

研究展望

循環型社会に向けた埋立処分研究の展望

—今、どんな埋立技術研究が必要か—

VIEW OF RESEARCH ON LANDFILL DISPOSAL OF NON-HAZARDOUS SOLID WASTE FOR A RECYCLING-BASED SOCIETY—NOW, WHAT RESEARCH IS DESIRED IN SANITARY LANDFILL ENGINEERING?—

田中信壽

Nobutoshi TANAKA

フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13西8)**Key Words** : *recycling-society, non-hazardous solid waste, sanitary landfills, reactor landfill, final storage quality, sustainable landfill*

1. はじめに

産業廃棄物の不法投棄や不適正処理処分、廃棄物焼却炉からのダイオキシン類の大量排出、埋立処分場における地下水漏洩疑惑など、廃棄物問題が、特に1990年代に大きな社会問題となった。その結果、廃棄物処理処分施設、特に埋立処分場の建設が極めて困難となった。基本的には環境に対する人々の要求の高まりと、人々が持つ拒否反応（NIMBY）に起因しているが、①自然を破壊する、②車両の増加など生活環境が破壊される、③埋立物を管理できない、④浸出水や粉塵飛散によって外部に汚染が広がる、⑤遮水工が万全でなく地下水汚染が起こる、⑥永久に管理できない、⑦被害が生じたときには誰が保証してくれるのかなどの建設反対意見が提起されている。安全なばかりでなく、安心な埋立地が求められている。そのため、法律が改正され、埋立地の技術基準も強化された。

一方、このような廃棄物問題を直接的な契機として、大量廃棄社会からの脱皮が主張され、循環型社会構築の動きが活発になった。2000年には循環型社会形成促進基本法が制定された。この基本法では、まず、不要物（不用物）の発生を抑制した後、発生した不用物を全てまず循環資源と捉え、再使用・再生利用を図った後、利用できなかったもの（廃棄物および循環利用残渣）は適正処分すると、優先順位を明らかにしている。

上に述べた状況の中で、埋立処分はどのような概念（コンセプト、あり方）でどのような機能を持った埋立地であるべきかが問い直されなければならない。この課題が重要な研究課題となった。本文では、まず、埋立処分はどのような歴史的経緯をたどって進歩してきたか、また、国内外埋立地研究の動向を調査し、研究課題を議論する。

なお、本文では、一般廃棄物埋立処分場、および産

業廃棄物管理型最終処分場、つまり非有害廃棄物最終処分場を考察の対象としている。

2. 埋立処分の歴史（表-1）

(1) 欧米の埋立処分の歴史

出版図書から過去の歴史を見いだしてみた。

American Public Works Association の“MUNICIPAL REFUSE DISPOSAL” (1966)¹⁾では、当時の米国の都市ごみ処分場の状況を説明して、「Dumping は最初に考えつくごみの処分方法であるが、人口が増えるにつれてそれに対する不満が高くなり、人口の多いところから排除され、過疎地へ移っていった。しかし、長距離輸送は不便で高コストであるし、人口の少ないところでさえ、激しい反対が生じた。アイオワ州のDavenportで1916年の数年前から、有機ごみを、

表-1 都市ごみ埋立処分の変遷

	欧米	日本
以前	オープンダンピング+野焼き 1910年代：衛生埋立開始 1930年代：トレンチ工法	オープンダンピング+野焼き 1920：東京でオープンダンピング 1956：夢の島埋立開始
1970年代	封じ込め（Containment）型埋立地、工学化された埋立地となる、遮水シートの使用始まる	1971：準好気性概念 1971：処分基準 1977：共同命令；最終処分場指針 1977：最初の遮水シート ²⁾
1980年代	1988：Final storage quality を提唱	1987：指針改訂 1988：指針解説発刊
1990年代	埋立物・構造基準の強化 1992：米国埋立地構造基準 Subtitle D, 1993：ドイツ熱灼減量5%	1997：基準省令（基準の強化）
2000年代		2000：性能基準 2001：設計要領発刊

悪臭を最小化するために、土や灰のような不活性な物質を十分に使って、混合しカバーする方法が使用された。同時期に、英国やドイツでも同じような手順が試みられている。1930年の中頃に、カリフォルニア州で、“Sanitary landfill”と名付けられた、別の操作法が始まった。そこでは、“Trench”工法が初めて米国で使われ、広がっていった。衛生埋立(Sanitary landfill)操作は、①自然の凹地、人工の凹地やトレンチにごみを堆積する(Deposit)、あるいは平地にごみを投げ出す(Dump)、②可能な限り小さく圧縮する、③ごみを圧縮された土壌などで、組織的・衛生的に覆う。」と記述している。

Tchobanoglous, G.らの“SOLID WASTES ENGINEERING Principles and Management Issues”(1977)⁹⁾では、「地下水汚染の問題などから設計に工夫が必要となってきた。地下水汚染を防ぎ、埋立ガスをより多く回収するためには、浸出水を封じ込める(Containment)が必要である。貯まった浸出水を循環することも有効である。浸出水の地下浸透を防ぐ実際的な方法は浸出水を浸出させないか、保持するかである。埋立地への、および外への浸透を制御するためには、①不透水性覆土材を使う、②埋立地に地下水が入らないようにする、③埋立地内外の水位を等しくする、④粘土や他の密封材(Sealant)を使う等の方法がある。1976年の時点まで粘土の使用が支持されてきた。Membrane linerも使われてきたが、高価で埋立作業に注意が必要である。」と記述している。

BAGCHI, A.著：“DESIGN, CONSTRUCTION, & MONITORING of SANITARY LANDFILL”(1990)¹⁰⁾では、序論において、「過去においては、廃棄物から浸みだしたものは、土壌と地下水により完全に浄化されると一般に信じられてきた。したがって、砂利採取跡(Gravel pit)などへの処分が受け入れられてきた。1950年代に環境に関する関心が高まるにつれて、監視下におかれるようになった。多くの国で有害物と非有害物の2つの法律ができた。非有害廃棄物からの浸出水の集水は命令されなかったが、有害廃棄物からは集水される必要があった。非有害廃棄物は衛生埋立地に運ぶことが強調された。その結果、1970年代初期に、Natural attenuation type landfillsとContainment type landfillsの2つの設計コンセプトがあった。前者の埋立地では、地下水への浸透を許し、不飽和ゾーンの最小厚さ、基盤の深さ、井戸を持つ民家までの距離などの設計ガイドラインがあった。後者の埋立地では、埋立地底部からの浸出水の漏出を制限する低透水性ライナーと、浸出水を集水するパイプシステムから構成されている。後者の埋立地はEngineered or secured landfillsともいわれ、有

害廃棄物の処分に対して命令されていた。不飽和ゾーンを厚くしてもイオン交換能を大きくしても、非有害性廃棄物の埋立地からでさえ、すべての汚染物を減衰できないことが分かった。現在、西ドイツおよび米国のいくつかの州ではNAタイプの埋立地は、廃棄物の質や量に関わらず禁止されている。有害廃棄物埋立地の設計にも変化があった。始め、一重ライナーでよかったのが、多くの場合、粘土とメンブレンの二重ライナーが命令された。」と記述している。

SHARMA, H. D.ら⁵⁾：“WASTE CONTAINMENT SYSTEMS, WASTE STABILIZATION, and LANDFILLS Design and Evaluation”(1994)では、米国廃棄物処理法のすべての都市ごみ埋立地に対する国の最低基準を示すSubtitle D program(1992)を紹介している。①用地位置に関する制約、②埋立作業に関する基準、③設計基準、④閉鎖と跡地管理、⑤財政保証基準、加えて、モニタリングや、有害有機成分のリストが義務づけられている。例えば、ライナー上の浸出水水深を12インチ=30cm以下に保持するためにコンポジットライナーと浸出水集水システムを設ける。コンポジットライナー上部は30-mil(1mil=0.001inch)以上のFlexible membrane liner(少なくとも、60-mil以上のHDPE)と 10^{-7} cm/s以下の透水係数を持つ最小2フィート厚の圧密粘土からなるものを設ける。放流水基準を守ることなどである。

CHRISTENSEN, T. H.ら編：“Technology and Environmental Impact”(1989)¹¹⁾では、出版の意図を「衛生埋立はほとんどの国の廃棄物処理の主要な方法であり、過去20年ほどの間に、衛生埋立の技術は、強力な環境規制の元で、Fully engineered facilityにまで開発された。現在、新しい技術について活発な研究が行われている。残念ながら、情報と経験のなさから、要求基準を満足できないことがしばしばある。したがって、衛生埋立に関する国際的なReference bookが必要である」と述べ、モノグラフ集として、埋立地内における有機物の微生物分解：6編、埋立ガス：3編、浸出水：5編(内、処理：2編)、ライニングと浸出水排水：4編、ライニング：3編、環境影響：9編(内、浸出水関係：3、埋立ガス関係：3(悪臭：1を含む))、設計：4編で構成されている。なお、第1回のサルジニア・衛生埋立に関する国際シンポジウムは1987年に開催された。

さらに、CHRISTENSEN, T. H.らは、浸出水¹²⁾(1992：序；1編、浸出水の量と質；9編、浸出水処理；15編、環境影響；4編)、バリア¹³⁾(1994：序；3編、ライナーの設計と施工；12編、粘土ライナーの特性と品質管理；5編、合成シート材の特性と品質管

理；7編，ジオシンセチック（合成土木材料）；5編，浸出水集排水；4編），埋立ガス⁹⁾（1996：序；3編，ガスの量と質；4編，環境影響；8編，ガス発生量予測；4編，ガス抜き；6編，ガス処理；6編，ガス利用；6編，ガス移動・放出；6編，事例研究；4編）に関する研究モノグラフ集を出版し，埋立地に関する研究が活発に行われ，技術情報が急速に蓄積されている様子が分かる。

上記のような埋立地技術を工学化するための研究が進展する一方で，埋立地の基本的な概念（あり方）を検討する動きが出てきた。

BACCINI, P. 編：“LECTURE NOTES IN EARTH SCIENCES Vol. 20 The Landfill—Reactor and Final Storage—”（1988）¹⁰⁾では，埋立地の設計思想の根本的な転換を議論する最初の国際会議を報告している。「①汚染埋立地の修復費用が高価であることから，生態系の保全と経済とのバランスに疑問が生じている，②大気，水，および土壌の質に関する目標が埋立地の内部および外部の固形物にまで延長されなければならなくなったので，スイス連邦政府は次のような段階に進むことを決めた。（A）発生者は，残渣物（再使用できない物）を最終安定化物（Final storage quality）に処理する。最終安定化物の状態にある固体の埋立地から発生する，大気と水へのエミッションはさらに処理される必要がない。（B）最終安定化物の状態にある固体は地殻（自然堆積物，石，鉱石，土壌）に非常に似た性質を持つはずである。とすると，原理的には，2つの埋立地が考えられる。①反応器型埋立地（“Reactor landfill”）：量，質，時間に関してエミッションが予測可能であり，約30年以内にそれらを処理することなく大気と水の基準を満足できるなら，残渣は基準（B）に合致するはずであり，最終安定化物になったと考えられる。②最終安定化物埋立地（“Final storage landfills”）：始めから基準（B）に合致した固体を投入する。必要なら，焼却などの適切な前処理によって達成できる。そこで，国際会議を開催し，どのようにしてこれを可能にするか，最終安定化物をどのように定義づければよいかについて議論する。」と説明している。筆者が読みとった，彼等の提案する戦略は，「始めは，反応器型埋立地にし，微生物分解などによって短期間で最終安定化物に到達する。その後は，わずかに水質基準や大気基準に合致しないエミッションが漏れるかもしれないが，それらは減衰や，希釈と分散などによって問題がない状態になる。」というシナリオに依存すれば可能であると考えられる。この戦略は，埋立地の早期安定化研究と方向的に一致するが，それよりも埋立物の選択が重要であるという問題認識であると思われる。

花嶋正孝・樋口壮太郎監訳：『ドイツ一般廃棄物技術基準』¹¹⁾は，1993年にドイツで制定された居住地区廃棄物処理技術基準を完全邦訳している。これによると，「これまでの欧米の廃棄物処理方針を180度転換する基準として，かつ技術的に最も厳しい基準として世界的に注目を集めた。その概要は，熱灼減量5%以下のものは埋立禁止（産業廃棄物は10%以下）〔筆者注：2005年実施予定〕で，焼却やコンポスト化により埋立廃棄物中の有機物を極力少なくし埋立を回避するというものであり，ある意味では日本型処理システムに近づいたともいえる。」と述べている。封じ込め型（嫌気型）埋立地内での有機物分解（安定化）は極めて長い時間を要するので，安定化には埋立物の有機物量を減らす前処理が必要であると認識するに至ったことを示している。

以上から，欧米の都市ごみ（非有害廃棄物）埋立地の歴史的推移をまとめると，古くから行われてきたオープンダンプングに伴う公害を防ぐために覆土を行う衛生埋立が1910年頃に開発され次第に広がっていった。これらの埋立地からの浸出水は地下浸透させても土壌の浄化作用により減衰して地下水汚染を起さないと考えられていた（Natural attenuation landfills）。しかし，公害規制が強化されると共に，地下水汚染を防ぎメタンガス回収量を増やすためには，降雨を浸入させず，生じた浸出水は埋立地内部に保持する封じ込め型の埋立地にするのがよいとの考えが1970年代に広がった。この埋立地は嫌気性のごみ分解が基本であり，浸出水の地下浸透を最小化する遮水工と浸出水集排水管，および降雨の浸入を最小化する難透水性のトップカバーを設けるEngineered landfillに成長した。そして，環境に対する基準の強化と共に，埋立地内現象研究が活発に行われ，遮水工やトップカバーの強化が図られ1990年代には厳しい埋立地基準が制定されるようになった。その一方で，浸出水中の有機汚濁成分が環境規制基準以下に下がるのに数百年の年数が必要との研究¹²⁾が現れるにつれて，都市ごみを埋立地に直接投入するような方法の変更，つまり「埋立地概念」の変更を迫られた。埋立物の埋立前安定化処理の研究¹³⁾が，1990年代に活発に行われた（4.（2）参照）。

（2）日本の埋立処分史

我が国では，山崎達雄著：『洛中塵捨場今昔』（1999）¹⁴⁾では，「明治9年でも川へ捨てることがやまない。」，「京都府は明治21年4月に腐敗臭気の発散や井戸への汚染防止の観点から，速やかに土砂で埋め戻すように告諭している。」，「明治31年（1898）に，市設ごみ捨場の設置に関する要望書が出て，同年に5カ

所のごみ捨て場を設けている。」などと記述している。

溝入茂は、『ごみの百年史—処理技術の移りかわり』(1987)¹⁹⁾で大正末頃までに知られていたごみ処理法を次のように紹介している。『①陸上投棄 低地、凹地に投棄する方法。土地改良手段として地主から要望された時代もあったようである。もちろん現在の陸上埋立のような汚水処理などの配慮はない。土地に恵まれた所ではしばしば行われた。東京湾深奥部はもともと水深が浅く、家康の江戸開府にともなう都市計画により盛んに埋立が行なわれ、その流れは明治以降も続いた。埋立は土砂によるものもあったが、ごみによる埋立も行われていた。明治43年深川区平久町の枝川改良工事埋立地でごみの露天焼却を開始した。』と述べている。

松藤康司¹⁶⁾は、『廃棄物埋立地の歩み(廃棄物埋立地史)—ごみ捨て場からクロードシステムへ[その1]』(1994)で、「昭和期戦後、東京では、当時の埋立地は、野焼きの煙でくすぶりつけ、単に大量のごみを投げ捨てるに等しかった、夢の島も昭和31年(1956)頃からごみ捨て場として利用されるに至った。昭和42年(1967)頃からごみ埋立地に本格的な埋立地実態調査、埋立地の早期安定化のモデル事業が花嶋によって始められた。1971年頃に「埋立構造」の概念や「準好気性埋立」の概念と呼称が昭和49年度報告書に使われた。福岡市東部地区の「新蒲田埋立場」で昭和50年(1975)に準好気性埋立地の実用化に着手した。生物処理と化学処理併用方式で浸出水処理が実用化された。」と記述している。

また、花嶋正孝¹⁷⁾は、1992年に最終処分場の変遷と動向について総説を書いている。まず、欧米と日本の処分場の違いに触れ、「日本の最終処分場には人家が迫っており、欧米ではkmのオーダーで離れていることから、前者では周辺に公害を出さないためと土地需要に基づく埋立地の早期安定化のため、埋立地内部をできるだけ好气的にする工法が用いられるのに対し、後者ではメタンガス回収による地球温暖化防止とガス利用を図るため、埋立地内部を嫌气的条件にする工法を用いている。」と記述している。さらに、我が国の埋立地の変遷について「昭和30年代半ばまでは廃棄物の処理処分は安上がりで人目につかなければよいという考えが主体を占めていた。それが昭和40年代後半より日本の経済がより大きくなり、廃棄物量の増大と公害が多発した。昭和52年には国庫補助基準として『最終処分場指針』¹⁸⁾(筆者注：覆土工法、浸出水処理施設や遮水工の設置が記載されているが、具体的な構造等については言及されていない)が定められる等制度面の整備が図られ、昭和62年には厚生省の研究班で最終処分場指針の内容が補強された(筆者

注：全国都市清掃会議発行『廃棄物最終処分場指針解説』¹⁹⁾として刊行された。その中で、遮水工について鉛直遮水工と表面遮水工、主として一枚の遮水シートを使う工法を記述、水処理施設についても記述。)と記述している。

近年の法制的な動向を整理すると、昭和46年9月以前は、最終処分場に関する規制はなかった。そして昭和46年9月(廃棄物処理法施行)以降に建設された最終処分場は規模に係わらず、処分基準(埋立処分場所からの浸出液によって公共の水域及び地下水を汚染するおそれがある場合には、そのおそれがないように必要な措置を講ずること)が適用される。昭和52年3月(共同命令施行、最終処分場指針の策定)以降、一定以上の規模の最終処分場に技術上の基準を定める共同命令²⁰⁾(埋立地からの浸出液による公共の水域及び地下水の汚染を防止するための、遮水工及び浸出液処理設備が設置されていること、ただし、公共の水域及び地下水の汚染を防止するために必要な措置を講じた一般廃棄物のみを埋め立てる埋立地についてはこの限りではない。)が適用されることになった。

そして、平成9年12月の改正により、規模要件は撤廃され、全ての最終処分場が処分基準と基準省令を遵守することとなった。共同命令を強化改訂したものを基準省令²¹⁾といい、構造基準・維持管理基準・廃止基準からなる。さらに、平成12年12月には、国庫補助を受ける自治体等の一般廃棄物最終処分場の設計に「廃棄物最終処分場性能指針」²²⁾が導入され、基準省令などで示されたものより高度な性能を導入すると共に、新技術を自治体の判断で導入することが可能になった。また、準好気性構造を明確に記述している。そしてこれらを取り入れ、自治体で採用可能な高度なごみ埋立地技術を集大成して、平成13年に『廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領』²³⁾が発刊された。

筆者²⁴⁾も、自治体などで十分採用し得る一般廃棄物最終処分場の高度安全安心技術(most achievable technology)が急速に進展していると考え、ソフトとハードの「多重安全の仕組み」と表現して、それぞれ図-1、図-2のように示している。前者は、住民への縦覧や専門家の意見聴取(後者は産業廃棄物の場合のみ)に基づく知事の設置許可(市町村施設は届出)、維持管理記録の情報開示、廃止までの維持管理などの環境安全を高度に追求するソフトな仕組み、および、廃棄物搬入管理、シート破損検知、地下水集排水管排水監視、地下水監視による地下水汚染防止モニタリング網と、浸出水処理施設浸出水・放流水や防災調整池溢流水の監視、埋立ガス監視によるエミッションモニタリング網といったハードな仕組みは、埋立地に屋根を掛ける覆蓋型施設の提案²⁵⁾など、種々の新技術

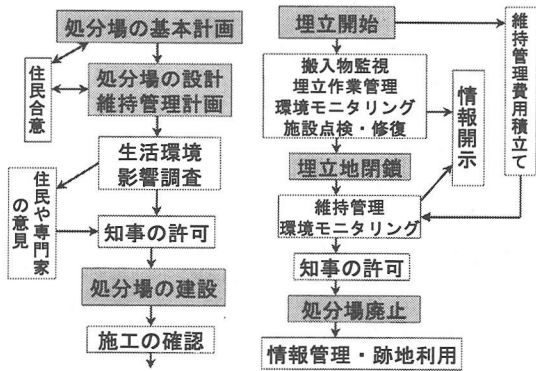


図-1 埋立地多重安全（ソフト）

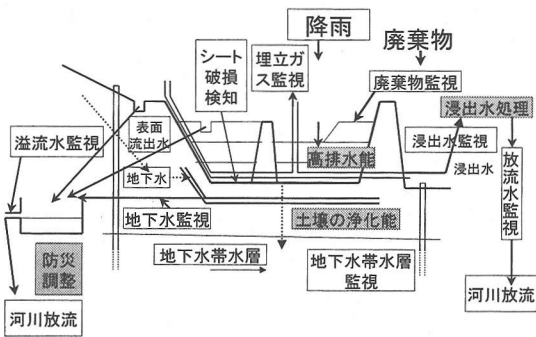


図-2 埋立地多重安全（ハード）

の導入と共に、その環境安全性を高度化している。しかし、一方で、このようにリスクを最小化するための技術の高度化が、費用対効果の面から、あるいはLCAの面から適正な解となっているか、また埋立地周辺の住民が安心できるものとなっているか、検討すべき時期にきていると感じている。

また、埋立地は廃止基準により、一定の安定化状態（廃棄物学会埋立部会の研究²⁵⁾によると、第一次の安定化[土の中にある限り周辺環境に影響を与えない状態]と定義している)に達すると、浸出水処理などの通常管理を行う必要がなくなり、土地台帳に埋立地であったことは記録されるが、廃棄物処理法から開放される。この措置によって埋立地のend of lifeを与えることが可能になった。しかし、通達²⁶⁾により、埋立地に対して一般環境から区分する機能を損なうような利用が行われる場合には土壤環境基準が適用される。遮水工は永久に機能維持できる施設でないことは明らかであり、埋立地が通常土地と同様に汚染地かどうか問題となる。また、土壤污染防治法では、含有量基準項目の拡大の動きがあることから、焼却残渣埋立地などは汚染地と判定されるかもしれない。このよ

表-2 廃棄物減量目標

	(百万トン/年)		
	平成8年度	平成17年度	平成22年度
一般廃棄物			
排出量	53*1 (100)	52 (100)	50 (100)
再生利用量	5.5 (10.4)	10 (19.2)	12 (24.0)
減量化量	34 (64.2)	34 (65.4)	32 (64.0)
最終処分量	13 (24.5)	7.7 (14.8)	6.5 (13.0)
(参考)焼却量	40 [75.5]	37 [71.2]	34 [68.0]

*1: 計画収集・直接搬入・自家処理量+集団回収量
 出典: 平成11年9月ダイオキシン対策関係関係会議
 ()内の数字は排出量を100としたときの割合、[]は、焼却率。

	(百万トン/年)		
	平成8年度	平成17年度	平成22年度
産業廃棄物			
排出量	426**2 (100)	460 (100)	480 (100)
再生利用量	181 (10.4)	219 (19.2)	232 (24.0)
減量化量	185 (64.2)	202 (65.4)	216 (64.0)
最終処分量	60 (24.5)	39 (14.8)	31 (6.5)
(参考)焼却量	18 [75.5]	14 [71.2]	14 [68.0]

**2: 平成12年度厚生省調べをもとに推計した量
 出典: 平成11年9月ダイオキシン対策関係関係会議

うな背景から考えると、埋立地が廃棄物処理法から開放されても土壤污染防治法によって汚染地と認定される可能性がある。ここでは埋立地のend of lifeが決まらない(リスクを持ち続ける)。埋立不適物を重金属高濃度含有物にまで拡大して設定することが必要であり、埋立物の根本的な見直し¹⁰⁷⁾、つまり埋立地概念の研究が必要である。

3. 循環型社会形成促進の動きと埋立処分場

循環型社会形成のための、廃棄物対策側からの具体的な取組としては、ダイオキシン対策、処理処分施設確保、不法投棄・不適正処分根絶などの課題解決を目指して、基本的には廃棄物量が余りにも膨大であることから発生しているとの認識から、廃棄物削減計画(目標)が作られ、市民・事業者の発生抑制努力、不用品のリユース、また現時点においては積極的なりサイクルに依存して、さらに超減量化ごみ処理技術に依存して埋立処分量ゼロ化を目指している。その目標は表-2に示すとおり2010年で埋立量半減が最大の目標であり、経済財政諮問会議・循環型経済社会に関する専門調査会は、平成13年11月の中間とりまとめで、2050年までに最終埋立処分量を1/10(究極的なゴミゼロ社会)にするとしている。

また、一方でダイオキシン類対策は、焼却灰溶融炉やガス化溶融炉の開発、および焼却残渣のセメント化技術により長足の進展を見せている。したがって、循環型社会においては、究極の姿として、埋立地は不要のものと思われているかの感がある。すなわち、①埋立行為そのものが環境負荷であり、埋立量削減が、循環型社会の指標である。②埋立地は土地を消費続けるから、埋立量削減は土地資源・自然の保全につなが

表-3 対象とした論文

	全論文数	埋立論文数
WM&R	581	189(6)
土木・廃棄物学会合計	-	99
土木学会論文集	[42]	6
環境工学研究論文集	[24]	14
環境システム研究論文集	[121]	9
廃棄物学会論文集	286	70

[]はその論文集で廃棄物関連と思われるものの数
()は日本人の論文

る。③灰溶解やセメント化技術により、埋立ゼロ化は容易であるとの論である。

以上のような埋立地不要論に対して、科学的な意味でどのような回答を出すのか、今後の重要な研究課題であると思われる。各論に対して次のような研究が必要である。①生産から廃棄に至る全ライフサイクルで、少なくとも循環・適正処分過程全体で、LCAを行い、埋立地の役割について結論を出す必要がある。②土地が埋立跡地として有効に利用される、あるいは元の自然環境以上の環境に復元されることが必要であり、そのための研究が必要である。③ごみの燃焼技術が持つ長所と短所をリスク管理やLCAから研究することによっても回答が得られると思われる。

4. 国内外における埋立研究の動向

(1) 埋立地研究の全体的な傾向

1990-2001の期間における、Waste Management & Research (以下、WM & Rと略記)と、日本の土木学会(土木学会論文集、環境(衛生)工学研究論文集、環境システム研究(A論文)論文集)および廃棄物学会論文集の論文を対象とした。調査対象全論文数と、筆者が主観的に抽出した埋立研究論文数を表-3に示した(またWM & R誌では内数として日本人の論文数を示した)。まず、A:埋立地の計画・管理に関わる研究、B:埋立地内施設・設備の設計・機能に関わる研究、C:埋立地内の安定化・流出特性に関わる研究、D:廃棄物の溶出・有害特性に関わる研究に大分類した(表-4)。国内外ともCに関する研究が多く、埋立地からの浸出水や埋立ガスのエミッションに関わる、特に安定化に関する研究が盛んに行われていることが分かる。国内外の比較では、日本ではCとDに関わる研究が多く、欧米ではAに関わる研究が多い。

さらに、表-5、図-3に示すように細分類すると、国内外の違いがさらに鮮明になる。

大分類Aを見ると、欧米では、搬入物管理、堆肥化などの埋立前処理、および閉鎖後に植樹したりそれ

表-4 埋立地研究の大分類、%

	WM&R	土木・廃棄物
A:計画・管理	29.6	17.2
B:施設・設備	16.9	17.2
C:安定化・流出特性	40.2	46.5
D:廃棄物溶出・有害特性	13.2	19.2

表-5 埋立地研究の細分類、大分類毎の%

	WM&R	土木・廃棄
A1:アセスメント・モニタリング	33.9	23.5
A2:管理	41.0	5.9
A21:搬入物管理・前処理	17.8	0.0
A22:植生・浸出水散布	14.3	5.9
A23:他	8.9	0.0
A3:経済性	3.6	17.6
A4:住民参加・用地選定	10.7	23.5
A5:他	10.7	29.4
B1:遮水工	50.0	23.5
B11:無機ライナー	34.4	0.0
B12:遮水シート	12.5	5.9
B13:他(漏水検知など)	3.1	17.6
B2:水処理	28.1	47.1
B3:ガス抜き	6.3	11.8
B4:覆土・トップカバー	12.5	11.8
B5:他	3.1	5.9
C1:埋立ガス	34.2	6.5
C2:浸出水質	31.6	54.3
C21:有機汚濁	9.2	19.6
C22:有機化学物質	14.5	23.9
C23:重金属	7.9	10.9
C3:ごみ分解	22.4	17.4
C4:水分移動・水量	3.9	15.2
C5:他	7.8	6.5
D1:無害化	32.0	26.3
D2:焼却灰・石炭灰	44.0	31.6
D3:有害性・溶出試験	20.0	42.1
D4:他	4.0	0.0

に浸出液散布をするなどの埋立管理にかかわるもの(A2)が特に多く、埋立地に関するアセスメントやリスク評価や環境モニタリング(A1)が多い。一方、日本では埋立地のコスト削減(A5)や用地選定(A7)に関わるものが多い。欧米では埋立地に対する厳しさを、組織的・総合的な事前評価や管理で対応する研究を活発に行っていることが伺われる。

大分類Bでは、遮水工(B1)と浸出水処理(B2)に関する研究が多い。しかし詳しく見ると次のような違いがある。欧米では底部や最終覆土の遮水工による封じ込め型の埋立地を基本としているので、浸出水処理よりは遮水工(B1)、特に無機(粘土)ライナー(B11)に関する研究が多い。それに対して、日本では降水量が多いという地域条件を反映して、洗出し作用による早期安定化を基本としているので水処理施設(B2)(水処理技術の開発)に関する研究が多いという特徴がある。

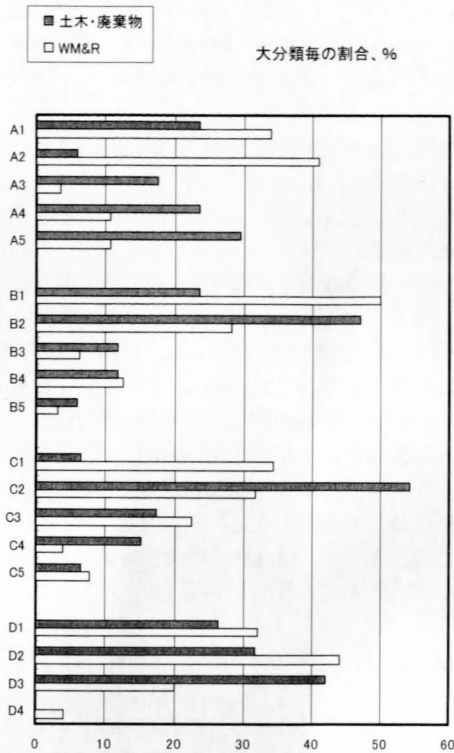


図-3 埋立地研究の細分類比較

大分類Cでは、浸出水に関する研究(C2とC4)が最も多く、埋立ガス(C1)やごみ分解(C3)に関する研究も多い。さらに、欧米では封じ込め型であるのでエミッションとしては埋立ガスが多く研究され、覆土内でのメタン酸化も含める(C1)とCの研究の約1/3を占めるのに対し、日本では前述した地域条件から浸出水質(C2)や水量(C4)に関する研究が多い。浸出水質では、国内外とも有機化学物質に関する研究(C22)が多い。また、ごみ中有機分解では、欧米では埋立地内有機物の嫌気状態での安定化速度(C3)を研究しており、最近、安定化速度を早めるための好気性に注目した研究が出始めているのに対して、日本では一貫して準好気性埋立に関連した研究(C3)が多い。

大分類Dでは、日本では有害性に関する研究(D3)、特に重金属溶出試験方法の研究が多いのに対して、欧米では焼却灰などが有害であるかどうかを検討する研究(D2)が多い。

(2) 欧米における安定化促進研究と埋立地の概念

特に、埋立地の概念に関わる早期安定化に注目して行われた研究を抽出した。

Belevi, H.ら²⁸⁾(スイス, 1989)は、MSW埋立地

から採取したごみの溶出実験にもとづき、浸出水質が環境と同じレベルになるまで管理するのに重要な成分は有機成分であること、最終安定化物になるには、5、6百年かかるだろうと予測している。MSW埋立地は最終安定化物になるのかが答えられるべき重大な課題となっていると述べている。

Bogner, J. E.²⁹⁾(USA, 1990)は、研究の背景として「埋立地内のごみ分解は、分解速度が遅いので、1世紀以上も掛かる。これは降雨が浸入しないようにトップカバーを設けるという法的な制約によるごみ含水率低下に原因している。」と述べている。

Reinhart, D. R.ら³²⁾(USA, 1996)は、埋立地微生物反応器技術(Landfill bio-reactor technology)は重要で、ごみ安定化速度を早め、メタンガス発生速度を高め、浸出水処理を容易にし、ごみ容積を減らし、責任の長期化を最小化すると述べ、浸出水循環を行っている実埋立地を調査し安定化が促進されていることを確認している。

Westlake, K.³⁴⁾(UK, 1997)は、「持続可能な埋立地(Sustainable landfill)が環境リスクを受容可能なものにするように埋立地を管理するという、より適切なゴールを目指すというよりも、運転技術(例えば、反応器型埋立地、あるいは廃棄物を好氣的に前処理する)で表現されることがしばしばある。真の持続可能な埋立地は、どんな前処理を受けていようが、廃棄物が安全に周囲環境に同化するようなものである。これは、封じ込め型埋立地で達成できると思われるが、結局はライナーが破損し、長期間にわたってみると、廃棄物と分解生成物が埋立地から流出することは避けたいということが認識されている。適切な用地選定、設計および管理が、より持続可能な廃棄物処理の達成に必須である。」と述べている。また、「ISWA(The international solid waste association)は1992年に、埋立地とは、環境への汚染や害が防止され、返還(restoration)によって他の目的に使用される土地が提供されるような方法で、陸上または土中に廃棄物を堆積する工学施設であると定義している。これが持続可能な埋立地だろうか?」と述べている。さらに、著者は別の論文(1992)で、「短期及び長期の環境リスクを受容可能なレベルにするような方法で、設計し運転される埋立地」と定義している。つまり、持続可能な埋立地では、リスク最小化は多数の手段、廃棄物分解プロセスの効果的な管理、および適切な用地選定、設計、工学、管理によって達成可能である。ISWA(1992)によると、『封じ込め型埋立地の定義は、浸出水の環境への放出速度が非常に遅い埋立地である。廃棄物中の汚染成分は微生物分解や減衰プロセスが起こるほど十分長い時間埋立地内に保持され、受容できな

い濃度で汚染物質が滲出することはない。」と定義している。」とも記述している。最後に、「前処理による方法と、微生物反応器による方法のどちらが最も持続可能であるかについて簡単には答えられない。」と述べている。

Burton, S. A. Q.³⁵⁾ (UK, 1998) らは、「ヨーロッパの埋立地浸出水の水質に対して強い規制が課される、主要な成分はアンモニアであり、さらに、Sustainability の概念を埋立地に適用することで、ごみ分解速度の加速に挑戦する必要がある。持続可能性の目的に合致するためには、埋立地の汚染可能性期間は一世代、つまり 30 年に減少しなければならない。この期間内にごみは安定化され、可溶性汚染物は洗い出されなければならない。」と述べている。

Komilis, D. P. ら³⁹⁾ (USA & Germany, 1999) は、「埋立地は廃棄物総合管理システム (Integrated solid waste system) の必要な部分であり、熱的、機械的、および生物学的前処理がリサイクルのために行われるが、埋立地挙動を制御する目的でも使用される。未来の埋立地管理法には 2 つあり、最終安定化物埋立 (環境へのエミッションを最小にする) と、制御された生物反応器 (メタン生成速度とメタン利用を高める) がある。前処理によって上記のゴールを達成できる。ただし、最適化された総合管理システムの一部として、財政的・環境的考察を行う必要がある。」と述べている。

Komilis, D. P. ら⁴⁰⁾ (USA & Germany, 1999) は、埋立地設計と埋立作業の埋立地ごみ分解に対する効果について扱っている。例えば、浸出水循環、水中有機成分分解層を作る (Layer development)、緩衝液・栄養・汚泥・部分的に分解したごみ・水分の添加である。「幾つかの実験が示しているように、酸生成相の最小化がメタン生成増進のためには必要な条件であり、含水率と水分流動が重要であることは知られていて、これらの効果は複合的である。」と述べている。そして、埋立地設計と操作の基本的なコンセプトとして次の 3 つを示している。(1) Dry landfill: 現在の埋立地の典型で、降雨浸透を制限するもので、低浸出水・長期間メタン生成によって特性づけられる。最終安定化物に到達できる埋立地ではない。(2) 微生物反応器型埋立地: このタイプではごみ分解とメタン生成を高める。早期安定化も長所である。トップカバーのコストが削減できる。早くて制御されたごみ分解によって短期間で埋立跡地の利用が促進できる。(3) 最終安定化物埋立地: 埋立物が、埋立後に起こるエミッションが最小化される状態になっている。通常、生物分解性有機物を埋立前に減少させることで、有機物エミッションが最小化される。しかし無機物のエミッシ

ョンもある。長期にわたる埋立地モニタリングは必要ないし、コストも減少すると期待できる。「このような研究がここ 20 年にわたって行われてきた。」と述べている。

この時点の既往研究で WM & R に記載されている安定化研究には、Barlaz, M. A. ら³⁰⁾ (1992): 浸出水循環の効果, Stessel, R. I. ら³¹⁾ (1992): 水の注入, 浸出水の循環および空気の注入による研究, Reinhart, D. R.³²⁾ (1996): 浸出水循環を行う埋立地の調査, West, M. E. ら³⁶⁾ (1998): コンポスト化前処理の効果研究, Chugh, S. ら³⁷⁾ (1998): は、液流れが制御・管理された微生物型埋立地の研究, Deusto, I. A. ら³⁸⁾ (Spain, 1998): ごみの好気的前処理研究がある。

Martensson, A. M. ら⁴¹⁾ (Sweden, 1999) は、「ヒューミック相にある埋立地内部の金属移動性は、好気的条件下になると増加するだろう。環境条件が埋立年齢と共に変わるので、埋立初期の研究に基づいて有害性評価を行うことには注意が必要である。」と述べている。

Andreas, L. ら⁴²⁾ (Germany, 1999) は、「窒素が排出基準に合致するまでに長い期間が必要であることから、有機物分解ではなく、窒素が閉鎖後の管理の決定因子であることが分かる。灰が不完全燃焼であっても、灰の埋立は、何の前処理もしない場合よりも、よりよい長期挙動を示す。埋立地表面における意図せざる好気プロセスも長期エミッションを減少させる。埋立地における生物分解と浸出の促進は、十分な水バランスで達成できる。MSW は埋める前に前処理するのが良いことが分かった。廃棄物組成は、現代埋立地技術の操作法より、低いエミッションのためのより重要な因子である。焼却や機械的破碎選別—生物学的好気前処理は、長期的な挙動を改良する上で有効である。現存する埋立地について、不透水性の表面カバーを設置することは賢明な選択ではないようである。トップカバーを無くすことで分解は促進されるが、保全是阻害される。したがって、その地域の気候による浸出水発生程度の水浸透は許すべきである。」と述べている。

さらに、Leikam, K. ら⁴³⁾ (1999): 機械的—生物学的前処理の研究, Leikam, K. ら⁴⁴⁾ (1999): 古い埋立地における現場曝気安定化研究, Lefebvre, X. ら⁴⁵⁾ (France, 2000): 酸素拡散と好気性反応による埋立地表面温度研究など、安定化促進のための研究が引き続き行われている。

これらの研究をまとめると次のようになる。

欧米の埋立地は、有機物の多いごみを封じ込め型の埋立地に埋め、メタンガスを回収するものとなっている。しかし、この埋立地からの浸出水の水質、特に窒素成分が環境レベルになるには、数世紀掛かることが

予測されるようになって、この20年間に於いて埋立地の安定化促進が盛んに研究されるようになった。一つは、トップカバーを設けるという法的な縛りのために埋立地内が乾燥し(Dry landfill)、ごみ分解速度が低下するので、浸出水循環などによって水分供給を行い、メタン生成速度を高め、安定化を促進しようとする(微生物反応器型埋立地)研究が盛んに行われている。そしてトップカバーを設けるやり方でなく、その地域の気候による浸出水発生程度の降雨浸入は許すべきという意見もある。一方、投入する埋立物の有機物量、あるいは腐敗性有機物量を減らすことによって安定化を促進する(最終安定化物に近づけて埋める)ことが検討され、機械的破砕選別-好気性(コンポスト化)前処理や焼却による方法が検討されている。他にも、埋立底部に浸出水中有機物分解層を作ること、緩衝剤・栄養などを添加することなどが研究されている。ただ、安定化を早くしたいのか、メタン回収量を多くしたいのか相矛盾することを求めているため、明確な答えを出せないように、筆者には見える。

これらの研究の一方で、持続可能な埋立地概念「短期及び長期の環境リスクを受容可能なレベルにするような方法で、設計し運転される埋立地」も提案され、運転技術のみの議論ではなく、適切な用地選定、設計および管理と合わせて議論される必要があるとしている。そして、持続性の概念から言えば、埋立地の汚染可能性保持期間は一世代、つまり30年に減少しなければならず、この期間内にごみは安定化され、可溶性汚染物は洗い出されなければならないという意見は傾聴に値する。

(3) 日本における安定化促進研究と埋立地概念

日本の埋立地研究は、福岡大学花嶋に始まるが、前述したように1967年頃から研究を始め、1971年頃には準好気性埋立を提唱している。1976年2月に行われた特別講演⁴⁶⁾では、「埋立方法について、廃棄物の投棄(嫌気性埋立)の時代から、人為的に手を加える衛生埋立に移行し、衛生埋立もただ単に覆土のみによる嫌氣的衛生埋立(Sanitary landfill)から集水管を底部に埋設する改良型嫌氣的衛生埋立(改良型衛生埋立)、ポンプ用ピットと集水管を組み合わせた通気集水装置を有する準好気性埋立(Semiaerobic landfill)の5種類に大別でき、ついで破砕後好気性埋立等が研究実施の段階にある。好気性埋立の方が嫌気性埋立に比べて浸出率や浸出水中BOD濃度の早期安定化において優れている。」と述べている。そして、結論で「“ゴミ層が好氣的状態ならばゴミ層は良好な浄化槽にもなる”即ち、埋立場を一種の浄化槽という立場でとらえ、土壌微生物を効果的に利用するという

ことである。廃棄物埋立における『自然のサイクルとその分解メカニズム』の解明が重要であり、廃棄物埋立も科学として体系化される時も近いと言えよう。」と述べている。1976年には現場スケールによる好気性埋立を報告している⁴⁷⁾。さらに、循環式準好気性埋立構造の実験的研究⁴⁸⁾を1979年には報告し、窒素除去が起こることを見だしている。1986年には実埋立地に浸出液量削減のためであるが、浸出液循環システムを導入している⁴⁹⁾。1970年以前から埋立地内の機構を解明し、早期安定化(浸出水中の有機汚濁濃度を早く低くすること)を進めるため反応器型埋立地研究を行っていたと言える。

1970年前後から各地で活発な埋立地研究が行われたが、筆者の埋立地研究歴²⁴⁾を示す。1980年までは浸出水量推計⁵²⁾と水処理施設容量^{53),55)}、浸出水質調査^{51),54)}、ならびに焼却灰の性状分析^{50),56)}など初歩的な研究が主体であった。1985年までは、水量水質に影響する因子などの研究課題整理^{59),61)}、実水処理施設調査⁵⁷⁾、および嫌気性消化の植種効果⁵⁸⁾やごみの好気性分解⁶⁰⁾の研究など埋立地内現象研究をようやく開始した。1986~1995年までの10年間は埋立地内現象に集中した時期で、世界の研究動向と同様、反応器型埋立地の概念によって安定化を早めることや適切に水処理施設を設計することで、環境影響を少なくする研究であった。ガス移動式の開発⁷⁴⁾、ごみ層への酸素浸入⁶²⁾や好気性ごみ分解⁶⁰⁾、準好気性構造安定化機構^{78),80),82)}、嫌気性層ごみ分解^{63),64),69)}、浸出水pH^{73),83)}、重金属の浸出挙動^{65),67),71),84),86)}、有機化学物質のごみ層内挙動^{66),70),72),75),85)}、ごみ層内温度特性^{68),76),81)}、不飽和水分移動⁷⁷⁾と洗出し特性⁷⁹⁾などの研究である。1996年以後は、埋立地内施設設備(準好気性^{87),89)}、ガス抜き管^{90),91)}、水分移動制御^{96),105),111),112)}の設計研究、埋立物(破砕残渣^{92),103),109)}、溶融スラグ⁹⁵⁾、集塵灰⁹⁹⁾)の特性研究、長期安定化^{98),104)}の研究、埋立地の高塩類⁹³⁾・土壌汚染^{101),102)}・粉じん飛散^{97),110)}などの新しい問題、遮水工や水処理の技術^{88),94),108),114)}や埋立地のあり方^{100),106),107),113)}の研究と多様になり、埋立地に関わる要求水準の高度化に必要な新技術の開発、埋立物の選択、さらには埋立の概念そのものの研究を行うようになった。そして現在、埋立地内現象を計算機上で模擬し、埋立物特性や埋立方法に応じてエミッションを時系列的に予測できる「数値埋立工学」に研究を進めている。

そして日本の研究では焼却による埋立物の無機化が進行していることも重要な背景である(図-4)。日本では古くから埋立物としての焼却残渣埋立の研究^{97),103),110),115),117),118),120),126),127)}が行われ、焼却残渣の

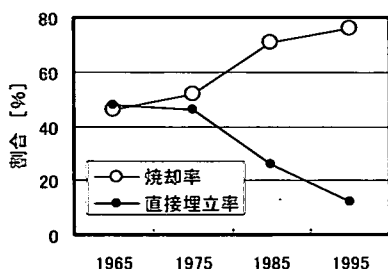


図-4 日本における廃棄物処理の経時変化

持つ、重金属の溶出挙動^{71),83),84),86),99),121),122),124),128)} や毒性^{116),119),123),125)}の研究が活発に行われた。また、焼却灰が最終安定化物に当たるかという点について意識して行われた研究はないが、焼却残渣埋立でもCOD_{Mn}や全窒素の低下には相当の年数が必要であるとの認識であるが、焼却残渣埋立が最終安定化物埋立につながるものであるかどうかは重要な研究課題である。

5. おわりに一循環型社会における埋立地概念の確立

循環型社会作りを進行させていく上で、埋立地の役割、機能を明確にし、埋立地概念(あり方)を抜本的に変更する必要があるというのが本文の主旨である。著者の考えを次のようにまとめ、結論としたい。まず、都市ごみ(非有害廃棄物)埋立処分法は歴史的には、次のように前進してきた。

①河川や海岸への投棄：環境汚染を考える必要がなかった時代

②オープンダンプ+野焼き：処分する廃棄物が増えて公害発生源となっていた時代

③衛生埋立地：覆土のある埋立地(自然減衰型埋立地)：公害(臭い、ハエ、飛散)を防ぐための初歩的な対策が取られたが、地下水汚染は、汚濁物濃度が土壌などの作用により自然に減衰するので、問題ないと考えられていた時代

④封じ込め型埋立地：公害規制を厳しく受けて、埋立地の容器構造が工学化されていった時代、遮水工、浸出水集排水・処理などがなされた時代。

⑤高度工学化埋立地：リスク最小化重視の時代で、Most achievable technologyが埋立地建設に求められ、それを実現しつつある現代

⑥循環型社会に求められる埋立地：現在の埋立地技術の延長線上にあるのか、それとも、概念変更が必要か。

一方、現段階で選択し得る、あるいは提案されている埋立地概念について整理すると、

①恒久土中封じ込め概念：埋立物を土中に隔離して保管し処理し続けることによって、埋立地外部の環境に影響を与えない。廃棄物は永久に廃棄物であり続けるので、恒久に管理される必要があるとの考え。現在の伝統的な考え方で、封じ込めを高度化(低リスク化)することで現在の要求に応えようとする。

②備蓄保管概念：現時点で利用できない、処理できないものを土中に一時的に保管しておき、いずれ必ず資源化や処理できることになるのでその時に掘り出すとの考え¹²⁹⁾。最近、出てきた考え方。

③微生物反応器概念：埋立地内の微生物反応や物理化学反応を使って、短期間の内に埋立物を安定化させようとする考え。これも近年の伝統的な考え方の一つで、埋立地からの浸出水や埋立ガスによる環境影響を早く小さくしたいという考え。日本の準好気性埋立地に関する研究はこれに該当する。

④最終安定化物埋立概念：埋立物を前処理により最終安定化物にして土地造成するという考え。新しく、出てきた概念。最近、洗浄処理などの考えが出ている¹³⁰⁾。

循環型社会における埋立地は、「一世代で安定化を達成でき、土地として循環できる持続型埋立地」が基本であると思われる。そこで、この概念が地球環境問題を含めたリスク管理やLCAに適合していることを確認すると共に、これを実現するための埋立物の選定や前処理を含んだ埋立地研究を行うべきであると考えている。例えば、有機物量を少量残し、金属含有量を制限した埋立物を反応器型埋立地に埋め、遮水工の健全性を確実に保証できる20~30年程度の期間で最終安定化物に変換する(⑤低負荷反応器概念)。これによって、早期に通常の土地が造成できる。埋立地が使い捨ての土地でなく、土地資源として循環できるので持続的な埋立地の概念となり得る。

さて、「安定化」とは、通常、「浸出水中の汚濁物濃度の減少や、埋立ガス量の減少をいう」が、筆者は次のように定義している²⁴⁾。「それ以上何の変化も起こさない状態で、広義には環境に影響を与えない状態」としている。基準省令に言う廃止条件は、第一段階の安定化「土の中にとどまっている限り、外部の環境に影響を与えない状態」と考え、最終の安定化とは、「廃棄物を掘り返して大気や雨に曝しても環境に影響を与えない状態」と定義している。さて、前述の最終安定化物(Final storage quality)とは、「大気・水域への埋立地からのエミッションを処理する必要がない埋立物の状態」としている。第一段階の安定化に相当すると考えられる。また、細見・中杉¹³¹⁾は、安定化を「埋立処分地内の生物分解可能な有機物が微生物学的に分解されて、生物学的、化学的、物理化学的

反応を通じてメタン、二酸化炭素、水や分解されない安定な有機物になり、埋立処分地の環境汚染リスクが削減される過程」と定義している。

引用・参考文献

- 1) American Public Works Association: "MUNICIPAL REFUSE DISPOSAL", Public Administration Service, Chicago, USA, 1966.
- 2) 最終処分場技術システム研究会:「廃棄物最終処分場技術システムハンドブック」, p. 264, 環境産業新聞社, 1999.
- 3) Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Eliassen, R.: "SOLID WASTES Engineering Principles and Management Issues", McGRAW-HILL KOGAKUSHA, Ltd., TOKYO, 1977.
- 4) BAGCHI, A.: "DESIGN, CONSTRUCTION, & MONITORING of SANITARY LANDFILL", WILEY-INTERSCIENCE, New York, 1990.
- 5) SHARMA, H. D. and LEWIS, S. P.: "WASTE CONTAINMENT SYSTEMS, WASTE STABILIZATION, and LANDFILLS Design and Evaluation", JOHN WILEY & SONS, INC., New York, 1994.
- 6) Edited by CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. and STEGMANN, R.: "SANITARY LANDFILLING: Process, Technology and Environmental Impact", ACADEMIC PRESS, LONDON, 1989.
- 7) Edited by CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. and STEGMANN, R.: "LANDFILLING OF WASTE: LEACHATE", E & FN SPON, 1992.
- 8) Edited by CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. and STEGMANN, R.: "LANDFILLING OF WASTE: BARRIERS", E & FN SPON, LONDON, 1994.
- 9) Edited by CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. and STEGMANN, R.: "LANDFILLING OF WASTE: BAIOGAS", E & FN SPON, LONDON, 1996.
- 10) BACCINI, P. (Ed.): "LECTURE NOTES IN EARTH SCIENCES Vol. 20 The Landfill-Reactor and Final Storage-", Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- 11) 花嶋正孝, 樋口社太郎監訳:「ドイツ一般廃棄物技術基準」, エヌ・ティ・エス, 東京, 1998.
- 12) 例えば, Ziegler, C.: Nitrogen Fixation and Release from Biologically Pretreated MSW, Proceedings, Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium, I, pp. 513-521, 1997.
- 13) 例えば, Zach, A., Binner, E. and Latif, M.: Improvement of municipal solid waste quality for landfilling by means of mechanical-biological pretreatment, Waste Management & Research, 18(1), pp. 25-, 2000.
- 14) 山崎達雄:「洛中塵捨場今昔」, (朝臨川書店, 京都, 1999. 9.
- 15) 溝入茂:「ごみの百年史—処理技術の移りかわり」, (朝学芸書林, 東京, 1987. 12.
- 16) 松藤康司:「廃棄物埋立地の歩み (廃棄物埋立史)—ごみ捨て場からクローズドシステムへ[その1]」, 第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 469-471, 1994.
- 17) 花嶋正孝:「最終処分場の変遷と動向」, 廃棄物学会誌, 3(2), pp. 116-125, 1992.
- 18) 例えば, 都市清掃, 7(7), pp. 55-56, 1977.
- 19) 厚生省水道環境部監修:「廃棄物最終処分場指針解説」, 全国都市清掃会議, 東京, 1988.
- 20) 例えば, 都市と廃棄物, 7(3), pp. 50-51, 1977.
- 21) 例えば, 都市と廃棄物, 28(9), pp. 23-30, 1998.
- 22) 文献23)のpp. 14-18を参照, または, 文献114)を参照.
- 23) (社)全国都市清掃会議:「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領」, (社)全国都市清掃会議, 東京, 2001. 11.
- 24) 田中信壽:「環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理」, 技報堂出版, 東京, 2000. 2.
- 25) 廃棄物学会埋立部会:「廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法」, 2002. 3.
- 26) 平成10年7月16日付け環水土第151号, 環境庁水質保全局土壤農薬課長通知.
- 27) 花嶋正孝:「クローズドシステム処分場の提案」, 廃棄物学会誌, 1(1), pp. 38-42, 1990.
- 28) Belevi, B. and Baccini, P.: Long-term behaviour of municipal solid waste, WM & R, 7(1), pp. 43-56, 1989.
- 29) Bogner, J. E.: Controlled study of landfill biodegradation rates using modified BMP assays, WM & R, 8(5), pp. 329-352, 1990.
- 30) Barlaz, M. A., Ham, R. K. and Schaefer, D. M.: Microbial; chemical and methane production characteristics of anaerobically decomposed refuse with and without leachate recycling, WM & R, 10(3), pp. 257-267, 1992.
- 31) Stessel, R. I. and Murphy, R. J.: A lysimeter study of the aerobic landfill concept, WM & R, 10(6), pp. 485-503, 1992.
- 32) Reinhart, D. R. and Al-Yousfi, A. B.: The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics, WM & R, 14(4), pp. 337-346, 1996.
- 33) Reinhart, D. R.: Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: case studies, WM & R, 14(4), pp. 347-365, 1996.
- 34) Westlake, K.: Sustainable landfill—possibility or pipe-dream?, WM & R, 15(5), pp. 453-461, 1997.
- 35) Burton, S. A. Q. and Watson-Craik, I. A.: Ammonia and nitrogen fluxes in landfill sites: applicability to sustainable landfilling, WM & R, 16(1), pp. 41-53, 1998.
- 36) West, M. E., Brown, K. W. and Thomas, J. C.: Methane production of raw and composted solid waste in simulated landfill cells, WM & R, 16(5), pp. 430-436, 1998.
- 37) Chugh, S., Clarke, W., Pullammanappallil, P. and Rudolph, V.: Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation, WM & R, 16(6), pp. 564-573, 1998.
- 38) Deusto, I. A., Lopez, J. I., Frutos, J. L. R. and Rodriguez, J. L.: Assessment and influence of specific parameters on a high density, aerobic landfill, WM & R, 16(6), pp. 574-581, 1998.
- 39) Komilis, D. R., Ham, R. K. and Stegmann, R.: The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill

- behavior: a literature review, WM & R, 17(1), pp. 10-19, 1999.
- 40) Komilis, D. P., Ham, R. K. and Stegmann, R.: The effect of landfill design and operation practices on waste degradation behavior: a review, WM & R, 17(1), pp. 20-26, 1999.
- 41) Martensson, A. M., Aulin, C. and Agren, S.: Effect of humic substances on the mobility of toxic metals in a mature landfill, WM & R, 17(4), pp. 296-304, 1999.
- 42) Andreas, L. and Bilitewski, B.: Effects of waste quality and landfill technology on the long-term behavior of municipal landfills, WM & R, 17(6), pp. 413-423, 1999.
- 43) Leikam, K. and Stegmann, R.: Influence of mechanical-biological pretreatment of municipal solid waste on landfill behavior, WM & R, 17(6), pp. 424-429, 1999.
- 44) Leikam, K., Heyer, K. U. and Stegmann, R.: Aerobic in situ stabilization of completed landfills and old sites, WM & R, 17(6), pp. 555-562, 1999.
- 45) Lefebvre, X., Lanini, S. and Houi, D.: The role of aerobic activity on refuse temperature rise, I. Landfill experimental study, WM & R, 18(5), pp. 444-452, 2000.
- 46) 花嶋正孝: 廃棄物埋立の変遷と動向, 第26回廃棄物処理対策全国協議会全国大会講演概要集, pp. 74-83, 1975.
- 47) 花嶋正孝, 松藤康司, 長野修治: 現場スケールによる好気性埋立, 第27回廃棄物処理対策全国協議会全国大会講演集(以下, 廃対協講演集), pp. 51-56, 1976.
- 48) 花嶋正孝, 山崎惟義, 松藤康司, 長野修治, 柳瀬龍二: 循環式準好気性埋立構造の実験的研究, 第30回廃対協講演集, pp. 59-64, 1979.
- 49) 太田耕, 花嶋正孝, 長谷川信夫, 樋口杜太郎: 浸出液削減計画(循環システム)を取り入れた最終処分場, 都市清掃, No. 153/39, pp. 384-390, 1986.
- 50) 田中信壽, 木全央: 京都府におけるごみ焼却場の引き出し灰および集塵灰中の重金属組成について, 第25回廃対協講演集, pp. 38-41, 1974.
- 51) 八島哲, 田中信壽, 米谷武士: 一般廃棄物埋立地浸出水の性状について, 第27回廃対協講演集, pp. 61-64, 1976.
- 52) 田中信壽, 八島哲, 米谷武士: ごみ埋立地における雨水量と浸出水量の関係についての一考察, 第28回廃対協講演集, pp. 1-6, 1977.
- 53) 田中信壽, 八島哲, 米谷武士: ごみ埋立地浸出水処理施設における処理容量の計算方法(雨水量と蒸発量を考慮したモデル計算), 29回廃対協講演集, pp. 34-39, 1978.
- 54) 八島哲, 田中信壽, 米谷武士: ごみ埋立地浸出水の水质変動についての二, 三の考察, 29回廃対協講演集, pp. 40-45, 1978.
- 55) 田中信壽, 八島哲, 米谷武士: 廃棄物埋立地浸出水の流出係数, 最大水量, 平均水量の推定式と処理施設の貯留槽容量計算法についての提案, 30回廃対協講演集, pp. 53-58, 1979.
- 56) 田中信壽, 八島哲, 米谷武士: 各種の溶出条件における都市ごみ焼却残灰の溶出特性, 第31回廃対協講演集, pp. 107-112, 1980.
- 57) 高橋靖弘, 井上雄三, 田中信壽, 神山桂一, 白鳥悟士: 混合ごみ埋立地浸出水処理施設の調査結果, 第32回廃対協講演集, pp. 104-109, 1981.
- 58) 田中信壽, 神山桂一, 竹中弘幸, 中田昌則: 都市廃棄物堆積層におけるメタン生成について一下水消化槽汚泥植種の効果一, 第33回廃対協講演集, pp. 88-91, 1982.
- 59) 田中信壽, 神山桂一: 廃棄物処分場浸出水の水量・水質に係る物理化学的ならびに生物学的現象について, 第34回廃対協講演集, pp. 103-108, 1983.
- 60) 神山桂一, 田中信壽, 井上雄三: 都市ごみの好気性分解に関する研究, 衛生工学研究論文集, 19, pp. 136-145, 1983.
- 61) 田中信壽: 一般廃棄物最終処分場計画設計法の確立のために必要な研究課題について, 水, 27(11), pp. 23-27, 1985.
- 62) 田中信壽, 高畑恒志, 神山桂一: 廃棄物埋立処分場における大気中酸素の廃棄物層への浸入深さとフラックスについて, 衛生工学研究論文集, 22, pp. 37-47, 1986.
- 63) 田中信壽, 神山桂一: 都市廃棄物嫌気性埋立層中の可溶性汚濁物生成過程に関する研究, 土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 217-225, 1987.
- 64) 田中信壽, 神山桂一: 嫌気性混合ごみ埋立層中の可溶性汚濁物生成過程に関する研究, 衛生工学研究論文集, 24, pp. 189-196, 1988.
- 65) 土手裕, 田中信壽, 神山桂一: 埋立層内汚水中のカドミウム濃度に及ぼす OH^- , Cl^- , CO_3^{2-} の影響に関する研究, 衛生工学研究論文集, 24, pp. 177-186, 1988.
- 66) 李東勳, 田中信壽, 神山桂一: 埋立処分場廃棄物へのトリクロロエチレンの吸着特性について, 衛生工学研究論文集, 25, pp. 15-20, 1989.
- 67) 土手裕, 田中信壽, 神山桂一: 模擬埋立実験による廃棄物埋立層内におけるカドミウムの化学的挙動に関する研究, 衛生工学研究論文集, 25, pp. 21-27, 1989.
- 68) 吉田秀樹, 田中信壽, 神山桂一, 穂積準: 廃棄物埋立層内の温度分布に関する理論的研究, 衛生工学研究論文集, 25, pp. 29-38, 1989.
- 69) 田中信壽, 神山桂一: 都市廃棄物嫌気性埋立層のガス発生特性に関する研究, 衛生工学研究論文集, 25, pp. 39-46, 1989.
- 70) 李東勳, 田中信壽, 神山桂一: 廃棄物埋立層内におけるトリクロロエチレンの輸送現象に関する研究一湿潤廃棄物中のガスによる輸送並びに飽和水による輸送一, 衛生工学研究論文集, 26, pp. 61-70, 1990.
- 71) 土手裕, 田中信壽, 神山桂一: 都市廃棄物埋立処分場浸出水中の溶存カドミウム濃度の長期的経時変化に関する理論的研究, 衛生工学研究論文集, 26, pp. 49-60, 1990.
- 72) 田中信壽, 李東勳, 松藤敏彦, 神山桂一: 廃棄物層内での分解反応を伴うトリクロロエチレン輸送に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 1(1), pp. 1-9, 1990.
- 73) 土手裕, 田中信壽, 神山桂一: 都市ごみ埋立地浸出水 pH に関する考察, 公害, 25(5), pp. 53-63, 1990.
- 74) 田中信壽, 神山桂一: 廃棄物埋立処分場におけるガス及びガス成分の移動について一廃棄物層・土壌層を流れるガスの移動方程式とその応用一, 廃棄物学会誌, 2(1), pp. 46-58, 1991.
- 75) 田中信壽, 松藤敏彦, 李東勳: 廃棄物埋立処分場における有害有機化学物質の挙動評価モデル, 公衆衛生院研究報告, 40(2), pp. 1-13, 1991.

- 76) 吉田英樹, 田中信壽, 穂積準: 廃棄物充填層の有効熱伝導率に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 3(2), pp. 17-25, 1992.
- 77) 田中信壽, 松藤敏彦: 廃棄物埋立層における不飽和水分移動特性とその測定法に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 4(3), pp. 107-115, 1993.
- 78) 田中信壽: 埋立地浸出水の水量水質問題と準好気性埋立構造, 廃棄物学会誌, 4(1), pp. 40-46, 1993.
- 79) 田中信壽, 松藤敏彦: 廃棄物埋立層内の降雨不飽和浸透流による非反応性溶質輸送(混合)現象への拡散モデルや二成分モデルの適用生, 廃棄物学会論文誌, 5(1), pp. 1-10, 1994.
- 80) 金英圭, 松藤敏彦, 田中信壽: 準好気性廃棄物埋立地内浸出水集排水管への空気流入に関する研究—単一管の場合—, 廃棄物学会論文誌, 6(4), pp. 127-136, 1995.
- 81) 吉田英樹, 田中信壽, 穂積準: 廃棄物埋立層内における自然対流伝熱に関する理論的研究, 廃棄物学会論文誌, 6(6), pp. 245-251, 1995.
- 82) 金英圭, 田中信壽, 松藤敏彦: 微好気性ごみ層における浸出水中の TOC 除去能力に関する実験的研究, 環境工学研究論文集, 32, pp. 425-433, 1995.
- 83) 宮脇健太郎, 松藤敏彦, 田中信壽, 松尾孝之, 増田剛: 炭酸ガス吸収による焼却灰埋立層浸出液 pH の低下に関する研究, 環境工学研究論文集, 32, pp. 417-423, 1995.
- 84) 宮脇健太郎, 松藤敏彦, 田中信壽: 焼却灰溶出液中における硫酸還元反応への影響因子に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 6(3), pp. 95-104, 1995.
- 85) 田中信壽, 石井一英: 埋立処分場における揮発性有機化合物の挙動, 廃棄物学会誌, 6(1), pp. 24-33, 1995.
- 86) 宮脇健太郎, 田中信壽, 松藤敏彦: 焼却灰炭酸中和溶出液中硫酸還元反応に対する灰特性および植種の影響, 廃棄物学会論文誌, 7(6), pp. 312-319, 1996.
- 87) 田中信壽, 金英圭, 松藤敏彦: 準好気性埋立地浸出水集排水管周りの碎石層における有機汚濁浄化能の理論的評価と管設計, 土木学会論文集, No. 552/VII-1, pp. 85-93, 1996.
- 88) 田中信壽: 講座: 最終処分場の技術とシステム第 2 章最終処分場の基礎(その 2), 都市清掃, No. 207, 48, pp. 384-389, 1996.
- 89) 金英圭, 松藤敏彦, 田中信壽: 準好気性廃棄物埋立地内浸出水集排水管への空気流入に関する研究—管網の場合—, 廃棄物学会論文誌, 8(1), pp. 1-8, 1997.
- 90) 李海承, 田中信壽: ごみ埋立地におけるガス抜き管の設計に関する理論的研究—集ガス率と覆土下ガス圧に影響する因子—, 廃棄物学会論文誌, 第 8 巻第 1 号, pp. 31-40, 1997.
- 91) 李海承, 田中信壽: ごみ埋立地におけるガス抜き管の設計に関する理論的研究—管設置間隔と覆土透気係数の決定—, 廃棄物学会論文誌, 第 8 巻第 2 号, pp. 81-88, 1997.
- 92) 関戸知雄, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: 都市ごみ破碎選別処理施設における破碎選別残渣の特性に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 8(5), pp. 190-199, 1997.
- 93) 田中信壽, 花嶋正孝: 都市ごみ埋立地における埋立物の無機化と高塩類問題, 廃棄物学会誌, 8(7), pp. 481-485, 1997.
- 94) 堀井安雄, 田中信壽: 焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題, 廃棄物学会誌, 8(1), pp. 64-75, 1997.
- 95) 肴倉宏史, 田中信壽: 都市ごみ焼却残渣溶融スラグのバッチ実験における溶出機構, 廃棄物学会論文誌, 9(1), pp. 11-19, 1998.
- 96) 東條安匡, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: 埋立廃棄物層の浸透能(飽和透水係数)の原位置測定, 環境工学研究論文集, 35, pp. 11-20, 1998.
- 97) 東條安匡, 松藤敏彦, 松尾孝之, 肴倉宏史, 田中信壽: 焼却灰飛散による最終処分場周辺土壌の重金属濃度, 廃棄物学会論文誌, 10(6), pp. 311-320, 1999.
- 98) Trebles, I., 松藤敏彦, 田中信壽, 松尾孝之: Physico-chemical characteristics and stabilization of about 23 years old landfilled municipal solid waste, 環境工学研究論文集, 36, pp. 403-411, 1999.
- 99) 肴倉宏史, 菅野一敏, 松尾孝之, 松藤敏彦, 田中信壽: ジテオカルバミン酸基を有するキレート剤による都市ごみ焼却炉集じん灰中重金属の影響因子, 廃棄物学会論文誌, 10(4), pp. 187-195, 1999.
- 100) 田中信壽: 環境安全な廃棄物埋立処分技術, 廃棄物学会誌, 10(2), pp. 118-127, 1999.
- 101) 田中信壽: [巻頭言]究極の廃棄物埋立地, エバラ時報, No. 182, 1999.1.
- 102) 田中信壽: [特別寄稿]埋立地と土壤汚染, 土壤環境ニュース, 11, 1999.
- 103) Sekito, T., Tanaka, N. and Matsuto, T.: Leachability and content of heavy metals in incombustible residues from resources recovery facilities, WM & R, 18(2), pp. 151-159, 2000.
- 104) Trebles, I., Horibe, H., Tanaka, N. and Matsuto, T.: Origin of low carbon/nitrogen ratios in leachate from old municipal solid waste landfills, WM & R, 18(3), pp. 224-234, 2000.
- 105) 東條安匡, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: 廃棄物処分場覆土における表面流の生成とその排除, 環境工学研究論文集, 37, pp. 423-433, 2000.
- 106) 田中信壽: 環境安全な最終処分場建設の課題を知る, いんだすと, 15(2), pp. 25, 2000.
- 107) 田中信壽: 循環型社会における最終処分場のあり方, 生活と環境, 45(11), pp. 8-11, 2000.
- 108) 田中信壽: 信頼される処分場と漏水検知・修復技術, 総合政策提案誌「新政策」特集号「地域融和型の廃棄物最終処分場」, pp. 142-145, 2000.
- 109) 関戸知雄, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: 家庭系粗大ごみ中に含まれる鉛量の推定, 土木学会論文集, No. 671/VII-18, pp. 49-58, 2001.2.
- 110) 松藤敏彦, 東條安匡, 松尾孝之, 田中信壽: 埋立地における焼却残渣飛散要因と防止に関する小風洞を用いた実験的研究, 廃棄物学会論文誌, 13(4), 2002 (掲載決定).
- 111) 東條安匡, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地底部集排水構造に関する研究—数値解析—, 土木学会論文集, No. 692/VII-21, pp. 41-52, 2001.
- 112) 東條安匡, 田中信壽, 松藤敏彦, 松尾孝之: キャピラリーバリアを用いた廃棄物埋立地底部集排水構造に関する研究—実験的研究—, 土木学会論文集, No. 692/VII-21, pp. 53-62, 2001.

- 113) 田中信壽：安全で安心な埋立処分場を実現するための技術課題について，総合政策提案誌『新政策』特集号『負の遺産にしない埋立処分場』，pp. 88-91, 2002.
- 114) 田中信壽：最終処分場の性能指針と計画・設計要領について，都市清掃，55, No. 246, pp. 136-140, 2002.
- 115) 李南勳，楠田哲也，島岡隆行，松藤康司，花嶋正孝：埋立廃棄物層における汚濁物質の質変換現象に関する実験的研究，廃棄物学会論文誌，4(2)，pp. 53-63, 1993.
- 116) 吉野秀吉，浦野悠平：一般廃棄物焼却灰の変異原性，廃棄物学会論文誌，5(1)，pp. 11-18, 1994.
- 117) 朴祥徹，楠田哲也，島岡隆行，松藤康司，花嶋正孝：埋立廃棄物層の通気性が浸出水水質の安定化に及ぼす，廃棄物学会論文誌，5(1)，pp. 19-28, 1994.
- 118) 島岡隆行，末松峰樹，朴祥徹，花嶋正孝：循環式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)，pp. 234-243, 1996.
- 119) 金子栄廣：藻類の生長に対する都市ごみ焼却飛灰の溶出毒性，廃棄物学会論文誌，8(7)，pp. 321-326, 1997.
- 120) 野馬幸生，貫田晶子：最終処分場におけるカルシウムスケール生成の予測，廃棄物学会論文誌，9(5)，pp. 215-223, 1998.
- 121) 島岡隆行，於久弘治，宮脇健太郎，他5名：廃棄物埋立地における薬剤処理飛灰の有害重金属安定性，廃棄物学会論文誌，9(6)，pp. 264-273, 1998.
- 122) 欧陽通，鳥貝真，坂井り子，王寧，尹順子，岩島清，大迫政浩：廃棄物中の有害金属類の溶出ポテンシャルに関する研究—逐次抽出法による溶出試験結果の評価—，廃棄物学会論文誌，10(3)，pp. 142-151, 1999.
- 123) 金谷珍，大迫政浩，李東勳：溶存性フミン物質の共存化における PCDFs/DFs の水溶解度に関する考察，廃棄物学会論文誌，10(4)，pp. 214-223, 1999.
- 124) 野馬幸生，松藤康司，高田光康，友田啓二郎：一般廃棄物最終処分場におけるダイオキシン類の収支，廃棄物学会論文誌，11(6)，pp. 297-306, 2000.
- 125) 立藤綾子，松藤康司，花嶋正孝，宮野和子：焼却残渣主体の埋立地における変異原物質の生成機構に関する研究，廃棄物学会論文誌，12(5)，pp. 191-199, 2001.
- 126) 黒川岳司，小松登志子，福島武彦：廃棄物埋立地層内における重金属の溶出性の評価，廃棄物学会論文誌，12(5)，pp. 209-218, 2001.
- 127) 立藤綾子，松藤康司，花嶋正孝：焼却残渣主体の埋立地における亜酸化窒素の発生機構に関する研究，廃棄物学会論文誌，12(6)，pp. 241-248, 2001.
- 128) 大迫政浩，山田正人，井上雄三，金谷珍，朴政九，李東勳，吉田應男，野村稔郎：日韓の都市ごみ焼却主灰からの重金属類溶出特性に関する比較考察，廃棄物学会論文誌，12(6)，pp. 256-265, 2001.
- 129) 松藤康司：廃棄物埋立地の機能と新しい埋立システム—ミニマム・デポ・ランドとインフォームド・コンセントのすすめ—，都市清掃，No. 246/55 巻，pp. 155-157, 2002.
- 130) 花嶋正孝，樋口壮太郎：廃棄物洗浄型埋立処理システムの開発，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 947-950, 1998.
- 131) 細見正明，中杉修身：廃棄物埋立処分地浸出水の循環に関する考察，第1回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 181-184, 1990.

(2002. 8. 12 受付)