

欧米における埋立地安定化戦略

北海道大学大学院工学研究科 正会員 松藤敏彦

1. 早期安定化の必要性

廃棄物埋立地の安定化は、埋立地の「廃止」を定義するのに重要な概念である。そこでまず、埋立地ライフサイクルを整理することから本稿を始める。わが国では、埋立の終了を、開口部を土砂等で閉鎖することから「閉鎖」、浸出水、埋立ガスが安定化し、埋立地管理の必要性がなくなると埋立地としての許可登録が不要となることから「(許可登録の) 廃止」と呼ばれている。

	日本	欧米
埋立開始	↓	↓
	Operation	Operation
	閉鎖・安定化	
	廃止	廃止

欧米ではどうか。R.Stegmann の論文²⁾を参考にまとめると図1のようになる。埋立の終了は”closure”であり、訳としても日本の「閉鎖」と同じである。ただし、欧米の Final cover は最終覆土と訳せるが、「上部からの浸透が底部からの漏出と同程度あるいはそれ以下²⁾³⁾」であり、複数の遮水層、排水層と表土、植生から構成されるため、わが国で 50cm 厚の土砂による埋立地は”Closed landfill”あるいは”Comp Aftercare は、Post-closure care (closure 後の(長期間のケア)”とも呼ばれている。この図にはなく、アフターケアの終了がそれにあたる。

アフターケアについては米国では USEPA の RCRA（資源保全回収法）Subtitle D（非有害廃棄物の基準）によって、また EU では埋立指令（99/31/EC）によって、30 年間のアフターケアを行い、そのための資金を確保することが義務付けられている⁴⁾。主として資金的な規定であり、米国では「構造、運転が基準を守り、適切なカバーがされ、過去 10 年間に水質モニタリングで異常が検出されていない」ときに終了できるとしている⁵⁾としているが、アフターケアの終了を”release from aftercare”（解放）との表現が使用されるように、費用がかかることから以下にアフターケア期間を短縮するかが、欧米でも問題となっている。

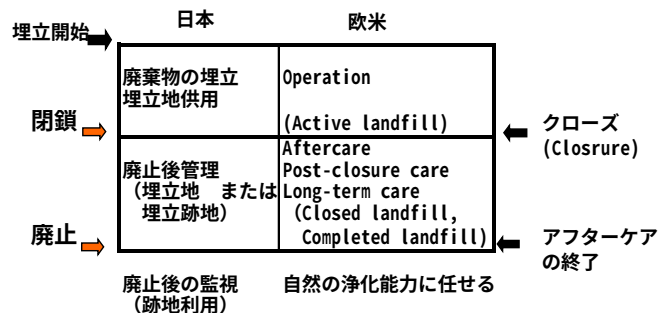


図1 埋立の開始から廃止までの日本と欧米の定義

2. 米国の安定化戦略

米国における都市ごみ埋立地 (Subtitled landfill) は HDPE シートと 2 フィート厚以上の圧縮粘土の複合ライナーによるしゃ水が必要であるが、埋立地終了時 (closure 時) には底部しゃ水と同程度かそれ以上のしゃ水能力をもつ Final cover を設置しなければならない (CRF 258.60)。これは埋立地への雨水浸入を最小化するためであり、「ふた」をした状態にすることから landfill cap あるいは capping と呼ばれる。このような構造は浸出水への漏出を最小にする、いわゆる封じ込め型埋立地 (Containment landfill) である。浸出水量は最小化され、短期的な環境影響は少ないが、廃棄物が分解せずにいつまでもとどまるため Dry tomb (乾燥したごみの墓) と呼ばれている。これに対しては、「底部ライナーからの漏出が長期的には避けられず、環境リスク発生を長期化させるだけ」との批判がある。また一方で、「雨水の浸入を許すと浸出水処理コストが増加し、浸出水が廃棄物層内を一様には流れないので全体が安定化することはない」との、封じ込めを支持する意見もあった³⁾。

そのため北米では微生物活動の活発化によって廃棄物の安定化を促進し、環境汚染のポテンシャルを低くすることを目的に Bioreactor landfill が提案されている。埋立地自体、微生物分解が廃棄物安定化の主なメカニズムなので生物反応器（バイオリアクター）であるとの考え方は古くからあるが、pH、廃棄

物の粒径、栄養、温度制御、水分の制御、さらには微生物植種なども行って「工学的に分解条件の最適化をはかる」⁶⁾⁷⁾もので、これらの要因のうち最も重要なのが水分である。浸出水再循環は1980年代から広く行われていたが、Bioreactor landfillは嫌氣的分解を最大化するために廃棄物層を一様にField capacity、すなわち最大水分保持状態に保つことが目標となっている。したがって、浸出水以外にも、雨水、汚水処理水なども利用する。SWANA（北米廃棄物処理協会）の調査によると、1997年の時点で浸出水循環は多くの州で認められていたがBioreactorを認めていたのは6州のみであった²²⁾。水分供給方法としては、埋立地表面から（池、トレンチ、スプレー）、鉛直井戸による供給、水平方向の埋め込みト

レンチからの供給に分けられる。大型ライシメータ、あるいは実規模での実験が行われており、米国ではカリフォルニアのYolo County埋立地（ごみ量8000トン、深さ12mのセルが2つ）など、4つの大規模プロジェクトが進行中である。カナダの例⁹⁾では、浸出水の水位、ライナー上・廃棄物の温度、廃棄物の水分、廃棄物のサクション、廃棄物の沈下・圧縮、浸出水組成・発生量、ガス組成・発生量、廃棄物の特性、有機物含有量を測定しており、評価のためのデータ取得中である。

3. 欧州の安定化戦略

欧州の埋立地も米国と同様な封じ込め型であったが、1999年公布のEU埋立指令によって大きく変わろうとしている。埋立指令の主な内容は(①埋立地の分類：有機物、有害廃棄物、非有害廃棄物、安定廃棄物)、②埋立禁止（液状廃棄物、爆発性・腐食性・酸化性・引火性廃棄物、感染性廃棄物、研究等に使用した環境影響が未知の化学物質、使用済みタイヤ、未処理の廃棄物）、③廃棄物は埋立される前に、前処理をしなければならない、④生物分解性廃棄物の埋立量を減少する、ことである。③④によって混合埋立を改める必要が生じ、④の生物分解性有機物量は1995年を基準として2006年までに25%、2009年までに50%、2016年までに65%とすることが具体的に定められている。この達成のために考えられたのがMBP(Mechanical Biological Waste Pre-treatment、物理・生物的前処理)である。図2にフローの例（文献9）の図より作成）を示すが、混合ごみを、破碎、選別、ふるい分けによって可燃物、不燃物、有機性ごみに分け、可燃物は熱処理（エネルギー回収）、有機性ごみは生物処理（好気性または嫌気性）し、それらの安定化物を埋め立てるものである。具体的なフローとして、Cossuら¹⁰⁾は大型ごみ除去後に破碎し、トロンメルで選別、その残渣を2～3週間堆肥化。さらに3～4週間野積みし、熱処理残渣（スラグとボトムアッシュ）の20mmふるい下を1:9で充填したライシメータ埋立実験を行っている。

MBP処理物の安定化度評価については多くの研究（例えば11),12))がなされ、ドイツでは表1に示すMBP処理物埋立基準が設けられた。ここでAT, GBはそれぞれ好氣的、嫌氣的な雰囲気での酸素消費量、ガス発生量であり、生物分解活性を直接測定する指標である。MBPは要するに破碎選別による可燃分の回収と有機物堆肥化であり、わが国のRDF化施設にもこのような、堆肥化を平行しておこなう施設があった。製品堆肥中に異物が多いとの問題があったが、MBPは堆肥化を安定化前処理と考えていることが異なる。しかし処理プロセスの複雑さ、前処理物中の生物分解性有機物低減が焼却には及ばないことか

表1 ドイツにおけるMBP処理物の埋立基準（AbfAbIV(2001)）

項目	単位	基準値	内容
AT ₄	mg O ₂ (gTS) ⁻¹	5	酸素雰囲気における4日間の生物学的酸素消費量
GB ₂₁	ml(g TS) ⁻¹	20	21日間の嫌気ガス発生可能量
TOC _{Eluat}	mg l ⁻¹	250	溶出試験(L/S10, 24時間)におけるTOC溶出量
H ₀	kJ kg ⁻¹	6000	発熱量
TOC	TSあたり重量%	18	乾燥固形物(TS)あたりのTOC

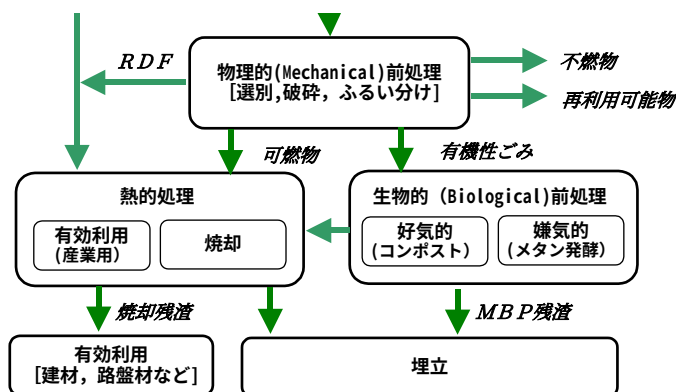


図2 MPBのフロー例

ら、「MBP が採用されるのは、これまで多大の投資をした埋立地の使用をやめ、新たに建設費の高い焼却炉を建設することが困難である、という経済的・政治的な理由によるもので、将来は焼却をすることになる（Brunner：東條安匡ヒアリング¹³⁾）」との意見がある。Soyez¹⁴⁾のように、埋立前処理としての目的よりも、可燃物を RDF として回収することに意義があるとの見方もされている。

4. 埋立地好気化の動き

嫌気的な埋立地の安定化には、100 年オーダーの時間を要する。安定化を促進するために、古い埋立地に強制通気を行うことが行われている。Heyer ら¹⁵⁾は底部ライナーのない埋立地（埋立面積 3.2ha）内に空気圧入管、ガス抽出管を打ち込み（供給-抽出は交互に切り替える）、埋立地全体（landfill body）の完全な好気化を図っている。埋立終了から 14 年が経過しており、2001 年から運転を開始したところ、2 年後もガス発生が続き、温度が 50～60℃と高く、さらに 1 年エアレーションを継続する¹⁶⁾と報告している。Cossu ら¹⁷⁾は高速鉄道建設のため廃棄物を取り除く必要があり、バイオガスと浸出水発生の問題を解決するため、やはり現場でのエアレーションを行った。

これらは埋立終了後の好気性化であるが、埋立を好氣的雰囲気として安定化を促進する試みもある。Hudgins ら¹⁸⁾は PVC 製のパイプを挿入し、通気とともに水分を供給して廃棄物をコンポスト化し、掘り起こして埋立物より有価物を回収し、埋立地を再利用することを提案している。Aerobic landfill(好氣的埋立)→Landfill Mining(廃棄物掘り起こし)→Recycling(有価物回収)→Reuse of landfill space(埋立空間の再利用)を 4 年サイクル繰り返すもので、Sustainable Landfill と呼んでいる。埋立地自体を堆肥化装置とするものと見なすことができる。

Cossu¹⁹⁾はわが国の準好気性埋立に注目し、MBP と準好気性を組み合わせた実験を行っている。PAF (Pretreated Aerobic Flushing) モデルと呼んでいる。Flushing とは水分流動による洗い出しのことで、特にアンモニア、無機イオンの低減が目的であり、通常の Bioreactor のうち洗い出しも同時に目的としているものは Flushing Bioreactor と呼ばれている²⁰⁾²¹⁾。

「欧米の埋立地は嫌気性であり、わが国が準好気性を標準としているのとは大きな違いがある」というのが一般的理解であると思われる。しかし、この節で述べたように好気性の長所が注目され、欧米の埋立も好気性化を目指す方向に変わりつつある。2 で述べたバイオリアクターは当初は生物分解、メタンガス回収の効率化を目指したものであったが、現在では水分に次いで嫌気/好気状態が重要なパラメータあるとし、EPA は好氣的、嫌氣的、ハイブリッド（好気-嫌気）の 3 種類に分類している。ハイブリッドとは好気、嫌気を切り替えるもので、Reinhart ら²²⁾は、「短時間の好気化によって温度を上げて嫌気分解を促進する、嫌気分解後の余剰水分を除く、硝化・脱窒を促進する、などの利点がある」と述べている。SWANA は、バイオリアクターを「廃棄物の生物学的安定化を促進するために、廃棄物層への水分あるいは空気供給を制御する埋立地」と定義している⁷⁾。

5. まとめ

本稿の最初に引用した Stegmann¹⁾は、埋立地を持続可能とするための前処理からアフターケアまでを、図 3 のように描いている。この図には、2、3、4 で紹介した安定化のための戦略が、すべて含まれている。すなわち、左が米国の Bioreactor、中が EU の MBP 埋立、そして右が可燃物（あるいは混合ごみ）の焼却であり、右に行くほど廃棄物は無機物的状態となり、安定化度合いが高まる。3 で述べたように、

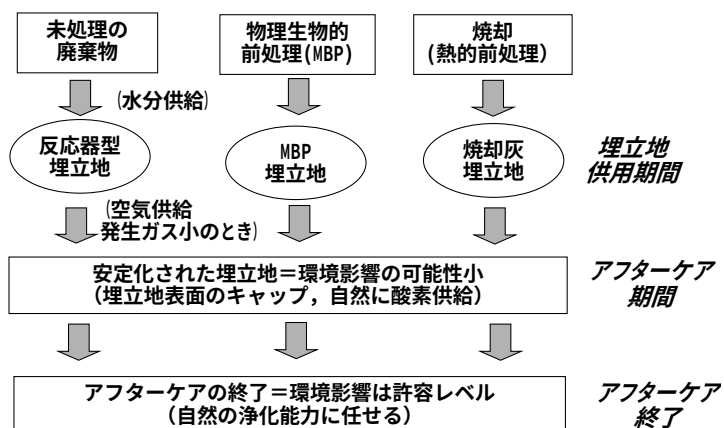


図3 持続可能な埋立地のための前処理からアフターケアまで
(文献 1)の図を和訳・修正)

EU は長期的には焼却に移行すると予想され、北米の Bioreactor との両極化が進むかもしれない。わが国の状況を図3と較べると、①日本は、すでにEUの動きを先取りしており、最近はより完全な無機化、すなわち溶融処理も現実的な方法となっている。②MBPは混合ごみに対してこそ必要であり、日本は一般的に処理以前に分別されている（MBPの必要がない）。③準好気性は日本のオリジナルであり、欧米に先立つ豊富な知見がある、と言えるだろう。

しかし一方では、①しかし、溶融スラグは資源化が目的で、やむを得ず埋め立てる場合がある。②家庭系ごみについては確かに分別が進んでいるが、事業系を含めれば有機物量は依然として多い。③不燃物、焼却残渣中心の埋立地をどのように運転・管理すべきか、定まった知見がない。といった問題もある。持続可能な埋立戦略（日本版）を、しっかりとしたデータと考え方にもとづいて立てる必要がある。

参考文献

- 1) R.Stegmann, K.-U.Heyer, K.Hupe : Discussion of Criteria for the Completion of Landfill Aftercare, Sardinia 2003
- 2) H.D.Sharma, S.P.Lewis: Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills, John Wiley & Sons, p.9, 1994.
- 3) A.Bagchi: Design, Construction and Monitoring of Landfills (2nd Ed.), John Wiley & Sons, pp.116-118(Final cover), pp.266-291(monitored), 1994.
- 4) P.R.O'Leary & P.Walsh: The problems of long-term post-closure landfill care –Is 30 years long enough?, Waste Management World, July-August 2003, pp.87-94.
- 5) Department of Environmental Protection: Chapter 62-701 (Solid Waste Management Facilities), 620 Long-Term Care
- 6) D.R.Reinhart, T.G.Townend: Landfill Bioreactor Design and Operation, Lewis Publishers, p.3, 1998
- 7) Office of Solid Waste: Bioreactors, U.S.EPA ホームページ
- 8) A.Simard, J.Norstorm, H.Bourque: Construction, Operation and Monitoring of a Bioreactor Landfill in Sainte-Sophie, Quebec, Canada, Sardinia 2003.
- 9) R.Cossu, R.Raga and E.Rocchetto : Co-Disposal In Landfill Of Mechanical Biological And Thermal Pretreated Waste: Lab Scale Tests, Sardinia 2003.
- 10) K. Soyez And S. Plickert: Material Flux Management Of Waste By Mechanical-Biological Pre-Treatment, Sardinia 2003.
- 11) R.Cossu, R.Raga, V.Vascellari: Comparison of Different Stability Criteria For MBP Waste in View of Landfilling, Sardinia 99, pp.1473-478, 1999.
- 12) E.Binner, A.Zac, P.Lechner: Test Methods Describing the Biological Reactivity of Pretreated Residual Wastes, Sardinia 99, pp.1465-472.
- 13) P.H.Brunner 談話：東條安匡氏によるヒアリング
- 14) K. Soyez And S. Plickert : Material Flux Management Of Waste By Mechanical-Biological Pre-Treatment, Sardinia 2003.
- 15) K.U.Heyer, K.Hupe, J.Heerenklage, M.Ritzkowski, F.Dalheimer, R.Stegmann: Aeration of Old Landfills as an Innovative Method of Process Enhancement and Remediation, Sardinia 99, pp.IV563-571.
- 16) M. Ritzkowski, K.-U. Heyer and R. Stegmann : In Situ Aeration of Old Landfills: Carbon Balances, Temperatures and Settlements, Sardinia 2003
- 17) R.Cossu, R. Raga and D.Rossetti: Full Scale Application Of In Situ Aerobic Stabilization of Old Landfills, Sardinia 2003
- 18) M.Hudgins: Cost-Benefit Analysis of Aerobic Landfills and Their Potential Impact on MSW Sustainability, Intercontinental Landfill Research Symposium (ICLRS 2002), Asheville, 2002
- 19) R.Cossu, R.Raga and D.Rossetti: Experimental Reduction of Landfill Emissions Based on Different Concepts. The PAF Model, Sardinia 2001, pp.I219-230.
- 20) M.Karnik and C.Parry: Cost Implications of Operating Landfills as Flushing Bioreactors, Sardinia 97, pp.419-425.
- 21) A.N.Walker, R.P.Beaven, W.Powrie: Overcoming Problems in the Development of a High Rate Flushing Bioreactor Landfill, Sardinia 97, pp.397-408.
- 22) D.R.Reinhart, P.T.McCreanor, T.Townsent: The Bioreactor Landfill: Its Status and Future, Waste Management & Research, 20, pp.172-186, 2002