

堆肥化



都市廃棄物の中間処理技術に関するCCETガイドラインシリーズ： 堆肥化

著者

河井紘輔 (国立環境研究所：NIES)、
劉晨 (地球環境戦略研究機関：IGES)、
Premakumara Jagath Dickella Gamaralalage (IGES)

翻訳監修：小野川和延

CCETガイドラインシリーズのプロジェクト管理

小野川和延 (IGES)、堀田康彦 (IGES)、
Keith Alverson (UNEP IETC)、本多俊一 (UNEP IETC)、
ディリー美里 (UNEP IETC)

査読者

廃棄物資源循環学会 (JSMCWM) 会員：
中崎清彦 (東京工業大学)、岩渕和則 (北海道大学)、
間藤徹 (京都大学)

その他の外部レビュアー：Soumya Chaturvedula (ICLEI -
持続可能な都市と地域をめざす自治体協議会南アジア)、
Ritu Thakur (ICLEI南アジア)、Achu Sekhar (ICLEI南アジア)、
Anurudda Karunarathna (ペラデニヤ大学)、Thilini Rajapaksha
(ペラデニヤ大学)

謝辞

本ガイドラインは、日本政府の財政的支援のもと、UNEP
IETCおよび廃棄物資源循環学会 (JSMCWM) の協力を得て、
IGES-UNEP環境技術連携センター (CCET) が作成したもの
である。著者とプロジェクトチームは、本ガイドラインの実
現に向けて貴重な貢献をしてくださった関係者の皆様に感
謝します。

著作権

© 国連環境計画、2020

本書は、教育または非営利目的であれば、著作権者の特別
な許可なく、出典を明記した上で、全体または一部をいか
なる形で複製することができる。なお、国連環境計画は、
本書を出典として使用するあらゆる出版物の写しを受領す
ることを希望する。

国連環境計画の書面による事前許可なしに、本書を転売ま
たはその他の商業目的で使用することはできない。

免責事項

本書で使用されている名称と資料の表示は、いずれかの
国、領土、都市、地域、またはその当局の法的地位に関して、
あるいはその国境や境界線の画定に関して、国連環境計画
側のいかなる意見も表明するものではない。また、述べら
れている見解は、必ずしも国連環境計画としての決定や表
明された方針を示すものではなく、商品名や商業プロセス
の引用もそれらの推奨を意味するものではない。

国際環境技術センター (UNEP/IETC) は、開発途上国と協力
して、環境問題に対する持続可能な解決策を実施しており、
特に全体的な廃棄物処理に重点を置いて活動している。



都市廃棄物の中間処理技術に関するCCETガイドラインシリーズ：
堆肥化

2020年8月

目次

略語一覧	ii
この堆肥化ガイドラインについて	iii
1. はじめに	1
1.1 堆肥化の目的	1
1.2 堆肥化の利点	1
1.3 開発途上国の都市にとっての可能性と課題	4
2. 持続可能な堆肥化のための前提条件	5
2.1 社会情勢	7
2.2 市民の理解と住民の協力	9
2.3 制度・組織的側面	11
2.4 行政的側面	12
2.5 財務的側面	13
2.6 技術的側面	14
3. 主な技術と堆肥化プロセス	17
3.1 堆肥化に適した廃棄物	17
3.2 堆肥化システムの種類	19
3.3 発酵	21
3.4 機械的選別	21
3.5 脱臭	22
4. ケーススタディ	23
4.1 スラバヤ市（インドネシア）	23
4.2 クリヤピティヤ市政局（スリランカ）	26
4.3 ハノイ市（ベトナム）	31
4.4 長井市	32
5. 結論と提言	35
参考文献	36
CCETガイドラインシリーズについて	38

略語一覧

BOD	Biochemical Oxygen Demand	生物化学的酸素要求量
GHGs	Greenhouse Gases	温室効果ガス
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
JOCVs	Japan Overseas Cooperation Volunteers	青年海外協力隊
KITA	Kitakyushu International Techno-cooperative Association	北九州国際技術協力協会
KUC	Kuliyapitiya Urban Council	クリヤピティヤ市政局
MSW	Municipal Solid Waste	都市廃棄物
NSWMSC	National Solid Waste Management Support Center	全国廃棄物処理支援センター
NVQ	National Vocational Training	全国職業訓練
PKK	Pemberdayaan Dan Kesejahteraan Keluarga	家族福祉運動
RTs	Rukun Tetangga	近隣住区
URENCO	Urban Environment Company	都市環境公社
VOCs	Volatile Organic Compounds	揮発性有機化合物

この堆肥化ガイドラインについて

本ガイドラインの対象者と目的

本ガイドラインは、アジアの開発途上国の都市を対象に、有機性廃棄物の発生源での分別と、都市廃棄物処理施設における好気性発酵による堆肥化の活用を図ることに焦点を当てている¹。

またこのガイドラインは、堆肥化の妥当性を検討するための技術的知見をほとんど、あるいは一切持っていない地方の政策立案者や意思決定者を対象に、廃棄物処理の改善に向けての適切な戦略の選択肢としての堆肥化の導入について、その実現可能性の評価を支援することを目的としている。

このガイドラインは、

- (1) 堆肥化についてその長所と短所、および持続可能な堆肥化の立案のための技術的および非技術的側面について必要となる諸条件を始めとする堆肥システムの全体像を説明し、
- (2) 堆肥化プロジェクトの導入可能性を検討するに際して、その目的に則った基準を決定し、評価するための重要な判断基準と事前の検討の流れを提案する、ものである。

廃棄物処理のヒエラルキーにおける堆肥化の位置付け

堆肥化の導入は、廃棄物の発生の防止、再利用、リサイクル、資源回収そして廃棄という廃棄物処理の優先順位/ヒエラルキー (Pires他 2019) に則って行われる必要がある(図1)。食品の過剰製造は、フードサプライチェーンのあらゆる時点で防止および最小化されるべ

きで、非食用食品や賞味期限切れの食品は、飼料として再利用されるべきである (Teigiserova et al., 2020)。食品廃棄物、剪定枝、豚の糞、下水汚泥などの有機性廃棄物を処理する技術としては、**堆肥化、嫌気性消化(AD)、焼却、埋立**などの選択肢がある。堆肥化は一般的にはヒエラルキーの中でリサイクルに分類されるが、環境への影響を軽減し、持続可能な社会の構築に向けて前進する上で、**有機性廃棄物処理のための最も望ましい技術選択肢となり得るものである**。

堆肥化は、都市廃棄物処理システムを機能させる上での多くの要素の一つに過ぎない。堆肥化施設だけで既存の廃棄物問題を解決することはできず、**堆肥化を妥当な技術として選択するかどうかの判断は、それぞれの都市や国の総合的な都市廃棄物処理計画に則って行われなければならない**。

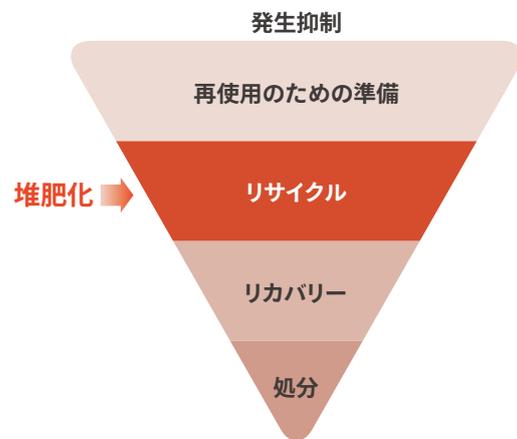


図1 持続可能な廃棄物処理のためのヒエラルキー
(出典：EU廃棄物枠組指令²)

1 CCETガイドラインにおいては、「先進国」と「開発途上国」という用語は、世界銀行が2016年に発表した「世界開発指標」レポートでの分類に従って経済圏を定義するために使用されている。「先進国」という用語が高所得の国や地域を指すのに対し、「開発途上国」という用語には、低所得、低中所得、および高中所得の国や地域が含まれる。

2 EU廃棄物枠組指令 (廃棄物に関する指令2008/98/EC) : https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en

本ガイドラインの考え方と構成

本ガイドラインは主に、利用可能な文献に加え、日本およびアジア諸国における堆肥化プロジェクトの専門知識と実践経験のレビューに基づいて作成されたものである。本ガイドラインは、(1) 発生源での分別の重要性と、(2) 堆肥化プロジェクトに持続性を持たせるためにはまず堆肥に対する需要が存在することの重要性を指摘している。ガイドラインは4章から構成されており、第1章、「はじめに」では、堆肥化の目的やメリットなどの基本的情報を紹介し、第2章、「[持続可能な堆肥化のための前提条件](#)」では、堆肥化プロジェクトを計画する際に必要となる主要な評価基準について説明するとともに、併せて持続可能な堆肥化のための事前チェックの流れを紹介している。主要な評価基準には、技術的なものだけでなく、社会情勢、市民の意識と住民の協力、制度・組織的側面、行政的側面、財務的側面など、非技術的なものも含まれる。第3章は、「[主な技術と堆肥化のプロセス](#)」、であり、堆肥化に適した廃棄物の種類、集中型および分散型のシステム、および堆肥化の主な技術的プロセスについて手短かに紹介している。第4章は、「[ケーススタディ](#)」、として、先進国と開発途上国の双方から堆肥化プロジェクトの実例を取り上げ、失敗したプロジェクトを含め、参考になる教訓を紹介している。結論においては、堆肥化プロジェクトについての著者の提言を紹介してまとめとした。

本ガイドラインでは、「**堆肥化**」、「**堆肥化システム**」、「**堆肥化プロジェクト**」を、それぞれ別に定義している。堆肥化とは、原料の受け入れから堆肥の製造までの一連の技術的プロセスを指す。**堆肥化システム**はより広範囲な視点をカバーするものであり、発生源での分別、有機性廃棄物の収集と堆肥の利用などが施設のプロセスに加えて対象とされている。**堆肥化プロジェクト**とは堆肥化システムの計画、プラントの建設と運転、需要の確保などといった一連の業務を指して使われている。

なお本ガイドラインでは、廃棄物を単に生物学的に乾燥させて、最終的には投棄したり、埋立地の覆土として使用したりするバイオドライング技術はここでの対象とはしていない。

時間のない読者のために

時間のない読者は、[第1章](#)に目を通すことで、堆肥化の一般的な知見を得ることができる。堆肥化プロジェクトの導入可能性を検討している読者は、[6ページの図3](#)を参考に、計画の初期段階でクリアしておかなければならない条件を確認してほしい。堆肥化プロジェクトに関わる技術の詳細については、[第3章](#)で紹介している。

1 はじめに

1.1 堆肥化の目的

農作業において、農薬や化学肥料が過剰に使用されるようになったことで、廃棄物由来の有機肥料である堆肥の役割は、影が薄くなっている。農地で堆肥が使われず、化学肥料に依存してきたことで、土質の劣化、栄養不足や過多、病害虫の発生、土壌の固化といった多くの好ましくない影響がもたらされている。しかし、**日常生活で発生する有機性廃棄物は、それが堆肥製造に利用されれば、土壌の肥沃性を取り戻すうえで役に立つ。**

国連食糧農業機関の報告(2011年)によると、世界中で生産される食料の約3分の1が廃棄されたり、無駄になったりしており、その量は年間およそ13億トンという驚異的な数字に昇る。食品廃棄物は都市廃棄物のかなりの部分を占めており(Kawai et al., 2016)、多量の水分を含んでいる。開発途上国における未処理の都市廃棄物は、主に非衛生型の埋立地やごみ投棄場に捨てられており、食品廃棄物が嫌気状態で分解されることにより、メタン(CH₄)の発生源となる。さらに、有機性廃棄物を埋立地に直接投棄すると、周辺地域に腐敗臭が漂い、生物化学的酸素要求量(BOD)の濃度が高い浸出水が発生する。

有機性廃棄物、特に食品廃棄物は、生物由来の物質であり、自然に分解する。有機性廃棄物が埋立地に投棄されずに適切に処理されれば温室効果ガスの発生が抑えられるだけでなく、臭気、害虫、水質の悪化、火災や煙、埋立地に廃棄物を輸送する車両から発生する汚染など、様々な環境問題を軽減することができる。**堆肥化、つまり有機物を水、二酸化炭素、エネルギー、および堆肥化物に転換する生分解プロセス(Bagchi, 2004; IPCC, 2006)は、有機物の残渣を安定化させる技**

術として、長年にわたり世界中で採用されてきた(Diaz et al., 2007)。有機性廃棄物を堆肥化してできた堆肥は、化学肥料の部分的代替品として機能する(Nakakubo et al., 2012)。

堆肥は土壌改良剤として有効である。農家が化学肥料を使う期間が長ければ長いほど、農地の土壌の質は劣化する。堆肥は、持続可能な農業を行うために必須となる良好な土壌環境の回復のために使用できる。

堆肥化は、以下の目的で行われる。

- (1) 食品廃棄物、園芸廃棄物、家畜の排泄物などの**有機性廃棄物**を、好気性または嫌気性の状態で**処理し**、微生物の発酵熱によって、**有害なバクテリア、ウイルス、雑草の種子を不活性化**する。
- (2) 土壌環境を物理的に改善するとともに、現代の農業が全面的に依存している化学肥料に含まれる、窒素、リン、カリウムなどの栄養素の部分的代替品となる**有機肥料を生成**する。

1.2 堆肥化の利点

堆肥化には、**不適切な廃棄物処理による環境への悪影響の軽減と、土壌環境の改善という2つの重要な利点がある**。しかし、堆肥化システムが有効に機能しなければ、堆肥化にもいくつかの**デメリット**がある。同様に、技術、環境、温室効果ガス(GHG)排出量、資源、および社会全体の観点から、将来性のある習慣として堆肥化を導入するためには、いくつかの**要件**を満たす必要がある(表1)。

表1 堆肥化の主なメリット、デメリット、要件

	メリット	デメリット	要件
技術	<p>堆肥化は、極寒の地域を除き、ほぼすべての地域で実施できる。現地の好気性菌、放線菌類、真菌が、有機性廃棄物の分解と堆肥の生産において主要な役割を果たす。</p> <p>堆肥化は、焼却などの他の処理技術よりもシンプルな設備で可能である。また、堆肥化は、家庭での実施や分散処理型での実施から、大規模な集中処理型施設での実施まで、様々な規模で適用できる。</p>	<p>嫌気状態で不適切な発酵を行うと、処理が遅れ、堆肥の質が低下し、不快な臭気が生じる。プラスチックやガラスなどの汚染物質を除去する装置の性能が悪い場合、堆肥の需要が著しく低下する。</p>	<p>プラスチック、紙、ガラス、金属などの異物を、機械的に、または手作業で、可能な限り多く取り除くための適切なプロセスを導入しておく必要がある。異物の混入を避けるためには発生源での分別が必要である。好気性発酵プロセスでは、含水率、温度、酸素供給量、pH、C/N比、粒径、および圧縮度を、適切な範囲に維持する必要がある。</p>
環境	<p>堆肥化施設で有機性廃棄物を処理することにより、臭気、害虫、火災など、埋立地やその周辺地域での環境への悪影響を軽減または排除できる。</p>	<p>施設の設計が適切でなく、処理が適切あるいは効率的に行われなかった場合に臭気を発生させる。アンモニア、硫化水素、メチルメルカプタン、アセトアルデヒドの混合物が、臭気の原因となる。</p> <p>堆肥化施設の内部や周辺では、ハエ等の害虫が繁殖することがある。堆肥化の過程で除去された異物や残渣を不適切に投棄すると、環境に悪影響を及ぼす可能性がある。</p>	<p>事業者は、堆肥化施設の脱臭のための措置を講じる必要がある。</p> <p>発酵プロセス中の温度は、ハエの卵や幼虫を破壊するために、50~55℃以上にすることが必要である。二重扉にすることで、ハエの成虫が施設内に侵入するのを防ぐことができる。</p>
温室効果ガス排出量	<p>埋立地からのCH₄ガス排出量を削減できる。発酵プロセスは好気状態で行われるため、埋立と比較してCH₄ガスの排出量が大幅に削減される。堆肥化によって、温室効果ガス排出量が多いとされる化学肥料の必要量を減らすことができる。</p>	<p>好気性発酵プロセスでは、一定量のCH₄と亜酸化窒素(N₂O)ガスが発生する。2006年温室効果ガス目録のためのIPCCガイドラインでは、CH₄とN₂Oの排出係数は、それぞれ10kg-CH₄/t、0.6kg-N₂O/tとなっている(乾燥ベース)。</p>	<p>堆肥化では、発酵プロセスの好気条件を維持し、温室効果ガスの排出を避けるために、定期的に廃棄物の切り返しや曝気が必要となる。</p>
経済的影響	<p>分散型の堆肥化では、運搬コストや運営コストを削減できる。堆肥化施設は、焼却施設よりも建設・運転コストが低い。堆肥は、地域の農業、食品産業、観光産業を強化することができる。</p>	<p>事業者は、堆肥化施設建設用地とアクセス道路を確保しなければならない。事業者が臭気の管理に真剣に取り組むほど、脱臭プロセスへの投資とその維持のために、より多くのコストがかかる。</p>	<p>自治体や関係者は、廃棄物処理以外にも、土壌改良剤を製造することで得られるメリットがあることを認識すべきである。建設・運営コストをカバーすると共に、保守のための予算を確保する必要がある。自治体が堆肥化プロジェクトを立ち上げる際は、補助金や融資を受けられる場合がある。</p>
リソースの観点	<p>堆肥は土壌環境を、生物学的、物理的、化学的に改善することができ、持続可能な農業の実現に貢献する。</p>	<p>有機性廃棄物を原料とした堆肥は、十分な栄養分を含んでいない場合や、化学肥料の完全な代替とはならない場合がある。一部の栄養素は化学的に添加しなければならない。</p>	<p>地元の農家が堆肥利用の農地への有効性をよく理解した上でそれを使用するような動機付けが必要である。</p> <p>自治体や住民は、街路樹やガーデニングなど、堆肥の様々な用途を知っておくと良い。</p>
社会的側面、その他	<p>コミュニティレベルでの発生源での分別プロジェクトや分散型堆肥化プロジェクトは、社会的ネットワークとコミュニティ参加の発展と強化、および地域の環境問題に対する意識の向上につながる。</p>	<p>都市部の住民は、意識やモチベーションの低さから、発生源における食品廃棄物の分別に参加する可能性は低い。さらに都市部では、堆肥化施設の建設に適した場所を探すのは困難である。</p>	<p>すべての関係者は、堆肥の有効性を認識した上で堆肥化プロジェクトへ参加するような動機付けが必要である。プロジェクトを強化・充実させるために、新たな法制度が必要になる場合もある。堆肥化プロジェクトは、住民、自治体、農家など、すべての関係者にとって有益なものであるべきである。</p>

1.2.1 不適切な廃棄物処理から生じる 環境への悪影響の軽減

堆肥化は、廃棄物のオープンダンピングや埋立地での不適切な処分から生じる環境への悪影響を軽減することができる。多くの開発途上国はその建設及び運営が安く済むことから都市廃棄物の処理を単純な処分や非管理型の埋め立てに全面的に依存している。しかしながら、未処理の有機性廃棄物をそのまま埋立地に処分することはその地域及び地球全体の双方の視点から環境上の問題をもたらすことは議論の余地がない。有機性廃棄物をオープンダンピングしたり埋立地に不適切に投棄すると温室効果ガスが排出され、発生したBOD値の高い浸出水を処理しなければ、地下水や河川が汚染される。このような都市廃棄物の不適切な埋立はまた、処分場での火災や臭気、害虫の発生にもつながるものである。都市廃棄物は、環境への深刻な影響を避けるために、埋立前に適切に処理しなければならないが、**堆肥化は、埋立地に直接運び込まれる有機性廃棄物の量を低減する上で利用可能な最善の選択肢の一つである。**

1.2.2 土壌環境の改善

気候、地理、生態系の影響を受けて土壌が形成されるには、長い時間を要する。土壌は、岩、石、粘土、砂、火山灰、動植物の残渣などから成る有機成分と無機成分の混合物であり、様々な大きさの粒子を含んで、水分と空気の気泡体構造を持っている。土壌は、固相、液相、気相の3つの相に分けられる(図2)。固相の土壌は、物理的に植物の根を支え、栄養の供給を調整する。液相では、水と栄養分を根に供給する。気相の土壌は、酸素を根に供給する。**三相のバランスが作物の生育に大きく影響するが、固相率が40%前後の土壌が耕作に適しているとされている。**土壌は、固相が50%になると極端に硬くなり、30%では軟らかすぎる(日本土壌協会、2014)。

粘土が多くなると保水機能は大きくなるが、排水機能は低くなる。逆に、砂の割合が多い土壌は、排水力は高くなるが、保水力は低くなる。耕作に適した土壌とは、保水性と排水性、栄養分の保持力、および通気性を兼ね備えたものである。土壌がこうした能力を持つためには、粘土と砂が適度に混ざり合っ、かつ重要な要素として、腐葉土からなる塊状の構造をもっていることが必要である。

有機物は絶えず供給され、また土壌中で分解されている。有機物の中には、完全には分解されずに腐植土と呼ばれる複雑な組成・構造で土壌中に残るものもある。腐植土は土壌の保水と排水の機能を高め、栄養を蓄え、通気し、pHの緩衝材として働く。また、腐植土にはオーキシシンやサイトカイニンなどの成長ホルモンが含まれており、植物の成長を促し、結果として根の量を増やす。堆肥は、窒素、リン、カリウムの供給という点で、化学肥料を部分的に代替することができる。さらに重要なこととして、食品廃棄物由来の堆肥は人工的には生成されることのない腐植土のもととなり(Hermann et al. 2011)、上述したとおり様々なメリットを持つとともに持続可能な土壌管理と食品リサイクルシステムの形成に貢献する。

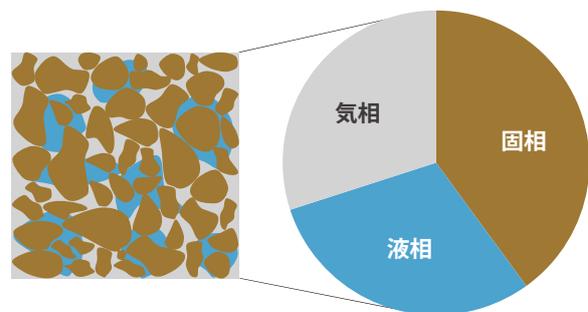


図2 土壌の三相

固相率が40%前後の土壌が耕作に適している。気相と液相の土壌における割合は、乾燥状態に応じて変化する。

Box 1 日本における堆肥の生産と使用の歴史

岩田ら(2001)は、日本の農業と有機肥料の使用に関する歴史的な視点を紹介している。江戸時代の農業では、広葉樹の萌芽や葉、野草、動物の糞尿、尿尿などを堆肥化したものが主な肥料として使用されていた。当時の農家は、煮干しや油かす、大豆かすなどの高価な肥料を購う余裕がなかったことから、このような肥料を使用していたのである。肥料を作るために、ヒトの尿尿が丹念に集められており、農家の人々は朝から農産物を荷車に積んで街を回り、夕方には集めた尿尿を持って農村に帰ってきた。こうした都市部と農村部の資源循環は、明治時代まで続いた。しかしながら、大正時代に都市部の人口が増加したことで、尿尿が過剰に供給されるようになり、都市部と農村部との間の物質循環は崩壊した。農家は、木の葉や枝、動物の糞尿を使って自作した有機肥料を主に使用していたが、油かすや煮干し、化学肥料を購入する農家も見られるようになってきた。

Fujita (1993)によると、第二次世界大戦後の10年間で日本では都市廃棄物処理のための堆肥施設の数に30に増え、ダノ式システム(Dziejowski et al., 2002)などのヨーロッパの技術が利用されていた。しかし、こうしたヨーロッパの堆肥化技術は含水率の低いヨーロッパの廃棄物向けに開発されたもので

あったため、含水率の高い日本の都市廃棄物には適していなかった。日本の一部の施設では、新聞紙などの紙ごみを食品廃棄物に混ぜて、含水率を減らしていた。1970年代までには、ほとんどの堆肥化施設は姿を消し、焼却が日本の都市廃棄物を処理するための代表的な技術となった。1980年代になると下水汚泥、家畜の糞尿、及び農業廃棄物を処理するための堆肥化施設数が増加したことにより堆肥化は再度日の目を見ることとなるが、2018年現在、堆肥化施設に搬入される都市廃棄物は、全体の0.5%に過ぎない。現時点では、日本全国には、約100カ所の一般廃棄物を対象とした堆肥化施設が存在する。

農地に堆肥が使用されてきた日本の長い歴史の中で、窒素、カリウム、リン、腐植などの栄養分が土壌に供給され、それが土壌中の微生物の繁殖を促し、排水性と保水性のバランスが保たれ、化学的な緩衝材としての役割を果たしてきた。日本の堆肥化は、有機性廃棄物の発生源での分別の原則に基づいて確立されている。最近では、堆肥化施設で処理される都市廃棄物の量は限られてはいるものの、堆肥化プロジェクトへの参加を求められている住民は、堆肥化のための良質な材料を提供するべく、積極的に有機性廃棄物を発生源で分別し、排出している。

1.3 開発途上国の都市にとっての可能性と課題

近年、東南アジアをはじめとする開発途上国では、人口増加や都市化、ライフスタイルの変化などにより、都市部を中心として廃棄物の発生量が急激に増加している。その結果として埋立地がひっ迫するにつれ、廃棄物量の削減を図ることを目的に堆肥化施設などの中間処理施設の重要性が増してきている。集約型の堆肥化は、以下の条件の全部または大部分を満たす都市や地域であれば、問題なく適用することができる。

- (1) 埋立に代わる代替処理システムを求めていること
- (2) 堆肥化のための良質な原料を分別収集できること
- (3) 堆肥の需要が十分にあること
- (4) 堆肥化施設を長期的に運営するための適切な規模の予算を確保できること
- (5) 持続可能な堆肥化プロジェクトの立案及び実施のための適切な人材と実施体制を持っていること

2 持続可能な堆肥化のための前提条件

堆肥化プロジェクトを成功させるためには、様々な条件が整っている必要がある。意思決定者向けのガイド (Rand et al., 2000; Kamuk, 2013; Mutz et al., 2017) によれば、**主たる評価基準は、「社会情勢」、「市民の意識と住民の協力」、「制度・組織的側面」、「行政的側面」、「財務的側面」、「技術的側面」の6つの視点から成り立っている。**計画の初期段階では、この6つの視点と対象事案ごとの相対的な評価基準を踏まえつつ、図3に示す改訂版の事前検討のためのフローチャートを利用して検討することができる。この重要な評価基準と事前検討のためのフローチャートは、堆肥化プロジェクトに必要となる条件を地方自治体が準備できるかどうかについて詳細な検討を行う際に、意思決定者及び政策立案者を支援する目的で準備されたものである。

重要な評価基準は、(1) **必須の要件 (ピンクで示す)**、(2) **強く推奨される要件 (黄色で示す)**、(3) **望ましい要件 (緑で示す)** の3つのグループに分類されている。評価基準が満たされている場合は、矢印に従って次のステップに進む。基準が満たされていない場合は、次の手続きをとることを提言する。

- (1) **必須の要件**が満たされていない場合は、**堆肥化プロジェクトの導入はまだ時期尚早である。**評価を中断するか、状況を改善した後で再評価を行うことを強く推奨する。
- (2) 強く推奨される要件が満たされていない場合は、**支援策を導入するか、代替案を検討する。**
- (3) 望ましい要件が満たされていない場合は、**堆肥化プロジェクトの実施にはリスクが伴うため、注意が必要である。**

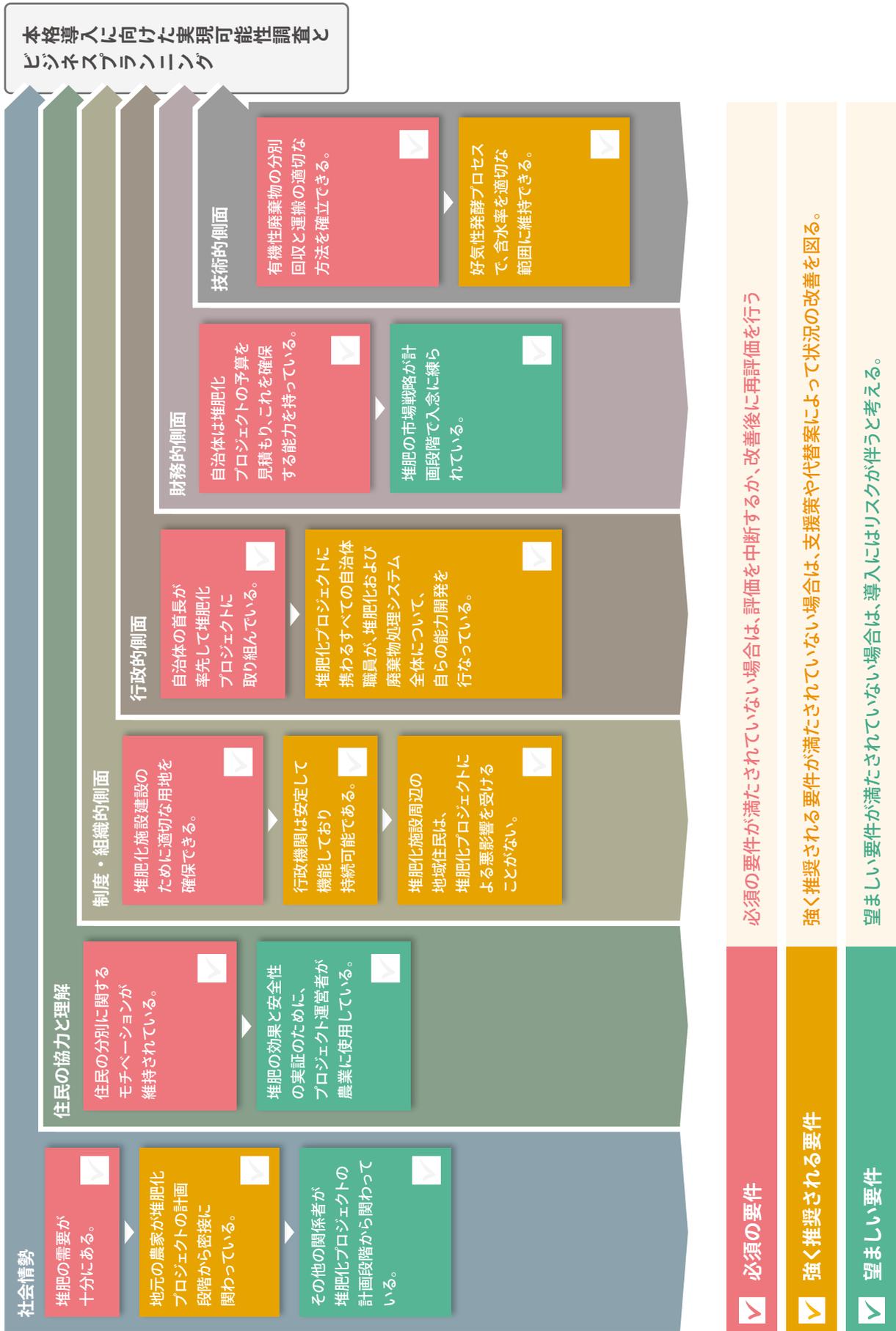


図3 計画の初期段階で行うべき事前チェックフロー

Box 2 堆肥化プロジェクトの各段階

堆肥化プロジェクトの進展につれ、関係者の種類や人数、地理的な境界、堆肥化の技術の変更などが起こりうる。プロジェクトの進行は、計画段階、設置・運用段階、アップグレード段階の、3段階に分けられ（田崎ら、2016）、現地の状況に応じて、各段階に数カ月から数年を要する。

計画段階

計画段階では、自治体が地元の関心度を評価し、計画の策定を開始する。検討事項としては、堆肥化システムのタイプと利用する技術、原料として収集される廃棄物の量、堆肥化のための廃棄物を収集する車両の数と能力、堆肥化施設の容量、初期コスト及び運転コスト、年間当たり生産される堆肥の質と量、堆肥に対する地元の需要量、その他計画に含むべき関連する事項、がある。もし堆肥化プロジェクトが有機性廃棄物の発生源での分別を前提とするものであれば、発生源での分別の実現可能性（FS）をこの段階で検討する。発生源での分別に関するFSは、まずは小規模な地域から始めて、その後対象地域を拡大していくべきである。

設置・運用段階

この段階では、自治体が堆肥化プロジェクトの実現

可能性の評価と計画策定を完了しており、堆肥化が環境負荷低減のための解決策の1つとして位置づけられている。続いて、自治体は堆肥化施設の設計、建設、運営のための予算を確保しなければならない。通常は自治体が民間企業と契約を結び、堆肥化施設の設計・建設を行う。自治体が施設を運営している場合もあれば、民間業者に委託している場合もある。

堆肥化に適した廃棄物が回収され、堆肥化施設に運ばれてくる。生産された堆肥は、地元の農家や住民などのユーザーに配布される。

アップグレード段階

堆肥化が、廃棄物処理という一面だけにフォーカスした枠組みを超え、地域の農業ビジネスの強化を重視したものに变化していく。地元の農家は、有機性廃棄物から作られた堆肥を使って農地での野菜の栽培方法を改善し、作物の品質が向上して地元の市場で販売したり、レストランで利用されたりするようになる。このように品質が向上することで、市場や地元のレストランはより多くの顧客を獲得することができ、フードサプライチェーンにおけるリサイクルの輪が出来上がってくる。

2.1 社会情勢

☑ 必須の要件

堆肥の需要が十分にあること。

生産された堆肥に対する十分な需要が存在することは、堆肥化施設の運営を成功させるための前提条件である。しかしながら、人口密度の高い地域では農地が少ないため、十分なレベルの堆肥需要を確保することは難しい。**堆肥化施設は、十分な農地がある地域に近い場所に設置されるように計画されなければならない。**それが難しい場合、堆肥化事業者は既存の肥料会社と連携したり、新たなビジネスネットワークを構築したりすることを通じて、生産された堆肥の需要を確保する必要がある。その上で、処理される廃棄物の量、供給される堆肥の量、および消費される堆肥の量の間の

バランスを慎重に見積もり、検証することがこの計画段階でなされなければならない。

通常、年間で1m²あたり1kgの堆肥が農地で使用される。換言すれば、年間10,000トンの堆肥を生産する場合、生産した堆肥がすべて使われるようにするためには最低でも10,000,000m²（=1,000ヘクタール）の農地を確保する必要がある。堆肥化施設は、日常的な堆肥の供給を確実にするために、広大な農地のある地域の近くに設置する必要があるが、一方で、堆肥を使用したがない農家も一定の割合で存在することも考慮しておかなければならない。

また、需要は季節によって変動し、農地への散布も年に2~3回に限られるため、施設には堆肥の貯蔵庫を設置しておく必要がある。農家だけでなく住民の中にも家庭菜園用の堆肥を欲しがっている人がいる場合もあり(図4)、また都市でも、公共の庭園や公園、行政施設などで、堆肥を優先的に使用する場合がある。



図4 住民に配布するために5kgのポリ袋に詰められた堆肥(大崎町)

✓ 強く推奨される要件

地元の農家が堆肥化プロジェクトの計画段階から密接に関わっていること。

堆肥の利用者は、堆肥化プロジェクトにとって不可欠の存在である。彼らの理解や支援がなければ、自治体やその他の関係者が立ち上げた堆肥化プロジェクトが成功することはない。地元の農家はほぼ間違いなく堆肥の最も重要な利用者であり、**初期段階からプロセスに関与してもらう必要がある。**

堆肥は化学肥料に含まれる一部の栄養分の代替品として使用できるため、化学肥料の使用量を減らし、土壌質を改善することができる。

農家は、有機性廃棄物を原料とした堆肥などの有機肥料を使用することで良質な土壌環境を維持できる。堆肥の主なユーザーである彼らの意見が計画に反映されるように、彼らには計画段階から堆肥化プロジェクトに参加してもらう必要がある。堆肥を常用する地元農家の参加がなければ、生産者は地元地域での堆肥の販売が困難になり、より遠くの地域まで需要を掘り起こしに行かねばならなくなる。

✓ 望ましい要件

他の関係者も堆肥化プロジェクトの計画段階から関わっていること。

自治体は、地元の農家だけでなく、**自治体、婦人会、農協、商業団体、レストラン、ホテル、野菜の小売店、一般家庭など、主要な関係者の関与を計画段階から奨励する必要がある。**自治体や婦人会は、発生源での分別に参加し、有機性廃棄物を適切に処理することを住民に促すことができる。また、家族で農業やガーテニングを行うことに興味と意欲があり、そのためのスペースがある家庭では、自らが発生源で分別した有機性廃棄物を使って自宅や裏庭で堆肥を作ることができる。

農協は、地元農家に堆肥を配布するための拠点としての役割を担うことができ、商業団体は、堆肥を使って栽培した農産物の加工・販売を支援することができる。廃棄物の排出者であるレストラン、ホテル、野菜の小売店は、定期的に排出される有機性廃棄物の質と量に関する情報を提供することができ、これは堆肥化施設の処理能力を設計する際の判断材料となる。堆肥化プロジェクトを持続可能なものにするためには、廃棄物の排出者の賛同と支援が不可欠である。

2.2 市民の理解と住民の協力

☑ 必須の要件

住民の分別に関するモチベーションが維持されている。

住民は都市廃棄物の主な排出者である。自治体が有機性廃棄物の発生源での分別と組み合わせた堆肥化システムを計画する場合、住民は堆肥の原料となるこうした廃棄物を供給するという重要な役割を担う。

堆肥化プロジェクトの成否は、発生源での分別が適切に行われるかどうかによって決まる。図5に示すように、「参加率」、「適正分別率」、「適正排出率」の3つが発生源での分別の進捗状況を示す主な指標として用いられる (Kawai et al., 2017)。最も重要な指標である「参

加率」とは、住民全体のうち有機性廃棄物を分別している住民の割合を指す。「適正分別率」とは、有機性廃棄物がどれだけ正確に分別されているかを示す指標であり、「適正排出率」とは、有機性廃棄物として適正に分別された廃棄物と混じることのないよう、分別を行わない者が未分別の廃棄物を適正に排出していることを示す指標である。これら3つの主要指標は有機性廃棄物として分別収集される廃棄物の質と量に影響を与えるものであり、原料の質の向上と十分な量の確保のための目標とするべきものである。

参加率を上げるためには、いくつかの方策が考えられる。自治体は、住民が有機性廃棄物を分別する際の難しさを最小限に抑えるための機会や条件を整える必要がある。そのためには、自治体は住民と頻繁にコミュニケーションを取り、発生源での分別や回収に関してどのような問題があるのかを把握しなければならない。重要なことは、住民が適切な堆肥化のためにごみを分別する意欲を持つように、継続的な働きかけを行うことである。図6は、行動心理学を発生源での分別に適用した場合、どのように働くか、を示したものである。

フェーズ1では、住民は、人間の活動によって引き起こされる環境へのリスク、環境負荷を低減するための

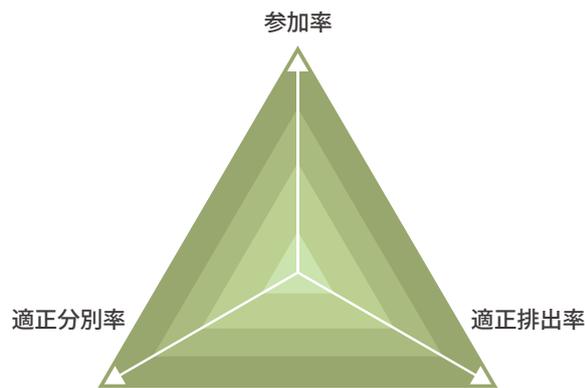


図5 有機性廃棄物の発生源での分別のための3つの主要指標

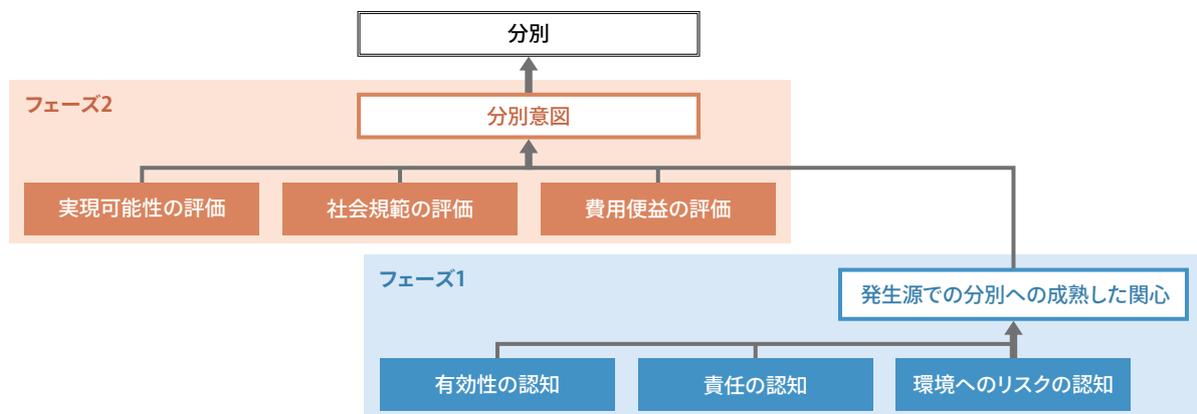


図6 発生源での分別に対する行動心理学的な仕組み

各自の責任、および発生源での分別の有効性(図7)を認知することによって、発生源での分別に対する関心を持つようになる。さらに、発生源での分別には追加的な作業や時間、コストがかかる可能性があるため、発生源での分別の妥当性、家族や隣人の参加の必要性、発生源での分別のための指導や設備について自治体がどこまで準備できているかを評価することで、住民の食品廃棄物の分別意欲を高めることができる。堆肥を使って栽培された野菜を地元の市場で購入することで(図8、9)、廃棄物の排出者(=野菜の消費者)は、自分たちが行なっている有機性廃棄物の発生源での分別がいかに関農活動に貢献しているかを認識でき、堆肥

化プロジェクトへの協力を継続する意欲を維持することにつながる。

国や自治体は、廃棄物が適切に分別されていない場合は収集しない、あるいは廃棄物を適正に分別しない廃棄物排出者に罰金を科すなど、発生源での分別を推進するための新しい法制度を設けることもできる。法制度は発生源での分別の推進と改善に役立つが、そのための準備は慎重に行う必要がある。厳格すぎる制度の場合には住民が日常生活で不便を感じる可能性があり、逆にゆるすぎる制度の場合は適正な発生源での分別の有効性が失われる可能性がある。

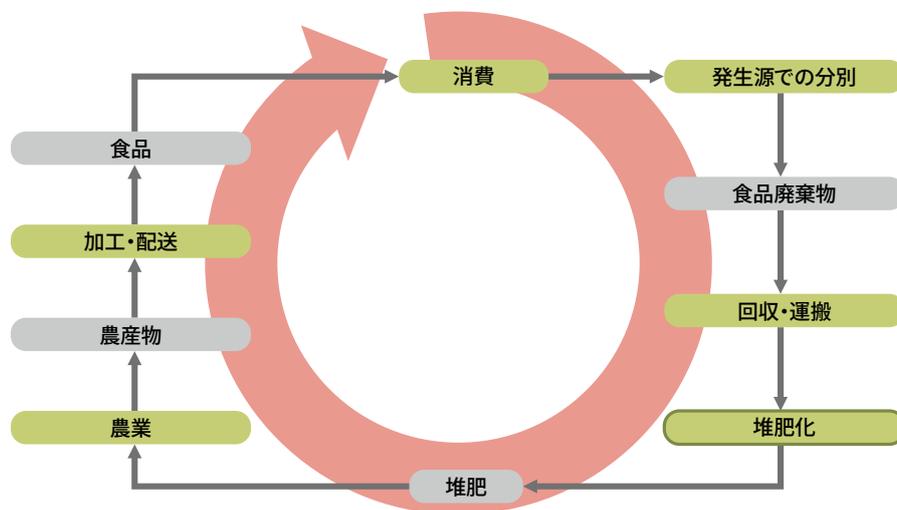


図7 発生源での分別に基づくフードサプライチェーンのリサイクルループ



図8 堆肥を使って栽培された野菜(茂木町)



図9 堆肥を使って栽培された野菜(池田町)

✓ 望ましい要件

堆肥は効果と安全性を実証するため、プロジェクト運営者自らが農業に使用してみせること。

農業用堆肥の有効性と安全性は、プロジェクト開始時点では理解されないこともある。ターゲットとする利用者は、廃棄物由来の堆肥について、「臭いがする」、「プラスチック、ガラス、金属などの不適な廃棄物が混じっている」などの否定的な印象を持っている場合があり、住民やその他の廃棄物排出者が有機性廃棄物の発生源での分別の目的を見失ったり、農家が堆肥の使用をためらったりする可能性がある。**廃棄物排出者および堆肥ユーザーの協力と理解を深めるために、プロジェクト運営者は堆肥を農作業に使用できる試験農地を準備して、堆肥の有効性と安全性を自ら実証するべきである(図10)**。こうした実証は、堆肥化に対する市民の意識を高める効果がある。



図10 試験農地(大崎町)

2.3 制度・組織的側面

✓ 必須の要件

堆肥化施設建設のために適切な用地が確保できること。

建設用地の確保は、堆肥化計画において必須の要件であり、事業の目標を達成する上で最も基礎的な要素である。用地には都市計画法や建築基準法など様々な法令が適用されるため、総合的な観点から計画を設計

することが重要である。また、自治体の堅牢性や信頼性も、こうした基準の重要要素となる。**堆肥化施設を建設する上で最も重要なポイントは、周辺地域の住民の同意が得られるか否かである。**

✓ 強く推奨される要件

行政機関が安定して機能しており持続性があること。

都市廃棄物処理は公共サービスとして管理されるものであり、また堆肥化施設は何十年にもわたって運営されるものであるため、**行政機関が安定して機能していることは、堆肥化プロジェクトの持続可能性のために構造的に重要なポイントとなる。**

堆肥化施設を自治体が運営する場合であっても、民

間企業が運営する場合であっても、堆肥化プロジェクトの主導権は自治体が必要がある。堆肥化施設を管理・運営していた民間企業が撤退した場合、自治体は直ちに施設を運営する代替りの事業者を探し、施設の運営が再開されるまでの間、堆肥化できない廃棄物の行き先を確保しなければならない。



強く推奨される要件

堆肥化施設周辺の地域住民が堆肥化プロジェクトによる悪影響を受けないこと。

堆肥化施設の運営は、廃棄物を運搬する大量の車両の行き来や、堆肥化施設から出る臭気、害虫などにより、近隣住民に悪影響を及ぼす可能性がある。**堆肥化施設の運営者は、建設・運営に際しての規制に沿って、施設が周辺住民の日常生活や環境に悪影響を与えないよう特に配慮する必要がある。**

堆肥化施設は、農地を持たない住民に区画を割り当て、施設で生産された堆肥を使用して自分たちで作物を育ててもらうことなどを通じて、住民同士の関係の構築に積極的な役割を果たすことができる。

2.4 行政的側面



必須の要件

自治体の首長が率先して堆肥化プロジェクトに取り組むこと。

堆肥化プロジェクトの導入は政治的な動向や、自治体の権力者の意向にも強く影響される。**自治体の首長が、堆肥化施設の建設・運営に前向きな姿勢を持っていることが不可欠である。**自治体の首長によって任命された責任者と併せて、自治体での関連部署の役割は当初から明確にされている必要がある。

自治体の首長選挙後は、新しい首長が前首長のもと

で実施されてきた政策を転換することがよくある。しかし、新しい首長は、それを選挙中の公約にしていなくても、人事異動などによって進行中の廃棄物処理計画を中断してはならない。廃棄物処理システムは、住民や農家、自治体など、様々な関係者との綿密なコミュニケーションの上で出来上がってきたものだからである。



強く推奨される要件

堆肥化プロジェクトに携わるすべての自治体職員が、堆肥化および廃棄物処理システム全体について、自ら研鑽を積んでいること。

自治体は、堆肥化施設の将来的な所有者または運営者、廃棄物の量、収集運搬車両の数と能力、堆肥化施設の容量、堆肥化技術の種類、堆肥化の初期コストと運営コストを含む長期にわたって必要となる経費、年間に生産される堆肥の質と量、地元の堆肥需要など、様々な検討材料を考慮した具体的な計画を立てて、堆肥化プロジェクトを計画しなければならない。堆

肥化プロジェクトが廃棄物排出者による発生源での分別を前提としている場合、計画段階において発生源での分別に関する実現可能性調査を実施することも一案である。発生源での分別に関する実現可能性調査は、まず小規模な地域を対象とし、その後プロジェクト範囲を広げていくべきである。これらのステップを進めるためには、**自治体のすべての関係する職員が、プロジェク**

トの開始に先立って、堆肥化および廃棄物処理システムに関する知見や能力の研鑽を行っておく必要がある。必要に応じて、外部の専門家やコンサルタントに関

与してもらうなど、外部からの支援を求めることもできる。堆肥化を担当する自治体の部署は、職員が入れ替わっても、その能力レベルを維持していく必要がある。

2.5 財務的側面

✓ 必須の要件

自治体が堆肥化プロジェクトの予算を見積もり、これを確保する能力を持っていること。

自治体は、堆肥化プロジェクトの推進が決定された場合、堆肥化施設の建設、運転、および稼働している間の維持管理に必要な予算の見積りを行わなければならない。堆肥化プロジェクトの必要予算の見積りを行うためには、必要に応じて、自治体は外部の専門家やコンサルタントの技術的支援を求めることができる。請負業者が施設を所有・運営している場合、自治体は、請負業者に支払うべき廃棄物1トンあたりの処理委託料を見積もる必要がある。民間事業者が用地を探すのは非常に困難な仕事になり得るため、自治体が民間事業者に堆肥化施設建設のための土地を割り当てることも有

効な手段である。可能な場合、自治体は国や国際援助機関と協議し、施設建設のための助成金や融資の条件を取り決める必要がある。また、自治体は廃棄物の収集・運搬のための予算も確保する必要がある。収集容器といった分別収集に必要な物品を自治体を用意して、住民がごみを捨てやすいように支援することも必要である。また、住民、特に他地域から移住してきた世帯を対象として、堆肥化のための発生源での分別への参加を促すための情報発信や市民意識向上のための予算も常に確保しておく必要がある。

✓ 望ましい要件

堆肥の販売戦略が計画段階で入念に練られていること。

十分な堆肥需要があることは、堆肥化プロジェクトにおいて、原料と堆肥のバランスという観点から重要である。堆肥の需要は、その品質だけでなく、販売価格や運搬費によっても左右される。堆肥の適切な価格は、化学肥料や様々な種類の堆肥の価格を考慮して検討されなければならない。

プロジェクト運営者は、計画の初期段階から、堆肥価格について地元農家と事前に協議し、販売戦略を立てておく必要がある。堆肥は、公園での使用や街並みの改善のためにも利用できる。堆肥需要が落ち込んだ場合に備え、農業以外の分野での堆肥の潜在的需要を検討し把握することを推奨する。

2.6 技術的側面

☑ 必須の要件

有機性廃棄物の分別収集と運搬の適切な方法を確立できること。

堆肥の最終品質に悪影響を与えることから、堆肥の原料には、非生分解性のごみや有害廃棄物などが混入してはならない。有機性廃棄物として収集された廃棄物の中に、プラスチックやガラスなどの非分解性のごみが最初に含まれているか否かで、堆肥化プロセス終了時の不純物の含有量が決定する (Cerda et al., 2018)。堆肥に含まれるプラスチック廃棄物は生分解性ではないが、太陽光の影響を受けて最終的には細かな粒子に分解され、マイクロプラスチックとして土壤中に長期に渡って残留する。**有機性廃棄物が発生源できちんと分別され、自治体が堆肥化に適した廃棄物だけを収集できれば、一連の機械的プロセスに頼る異物の分離・除去プロセスは必要なくなる。**都市廃棄物に含まれる有機成分を発生源で分別すれば、有機性廃棄物として収集された廃棄物に含まれる非分解性のごみを減らすことができる (Cerda et al., 2018; Hargreaves et al., 2008)。有機性廃棄物の分別収集は、高品質の堆肥を作るためのより良い原料を供給するために不可欠な要素である。

有機性廃棄物の分別収集と運搬手段にはいくつか

の選択肢があり (表2、図11)、地域の状況や、堆肥化のための有機性廃棄物の回収に関する詳細な実現可能性調査を基に、最も適した選択肢を採用しなければならない。プラスチック廃棄物は、現在世界が直面している最大の問題の一つである。バイオポリ袋には、生分解可能な石油由来のプラスチック袋と、(一部が) 生物由来の物質で構成されたプラスチック袋の2つのタイプがある。

これらのバイオポリ袋には様々な種類があるが、土壤中で完全に分解されるバイオポリ袋があるかどうかは疑わしい。ポリ袋は、堆肥化施設で機械や手作業によって確実に取り除くことができる場合は、有機性廃棄物の梱包材として使用することができる。

各コミュニティには、コミュニティ内の各家庭から出される有機性廃棄物を回収するためのプラスチック容器が設置されている (図12、13)。有機性廃棄物の分別回収に参加しているすべての世帯が、共有の容器に有機性廃棄物を出すのが、異物が入ると一目で見分けられるようになっている。プラスチック容器は、内部を洗浄した後、再使用される。

表2 日本の経験に基づく有機性廃棄物の分別回収・運搬手段の選択肢

収集・運搬のための梱包	場所	トラックの種類	頻度	時間
ポリ袋、紙袋、プラスチック容器	歩道脇、収集拠点	平台型、圧縮型	指定日、毎日	午前、午後、夕方



図11 有機性廃棄物収集用の紙袋 (池田町)



図12 収集地点に設置された容器に有機性廃棄物を入れる様子 (長井市)



図13 食品廃棄物運搬用の平台車両 (長井市)



強く推奨される要件

好気性発酵プロセスで、含水率を適切な範囲に維持できること。

堆肥の原料となる混合物の含水率は、微生物の代謝や生理活動に必要な溶存性の栄養素を運搬する媒体となるため、重要なファクターである (Kumar et al., 2010)。好気性細菌を活性化させるためには、原料の含水率を40%超に保つ必要があるが、含水率が高いと空気を供給しにくくなる。食品廃棄物は、含水率が約70~80%と高いのが特徴で、好気性の状態を維持する

ためには、好気性発酵プロセスの初期段階で、おがくず (図14) やもみ殻 (図15) などの有機性の添加物を加えて含水率を下げる必要がある。乾燥した葉 (図16)、草 (図17)、せん定枝なども、含水率の調整に使用できる。Kaneko et al. (1986) は、一定の温度下で十分な曝気を行い、含水率を50~60%にすると、呼吸活性が最大になると報告している。



図14 堆肥化施設に保管されているおがくず (茂木町)



図15 堆肥化施設で水分調整に使われているもみ殻 (長井市)



図16 堆肥化施設に保管されている落ち葉 (茂木町)



図17 堆肥化施設に保管されている草類 (大崎町)

Box 3 堆肥化プロジェクトの成功に必要な主な活動や措置

既存のプロジェクトを検証することで、堆肥化プロジェクトの準備と実施を成功させるための重要な活動や措置が明らかになる(表3)。主な活動、措置の中には、現地の状況によってさらなる発展に大

きな影響を与えるものもあれば、全く効果のないものもある。活動や措置は、表に示された順に実行する必要はなく、必要に応じて検証・実施するのが望ましい。

表3 堆肥化プロジェクトの種類と特徴

活動/措置の種類	例
計画	目的の明確化、行動計画の作成
キーパーソンの関与	地域の最高責任者、自治会長、農家の方々の参加
関係者との連携	経済団体、農業団体、女性団体との連携
人員の配置	担当部署や担当者の指定
情報の収集	堆肥化技術や農業に関する専門家へのインタビュー
選択された事例の研究	現場を訪問し、主たる関係者にインタビュー
ケーススタディのレビュー	モデル地域における有機性廃棄物の発生源での分別の実現可能性に関する調査、堆肥の農業への使用の有効性の検証
説明会の開催	住民やその他の関係者を対象とした定期的な説明会の開催
広報活動の実施	地域情報誌、ウェブサイト、SNS、個人的なコミュニケーションを通じて、堆肥化プロジェクトの情報を配信
専門家による講演会の開催	専門家による住民向けの科学的講義の手配
地域の意向の確認	発生源での分別に関わる住民へのアンケートの実施
ブランディング	堆肥化プロジェクトのコピー、ロゴ、マスコットの依頼
認証	堆肥や農産物の品質を規格に基づいて認定すること
評価	堆肥化プロジェクトに協力した住民やコミュニティへの表彰、リサイクル率や費用対効果の改善の評価

3 主な技術と堆肥化プロセス

3.1 堆肥化に適した廃棄物

堆肥化に適しているのは、生物学的に分解できる有機性廃棄物である。以下に、堆肥化の原料として使用できる有機性廃棄物を例示する。

- a) 調理残渣や食べ残しなどの食品廃棄物 (図18)
- b) 草木の葉や剪定枝
- c) 稲わら・麦わら
- d) 畜産廃棄物
- e) 尿尿や下水汚泥
- f) 生鮮市場や公設市場から出る青果物の廃棄物

なお、c)、d)、e) は、国によっては都市廃棄物に分類されずに別個に処理されている場合もある。



図18 家庭から回収された堆肥化に適した食品廃棄物 (ハノイ市、ベトナム)

貝殻、卵殻、エビの殻、鶏骨、豚骨、牛骨、ココナッツ殻、および果物の種は、食品廃棄物として分類されることが多いものの、分解が難しいため、堆肥化には適していない (図19)。こうした廃棄物を除去する適切なプロセスがない施設では、可能であれば堆肥化の原料からこうした廃棄物を取り除くことが望まれる。また、塩分や辛味成分の強い廃棄物は、堆肥化の発酵プロセスでバクテリアを不活性化させてしまうため、最小限に抑える必要がある。



図19 家庭から回収された堆肥化に適さない食品廃棄物 (ハノイ市、ベトナム)

プラスチック、金属、ガラス、油、吸い殻、ガム、紙おむつ、およびこれらに類する、生物学的に分解されない廃棄物は処理プロセスで阻害物質になる可能性があり、堆肥化には適していない。紙は生分解性があるが、紙ごみは堆肥化には適さないものとして分類されることが多い。一般的に、堆肥化のための好気性発酵プロセスには10日から3カ月かかるが (Elango et al., 2009)、紙が分解されるには、これよりはるかに長い期間が必要である。農家では、プラスチックやガラスなどを含んだ低品質の堆肥の使用を避ける傾向がある。

医薬品、乾電池、スプレー缶、殺虫剤、水銀体温計など、危険で有害な廃棄物は、堆肥化の原料に混ぜてはならない。有害廃棄物を混ぜると、堆肥の品質に悪影響を及ぼし (McDougall et al., 2001)、最終的には、堆肥を使用した農地で収穫された作物を食べる人々の健康を脅かすことになるからである。

牛や豚の排泄物や下水汚泥を利用するには、類似物や化学組成に十分注意を払う必要がある。乳牛は大量の水を摂取するため、糞便の水分は多い。肉牛の糞便は含水率はるかに少ない一方で、豚の糞は一般的にかなりの量の水分を含んでいる。稲わら、もみ殻、おがくずなど、牛や豚の敷料は糞便の含水率を下げるために利用される混合物として最適である。ただ、牛や豚の排泄物から作られた堆肥を農地で使用すると、飼

料作物に残留した除草剤の成分が排泄物中に残り、作物の生育に支障をきたす可能性がある

下水汚泥は、廃水処理の際に発生する有機物と無機物の残渣であり、高レベルの有機成分と結合した大量の窒素およびリンを含んでいる (Arthurson, 2008)。し

かし、下水汚泥に含まれる重金属は下水汚泥から作られる堆肥にとって大きな制約要素となり得る (Amir et al., 2005)。このため、堆肥の品質を保証するためには、糞便や下水汚泥を取り扱うための適切なガイドラインや基準を作成する必要がある。

Box 4 フードサプライチェーンにおけるリサイクル率

FAO (2019) によると、毎年、世界で生産される食料の約30%が失われたり、無駄になったりしている。これは、食品メーカー、卸売業者、小売業者、サービス産業、家庭など、フードサプライチェーンの様々な段階で起こっており、食糧安全保障、経済損失、および環境汚染への悪影響を考慮すると、廃棄物処理のヒエラルキーと3Rに基づいて食品ロスと食品廃棄物の削減を図ることが最優先事項とされている。食品を動物飼料などに再利用したり、食品廃棄物をリサイクルしたりすることも埋立地に処分する代替手段として重要である。リサイクル目的の食品廃

棄物は、小売業などフードチェーンの下流の関係者よりも、上流の食品メーカーなどから収集される (図20)。分別収集の効率が悪く、混入物が多いことから、食品卸売業、小売業、食品サービス業、および一般家庭から出る食品廃棄物のリサイクル率は、低い傾向にある。なお、ここでいう混入物とは有害物質を指すのではなく、紙やプラスチック、ガラス、金属など、堆肥化に適さない異物のことをいう。家庭は、堆肥化用の食品廃棄物の主な供給源であるため、都市廃棄物問題に取り組む上での第一の対象となる。

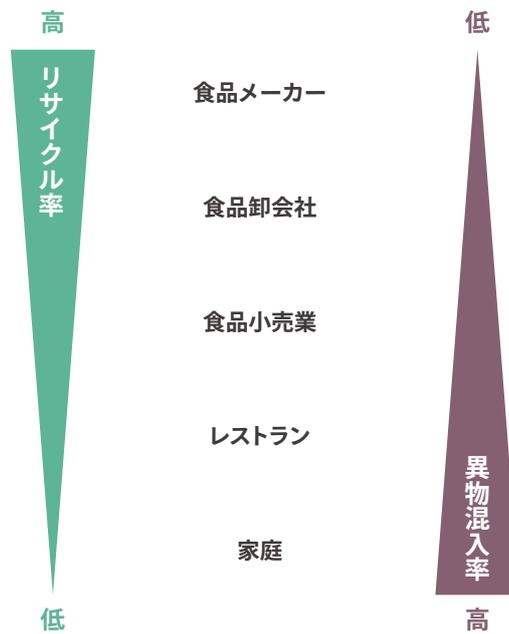


図20 フードサプライチェーンのアクターが排出する食品廃棄物のリサイクル率と異物混入率

3.2 堆肥化システムの種類

開発途上国、特に大都市では、人口増加に伴って都市廃棄物の排出量が増加しており、自治体はこうした廃棄物の増加への対応という課題に直面している。廃棄物排出者には可能な限り廃棄物を削減する責任があり、都市廃棄物の発生を削減するためには、**家庭やコミュニティでの堆肥化**が一つの解決策となる。有機性廃棄物を他の廃棄物から積極的に分別し、自ら堆肥化する家庭が増えれば増えるほど、自治体が収集・管理しなければならない都市廃棄物の量は少なくなる。家庭やコミュニティで堆肥化を行うための十分なスペースを確保できない場合、自治体が有機性廃棄物を埋立地に運搬する代わりに、堆肥化施設で都市廃棄物を集約して処理することを選択することも一案である。堆肥からプラスチック片やガラス片などの汚染物質を完全に取り除くことは難しいことから、本ガイドラインでは、有機性廃棄物が収集・運搬される前に、可能な限り発生源での分別を行うことを強く推奨している。

3.2.1 家庭やコミュニティでの堆肥化 (分散型堆肥化)

自宅やコミュニティに容器を設置する十分なスペースがあり、有機性廃棄物が適正に発生源で分別できる場合、家庭やコミュニティは自分自身で有機性廃棄物を使って堆肥を生産することができる。**家庭やコミュニティでの堆肥化は「分散型堆肥化システム」とも呼ばれ、技術的には管理が容易である。**家庭やコミュニティでの堆肥化には、プラスチック製のバスケット(図21)、土鍋、段ボール、鉄またはプラスチック製の樽(図22)など、様々な種類の容器が使われており、通気性の良い容器であることが推奨される。バスケットの内側に段ボールを敷くことで、水分を安定させることができ(図23)、また、好気性の状態を維持するために、バスケットや容器の中の廃棄物を定期的にかき混ぜる必要がある。



図21 家庭用堆肥化バスケット
(スラバヤ市、インドネシア)



図22 コミュニティベースの堆肥化用
プラスチック樽(スラバヤ市、インドネシア)



図23 段ボール張りされたバスケット
(スラバヤ市、インドネシア)

臭気は、家庭やコミュニティでの堆肥化において最も重要な環境問題である。発酵プロセスにおいて水分が過剰な場合、嫌気性状態となって臭気が発生する。好気性発酵を維持するためには、最も重要なパラメータの1つである含水率をモニタリングし、60%前後に維持する必要がある。食品廃棄物の含水率は一般的に80%前後であるが、スイカの食べ残しなど、含水率の高い食品廃棄物は原料として利用しない方が望ましい。食品廃棄物をバスケットや容器に入れる前に、水分を絞ったり漉したりすることで過剰な水分を除けば、嫌気性発酵を防止し、臭気や虫の発生を防ぐことができる。食品廃棄物の層の間に乾燥した土を挟むと、水分の除去だけでなく、臭いの吸収や虫除けにも効果がある。

コミュニティベースの堆肥化を導入する場合、発酵用の容器を設置できるスペースを慎重に確保する必要があり、有機性廃棄物を排出する世帯数に応じて適切な数の容器を設置することも求められる。家庭で行う堆肥化と比較して、コミュニティベースの堆肥化では容器に入れられる有機性廃棄物の量が多く、含水率も高くなって嫌気性になる可能性があるため、換気と排水の機能を備えた容器を使用する必要がある。

4.1では、インドネシアのスラバヤ市における家庭およびコミュニティベースの堆肥化の導入事例を紹介している。

3.2.2 集約型の堆肥化

自治体は、有機性廃棄物の分別について、地域の住民の協力が十分に得られることが確認できた場合には、集約型の堆肥化を選択することができる。堆肥化施設での工程の種類や数は原料の品質に応じて変わるが、通常、堆肥化には**原料の発生源での分別収集のほか、含水率の調整、発酵、機械的選別**などの工程がある。図24に堆肥化プロセスの一般的な流れを示す。原料の収集・運搬にポリ袋が使用されている場合は、初期工程で取り除かれる。一般的に、堆肥化のための原料は含水率が高く、水分を吸収・調整するためにおがくずやもみ殻を加えることが多い。次の発酵プロセスでは、原料はより一般的な発酵プロセスである好気性発酵によって生物学的に分解される。有機性廃棄物が分解されると、水蒸気のほかにCO₂、CH₄、N₂Oガスが発生する。発酵プロセスの後、金属、ガラス、プラスチックなどの汚染物質が取り除かれて、最終的に堆肥が出来上がる。また、堆肥化施設の近隣に人が住んでいる場合は脱臭工程も組み込む必要がある。集中型の堆肥化の主な工程（発酵、機械的分別、脱臭）は、以下の通りである。

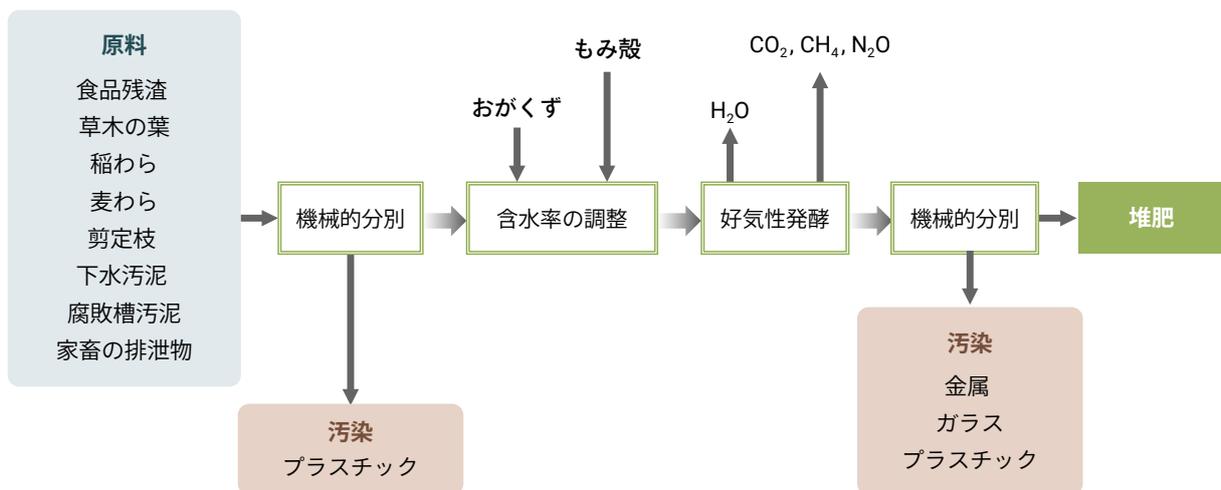


図24 堆肥化プロセスの一般的な流れ

3.3 発酵

発酵処理には、**好気性処理と嫌気性処理**の2種類がある。嫌気性処理とは、嫌気性細菌が空気のない状況で有機成分を分解し安定化させるプロセスのことである。嫌気性処理では、その反応が遅いため、発酵プロセスが完了するまでに最長10カ月もの長い期間が必要となる。好気性処理とは、空気が豊富な環境下で好気性細菌が有機成分を分解し安定化させるプロセスのことである(図25、26)。この処理においては、攪拌や機械的換気によって処理する混合物に空気を供給し、一定の酸素濃度を保つ必要があるが、より短期間に堆肥を作ることができる。本ガイドラインは、技術的にシンプルであること、また開発途上国で堆肥化施設を設置・運営できる可能性が高いことから、好気性発酵に焦点を当てている。

発酵プロセスの有効性は、**温度、酸素供給量、含水率、pH、C/N比、粒径、圧縮度などの要因に影響される**(Onwosi et al., 2017)。これらの要因は、有機性廃棄物



図25 一次好気性発酵プロセス(大崎町)



図26 二次好気性発酵プロセス(大崎町)

を混合し(Getahun et al., 2012)、必要に応じて水分を供給することで維持・改善することができる。また、酸素を供給して好気性発酵を促進するために廃棄物の底に空気を吹き込んだり、引き込んだりすることも効果的である。含水率が高すぎると廃棄物に空気を送り込むことができず、嫌気性の状態を生じさせる。発酵プロセスでは、生物学的な分解により有機成分が約50%まで減少し、発酵熱による水分の蒸発によって原料の含水率も減少する。

3.4 機械的選別

集約型の堆肥化施設では、発酵プロセスに加えて機械的選別という重要なプロセスが必要となる。**機械的選別は、発酵プロセスの前と後に、混合物から混入物を取り除くために行われ**(図27)、その選別の良し悪しは、堆肥の品質に影響を与える。有機性廃棄物が他の廃棄物と分別して収集されている場合でも、汚染物質を完全に除去するには複数の手段で機械的選別を行う必要がある。



図27 発酵プロセス後の機械的選別(長井市)

3.4.1 ふるい分け

ふるい分けは、発酵の前または後に、スクリーンを使って大きな粒子を物理的に取り除く工程である。生分解性の成分は発酵プロセス中に小さくなる。発酵プロセスの後にふるい分けを行うことで、非生分解性の成分を堆肥から物理的に分離することができる。一次発酵直後の堆肥は含水率が高く、またプラスチックフィルムや繊維などの非生分解性の様々なごみが混ざっているため、スクリーンが目詰まりすることがある。スク

リーンを上下、前後、円形、トロンメルといった一連の動きをさせることによって、目詰まりを防ぐことができる（図28）。



図28 発酵プロセス後に汚染物質を除去するトロンメル（池田町）

3.4.2 鉄の分離

鉄（Fe）は、堆肥の処理の流れから鉄を引き寄せる磁石で選別することができる。これには、例えばオーバーバンド磁選機や磁気ドラムを使用する（図29）。



図29 磁力選別された金属類（ハノイ市、ベトナム）

3.4.3 電磁選別

非鉄金属は、渦電流選別機を使って選別することができる。渦電流は、コンベヤの先頭に付いている、コンベヤとは独立して高速回転する一連の希土類磁石またはセラミックローターによって誘導される。このプロセスでは、ローターと同じ極性の非磁性金属に一時的な磁力を誘導して金属を反発させ、原料から分離する。

3.5 脱臭

堆肥化施設が住宅地周辺にある場合は、臭気の除去を行う必要がある。しかし、臭気を完全に除去することは困難であり、さらに堆肥が酸性の場合、中性やアルカリ性の場合と比べ臭気は一層強くなる（Sundberg et al., 2013）。アンモニア、アミン類、硫化ジメチル、酢酸、揮発性有機化合物（VOC）が、臭いの主な原因となる（Mao et al., 2006；Maulini-Duran et al., 2014；Scaglia et al., 2011）。堆肥化施設では、土壌（図30）や堆肥そのものをバイオフィルターとして利用して臭気を処理・軽減する方法が一般的に採用されている。堆肥の臭い軽減のための手段として重要なことは、初期の低pHの段階を速やかに通過させることである。これは、曝気率（酸素を供給する割合）を高くすることと、戻し堆肥などの添加物の使用を組み合わせることで実現できる（Sundberg et al., 2013）。



図30 脱臭用の土壌（長井市）

4 ケーススタディ

4.1 スラバヤ市 (インドネシア)

スラバヤ市は、人口300万人の、東ジャワ州に位置するインドネシア第2の都市であり、同州の重要な商業・工業の中心として機能している。人口300万人のこの都市では、住宅(68%)、市場(16%)、商業・工業(11%)、街路・オープンスペース(5%)などのセクターから、1日に1,500トンを超える都市廃棄物が排出されており、その組成の50%超を有機性廃棄物が占めている(Gilby et al., 2017)。同市では、堆肥化センターの設置と堆肥化バスケット数千個の住民への配布を通じた堆肥化の推進、家庭での廃棄物分別・廃棄物削減活動の導入、コミュニティ管理型の廃棄物回収および地元NGO・民間企業(公式および非公式)・メディアとの連携によるコミュニティ清掃キャンペーンや廃棄物リサイクル活動の実施を通じて、3年間(2005年~2007年)で都市廃棄物の発生量を20%以上削減することに成功した(Maeda, 2009)。**スラバヤ市の実績は、有機性廃棄物をターゲットとして堆肥化をベースとした持続可能な統合的廃棄物処理システムを確立すれば、限られた予算で短期間に大量の廃棄物を削減できるということを示している**(Maeda, 2009; Premakumara et al., 2011)。

スラバヤ市では、堆肥化という廃棄物処理モデルが確立されるまでは、都市廃棄物は主に埋め立て処理されていた。スラバヤ市の廃棄物問題がピークに達したのは、2001年10月、ケプティ村にあるスラバヤ市所有の唯一の最終処分場が閉鎖されたときであり、この処分場に送られるはずだった廃棄物が街中の路上に溢れ、市は大混乱に陥った。

2004年、北九州市の北九州国際技術協力協会(KITA)と、スラバヤ市の現地NGOであるプスタコタが協力して、市内最大の工業地域に隣接する低所得者層の居住区であるカンボン・リンクット・ローでパイロットプロジェクトを試行した。6カ月間の試行錯誤の末、従来のウインドロー堆肥化方式をベースとした効率的な堆肥化法である「高倉式」(北九州市在住の堆肥化専

門家の名をとって命名)が応用され、プスタコタの堆肥化センターに採用された。高倉式では、醤油、ヨーグルト、発酵大豆(インドネシア語でテンペやタペ)、果物や野菜の皮、米ぬか、もみ殻など、その土地の発酵食品から培養された発酵微生物を、種堆肥として使用している。高倉式の最大の特徴はその処理速度で、ウインドローやその他の方法では有機化合物の大部分を分解するのに通常3カ月以上かかることを、わずか1~2週間で分解することができる。プスタコタ堆肥化センターでは、コミュニティの発生源で分別されて回収された有機性廃棄物を使って、高品質の堆肥の大量生産(1.4トン/日)を開始した。

スラバヤ市は既存の堆肥化センターでもこれと同じ堆肥化手法を採用し、新しいセンターも設立するとともに、堆肥化バスケット数千個を住民に配布して、プロジェクトの規模を拡大した。その結果、市は13の堆肥化センターを運用するようになり(図31)、これらを合わせた全体の処理能力は1日約40トンで、野菜市場や街路/公園の整備事業から集められた大量の有機性廃棄



図31 堆肥化センター

物を処理している。また、市は19,000個のバスケット(図32)も各家庭に無料配布した。

市はプスダコタからバスケットを購入し、その配布をPKK(女性グループであるPemberdayaan Dan Kesejahteraan Keluarga)やその他のNGOに委託することを通じて、コミュニティに対し草の根的な活動を行っている彼らの能力を活用している。これらのNGOは、「環境幹部」と呼ばれるコミュニティ環境リーダーのネットワークを構築した。こうしたリーダーたちは、バスケットを使って台所の食品廃棄物から堆肥を作る方法や、台所環境をごみのない状態に保つことで期待される環境や健康への影響について、住民に教えている。

また、環境幹部は、バスケットの使用状況をモニタリングしてフォローアップを行い、一般的な問題も解決している。多くの家庭がこれに追随したことで住民の意識が変わり、道路や川にごみが捨てられることがなくなり、その結果、緑の多い清潔なコミュニティが生まれた。



図32 高倉式堆肥化バスケット

プスダコタはさらにコミュニティのごみステーションとしても機能するようになり、リサイクル資源も含め、有機性廃棄物と無機性廃棄物の分別回収を行って廃棄物の発生源での分別を推進している。

Maeda (2009) が報告しているように、堆肥化の推進は、廃棄物の削減という点で2倍以上の相乗効果がある。13カ所の堆肥化センターで1日40トン、4万世帯で1日40トン、他の乾燥した廃棄物の利用・リサイクル(廃棄物バンクや、プラスチック廃棄物を利用した手工芸品の製造)により1日120トンの廃棄物が削減されている。さらに、スラバヤ市では、市の廃棄物処理費全体のわずか1~2%の予算で、これら13カ所の堆肥化センターの運営・維持管理、堆肥化バスケットの配布、PKKやNGO、環境幹部の活動支援、「グリーン&クリーンキャンペーン」の展開などの成果を出している。これらの活動の経費全部を合わせても、2006年から2008年にかけて、年間15億~20億IDR(15万~20万米ドル)にしかっていない。他の都市でも、以下の5つのステップを参考に同様な戦略の採用が推奨されている(Maeda, 2009)。

ステップ1 廃棄物削減目標の設定と制度の整備

まず、自治体が、市長の支持を得た上で廃棄物削減目標を設定する。プロジェクトの主体となる部署(通常は廃棄物処理部)を指定し、公園管理部、環境管理部、都市計画部門など、他の関連部門との調整を行う。

ステップ2 市場用の廃棄物堆肥化センターの設置

自治体は、堆肥化センターを設置し、最終処分場に運ばれて投棄されるはずの青果市場から出る有機性廃棄物を処理することで、堆肥化プロジェクトを直ちに開始できる。堆肥化プロジェクトには、処理センターのための土地と建物、廃棄物を細断するためのシュレッダーと併せてスタッフの技術的なトレーニングが必要である。プロジェクトはまず、例えば1日1トンの堆肥を試験的に処理し、生産された堆肥を市の公園で使用するなど小規模にスタートして、効果を確認した後に、段階的に規模を拡大していけばよい。

ステップ3 コミュニティでのパートナーの特定と 堆肥化バスケットの配布

プロジェクトを開始して間もない段階では、都市全体を対象とするのではなく、強いリーダーシップやコミュニティの絆がすでに存在している地域や学校をパートナーとすることが望ましい。また、スラバヤ市の事例のように、住民に堆肥化バスケットの使い方を教えたり、進捗状況をモニタリングしたりするコミュニティ環境リーダーのネットワークを構築することも効果的なアプローチである。市と緊密に連携し、他のNGOや環境幹部との調整を行うPKKが積極的に関与していることも有利な点であるが、PKKはインドネシアのどの都市にも存在することから他の都市もこれを参考にすることができる。堆肥化のためのバスケットは、数年後には廃棄物削減の効果がバスケットの配布コストよりも大きくなるため、無料で配布することができる。

ステップ4 コミュニティベースの 堆肥化センターの開設

コミュニティ堆肥化センターを開設するにあたって、資金、建物、設備を提供して地域のパートナーを支援することは、廃棄物処理へのコミュニティの参加を促す効果的なアプローチである。また、コミュニティの既存の素材回収施設にシュレッダーや技術のトレーニングを提供するというやり方もある。特に初期の段階では、市が生産された堆肥の買い手になったり農家への堆肥の販売を支援したりして、運営をサポートする必要がある。また市は、まず市場の廃棄物のための堆肥化センターを開設し徐々に家庭廃棄物を受け入れるようにした上で運営をコミュニティに委ねることで、コミュニティの参加を促すことができる。

ステップ5 コミュニティでの清掃キャンペーンの実施

地域の清掃キャンペーンを実施し、コミュニティ同士の競争を促すことは、コミュニティの参加を促す上での効果的なアプローチである。民間企業やメディアグループとキャンペーンを共催することは、人的・資金的資源を動員し、キャンペーンを大々的に宣伝し、コミュニティのさらなる参加を促すことから優れた手段となる。

スラバヤ市の成功には、いくつかの重要な要素が存在する。

1. **社会情勢：**スラバヤ市では公有地が少ないため、新たに埋立地として使用できる土地がなかった。住民は、台所をごみのない環境に保つことによる衛生面での効果、すなわち台所に食品廃棄物を放置していれば腐ってハエやゴキブリが湧き、家族の健康に望まない影響を及ぼしかねない、ということに気づき、こうした問題を解決する1つの方法が堆肥化の実践であるということ、理解していた。
2. **技術的側面：**良質な堆肥を作るために、「高倉式」と呼ばれる効率的な家庭向けの堆肥化方式が開発され、堆肥化センターは、フォローアップのサポートを行った。
3. **制度・組織的側面：**スラバヤ市は、行政施策として廃棄物処理のための様々な活動を展開してきた。堆肥化の導入、堆肥化センターの更新、資源分別・リサイクルセンターの改良、廃棄物処理改善のための予算を継続して割り当て、都市計画マスタープランの公開、廃棄物削減目標の設定、表彰制度の整備など、廃棄物処理の改善の進捗に合わせて段階的に発展させてきた。
4. **行政的側面：**市は堆肥化に対して前向きな姿勢を持ち、上記のすべての活動においてリーダーシップを発揮している。また、スラバヤ市はNGOや民間企業、メディアと協力して、「グリーン&クリーンキャンペーン」と呼ばれるコミュニティ清掃キャンペーンを実施した。キャンペーンに参加したコミュニティ(Rukun Tetangga: RT)の数は、プログラム初年度の2005年には325であったものが、2008年には1,797となり、市内の全RTの約20%を占めるまでになった。
5. **財務的側面：**スラバヤ市では、プスタコタから1個あたり約10万IDR(10米ドル)でバスケットを調達し、過去5年間で19,000個の堆肥化バスケットを無料配布してきた。NGOや環境幹部による宣伝・啓発活動を含めた流通コストも1バスケットあたり10万

IDR (10米ドル)であったと仮定すると、この5年間の市の支出総額は38億IDR (38万米ドル)となる。一方、バスケット1個あたり、1kg/日の有機性廃棄物を削減できると仮定すると、19,000個のバスケットでは1日に19トン、年間にすると約6,900トンとなる。スラバヤ市の廃棄物処理コストは、廃棄物1トンあたり約23万IDR (23米ドル)なので、廃棄物削減によって節約できるコストは、年間16億IDR (16万米ドル=6,900トン×23米ドル/トン)と概算できる。この想定に基づけば、市は2.5年で初期投資を回収し、その後も廃棄物削減効果を維持できることとなる。さらに、実際に削減された廃棄物の総量は、堆肥化センターと家庭での堆肥製造能力の合計よりもはるかに大きいことから、家庭での堆肥製造の推進や有機性廃棄物の分別回収が、住民に対し他のタイプの廃棄物も併せて削減するよう促す方法として機能していると推測される。このことから、堆肥化バスケットを大量に無料で配布しても、数年後には関連したコストも含んでその費用が相殺され、他の都市にも追随するよう推奨できる活動となっている。

6. **市民の意識と住民の協力:** 住民が家庭での堆肥作りを実践することには一般的に3つのインセンティブがある。第1は、ほとんどの人が、自作の堆肥を植物や庭に使って楽しんでいてということである。第2は、台所に腐敗したごみがあると家族の健康に望ましくない影響を及ぼしかねないということに住民が気づいたことであり、第3は、堆肥やそれを使って栽培した植物や野菜を売ること、副収入を得られることである。例えば、プスタコタは、バスケットユーザーが生産した堆肥を1kgあたり700IDR (0.07米ドル)で購入している。これにより、1日に1kgの有機性廃棄物を出す家庭では、投入量の約20%が最終製品になるとして、1カ月で4,200IDR (0.42米ドル)の収入を得ることができる。

しかしながら、最近、インドネシアの国家廃棄物処理戦略では、廃棄物発電 (WtE) 焼却が注目されるようになってきた。大統領令2016年第18号では、インドネシ

アの7都市 (ジャカルタ、タンゲラン、バンドン、スマラン、スラカルタ、スラバヤ、マカッサル) が、WtE焼却プロジェクトの開発支援対象都市として指名されている。しかし、WtE施設が最大の効率で稼働するためには、1日に最低1,000トンの都市廃棄物が必要であるため、スラバヤ市では、廃棄物が他の処理手段に回されるという状況下での堆肥化システムの維持という新たな課題に直面している。

4.2 クリヤピティア市政局 (スリランカ)

国立廃棄物処理支援センター (NSWMS) の設立と、PILISARUプログラム (環境天然資源省が立ち上げた国家プログラム) の開始に伴い、クリヤピティア市政局 (KUC) は市内に総合的な都市廃棄物処理システムを構築することを計画した。この総合的アプローチにより、生分解性廃棄物を管理するための堆肥化施設の建設、資源回収のためのリサイクルセンターの建設、残余廃棄物を投棄するための半人工的な埋立地の整備、下水と浸出水を管理するための低コストの廃水処理システムの整備など、廃棄物処理における多くの問題が解決された。現在、クリヤピティアの統合廃棄物処理施設は、都市廃棄物から資源を回収することで、クリヤピティアが当初の意図に込めている (Karunaratna, 2020)。

回収・投棄から統合的都市廃棄物処理アプローチへの転換

クリヤピティアは人口6,554人で、スリランカ北西部州クルネガラ県で2番目に大きな町である。KUCは、2009年に適切な方向性が示されるまで、都市廃棄物処理や廃棄のための基本的インフラがない中、他の小さな自治体と同様に住民に標準以下の都市廃棄物処理のサービスしか提供できず、環境に大きな負荷をかけて、家庭やビジネス、公共の場から排出される大量の廃棄物の管理に苦慮していた。

2008年までは、市の一角にあるやせた土地にすべての廃棄物がそのまま投棄されていた (図33)。積み上げられた廃棄物が高くなると、作業員がそれを燃やして、

翌日に投棄される廃棄物のスペースを確保していた。廃棄物を燃やして出る煙のせいで周辺は不快な環境となり、住民は深刻な健康上のリスクに晒されていた。KUCは、このごみ集積場を閉鎖して遠隔地移さなければならないという大きなプレッシャーを感じていたものの、域内の土地資源が乏しいため、新しいごみ捨て場となる場所を探すのはほとんど不可能であった。

KUCの環境保全センター

2007年にNSWMSMCが設立され、2008年にPILISARUプログラムが開始されたことで、KUCをはじめとする自治体には、これまで切望していた技術的・財政的支援を求める道が開かれることとなった。KUCは、最終処分場に送られる廃棄物の量を減らすために、長年ごみ捨て場として使われていた土地に、統合的な廃棄物処理・処分施設である「環境保全センター」(図33)を設置する考えを打ち出した。

計画者が提案したのは、特に問題が多かつ腐敗した廃棄物を処理する小型バイオガスユニット、生分解性廃棄物のための堆肥化施設、非生分解性廃棄物からリサイクル可能な廃棄物を選別・回収する施設、およ

び残余廃棄物を処分するための小型の準衛生埋立型の埋立施設を含む、統合的な廃棄物処理・処分施設であった。

この堆肥化施設は、最大10トンの生分解性廃棄物を処理できる、初の本格的なウインドロータイプの堆肥化システムであった。この堆肥化施設が2009年に稼働を始めた後最大の課題となったのは、従来の回収システムを通じて受け入れた未分別の都市廃棄物を選別することであった。5〜6人の作業員が雇われて、運ばれてくる廃棄物の選別作業に当たっていたが、こうした追加的な高い人件費、作業員の衛生面の問題、およびシステム全体の効率の悪さのせいで、プロジェクト開始時にはKUCは想定していたよりも多くの費用を費やすこととなり、市全体を対象としての廃棄物の発生源での分別・回収システムを導入するための短期的および長期的な対策を立てる必要に迫られた。

廃棄物の発生源での分別・回収の実施

当初からKUCが直面していた最も困難な課題は、一般市民にごみの分別に参加してもらうことであった。2009年には、パイロットプロジェクトとして、1つの区で



図33 クリヤピティヤの廃棄物処理施設。2008年の改良前と、2009年の環境保全センター設置後

(Karunarathna, 2020)

ベル回収システムが導入された。ベル回収とは、生分解性廃棄物用の回収車が独特のメロディを流すことによって各家庭に回収車が来たことを知らせ、住民は家のごみ容器の中身を回収車に直接捨てるというシステムである(図34)。回収車の作業員は廃棄物が完全に分別されているかどうかを検査し、適正に分別されていない場合は住民に警告が出され、廃棄物を回収してもらえないこととなる。回収が定期的に行われていたため、市民はこうした発生源での分別・回収システムにおおむね協力的であったし、上層部からの支援や励ましにより、作業員たちは発生源で分別された廃棄物の回収を効果的に実施できた。この発生源での廃棄物の分別システムを導入したことで、堆肥化施設では常勤の作業員の数を減らすことができた。さらに、KUCの積極的な取り組みが評価され、PILISARUプロジェクトから堆肥化作業をサポートするスキッドステアローダー(小型のホイールローダーの一種)が寄贈された。

このパイロットプロジェクトの成功を受けて、KUCは2010年に、他の2つの区にもこの手法を拡大した。住民には、集会、ポスター、住宅地での告知などを通じて、この新しい回収手法についての情報を提供し、学校や公共/民間セクターの組織では正式な啓発キャンペーンも実施した。2014年には、生分解性廃棄物と非生分解性廃棄物の分別をサポートする目的で、再利用可能な収集袋が各家庭に配布された。2016年までに、KUCは市内全域で分別された廃棄物の回収・処理を開始した。KUCの住民コミュニティ全体がこの回収・処理



図34 ベル回収システムによる発生源での分別・回収
(Karunaratna, 2020)

スキームに慣れてくると、KUCは、仕事、取引、買い物などの目的で市にやってくる人々を対象とした戦略を展開した。

KUCが、NSWMSCや青年海外協力隊(JOCV)などの専門家の協力を受けると決めたことは、このスキームの実施に大きく貢献した。2009年以降、KUCは青年海外協力隊の派遣先となっており、彼らは適切な廃棄物処理の方法、発生源での分別された廃棄物の処分およびリサイクルの導入を進めるべく、コミュニティと協力している。

生分解性廃棄物のウインドロー堆肥化

環境保全センターの作業員は近隣のコミュニティから採用され、常勤幹部として勤務している。日々の運営には9名の作業員が従事しており、1名は堆肥販売所に配置され、1名はスキッドステアローダーの操作訓練を受けている。施設の全体的な管理は訓練を受けた監督者が担当しており、記録の維持にも責任を持っている。

廃棄物はまず6台の廃棄物回収トラクターで施設に運び込まれ、コンクリート床の上に降ろされる。その後詳しく検査され、生分解性のない廃棄物が混じっていれば手作業で取り除かれる。生分解性の廃棄物原料はローダーを使って木枠の中に積み込まれ、最大2mの高さまで少しずつ積み上げられる。積み上げられた廃棄物の高さは当初は約2mであるが、急速な分解と圧縮により、数日(最大1週間)で1.5m以下に低くなる(図35)。

新しい廃棄物の山の最初のウインドロー化は2週間後に行われ、その後は1週間ごとに行われる。ウインドロー処理中の重量廃棄物の運搬はすべてローダーによって行い、作業員は廃棄物の山を平らにならして均一に圧縮する。ウインドロー処理の間、特に10週間の初期分解の後で堆肥化中の山が成熟していく間に水を散布する。

廃棄物の山から出る浸出水は、コンクリート製の排水システムを経由して処理施設に送られる。乾季には浸出水が少なくなるため屋外のコンクリート床にも新しい廃棄物を積み上げることができるが、雨季には浸出水が大量に発生するため、作業は屋内に限られる。浸出水の処理施設は、ココヤシ皮の繊維でできたブラ



図35 木枠とスキッドステアローダーを使って堆肥化用原料を積み上げる様子 (Karunaratna, 2020)

シを使用した地元製のシステムで、生物膜式処理法を模倣したものである。浸出水処理システムには、家庭や施設から集められた未処理の下水も送られてくることから、廃水処理システムは、この2種類の廃水を一緒に処理したときに最善の機能を発揮するように設計されている。処理された廃水は、堆肥化施設で、ウインドロー処理中に散水が必要になったときに再利用される。

発酵済みの堆肥は、スリランカ政府が指定した標準サイズのトロンメルスクリーンを使って、ふるいにかけてられる。後工程のふるい分けで集められた残渣と一部の発酵済み堆肥は、送られてくる新しい廃棄物と混ぜられ、水分コントロールと嵩増しのために利用される。一方、少量の残渣、プラスチック粒子、不活性廃棄物は、準衛生埋立型の埋立地に投棄される。

堆肥製品と品質保証

堆肥の製造で最も難しいことは、最終製品の品質を安定的かつ適切に保つことである。運び込まれる廃棄物には、発生源で混入した、あるいは堆肥化施設での処理中に混入したかなりの量の微細な不活性の混入

物が含まれている。公共スペースや民間施設からの廃棄物には大量の土や砂が含まれており、これらは最終的に製造された堆肥の中に残ることになる。

砂の量が多いことを除けば、製造された堆肥は農業用堆肥としての品質基準をすべて満たしている。堆肥の品質検査（水分、砂の割合、pH、EC、N、P、K、Mg、OC、C/N比）は、少なくとも6カ月に一度、政府公認の研究所に堆肥サンプルを送って、定期的に行われている。この外部機関による品質検査の結果（図36）は買い手に公開され、製品の品質を保証するものとなる。こうした活動によって買い手の信頼を獲得し、堆肥の安定的な需要を維持できるようになる。

1. Physical Parameters									
Serial No.	Identification No.	Moisture (% d.w.b.)		Sand (%)					
OM-17-010A	Sample 01	33.6		32.3					
Important quality standards for compost (Sri Lanka Standards)		Not more than 25%		< 10					
2. Chemical Parameters									
Serial No.	Identification No.	pH (1:5 %)	EC (1:5 %) µS/cm	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	OC (%)	C/N Ratio
OM-17-010A	Sample 01	7.4	5710	1.05	1.19	1.26	0.324	12.2	11.7
				(P ₂ O ₅ = 2.46)		(K ₂ O = 1.51)		(MgO = 0.33)	
Important quality standards for compost (Sri Lanka Standards)		pH (1:5 %)	EC (1:5 %) µS/cm	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	Mg (%)	OC (%)	C/N Ratio
		8.5 - 8.5	-	1.0	0.5	1.0	0.5	20 - 25	10 - 25
THIS REPORT REFERS SPECIALLY TO THE TEST ITEM SUBMITTED.									

図36 堆肥品質の試験報告書のサンプル (Karunaratna, 2020)

環境的、経済的、社会的なメリット

KUCは環境保全センターのすべての財務記録を維持管理しており、毎年末に全体的な財務監査を実施して、センターの財務的な持続可能性を確保できるようにしている。年間約100トンの堆肥が製造されており、堆肥化施設での生分解性廃棄物の処理にかかる総運営コストは、2,289スリランカルピー（13.5米ドル）/トンとなるが、このコストの大部分は堆肥の販売によって回収されており、純粋な運用上の支出は289スリランカルピー（1.7米ドル）/トンに過ぎない。

こうした財務分析により、適切な堆肥化システムでは廃棄物処理にかかる費用の多くを堆肥の販売によって回収できるということが証明されている。堆肥化の社会的・環境的なメリットを考慮すれば、堆肥化スキームの全体的なメリットは、従来のオープンダンピングによる投棄をはるかに上回るものであることは明らかである。

堆肥化施設は、埋立地で処分される廃棄物量の削減というKUCの主な目標を達成した。KUCは環境保全センターの成功を活用し、クリヤピティヤを廃棄物ゼロの都市にすることを長期的なビジョンとしており、このビジョンを達成するための戦略が、リサイクルを推進し各家庭での堆肥化を奨励することを通じて、集中型の堆肥化施設の負担を減らすことである。

現在、KUCでは、準衛生埋立型の埋立地に投棄される廃棄物の量を大幅に削減できている。推定では、この堆肥化施設は1日あたり4.9トンの生分解性廃棄物を受け入れている。合計2.1トン/日に上る非生分解性廃棄物のうち約1.79トン/日が資源回収施設でリサイクル資源として回収され、0.32トン/日のみが準衛生埋立型の埋立地に投棄されている。残りの廃棄物は、家庭で作られた堆肥として自己処理されるか、非公式のリサイクル業者を通じてリサイクルされている。

この堆肥化施設は、近隣の9つの村に雇用の機会を作り出した。センターでは、勤務時間や残業時間を柔軟に設定できる独自の人材管理システムを採用しており、KUCは近隣の村から若くかつ教育を受けた作業員を集めることができ、週末や祝祭日でも施設を継続的に稼働させることが可能となっている。すべての作業員には、汚染物質から自身を保護するための個人用防護具が支給されており、さらに、すべてのスタッフは専門的な訓練を受けた上で、国家職業資格（NVQレベル2）を取得しなければならない。KUCでは、少なくとも年1回、全従業員を対象とした健康診断も実施している。

堆肥化施設は適切に管理されており、ハエや臭気の問題は最小限に抑えられていて、近隣のコミュニティにもメリットをもたらしている。現在、KUCでは、廃棄物の処分場での焼却だけでなく、市内での焼却も全面的に禁止している。

主な成果と教訓

KUCのケースは、小さな都市の廃棄物処理の問題の解決のために堆肥化システムと関連施設の導入を図ることで得られる成果を示している。このケースにおける大きな成果は、「集めて処分する」というシナリオから、都市廃棄物中に含まれる資源を回収・リサイクルする機能を持つ総合的廃棄物処理・処分施設の設置を通じて、「資源を回収する」というシナリオに転換したことである。

何よりもまず成功の鍵となったのは、KUCが廃棄物問題の長期的な解決策を見つけることに指導力を発揮したことであった。指導者は、従来の廃棄物処理から統合的な廃棄物管理に転換することを目的に適切なタイミングできわめて重要な決断を行った。KUCは小さな地方自治体であり実行に移す上で必要な財源や技術的な専門知識が限られていたため、外部の機会やリソースを探すこととしたのである。NSWMSOやPILISARUプログラムを通じた国からの財政的・技術的な協同支援により、KUCの廃棄物処理アクションプランの着実な進展と完全な実施が保証されることとなった。財政的・技術的支援が確保されると、KUCは3年間で達成可能な廃棄物の発生源での分別・回収に着手した。NSWMSOやPILISARUプロジェクトとの着実な連携により、KUCは事業拡大のための継続的なサポートを確保し、支援的な啓発活動を開始することができた。

得られた利益はすべての関係者と、特に作業員に分配されている。作業員は、センターの運営について各自が主体者としての責任感を持って臨むよう奨励されており、報酬が与えられるため、さらに貢献しようという意欲が高まる。

住民は廃棄物処理システムがより良い方向に変化していることを認識しており、街や最終処分場の衛生状態を維持するというKUCの使命を支持している。その見返りとして住民は、周到に準備された定期的な廃棄物回収システムの恩恵に浴している。

4.3 ハノイ市（ベトナム）

ハノイ都市環境公社（ハノイURENCO）は、スペイン政府からの資金援助を受けて、都市廃棄物から堆肥を製造する堆肥化施設をCau Dienに建設し、2002年に操業を開始した（図37）。さらに、堆肥化活動を推進するために、2006年から3年間、国際協力機構（JICA）の「循環型社会に向けたハノイ市の3Rイニシアチブの実施支援プログラム」を通じた技術支援を受けて、発生源での分別・回収プロジェクトを立ち上げている（Japan International Cooperation Agency et al., 2009；Taniguchi et al., 2011）。このプロジェクトでは、**4つのモテル地域の住民が有機性廃棄物（生分解性）と無機性廃棄物（非生分解性）を分別し、有機性廃棄物は別途収集・運搬されて堆肥化施設に送られた。**ハノイ市が作成したガイドラインによると、生分解性の食品廃棄物や園芸廃棄物は有機性廃棄物、それ以外の廃棄物（貝殻、鶏骨、ココナッツ殻など、非生分解性の食品廃棄物を含む）は無機性廃棄物として分類されている。紙や繊維、木材などは、一般的には有機性廃棄物に分類されるが、生分解に時間がかかるため、ハノイ市では無機性廃棄物に分類している。

発生源での分別・回収プロジェクトは、ホアンキエム区のファン・チュー・チンと、ハイバーチュン区のグエン・ズーで実施された。この地域は、700万人を超えるハノイ市の住民の約0.2%を占めており（ベトナム統計総局、2015）、一般家庭はもちろん、オフィスや店舗、レストラ



図37 堆肥化施設における好気性発酵
（ハノイ市、ベトナム）

ン、ホテルなどの事業者には、有機性廃棄物と無機性廃棄物を分別し、それぞれを指定の容器に捨てることが義務付けられている。

JICAプロジェクトでは、発生源での分別・回収プロジェクトについての情報や、有機性廃棄物と無機性廃棄物の適切な分別の仕方などが様々な方法を使って情報発信され、一般家庭に対してこのプロジェクトへの参加を促した。モテル地域内の全世帯とハノイURENCOの廃棄物収集業者には発生源での分別に関するガイドブックが配布され、廃棄物収集業者は、住民への指導もできるように、発生源での分別のインストラクターとしての訓練も受けた。住民グループのリーダーや世帯員を対象とした説明会が繰り返して開催され、発生源での分別に関する情報は、地元のラジオ局やコミュニティのメッセージボードを通じて伝えられた。ハノイ市では、地元のテレビ番組も、廃棄物の発生源での分別の習慣についての広報に協力した。

ハノイ市のモテル地域では、毎日18時から20時30分までの間に有機性廃棄物や無機性廃棄物を指定の廃棄物収集容器に捨てることとされた。住民の中には、ダストボックスを使う人もいれば、廃棄物処分用のポリ袋を使う人もいたが、いずれの場合も有機性廃棄物は緑色の容器に、無機性廃棄物はオレンジ色の容器に捨てられた（図38）、毎日、収集時間が始まる前に、ハノイURENCOの作業員によって、この2種類の容器が大通りに並べて設置された。

2009年にプロジェクトが終了した後モテル地域の



図38 有機性廃棄物用の容器（緑色）と無機性廃棄物用の容器（オレンジ色）（ハノイ市、ベトナム）

うち2つの地域でプロジェクトが継続されたが、JICAプロジェクトの完了後はどの参加機関も進捗状況をモニタリングしていない。

Kawai et.al. (2017) は、家庭での有機性廃棄物の発生源での分別に関する行動について、3つの主要な指標(参加率、適正分別率、適正排出率)を提案し、2014年8月にハノイ市のモデルプログラム地域の558世帯からサンプリングした家庭廃棄物の組成に基づいて、プログラムの進捗をモニタリングした。その結果、558世帯のうち13.8%が有機性廃棄物を分別しており、33.0%の世帯が混合(未分別)廃棄物を不適切に出していることが判明した。有機性廃棄物として回収された廃棄物の約41.5%(重量比)に無機性廃棄物が混入しており、住民が有機性廃棄物として処分した廃棄物の3分の1が無機性廃棄物であった。

現在、ハノイURENCOは有機性廃棄物の分別回収を行っておらず、混合廃棄物を回収し、そのすべてを埋立地に送っている。ハノイ市の路上に有機性廃棄物と無機性廃棄物を分別回収するための容器が置かれることはなくなった。ハノイURENCOは堆肥の需要が次第に減少したことから堆肥の生産を削減したようであり、最終的には有機性廃棄物として収集した廃棄物を堆肥化施設に送ることをやめてしまった。持続可能性を確保するためには、堆肥の継続的な需要を確保することがきわめて重要である。プラスチック片やガラス片は取り除くのが難しいため、堆肥化原料の質が悪ければ堆肥の品質にも悪影響が及ぶ。ほとんどの農家は、たとえ化学肥料より安価であっても、質の悪い堆肥を使うことには抵抗を感じるものである。

4.4 長井市

長井市は山形県にあり、人口は2万7千人である。長井市の農家の人々は化学肥料を長期間使用してきたことによって農地の土壌環境が悪化していることを認識しており、土壌環境を改善するには農地に有機肥料を使う必要があって、自分たちの家の台所で発生する食品廃棄物を有機肥料の原料にできると考えた。長井市は、住民提案に基づく環境にやさしい農業の確立を支

援した。その結果、現在ではこれまで地元の焼却場で処理されていたその他の可燃性廃棄物が混ざった食品廃棄物が市内の約5,000世帯から回収され、堆肥化施設(1日あたり9トンの食品廃棄物を処理可能)でもみ殻や牛糞を使用して有機肥料を製造するのに使われている。堆肥化システムにより可燃性廃棄物が30%削減され、年間400トンの有機肥料が製造されるようになった。製造された堆肥はすべて地元の農家に配布され、栽培された作物は地元で販売・消費されている。本ガイドラインには、長井市でこうした堆肥化システムが構築されるまでの経緯が紹介されており(田崎ら, 2016)、堆肥化システムの構築を検討している他の自治体にとっても参考になると考える。

1984年、地域住民の参加を促した長井市長の提案を受けて住民で構成されるまちづくりデザイン会議が設置され、市の次期基本計画が協議されて、農業分科会が発足した。他の地域の事例を調査し、有機肥料として使用できる堆肥を食品廃棄物から製造する方法を見つけ出した。農業分科会では、家庭から出る食品廃棄物の収集と、生産された堆肥の農地での使用を通じた堆肥化システムの開発推進のための提言をまとめ、市長はこの提言を農業の未来に関する新しい基本計画の一部として採用した。

農業分科会のメンバーとして参加した住民たちを構成員とするいいまちデザイン研究所が立ち上がり、農家、商工会議所、婦人会のメンバーに参加を呼びかけた。研究チームは市長と交渉し、基本計画での提言を実現するための研究に、資金援助を受けることとなった。研究チームのメンバーは、家庭からの食品廃棄物の分別収集方法、様々な種類の堆肥化、堆肥の利用方法など、持続可能な廃棄物処理に関するその他の活動について調査を行い、食品廃棄物の堆肥化に関する最終報告書をまとめて市長に提出した。

調査結果に基づき、研究チームは食品廃棄物の堆肥化の実現可能性について、独自に分析を行った。調査チームのメンバーは婦人会に実現可能性調査への協力を依頼し、自宅や飲食店で食品廃棄物の分別を開始した。食品廃棄物の回収コンテナが2つの地域に設置され、週に2回、食品廃棄物がこれらのコンテナに集められた。分別された食品廃棄物は研究チームによ

て収集され、地元の畜産農家にある堆肥舎に運ばれ、牛糞と混ぜられて、好気性発酵が行われた。調査チームのメンバーである農家の人々は、この堆肥を活用して野菜を育て、食品廃棄物の分別に協力してくれた家庭に配布した。この実現可能性調査は2年間に渡って行われ、調査に必要となった消耗品の購入や食品廃棄物の収集用トラックの借り上げのために、助成金が支給された。

研究チームの活動に興味を持った人たちが、長井市の食品廃棄物堆肥化施設を訪れるようになった。市長は、市の担当課に市内での食品廃棄物の堆肥化に関する活動を拡大するよう指示し、他の関連部署は必要なデータを提供・共有して、この活動を紹介するための市民への啓発活動を実施した。また、長井市の関連部署と連携して、プロモーションチームが立ち上がった。

長井市は研究チームと連携して、モデル地域での食品廃棄物の分別回収に関する実現可能性調査を正式に開始した。担当課が予算を獲得し、研究チームが実現可能性調査を実行した。実現可能性調査のためには協力世帯を増やす必要があったため、婦人会が研究チームと協力して、住宅地の協力世帯を100世帯を増やした。試行錯誤の末、ユーザーからのフィードバックに基づいて、家庭で食品廃棄物を保管し回収ボックスまで運ぶためには、バケツ(図39、40)が最適であるとの結論に達した。長井市担当課は、食品廃棄物の堆肥化に対する住民の関心の高さを認識し、モデル地域での実現可能性調査を経て、堆肥化の本格的な実施を最終決定した。

長井市は、研究チームと共同で、堆肥化施設の建設・運営および堆肥を使った有機農業の推進のための事業計画を策定する取り組みを始めた。日本の他地域における食品廃棄物の堆肥化の優れた事例を調査したところ、堆肥の需要を確保することの重要性が指摘されていた。また、こうした優良事例では、堆肥を使用することのメリットをユーザーに示すことの重要性も示唆されていた。この調査をもとに、市は中心部の住宅地からのみ食品廃棄物を回収することとした。長井市の農村部の家庭は食品廃棄物を自分たちで処理していたこと、農村部から食品廃棄物を輸送するのは非効率的であったことによるものである。

長井市は、堆肥化計画に基づき、農林水産省の補助金を受けて堆肥化施設を建設した(図41)。堆肥化施設では、畜産農家から出る牛糞と、米農家から出るもみ殻を、食品廃棄物と混ぜ合わせて使用している。



図39 収集拠点でバケツを使って食品廃棄物を出す様子



図40 収集容器に排出される食品廃棄物



図41 堆肥化施設(長井市)

食品廃棄物、牛糞、もみ殻の混合割合は、試行錯誤しながら変化・改善していった。市の担当課は、研究チームのメンバーと共に、食品廃棄物の分別回収が継続的に行われている地域を訪問し、初期段階の活動のプロモーションやモニタリングを行った。研究チームのメンバーは、将来の健全な環境づくりのためには食品廃棄物の発生源での分別が必要であることを丁寧に説明し、地域の人々に、家庭での食品廃棄物の分別に協力してもらえよう依頼した。研究チームのメンバーは、堆肥化施設で生産された堆肥の活用に尽力した。

研究チームは、堆肥を使用する農家の数をいかに増やすかという課題に直面した。その解決策として、堆肥を使った栽培方法のガイドラインを作成し、そのガイドラインに沿って生産された作物を認証する制度を構築し、市の担当課に認証窓口を設置した。この制度では、農産物に、認証製品であることを示す特別なラベルが付けられる(図42)。研究チームのメンバーは、農家や住民を対象に、食品廃棄物の堆肥化や認証制度についての説明会を開き、また研究チームは、地元の商工会議所のネットワークと協力して、認証された農産物を使用する店やレストランの数を増やす努力も重ねた(図43)。

長井市では、地元の農作物を消費するために、学校給食での使用を推進する方針を打ち出した。市の担当課では、市内の学校給食に認証米や認証野菜を使用することを、教育委員会と交渉した。認証を受けた農作物を学校給食に提供している農家は、生産された堆肥の使用量を増やし、その結果、堆肥の需要が増加した。市は、食品廃棄物の堆肥化による学校給食への影響を住民に知らせる啓発活動を開始し、家庭での食品廃棄物の分別に一層の努力をするよう住民に呼びかけた。長井市と研究チームは、農産物の地産地消を拡大した功績から県から表彰を受けた。



図42 認証製品のラベル



図43 堆肥で育てた野菜の地元市場での販売

5 結論と提言

堆肥化は、有機性廃棄物を生物学的に処理し、土壌環境を化学的、生物学的、物理的に改善する有機肥料である堆肥を生産することを目的としている。**堆肥化は、開発途上国の埋立地に処分される都市廃棄物の量を減らすのに役立ち、ユーザーが必要とする堆肥を生産することで、環境への影響を大幅に軽減する。また、堆肥化は埋立地からのメタンガスの排出を減らし、カーボンフットプリントを軽減する。さらに、家庭やコミュニティベースでの堆肥化は、ユーザーに明確な社会的・経済的なメリットをもたらすことができる。**

堆肥化プロジェクトは、埋立に代わる処理システムを求めている都市や地域に強く推奨される。ただその都市や地域は、堆肥化に向けての良質な原料を分別収集し、十分な堆肥需要を確保し、堆肥化施設を何十年にもわたり運営するための十分な予算を確保できなければならない。また、都市や地域には、堆肥化プロジェクトを持続可能なものにするために、十分なレベルのマンパワーと制度・組織的能力が必要である。

堆肥には、品質に悪影響を及ぼす可能性のある非生分解性廃棄物や有害廃棄物などの異物や汚染物質が含まれてはならない。本ガイドラインは、堆肥化用の良質な原料を供給し、高品質の堆肥を製造するためには、有機性廃棄物の分別収集が不可欠の要素であると断言する。有機性廃棄物の分別回収と運搬について住民にはいくつかの選択肢があり、**高品質の廃棄物のみが収集されるよう、地域の状況及び詳細な実現可能性調査に基づいて、最適の選択肢を採用する必要がある。**

堆肥化システムには地元農家などの堆肥の利用者が必要であり、彼らには計画の初期段階から参加してもらって、その意見をシステムに反映させる必要がある。恒常的に堆肥を使用する地元農家の参加がなければ、埋立地に処分される廃棄物の量を減らし、廃棄物処理を合理化するという自治体の目標を達成することはできない。

参考文献

- Amir S., Hafidi M., Merlina G., Revel J.C. (2005) Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere*. 59: 801-810.
- Arthurson V. (2008) Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society. *Applied and Environmental Microbiology*. 74: 5267-5275.
- Bagchi A. (2004) Design of landfills and integrated solid waste management, Third edition. New Jersey, US. John Wiley & Sons, Inc.
- Cerda A., Artola A., Font X., Barrena R., Gea T., Sánchez A. (2018) Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*. 248: 57-67.
- Diaz L.F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E. (2007) Compost science and technology. Waste management series 8. Oxford, UK. Elsevier Ltd.
- Dziejowski J.E., Kazanowska J. (2002) Heat production during thermophilic decomposition of municipal wastes in the Dano-system composting plant. In: Insam H., Riddech N., Klammer S. (eds) *Microbiology of Composting*. Berlin, Germany. Springer.
- Elango D., Thinakaran N., Panneerselvam P., Sivanesan S. (2009) Thermophilic composting of municipal solid waste. *Applied Energy*. 86: 663-668.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2011) Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019) The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. Italy. <http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- 藤田賢二 (1993) コンポスト化技術廃棄物有効利用のテクノロジー 技報堂出版
- General Statistics Office of Vietnam (2015) Statistical Yearbook of Vietnam 2014. Hanoi, Vietnam. Statistical Publishing House.
- Getahun T., Nigusie A., Entele T., Van Gerven T., Van der Bruggen B. (2012) Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling*. 65: 79-84.
- Gilby S., Hengesbaugh M., Gamaralalage P.J.D., Onogawa K., Soedjono E.S., Fitriani N. (2017) Planning and implementation of integrated solid waste management strategies at local level: the case of Surabaya city. IGES Policy Brief 1–16. <https://iges.or.jp/en/pub/planning-and-implementation-integrated-solid-1/en>
- Hargreaves J.C., Adl M.S., Warman P.R. (2008) A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 123: 1-14.
- Hermann B.G., Debeer L., De Wilde B., Blok K., Patel M.K. (2011) To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. *Polymer Degradation and Stability*. 96: 1159-1171.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, Japan. Institute for Global Environmental Strategies.
- 岩田進午、松崎敏英 (2001) 生ごみ堆肥リサイクル 家の光協会
- Japan International Cooperation Agency, Yachiyo Engineering Co., Ltd and Nippon Koei Co. Ltd (2009) Project completion report, the project for implementation support for 3R initiative in Hanoi City to contribute to the development of a sound material-cycle society in the Socialist Republic of Vietnam. Tokyo, Japan. Japan International Cooperation Agency.
- 日本土壌協会 (2014) 図解でよくわかる土・肥料の基本 誠土堂新光社
- Kamuk B. (2013) ISWA guidelines: Waste to energy in low and middle income countries. Vienna, Austria. International Solid Waste Association (ISWA).
- Kaneko H., Fujita K. (1986) The moisture limit for optimum composting. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. 369: 303-309. (in Japanese)
- Karunaratana A., Rajapaksha T., Singh R. K., Hayashi M., Premakumara D. G. J. and Onogawa K. (2020) Case studies on good practices in waste management in Sri Lanka - Municipal Solid Waste Composting -. IGES publication.
- Kawai K., Huong L.T.M. (2017) Key parameters for behaviour related to source separation of household organic waste: A case study in Hanoi, Vietnam. *Waste Management & Research*. 35: 246-252.
- Kawai K., Huong L.T.M., Yamada M., Osako M. (2016) Proximate composition of household waste and applicability of waste management technologies by source separation in Hanoi, Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 18: 517-526.
- Kumar M., Ou Y.L., Lin J.G. (2010) Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*. 30: 602-609.
- Maeda T. (2009) Reducing waste through the promotion of composting and active involvement of various stakeholders: Replicating Surabaya's solid waste management model. Policy Brief #9 December 2009.
- Mao I.F., Tsai C.J., Shen S.H., Lin T.F., Chen W.K., Chen M.L. (2006) Critical components of odors in evaluating the performance of food waste composting plants. *Science of the Total Environment*. 370: 323-329.
- McDougall F.R., White P.R., Franke M., Hindle P. (2001) *Integrated solid waste management: a life cycle management (2nd edition)*. Oxford, UK. Blackwell Publishing Ltd.
- Mutz D., Hengevoss D., Hugi C., Gros T. (2017) *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management—A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*. Bonn, Germany. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Nakakubo T., Tokai A., Ohno K. (2012) Comparative

- assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery. *Journal of Cleaner Production*. 32: 157-172.
- Onwosi C.O., Igbokwe V.C., Odimba J.N., Eke I.E., Nwankwoala M.O., Iroh I.N., Ezeogu L.I. (2017) Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*. 190: 140-157.
- Pires A., Martinho G. (2019) Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Management*. 95: 298-305.
- Premakumara D.G.J., Abe M. and Maeda T. (2011) Reducing municipal waste through promoting integrated sustainable waste management (ISWM) practices in Surabaya city, Indonesia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 144: 457-468.
- Rand T., Haukohl J., Marxen U. (2000) *Municipal solid waste incineration: a decision maker's guide* (English). Washington, D.C., US. The World Bank.
- Scaglia B., Orzi V., Artola A., Font X., Davoli E., Sanchez A., Adani F. (2011) Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability. *Bioresource Technology*. 102: 4638-4645.
- Sundberg C., Yu D., Franke-Whittle I., Kauppi S., Smårs S., Insam H., Romantschuk M., Jönsson H. (2013) Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting. *Waste Management*. 33: 204-211.
- Taniguchi Y., Yoshida M. (2011) Public involvement and mobilization for promoting 3R initiative in Hanoi city: Lessons from 3R initiative project in Hanoi city 2006–2009. In: *proceedings of the 8th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific islands (SWAPI)*, Tokyo, 21–23 February 2011, 57–64.
- 田崎智宏、稲葉陸太、河井紘輔、小島英子、小澤(遠藤)はる奈 (2016) 物語で理解するバイオマス活用の進め方～分別・リサイクルから利用まで～
- Teigiserova D.A., Hamelin L., Thomsen M. (2020) Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss: Clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. *Science of the Total Environment*. 706: 136033.

CCETガイドラインシリーズについて

CCETは国連環境計画 (UNEP)、国際環境技術センター (IETC)、および日本の環境省 (MOEJ) と連携して、開発途上国の国、地域、自治体に、廃棄物処理戦略の策定と実施に関する技術支援を提供している。CCETの活動を通じて廃棄物処理の問題は、開発途上国においてより複雑であることが明らかになったが、これは開発途上国では急激な都市化が進行しており、これが廃棄物の量と種類 (危険薬品、水銀や鉛などの金属を含む) の増加につながっている一方、現実的な長期計画のための法制度や政策、限られた廃棄物の回収と適切な処分の欠如、非合法なごみ回収、不十分な資金、国民の意識の低さなど、適正な廃棄物処理を持続的に行う能力が欠如していることによるものである。また、持続可能な廃棄物処理に関する知識が不十分なことから、不適切な技術や機器が多数導入されている。このため、政策立案者や実務者があらゆる廃棄物処理技術に関する明確かつ包括的な見方ができるように、正確な情報を提供することが求められている。

CCETガイドラインは、政府が直面しているそれぞれの課題に対処するため、最適な答えによって組み立てられるパズルのピースのような役割を果たす技術をシリーズで提供している。ある地域にとってどの技術が適切かという問題に普遍的に正しいまたは間違っている答えはないということは、広く理解されている。解決策は地域に合わせて構想し、現地のニーズや状況に合わせて調整す

る必要がある。市民や関係者は、様々なサービスの設計に関与する必要がある、これらのサービスは、妥当なコストで提供される必要がある。CCETガイドラインシリーズは、つなげることでデザインがはっきりと見えてくるパズルのピースのように、戦略や行動計画を策定するための、知識に基づく支援を提供するものである。

本ガイドラインシリーズは、国や地域レベルの政策立案者・実務者が適切な廃棄物処理技術を選択し、関係政策を実施して廃棄物処理を改善する際の参考となることを主な目的としている。CCETではこれまで、堆肥化、機械的・生物学的処理 (MBT)、嫌気性消化 (AD)、廃棄物発電 (焼却) など、基本的な中間処理技術に焦点を当てており、本ガイドラインシリーズは、以下を特徴とする。

- (1) 明確かつ簡潔で包括的な説明を提供し、最適な選択肢を一目で、容易に特定できる、使いやすい知識志向の製作物であること。
- (2) 3R、廃棄物処理のヒエラルキー、循環型経済の概念に基づき、「廃棄物処理の観点」ではなく「資源の有効利用の観点」から策定。
- (3) リカバリー、処分、リサイクルの物理的 (技術的) な要素だけでなく、管理や市民の意識と参加、社会参加を促すための制度・組織的側面や財務的側面などの「ソフト」面にも対応。
- (4) グッドプラクティスの具体例の提供。



United Nations Avenue, Gigiri
PO Box 30552, 00100
Nairobi, Kenya
電話 : +254 (0)20 762 1234
Eメール : unenvironment-info@un.org
www.unep.org

経済部門
国際連合環境計画
国際環境技術センター
〒538-0036 大阪市鶴見区緑地公園2-110
TEL: 06-6915-4581
Eメール : ietc@un.org
www.unep.org/ietc



国立研究開発法人 国立環境研究所
〒305-8506
茨城県つくば市小野川16-2
www.nies.go.jp



公益財団法人
地球環境戦略研究機関

IGES-UNEP 環境技術連携センター (CCET)
〒240-0115
神奈川県葉山町上山口 2108-11
TEL: 046-855-3840
www.ccet.jp