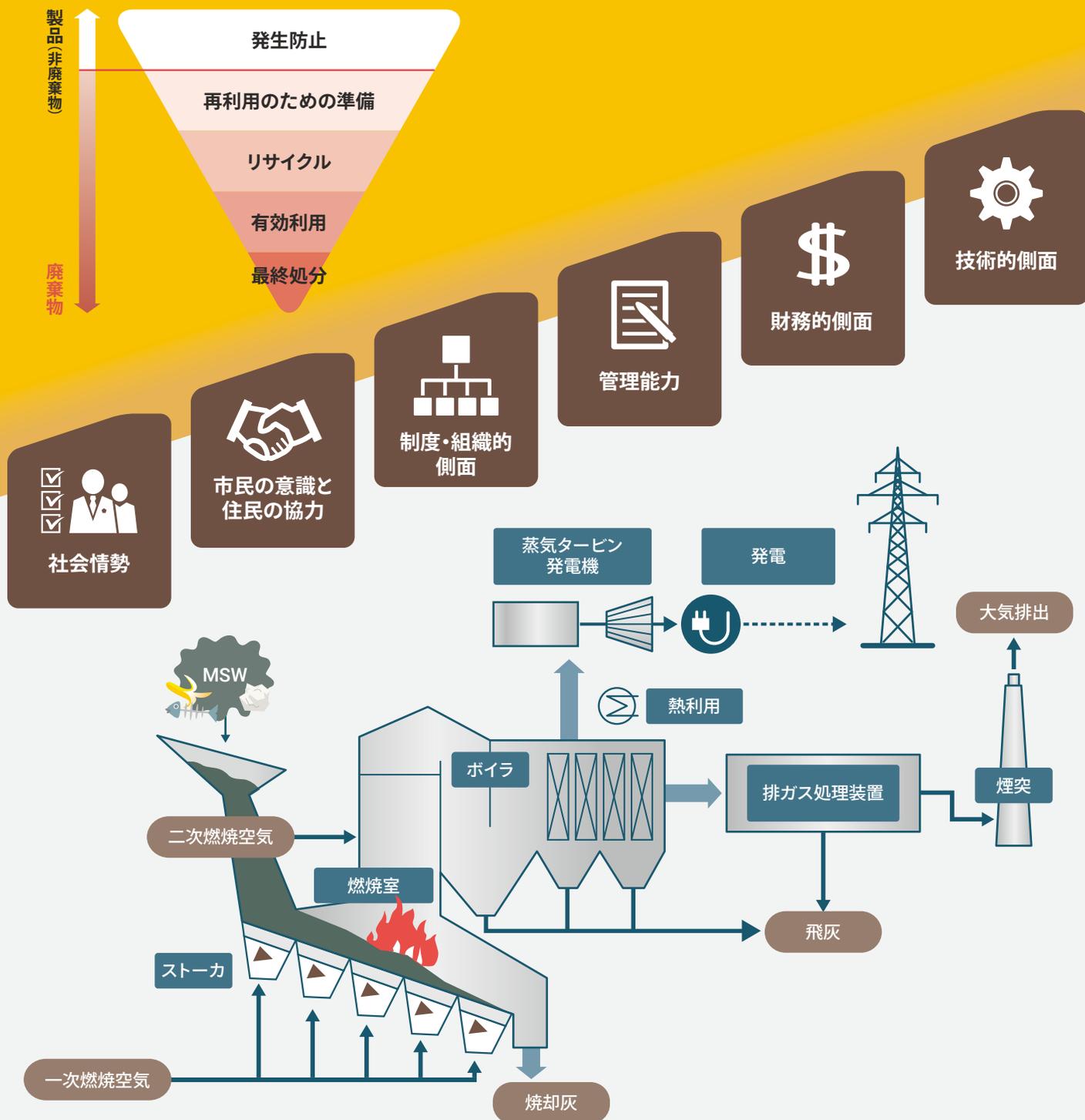


# 廃棄物発電焼却



## 都市固形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

### 著者

劉晨 (IGES)、西山徹 (IGES)、川本克也 (岡山大学)、  
佐々木創 (中央大学およびチュラロンコン大学)

### 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)、本多俊一 (UNEP IETC)、  
Keith Alverson (UNEP IETC)

### 査読者

廃棄物資源循環学会 (JSMCWM) 会員：高岡昌輝 (京都大学)、  
肴倉宏史 (国立環境研究所)、増田孝弘 (株式会社タクマ)、  
小野義広、谷垣信宏 (日鉄エンジニアリング)、竹田航哉  
(川崎重工工業株式会社)、藤井実 (国立環境研究所)、酒井  
伸一 (京都大学)

その他の外部レビュアー：Agamuthu Pariatamby (サンウェイ大学)、  
Prasad Modak (Environmental Management Centre LLP)、May Man-Mei Chim (UNEP IETC)

### 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。



都市固形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**

2020年6月



# 目次

略語一覧	ii
この廃棄物発電焼却ガイドラインについて	iii
<b>1. はじめに</b>	<b>1</b>
1.1 MSW廃棄物発電 (WtE) 焼却の定義	1
1.2 WtE焼却の歴史的背景と主な特徴	1
1.3 アジアの開発途上国の都市に与えられた機会と課題	2
<b>2. 持続可能なWtE焼却施設のための前提条件</b>	<b>5</b>
2.1 社会情勢	8
2.2 市民の意識と住民の協力	10
2.3 制度・組織的側面	10
2.4 管理能力	11
2.5 財務的側面	12
2.6 技術的側面	16
<b>3. 主な技術およびプラント製造業者との議論点</b>	<b>20</b>
3.1 焼却炉の分類	21
3.2 燃焼のための運転パラメーター	24
3.3 熱回収と発電	24
3.4 環境への影響を低減するための大気汚染・廃水管理プロセス	25
3.5 焼却灰および飛灰	28
<b>4. ケーススタディ</b>	<b>29</b>
4.1 クリーンプラザよこて (秋田県横手市)	29
4.2 上越市クリーンセンター (新潟県上越市)	31
4.3 焼却炉運営における長期の実績 (タイ、プーケット)	33
<b>参考文献</b>	<b>36</b>
CCETガイドラインシリーズについて	

## 略語一覧

APC	Air Pollution Control	大気汚染管理
FIT	Feed-in Tariff	固定価格買取制度
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit	ドイツ国際協力公社
GHGs	Greenhouse Gases	温室効果ガス
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	気候変動に関する政府間パネル
JICA	Japan International Cooperation Agency	国際協力機構
LCV	Lower Calorific Value	低位発熱量
MSW	Municipal Solid Waste	都市固形廃棄物
NDC	Nationally Determined Contributions	国が決定する貢献
PPP	Public-private Partnership	官民パートナーシップ
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
WtE	Waste-to-Energy	廃棄物発電

# この廃棄物発電焼却ガイドラインについて

都市固形廃棄物 (MSW) 管理の問題は、全世界の国々がパリ協定および持続可能な開発のための2030アジェンダの両方の目的を達成する上で、重要な推進要因の1つであるとみなされている。パリ協定に基づき各国が決定する貢献 (NDC) には、廃棄物をエネルギー・リサイクル・再利用の資源として使用すること、埋立地からメタンを回収することによる、温室効果ガス (GHG) 排出削減のための取り組みの一環としての廃棄物管理に関する対応が含まれる。持続可能な開発目標 (SDGs) の目標11 (住み続けられるまちづくり) には、大気の水質及び一般並びにその他の廃棄物の管理に特別な注意を払うことによるものを含め、1人あたりの都市の環境への悪影響を軽減することに焦点を当てたターゲット11.6が含まれている。SDG12 (つくる責任つかう責任) には、発生防止、削減、再生利用、再利用によるあらゆる廃棄物の環境上適正な管理 (ターゲット12.4および12.5) および食料廃棄物の削減 (ターゲット12.3) に焦点を当てた目標が含まれている。しかしながら、世界銀行 (2018年) では、2016年には20.1億トンであった全世界の年間廃棄物発生量は、今後30年間で34.0億トンに増大すると予測しており、この傾向はアジアおよびアフリカの開発途上国で特に顕著であるとしている。このことは、MSW発生量の増加傾向を覆すにはほとんど成功していないことを示唆しており、世界は「使い捨て社会」への道を相変わらず突き進んでいることになる。WtE焼却は廃棄物の減量およびエネルギー回収のための最良の選択肢の1つだが、1人あたりの廃棄物発生量の削減を確実なものとし、世界的な廃棄物問題に対する長期的な解決策を提供できるのは、循環型経済しかない。

## 廃棄物ヒエラルキーにおける WtE焼却の位置づけ

WtE焼却技術の導入は廃棄物ヒエラルキーに従う必要がある (図1)。このシナリオでは、廃棄物を削減するための発生防止、再利用、リサイクルの順に重点が置かれる。廃棄物フローを評価し、廃棄物を削減、再利用、リサイクルするためのさらなる可能性を明確化することも、MSWの意思決定プロセスにおける必須の部分である。WtE焼却プロジェクトは、リサイクルできないMSW残存物からエネルギーを回収するための補完的な技術の一種に分類されるため、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してはならない。

また、WtE焼却は、機能的なMSWシステムの数ある要素の中の、可能性のある1要素に過ぎない。WtE焼却だけで既存の廃棄物問題を解決することはできないため、適切な技術としてWtE焼却を選択するかどうかの決定は、それぞれの都市や国の統合的なMSW管理計画に基づいて行われるべきである。

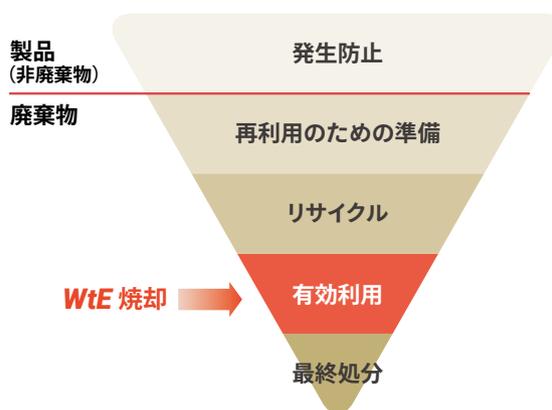


図1 持続可能な廃棄物管理のための廃棄物ヒエラルキー (出典: EU廃棄物枠組指令<sup>1)</sup>)

1 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](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en)

## 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において、主に家庭廃棄物と商業廃棄物であるMSWを対象とするWtE焼却技術に焦点を当てている。<sup>2</sup> 本ガイドラインは、WtE焼却について明確に理解する上で参考になる付加的な知識や情報を求める、国および都市レベルの意思決定者および政策立案者、住民やその他関係者が、廃棄物管理の改善に役立つ適切な選択肢としてWtE焼却技術導入の実現可能性について検討するのを支援することを目的としている。本ガイドラインは、以下のことを提供する。

- (1) WtE焼却技術を、その**メリットとデメリット**を含め**全体的に理解できる**ようにし、持続可能なWtE焼却プラントを計画する上での**技術的および非技術的側面**について説明する。
- (2) WtE焼却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。
- (3) プラント製造業者との議論に向けた**技術的知識**を提供する。

## 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て、日本およびその他の国におけるMSW管理セクターのプラント運営者や民間企業の専門知識と実践経験に基づいている。本書は、4つの主要パートから構成されており、[第1章の「はじめに」](#)では、WtE焼却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。[第2章の「持続可能なWtE焼却施設のための前提](#)

[条件](#)」では、WtE焼却プラントを計画する際に必要となる主要評価基準について説明し、持続可能なWtE焼却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、管理能力、財務的側面など、非技術的なものも含まれる。[第3章の「主な技術およびプラント製造業者との議論点」](#)では、WtE焼却プロセスで使用される技術、環境への排出など、WtE焼却プラント製造業者との調整の際に検討すべき重要な事項について説明している。[第4章の「ケーススタディ」](#)では、開発途上国と先進国の双方からの実例を取り上げている。

WtE焼却施設の建設を計画することは複雑なプロセスであり、専門的かつ徹底的な実現可能性の評価を伴う必要がある。本ガイドラインは、**意思決定者が都市における現状を正確に評価し、全体的なMSWシステムを補完するWtE焼却施設を導入する可能性を決定するための参考として、計画の初期段階で使用する必要**がある。プロジェクトは、あくまでも成功の確率を確認した後のみ、WtE焼却プラントを実際に建設する前の詳細な実現可能性調査と実行計画という次のステップに進むべきである。

## 忙しい読者へのメッセージ

忙しい読者の方は、[第1章](#)に目を通すことで、WtE焼却の全般的な概要をおおまかに理解できる。WtE焼却の導入可能性を検討されている方は、[6ページの図4](#)を参考にして、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すると良い。WtE焼却に関わる技術の詳細は、[第3章](#)に記載されている。

2 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、低中所得、および高中所得の国や地域が含まれる。

# 1 はじめに

## 1.1 MSW廃棄物発電 (WtE) 焼却の定義

WtE焼却は、廃棄物を850℃以上の酸素の存在下で直接燃焼させ、熱とエネルギーを回収し、排ガスを浄化し、排水を有効利用する高度なメカニズムを備え、多様な廃棄物をひとつのプロセスで扱うことができるものである(図2)。MSW焼却は、大気汚染やダイオキシンへの対応策と共に長年に渡って大幅に進化してきた、信頼できる形式の熱処理技術である(Makarichi et al., 2018)。MSW焼却の主なメリットは廃棄物の減量と衛生管理であり、また、都市部の環境に合わせた設計も可能であることから、大都市や人口の多い都市においてMSWを処理するための実践的な方法でもある。

WtE焼却には、エネルギーを生み出すための資源として廃棄物を利用するというメリットもある。この焼却形式はまた、化石燃料源によるエネルギーの必要性を相殺することによって二酸化炭素放出を減らし、埋立の代替手段として使用される場合には、埋立から発生するメタンも削減する(IPCC, 2007)。しかしながら、MSW焼却の導入にも、(1) 焼却炉の建設・運営費用の高さ、(2) 廃棄物の処分やエネルギー売却による収益ではすべてのコストを賄うには不十分、(3) 運営には一定量以上の廃棄物が必要であり、廃棄物を3Rから逸らしてしまう可能性がある、(4) 人の健康へのリスクなど、内在する障壁が存在する(Karim and Corazzini, 2019; GAIA, 2019)。

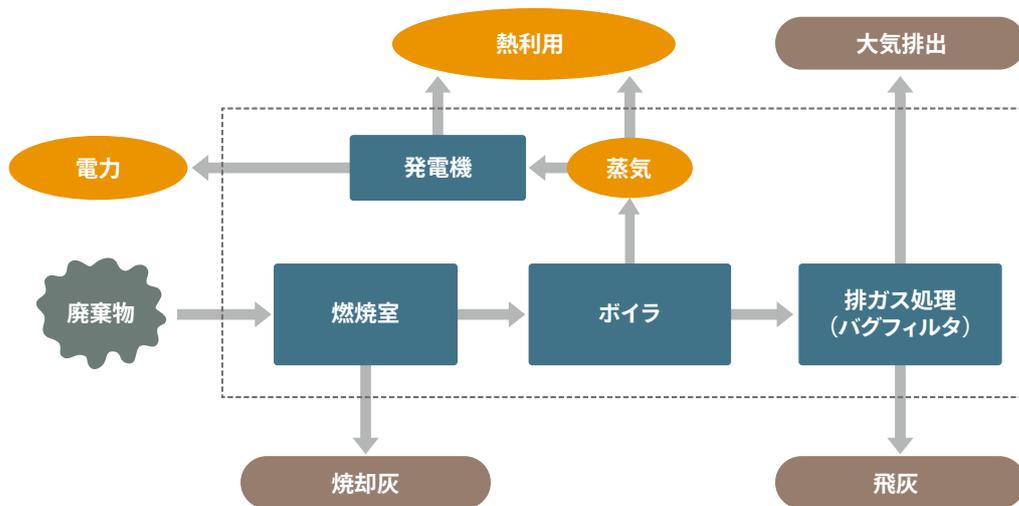


図2 WtE焼却プラントの一般的なフローチャート

(出典：著者)

## 1.2 WtE焼却の歴史的背景と主な特徴

廃棄物焼却は、19世紀後半に、町や都市における継続的な人口増加に起因する疾病の大流行を抑制し、増加する廃棄物の量を削減する必要性から始まった。衛生的な観点からは、焼却は腐敗する可能性のある

食品廃棄物と、感染や疾病の原因となる廃棄物の両方を処理する上で最も有効な方法である。一方、経済発展の結果、紙やプラスチックなど、さらに多くの廃棄物が発生するようになり、最終処分場を圧迫している。

焼却は、最終処分場に送られる廃棄物の量を削減するための最も効果的な方法として開発されてきた。

WtE焼却は、焼却中のエネルギーを効果的に利用するために開発されてきた。日本のプラント製造業者がWtE焼却のために建設した最新のプラントでは通常、エネルギーの**20~25%、場合によってはそれ以上のエネルギーを電力に変換**することができる。一定量のエネルギーを総生産量から自己消費用にとっておき、残りのエネルギーが他の施設や消費者に伝送される。北欧など、暖房の需要が高い地域では、地域暖房用に温水を供給することもできる。現在、全世界が気候変動やエネルギーシステムの移行による影響を懸念しており、WtE焼却によって発生したエネルギーを可能な限り使用するという選択肢を検討することが必要となっている。近年、日本や中国、タイにおいて、WtE焼却プロセスにより発生したエネルギーを外部顧客に販売することが可能な、FITスキームなどの国の制度が導入され、WtE焼却はさらに多くのメリットを提供するようになっている。しかしながら、一般に、販売利益のみでは焼却炉の運転費用を十分に賄うことはできない。

**廃棄物の焼却は、当該施設で施行される環境対策が不十分であれば、ばいじんやダイオキシンなど、大気汚染の問題につながることから、住民やその他の関係者にとっては懸念となる。**現在では、ダイオキシン対応など、最新の環境技術や施設の利用により、**厳格な環境基準を満たすことも可能となっている。**しかしながら、古い焼却炉の悪評により住民が建設に反対することも多く、今では、焼却が持つ一般的な悪いイメージを払拭させ、焼却は効果的かつ容認可能な技術だとする評判へ変える必要性も高まっている。

また、WtE焼却施設は、災害中の停電時には特に、**非常用電源の代替手段**となり得る。これは、近年の日本においては重要な付加的メリットとみなされている。

文献レビュー (Kumar and Samadder, 2017; Karim and Corazzini, 2019; Psomopoulos et al., 2009; GAIA, 2019; GIZ, 2017; UNEP, 2019) に基づくWtE焼却のメリット、デメリット、要件の概要を表1に示す。

### 1.3 アジアの開発途上国の都市に与えられた機会と課題

近年、東南アジアや周辺地域の開発途上国においては、人口増加や都市化、ライフスタイルの変化などにより、特に都市部を中心に廃棄物の量が急激に増加している。その結果、最終処分場の残余容量に対する負荷が増したため、焼却プラントなど、廃棄物量を減らすための中間処理施設の重要性が高まっている。エネルギー需要や全世界的な支持の高まりと相まって、WtE焼却は太陽光や風力よりも安定したエネルギー源になり、将来的なWtE焼却システムに対する需要も増加するという期待も高まっている。一般的に、WtE焼却は以下の場合、適切な選択肢となる。

- (1) 都市化の進展につれて廃棄物量が増加しているが、埋立のためのスペースが限られていて、廃棄物量を迅速に減らす方法を求めている都市。
- (2) 埋立削減による温室効果ガスの排出削減や廃棄物からのエネルギー回収、廃棄物管理およびエネルギー回収による経済的インセンティブの増加など、廃棄物処理上のメリットを増やしたいと考えている都市。
- (3) 廃棄物に残留するウイルスや病原菌による感染を懸念し、WtE焼却システムでの処理による適切な衛生管理を求めている都市。

表1 WtE焼却の主なメリット、デメリット、要件

	メリット	デメリット	要件*
技術	1. WtE焼却は、廃棄物の埋立量を削減し、衛生状態を管理し、エネルギー(熱および電力)を回収する上で有用である。	1. 施設で使用される技術が複雑である(建設および運営)。	1. WtE焼却には、LCVが十分な廃棄物が必要である。 2. 廃棄物の組成を注意深く調べる必要がある。
環境	1. 焼却は、埋め立てられる廃棄物の量を減らし、埋立を有効に利用する上で効率的な手段である。	1. 飛灰および固形残留物(焼却灰)は、人の健康にリスクを及ぼすおそれがあるため、適切に処理しなくてはならない。	1. 大気汚染、灰の処分、水質汚染規制など、環境基準を整備しなくてはならない。 2. 焼却灰および飛灰は、安全な最終処分場で安全に処分しなくてはならない。
温室効果ガス排出量	1. WtE焼却は、以下の2つの方法で、温室効果ガス(GHG)の排出を削減する。(1) 直接埋立の代替として使用された場合に、埋立地からのメタンガス排出をなくす、(2) 化石燃料の代替として廃棄物からのエネルギーを使用する。	1. WtE焼却による処理は、発生源での抑制や再利用よりも、温室効果ガス排出量が多くなる。	1. 要件ではないが、ライフサイクルアセスメントや排出規制措置も推奨される。
経済的影響	1. 発生したエネルギーを使用またはFITスキームなどの法的インセンティブを用いて売却できる。 2. 可能な場合には、クリーン開発メカニズム(CDM)に基づく炭素クレジットを利用できる。	1. 建設・運営コストが高い。電力やその他のリサイクル資源の売却による収益では、焼却炉の運転コストを賄うには十分ではない。	1. 自治体は、処理委託料や様々なスキームによる収益、その他の補助金により建設・運営コストの全額を賄う方法を検討する必要がある。
リソースの観点	1. 電力、蒸気、熱を回収できる。 2. 焼却灰から金属などの有価物を回収できる場合がある。	1. WtE焼却には、安定した運営のために一定量以上の廃棄物収集が必要となるが、これは廃棄物の発生抑制と相反する要因となる。 2. 排ガスに酸性成分が含まれるため、発電効率の向上が難しい。 3. 電力と比べると、蒸気や熱を利用する方法が少ない。	1. 可能な限り、廃棄物の発生を最小限に抑え、リサイクルおよび再利用を推進する努力を怠ってはならない。WtE焼却という選択肢は、廃棄物管理ヒエラルキーおよび3R政策にも沿って検討すべきである。 2. 蒸気および熱としてのエネルギーの利用は、電力よりも効率的なエネルギー源であることから、拡大すべきである。
社会的側面、その他	1. WtE焼却は、ウイルスや病原菌による感染の防止に有効であり、廃棄物関連感染症の拡大を抑制する。 2. WtE焼却施設は、災害中の停電時には特に、非常用電源の代替手段となり得る。 3. WtE焼却施設は、循環型経済において役割を担う。	1. 地域住民は、健康への悪影響、環境汚染、臭気、地価の下落に対する不安、ならびに不適切な説明、場所選定の根拠の不十分さ、あるいはその他の理由の結果としての心理的な問題により生じた不満により、焼却炉施設の建設に反対することが多い。	1. 周辺住民から建設に対する合意を得る必要があり、施設は周辺住民が監視できるようにしなくてはならない。 2. 廃棄物の発生源における住民の分別への協力が、WtE焼却の前提条件である。

\* 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管理施設と共通する一般的な問題は含まない。

(出典：著者)

しかしながら、開発途上国においてWtE焼却を導入するためには、いくつもの障壁があることに注目すべきである。WtE焼却だけでは問題を解決することは不可能で、廃棄物管理においては発生源での廃棄物の削減、さらに再利用とリサイクルが不可欠な要素であり、WtE焼却プラントを設計する前にこれらを検討する必要がある。WtE焼却はまた、廃棄物の組成、回収およびリサイクル、資金調達他の側面など、地域特有の条件に合わせた統合的な固形廃棄物管理システムに組み込まれる必要がある。「ソフト」な戦略的側面、具体的には政治、制度、社会、財務、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くある（UNEP, 2019；GIZ, 2017；IEAバイオエネルギー、2013；世界銀行、2000）。例えば、開発途上国では、以下のようなことがある。

- 廃棄物の含水率の高さや可燃性の低さ、季節的変動のせいで、直接焼却には適さない。回収・運搬システムやガバナンス能力、季節、天災により、廃棄物の量も異なる場合がある。注意深い監視やアセスメントが欠如していることによってもリスクが生じ、運営の失敗につながる可能性がある。
- 投資の不足や運営コストの高さによって、低所得国では、基本的な技術基準しか満たさず、複数ラインの焼却炉、ポンプや配管、電子制御システムなどのバックアップシステム、適切な排ガスフィルタシステムなどが除外されている可能性のあるWtE焼却プラントが増加している。バックアップシステムがないことから、これらの低コストプラントに関わる故障リスクは高い。また、長期的な資金調達が不安定で、運営コストの高さによる運営の失敗につながり、自治体が多大な財務リスクを引き受けなければならないことがある。

- MSW管理のパフォーマンスを向上させるための有望な代替手段として、官民パートナーシップ（PPPs）が台頭している。しかしながら、民間セクターが建設・運営した施設については、多くの場合、民間セクターが実権を握ったままでいるか、自治体が適切な運営を行うことに失敗している。
- 環境法令の施行の弱さ、特に継続的な排出監視がないことや、投資家や公共セクターによるデュー・ディリジェンスが欠如していることにより、高いレベルでの人の健康への悪影響や不可逆的な環境ダメージにつながる恐れがある。
- 設置されたシステムを効率的かつ効果的に運営するための熟練した職員の数が不十分なことによって、プロジェクトが失敗へと向かってしまう可能性がある。

WtE焼却プラントを導入するにあたって、自治体や地域環境に負担をかけたあげくに失敗してしまうリスクを避け、成功を確実にするためには、高コストかつ複雑で、技術的に進んだWtE焼却プラントを導入する前に、**現地の廃棄物管理条件が適切かどうか、注意深くチェックすることが重要である**。この点については、[第2章](#)で説明する。

廃棄物の組成や分別／回収率、その他の要因によっては、コンポスト化や、機械的・生物的処理、嫌気性消化など、他の中間処理技術の方が望ましい場合もある（図3参照）。他の中間処理技術に関する詳しい情報は、本シリーズの他のCCETガイドライン、すなわち、[堆肥化](#)、[機械的・生物学的処理（MBT）](#)、都市固形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：嫌気性消化に記載している。

## 2 持続可能なWtE焼却施設のための前提条件

WtE焼却施設の導入を成功させるためには、様々な条件を整えなくてはならない。世界銀行 (Rand et al., 2000) が発行した意思決定者向けガイド、ISWAによる低中所得国におけるWtE焼却に関するガイドライン (ISWA, 2013)、GIZによる都市固形廃棄物管理におけるWtEオプション (GIZ, 2017)、JICAによるWtE焼却ガイドライン<sup>3</sup>に基づいて、主要評価基準を、「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」、「財務的側面」、「技術的側面」の6つの視点から検証することができる (図3)。計画の初期段階には、この6つの視点とそれぞれの相対的な主要評価基準に従い、修正した事前チェックフロー (図4) を目安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WtE焼却に適しているかを詳しく調べ、どの技術がこれらの条件に最適であるかを考えるとき、透明性のある評価を構築するのに役立つ。しかしながら、これは、WtE焼却プロジェクトを計画する際において実現可能性を専門的に評価するという必要性に置き換わるものではない。図3に示すように、プロジェクトは、あくまでも成功の確率が確認できた後にのみ、WtE焼却プラントを実際に建設する前の、適切な技術を導入するための詳細な実現可能性調査と実行計画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む。基準が満たされない場合には、以下の行動が推奨される。

- (1) 必須主要基準が満たされない場合には、WtE焼却の導入に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) 強く推奨される主要基準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) 推奨主要基準が満たされていない場合は、WtE焼却の実施にはリスクが伴うため、注意が必要。

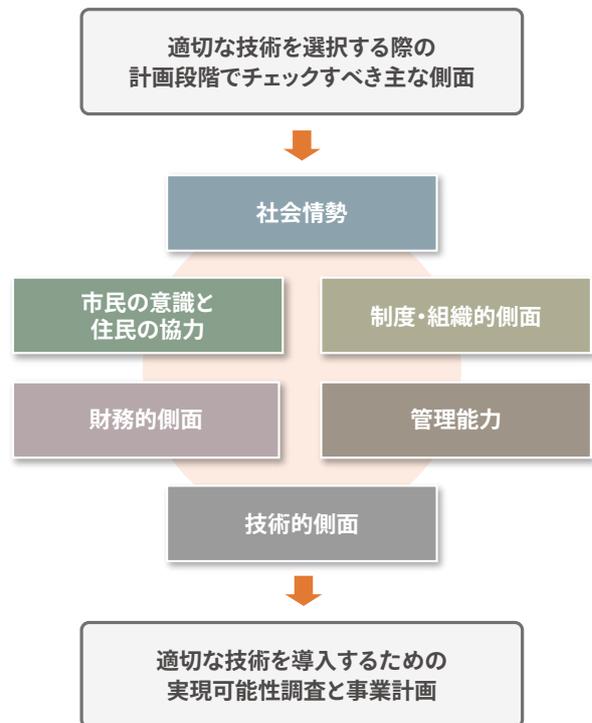


図3 適切な技術を選択する際の計画段階でチェックすべき主な側面 (出典：著者)

3 JICA WtE焼却ガイドライン (日本語)、2018年11月9日に開催されたWtE焼却ガイドラインに関する説明会による資料

## 社会情勢

対象エリア（都市部または市間共同体）には、一定以上の人口規模と保証された MSW 数量がなくてはならない。



MSWの回収と運搬のための適切なシステムが整備され、最終処分のための場所が確保されている。



最終処分場の容量が限られていることや、衛生的廃棄物処理の需要の高さにより、WtE 焼却施設の導入に対して社会的ニーズが高い。



エネルギーや上下水道のための効率的な行政サービスが整備されている。



汚染防止や環境影響アセスメントに関する法令が策定・制定されている。



## 市民の意識と住民の協力

住民は発生源における廃棄物の選別に積極的に取り組んでおり、リサイクル資源物質の回収や、WtE 焼却に適していない廃棄物の抑制が可能である。



住民に、大気汚染防止や、ウイルスや病原菌による感染の抑制といった衛生管理における有効性など、WtE 焼却技術についての基本的な理解がある。



## 制度・組織的側面

固形廃棄物管理に関する基本的な法規則が策定されている。



WtE 焼却施設のための適切な建設用地を確保することができる。



WtE 焼却施設の建設・運営を担当する安定的な行政機関が存在し、中核的な職員の長期雇用（3年以上）を可能にする人事管理システムが整備されている。



図4 WtE焼却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

### 管理能力

WtE 焼却が上位計画（総合計画、地域開発戦略など）に位置付けられている。



自治体のリーダーたちが、WtE 焼却の検討に前向きな態度や意欲を示している。



自治体は、専門委員会やコンサルタントから、WtE焼却プロジェクトを実施するための支援を得ることができる。



エネルギー部門や電力会社が電力を売却し、販売価格を設定するための技術的基準や業務を策定している。



### 財務的側面

WtE焼却の総コスト（建設、運営、保守）を確保できる。



電力や他のリサイクル資源を売却することにより、収益を創出できる。



契約により、処理委託料を安定した価格で長期的に設定することができる。



関係者の中で、WtE 焼却のための PPPスキームが協議されている。



リスクが評価・確認済みであり、各責任の分界点が理解され、全体的なリスク共有が確保されている。



### 技術的側面

廃棄物組成とLCV（WtE焼却では6000kJ/kg以上）を調べる必要がある。



焼却灰と飛灰を安全に処理できる。



プラント製造業者は、適切なレベルの専門知識と適切なタイプの焼却炉を有している。



環境モニタリングシステムが整備されている。



職員の技術的スキルを向上させるための能力構築と訓練が利用可能である。



✓ 必須の要件

必須の要件が満たされていない場合は、評価を中断するか、改善後に再評価を行う。

✓ 強く推奨される要件

強く推奨される要件が満たされていない場合は、支援策や代替案によって状況の改善を図る。

✓ 望ましい要件

望ましい要件が満たされていない場合は、導入にはリスクが伴うと考える。

（出典：著者）

## 2.1 社会情勢

### ☑ 必須の要件

**対象エリア（都市部または市間共同体）には、一定以上の人口規模と保証されたMSW数量がなくてはならない。**

WtE焼却プラントを計画する時には、検討すべき主要な要素として、まず最初に、**対象範囲の境界、対象人口、収集されるMSW量**を見積もってWtE焼却プラントの規模を決定する必要がある。

1人あたりの1日の廃棄物の発生量として表現されるMSWの発生量は、一般的には1人あたり約1kgと認められているが、都市によって異なる。また、この量は、自治体が商業廃棄物をMSWとして分類・回収している

かどうかによっても異なる。先進国では、1日1人あたりのMSW量が1kgを超えることが多く、米国では1日1人あたり2kgを超えているが、日本では、1日1人あたり1kgをわずかに下回る。開発途上国の多くでは、この数字は1日1人あたり0.5～1kgだが、大都市ではこれよりも多く1日1人あたり1kgを超える傾向にあり（表2）、将来的にはさらに増えると予想されている。

表2 東南アジア諸国におけるMSWの発生量

国名	MSWの発生量 (千トン/年)	1人あたり発生量 (kg/日)	データ取得年
カンボジア	6,818	0.49	2005
インドネシア	68,389	0.76	2006
マレーシア	10,845	0.99	2012
ミャンマー	5,616	0.44	2012
フィリピン	35,580	0.70	2012
タイ	27,820	1.15	2018
ベトナム	15,618	0.47	2015

（出典：Liu et al., 2018）

埋立地の残余容量がMSW量の増加に十分に対処できないという理由で、WtE焼却が直接的な埋立の代替手段として計画されている場合には、WtE焼却プラントの目標処理能力も、現在のMSW量から見積もることができる。

また、一般的に、施設の規模に伴い発電効率は増加し、一方、廃棄物処理量の単位あたりの建設コストと運営は減少する。

**発電の最適なパフォーマンスレベルを実現するためには、可燃性MSWの供給量を年間10万トン（年間平均で274トン／日、稼働率を考慮すれば300～330トン／**

**日）以上にすることが一般に推奨される**（GIZ, 2017；ISWA, 2013）。日本（焼却施設の数が世界で最も多く、MSWの1日1人あたり発生量が約1kg）で最も一般的に建設されているWtE焼却プラントの処理能力は1日1基あたり100、150、200、300トンとなっている。<sup>4</sup> 大半のプラントには複数の焼却炉装置があり、プラントの安全かつ連続的な運営が保証されており、各装置の稼働率は約80%と想定されている。<sup>5</sup> 現地の状況により、例えば、1日1基あたり500～600トンの大型装置や1日1基あたり100トン未満の小型装置なども提供されている。

4 環境省データベースのデータ概要

5 例えば、東京都では、各装置を年間293日稼働させることを計画している。

[https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/kihonkeikaku/documents/27\\_ippaikihonkeikaku\\_zenpenn.pdf](https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/kihonkeikaku/documents/27_ippaikihonkeikaku_zenpenn.pdf)

## ✓ 必須の要件

**MSWの回収と運搬のための適切なシステムが整備され、最終処分のための場所が確保されている。**

WtE焼却には、年間を通じて安定した運営をするための一定量以上の廃棄物収集が必要となることから、効率的なMSW管理システムが存在することが、WtE焼

却の実施を成功させるための基本的な要件となる。

また、WtE焼却では、焼却灰や飛灰など、最終残留物の処分のための最終処分場の必要性はなくなる。

## ✓ 強く推奨される要件

**最終処分場の容量が限られていることや、衛生的廃棄物処理の需要の高さにより、WtE焼却施設の導入に対して社会的ニーズが高い。**

埋立容量や廃棄物の衛生的処分に対する需要の高さ、環境保護や地球温暖化といった問題に対する強い意識など、強い社会的ニーズが認められる必要があ

る。こうした社会的考慮が存在しない地域では、WtE焼却施設の導入が反対を受ける原因となる恐れがある。

## ✓ 望ましい要件

**エネルギーや上下水道のための効率的な行政サービスが整備されている。**

WtE焼却施設の運営に必要な公共サービスを確保するため、施設の建設予定地の近くに、電力や上下水道など、十分なレベルの社会インフラが整備されてい

なくてはならない。管理の行き届いた都市インフラに対応する能力と経験が現地にあれば、複雑なシステムも現地で取り扱うことが可能になる。

## ✓ 望ましい要件

**汚染防止や環境影響アセスメントに関する法令が策定・制定されている。**

環境法令が整備されていなければ、WtE焼却施設の環境対策に関して、確実な結果を伴わない協議や決定が行われる恐れがある。環境アセスメント、排ガス排

出基準やその他の基準に関する法令は、国や地域ごとに実施方法や状況が異なるため、施設を建設する前に明確にする必要がある。

## 2.2 市民の意識と住民の協力

### ☑ 必須の要件

住民は発生源における廃棄物の選別に積極的に取り組んでおり、リサイクル資源物質の回収や、WtE焼却に適していない廃棄物の抑制が可能である。

開発途上国では、MSWの大部分が含水率の高い有機物から構成されており、LCVを低下させ、焼却効率が下がる。従って、**廃棄物分別によってリサイクル資源を回収すると共に、廃棄物の発熱量を確保することがWtE焼却の前提条件である。** 廃棄物分別プロセスにおいては、有害物質や不燃廃棄物（粗大な鉱物や金属な

ど）といった焼却に不適切な廃棄物を取り除くために、住民の協力が不可欠である。MSWの大部分は住民から発生するので、分別や排出抑制の協力を得ることが重要である。住民の協力の度合いをチェックできれば、自治体の能力や、その廃棄物管理における履行能力を示すことができる。

### ☑ 必須の要件

住民に、**大気汚染防止や、ウイルスや病原菌による感染の抑制といった衛生管理における有効性など、WtE焼却技術についての基本的な理解がある。**

住民がWtE焼却施設に対して持つ不信感を払拭することに注力すべきである。過去には、大気汚染に対する懸念は主に、ダイオキシンなどの焼却プラントから排出される未処理排ガスに起因していた。行政は、積極的な姿勢でこうした懸念に対処する必要がある。建設用地の周辺住民に、**最新の焼却炉の場合、大気汚染を防止するための広範な対策が取られており、基準を順**

**守している**ということを理解してもらうには時間が必要である。また、高温度燃焼は、ウイルスや病原菌による感染の抑制や殺菌においても効果的なプロセスであるということが認められている。高温度条件は、感染性廃棄物や糞尿を含有する廃棄物の分解にも効果的であることが指摘されている。

## 2.3 制度・組織的側面

### ☑ 必須の要件

**固形廃棄物管理に関する基本的な法規則が策定されている。**

廃棄物処分施設およびWtE焼却施設を設置することにより、**適正な廃棄物処分を推進するための法的根拠が整備されている必要がある。** 廃棄物処分システムと

管轄当局をまず特定してから、処理施設建設のための法的根拠を策定する必要がある。

### ✓ 必須の要件

**WtE焼却施設のための適切な建設用地を確保することができる。**

建設用地の確保は、WtE焼却計画の要件を満たし、目標を達成するための、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・規制が適用されるため、総合的な視点から計画を進めることが重要である。また、自治体の安定性や信頼性も、こうした基準の重要要素となる。前のセクションで述べた通り、WtE焼却施設を建設する上で最も重要かつ困難

な点は、周辺地域の住民の同意が得られる場所を確保できるかどうかである。適切な用地は都市部にも農村部にも存在する。日本や欧州では、WtE焼却プラントが都市の中心部に置かれている例がある。用地が都市（廃棄物の発生源）に近い場合には、蒸気需要が期待される工業団地内に置くことを検討することも可能である。

### ✓ 強く推奨される要件

**WtE焼却施設の建設・運営を担当する安定的な行政機関が存在し、中核的な職員の長期雇用（3年以上）を可能にする人事管理システムが整備されている。**

廃棄物管理は公共サービスであり、WtE焼却施設の建設は都市の長期的な廃棄物管理・都市開発計画に

基づくべきであることから、制度的側面からは、行政機関の安定性に第一に注目すべきである。

## 2.4 管理能力

### ✓ 必須の要件

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

WtE焼却技術は、国や地域の廃棄物管理計画や戦略などを含む、総合計画、地域開発戦略、その他の関連計画といった上位計画において、正式／法的に認めら

れる必要がある。こうした計画にWtE焼却プラントを位置づけることで、計画や建設、運営を確実に統合して円滑に実施することができる。

### ✓ 必須の要件

**自治体のリーダーたちが、WtE焼却の検討に前向きな態度や意欲を示している。**

WtE焼却施設の導入は政治的な動向に影響され、また自治体の権力者の意思にも強く影響される。自治体

のリーダーたちは、WtE焼却施設の導入に対して積極的な態度を示す必要がある。



### 強く推奨される要件

**自治体は、専門委員会やコンサルタントから、WtE焼却プロジェクトを実施するための支援を得ることができる。**

WtE焼却施設の建設計画には、技術的スキルなど、様々な専門知識が必要である。従って、プロジェクトは外部の専門家やコンサルタントの支援を受けて実施する必要がある。とはいえ、検討すべき最も重要なポイントは、電力売却という実務的な問題について電力会社

に事前に相談することが可能かどうかなど、プロジェクトを実行する行政機関の能力である。これらの理由から、行政機関は、WtE焼却システムを計画・実行・維持する上で一定の能力を有していなくてはならない。



### 強く推奨される要件

**エネルギー部門や電力会社が電力を売却し、販売価格を設定するための技術的基準や業務を策定している。**

WtE焼却プラントが送電のために電力会社の電力システムに接続される場合には、プラントで発電した電力をその電力会社に売却することが可能である。従って、電力の質（電圧や周波数など）を維持し、1つの発電施設における故障・障害が他に影響を及ぼすことを防止するためには、行政は、管轄の官庁または部署が

定めた技術的基準ならびに電力会社が提示した技術要件について、電力会社に相談することが可能でなくてはならない。また、WtE焼却プラントからの電力売却に関する技術基準や、電力売却の調整単価の有無を確認することが推奨される。

## 2.5 財務的側面



### 必須の要件

**WtE焼却の総コスト（建設、運営、保守）を確保できる。**

建設や運営、保守のコストを含め、プロジェクトサイクル全体の資金源を確保する必要がある。収益を創出するための方法の例としては、住民から直接受け取る廃棄物処分料、廃棄物を処理施設に持ち込む際の収集料、電力・熱・蒸気など再生エネルギーやリサイクル資源の売却益、廃棄物固定価格、国または地方の補助

金、その他の地方手数料・税金によるMSWサービスのクロスファイナンス、炭素資金や税還付・電力を対象とする特別FITの申請などの国または国家間の収益がある。その中でも、通常は処理委託料と電力販売による収益の両方が、WtE焼却の重要な収入源となる。

## ✓ 強く推奨される要件

### 電力や他のリサイクル資源を売却することにより、収益を創出できる。

WtE焼却により発生した電力やその他のリサイクル資源の売却益も、重要な資金源である。近年の同様の状況を鑑みるに、売却益を長期的に持続可能なものにするためには、FITなどの規制インセンティブを確立することが望ましいと思われる。従って、各国でどのよう

にこれらのシステムが実施されているか、調査することが必要である。電力売却量に影響を及ぼす要因としては、例えば、MSWの焼却量、廃棄物のLCV、発電効率、発電装置の稼働時間などがある。

## ✓ 強く推奨される要件

### 契約により、処理委託料を安定した価格で長期的に設定することができる。

処理委託料（もしくは収集料）は、焼却される廃棄物の量に基づいて自治体が焼却施設の事業者を支払う費用である。焼却の主な収入源は処理委託料であり、長期的に安定した運営のためには、この資金源を確保

することが非常に重要となる。アジアの開発途上国では、埋立や焼却の処理委託料はMSW1トンあたり10～数10米ドルのレベルで設定されており、これはWtE焼却炉の運営コストを賄うには十分ではない。

## ✓ 望ましい要件

### 関係者の中で、WtE焼却のためのPPPスキームが協議されている。

PPP(Public Private Partnership；公民連携)は民間資本や民間のノウハウを活用し、効率化や公共サービスの向上を目指すものとされており、多くの国々で、MSW管理サービスの提供を改善するための有望な補完的アプローチとして台頭してきている。PPPには、プロジェクトの資金調達、構築、運転において、政府機関と民間企業との協力が必要になる。

表3に示すように、WtE焼却のためのPPPには、様々な種類がある。近年、日本におけるWtE焼却プロジェクトでは、PPPとして設計-建設-運営(DBO)が選択されることが最も多くなっている。しかしながら、開発途上国では、多額の先行設備投資や高い運営コストにより、施設は主に、海外や民間からの資金調達によって建設さ

れている。アジア諸国では、公共セクターが負うリスクの低い建設-運営-移転(BOT)や建設-所有-運営(BOO)といった種類のPPPが好まれている。WtE焼却向けのこれらの種類のPPPでは、行政機関が技術審査の実施や契約策定において重要な役割を果たすが、公共と民間の両セクターが、それぞれに期待される役割と責任およびWtE焼却プロジェクトについて共通の理解を持つことが求められる。(1)回収される廃棄物の質や発熱量など、WtE焼却炉に供給される廃棄物の量と質の不確実性、(2)WtE焼却・運営コストを回収するための資本の形式、という2つの重要な問題が慎重に対処されれば、プロジェクトの成功確率は高まるだろう。



### 望ましい要件

リスクが評価・確認済みであり、各責任の分界点が理解され、全体的なリスク共有が確保されている。

最終的に、WtE焼却プロジェクトに関与する当事者は、プロジェクトに伴う多くのリスク(表4)を理解して

明確化し、リスクの共有方法について話し合う必要がある。

表3 WtE焼却プロジェクトの種類と特徴

種類	詳細	資金調達	設計および建設	運営管理	所有	
DB (設計-建設)	公共セクターが資金を調達し、民間事業者が十分な処理能力のある施設を設計・建設する。公共セクターも施設の運営・管理を行う。	公共	民間	公共	公共	
DBO (設計-建設-運営)	公共セクターが資金を調達する。民間事業者が長期的な包括契約に基づいて施設の設計、建設、管理、運営を行う。	公共	民間	民間	公共	
P F I (プライベート・ファイナンス・イニシアチブ)	BTO (建設-移転-運営)	民間事業者が施設を建設するための資金を調達する。建設後、投資家はこの施設を公共セクターに移転する。民間事業者が長期的な包括契約に基づいて施設の管理、運営を行う。	民間	民間	民間	公共
	BOT (建設-運営-移転)	民間事業者が資金を調達し、建設された施設を使って公共サービスを行う。公共セクターはサービスに対して民間事業者に報酬を支払う。契約期間が満了したら、民間事業者は施設を公共セクターに移転する。	民間	民間	民間	民間 公共
	BOO (建設-所有-運営)	民間事業者が資金を調達し、建設された施設を使って公共サービスを行う。契約期間が満了したら、民間事業者が施設の所有権を得て運営を継続する。	民間	民間	民間	民間

(出典：JICA WtE焼却ガイドラインに基づき、著者が改訂)

表4 検討すべき主なリスク

段階	リスク	内容
一般的な問題	法制の変更	法規制などの変更
	税制の変更	法人税・消費税の変更
	許認可の遅れ	事業者、補助金などの許認可の遅れ
	第三者補償リスク	騒音、振動、悪臭その他の環境汚染による補償請求がある場合
	住民対応	反対、訴訟などに関する事項
	土地取得	建設用地の確保に関する事項
	事故	事故発生の場合
	環境保護	プロジェクトが環境に影響を及ぼす場合
	延期および中止	政府の不支持、プロジェクトの中止、失敗など
	価格変動	インフレおよびデフレ
	金利変動	金利の変動が借入金などに影響を及ぼす場合
	その他の予期せぬリスク	天災、暴動など
計画と設計	資金調達	必要な資金を確保するための方策
	調査	地形、地質などの現場調査の不備による計画変更のリスク
	設計	設計に関する事項
建設	建設の遅れ	建設の遅れや建設の中断などによるサービス遅延のリスク
	建設コストの増加	建設コストの増加に伴うリスク
	パフォーマンス	要件不達リスク
運営	計画変更	事業のニーズや内容の変更
	廃棄物の不確実性および変更	廃棄物の予定数量の確保や廃棄物の質の変化に関するリスク
	施設の損傷	不可抗力以外の事故による施設損傷のリスク
	パフォーマンス	要求されるパフォーマンスレベルを満たすことができなかった場合
	運営コストの増加	不適切な管理によるコストの増加

(出典：JICA WtE焼却ガイドラインに基づき、著者が改訂)

## 2.6 技術的側面

### ☑ 必須の要件

廃棄物組成とLCV (WtE焼却では6000kJ/kg以上) を調べる必要がある。

計画段階においては、廃棄物の量や質について、正確なデータを得ることが重要である。廃棄物の量については2.1で取り上げている。廃棄物の質について理解するためには、実際の調査によって廃棄物の組成およびLCV<sup>6</sup>についてのデータを得る必要がある(世界銀行、2000)。WtE焼却は、発電量が廃棄物の特性(特にLCV)によって異なるという点で、化石燃料を使う発電とは異なる。廃棄物が特定の特性を満たさない場合には、その施設では予定されている電力量を発電できないか、施設自体が運営できなくなる可能性がある。また、廃棄物の内容の季節的な変化によって、廃棄物の組成とLCVは時間の経過とともに変わる。例えば、雨季には、廃棄物により多くの水分が含まれている可能性がある。これらの側面は、炉の設計および廃棄物投入のプロセス全体において対処しなくてはならない。様々な研究により、WtE焼却によりエネルギーを回収するためには、LCVは、平均で7,000kJ/kg以上かつ絶対に6,000kJ/kgを下回ってはならないということが示されている(ISWA, 2013; GIZ, 2017)。

廃棄物の組成は、LCVと密接な関係がある。Kawai et al. (2016) は、対象とするMSWの近似組成(水分、灰分、揮発分)が焼却、コンポスト化、RDF生産に適しているかどうか、三角図を使って確認することを提案している。三角図では、廃棄物組成によって特定される技術のおおまかな適用範囲が示されている。例えば、含水率が75%以下かつ揮発分の含有量が20%以上、つま

りLCVが3,352kJ/kg以上の廃棄物には、焼却技術を採用することが可能である。また、エネルギー回収が焼却プロセスの一部である場合には、通常、含水率が65%以下かつ揮発分の含有量が30%以上で、LCVが6,285kJ/kg以上の廃棄物に、これらの技術を適用することができる。

上記の研究および世界銀行報告書で示された各所得グループごとの国における廃棄物の組成(世界銀行、2018; 図5)に基づく、MSW焼却およびWtE焼却の適用範囲は、各国グループの近似組成と合わせて決定することが可能である(図6)。低所得国における廃棄物の組成によれば、この廃棄物は燃焼可能であるが、焼却によるエネルギー回収の範囲には該当しないということを示している。中所得国(上位中所得および下位中所得がおおよそ同じ位置に示される)の廃棄物の組成は、おおむね焼却によるエネルギー回収に該当する。高所得国の廃棄物は、焼却によるエネルギー回収の範囲に該当する。

廃棄物の組成全体を見ると、水分含量のレベルが高い食品および調理廃棄物の割合が最大の影響を及ぼすことが認められる。有機廃棄物の量が約50~60%であれば、焼却は選択肢になり得る。しかしながら、エネルギー回収には、プラスチックや紙の割合が増えて、食品および調理廃棄物が約50%以下にならなければ適していない。

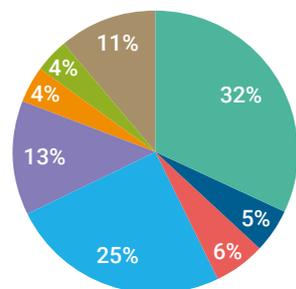
6 LCVは、高位発熱量から水の気化熱を引いて決定する。これは、H<sub>2</sub>Oを蒸気になるものとして扱うものである。参考資料例) <https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/153.html>

## Box 1 廃棄物の分類および組成

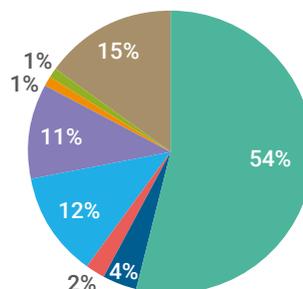
廃棄物は大きく分けて、生分解可能で、動植物に由来する**有機廃棄物**、つまり食品および調理廃棄物、剪定木などの植物廃棄物、プラスチックや紙、ガラス、金属などの**無機廃棄物**に分類される。<sup>7</sup>ただし、WtE焼却に関しては、MSWIは「**可燃**」もしくは「**不燃**」廃棄物に分類できる。可燃廃棄物は、**有機廃棄物**と、紙やプラスチック、繊維製品など、発生源でリサイクル資源として分別されなかった**その他の可燃性の廃棄物**で構成される。**不燃廃棄物**には陶磁器（ティーカップ、皿、植木鉢など）、金属、ガラス（瓶、花瓶、鏡など）、灰その他の物がある。これらの不燃廃棄物は、焼却される廃棄物から発生源において除去する必要がある。

**廃棄物組成**は、経済発展レベル、文化規範、地理的な位置、エネルギー源、気候など、多くの要因によって影響を受ける。一般に、国が都市化され、人口が豊かになると、紙やプラスチックの消費が増える一方で、相対的な有機成分が減少する。図5に示すように、有機廃棄物（食品および植物）の割合は低所得国において最も高く（56%）、高所得国において最も低い（32%）傾向にある（世界銀行、2018；湿重量ベース）。食品や調理廃棄物は通常、水分含量が多く、プラスチックや紙、繊維製品では水分含量は少なくなる。含水率が高いと、LCVや燃焼効率は下がる。

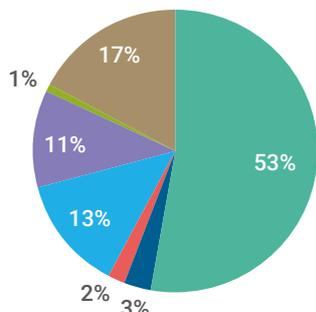
[a] 高所得



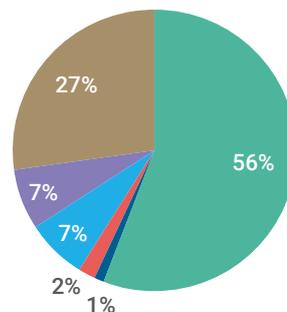
[b] 上位中所得



[c] 下位中所得



[d] 低所得



■ 食品および植物 ■ ガラス ■ 金属 ■ 紙および段ボール  
 ■ プラスチック ■ ゴムおよび皮革 ■ 木材 ■ その他

図5 国の所得水準と廃棄物組成

(出典：世界銀行（2018）に基づき、著者が改訂)

7 本シリーズでは、食品および調理廃棄物と剪定枝などの植物廃棄物といった生分解に適した廃棄物を有機廃棄物と称し、それ以外を無機廃棄物と称する。

## Box 2 WtE焼却のためのLCV

LCVが例えば4,500kJ/kgなど、6,000kJ/kgを下回った場合やさらに低下した場合であっても、補助燃料により焼却は可能だが、WtE焼却にとって効率的とはいえない。一般的に、開発途上国の廃棄物では、先進国よりも食品・調理廃棄物の割合が高く、LCVは低くなっている。可燃廃棄物の含水率を下げるために

は、開発途上国は発生源分別と食品および調理廃棄物の含水率の低減に注力する必要がある。また、特に雨季には、道路脇で収集される廃棄物に雨水が染み込まないように注意して収集する必要がある。台所の食品廃棄物を処分する前に水分を減らすよう市民の方々の協力を求めることも有用である。

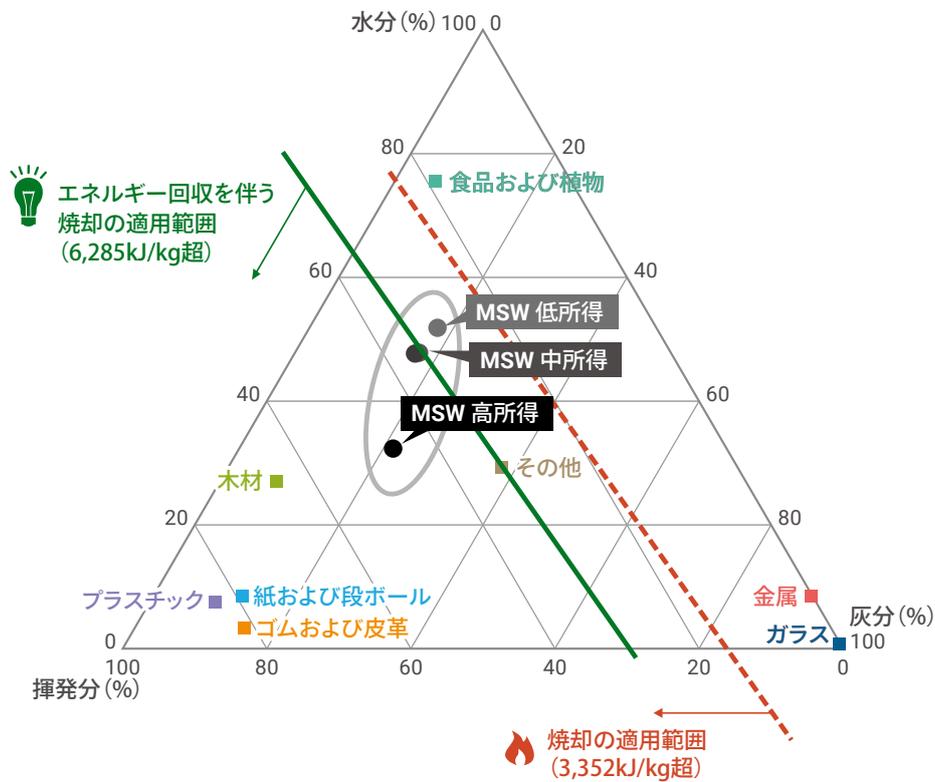


図6 各国グループの近似組成、および焼却とWtE焼却の適用範囲

(出典：Kawai (2016) および世界銀行 (2018) に基づき、著者が作成)

## ✓ 必須の要件

### 焼却灰と飛灰を安全に処理できる。

焼却灰（燃えがら）と飛灰（フライアッシュ・ばいじん）は、WtE焼却プロセスから必ず排出される。この残留物は、管理型最終処分場での埋立や、リサイクルのために適切に処理する必要がある。焼却灰と飛灰には様々

なリサイクル方法が開発されてきたが、能力や用途に限界があり、総量を常時受け入れられるとは限らない。いずれの場合にも、埋立のための管理型最終処分場を確保する必要がある。[\(3.5参照\)](#)

## ✓ 強く推奨される要件

### プラント製造業者は、適切なレベルの専門知識と適切なタイプの焼却炉を有している。

ストーカ式焼却炉は、最も普及した種類のMSW用WtE焼却システムである。他には、流動床式焼却炉やガス化熔融炉などの種類がある（[第3章](#)で詳しく説明する）。成功するために重要なことの1つは、経験豊富なプラント製造業者に呼びかけ、適切な提案を提出させ

ることである。プラント製造業者は、建設や運営の実績に照らして評価されるべきである。WtE焼却技術の概要とプラント製造業者と議論すべき点については、次のセクションで説明する。

## ✓ 望ましい要件

### 環境モニタリングシステムが整備されている。

WtE焼却施設の運営により発生する排ガス、廃水、騒音、振動、悪臭は、専門的な分析機関と連続的な測定システムの両方によって適切に監視する必要がある。

環境汚染を防ぐだけでなく、地域住民の理解と信頼を得ることが重要である。

## ✓ 望ましい要件

### 職員の技術的スキルを向上させるための能力構築と訓練が利用可能である。

WtE焼却プラントは単なる電力や熱、蒸気を発生させるためのブラックボックスではなく、経験豊富な経営陣や熟練した技術スタッフを必要とする高度な技術を伴う。WtE焼却プラントを運営できるエンジニアを訓練

して育成するためには、専門知識を利用可能とし、能力を構築できなくてはならない。長期的な観点で盛り込まれた、組織的な人材開発システムを整備することが重要である。



### 3.1 焼却炉の分類

#### プラント製造業者との 議論点

ストーカ式焼却炉は、最も普及した種類のMSW用WtE焼却システムである。他には、流動床式焼却炉やガス化溶融炉などの種類がある。

具体的な焼却技術は、各プラント製造業者によって異なる。一例がストーカ式焼却炉である。火格子装置の機械構造は、含水率やLCV、有機物や紙、プラスチックの含有割合など、廃棄物の質によって異なる。アジア諸国のMSWは含水率が高いことが多くある。例えば、格子装置がこれを考慮した仕様で設計されていない場合には、廃棄物の燃焼速度が遅すぎて完全燃焼前に放出されたり、燃焼が速すぎて格子装置の上で大きな塊が形成されてしまうことがある。このため、**WtE焼却炉は、焼却システム全体のあらゆる分野において、豊富な経験と強力な技術スキルを持つプラント製造業者に発注する必要がある。**

かつて、日本では、バッチ式焼却炉（各バッチサイクルに投入、点火、燃焼、冷却、排出が含まれる）や半連続式焼却炉（1日サイクルで、朝に起動して夜に停止する）が頻繁に設置されていた。しかしながら、不安定な燃焼ではダイオキシンが発生するということが明らかになり、大半の

焼却炉では、連続焼却（24時間焼却）システムが採用されるようになっている。

通常**の連続焼却炉には、ストーカ式焼却炉、流動床式焼却炉、ガス化溶融炉がある。**ストーカ式と流動床式の焼却炉は、十分な酸素を加えることで、廃棄物を炉内で完全に燃焼させることを目指している。一方、ガス化溶融炉は空気の供給方法などに違いがあり、高温で焼却灰を溶融する処理方法である。現在、最も一般的なのはストーカ式焼却炉である。以下に、これらの焼却炉の概要を示す。

#### (1) ストーカ式焼却炉

「ストーカ」とは、火格子を階段状に並べた燃焼装置である。投入された廃棄物は、可動式の火格子の動きによって、徐々に下流に進みながら燃焼される。燃焼室は、「乾燥帯」、「燃焼帯」、「後燃焼帯」の3段階に分かれている（図8）。含水率の高い廃棄物でも、乾燥帯で適切な時間保持することにより、効率的に燃焼させる

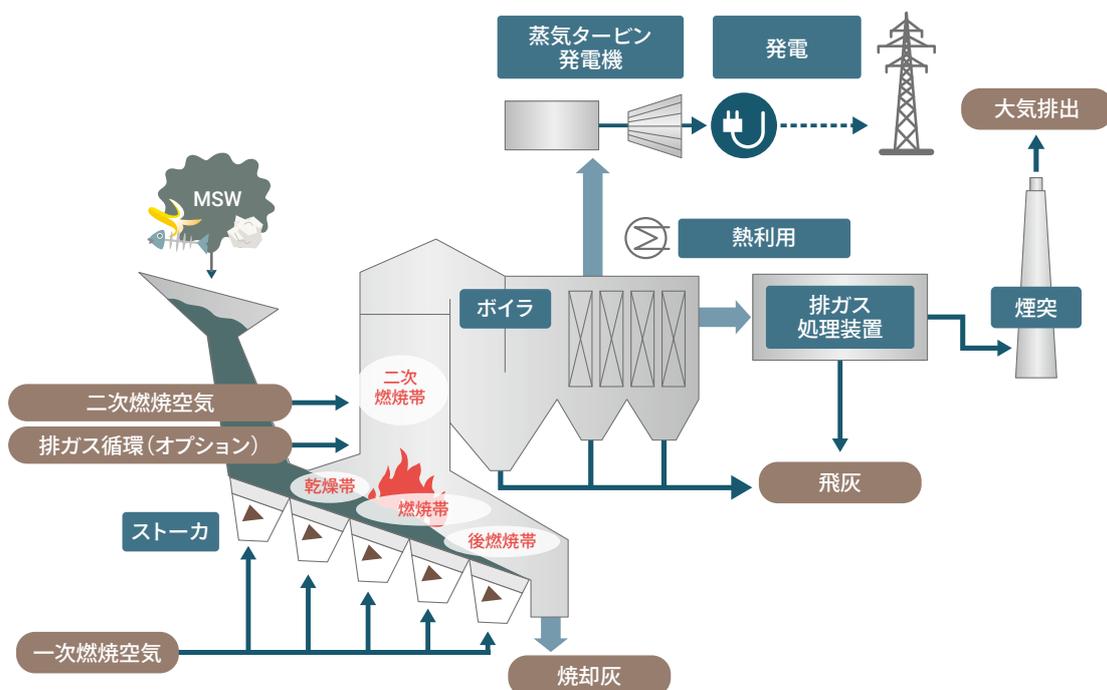


図8 ストーカ式焼却炉の例

(出典：施設パンフレットに基づき、著者が改訂)

ことができ、これがMSWには通常ストーカ式焼却炉が採用される理由の1つになっている。燃焼帯では、十分な空気を供給して可燃物を燃焼させる。未燃の可燃残留物は、後燃焼帯で完全に燃焼される。この3段階の燃焼室の設計と運転条件は、廃棄物の量と質に従って、適切に調整する必要がある。

## (2) 流動床式焼却炉

流動床式焼却炉（図9）には、燃焼室の底に砂の層があり、底部から砂の層に空気が吹き込まれて、砂が流

動化される。砂の層が加熱されると、廃棄物は流動床の上で自ら燃焼し続ける。砂の層は含水率の高い廃棄物が追加されても、砂の高い加熱力によって、乾燥してMSWをすぐに燃焼させることができる。また、流動床式焼却炉は、運転停止後も短時間で再起動することができる。しかしながら、燃焼速度が速いため、焼却炉の設計や運転が不適切であった場合には、不完全燃焼によって高レベルのCOガスが生じる可能性がある。この種の焼却炉は、不均質なMSWよりも、汚泥のような均質な物質を燃焼させるのに適している。

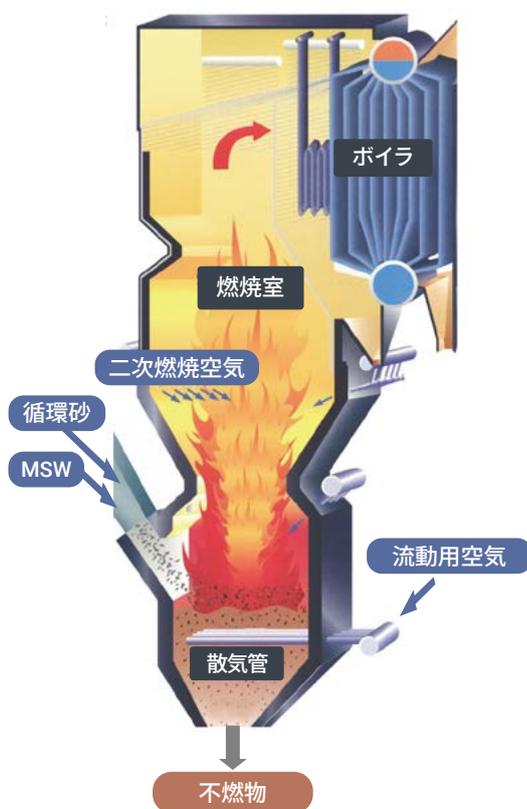


図9 流動床式焼却炉の例

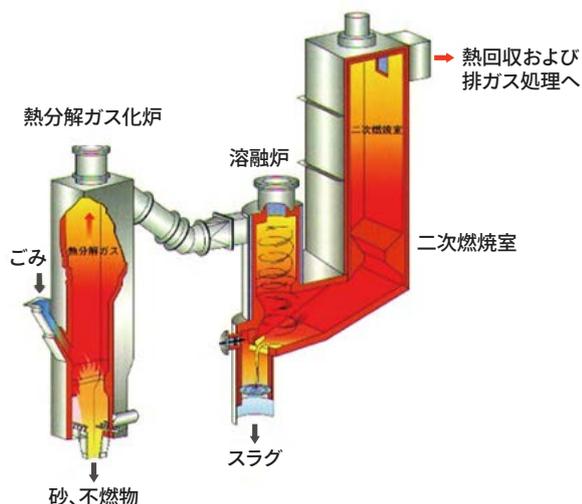
(出典：環境省の資料<sup>8</sup>に基づき、著者が改訂)

8 [https://www.env.go.jp/recycle/circul/venous\\_industry/ja/skill\\_pdf/t003.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/circul/venous_industry/ja/skill_pdf/t003.pdf)

### (3) ガス化溶融炉

ガス化溶融炉は、焼却灰を炉内で直接溶かして溶融スラグを作り出すシステムである(図10)。溶融スラグは焼却灰よりも密度が高く、建材としての利用可能性において上回る。

#### [a] 流動床式ガス化溶融炉: 主な構成要素



#### [b] シャフト炉型ガス化溶融炉システム

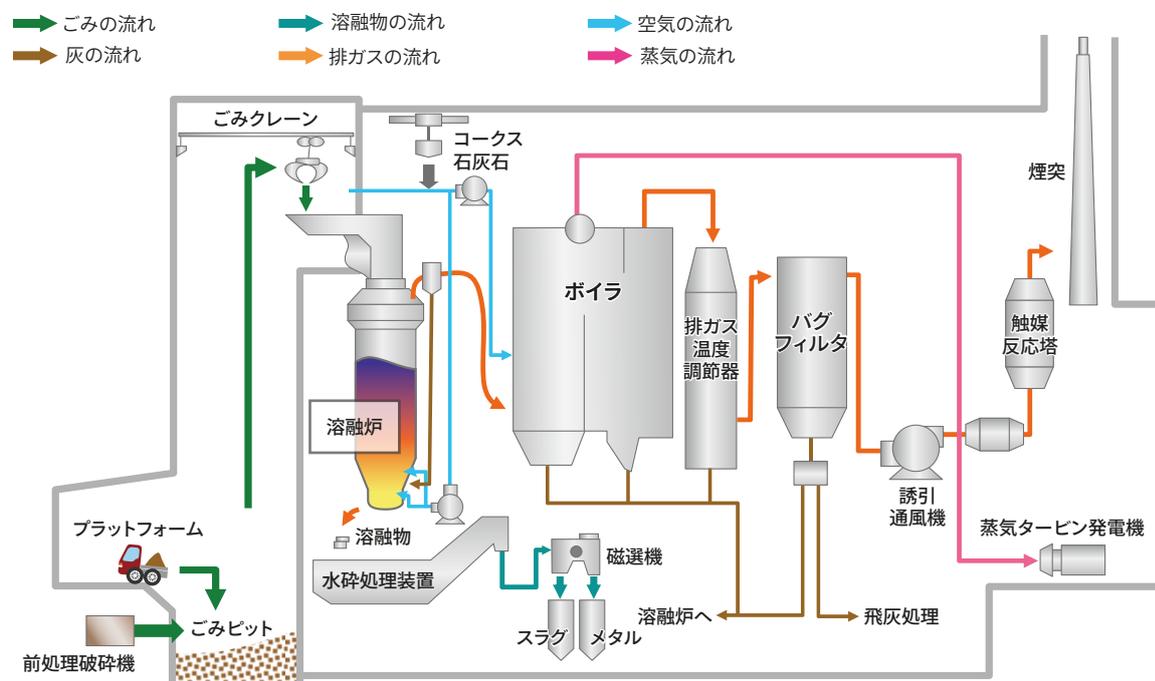


図10 ガス化溶融炉の例

(出典：施設パンフレットに基づき、著者が改訂)

ガス化溶融プロセスには、流動床(図10 [a])またはキルンを使う熱分解ガス化溶融炉と、シャフト炉を利用する直接溶融炉(図10 [b])という2種類の炉が含まれる。

熱分解ガス化溶融は、少ない量の酸素を用いるか間接的な加熱によって、燃焼温度よりも低い温度範囲内で廃棄物を熱分解し(部分燃焼)、熱分解ガスを発生させるプロセスである。流動床式炉およびキルン式炉では、このプロセスは、溶融炉から分離された各炉内で行われる。第2段階では、溶融炉に燃焼用空気を加えて熱分解ガスを高温で完全に燃焼させ、固形物は1,200~1,300°Cにもなる温度で燃焼することによって発生した熱で溶融する。近年では、キルン式炉を見ることはまれである。

シャフト炉溶融は、廃棄物が、上の乾燥層から中間の熱分解層を経て下の溶融層へと、シャフト炉の中を徐々に移動していくプロセスである。

従来の焼却方法と比較すると、ガス化溶融という選択肢は、コストの高さや運転面での難しさにより、他の方法ほど広く採用されていない。

## 3.2 燃焼のための運転パラメーター

### プラント製造業者との議論点

燃焼の主要パラメーターには、供給する空気比と、出口のCO濃度が含まれる。ダイオキシンの発生を避けるためには、「3T」(温度:Temperature、滞留時間:(retention) Time、乱流混合:Turbulence)が重要となる。

焼却炉は、固形残留物と排ガスの両方が完全燃焼するように設計する必要がある(タクマ環境技術研究会、2017)。完全燃焼には、適切な空気比による十分な温度と保持時間が必要である。空気比は、燃焼のための理論上の空気量に対する実際の空気供給量の比率である。固形燃焼室に供給される一次空気の空気比は通常1.2~1.4。排ガスの不完全燃焼を避けるには、二次燃焼帯において、850°C以上の温度と2秒以上の保持時間を保ったうえで十分な乱流が必要になるが、これはダイオキシンの形成も防止している。二次燃焼帯

に加えられる二次空気によって、この比率は1.7から1.9になる。最近、エネルギー回収効率を向上させるため、低空気比の設計も開発された。(ケーススタディ4.1参照)

燃焼状況を監視するため、酸素(O<sub>2</sub>)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)の濃度を連続的に測定する必要がある。日本のダイオキシン防止ガイドラインでは、CO濃度を30ppm(37.5mg/m<sup>3</sup>N)以下(O<sub>2</sub>=12%換算、4時間平均値)としている。

## 3.3 熱回収と発電

### プラント製造業者との議論点

ボイラの蒸気条件は、発電機の発電量に大きな影響を及ぼす。高温かつ高圧の蒸気ボイラを組み込んだシステムを設計することが望ましい。

WtE焼却の目的の1つは、蒸気を発生させて廃棄物燃焼熱からエネルギーを回収することである。廃棄物燃焼から発生した高温の排ガスは、排ガス処理のために冷却する必要があるため、WtE焼却プラントには、冷却プロセス中の熱エネルギーを回収するボイラシステムが装備される。熱エネルギーは、ボイラ内で蒸気として回収され、一方、排ガスは送水管内で水を間接的に加熱することにより冷却される。蒸気の大半は蒸気タービンに送られてから、発電に使用される。蒸気タービンから放出された蒸気と加熱された水も、さらに熱源として使用することができる。

図11に示すように、廃棄物加熱ボイラ内で蒸気が発生する。ボイラで最も影響力の大きい要素は蒸気条件であり、これは主に温度と圧力、そして水-蒸気サイクルによって規定される。蒸気の温度と圧力が上昇するにつれ、エネルギー回収効率も上昇する。数値は過去と比較すると大幅に上昇しており、1990年頃までは標

準値は300°Cおよび3MPa以下であった。しかし現在、日本の一般的な標準値は約400°Cおよび4MPaで、発電効率を最大約20%まで上げることができる。

なお、石炭または天然ガスによる火力発電所の蒸気の温度は500°C以上、圧力は15~25MPa以上であり、発電効率は40%以上である。廃棄物焼却の排ガスには塩化水素などの腐食性ガスが含まれているため、WtE焼却システムは、発電プラントのように高温・高圧システムを備えた設計はできない。

最近の技術開発の結果、蒸気の温度と圧力はこれを上回る場合があり、発電効率も25%や30%にまで高まっている。熱をより効率的に回収するには、ほかにもいくつかの種類の機器が必要である。過熱器はボイラからの蒸気を加熱し、エコノマイザは燃焼排ガスの余熱を使用して、ボイラに供給される水を加熱する。

また、蒸気を近隣の工場へ運搬して利用することが可能な場合には、蒸気が発電に使われる場合と比較して、エネルギー節減効果は倍増する (Fujii et al., 2019)。焼却炉から近隣の工場に蒸気を送るというのは、韓国

のウルサン工業団地などの場所で既に実施されているアプローチである。このアプローチは、投資回収期間が短い場合であっても、環境的にも経済的にもメリットがあることが実証されている (Behera et al., 2012)。

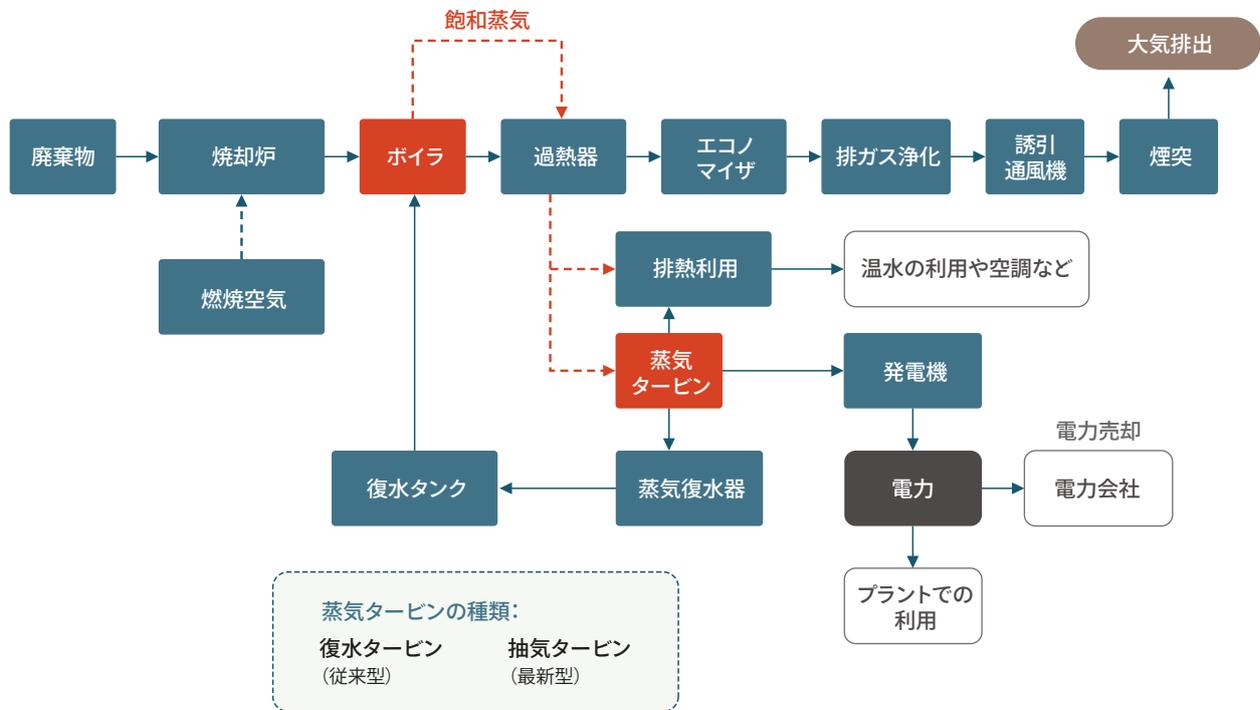


図11 ボイラおよび周辺機器のプラント構成

(出典：著者)

### 3.4 環境への影響を低減するための大気汚染・廃水管理プロセス

<p><b>プラント製造業者との議論点</b></p>	<p>大気汚染は統合的な制御プロセスを利用することにより防止できる。ダイオキシンの発生と排出を防ぐためには、燃焼を制御し、排ガスを適切に処理する必要がある。</p>
-----------------------------	--

WtE焼却プラントを建設するためには、特に周辺住民の理解と受容の観点から、様々な汚染物質の排出による環境影響について、よく検討することが重要である。近年開発された大気汚染防止用の先端技術は、様々な汚染物質の排出を効果的に除去することが可能である。一般的に、制御すべき大気汚染物質としてはばいじん、酸性ガス、窒素酸化物、ダイオキシン、水銀がある (タクマ環境技術研究会、2017)。

廃水については、多くのプラントが、廃水を発生しないクローズドシステムを使用している。こうしたシステムでは、処理プロセス中に発生した廃水は炉内で冷却水として噴霧され、蒸発して、排ガス処理システムによって処理される。MSWの含水率が高ければ、浸出水が廃棄物ピットに集まることもあり、処理が必要になる。

バグフィルタを使って、濾過によって排ガスから大気汚染物質を除去する。排ガスには、バグフィルタを通る前に石灰などのアルカリ剤や粉末活性炭が噴霧される。窒素酸化物以外の大気汚染物質は以下の仕組みによって除去される。

- ばいじんは濾過により除去される。
- 塩化水素 (HCl) や二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) などの酸性ガスは、アルカリ剤と反応させて除去される。
- ダイオキシンの水銀は、粉末活性炭に吸着させて除去される。

排ガスを監視するには、ばいじん、塩化水素、二酸化硫黄、窒素酸化物を連続して測定する必要がある。水俣条約 (2013) 以降、水銀排出への注目も高まっているため、近年開発された機器を使って水銀を連続的に測定することも検討すべきである。これらの項目については、専門的な分析機関による定期的な測定も必要である。

ダイオキシンは、連続的に測定することができないので、定期的に測定する必要がある。

かつては、排ガスからばいじんを除去するために電気集塵装置がよく使われていた。しかしながら、電気集塵装置の運転条件はダイオキシンのテノボ合成が起こりやすい300℃付近であるため、廃棄物焼却炉がダイオキシンの発生源となることが知られるようになった。1990年代頃には、200℃以下の温度での運転に適していて、ダイオキシンの発生を防ぐバグフィルタが電気集塵装置に急速に取って代わった。また、水銀は揮発性金属なので、温度域が低いバグフィルタの方が効率的に回収することができる。

除去された汚染物質は、「飛灰」として、投入されたアルカリ剤や活性炭と共にバグフィルタから排出される。飛灰は、有害廃棄物として適切に処分する必要がある。

### Box 3 ダイオキシン抑制

ダイオキシンは、高温で焼却した場合には、比較的分解されやすい物質である。しかしながら、約300℃の焼却システム内では、テノボ合成プロセスと呼ばれるダイオキシンの形成が起きる可能性がある。最新型の焼却プラントは、適切な焼却と排ガス処理により、排出基準を下回るまでダイオキシンの排出を減らすことができる。焼却炉におけるダイオキシン対策を以下にまとめる。

#### ● 焼却炉内での完全燃焼

標準的な目安として、CO値を低く保つ。不安定な温度での運転ではCOが発生する恐れがあるため、連続的な運転により温度を安定させる必要が

ある。先ほど述べたように、燃焼室では「3T」(温度、滞留時間、乱流混合) が重要となる。

#### ● テノボ合成を防ぐ

テノボ合成によるダイオキシンの発生を防ぐには、排ガスが約300℃の温度に保たれる電気集塵装置の使用は避けるべきである。

#### ● バグフィルタを使ったばいじんの回収

微量のダイオキシンも活性炭を使って吸着し、バグフィルタで除去できる。下に説明する脱硝触媒には、ダイオキシンを分解する機能もある。

(出典：著者)

こうした高度な大気汚染防止技術はすべて、図12に示すように体系的に組み込む必要がある。環境への影響を最小限に抑え、エネルギー回収を最大化するため

には、最も合理的なプロセスを設計・構築する必要がある。

#### Box 4 窒素酸化物削減

他の酸性ガスと異なり、窒素酸化物はバグフィルタでは除去できず、他のシステムが必要になる。窒素酸化物を減らす方法は主に3つある。これらの3つの方法は、必要な削減レベルによって、単独でも、組み合わせでも使用することができる(図12参照)。

- (1) **燃焼制御**: この方法では、炉内の燃焼ガスは低酸素雰囲気中に保たれる。ただし、窒素酸化物排出を抑制すれば、逆に一酸化炭素が増加する。**両方を同時に削減するためには、燃焼炉内の温度と空気比を精密に制御する必要がある。**1つのオプションは、燃焼させた排ガスの一部を炉に再循環させて、低酸素雰囲気を作り出すことである。
- (2) **無触媒脱硝**: この方法では、**アンモニアまたは尿素の溶液を燃焼炉内に噴霧して、窒素酸化物を削減・分解する。**噴霧する燃焼室の温度は800°Cを超える必要がある。これはシンプルな方法ではあるが、噴霧される溶液の量と排ガスの温度は正確に制御する必要があり、また、触媒脱硝ほど効率的ではない。

- (3) **触媒脱硝**: この方法では、排ガス中の窒素酸化物が、酸化バナジウム(V) / 二酸化チタン ( $V_2O_5/TiO_2$ ) などの触媒の作用によってアンモニアと酸素に反応し、窒素と水に分解される。この触媒は、ばいじんを含まず、温度200°C以上のきれいな排ガスを必要とするため、排ガスはバグフィルタを通過した後に再加熱されて触媒脱硝装置に送られる。**除去効率は約95%と推定されている。**ただし、この種の再加熱プロセスでは蒸気を使用するため、発電量が減る。この方法は燃焼制御や無触媒脱硝よりも効率的だが、コスト面ではデメリットがある。従って、燃焼制御や無触媒脱硝の組み合わせによって基準を満たせる場合には、この方法は使われないという傾向にある。最近、排ガスを再加熱する必要のない、約180°Cの低温触媒が開発された。

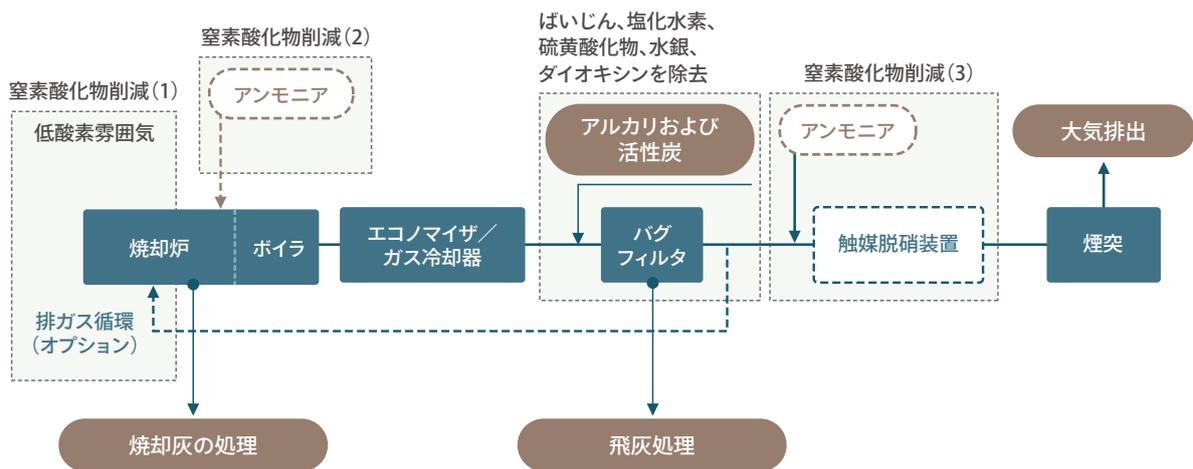


図12 最新の排ガス処理プロセスと周辺プロセスの構成

### 3.5 焼却灰および飛灰

#### プラント製造業者との 議論点

埋立やその他の処理の前には、熱しゃく減量と有害物質について、  
焼却灰および飛灰の質を調べる必要がある。

焼却炉では必ず焼却灰と飛灰が発生する。最も一般的な処理方法は、管理型最終処分場における埋立である。焼却灰および飛灰の特徴は、焼却炉の種類によって異なる。以下の説明は、主にストーカ式焼却炉に基づくものである（タクマ環境技術研究会、2017）。

焼却灰が焼却炉から排出される際、燃焼の質を確保するため、焼却灰内の未燃焼分を意味する「熱しゃく減量」を測定する必要がある。日本では、焼却灰の熱しゃく減量は5%以下に規制されている。また、重金属やダイオキシンなど、有害物質が規制値を超えないように確認することも必要である。

焼却灰には廃棄物に含まれていた鉄片が含まれていることが多くあり、磁気分離機で回収することができる。

焼却灰の場合、廃棄物最終処分場における埋立以外にも、複数の処理方法がある。ただし、リサイクル方法は依然限られており、すべての焼却灰がリサイクルに受け入れられるわけではない。いずれの場合にも、埋立のための管理型最終処分場を確保する必要がある。

- **セメント原料として焼却灰を利用。** 焼却灰は、総投入量の0.5～1%まで、セメント原料の代わりに投入することができる。量が限られているのは、塩素などの忌避物質を含有しているためである。
- **焼結、化学薬品による凝固・安定化 (S/S)、エージングなどの処理後に建材として利用。** 焼却灰を処理して利用するにあたり、有害物質に関する安全性基準を満たすことを確認する必要がある。

- **高温熔融によるスラグ化。** 焼却灰は、コークス炉や燃料炉、電気炉内で、高温（1,250℃以上）で熔融される。排出・冷却後、「スラグ」と呼ばれる、高密度でガラス状の物質が発生し、これは建材として利用可能である。このスラグは高品質だが、熔融施設の建設・運営コストも高額である。熔融プロセスでは、副産物として二次フライアッシュと金属塊が発生するが、いずれも、製錬プロセスに投入することが可能である。**ガス化熔融システムでは、もともとのMSWの灰組成物が熔融炉で直接熔融されてから、スラグとして排出される。**

飛灰は通常、バグフィルタで回収されてから排出される。通常は主に、噴霧されたアルカリ剤と、二酸化硫黄や塩化水素などの酸性ガスと塩の化合物、ならびに重金属やダイオキシンなどの有害成分を含有するばいじん構成される。**有害物質が溶出するのを避けるため、飛灰は通常、セメントまたは化学薬品で処理された後に管理型処分場に埋め立てられる。**国によっては、飛灰を地下に保管することもある。塩やその他の重金属を含有しているため、焼却灰よりも処理することが難しく、世界でもリサイクルされている例はほとんどない。



表5 運転開始前の負荷試験結果

測定項目		単位	結果
ボイラ主蒸気流量	Z <sub>1</sub> Z <sub>2</sub>	t/h	6.15 (第1号炉) / 6.13 (第2号炉)
ボイラ主蒸気温度	-	°C	400 (第1号炉) / 401 (第2号炉)
ボイラ主蒸気圧力	-	MPa	3.94 (第1号炉) / 3.95 (第2号炉)
タービン入口の主蒸気流量	-	t/h	9.82
タービンバイパス蒸気量	Z <sub>b</sub>	t/h	2.10
発電機出力	P <sub>g</sub>	kW	1,670
ごみ処理量 (第1号炉)	B <sub>1</sub>	t/h	2.01
ごみ処理量 (第2号炉)	B <sub>2</sub>	t/h	2.04
ごみ発熱量 (演算値)	H	kJ/kg	8,940
発電端効率 <sup>a)</sup>	η	%	16.6
発電端効率 <sup>b)</sup> タービンバイパス分を補正	η'	%	20.0

a)  $\eta = (P_g \cdot 3600) / \{(B_1 + B_2) \cdot 1000 \cdot H\}$

b)  $\eta' = (P_g \cdot 3600) / \{(B_1 + B_2) \cdot [1 - Z_b / (Z_1 + Z_2)] \cdot 1000 \cdot H\}$

図14は、稼働開始後3年間に収集された実際のプラントデータに基づいた廃棄物の燃焼量と発電量の関係を示したものである。2016年4月から2018年12月までの約3年度を対象とするこのデータは、MSW以外の燃料投入の可能性も含んでいることから見掛け上の数値ではあるが、単位発電量は、MSW燃焼量1トンあたり400kWhと推定されている。これらの数値は、2000年代前半の調査時の数字を大幅に上回っている。これは、技術の進歩によって目覚ましい結果を達成することが可能であるということを明確に示している。

ボイラプロセス後の排ガス冷却には水噴霧が使用されるが、ここ数年には、エネルギー消費を節減するため、エコノマイザを使った冷却方法が増えている。やはりエネルギーを節減することのできる無触媒還元法として、炉への尿素噴霧によって窒素酸化物が削減される。ダイオキシンと水銀は、活性炭の投入により除去される。排ガス中のダイオキシンに関する最近のデータは、2018年4月が0.0073ng-TEQ/m<sup>3</sup>N、7月が0.00025ng-TEQ/m<sup>3</sup>N、10月が0.00087ng-TEQ/m<sup>3</sup>Nで、<sup>9</sup> これらの数値は、日本の排ガス基準を大幅に下回っている。同

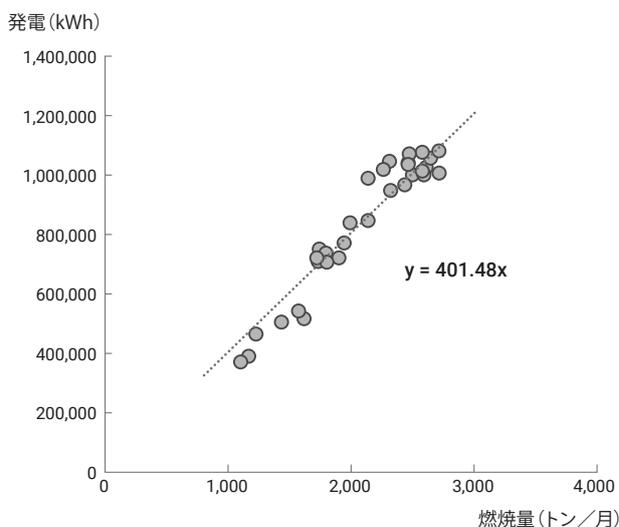


図14 過去3年間の廃棄物燃焼量と発電結果の関係

(出典：著者)

じ期間のダイオキシン濃度は、焼却灰では検出限界を下回り、飛灰では0.20~0.58ng-TEQ/gであった。

横手市は日本の北部の豪雪地域にあるため、廃棄物焼却によって回収されたエネルギーは、冬季には道路の雪を溶かすためにも使用される。

9 横手市ウェブサイト：<https://www.city.yokote.lg.jp/kankyo/page0000318.html>

## 4.2 上越市クリーンセンター (新潟県上越市)

MSWの特性は、人々のライフスタイルや、特定の地域で用いられているMSW回収方法によっても異なる。日本におけるMSWの平均LCVはMSW1キロあたり約8,000kJ (MSW1キロあたり2,000キロカロリーをやや下回る)、含水率は約40% (W/W) である。しかしながら、廃棄物を回収する時に水分含量の多い台所の食品廃棄物を回避することができれば、回収された廃棄物のLCVは平均的な廃棄物よりも高くなる。

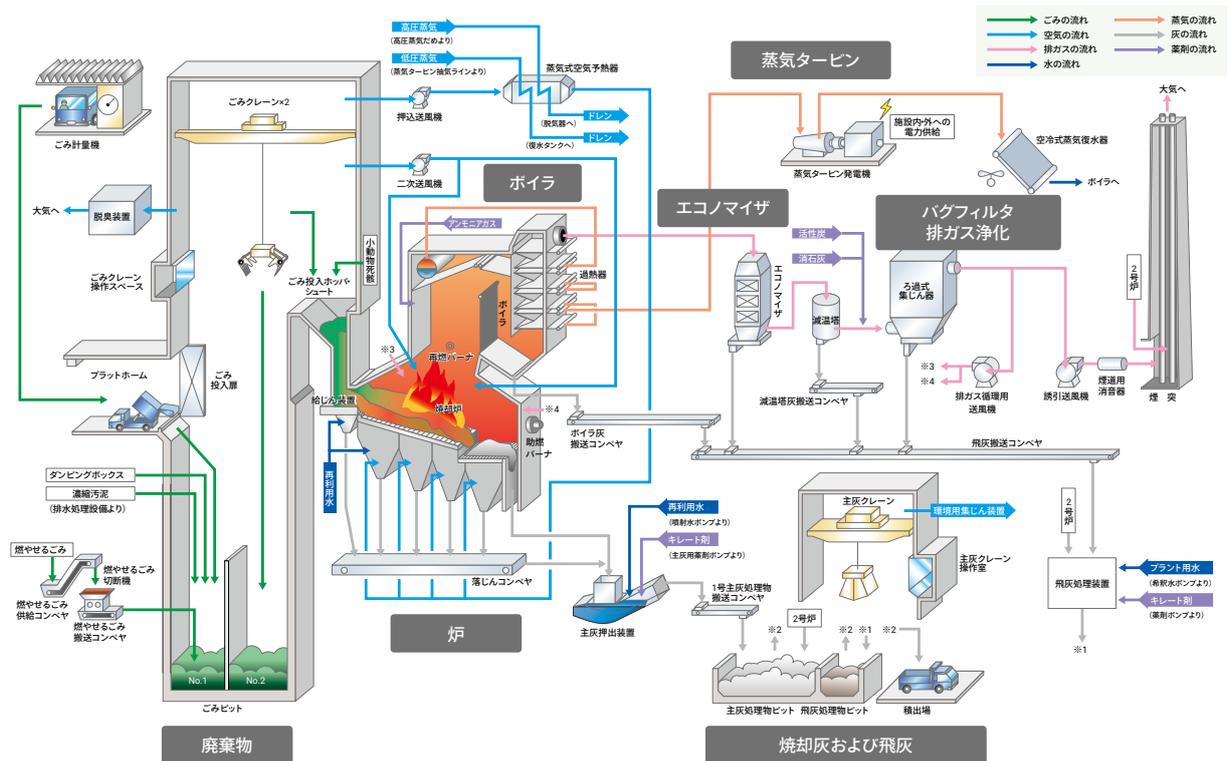
上越市(人口19万人)の焼却施設で焼却されるMSW

は、日本の他の地域よりもLCVが高く (8,100~15,900kJ/kg) になっている。この数値は、同市の台所の食品廃棄物が分別回収されているという事実により達成されたものである。表6にはこの施設についてのデータ、図15にはこの施設で使用されているプロセスを示している。この施設には、蒸気条件が5.0MPaおよび420°Cで、他のプラントよりも優れているという顕著な特徴がある。発電機は6,290kWの電力を出力できるため、発電効率は20%を超える。また、同施設では、エネルギー回収効率を高めるため、無触媒の窒素酸化物還元技術を使用している。図15 (a) および (b) には、このプラントのボイラ (a) とタービン発電機 (b) を示している。

表6 MSW焼却処理に関する施設情報およびデータ

炉形式	全連続運転式燃焼ストーカ炉
処理量	170 t/日 (85 t/日 x 2炉)
計画ごみ質 (LCV)	8,100~15,900 kJ/kg
燃焼ガス冷却設備	過熱器付自然循環式水配管ボイラ 最大蒸発量：19.44 t/h x 2炉 蒸気条件：5.0MPa x 420°C
排ガス処理設備	無触媒脱硝+減温塔+ろ過式集塵機
余熱利用設備	抽気復水タービン (6,290kW)
排水処理設備	生活排水を含むクローズドシステム

(出典：Moriyama et al., 2018)



(a) ポイラ



(b) タービン発電機

図15 上越市クリーンセンターの焼却プロセス

(出典：上越市)

最終残留物（焼却灰および飛灰）は、最終処分前に安全に処理される。焼却灰は処理されずに埋め立てられるが、飛灰は重金属の溶出を削減するため、薬品で適切に処理してから埋め立てられる。焼却灰は、セメントの原料としても使用することができる。

日本には、発電性能の高い最新の焼却プラントの同

様の例が数多くある。このセクションでは、以下のようなことが言える。

- WtE焼却は、焼却プラントの規模が比較的小さい場合（100～200トン／日）でも完全に実現できる。小規模でも、発電効率が約20%と高いプラントの例が数多く存在する。

- WtE焼却施設で高い効率を実現するためには、焼却プラントに高性能な機器を設置する必要がある。

また、固形廃棄物の組成が焼却に適している必要がある。MSWの安定した発生と回収も重要である。

### 4.3 焼却炉運営における長期の実績 (タイ、プーケット)

プーケットには2基の焼却炉がある。最初の焼却炉の建設は、1996年に内務省公共事業局によって開始され、1日あたりのMSW処理能力250トンで1999年に運転が開始された。しかしながら、2012年以降、この焼却炉の稼働は施設保守のため停止されている。1日あたりのMSW総処理能力700トンを有する第2号焼却炉が2009年に建設され、2012年から民間企業 (PJT Technology社) によって運営されている (図16、17)。



ストーカ式焼却炉プラント [第1号]

処理能力：250トン/日、ストーカ式  
初期費用：7.8億バーツ  
年間稼働：7,000時間



ストーカ式焼却炉プラント [第2号]

処理能力：350トン/日 × 2基、ストーカ式  
初期費用：9.4億バーツ  
年間稼働：7,000～8,000時間

図16 プーケットの焼却炉の概要

(出典：Tavorn, 2019)

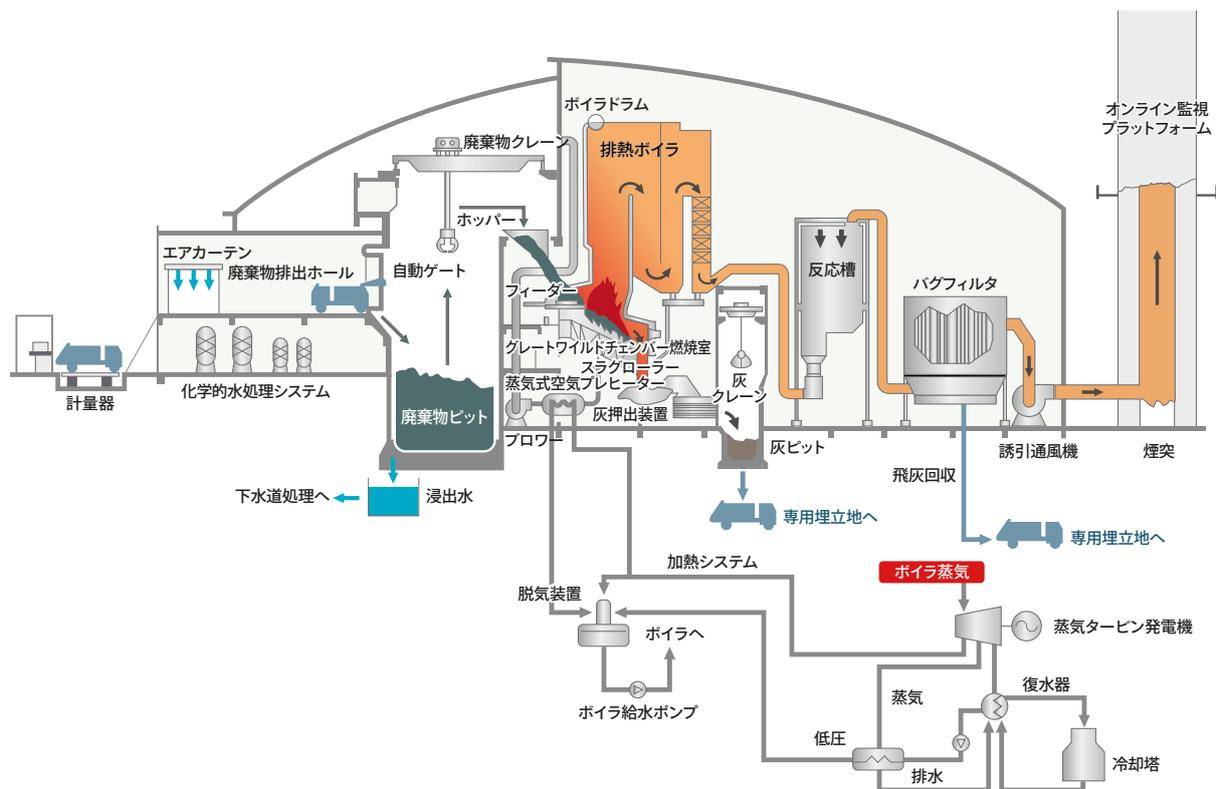


図17 プーケットの第2号焼却炉におけるプロセスフロー

(出典：PJT Technology社<sup>10</sup>)

10 <http://pjt.co.th/index.php/products/>

プーケット県は面積543km<sup>2</sup>、タイ南部のアンダマン海に浮かぶ最大の島である。2017年の人口は410,211人で、1400万人を超える観光客や訪問客があった。**プーケット市自治体 (CM) は、面積約500,000m<sup>2</sup> (埋立地エリア214,400m<sup>2</sup>、焼却炉プラントエリア73,600m<sup>2</sup>、廃水処理エリア52,800m<sup>2</sup>、緩衝地帯124,800m<sup>2</sup>を含む) を有する廃棄物処理複合施設の管理責任を負っているが、同施設の2018年の1日あたりMSW処理量は928トンであった。**

2017年、PJT Technology社は、商務省傘下の事業開発局に対し、総収入5.45億バーツ、総経費2.75億バーツと報告している。焼却能力を700トン/日、年間稼働日数を320日、処理能力を年間224,000トンと考えると、1トンあたりの収入は2,433バーツと推計できる(処理委託料は520バーツ/トン、電力売却<sup>11</sup>は1,913バーツ/トン、経費は1,226バーツ/トンとして推計)。その歴史的背景と段階的な開発により、プーケットCMは1994年にストーカ式焼却炉発電プラントの建設に関する公聴会を開いた。内務省の資金提供により、1996年に処理能力250トン/日を有する第1号焼却炉の建設が開始され、プーケット県における廃棄物管理に関する実行委員会が設立された。**最初のストーカ式焼却炉は1999年に運転を開始し、約2.5MWを発電したが、総廃棄物量(約350トン/日)が焼却炉の処理能力を超えてしまい、2003年からは、余剰廃棄物は埋立地に投棄されるようになった。**

プーケットCMは、2007年に固形廃棄物管理(SWM)マスタープランを策定し、第2号ストーカ型焼却炉発電プラントに関する公聴会を開き、2009年にはPJT Technology社に投資契約を提示した。**営業権を付与するというプーケットCMの決定は、大きな転換点であった。**700トン/日の処理能力を持つ新しいWtE焼却プラントは2012年に運転を開始して12MWを発電し、第1号焼却炉は保守のため、2012年に閉鎖された。プーケットCMは中央政府に、保守費用のための補助金申請を提出したがこれは認められず、第1号焼却プラントの運転は中断されたままになっている。

WtE焼却施設が効率的に稼働するためには、一定量の廃棄物を回収する必要がある。タイにおける都市廃棄物政策・技術の管轄当局である公害管理局(PCD)では、複数の自治体間でグループを構成することを推奨している(PCD, 2017)。**プーケット県知事とプーケットCMが、1996年に約18の自治体、地域コミュニティ、環境NGO(非政府組織)と共にプーケット県における廃棄物管理に関する実行委員会を設立したことは注目に値する。**

Pattaraporn(2015)によれば、**プーケットにおけるSWMは、実行委員会の設立以降、継続的に進化している。**同実行委員会では、2007年に、同地域のためのSWMマスタープランの策定を提案した。**2008年に締結されたSWMに関する覚書には、自治体は廃棄物を回収してプーケットCMが運営する処分センターに運搬し、520バーツ/トンの処分(焼却および埋立)料を支払うと定められているが、この連携の成否は、各自治体の能力と政策に依存していた。**しかしながら、計画の実施範囲は限られていた。ある公務員は、**運営に責任を負う担当者がいなかったため、計画は実施されなかった**と説明している。2014年のプーケットSWMマスタープランは明らかにプーケット天然資源・環境局の責任下であり、異なった見方がされている。実行委員会の権限や役割も増えた。これにより、SWMの問題も同時に管理することが可能になる。とは言え、**これらの制度や政策の有効性は、問題の重大性についての関係当局や一般の人々の認識レベルや、変化を実現するためのコミットメントや協力のレベルに左右される。**

当然ながら、プーケットにおける廃棄物の組成は大半が含水率の高い有機物で、LCVと不十分な焼却につながる。初期には、食品廃棄物は回収され、伝統的に家畜、特に豚の餌として使用された。しかしながら、観光ブームと都市化により、養豚場は閉鎖を余儀なくされ、所有者たちは土地を売却するか、土地がもっと安い近隣の県に移動した。このような社会的変化のため、**余剰食品廃棄物は主に廃棄物として処理されることになり、焼却炉に送られる有機成分の割合は1993年**

11 この価格設定は、主にタイの国庫補助金プログラムであるAdderと、1キロワットあたり約5バーツ以上と推定されるFIT販売料率により可能になったものである。

の34%から、2004年には64%と、ほぼ倍増した。**その結果、ダイオキシンとフランガスの量は**、2005年の固形廃棄物焼却炉の全国排出規制基準では許容濃度 $0.5\text{ngTEQ/Nm}^3$ と定められていたのに対して、 $2.13\text{ngTEQ/Nm}^3$ であったことが判明した。2007年のプーケットSWMマスタープランの策定後、環境質推進局は自治体やNGOと協力して、発生源における廃棄物の削減・分別を推進するための国民参加キャンペーンを開始した。**好気性コンポスト化を利用して肥料を生産する有機廃棄物分別モデルを開始し、パイロットコミュニティでの実施を成功させた結果**、有機廃棄物の15~20%を主要廃棄物ストリームから除外することができれば、混合廃棄物のLCVを設計範囲まで上げ、燃焼効率を維持して不完全燃焼排出を減らし、発電率を高められることが分かった(Pireeyutma, 2011)。コミュニティによる廃棄物分別により、環境とエネルギーの両方の問題を改善することができる。

**プーケットの実例からは、多くの教訓が得られる。**

1. **社会的側面**：主要な観光目的地であるプーケットCMIは、廃棄物処理複合施設の管理・運営責任を負う権限を与えられている。
2. **技術的側面**：ストーカ焼却炉はWtE焼却に適した設計の堅牢な技術だが、それでも、灰や焼却不可能な余剰廃棄物(総重量の約23%)を投棄するための埋立地が必要である。
3. **制度的・組織側面**：2008年に締結されたSWMに関する覚書には、廃棄物の回収およびプーケットCMが運営する処分センターまでの輸送、および処分料の支払には、自治体が責任を負うと明記されている。
4. **管理的側面**：プーケット県知事とプーケットCMIは、プーケット県における廃棄物管理に関する実行委員会を設立した。

5. **財務的側面**：第2号焼却炉への民間投資により、自治体は財務上の障壁を超えることが可能となった一方で、「Adder」(2007年にタイにおいて導入された、民間セクターに再生可能エネルギーを使った発電プロジェクトへの投資を促すための政策措置)や、電力を売却するためのFIT販売料率など、国庫補助金プログラムを使用することで、安価な処理委託料のプロジェクトは実現可能なものとなっている。
6. **住民の協力と理解**：廃棄物削減および廃棄物分別への市民参加が、SWMの効率を高める上で重要となる。

現在、プーケットでは総廃棄物量が1日あたり1,000トンに迫り、別の危機に直面しています。プーケットCMでは、間もなくWtE焼却への投資を呼びかけることを計画しており、持続可能なSWMへの挑戦における新たなフェーズが始まろうとしています。

## 参考文献

- Behera, S.K., Kim, J.-H., Lee, S.-Y., Suh, S., Park, H.-S., 2012. Evolution of 'designed' industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: 'research and development into business' as the enabling framework. *Journal of Cleaner Production* 29, 103–112.
- Fujii M., Dou, Y., Sun, L., Ohnishi, S., Maki, S., Dong, H., Dong, L., Chandran, R., 2019. Contribution to a low-carbon society from improving exergy of waste-to-energy system by upgrading utilization of waste. *Resources Conservation and Recycling* 149, 586-594.
- GAIA, 2019. Waste-to-Energy has no place in Africa. <https://www.no-burn.org/waste-to-energy-has-no-place-in-africa/>
- GIZ, 2017. Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management-A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries. Dtsch. Gesellschaft für Int. Zusammenarbeit GmbH 1–58. <https://doi.org/10.1136/hrt.2009.187062>
- IEA Bioenergy, 2013. Waste to energy summary and conclusions from the IEA bioenergy ExCo71 workshop 10.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- ISWA, 2013. Waste-to-Energy in Low- and Middle-Income Countries.
- Karim, M.A. and Corazzini B., 2019. The current status of MSW disposal and energy production: a brief review of waste incineration. *MOJ Ecol. Environ. Sci.* 4, 33–37. <https://doi.org/10.15406/mojes.2019.04.00129>
- 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. *J Mater Cycles Waste Manag.* 18, 517–526.
- Kumar, A., Samadder, S.R., 2017. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Manag.* 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Liu, C., Hotta, Y., Totoki, Y., 2018. State of the 3Rs in Asia and the Pacific -Experts' Assessment of Progress in Hanoi 3R Goals-. UNCRD. [http://www.uncrd.or.jp/content/documents/6777\[full%20document\]%20State%20of%20the%203Rs%20in%20Asia%20and%20the%20Pacific.pdf](http://www.uncrd.or.jp/content/documents/6777[full%20document]%20State%20of%20the%203Rs%20in%20Asia%20and%20the%20Pacific.pdf)
- Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., Techato, K. Anan, 2018. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91, 812–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>
- Moriyama, S., Segawa, A., Omori, K., Yamashita, H., 2018. Operation of Joetsu Clean Center – Realization of high efficiency power generation with high temperatures and high pressure conditions in boilers – in Japanese, National Urban Cleaning Research and Case Study Presentation, Japan, 40 - 42.
- Pattaraporn, W., 2015. Evaluation of the local capacity in solid waste management at source, Phuket case study, Master thesis for Prince of Songkla University.
- Pireeyutma, V., 2011. A Decade of Waste to Energy Plant of Phuket, GMSARN International Journal 5, 195- 200.
- Pollution Control Department (PCD), 2017. National Solid Waste Management Master Plan (2016 - 2021).
- Psomopoulos, C.S., Bourka, A., Themelis, N.J., 2009. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Manag.* 29, 1718–1724. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>
- Rand, T.; Haukohl, J.; Marxen, U.; Rand, T. Haukohl, J. Marxen, U. 2000. Municipal solid waste incineration: a decision maker's guide (English). Washington, D.C. The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/206371468740203078/Municipal-solid-waste-incineration-a-decision-makers-guide>
- Tavorn J., 2019. 20-year experience of waste to energy in Phuket, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs), 27-28 February and 1 March 2019, at Pullman Bangkok King Power, Bangkok, Thailand.
- Tsukamoto, K., Nishiyama, K., Sasaki, M., Kanazawa, M., Sato, K., Hirakawa, Y., 2016. Construction of municipal waste treatment plant "Clean Plaza Yokote", *Ebara Engineering Review*, No.252, 1-7.
- UNEP, 2019. Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28413/WTEfull.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- World Bank, 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/30317/211329ov.pdf>
- タクマ環境技術研究会, 2017. 基礎からわかるごみ焼却技術

## 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](mailto: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)



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