

# 機械的・生物学的処理

製品(非廃棄物)  
↑  
↓  
廃棄物

発生抑制

再使用のための準備

リサイクル

リカバリー

処分



社会情勢



市民の意識と  
住民の協力



制度・組織的  
側面



管理能力



財政的側面



技術的側面

## 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： 機械的・生物学的処理

### 著者

石垣智基 (国立環境研究所：NIES)、  
劉晨 (地球環境戦略研究機関：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調整

Premakumara Jagath Dickella Gamaralalage (IGES)、小野川和延 (IGES)、堀田康彦 (IGES)、辰野美和 (IGES)、井上美紀 (IGES)、本多俊一 (国連環境計画国際環境技術センター：UNEP IETC)、Keith Alverson (UNEP IETC)

### 査読者

廃棄物資源循環学会 (JSMCWM) 会員：松藤敏彦 (北海道大学)、川崎幹生 (埼玉県環境科学国際センター)、Chart Chiemchairi (カセサート大学)、Dong-Hoon Lee (ソウル市立大学)、西山徹 (IGES)

### 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も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：  
**機械的・生物学的処理**

2020年10月

# 目次

略語一覧	ii
この機械的・生物学的処理ガイドラインについて	iii
<b>1. はじめに</b>	<b>1</b>
1.1 機械的・生物学的処理 (MBT) の定義	1
1.2 MBTの歴史的背景と主な特徴	2
1.3 アジアの開発途上国の都市にとっての可能性と課題	4
<b>2. 持続可能なMBTのための前提条件 (RDF／SRF)</b>	<b>6</b>
2.1 社会情勢	8
2.2 市民の意識と住民の協力	9
2.3 制度・組織的側面	10
2.4 管理能力	10
2.5 財政的側面	11
2.6 技術的側面	12
<b>3. 主な技術</b>	<b>13</b>
3.1 一般的な技術的要件	13
3.2 アジアの開発途上国における一般的なMBTのプロセス	15
<b>4. 持続可能性および関連する国際問題</b>	<b>17</b>
4.1 温室効果ガスと気候変動	17
4.2 SDGs	17
<b>5. MBTの実例</b>	<b>18</b>
5.1 ピッサヌローク (タイ)	18
5.2 ナーシク (インド)	20
5.3 ラヨーン (タイ)	23
5.4 三豊	25
<b>参考文献</b>	<b>27</b>
CCETガイドラインシリーズについて	28

## 略語一覧

BOO	Build-Own-Operate	建設-運営-移転 (BOO)
CLO	Compost-like Output	コンポスト様生成物
GHGs	Greenhouse Gases	温室効果ガス
GIZ	German Society for International Cooperation	ドイツ国際協力公社 (訳注：2011年にドイツ技術協力公社 (GTZ)、国際再教育開発公社 (InWEnt) およびドイツ開発サービス公社 (DED) の3機関を再編統合して発足)
GTZ	German Technical Cooperation Agency	ドイツ技術協力公社 (GIZの前身)
MBT	Mechanical-Biological Treatment	機械的・生物学的処理
MSW	Municipal Solid Waste	都市廃棄物
NIMBY	Not In My Backyard	嫌悪施設
PFI	Private Finance Initiative	民間資金主導
RDF	Refuse Derived Fuel	廃棄物由来の固形燃料 (SRFと区別せずに使用)
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SRF	Solid Recovered Fuel	廃棄物由来の固形燃料 (RDFと区別せずに使用)

# この機械的・生物学的処理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前提に、主として一般廃棄物と産業廃棄物である都市廃棄物(MSW)の機械的・生物学的処理(MBT)技術に焦点を当てている<sup>1</sup>。本ガイドラインは、国、都市レベルの意思決定者および政策立案者、ならびにエネルギーブランドなどの関係者、また代替燃料の供給源を探している製造業者が廃棄物処理の改善に役立つ適切かつ戦略的な選択肢としてのMBT技術の導入の実現可能性についての検討を支援することを目的としている。本ガイドラインは、

- (1) MBT技術についてその**長所と短所**を含め**全体像が理解できる**ようにするとともに、持続可能なMBT施設を計画する上での**技術的および非技術的側面**について説明し、
- (2) MBT技術の導入可能性を検討する際に、基準を客観的に判断および評価するための意思決定プロセスにおける**主要評価基準と事前チェックフロー**を提案する、ものである。

## 廃棄物ヒエラルキーにおけるMBTの位置付け

MBT技術の導入は廃棄物処理のヒエラルキー(Pires他 2019)(図1)に則って行われる必要があり、廃棄物削減上での発生防止、再利用、リサイクルの順に重点が置かれることとなる。廃棄物処理の流れを評価し、廃棄物を削減、再利用、リサイクルするための一層の可能性を明確にすることも、都市廃棄物処理の意思決定プロセスにおける重要なポイントである。MBTは、リサイクルできない都市廃棄物の残存物からエネルギーを回収し、化学的に、または追加のエネルギープロセス

スに資源を使用することを可能にするという補完的な技術の一種に分類される。このためMBT技術の施策は、廃棄物の削減、再利用、および資源リサイクルの施策と競合するものであってはならない。

また、MBT技術は、**機能的な都市廃棄物処理システムの数ある要素の中の一つの要素であるに過ぎず**、MBT技術だけで既存の廃棄物問題を解決することはできない。従って、適切な技術としてMBTを選択するかどうかの決定は、それぞれの都市や国の総合的な都市廃棄物処理計画に基づいて行われるべきである。

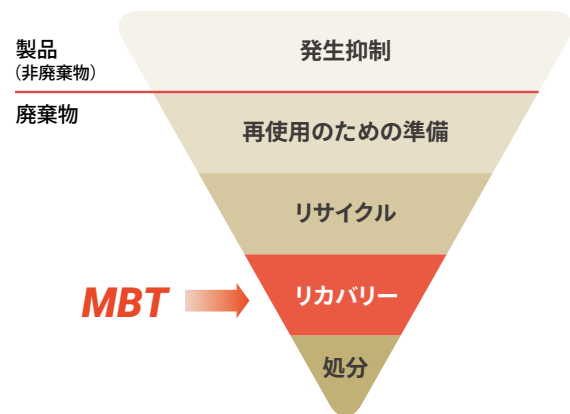


図1 持続可能な廃棄物処理のための廃棄物ヒエラルキー  
(出典：EU廃棄物枠組指令<sup>2</sup>)

## 本ガイドラインの考え方と構成

本ガイドラインは5つの主要パートから構成されている。第1章の「はじめに」では、MBT技術の概念とその歴史やメリット、課題についての基本的な情報を提供している。第2章の「持続可能なMBTのための前提条件」では、MBT施設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し、持続可能なMBT施設のための事前チェックの枠組みを提供している。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

1 CCETガイドラインにおける「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://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>

の意識と住民の協力、制度・組織的側面、管理能力、財政的側面など、非技術的なものも含まれる。[第3章](#)の「主な技術」では、MBT施設のプロセスで使われる主要な技術を解説しており、[第4章](#)の「持続可能性および関連する国際問題」では、SDG、温室効果ガス、また世界的に影響を及ぼしている諸問題に言及する。[第5章](#)の「MBTの実例」では、先進国・開発途上国の双方から実際の事例を取り上げる。

## 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、MBT技術の一般的な知見を得ることができる。MBT技術の導入可能性を検討している読者は、[7ページの図5](#)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。MBT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 機械的・生物学的処理 (MBT) の定義

機械的・生物学的処理 (MBT) は、投棄される廃棄物の量を削減するために埋立前に行う事前の処理手法である<sup>3</sup>。MBTでは、文字通り機械的な破碎・選別プロセスと、生物学的処理 (好気性・嫌気性分解など) を組み合わせて処理を行う (図2)。MBTは、**廃棄物処理という観点からは、系統的分別がされていない家庭から出る未分別の廃棄物にも適用できるというメリットがある**。MBT施設では、様々な目的のため多数のプロセスを様々な組み合わせで利用することができる<sup>4</sup>。**資源の観点からは、廃棄物由来の固形燃料 (RDF/SRF)<sup>5</sup>の生産にもMBTを用いることができ、選別プロセスにより金属などのリサイクル資源を回収できるメリットもある<sup>6</sup>。**また、嫌気性消化によってバイオガスも回収できる。嫌気

性消化プロセスによって生成される発酵残渣に加えて、好気性プロセスからはコンポスト様生成物 (CLO)<sup>7</sup>として知られる安定した有機の最終生成物が得られる。**発酵残渣とCLOはいずれも土壌の有機物資源として、あるいは埋立覆土の修復材として使用できる場合がある**。また、**裏込め材や骨材などの建材としても再利用できる**。SRFは、欧州規格EN15359およびISO (TC300) の開発規格に準拠した、非有害廃棄物から生成された燃料である。RDFに関しては国際的な公式の定義はなく、燃料として使用できる可能性のある発熱性廃棄物を指す総称である。ただしRDFに関して基準や規則を設けている国もいくつかあり、2020年現在ISOにおいてSRFの定義が議論されている最中である。そのため、本ガイドラインでは両者を区別せず**RDF/SRF**と表記している。なお、習慣に従って、燃料の実際の名称を記載する場合もある。

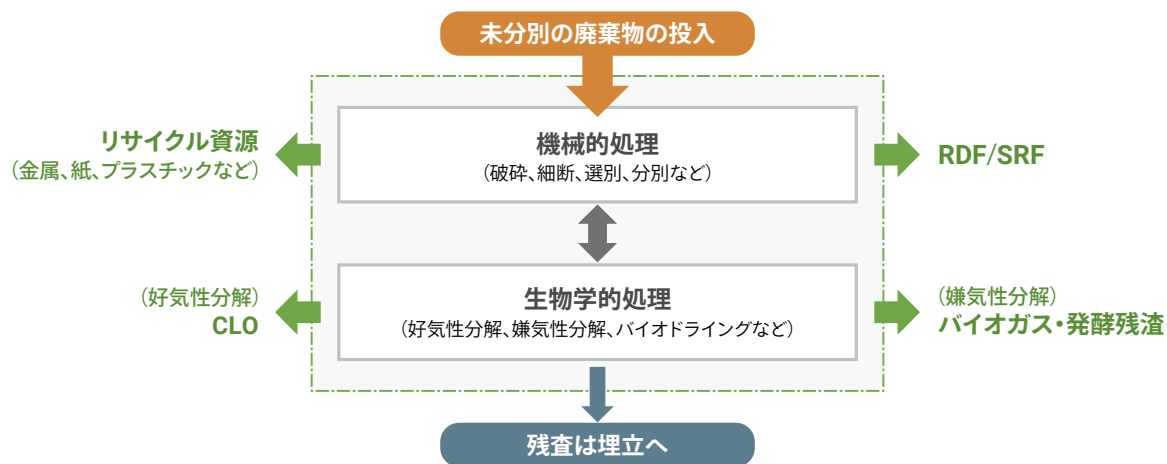


図2 MBTの主要プロセスの一般的なフローチャート

- 3 Barbara Zeschmar-Lahl, Johannes Jager, Ketel Ketelsen (2000) Mechanisch-biologische Abfallbehandlung in Europa, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin. ISBN:978-3826332616
- 4 Stephanie, Thiel and Karl Joachim, Thomé-Kozmienski (2010) Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste – Hope and Reality <https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanical-Biological-Pre-Treatment-of-Waste-%E2%80%93-Hope-Joachim-Thom%C3%A9-Kozmienski/9276c3979654efac29c2aaae4182e85d4db512d2>
- 5 European Waste Catalog (EWC) においてRDFというカテゴリは、機械的処理によって生成された可燃性の廃棄物画分として定義されている。混乱を避けるため、SRFという略語はMBTによって生成された固形燃料を指すために使用する。
- 6 Department for Environment, Food & Rural Affairs, UK, (2013) Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste
- 7 CLOは「安定化したバイオ廃棄物」または「土壌改良剤」と記載されることもあるが、これらは廃棄物の分別回収によって得られたコンポストや、より汚染レベルが低く幅広い最終用途に使用できる「土壌改良剤」と同一のものではない。



## 1.2 MBTの歴史的背景と主な特徴

当初、MBTは埋立前に廃棄物を事前処理するための手段として導入された<sup>8</sup>。MBT技術の開発が推進された主な背景としては、埋め立てられる廃棄物の品質に対して様々な制限があったことや<sup>9</sup>、埋立前の適切な事前処理技術に対する議論、および埋立処分のコストの増加などがあった。最初のMBT施設は、埋め立てられる残余廃棄物からの環境への影響を低減する目的で、ヨーロッパで開発された<sup>10</sup>。残余廃棄物はリサイクルに適さない廃棄物の未分別の物であって多種多様な組成・特性<sup>11</sup>を有しており、発生源分別の過程において特定のカテゴリに分類されないものである。従って、都市から出る未分別の廃棄物に対してMBTを適用することは、アジアの開発途上の都市部において有望とみなされており、これにより都市はリサイクル率を改善し、埋立地の耐用年数を延長する手段を獲得できる。

また、MBTプロセスは他の廃棄物処理プロセスよりもエネルギー消費量が少なく、エネルギーを節約しつつ、廃棄物量を減らすことができる<sup>12,13</sup>。加えて、機械的分別や生物学的処理は高度な技術やハイエンドの機械に依存する必要はない<sup>14</sup>。MBTプロセスを地域の廃棄物事情に適合させるためにも、リバース・イノベーション<sup>15</sup>を含む現地で利用可能な技術を使用することが推奨される<sup>16</sup>。自治体および関係者は廃棄物処理を改善するための政策措置を実施するに当たって予算的・財政的制約を抱えており、導入される技術はこれら

の視点からも好ましいものでなければならない。

さらに、MBTシステムは他の廃棄物処理技術<sup>17</sup>を補完することにより、埋め立てられる廃棄物の量を減らし、同時にリサイクルのパフォーマンスを向上させ（RDFを除く）、生分解性廃棄物を回収するなど、いくつかの異なる目標を達成することができ、これらを通じて、地域の廃棄物処理インフラにとって不可欠な機能を受け持つ。MBTの代表的な目的には、以下のものが含まれる。

- 埋め立てられる廃棄物を削減する
- 埋め立てられる非生分解性・生分解性の都市廃棄物を機械的に選別することにより、リサイクル資源として、あるいはエネルギー回収のためのRDFやSRFなどの廃棄物由来の固形燃料に転換する
- 埋立に先立って、生分解性都市廃棄物の乾燥質量を減らすか、都市廃棄物の生分解可能性を減少させることで、埋め立てられる生分解性都市廃棄物を減らす
- 廃棄物をCLOへ安定化させ、土壌に使用する
- 廃棄物を可燃性のバイオガスへ変換し、エネルギーを回収する
- 資源を乾燥させて発熱性が高く有機物を豊富に含む画分を製造し、RDF/SRFとして使用する

表1に、様々な観点から見たMBTの主なメリット、デメリット、要件についての要約を示す。

8 Barbara Zeschmar-Lahl, Johannes Jager, Ketel Ketelsen (2000) Mechanisch-biologische Abfallbehandlung in Europa, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin. ISBN:978-3826332616

9 The Council of the European Union (1999) Council Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste, Official Journal of the European Communities, L182,16/07/1999, pp1-19

10 Joern Heerenklage, Rainer Stegmann (1995) Overview of mechanical-biological pretreatment of residual MSW, Proceedings Sardinia 1995, fifth international landfill symposium, pp 913-925

11 Eunomia Research & Consulting (2002) Economic Analysis of options for managing biodegradable municipal waste, Final Report to the European Commission [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/compost/econanalysis\\_appendices.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/compost/econanalysis_appendices.pdf)

12 Eunomia Research & Consulting (2002) Economic Analysis of options for managing biodegradable municipal waste, Final Report to the European Commission [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/compost/econanalysis\\_appendices.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/compost/econanalysis_appendices.pdf)

13 Kardono, Agung Riyadi, Widiatmini Sih Winanə, Wahyu Purwanta, Annex 1-3 Technology factsheets waste sector, Mechanical-biological treatment (MBT), Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation 2012

14 Klaus Fricke, Heike Santen, Rainer Wallmann (2005) Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment. Waste Management 25, 799-810

15 リバース・イノベーションは「トリクルアップ・イノベーション」とも呼ばれ、開発途上国で最初に開発または使用され、後に先進国にも普及した技術または習慣のことを指す。

16 Maria Chiara Di Lonardo, Francesco Lombardi, Renato Gavasci (2012) Characterization of MBT plants input and outputs: a review. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 11, 4, 353-363

17 Matthias Kuehle-Weidemeier (2015) Waste to Energy and Re-sources, More Sustainability by Mechanical Biological Treatment (MBT) [http://giecdn.blob.core.windows.net/fileuploads/file/kuehle-weidemeier\\_mbt1.pdf](http://giecdn.blob.core.windows.net/fileuploads/file/kuehle-weidemeier_mbt1.pdf)

表1 MBT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*
廃棄物	1. 埋め立てられる廃棄物の量を減らす	1. MBTプロセスによって分別される乾燥リサイクル資源は品質が低い	1. 固形燃料やCLOとして不適格な残渣の管理が必要
技術	1. 既存の技術と組み合わせて使用できる可能性が高い 2. 高度な技術やハイエンドの機械は不要 3. 分別前の嫌気性消化やバイオドライングを行うことにより、水分を含む都市廃棄物に適応	1. 粗大ごみ、液体廃棄物、尿尿には不適	1. 含水率が高いアジアの廃棄物や有機性廃棄物に対処するため、乾燥および分別プロセスの適用が不可欠 2. 異物を取り除き効率を向上させるため、初期段階での廃棄物選別プロセスが必要
経済的側面	1. 集約的で、低エネルギーの手段 2. RDF/SRFの利用者にとって燃料費を節約 3. CLOを土壌改良剤または裏込め材として使用できる可能性 4. リサイクル資源、RDF/SRF、CLO、バイオガス市場への受け入れが可能	1. RDF/SRFの消費量は、燃料価格と産業分野の状況に依存 2. アジア市場における産業分野のRDF/SRF消費者層は限定的、不適格RDF/SRFの過剰在庫が発生するリスク、または投棄される廃棄物量の増加 3. CLOを使用するメリットが少ない	1. RDF/SRFの販売経路を複数確保することが重要 2. 貴金属やCLOの販売によって得られる利益が処理費用を上回る期待 残渣はCLOとして使用できる可能性があるものの、処分にコストがかかる
公衆衛生	1. 投棄処分よりも感染性・毒性が少ない	1. 熱処理やコンポスト処理と比べて、廃棄物の消毒が効果的でない	1. 非有害廃棄物について原料を規制および検査することが重要
環境	1. 埋め立て地からの環境汚染が少ない 2. 資源とエネルギーを効率的に回収でき、土壌、金属、燃料などの天然資源の保全に役立つ	1. 騒音、振動、粉塵が発生する可能性や、廃棄物の量を考慮する必要 2. RDF/SRF消費者による、潜在的な大気汚染物質の排出	1. 非有害廃棄物について原料を規制および検査することが重要
温室効果ガスの排出	1. 廃棄物処理プロセス全体における温室効果ガス排出量の削減	1. 低C/N比残渣を埋め立てることによる、窒素化合物の排出量増加	1. ライフサイクルアセスメントを推奨

\* プラント/施設の立地、交通、大気排出、粉塵/臭気、バイオエアロゾル、ハエ、騒音、ごみ、廃棄物資源、設計原則、公共の懸念など、考慮されるべき他の廃棄物処理施設と共通する一般的な問題は含まない。

(出典：著者)

### 1.3 アジアの開発途上国の都市にとっての可能性と課題

これまで何度か、MBT技術をアジア<sup>18</sup>や南アメリカ<sup>19</sup>の開発途上国に移転する試みがなされてきた。しかし、こうした努力はほとんどのケースで技術を地域の実情に適合させることに失敗しており、成果は限定的であった。近年、特に目覚ましい都市開発が進む東南アジアにおいては、増加する廃棄物量に対応するため、また3R（リデュース、リユース、リサイクル）政策を推進させるための技術として、MBTの導入が再注目されている<sup>20,21</sup>。

MBTは、次のような都市に推奨される。

- (1) 都市化が進行しており、総合的な廃棄物処理を構築する必要があるが、安定した財政基盤または外部／内部からの支援がなく、かつ／または発生源分別の実施が不十分な都市

- (2) セメント産業が存在する、火力発電所またはWtEプラントにおいて余剰処理能力がある、木材産業における製紙工場において熱需要があるなど、RDF／SRFを使用できる産業基盤を持つ都市

MBTは、次のような組織にとって好ましい技術となる可能性がある（図3）。

- (1) 現在は直接投棄によって廃棄物を管理しているが、埋立地を最大限に有効活用したいと考えており、かつ／または費用対効果に優れた埋立前の事前処理手法を模索している自治体
- (2) 廃棄物処理とリサイクルによる経済的インセンティブを活用したいと考える廃棄物処理事業者または自治体
- (3) 燃料費の節約、またはリサイクル資源の利用拡大を目指している事業者
- (4) 再生可能エネルギーの利用拡大を目指す中央政府



図3 MBTによって恩恵を受けられる利用者

18 Tomonori Ishigaki, Satoru Ochiai, Masato Yamada, Dong-Hung Lee, Jae-Ram Park, Komsilp Wangyao (2016) Applicability of MBT in Middle Scale and Small Scale Municipality in Asia, The 9th Inter-continental Landfill Research Symposium, pp.100-101.

19 Alberto Bezama, Pablo Aguayo, Odorico Konrad, Rodrigo Navia, Karl E Lorber (2007) Investigations on mechanical biological treatment of waste in South America: towards more sustainable MSW management strategies. Waste Management, 27, 228-237

20 Nemanja Stanisavljevic, Paul H Brunner (2014) Combination of material flow analysis and substance flow analysis: A powerful approach for decision support in waste management, Waste Management & Research, 32, 8, 733-744

21 International Solid Waste Association Task Force (2014) Globalization and Waste Management [https://www.iswa.org/index.php?elD=tx\\_iswaknowledgebase\\_download&documentUid=3818](https://www.iswa.org/index.php?elD=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=3818)

しかしながら、消費レベルやライフスタイルの違いにより、アジアの開発途上国における都市廃棄物の特性は先進国とは異なる。このことは、MBT技術に対する需要の背景にある理由も異なることを意味する。ヨーロッパ諸国の場合、EU指令<sup>22</sup>に準拠する必要性から都市廃棄物の事前処理の導入が進められており、有機性廃棄物の安定化や希少なリサイクル資源の回収などがMBT施設の主な役割となっている。開発途上国においては、都市廃棄物の50%以上に有機性廃棄物が含まれており<sup>23</sup>、また非公式のリサイクル部門によって分別が行われるため廃棄物に含まれるリサイクル可能資源の量ははるかに少なくなる<sup>24</sup>。こうした背景から、**アジアにおけるMBT施設に対しては、主に有機性廃棄物の処理と副産物の活用（RDF／SRF、バイオガス、CLOなど）に需要がある一方で、リサイクル資源の分別による効果は全体的に見ると限定的である**。MBTには様々な処理や機械的分別の選択肢があるものの<sup>25</sup>、MBTプロセスから派生する様々な資源と燃料の搬出先を特定するためにも、副産物としての生成物の利用を最適化する必要がある。

**MBTを持続可能にするためには、RDF／SRFの市場を確保することが鍵になる**。先進国と比較して開発途上国では工業炉の数が限定的であるため、潜在的な消費者を探すためには広い地域（都市間または州間）を対象に幅広い用途に目を向ける必要がある。これらの事業者は他のRDF／SRFの製造業者や他の代替燃料と

の競争を経験しており、例えば発熱量を石炭に近い5,000kcal/kg<sup>26,27</sup>に設定するなど、消費者が求める高品質の要件を満たすための努力を行っている。市場のニーズに合わせてRDF／SRFの品質を向上させるため、選別効率を少しでも改善しようとする動きもある。一方で、廃棄物をほとんど選別せずに生物学的処理だけを行って埋め立てられる廃棄物量を減らすケースもある。

東南アジアにおける食品廃棄物や果実・野菜の非食用部分などの廃棄物は、水分と有機物を多く含んでいる<sup>28</sup>。このような廃棄物をMBTプロセスに導入すると、破碎および選別効率が低下する可能性がある。そのため、MBTプロセスの開始前に、廃棄物の含水率を下げしておく必要がある。場合によっては天日乾燥も選択肢に入るが<sup>29</sup>、臭気、ごみの飛散、突然の雨に対する脆弱性など、他の問題点もある。バイオドライングプロセスなどは有機物を分解し、生物学的反応によって発生した熱で乾燥させるため、生物学的プロセス中の内因性発熱はこうした熱プロセスの前に適用するべきである<sup>30</sup>。廃熱はRDF／SRFの乾燥に使用されることがあるが、こうした高品質のエネルギーは価値が高く、高密度エネルギー源として利用の方が適している。

**MBT技術を導入するという選択は、とりわけ都市の規模、産業の集中度、および交通環境の改善可能性に依存しており、都市および地域全体の成長に合わせて再検討する必要がある**。

22 The Council of the European Union (1999) Council Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste, Official Journal of the European Communities, L182,16/07/1999, pp1-19

23 World Bank (2018) What a Waste Global Database, <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/what-waste-global-database>

24 Agamuthu Pariatamby (2017) Chapter 3 Waste Management, In Asia Waste Management Outlook, UN Environment Programme

25 Stephanie, Thiel and Karl Joachim, Thomé-Kozmiensk (2010) Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste – Hope and Reality <https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanical-Biological-Pre-Treatment-of-Waste-%E2%80%93-Hope-Joachim-Thom%C3%A9-Kozmiensky/9276c3979654efac29c2aaaae4182e85d4db512d2>

26 Jidapa Nithikul, Obulisamy Parthiba Karthikeyan, Chettiyappan Visvanathan (2011) Reject management from a mechanical biological treatment plant in Bangkok, Thailand, Resources, Conservation & Recycling, 55, 417–422

27 Satoru Ochiai, Tomonori Ishigaki, Komsilp Wangyao, Masato Yamada (2014) Adaptability of Mechanical Biological Treatment in Tropical Asia, A Case Study in Thailand, 25th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, pp.625-626

28 Ashok V Shekdar (2009) Sustainable solid waste management:An integrated approach for Asian countries, Waste Management, 29, 1438- 1448

29 André Guimarães Ferreira, Lindomar Matias Gonçalves, Cristiana Brasil Maia (2014) Solar drying of a solid waste from steel wire industry. Applied Thermal Engineering, 73, 104–110.

30 Costas Velis, Philip John Longhurst, Gillian H. Drew, Richard Smith, Simon James Trent Pollard (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, Bioresource Technology 100, 11, 2747–61.

## 2 持続可能なMBTのための前提条件 (RDF / SRF)

MBTを持続可能な方法で導入するためには、まず様々な観点から状況を包括的に理解・評価した後、廃棄物処理システム全体にとって適切な廃棄物処理技術としてMBTを選択するという政治的決定を下す必要がある。「ソフト」な戦略的側面、具体的には政治、制度、社会、財政、経済、技術といった要素に十分な注意が払われなかったことにより、先進国では「実証された」技術が開発途上国では失敗した例は数多い<sup>31,32</sup>。それぞれのMBT施設には個々に最適なアプローチが必要であるが、いくつかの重要な一般的要因を特定することは可能である。

本ガイドラインでは、**主要な評価基準を、「社会情勢」、「市民の意識と住民の協力」、「制度・組織的側面」、「管理能力」、「財政的側面」、「技術的側面」という6つの視点から検証している** (図4)。計画の初期段階では、この6つの視点とそれぞれの相対的な主要評価基準を基に、**事前チェックフロー** (図5) を参考として使用することができる。主要評価基準と事前チェックフローは、意思決定者や政策立案者が、地域の条件がMBT技術に適しているか否かを詳しく調べどの技術がこれらの条件に最適であるかを考える際に、透明性のある評価を行う上で役に立つ。しかしながら、これは、MBTプロジェクトを計画する際に実現可能性を専門的に評価することの必要性に取って代わるものではない。図4に示すように、あくまでも成功の可能性が確認できて初めて、MBT施設建設に先立っての詳細な実現可能性調査と実行計画の立案、という次のステップに進むべきである。

主要評価基準は、以下の3つのグループに分けられる。(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)。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み、基準が満たされていない場合には、以下の行動をとることが推奨される。

- (1) **必須の要件が満たされない場合には、MBT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。

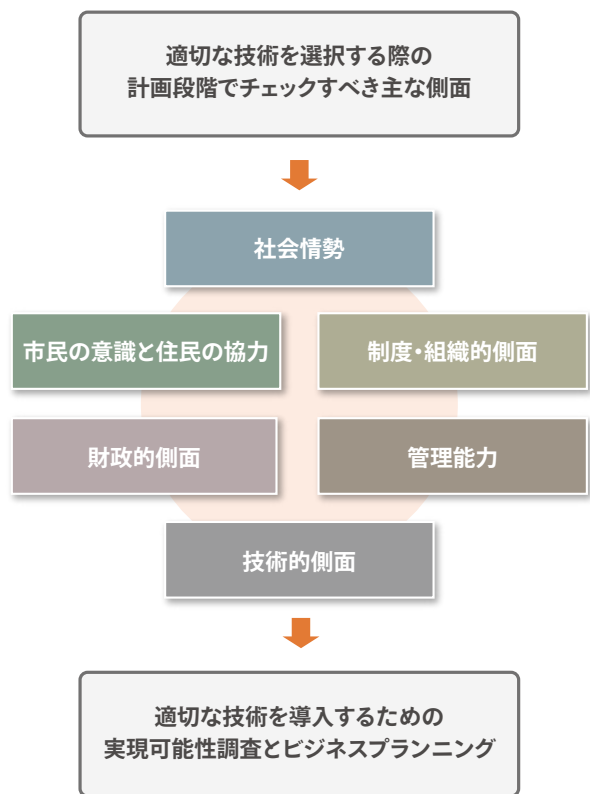


図4 適切な技術を選択する際の計画段階でチェックすべき主な側面 (出典：著者)

31 International Solid Waste Association Task Force (2014) Globalization and Waste Management [https://www.iswa.org/index.php?eID=tx\\_iswaknowledgebase\\_download&documentUid=3818](https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=3818)

32 Kai Münnich, Gunnar Ziehmman, Klaus Fricke (2002) Biological pre-treatment of municipal solid waste in low income countries, Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, p.293-303.

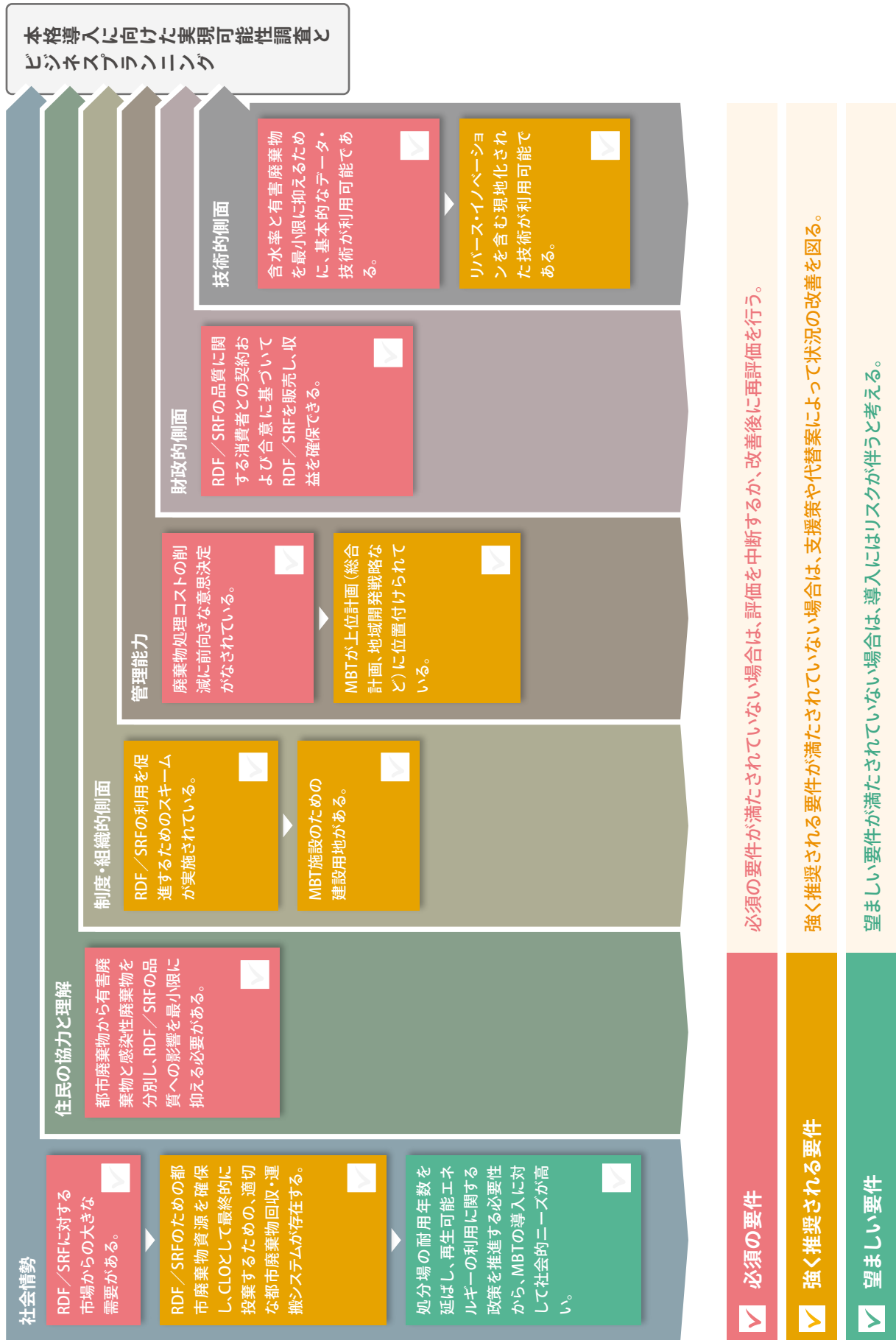


図5 MBTプロジェクトを開発する時に計画の初期段階で行うべき事前チェックフロー

(出典：筆者)

(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、**MBTの実施にはリスクが伴うため、注意が必要である。**

これに加えて、アジアの開発途上国におけるMBTの主な役割はRDF／SRF画分の分別であることと、「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」と「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：廃棄物発電焼却」は同じシリーズの一部として設計されていることから、本ガイドラインでは主にRDF／SRFに焦点を当てており、コンポスト処理および嫌気性消化技術に関連する問題については、詳細には議論していない。

## 2.1 社会情勢

### 2.1.1 RDF／SRFの利用者確保

#### ☑ 必須の要件

**RDF／SRFに対する市場からの大きな需要がある。**

対象地域には、RDF／SRFの継続的かつ安定した利用を確実にするしっかりとした産業の存在が必要である。**MBTの持続可能な運営は、工業炉、廃棄物焼却炉、またはRDF／SRF発電所があって初めて可能となる。**例えば、経済的に見て採算の取れる距離内にセメントキルンがあれば、RDF／SRFの潜在的な利用者になる<sup>33,34</sup>。褐炭火力発電所はヨーロッパにおいて最大のRDF／SRF利用者であり、アジアでも同様の可能性を秘めている<sup>35</sup>、製紙・パルプ工場もまた、ボイラーに代替燃料を必要としている。

RDF／SRFの生産者（MBT所有者／運営者）と利用者間の契約は、主にRDF／SRFの品質と化石燃料の市場価格に基づいて決まってくるが、加えて、地域の消費者と相互信頼関係を構築することが、RDF／SRFの提供を成功させる重要な要素となる。通常、産業分野のRDF／SRF利用者は、質と量の観点から燃料の安定的な供

給を求めている。廃棄物の回収・運搬システムに問題がなければ、RDF／SRFの生産は量という点では安定したものとなる。RDF／SRFは、コストという面からは競争力がないので<sup>36</sup>、なるべく運搬コストのかからない地元で消費する必要がある。RDF／SRFは、消費者が必要とするレベルの品質を提供できることを証明する必要があり、RDF／SRFの品質を保証するために、地域または国際規格の適用が必要になる場合がある。

**RDF／SRFの市場性を高めるために、例えばグリーン調達など、リサイクル資源の使用を促進させる法律を適用してRDF／SRFの使用を増やすことはできるが、反面、地域の大部分の企業・産業に悪影響を及ぼすこともある。**RDF／SRFは再生可能な画分を含んでいることから、**再生可能エネルギーの利用に関する固定価格買取制度もまた利用を促進するために効果的な手段となる。**

33 ECOFYS (2016) Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU [http://www.titan.rs/public/uploaded\\_files/ecofysreport\\_wastetoenergy\\_2016-07-08.pdf](http://www.titan.rs/public/uploaded_files/ecofysreport_wastetoenergy_2016-07-08.pdf)

34 Costas A Velis, Philip John Longhurst, Gillian H. Drew, Richard D Smith, Simon James Trent Pollard (2010) Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 40, 12, 979–1105

35 Thomas Glorius (2009) SRF in a CHP-plant in Germany ERFO Conference on Solid Recovered Fuels (SRF) – A sustainable option for Spain

36 Jan Theulen (2013) Standardization as a help to facilitate SRF acceptance and use, Experience of the European Cement Industry [http://www.eu-projects.de/Portals/11/08\\_Theulen\\_ERFO.pdf](http://www.eu-projects.de/Portals/11/08_Theulen_ERFO.pdf)

## 2.1.2 RDF／SRFの原料確保

### ✓ 強く推奨される要件

**RDF／SRFの材料となる都市廃棄物を確保し、CLOとして最終的に投棄するための、適切な都市廃棄物回収・運搬システムを導入する必要がある。**

一般的に、MBTは使用する機械を変更することで処理能力を柔軟に拡張できるため、あらゆる人口規模に適用できる。処理の量から見た効率性という意味では、MBTは中小規模の自治体（人口10万人未満など）に推奨される。都市廃棄物について一定の質と量を確保することは不可欠である。例えばプラスチックの削減など

の政策が実施されることによって将来的に都市廃棄物の組成が変わり、RDF／SRFの安定した生産・品質に影響を与える可能性があることなどは考慮しておく必要がある。例えば、紙やプラスチックのリサイクルを目的とした既存の公式および非公式の制度はRDF／SRFの品質に影響を与える。

## 2.1.3 社会的ニーズ

### ✓ 望ましい要件

**処分場の耐用年数を延ばし、再生可能エネルギーの利用に関する政策を推進する必要性から、MBTの導入に対して社会的ニーズが高い。**

不法な廃棄物処分場と本来の埋立地の双方を含め、処分場の耐用年数を延ばす必要性や、再生可能エネルギーの利用に関する政策を推進する必要性があるなど、MBTを導入するための社会的ニーズを把握する必要がある。他の廃棄物処理施設と同様、MBT施設もまた建設に対して関係者間で合意に達することが不可欠

である。社会のすべての構成グループが埋立地の収容能力を拡張しようとしている場合であれば、社会は積極的にMBT施設の建設を支援するであろう。しかし、例えばWtE焼却に対して反対がある場合、MBTの導入にも消極的であるか、支援を受けられない可能性がある。

## 2.2 市民の意識と住民の協力

### ✓ 必須の要件

**都市廃棄物から有害廃棄物と感染性廃棄物を分別し、RDF／SRFの品質への影響を最小限に抑える必要がある。**

有害性の化合物による汚染を原因とするRDF／SRFの価値の低下を防ぐためには、人々は協力して有害物質を含む廃棄物を除去しなければならない。毒性化学

物質と感染性廃棄物は、MBT施設に送られる一般廃棄物から注意深く取り除かなければならない<sup>37,38</sup>。

37 Kardono, Agung Riyadi, Widiatmini Sih Winano, Wahyu Purwanta (2012) Annex1-3 Technology factsheets waste sector, Mechanical-biological treatment (MBT), In Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation 2012

38 Vera Susanne Rotter, Thomas Kost, Joerg Winkler, Bernd Bilutewski (2004) Material flow analysis of RDF-production processes, Waste Management, 24, 1005–1021



## 2.3 制度・組織的側面

### ✓ 強く推奨される要件

#### RDF／SRFの利用を促進するための仕組みが実施されている。

RDF／SRFについて既に広く受け入れられている普遍的な品質基準は、一般的な試験方法に則り、合意に基づいて導入されるべきである。品質に関する基準があれば潜在的なRDF／SRF利用者にとって懸念が少なくなり、市場の拡大につながる。ヨーロッパ<sup>39</sup>、日本<sup>40</sup>、米国<sup>41</sup>で適用されている品質基準を参考にすることも

可能ではあるものの、**地域の実情に合わせて国ベースまたは地域ベースで基準を設定することが推奨される**。国際的な規格は現在、国際標準化機構 (ISO) によって議論されている最中であり、後日公開される予定である<sup>42</sup>。

### ✓ 強く推奨される要件

#### MBT施設のための建設用地を確保している。

建設用地の確保は、MBT計画に求められる条件を満たし目標を達成する上で、基礎的な要件である。用地には都市計画や建築基準など様々な法令・制限が適用

されるため、総合的な視点から計画を進めることが重要である。

## 2.4 管理能力

### ✓ 必須の要件

#### 廃棄物処理コストの削減に対して前向きなコミットメントが形成されている。

MBTプロジェクトの導入は、自治体の政治的ニーズに影響を受ける。MBT施設の建設と運営に対して、自治体の首長が前向きで開かれた姿勢を持っていることが不可欠である。自治体の首長が任命した担当職員との間で、自治体の他の関連部門の役割が最初から明確にされている必要がある。

一方、大量処理に使われる焼却やその他の技術についてのレベルと経済規模がまだ十分でない場合、都市廃棄物を実用的かつ合理的な方法で処理するための以前からある技術として、MBTがよく注目される<sup>43</sup>。**MBTは、焼却などの高コストな処理技術を導入する余裕がない自治体に推奨される**。従って、MBTを導入すること

39 CEN, EN15359 (2011) Solid Recovered Fuels—Specifications and Classes.Brussels, CEN

40 JIS Z 7311 (2010) Refuse derived paper and plastics densified fuel.

41 ASTM E856-83(2004) Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel

42 Rieko Kubota Development of SRF standard in ISO TC300, Knowledge sharing seminar on RDF production, utilization, standardization seminar

43 International Solid Waste Association Task Force (2014) Globalization and Waste Management [https://www.iswa.org/index.php?elID=tx\\_iswaknowledgebase\\_download&documentUid=3818](https://www.iswa.org/index.php?elID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=3818)

により自治体の廃棄物処理の予算がどれだけ削減されるか、その費用対効果を確認しておくことが重要である<sup>44,45</sup>。MBTは、埋立地に送られる廃棄物の量の削減、生成されるエネルギー、収益、およびその他の便益、効果をもたらすメリットについて、常に評価される必要がある。これらの関連目標・指標は、施設が公共・民間セクターのどちらによって運営されるかに関係なく、プロ

ジェクトの実施に先立って事前に明確に提示され、共有されていないと見なされる。自治体は、指標によって示されたプロジェクトの有効性およびプロジェクトの金銭的価値を最大化させるために、民間請負業者（SPC、つまり特別目的事業体）に助言する権利を持ち続ける必要がある。

#### ✓ 強く推奨される要件

**MBTが上位計画（総合計画、地域開発戦略など）に位置付けられている。**

MBTは、総合計画、地域開発戦略、その他の関連計画などの上位計画に正式／法的に位置づけられている必要がある。特定のマスタープランや政策イニシアチブ

もまた、導入を実現する上で効果的である。MBTがこうした計画に位置付けられると、施設の設計、建設、運営、および市民への教育がスムーズに進むこととなる。

## 2.5 財政的側面

#### ✓ 必須の要件

**RDF／SRFの品質に関する消費者との契約および合意に基づいてRDF／SRFを販売し、収益が確保できる。**

MBTは、特に生物学的プロセスの採用を検討する場合や、機械化・自動化度の度合など、技術の複雑さに応じて様々なコストがかかる。MBTシステムは、その取引可能性と市場性が化石燃料市場の状況に強く影響されるため、リサイクル資源、他のプロセスによって生成されたRDF／SRF、CLOの市場からも影響を受けやすい<sup>46</sup>。MBT事業者と生成物の潜在的な利用者との間の連携はなるべく早期に確立されるべきであり、施設が十分な品質の商品をその市場に提供できるよう注意を払うべきである（DEFRA, 2013）。特にRDF／SRFの売れ残りが施設に保管される場合には、最終的に埋立地

に処分する必要が生じるためMBT事業者にとって負担になる。RDF／SRFの消費者を確保することは、MBT施設の運営を成功させるためだけでなく、地域の持続可能な廃棄物処理にとっても欠かすことができない。SRFは工業炉やボイラーなど、熱および発電を必要とする様々な産業で使用できるだけでなく、SRF発電所や地域冷暖房サービスなど、自治体の施設でも利用できる<sup>47</sup>。RDF／SRFの販売は契約や市場の状況によって非常に不安定になる可能性があり、大きな利益をもたらすことは期待できない。このため、RDF／SRFの販売は、**ある程度の収益をもたらす可能性はあるものの、予算の見**

44 Kardono, Agung Riyadi, Widiatmini Sih Winanø, Wahyu Purwanta (2012) Annex1-3 Technology factsheets waste sector, Mechanical-biological treatment (MBT), In Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation 2012

45 Satoru Ochiai, Tomonori Ishigaki, Masato Yamada (2015) Comparison of Mechanical Biological Treatment Operations Based on Cost and Benefit in Asia, 2nd 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, pp.210-213

46 ECOFYS (2016) Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU [http://www.titan.rs/public/uploaded\\_files/ecofysreport\\_wastetoenergy\\_2016-07-08.pdf](http://www.titan.rs/public/uploaded_files/ecofysreport_wastetoenergy_2016-07-08.pdf)

47 Eleni Iacovidou, John Hahladakis, Innes Deans, Costas Velis, Phil Purnell (2018) Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal: Impact on multi-dimensional resource recovery value, Waste Management, 73, 535-545

積りにおいて主要な収益源とみなされるべきではない。

また他の都市廃棄物処理技術と同様に、MBTプロジェクトのコスト（建設コストと運転コスト）を確保する必要がある。補助金やローンは、運転コスト（設備の保守、燃料、電気、処理委託料など）を賄うために自治体

の予算から捻出する必要があり、信頼できる投資家の参加が必要である。残渣の処理を外部委託する場合、通常、処理委託料を考慮する必要がある。MBTプロセスと埋立地処理は、常に同じセクションで取り扱われるとは限らない。

## 2.6 技術的側面

### ✓ 必須の要件

含水率と有害廃棄物を最小限に抑えるために、基本的なデータ・技術が利用可能でなければならない。

MBTは、未分別の一般廃棄物と、発生源での分別処理で他のカテゴリに分類されない残余廃棄物の処理に適している。ただ、MBTは未分別の一般廃棄物の処理に適してはいるものの、含水率が高い成分は効率的な機械的分別という点で適正な処理を行う上で障壁となる<sup>48</sup>。バイオドライングプロセスは水分を除去することから廃棄物の確実な選別に有効であり、結果としてRDF/SRFの品質を向上させる。また、食品廃棄物を事前に除去しておくことで分別のプロセスの効率が向上し、高品質のRDF/SRFを生産できる<sup>49</sup>。アジアの熱帯気候地域の一般廃棄物はヨーロッパ諸国のものよりも含水率が高いため<sup>50</sup>、物理的に分別する前に乾燥させるこ

とが不可欠であるが、さらなる運用コスト増加を防ぐためにも加熱処理に投入されるエネルギーはできる限り抑制する必要がある。主に紙、プラスチック、木材で構成される産業廃棄物はリサイクル資源として用いる方が適しているが、これらに対してもMBTは使用できる。毒性、感染性、爆発性物質などの有害化合物はRDF/SRFの品質に影響を与える可能性があるため、これら有害廃棄物は廃棄物に混入されてはならない。粗大ごみ、液体廃棄物、尿尿の処理もまた、MBTによる処理に適していない。MBTで回避すべき特定の廃棄物を、地域の法律・規制や、RDF/SRFの消費者との契約を通じて規定しておく必要がある。

### ✓ 強く推奨される要件

リバース・イノベーションを含む現地化された技術が利用可能である。

先述したとおり、機械的分別と生物学的処理は高度な技術やハイエンドの機械に依存する必要はない。MBTを確実に地域の廃棄物の特性に適合させるため

に、リバース・イノベーションを含む現地化された技術を使用することを推奨する。

48 Kardono, Agung Riyadi, Widiatmini Sih Winanè, Wahyu Purwanta (2012) Annex1-3 Technology factsheets waste sector, Mechanical-biological treatment (MBT), In Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation 2012

49 Maria Chiara Di Lonardo, Francesco Lombardi, Renato Gavasci (2012) Characterization of MBT plants input and outputs: a review: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 11, 4, 353-363

50 Ashok V Shekdar (2009) Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries, Waste Management, 29, 1438- 1448

# 3 主な技術

## 3.1 一般的な技術的要件

MBTは、機械的プロセス（廃棄物の事前処理と分別）と生物学的プロセス（廃棄物の好気性・嫌気性分解、およびバイオドライイング）の2つのプロセスを組み合わせた包括的なシステムである。機械的プロセスと生物学的プロセスは、機械的処理、生物学的処理の順に配置するか、その逆、いずれの順序も可能である（図6）。

### 3.1.1 廃棄物の事前処理

都市廃棄物は、生物学的処理や資源の選別（除去、細断、破碎など）の前に、事前処理を必要とする。廃棄

物の事前処理では、まずマットレス、カーペット、その他の粗大ごみなど、そのまま次の装置で処理すると問題を引き起こす可能性のある不適切な物を取り除く処理が行われることがある。機械的な廃棄物の事前処理を追加することで、続く分別段階の処理に適した形に調整することもできる。こうした技術は、ごみ袋を引き裂いて中の物を自由にしたたり、廃棄物を様々な分別プロセスに適した小さな粒径に細断して均質化したり、あるいは利用されるMBTプロセスによってはそれに続く生物学的処理を実行したりすることが目的になる（DEFRA, 2013）。廃棄物の事前処理に利用される様々な技術の概要を、表2に示す。



図6 MBTシステムの概要

表2 廃棄物の事前処理技術

技術名	基本的な機能	主な懸念事項
ハンマーミル	鋼鉄製ハンマーを振り下ろすことによって、資源のサイズを大幅に縮小させる。	ハンマーによる資源の劣化。ガラス／骨材は粉碎され「リサイクル不能」になる。加圧コンテナを除く。
細断機	低速かつ高トルクで無数のナイフ・フックを回転させる。細断処理によってほとんどの資源が引き裂かれる、または切断される。	大型で硬性の物体が投入されると、細断機が物理的に損傷する可能性がある。加圧コンテナを除く。
バッグスプリッター	比較的緩やかな細断機を使用してポリ袋を開き、大部分の廃棄物の形状を保つ。	廃棄物のサイズを縮小させる効果はない。大型で硬性の物体が投入されると、スプリッターが損傷される可能性がある。
手動分別	廃棄物からプラスチック、汚染物質、大型の素材を手作業で分別する。	役割についての倫理、健康、安全面の問題がある。

### 3.1.2 廃棄物の分別

分別に際しては、廃棄物に含まれる様々な素材のそれぞれに異なる特性を活かして分別を行う。例えば、物体ごとに異なるサイズと形状、密度、重量、磁気的・電気的特性などである(DEFRA, 2007)。**MBTプロセスでは、廃棄物を選別することによって資源リサイクル、生物学的処理、RDF/SRFの生産によるエネルギー回**

**収、埋立など、様々な最終用途に合わせて、あるいは一連の処理プロセスに適するように、様々な資源を分別できる。**MBTでは様々な技術を利用でき、またほとんどのMBT施設では異なる資源ごとに最終用途に即したそれぞれの要件を満たすことができるよう、いくつかの異なる技術を組み合わせて使用している。表3に、廃棄物分別に用いられる選択肢の概要を示す。

表3 廃棄物分別の技術

分別技術	分別に利用する特性	対象となる物質	主な懸念事項
トロンメルとスクリーン	サイズ	大型の紙、プラスチック 小さな有機物、ガラス、細粒分	空気の封じ込めと洗浄
磁気的分別	磁気特性	鉄金属	実証済みの技術
渦電流分別	電気伝導性	非鉄金属	実証済みの技術
空気分級機	重量	軽いプラスチック、紙 重い石、ガラス	空気の洗浄
バリスティック分別機	密度と弾力性	軽いプラスチック、紙 重い石、ガラス	分別の処理率
光学的分別	回折	特定のプラスチックポリマー	分別の処理率
振動ふるい	サイズと密度	プラスチックフィルム、紙、布、砂、石	ふるいの細かさ、加速振動、 分別の処理率

### 3.1.3 生物学的処理

MBTに使用される生物学的処理には、**好気性分解、好気性バイオドライング、嫌気性消化**が含まれ、MBT施設では多種多様な生物学的処理技術が利用されている(DEFRA, 2013)。好気性分解プロセスはコンポスト処理に似ているが、生成物の品質は必ずしも同程度ではない。このプロセスは、家庭廃棄物に含まれる分解可能な有機物を最大限に分解することを目的としているところから、曝気速度または切り返しの頻度は、分解プロセスにおける微生物に合わせて最適化される。

水分の添加や微生物の増殖はRDF/SRFの品質を低下させるものの、CLOの品質は向上する可能性がある。これとは対照的に、好気性バイオドライングの目的は一般廃棄物からの水分蒸発を最大化させることである<sup>51</sup>。主な熱源は生物学的分解であるため、曝気および切り返しのプロセスも実施される。ただし微生物の

増殖は水分シンクとして機能して乾燥を妨げるため、抑制する必要がある。こうした微生物はヒートスケベンジャーとも呼ばれ、熱を消費して効率的な水分蒸発を阻害する。

嫌気性消化は、アジア諸国で家畜の糞尿や汚水を処理するために一般的に使われるプロセスである<sup>52, 53</sup>。嫌気性消化を単独で利用すると、嫌気性微生物の栄養となる有機物が不足してバイオガスの生成率が不十分となり、失敗することがしばしばある。**MBTにおいては嫌気性消化プロセスを他の有機物発生源も取り込むことにより、十分な量のバイオガスが生成できるようにすることを推奨する。**以下の表4に、生物学的処理の主なカテゴリの概要を示す。プロセスによってはすべての都市廃棄物残渣が生物学的に処理され、選別の必要がない埋立投棄用の安定化した生成物をつくり出す。

51 Costas Velis, Philip John Longhurst, Gillian H. Drew, Richard Smith, Simon James Trent Pollard (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, Bioresource Technology 100, 11, 2747–61.

52 International Atomic Energy Agency (2008) Guidelines for Sustainable Manure Management in Asian Livestock Production Systems [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1582\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1582_web.pdf)

53 Tiffany Joan Sotelo, Hiroyasu Satoh, Takashi Mino (2019) Assessing Wastewater Management in the Developing Countries of Southeast Asia: Underlining Flexibility in Appropriateness, Journal of Water and Environment Technology, 17, 5, 287–301

表4 生物学的処理の選択肢

選択肢	主な特徴
好気性分解	開放型の山積みまたは容器内リアクター。通常汚泥、尿尿、バイオ廃棄物、または分別された有機物に富む画分に用いられる
好気性バイオドライイング	廃棄物の水分を減らすために利用される
嫌気性消化	通常、汚泥、尿尿、バイオ廃棄物、または分別された有機物に富む画分に用いられる

### 3.2 アジアの開発途上国における一般的なMBTのプロセス

MBTの機械的プロセスは単一のプロセスではなく、いくつかの技術を用いる一連のプロセスであり、**アジアの開発途上国においては、RDF／SRF用の画分を分別させることが機械的プロセスの主な目的である。**RDF／SRFの品質を最大化させるためには、廃棄物の物理的特性に応じて適切な技術を選択する必要がある。ただし、そのために高度な技術を用いる必要はなく、導入に先立って地元で可能な分別技術の組み合わせを検証すればよい。

嫌気性分解プロセスは、嫌気性消化とほぼ同じである（詳しくは「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：嫌気性消化」を参照）。ただし、アジアの未分別の一般廃棄物は乾燥量ベースでは腐敗性画分の割合が低く、嫌気性消化を単位工程として用いるには不向きである。**嫌気性消化の導入を成功させるためには、継続的で安定したバイオガスの発生が必要である。**関係者がバイオガスの利用に強い意欲を示していて、そのための社会的・産業的基盤がある場合、機械的分別プロセスを嫌気性消化に先立って実行する必要がある（図7-a）。さもないと、このプロセスの残留物には一定量の有機物と水分が含まれるため、RDF／SRFの生産という視点からはMBTによって廃棄物を処理することは技術的かつ実務的に困難となり、また後処理のために追加のプロセスが必要になる

場合がある。嫌気性消化プロセスの他の選択肢としては、廃棄物を処理するための外部の相応の嫌気性消化施設を利用する方法や、有機性汚泥、農業廃棄物、剪定枝などの植物性廃棄物などの廃棄物を処理するよう、施設を設計する方法がある（図7-b）。

**好気性分解プロセスにおいては、微生物に空気を送り込む必要がある。熱帯諸国の廃棄物向けMBTでは、バイオドライイングプロセスはエネルギー・資源の回収並びに費用対効果の面で優れているものの、コンポスト処理プロセスで使用されるような高い曝気速度は適していない。**バイオドライイングに利用される基本的な技術はコンポスト処理に用いられる技術と類似しているが、バイオドライイングは生分解に最適化されたものではない<sup>54</sup>。イオドライイングでは生分解によって発生する熱を利用して廃棄物に含まれる水分の蒸発を最大化させる。その最大の利点は、機械的プロセス前の分別効率を高めるのに役立つことである（図7-c）。先進国の例を見ると、廃棄物分解においては容器内でのバイオプロセスやバイオリクターを利用する方が効率面で優れている可能性があるが、開放型の山積み処理区画、ウインドロー、その他の現地で開発された開放型の技術は、容器内リアクターと比較してコスト面と技術的な現地での実施可能性の点で優れている<sup>55,56</sup>。

また、廃棄物量を減少させる効率やRDF／SRFの生産効率は、機械的・生物学的プロセスの順序によって決まる。アジアの開発途上国における一般廃棄物は含水率が高いことを考慮すると、分別効率を高めるため、しば

54 Costas Velis, Philip John Longhurst, Gillian H. Drew, Richard Smith, Simon James Trent Pollard (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, Bioresource Technology 100, 11, 2747-61.

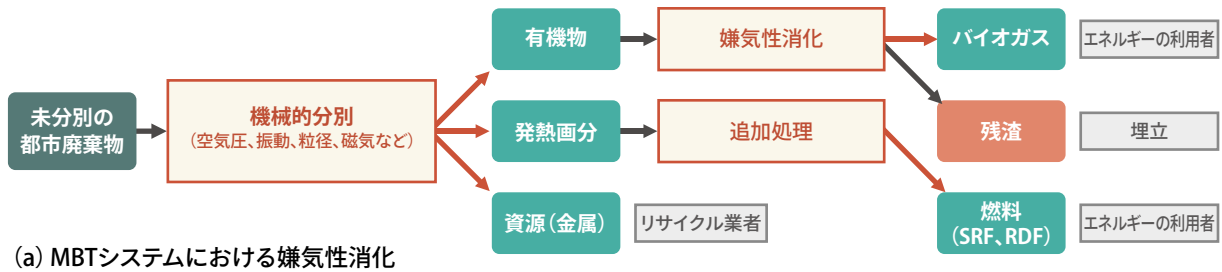
55 Costas Velis, Philip John Longhurst, Gillian H. Drew, Richard Smith, Simon James Trent Pollard (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, Bioresource Technology 100, 11, 2747-61.

56 Kardono, Agung Riyadi, Widiatmini Sih Winane, Wahyu Purwanta (2012) Annex1-3 Technology factsheets waste sector, Mechanical-biological treatment (MBT), In Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation 2012

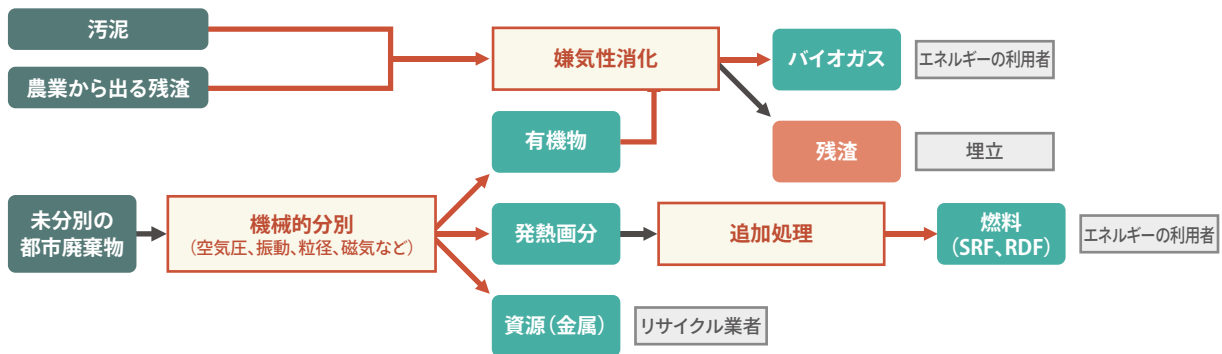
しば生物学的処理を行ってから機械的分別を行う。アジア地域において生物学的プロセスに対して分解や消化よりも乾燥に重点が置かれるのはこのためである。

また、サイズ、汚染、含有水分の理由からRDF/SRFに適さない最終廃棄物は、通常、最終埋立地に投棄さ

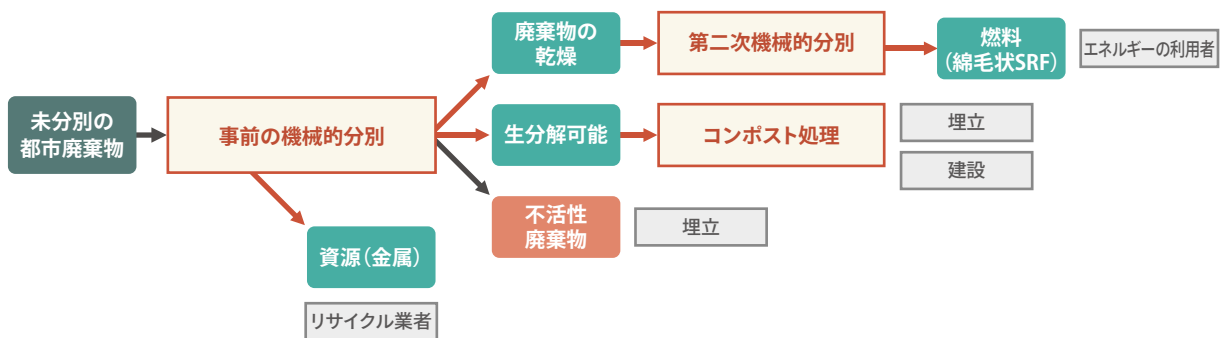
れる。これらの最終廃棄物はCLOとみなされているが、裏込め材などに利用して環境に持ち込む際は汚染源とならないよう慎重に取り扱う必要がある<sup>57,58</sup>。RDF/SRFは、廃棄物埋立地のカバー材用など、閉鎖された場所で使用することを推奨する。



(a) MBTシステムにおける嫌気性消化



(b) 機械的に分別された有機画分を外部の嫌気性消化プロセスで処理



(c) MBTシステムに適用されるバイオドライングプロセス

図7 MBTにおける資源分別の一般的なフローおよび利用される技術

57 Maria Chiara Di Lonardo, Francesco Lombardi, Renato Gavasci (2012) Characterization of MBT plants input and outputs: a review: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 11, 4, 353-363

58 Agency for Environmental Protection and Technical Services (2006) Effetti dell'impiego di frazione organica stabilizzata in attivita` di ripristino ambientale Report 65/2006

# 4 持続可能性および関連する国際問題

## 4.1 温室効果ガスと気候変動

MBTは、直接投棄、熱処理、または生物学的処理と比較して、**廃棄物処理による温室効果ガス (GHG) の直接的な放出を減らすことができる**（一般的に、MBTからの放出量<処分場からの放出量<焼却からの放出量、となる）。**間接的な温室効果ガスの放出も**

- (i) エネルギーを必要とする処理の場合、エネルギー、燃料、化学物質の消費レベルを低く保つこと、
  - (ii) 有機炭素の含有量に応じて化石燃料の利用をSRFに置き換えること、
  - (iii) 廃棄物に含まれる分解性の炭素を減らして処分場から放出されるメタンを削減すること、
- によって削減することができる。

さらに、埋立地に送られる廃棄物に含まれる分解性有機物を減らすと、埋立に関連する環境汚染も低減することができる。MBTによって生じる残渣はC/N比が低く、埋立地における物質の変換に対する影響はわかっていない。

## 4.2 SDGs

SDGに対するMBTの主な貢献を表5に示す。

表5 SDGに対するMBTの主な貢献

SDGに対する貢献	
全体	「合意された国際的な枠組みに従い、製品のライフサイクルを通じ、化学物質やすべての廃棄物の環境上適正な処理を実現し、人の健康や環境への悪影響を最小化するため、化学物質や廃棄物の大気、水、土壌への放出を大幅に削減する」(12.4) 「廃棄物の発生防止、削減、再生利用および再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減する」(12.5)
発電および熱源用燃料としてのRDF/SRFの生産	「世界のエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を大幅に拡大させる」(7.2)
リサイクル資源(金属)の回収	「世界の消費と生産における資源効率を漸進的に改善させる」(8.4)
CLOの建設利用	「天然資源の持続可能な管理および効率的な利用を達成する」(12.2)
廃棄物処理システムから排出される温室効果ガスの削減	「気候変動の緩和に関する人的および制度・組織的能力を改善する」(13.3)
埋立に関連する環境汚染の低減	「廃棄物の処理に特別な注意を払うことなどの手段も含め、都市の環境上の悪影響を軽減する」(11.6) 「人の健康や環境への悪影響を最小化するため、大気、水、土壌への放出を大幅に削減する。」(12.4)



# 5 MBTの実例

## 5.1 ピッサヌローク(タイ)

### 簡単な紹介と重要なポイント

ピッサヌロークでは、未分別の都市廃棄物を処理するためにMBT施設が導入された(図8)。この施設の特徴として、国内の大手セメント会社と連携してRDFを生成する独自システムが備えられており、RDFの大部分は同社が所有するセメントキルンに搬送される。MBT施設は現在閉鎖されているが、この地域の埋立地に送られる廃棄物の量を減らし、自治体の廃棄物処理にあてられる予算の削減に役立った。

### 歴史的背景

MBTは、この地域の廃棄物処理能力が不足している問題を解決するために導入された。このMBTシステム(FABER-AMBRA)は当初(2000年)、German Technical Cooperation Agency(GTZ)からの技術的支援を受けて導入された。建設後の施設は自治体との契約に基づき、セメント会社の現地子会社が運営していた。プロジェクトの当初から、このプロセスで生産された固形燃料はセメントキルンで使用されることが計画されていた。このことは、プロジェクトがこの企業の活動状況に大きく依存していたことを示しており、最終的には施設が閉鎖される原因にもなった。

ピッサヌローク市と周辺の自治体の都市部から回収された未分別の一般廃棄物が施設で処理され、その受入量は平均100トン/日に上った。回収された都市廃棄物の内訳は乾燥量基準で評価すると、有機性廃棄物(食品および植物性のもの、40.3%)、プラスチック(41.7%)、無機物(8.2%)、その他廃棄物(9.8%)であり、初期含水率の平均値は52.9%であった。

廃棄物処理という点では、施設は15年以上に渡って効率的に運営された。一方、セメント会社はその状況に常に満足していたわけではない。含水率の高い有機物と塩化物を含む廃棄物が混入したRDFの品質は低く、セメントキルンに直接投入できないことから、セメン

ト会社における処理ラインでRDFを精製する必要があった。この追加プロセスによって最大でRDFの20~30%が使用不能な残渣となり、不適格なものとして自治体に返送された。セメント会社が状況に不満を感じていた2番目の理由は、輸送に関するものであった。MBT施設からセメントキルンまでの距離は約350kmあり、この遠い距離と限られた輸送経路(高速道路)が相まって、事故や災害に関連した問題が発生した。最終的にセメント会社は自治体との契約を終了し、より迅速に輸送できる別の施設で生産されたRDFを利用するようになった。

### 導入と成功要因

#### (a) 社会情勢

MBT施設はセメント会社の子会社によって運営されていたため、RDFの安定的な利用者としてセメントキルンが確保されていた。廃棄物処理に関する契約に基づいて、RDFは無料でセメント会社に提供されたが、RDFの低位発熱量が21MJ/kgを超える場合、セメント会社は約100パーツ(約3.2米ドル)/kgの払い戻しを受けた。品質が低かったためRDFの販売はスムーズではなかったが、このスキームのおかげで新しい利用者を探す必要はなかった。セメント会社にとっては代替燃料の調達が必要であったが、この契約によってこの問題は解決された。

18km<sup>2</sup>の面積に7万人の人口というピッサヌロークは、あまり大きな都市ではない。しかし、埋立地がいつも縁辺部に設けられていたことから、埋立地近くの住民からは反対の声が上がっていた。住民は埋立地の問題に対して不公平だと感じており不平を漏らしており、このことから市当局はこの地域の既存の埋立地の能力を最大元に活用するという強い意欲を持つようになった。建設されたMBT施設は既存の埋立地に位置していたため、埋立地に関連する問題の解決策として周辺住民から比較的好意的に受け入れられた。政府は2035年までに廃棄物からのエネルギー生産を2014

年の水準と比較して10倍に増加させることを目標にしており、RDFの利用は再生可能エネルギーの利用を促進させる国家目標と一致していた。

### (b) 市民の意識と住民の協力

住民は、RDFの品質を維持するために有害物質による一般廃棄物の汚染を避けることが重要かつ必要であることについて、十分に説明を受けていた。ピッサヌローク市の都市部の住民は有害廃棄物の分別に協力しており、一連の組成分析ではこの種の有害廃棄物は検出されていなかった。

### (c) 制度・組織的側面

セメント会社はRDFについて会社内部の品質要件として、かさ密度0.3以上、低位発熱量18.8MJ/kg以上、塩素含有量0.8%未満という条件を定めていた。また、セメント会社は、発生源で分別されたタイヤやプラスチックなど、他の種類の廃棄物を追加することで代替燃料の最終的な品質を自ら調整することが可能であった。

MBT施設は既存の埋立地の残存地に建設されたため、施設の建設および運営のための土地確保に障壁はなかった。当初、MBTプロセスは、埋立地の建設と運営に対する社会の反対に対処するための積極的な方法として導入された。

### (d) 管理能力

単純な投棄スキームと比較すると、MBTを利用した廃棄物処理システムは常にコストが高くなる。MBT施設の導入のための資金を提供したドイツ国際協力公社(GIZ)は、当初、追加の資本コストと運営コストはそれぞれ廃棄物の重さあたり5.1ユーロ/t、5.7ユーロ/トンになると見積もっていた。費用便益分析によると、RDFのもたらすメリット(価値)はRDFの生産にかかる運転コストに比べ2倍から7倍高いことが明らかになったが、その一方、この見積もりにはMBTの建設コストや残渣の処理のコストが含まれていない。利益を生み出す投資収益率の観点から、RDFの価値は高く評価する必要がある。

ピッサヌローク市は都市廃棄物処理において「埋立ゼロポリシー」を採用しているが、この方針もGIZから技術的支援を受けて策定されたものである。この方針

はタイ政府によって国としての目標にも定められた3R(リデュース、リユース、リサイクル)の理念に基づいており、埋立地に送られる廃棄物の削減に向けての市民の参加と技術的導入を含むものである。市民の参加はコミュニティベースの廃棄物処理に関するプログラムを通じて進められ、公共の廃棄物処理サービスにおける市民意識と協力が大幅に強化された。MBTは、埋め立てられる廃棄物の削減を実現するために導入された重要な技術であった。

### (e) 財政的側面

施設の一部はGIZとの国際開発スキームの支援を受けて建設されたとはいえ、施設のほとんどは地域のセメント会社によって設置・更新された。そのため、運営スキームは民間資金主導(PFI)スキームに近いとみなされる。このスキームにおいて施設の予算調達、設計、建設は当初、国際基金の支援を受けた公的セクターによって実施され、その後、運営の責任が民間セクターに移された。

### (f) 技術的側面

全体としてのMBTプロセスは、いくつかの段階に分かれている。最初に都市廃棄物は袋から出され、回転ドラムによって均質化される。均質化された都市廃棄物はパレットプレートの上に積み上げられ、バイオドライングのために数カ月ほど保管される(MBTウインドロー)。廃棄物は幅50m、長さ170m、高さ4.0mのサイズに整えられるが、見掛け上の密度は625kg/m<sup>3</sup>と推定される。この保管期間の数カ月の間に、廃棄物を安定させるための自然のエアレーションが進む。廃棄物層と周辺空気の間には温度差が生じるため、対流のような空気の流れが発生するが、ガス交換を促進するために廃棄物が積み上げられた中央には換気パイプが導入されている。廃棄物層に空気が入り込むと、廃棄物の分解に寄与する好気性微生物の活動が進む。一般的に、このバイオドライングのプロセスには約9～11カ月を要している。

次に、安定化した廃棄物を分別施設に移して固形燃料を製造する。この分別プロセスは、トロンメル、円板型スクリーン、空気圧分別、磁氣的分別で構成されている。固形燃料への使用に適さない廃棄物の画分は、一

部バイオドライイング中の廃棄物のカバー材として利用されるが、ほとんどは残渣として埋立地に投棄される。

持ち込まれた廃棄物の量に対して生産されるSRFは30%と推定されていたが、生産されたSRFの20~30%はセメントキルンから不適格とされ、埋立処分された。

ただこのことを考慮しても、廃棄物の量は初期量に比して15%まで削減された。一方、顧客の事情により一時的に操業を停止することが度々あり、最終的にはセメント会社との契約は解除された。



MBT施設におけるバイオドライイング場 (ピッサヌローク)



ピッサヌロークで生産されたRDF

図8 MBTの実例 (ピッサヌローク、タイ)

## 5.2 ナーシク (インド)

### 簡単な紹介と重要なポイント

ナーシク (図9) に導入されたMBTシステムは、未分別の都市廃棄物を処理している。生成されたコンポストは農業に使用され、RDFは地域の工場で使用されている。導入当初は総合的なシステムとして整備されたものではなく、大量の売却不能な廃棄物画分を (コン

ポストに不適合な廃棄物ともいう) を処理し、RDFを生産するための機械的プロセスであった。

### 歴史的背景

ナーシクは100万人以上の人口を抱える都市であり、マハーラーシュトラ州に位置する有名なヒンドゥー教の聖地である。廃棄物が効果的に回収できていないことと、有機物は地元の園芸産業で肥料として積極的に

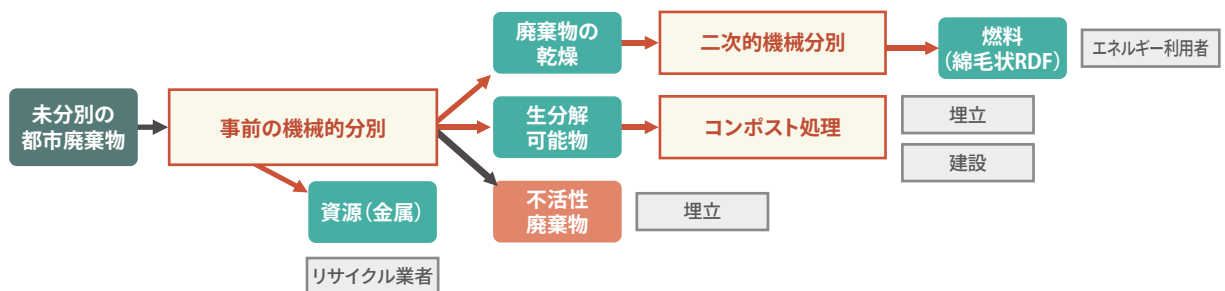


図9 MBTの実例 (ナーシク、インド)

(ただし非公式に) 使用されていることもあり、廃棄物の発生量は1日1人あたり0.22kgとインドの中では最も低い水準である。MBTが導入される以前は自治体で回収し廃棄物向けのコンポスト処理施設が稼働していたが、そもそも有機物の回収率が低かったため、コンポストの生産効率は低水準であった。コンポストの生産量は投入された廃棄物量の3~5%と推定され、コンポスト製造に不適な廃棄物が60%を占めていた。このような背景から、コンポスト製造に使えないために埋立地に廃棄されるコンポスト不適な廃棄物の量を削減し、RDFを製造するための機械的分別プロセスが導入された。

MBT施設は民間企業との30年間の契約の下で2016年に完全に近代化された。この連続的なシステムで処理される未分別の一般廃棄物の量は、500トン/日にのぼる。以前、RDFはペレット化された形で取り扱われていたが、現在は綿毛(わたげ)状の形で取り引きされ、地域の工場や発電所で使用されている。インドでは、石炭火力が2番目に大きな発電源となっているが、石炭の利用によって引き起こされる環境問題に対する市民の意識に加えて、規制の変更、石炭の不足、石炭価格の高騰、および施設の稼働停止が頻発したことによって、石炭の代替熱源に対する需要が高まってきた。そのため、国内の石炭危機を安定化させる解決策になる可能性があるとして、RDFの導入が期待されている。

## 導入と成功要因

### (a) 社会情勢

現在、この施設で生産されたRDFはセメントキルンや発電所などの域内の工場で利用されているが、取引状況は不安定である。MBTの運用とRDFの生産は変動するとしても、持続した運転を確実なものにするためには安定した顧客基盤を確保することが不可欠である。RDFの潜在的な顧客の候補には、製造業と発電所が含まれる。

ナーシクは、ゴールデン・トライアングル・プロジェクトとして知られるインフラ開発プロジェクトに、ムンバイやプネーと共に参加している重要な都市である。このプロジェクトはナーシクを社会的、経済的、産業的に成長、拡大、発展させてきた。また輸送ネットワークの改善により、自社発電所での発電が許可されているナビ・

ムンバイ経済特区へのアクセスが向上した。この地域においてRDFの産業利用は大きな市場となる可能性がある。加えて、石炭火力発電に対する現在の世界的な逆風は、RDFの国内利用を促進させる力として働く可能性がある。ナーシク中心部から10km離れた場所に位置するナーシク火力発電所は、630MWの発電能力を備えた石炭火力発電所である。この施設は、近い将来、RDFの近場の利用者になる可能性がある施設の1つである。

ナーシク市は今後人口増加、産業開発が進むと予測され、適正な都市廃棄物の回収強化が課題になっており、総合的な廃棄物処理システムの導入を余儀なくされている。埋立地の収容能力を最大限に活用するために、有害廃棄物と有機性廃棄物の発生源での分別を公的かつ効果的に導入することと合わせ、MBTでプロセスは重要な役割を果たすと期待される。

### (b) 市民の意識と住民の協力

マハーラーシュトラ州は、古い医薬品、塗料、蛍光灯、スプレー缶、肥料、農業容器、電池、靴磨き剤などの有害都市廃棄物を発生源で分別することについての規則とガイドラインを文書化しているが、現在も汚染は頻発している。この状況に取り組むためにはさらなる情報の普及と市民の意識の向上を必要としており、汚染されたRDFをどう取り扱うかという問題は二次的な問題である。RDFとコンポストの利用者はいずれも、都市廃棄物が汚染される危険性を憂慮している。コンポストや代替燃料の利用を促進させるためには汚染廃棄物を混ぜないことが重要だと住民は認識しているが、自治体による有害廃棄物の分別回収を含む効果的なスキームと共に、市民の協力が不可欠である。

### (c) 制度・組織的側面

政府(Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, Ministry of Housing and Urban Affairs)は、廃棄物発電プラントやセメント産業で利用されるRDFの品質基準を含め、インドの様々な産業におけるRDFの利用に関するガイドラインを公表した。RDFは利用目的、サイズ、灰の含有量、水分、塩素、硫黄、および低位発熱量によって3つのグレードに分類される。例えば最高グレードのRDFは直接セメントキル

ンでの共処理に使用でき、含まれる灰は10%未満、水分10%未満、塩素0.5%未満、および低位発熱量は18.8MJ/kg超である必要がある。このガイドラインには法的強制力も正式な認証システムもないが、これがあることによって顧客はある程度RDFを信頼できるようになる。

MBT施設は、MBT以外の処理に用いられる衛生埋立地と焼却炉を含む総合廃棄物処理施設の中にある。市の中心部からわずか10kmの距離に位置しているものの、市境に近く、住宅や企業向けに開発されてこなかった場所に建てられている。これまで施設の安全性をめぐる住民からの強い反対はなかったが、この施設は古代の宗教的遺跡であるパンダヴレニ洞窟の背後にあり、臭気、騒音、煙、廃棄物の飛散、衛生などの観点から地域の環境に影響を与えないよう注意し、観光産業から苦情を受けないよう配慮が必要である。

#### (d) 管理能力

ナーシクの人口増加の見通しから、費用対効果の高い廃棄物処理の構築が強く求められていた。安定した顧客基盤がなかったため、低品質のコンポストやRDFでは市場価値が低いことが既存のシステムの問題点であったが、民間企業との新しい契約スキームによって、コンポストおよびRDFの両方の価値が高まり、費用便益のバランスが改善されることが期待される。

2011年に打ち出されたナーシクの廃棄物処理計画では、老朽化したコンポスト処理プラントをMBT施設にアップグレードすることが明らかにされた。このことは2016年の廃棄物処理に関する政府規則にも記載されており、機械的・生物学的処理は埋立地に回される廃棄物を減らし、CLOの品質を向上させ、代替燃料の生産を全国的に推進するための重要なアプローチとみなされている。

#### (e) 財政的側面

インドとフランスの複合企業による地元プネーを拠点とする合併事業に対して、30年間の設計、資金調達、建設、運営、移転 (design, finance, build, operate and transfer: DFBOT) 契約が結ばれた。この官民パートナーシップは、廃棄物回収の改善、発生源分別に関する情報と実践の普及、埋立地管理の改善、既存のMBT

施設の機械の修繕・アップグレードを含む、総合的な廃棄物処理モデルを導入することを目的として開始された。行政機関はRDFの価格について、セメント産業で使用する際の発熱量に応じて固定価格で取引することを提案したが、推奨された価格は0.4インドルピー／1,000kcal (約1.34米ドル/MJ) である。例えばRDFが最高グレードのカテゴリ (18.8MJ/kg) の品質基準を満たしている場合、RDFの価格は1,800インドルピー／トン (約25.2米ドル／トン) になる。

#### (f) 技術的側面

前処理としての機械的分別プロセスにおいて、廃棄物は主に3つのカテゴリに分類される。乾燥廃棄物 (粒子径<100mm)、生分解性廃棄物 (20~100mm)、不活性廃棄物 (>20mm) の3種類である。木材、紙、繊維、ジュート繊維などの乾いた廃棄物は、RDFを生産するために処理される。廃棄物は乾燥、サイズの縮小、ふるい分け、均質化のプロセスを経て、最終的に細断されて綿毛状のRDFになるが、続いてこれをさらに処理し、消費者の求めに応じてペレットまたはブリケット状のRDFを製造する。RDFはボイラー燃料として周辺の工場や発電所で利用される。施設が近代化された後その運転に関していくつか問題が出てきたため、RDFの生産能力は約20トン／日になっている。しかし顧客からの強い需要を受けて、市はRDFの生産能力を80~100トン／日に引き上げることを計画している。

前処理の機械的分別プロセスによって得られた生分解性廃棄物と細粒分は一般廃棄物全体の40%を占めており、これらは後にウインドローを用いてコンポスト処理される。インドの他のコンポスト処理プラントと同様、生産されるコンポストの収量は非常に低く (10%)、プラスチックやその他の廃棄物が混入していることからコンポスト処理に適さない画分が一部発生する。また、機械的な問題によって頻繁に運転が停止することもある。コンポスト処理には不適とされた画分の発熱量は約12,000kJ/kgあるため、RDFを製造するための原料として利用できると期待されているが、再利用できない場合は、不活性廃棄物と一緒に埋立地に投棄する必要がある。この場合、埋立地の収容能力の最大化を図るという点において、廃棄物削減の効果は期待されたほどには高くなる。

### 5.3 ラヨーン (タイ)

#### 簡単な紹介と重要なポイント

タイのラヨーン (図10) に位置するMBT施設は、ラヨーン州と発電・送電を行う公営企業との間で交わされた契約に基づいて運転されているラヨーンの廃棄物発電センターの総合的な廃棄物処理システムの一部として稼働している。約500トン/日の未分別の一般廃棄物は最初に機械的分別プロセスに送られ、その30%が約14,000~17,000kJ/kgの発熱量を持つSRFに加工される。以前はSRFはセメントキルンに送られていたが、現在では民間のSRF発電所で利用されている。投入廃棄物の45%を占める小さなサイズの廃棄物は、コンポスト生産ラインに送られる。機械的プロセスと生物学的プロセスは異なる会社によって別々に運営されているが、MBTシステムは廃棄物処理の一連のプロセスを指すものとみなされてきた。機械的分別プロセスによって得られたリサイクル資源の画分は投入廃棄物の約5%を占め、民間のリサイクル業者へ売却される。残渣はすべて、州の総合的な廃棄物処理システムの一部である埋立地に送られる。

#### 歴史的背景

ラヨーン州はタイ東部に位置しており、産業、農業、観光業の中心地であって、人口、経済、産業の発展から都市廃棄物の量が大幅に増加した (1,000トン/日超)。以前は都市廃棄物はラヨーン州内の各自治体がそれ

ぞれの地域ごとに処理していたが、2007年、約68の自治体が、「ラヨーン廃棄物発電」と呼ばれる総合的な廃棄物処理施設を設置するための契約を締結した。この施設は内務省の政策に沿って建設され、ラヨーン州行政機関 (Rayong Province Administrative Organization : Rayong PAO) によって管理されている。このプロジェクトは、発生源での廃棄物削減に焦点を当てており、この総合的なWtE施設から遠く離れている自治体向けには、輸送の中継地点が設けられている。ただし、ラヨーンの各自治体は処分費として、約400パーツ (12.7米ドル) を支払う必要がある。

このプロジェクトは、3段階に分けて計画が実施された。第1段階 (予算1.15億パーツ=367万米ドル) では、衛生埋立 (10,800m<sup>2</sup>) の敷地内に施設のインフラと廃水処理プラントが建設された。第2段階 (予算1.85億パーツ=590万米ドル) では、施設内の機械的分別プロセスの建設・アップグレードが行われ、併せて第2の衛生埋立地 (19,200m<sup>2</sup>) も建設された。第3段階 (予算3.22億パーツ=1,028万米ドル) ではコンポスト処理施設が建設され、埋立地が拡張された。

このプロジェクトのもう一つの重要な点は、都市廃棄物発電所を建設する上でのラヨーン州行政機関とGlobal Power Synergy社 (GPSC) との協力関係である。このプロジェクトはRDF生産と発電の2つの要素から構成されており、都市廃棄物を500トン/日処理し、売電のために約6~9MWの電力を発電する能力を備えている。

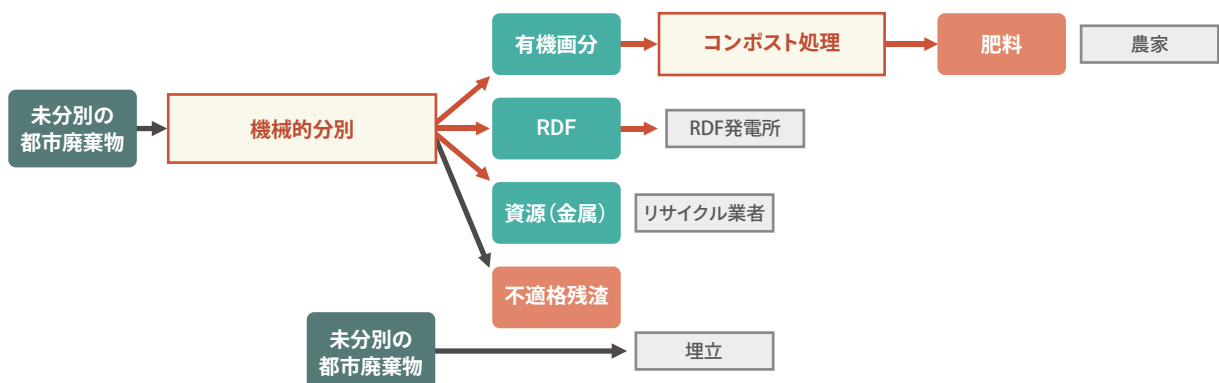


図10 MBTの実例 (ラヨーン、タイ)

## 実施と成功要因

### (a) 社会情勢

ラヨーン廃棄物発電プラントはムアン・ラヨーン地区のタンボンナムコックの離れた場所に建てられており、敷地面積は0.68km<sup>2</sup>である。分別およびコンポスト処理のプロセスは閉鎖的なシステムで行われるように設計されており、埋立もまた工学的に法面をカバーする方法で行われている。こうした対策を施すことにより、住民から臭気に関する苦情が来ることは少なく、廃水処理施設から排出された処理水も地域で再利用されていて、汚染水の放出による環境汚染の防止に役立っている。

### (b) 市民の意識と住民の協力

ラヨーン廃棄物発電プラントはラヨーンの大部分の自治体から都市廃棄物を受け入れており、各自治体の住民が抱く「Not In My Backyard」(NIMBY) と呼ばれる嫌悪感情に対応する必要があった。NGOや公共セクターから支援と協力を受けつつ、自治体が強いリーダーシップを発揮してコミュニティと関わり、地元の企業を巻き込むことで、住民の環境意識が高まり廃棄物問題を解決しようという意欲が芽生えた。また、NIMBY問題を解決するための活動によってプラントは近隣住民から受け入れられ、住民は州が推進する方針を支持するようになった。

### (c) 制度・組織的側面

一般に、システムの保守(または追加の案件)の予算案が組まれるためには長く詳細なプロセスを経る必要があり、プロジェクトが実施されている現地の実情とは一致しない場合がある。幸い、ラヨーン廃棄物発電プラントは、ラヨーン州行政機関との25年契約のもと、Rayong Renewable Energy社(RY)によって完全に管理されている。Global Power Synergy社から協力があつたこともあり、プラントは2つの民間企業で管理できる体制になっているため、将来的に保守が必要になった場合の予算管理と施設運営が簡素化されている。

### (d) 管理能力

ラヨーン廃棄物発電プラントは民間セクターによって管理されているため、ラヨーン州行政機関はプラントを長期的に管理する運営者の確保という難しい問題に対処することができた。また、発電所に都市廃棄物を提供する保証ができたことにより、自治体が徴収する処理費は減額された。

### (e) 財政的側面

ラヨーン州行政機関はセンターの運営についてRayong Renewable Energy社と25年契約を締結したことから、施設の新しい運営者を採用するための予算を長期的に削減することができた。さらに廃棄物を一元管理できるようになったことにより、州内の自治体は運営コストを削減できた。一方、ラヨーン州行政機関は、プラントへの継続的な都市廃棄物供給が保証される場合、自治体の処理委託料を減額することができる。焼却によって都市廃棄物の量は減少しているため、新しい埋立地を建設するための予算が必要でなくなり、Global Power Synergy社はまた、売電による利益も得られている。

### (f) 技術的側面

施設が建設中であつたため、総合的な廃棄物処理プロセスはいくつかのフェーズに組み込まれている。この施設は2018年から稼働しており、500トン/日の未分別の都市廃棄物がまず機械的分別施設に送られる。リサイクル資源(都市廃棄物全体の5%)は、分別プロセスの初期段階で分別される。ふるいを通過した小さな粒子(都市廃棄物全体の45%)はコンポスト処理施設に送られ、残りの大型の都市廃棄物は細断処理されてセラミック、PVCや金属などの不燃性物質(都市廃棄物全体の約20%)が分別されて埋立地に投棄される。都市廃棄物全体の約30%がRDFになって発電所で6~9MWの電力を発電するために使用され、送電網に供給される。

## 5.4 三豊

### 簡単な紹介と重要なポイント

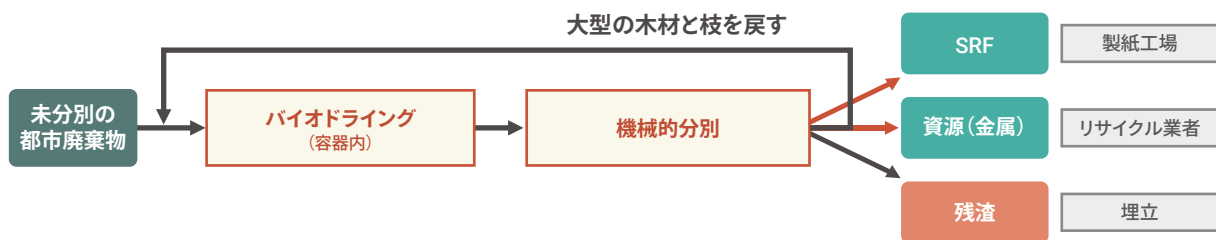
通常日本では大規模焼却システムを利用しているが、三豊市(図11)は独自の都市廃棄物処理システムを採用している。残留可燃廃棄物として回収された都市廃棄物(1日平均31.5トン)は、浸透性を高めるために木の枝と混合され、空気循環と水分コントロールの機能を備えた容器内でのバイオドライイングプロセスを用いて処理される。施設には6つの部屋(幅6m、高さ5m、長さ35m)が設置されており、それぞれバイオドライイングの処理に平均17日間の期間を要する。乾燥された廃棄物は続いて機械的分別プロセスに移され、SRF成分(プラスチックと紙)、大型の木材と木の枝、細かく細断された画分に分別される。大型の木材や枝は、その後バイオドライイングプロセスに戻される。SRFの画分はさらに処理され、工業用ボイラーでは避ける必要のあるポリ塩化ビニル(PVC)が除去される。この工程から平均13.3トン/日以上 of 製品が生成され、固形燃料製造会社に原料として売却される。生成されたSRFは、この地域の主力産業である製紙工場で利用される。安定したSRFの消費者がいることはその自治体でMBTが成功するための重要な要素であり、SRFの利用者が特

定できる場合、焼却の代替技術として検討する価値があることがこの実例から明らかになっている。

### 歴史的背景

三豊市は、2006年に7つの町が合併して発足し、現在約63,000人の人口を抱えている。発足当時は1986年に建設された焼却炉(処理能力62トン/日×2基)によって廃棄物は処理されていたが、2013年3月に建設地の使用期限が満了し、閉鎖された。埋立地も2009年に容量が限界に達し、その後は外部委託に回されている。

2010年から2011年にかけて、三豊市はどの廃棄物処理方法を導入すべきか市民に向けて公募を行い、時間をかけることなく上記システムの導入を決定した。その後、2011年から2014年にかけて実証プロジェクトを実施し、2015年度から2016年度にかけて三豊市は環境省から施設建設に対する資金助成を受けた。2017年4月に実際の操業を開始したプラントは株式会社エコマスターに委託され、新和産業株式会社から技術・技術的要素の提供を受けてBOO(建設-所有-運営)の形が取られた。プラントの建設費は16億円(土地代込み)、助成金は3億円であった。三豊市は同社と20年契約を結んでおり、処理費は24.8円/kg(回収費を除く)に設定されている。



容器内生分解プロセス



製造されたSRF(三豊)

図11 MBTの実例(三豊)



## 実施と成功要因

### (a) 社会情勢

三豊市がこの種のシステムを導入できた理由は、石炭に約10%の固形燃料(SRF)を混合して紙を製造している工場が近くにあったからである。

### (b) 市民の意識と住民の協力

焼却処分の際に用いられていた既存の分別・回収方法には変更がなかったため、住民にとってこのシステムは受け入れやすいものであった。

一般的に生物学的処理システムでは、臭気が問題になる傾向がある。しかし、このシステムでは、バイオドライングプロセスから排出される排気ガスを脱臭する方法として、木材チップの層に排気ガスを通過させるバイオフィルターメカニズムという効果的な方法を採用している。脱臭前の排気ガスには強い臭気があるが、フィルターを通して排出される排気ガスは天然木のような香りになるため、施設周辺ではゴミによる悪臭問題がなくなった。

### (c) 制度・組織的側面

三豊市は、本システムの運営・管理に必要な特許技術を有する企業からの提案を受け、大学や研究機関と連携して実証プロジェクトを実施した。市は環境省の助成事業に申請し承認されたため、国の認可を受けた処理方法の導入を進めることができた。

### (d) 管理能力

2015年、三豊市は都市廃棄物の処分に関する基本計画の見直しを行った。市はすべての廃棄物は資源であるという認識のもとに、「資源が循環する持続可能なコミュニティを構築する」という基本理念を確立し、再利用、リサイクル、資源回収を可能な限り推進させる方針をとっている。また三豊市では、リサイクル志向社会の発展と地球温暖化の防止に向けて、住民・企業・政府

の三者協力による廃棄物の発生・排出の抑制に関する基本方針を定めた。この計画では、トンネルタイプのコンポスト処理が市の廃棄物処理実践の一部として実施されることが明確に定められた。計画を成功させるためには、自治体が強いリーダーシップを発揮することと、公的・民間セクターの間にパートナーシップを構築することが不可欠であった。

### (e) 財政的側面

同レベルの処理能力を備えた焼却炉を建設する場合、その建設費は40～50億円と推計されており、三豊市の採用した方式では、廃棄物処理コストを大幅に削減できたことが示されている。

BOOイニシアチブを適用したプロジェクトのため、市は処分費を支払うだけでよく、建設費の責任を負う必要はなかった。

### (f) 技術的側面

この方法は、もともとヨーロッパでコンポスト処理のために開発されたものである。場合によっては、コンポストにプラスチックが混ざる事態を避けられないことがあり、コンポストの生産を目的としない焼却処理の代替技術としてこの方法が利用できる点が重要である。

## 参考文献

- Archer E., Klein A., Whiting K. (2005) Mechanical-Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers, Processes, Policies, and Markets, Juniper Consultancy Services Ltd.
- DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs, UK)(2013) Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste
- Kanning K. and Ketelsen K. (2013) MBT-Best technology for treatment of moist MSW: AD and bio-drying prior to energy recovery, Waste-to-Resources 2013 V International Symposium MBT and MRF, 328-342
- Ketelsen K. and Nelles M. (2015) Status and new trends / perspectives of MBT in Germany, Waste-to-Resources 2015 VI International Symposium MBT and MRF, 65-186
- Kritjaroen, T. (2011) Understanding Urban Governance in the context of Public-Private Partnerships: A Case Study of Solid-Waste Management in Rayong Municipality, Thailand, Federal Governance, 8, 3, 69-92
- r<sup>3</sup> Environmental Technology Limited (2004) Composting of Mechanically Segregated Fractions of Municipal Solid Waste - A Review. [http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user\\_upload/Daneshkadaha/dbehdasht/markaz\\_tahghighat\\_olom\\_va\\_fanavarihayeh\\_zist\\_mohiti/e\\_book/pasmand/Composting\\_of\\_Mechanically.PDF](http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/Daneshkadaha/dbehdasht/markaz_tahghighat_olom_va_fanavarihayeh_zist_mohiti/e_book/pasmand/Composting_of_Mechanically.PDF)
- Ranaweera, R.M.R.P. and Tränkler, J. (2001) "Pre-Treatment Prior to Final Disposal - A Case Study For Thailand" Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Pula, Cagliari, Italy, III pp.187-196
- Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T. (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering, Bioresource Technology, 100, 11, 2747-2761

## 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・組織的側面や財政的側面などの「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](http://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](mailto:ietc@un.org)  
[www.unep.org/ietc](http://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](http://www.nies.go.jp)

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](http://www.ccet.jp)