphate					
A. Kida, Y. Noma and T. Imada	Chemical Speciation and Leaching Properties of Elements	Waste Manage.	16(5/6)	527-536	+(1996)	
	in Municipal Incinerator Ashes					
S. Mizutani, T. Yoshida, S. Sakai and	Release of Metals from MSWI Fly Ash and Availability in	Waste Manage.	16(5/6)	537-544	+(1996)	
H. Takatsuki	Alkali Condition					
H. Kaneko	Evaluation of Municipal Waste Incinerator Fly Ash	Waste Manage.	16(5/6)	555-559	+(1996)	
	Toxicity Tests					
K. Brodersen:	Leaching due to Hygroscopic Water Uptake in Cemented	Waste Manage.	12(2/3),	261-269	(1992)	
	Waste Containing Soluble Salts,					
Z. Zhou and R. Dayal:	Characterization and Leaching Studies of FGD Waste	Waste Manage.	10(1),	53-59	(1990)	
	By-products,					
貫上芳則，山田優	廃棄物の再利用時における判定法としての溶出試験方法	廃棄物焼却残渣の循環処理技術に関す		195-202	+(1996)	
I. Lecuyer, S. Bicocch, P. Ausset and	Physico-chemical characterization and Leaching of	Waste Manage. Res.,	14(1),	15-28	(1996)	
R. Lefevre:	Desulphurization Coal Fly Ash,					
V. Albino, R. Cioffi, L. Santoro and G. L. Valer	Stabilization of Residue containing Heavy Metals by	Waste Manage. Res.,	14(1),	29-41	(1996)	
	Means of Matrices Generating Calcium Trisulphoaluminate					
	and Silicate Hydrates,					
E. Egmen and C. Yurteri:	Regulatory Leaching Tests for Fly Ash: A Case Study,	Waste Manage. Res.,	14(1),	43-50	(1996)	
C. S. Lu:	A Model of Leaching Behaviour from MSW Incinerator	Waste Manage. Res.,	14(1),	51-70	(1996)	
	Residue,					
E. J. Reardon, C. A. Crank, C. J. Warren, R. Dayal	Determining Controls on Element Concentrations in Fly Ash L	Waste Manage. Res.,	13(5),	435-450	(1995)	
F. Hasselriis: National Incinerator Testing	The Environmental Characterization of Refuse-derived Fuel(RI	Waste Manage. Res.,	13(5),	499-500	(1995)	

著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	No. 6 出版社
J. A. Stegemann, J. Schneider, B. W. Baets and K. L. Murphy:	Lysimeter Washing of MSW Incinerator Bottom Ash,	Waste Manage. Res.,	13(2),	149-165	(1995)	
A. Andres and J. A. Irabien:	Solidification Stabilization Process for Steel Foundry Dust Using Cement Based Binders- Influence of Processing Variables,	Waste Manage. Res.,	12(5),	429-449	(1994)	
M. Gonullu:	Analytical Modelling of Inorganic Contaminants in Leachate:	Waste Manage. Res.,	12(4),	339-350	(1994)	
M. Gonullu:	Analytical Modelling of Inorganic Contaminants in Leachate:	Waste Manage. Res.,	12(2),	141-150	(1994)	
N. Lee, T. Kusuda, T. Shimaoka, Y. Matsuhuji and M. Hanasima:	Pollutant Transformations in Landfill Layers,	Waste Manage. Res.,	12(1),	33-48	(1994)	
B. Gutierrez, C. Pazos and Jose Coca:	Characterization and Leaching of Coal Fly Ash,	Waste Manage. Res.,	11(4),	279-286	(1993)	
H. Belvi, D. M. Stampfli and P. Baccini:	Chemical Behaviour of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash in Monofills,	Waste Manage. Res.,	10(2)	153-167	(1992)	
I. M. Madany and E. Raveendran:	Leachability of Heavy Metals from Copper Blasting Grid Waste,	Waste Manage. Res.,	10(1),	87-91	(1992)	
M. Wahlstrom, J. Ranta and P. Lindroos:	Landfilling Characteristics of Flue Gas Desulphurizing Waste,	Waste Manage. Res.,	8(6),	451-459	(1990)	
O. Hjelmar:	Leachate from Land Disposal of Coal Fly Ash,	Waste Manage. Res.,	8(6),	429-449	(1990)	
S. Cernuschi, M. Giugliano and I. de Paoli:	Leaching of Residues from MSW Incineration:	Waste Manage. Res.,	8(6),	419-427	(1990)	
P. Kjeldsen and T. H. Christensen:	Leaching Tests to Evaluate Pollution Potential of Combustion Residues from an Iron Recycling Industry:	Waste Manage. Res.,	8(4),	277-292	(1990)	
H. A. van der Sloot:	Leaching Behaviour of Waste and Stabilized Waste Materials; Cha Materials; Characterization for Environmental Assesment Purposes,	Waste Manage. Res.,	8(3)	215-228	(1990)	

						No. 7
著者・編者	論文名又は単行本	雑誌名	巻（号）	頁	発行年	出版社
環境庁水質保全局海洋汚染・廃棄物対策室監修：	産業廃棄物分析マニュアル,	日本環境測定分析協会		pp. 407，	1995	
環境庁企画調整局環境研究技術課	平成８年度環境測定分析統一制度管理調査に関する中間報告				(1996)	
淡路宣男：	我が国の溶出試験方法の歴史と課題,	廃棄物学会誌,	7(5)，	317-382	(1996)	
酒井伸一，水谷聡，高月紘：	溶出試験の考え方：	廃棄物学会誌,	7(5)，	389-393	(1996)	
貴田晶子，野馬幸生：	廃棄物の溶出特性,	廃棄物学会誌,	7(5)，	410-421	(1996)	
金子栄廣：	溶出試験による廃棄物の毒性評価　バイオアッセイの適用を考える,	廃棄物学会誌,	7(5)，	394-402	(1996)	
寺島泰：	都市廃棄物埋立地における汚濁物の挙動,	廃棄物学会誌,	7(2)，	148-167	(1996)	
金子栄廣：	溶出試験方法の現状と課題	廃棄物学会誌,	3(3),	182-191	(1992)	
池田太，金子栄廣：	都市ごみ焼却飛灰の溶出毒性におよぼす溶出条件の影響	廃棄物学会論文誌,	8(2),	107-114,	+(1997)	
島岡隆行，末松峰樹，朴祥徹，花嶋正孝：	準好気性埋立における浄化機構のモデル解析：	廃棄物学会論文誌,	7(5)，	234-243	+(1996)	
酒井伸一，水谷聡，高月紘，岸田拓郎：	廃棄物の溶出試験に関する研究ー ｱﾍﾞｲﾗﾋﾞｨﾃｨ 試験と pH依存性試験	廃棄物学会論文誌,	6(6)	225-234	(1995)	
金谷健，寺島泰：	実気象条件化における都市ごみ焼却灰充填層浸出水の水量水質変化	廃棄物学会論文誌,	6(2)，	39-48	(1995)	
貫上佳則，木元敦子，本多淳裕：	防腐・防蟻処理廃木材からのクロム，銅，及びひ素の抽出除去処理に関	廃棄物学会論文誌,	5(5),	185-192	(1994)	
金子栄廣，山口稔：	都市ごみ焼却飛灰からの重金属の溶出量に及ぼす溶出操作条件の影響,	廃棄物学会論文誌,	5(2),	45-53	(1994)	
李南勲，楠田哲也，柴垣満，島岡隆行，花嶋正孝：	埋立廃棄物層における汚濁成分の溶出特性に関する研究：	廃棄物学会論文誌,	4(3),	87-96	(1993)	
野馬幸生，貴田晶子，児玉學，山下俊之，神頃貢,	一般廃棄物焼却灰の中間処理とその有効性について	第10回全国都市清掃研究発表会講演論文		167-169	+(1989)	
松藤敏彦，田中信寿，宮脇健太郎，阿部知子：	焼却灰埋立層浸出水 pHの決定要因	土木学会第48回年次学術講演会講演概要		1152-1153	+(1993)	
佐藤正光，山岡康宏：	廃棄物焼却飛灰からの金属の溶出特性	水処理技術,	36(11),	549-557	+(1995)	
貴田晶子：	焼却灰の溶出特性,	都市清掃,	41，No. 164,	17-22	(1989)	
早川亮太：	廃棄物溶出試験の問題点,	水質汚濁研究,	13(3),	182-186	(1990)	
寺島泰，内藤茂喜：	廃棄物埋立層内における水と汚濁物質の挙動とその予測手法	衛生工学研究論文集	25,	1-13	+(1989)	
金谷健，樫本茂樹，寺島泰：	一般廃棄物焼却灰からの重金属溶出に及ぼす雨水酸性化の影響,	環境技術，	23(3),	159-164	(1994)	
貴田晶子：	溶出試験の現状と課題－第１回－	環境測定と技術	23(5)	46-55	+(1996)	
貴田晶子：	溶出試験の現状と課題－第２回－	環境測定と技術	23(7)	56-68	+(1996)	