

廃棄物の焼却技術における竪型ストーカ式焼却炉の位置づけ

松藤敏彦*
Toshihiko MATSUTO

1. はじめに

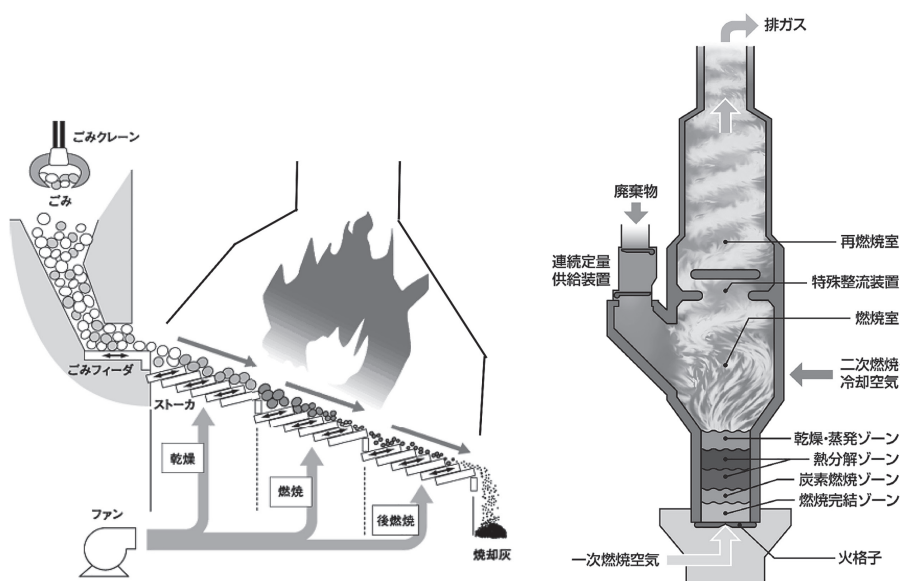
1900年制定の汚物掃除法以来、日本の廃棄物処理は焼却を中心に置いてきた。さまざまな炉形式がある中で、ストーカ式焼却炉(図1(a))は焼却炉の代名詞といってよいスタンダード技術となっている。筆者もストーカ式焼却炉を前提に焼却に関する調査研究を行ってきたが、数年前、図1(b)のような炉形状をもつ竪型ストーカ式焼却炉を知り興味をもった。空気とごみの接触効率が高くコンパクトであると感じたが、「従来のストーカ式焼却炉の乾燥・燃焼・後燃焼の各ゾーンを垂直に積み重ねた」、「一次燃焼空気を0.4程度とした低空気比燃焼」などの説明をなかなか理解できなかった。そこでストーカ式焼却炉を比較対象として、炉内

での現象、ごみ質変動の影響などについての考察を行った²⁾³⁾。

あるとき1970年代の教科書⁴⁾にある石炭燃焼の図が、竪型ストーカ式焼却炉内の現象をよく説明していることを知った。それは積み上げた石炭を熱分解し、発生した可燃ガスを燃焼するというものであった。つまり熱分解が焼却の一部をなすような技術が存在するということである。

ごみ焼却技術の説明はたいていの場合、ストーカ式焼却炉を前提とする。ごみを焼却するときには十分な空気を供給して可燃分を「燃焼」し、その効率を高めて環境影響を最小にするような技術開発がなされる。一方、空気を遮断して加熱し、可燃ガス、チャーを燃料として取り出す「熱分解」の技術がある。この両者は別の技術として説明されることが多いが、焼却炉内をミクロに見るならば熱分解や、酸素不足の不完全燃

*北海道大学名誉教授



(a) ストーカ式焼却炉(東京都HPの図¹⁾を修正)

(b) 竪型ストーカ式焼却炉

図1 ストーカ式焼却炉と竪型ストーカ式焼却炉の概要

焼による可燃ガスの発生があり、それらが燃えることで全体として「焼却」となっている。また熱分解によって発生した可燃ガス、チャーを回収したのち燃やすと、装置全体としてのマクロな結果は「焼却」と同じになる。直接燃焼するか、一旦ガス化して燃焼するかの違いである。

上記のように、堅型ストーカ式焼却炉は熱分解によりごみをガス化してから燃焼する技術なので、「ガス化」から考察を始めることでさまざまな技術の整理が可能となる。本稿ではまず、熱処理の技術を整理し、燃焼の中心部分であるガス化の原理をまとめる。次にごみ処理の代表的技術としてストーカ式焼却炉がどのように発展してきたか、堅型ストーカ式焼却炉内ではどのような現象が起きているかを述べ、最後にストーカ式焼却炉と較べて堅型ストーカ式焼却炉にはどのような特徴があるかについて考察する。

2. 有機物のガス化と燃焼

2.1 ガス化の主な反応

まず、「燃焼」と「ガス化」の関係から始めたい。固体燃料の燃焼は、おおよそ表1の順に進行するとされている。まず水分が蒸発し(乾燥)、可燃ガスが燃え(ガス化燃焼)、残りの未燃分が燃える(おき燃焼)。高

表1 固体燃料の燃焼

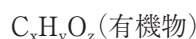
乾燥	表面の付着水分が蒸発する。その後、固形物中の水分が表面に移動して蒸発する。
ガス化燃焼(分解燃焼)	熱分解によって揮発分を放出し、気相中で拡散燃焼する。炎(ほのお)が見える(火炎燃焼)。
表面燃焼(おき燃焼)	分解後に残った固定炭素が燃焼する。酸素が固体表面、内部の気孔側壁まで拡散し、酸化反応が起きる。表面が赤熱し、炎は見えない。

表2 主なガス化反応⁶⁾

燃焼(酸化)	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
燃焼(酸化)	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$ (ガス)
部分酸化	$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$
発生ガス化	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
水性ガス化	$C + H_2O$ (ガス) \rightarrow $CO + H_2$
シフト反応	$CO + H_2O$ (ガス) \rightarrow $CO_2 + H_2$
メタン化	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ (ガス)
水蒸気改質	$CH_4 + H_2O$ (ガス) \rightarrow $CO + 3H_2$

温雰囲気での有機物分解による可燃ガス発生が「ガス化」であり、工業分析「水分、灰分、揮発分、固定炭素」のうち揮発分を由来とする。図2に工業分析値の例を乾ベースで示す⁵⁾。紙、プラスチックは揮発分が多く、プラスチックはセルロースより分解温度が低いので最もガス化しやすい。生ごみは水分が多いので、乾燥したのちに熱分解する。なお三成分「水分、灰分、可燃分」中の可燃分は、揮発分+固定炭素の合計である。

揮発分のガス化には、さまざまな反応が関与している。熱分解(pyrolysis)は



で表され、生成物はガス、タール、チャーである。熱分解に続いて、表2のような反応が起こる。表2の左辺の2項目の酸素、二酸化炭素、水蒸気などはガス化剤と呼ばれ、表2に示すようにガス雰囲気によって酸化、部分酸化、発生ガス化などさまざまな反応がある。各々の反応は酸化または還元、発熱または吸熱の場合があり、反応速度にも違いがある。ガス量は不変(Cの酸化など)、増加(発生ガス化など)、減少(Hの酸化など)の場合がある。全体としては図3に示すように初期の熱分解と、それに続く二次的の反応が並行して進み、熱分解は固体内、揮発後の気相内の両方で起こ

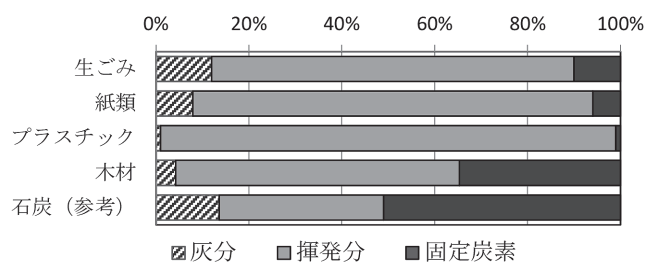


図2 有機物の工業分析値の例(乾ベース)

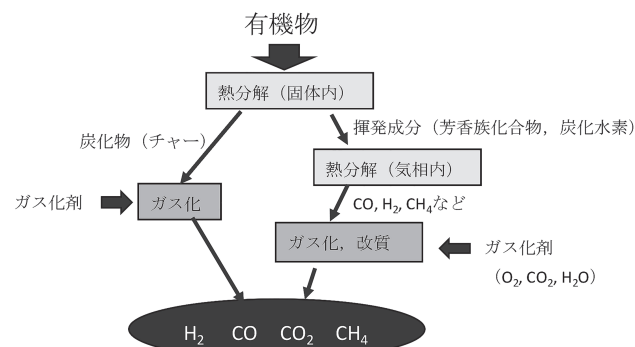


図3 ガス化の二段階反応 (文献7)をもとに作図)

る。改質とは、高分子ガスを高温下で低分子ガスにするなどの質変化を指す。

2. 2 ガス化の技術

可燃ガスの回収・利用を目的とするものをガス化炉と呼び、**図4**のような種類がある。バイオマスガス化の文献を引用したので、燃料Fがバイオマスであり、ガス化剤をここではO酸化剤と呼んでいる。火格子式は火格子(ロストル)上で燃料を支持し、中にガス化剤を吹き込む方式である。発生ガスの流れ方向によってダウンドラフト式、アップドラフト式がある。流動床式は流動媒体を循環する循環式と循環がないバブリング式に分けられる。噴流式はバイオマスを微粉化し、バーナで吹き込み部分燃焼するものである。キルン式は内熱式と、外部から加熱する外熱式がある。

なお、ガス化、石炭燃焼などの分野によって使用される呼称は異なるので、本稿では全体的な統一をはかるような表現とした。例えばバイオマスガス化では火格子は「固定床」とされるが、あとで述べるようにストーカ式は火格子に搬送機能を持たせたものなので、**図4**では火格子式とした。石炭燃焼では、バブリングは気泡流動、噴流は微粉炭燃焼であり、キルン式はロータリーキルン式、回転炉式などの呼称がある。また、参考文献が限定的なので、すべての技術は網羅できて

いないことを断っておく。

2. 3 石炭燃焼の技術

固体燃焼技術は18世紀以降のエネルギー源である石炭に対して発展した。ガスを回収せずにそのまま燃やすので、外熱式キルン、ダウンドラフト式の利用はないが、基本的には**図4**と同じである。1954年の燃料機械誌に掲載された欧米事情報告⁹⁾では、「良質炭を利用するには鎖状(チェーン)火格子ストーカ、移動式ストーカ、微粉炭燃焼が多く用いられている」としている。さらに水分、灰分の多い低品位炭利用のために特殊燃焼装置が必要であり、その代表例として火格子がごみと逆方向に往復するマルチン式逆送ストーカを挙げている。石炭を予熱・乾燥し、火層を掻きならして通風を良くすることができ、「驚くべき低質のものを有効に燃焼している」と述べている。

2. 4 用語の意味：火格子とストーカ

ストーカ(stoker)は英語では供給機を指し、火格子にあたるのはgrateである。したがって欧米では焼却炉の大きな分類として流動床、キルン式と並ぶのは火格子炉grate incineratorである。しかし上記のように石炭を効率的に燃焼するには、火格子自体の可動性を含めて、火格子が燃料を移動させる機能をもつことが必要となった。そのため「ごみの搬送機能をもつ火格

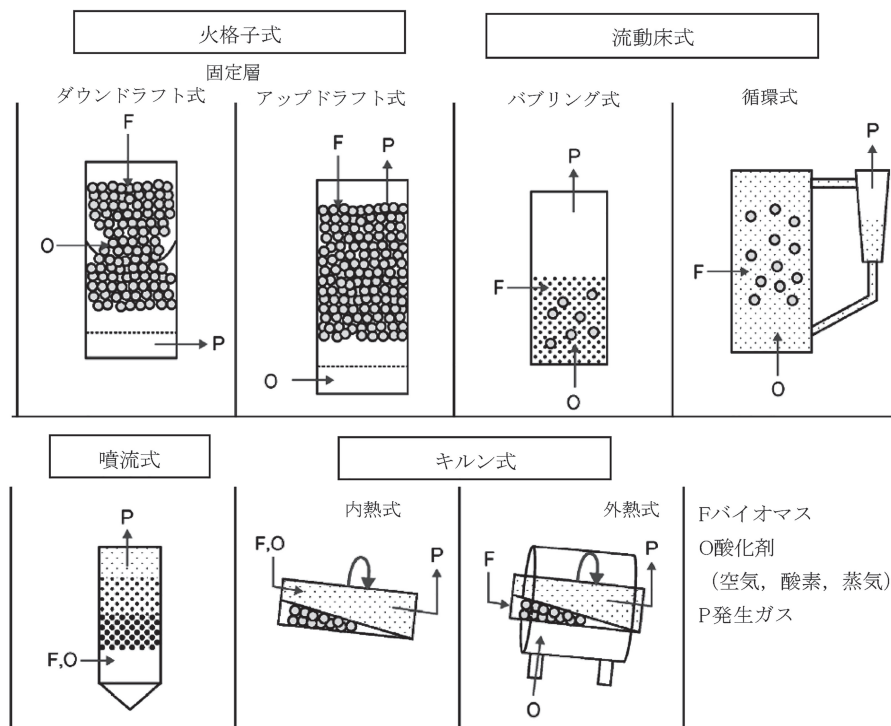


図4 ガス化炉の形式(参考文献⁹⁾の図を改変)

子炉)を「ストーカ炉」と呼ぶようになったと思われる。上記2.3のチェーンストーカはキャタピラ状の火格子を水平移動するもので、ごみ処理施設の整備計画・設計要領¹⁰⁾では移床式と呼ばれており、移動式ストーカは階段状などの形状を指すと思われる。

3. ストーカ式焼却炉と堅型ストーカ式焼却炉

3.1 ストーカ式焼却炉の変遷

低品位炭燃焼技術が、水分、灰分の多いごみを焼却するのに使用されていくのは自然な流れである。1996年に『環境施設』に掲載された杉島和三郎氏の著作¹¹⁾をもとに、バッチ炉からストーカ式焼却炉まで、どのような課題に対して現在に至ったかをまとめると以下のようなようになる。

初期のバッチ炉は、ごみの投入・灰出しが人力である。空気との接触をよくするため火掻き棒で攪拌し(これを火床ならしと呼ぶ)、炉の大きさが火掻き棒が届く範囲に限られるので、処理能力を大きくするには複数の炉(火房)を連続して並べる必要がある。空気は下部の灰出し口からの自然通風であり、攪拌、灰出し時の開閉によって通気量が変化する。

石炭と較べてごみは水分が多く悪臭を発生し、飛散、炎の吹き出しなどもあるので、人力作業は重労働かつ劣悪条件下にある。そこで、ごみの供給から灰出しまでの機械化が課題となった。ごみの移動・攪拌を機械的に行うため、火格子の階段状・多段の配置、火格子の揺動や反転がさまざま工夫された。また水分の高いごみを乾燥するための火格子を独立させ、輻射熱を補うため下部から燃焼ガスを通気するなどの工夫がなされた。そして石炭燃焼技術を応用した「ごみの搬送機能をもつ火格子炉(ストーカ炉)」による連続炉の開発へとつながる。乾燥段の独立が一般的となり、さまざまなごみの移動、攪拌方式が考案された。代表的なものとして杉島氏は並列揺動、逆送摺動、順送摺動に区分している。さらに、未燃分を完全燃焼させるための後燃焼を加え、乾燥、燃焼、後燃焼の3つゾーンとすることが一般的となった。投入ごみによる空気遮断、焼却灰の水封により通風の制御が可能となる。

3.2 堅型ストーカ式焼却炉

堅型ストーカ式焼却炉は火格子を有しており、2.4で述べたようにわが国では「火格子」と「ストーカ」が同等の意味で使われている(乾燥を目的とする

火格子を乾燥ストーカと呼ぶのはその例である)。したがって、堅型ストーカ式焼却炉は「ごみが自重で移動するストーカ炉」と呼ぶことができる。図5は前記教科書⁴⁾中のアップドラフト式ガス化炉の「火層の構造」であるが、堅型ストーカ式焼却炉の内部も同様の構造となっている。まず空気(ガス)側から見ると、炭素を燃焼してガス化反応に必要な熱を発生する酸化層、熱分解によって発生した固定炭素をガス化する還元層、バイオマス熱分解層、生成ガスの熱による投入されたバイオマスの乾燥層となる。逆に燃料側から見ると、予熱・乾燥、熱分解により揮発分を放出、固定炭素の酸化、燃焼を経て灰となる。空気と共に水蒸気を供給すると、還元ゾーンでは固定炭素の水性ガス化が起こる。図5右には、堅型ストーカ式焼却炉の説明に使われている用語を示した。従来のストーカ式焼却炉が念頭にあるので最後が燃焼完結ゾーンとなっているが、この意味については4.4で述べる。

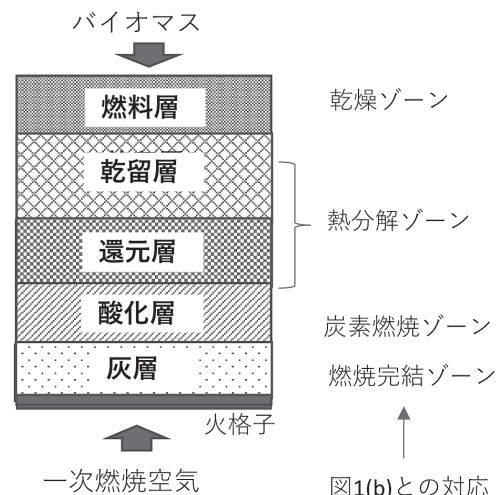


図5 バイオマスガス化炉内の現象

4. 堅型ストーカ式焼却炉の特徴

ここでは、堅型ストーカ式焼却炉が持つ特徴を、ストーカ式焼却炉と比較して述べる。この多くは、図1に示す形状の違いに由来している。

4.1 反応効率

ストーカ式焼却炉はごみと空気の接触効率を高めるためごみを広く薄く敷きつめる。一次燃焼空気はごみと交差するよう供給するので、両者の接触時間(反応時間)は短い。

堅型ストーカ式焼却炉はごみを厚く積み、閉じた空

間内をガスとごみが逆方向に移動するため、一次燃焼空気の酸素利用効率が高く、下部で発生した熱はごみを乾燥、熱分解するのに有効に利用される。

4. 2 炉内のごみとガスの分布

ストーカ式焼却炉は火格子上で乾燥、ガス化燃焼、おき燃焼とごみの状態が変化し、そのため燃焼室内では場所によってガス濃度や温度が異なる（二次元的分布がある）。そのため、ガス混合を促進し、燃焼の均質化をはかるため炉形状の工夫や、排ガス再循環が行われている。しかもプラスチックは早く燃え、生ごみはなかなか燃えないなど、投入ごみ質変化に伴って変動することへの対応が必要となる。

堅型ストーカ式焼却炉は熱分解層をはさんで廃棄物を可燃ガスと炭化物という燃料に変換し、上部で可燃ガス、炉底部では炭化物を燃焼する。廃棄物、ガスは一次元的に変化するのみであり、横方向に混合する必要がない。灰出しによる層全体の小刻みな上下移動はあるが、厚い灰層がその上の酸化層、熱分解層（還元を含む）および乾燥ゾーンを安定的に保ち、図5に示すゾーンの相対的位置は一定している。投入ごみはまず乾燥プロセスを経るので、低質ごみにも対応が容易である。

4. 3 燃焼のムラと吹き抜け

ストーカ式焼却炉ではストーカ上での燃焼完結のため、必要空気量の大部分を一次燃焼空気として供給するが、ごみを薄く広げるのでごみの不均質性のため燃え方が一様にならず、ムラが生じる。燃えやすいごみがあるところは吹き抜けが起きやすく、過剰燃焼によって火格子を焼損する。通気性の悪いところは燃焼空気が不足し、未燃のまま下流に移動する。ストーカに求められる攪拌機能は、吹き抜けを助長する場合がある。

堅型ストーカ式焼却炉はごみと灰が厚い充填層となるため、吹き抜けはおこらない。また火格子は常に厚い灰層に保護され、また一次燃焼空気冷却されており、焼損することはない。

4. 4 燃焼の完了点と滞留時間

ストーカ式焼却炉は残渣中の燃え残りがなく、燃え切り点（火炎の終端）を所定の位置に保つよう制御している。投入から排出までの滞留時間は1.5～2時間程度とされている。

堅型ストーカ式焼却炉は、ごみ投入から灰排出まで

の滞留時間が15時間、そのうち灰層は12時間程度¹²⁾と推定される。これは4.1で述べた高い反応効率によって急激にごみが減容化されるためである。ごみ層厚は2m程度あるが表面から1m以内で図5の乾燥・熱分解・酸化までが終了している。炉の半径方向で酸化層の位置が異なるなどばらつきがあると思われるが、その後、厚い灰層中で未燃炭素はほぼ完全に酸化される。すなわち、灰をすぐに排出せず厚い灰層を設けたことが、安定した完全燃焼を可能とする画期的な技術となっている。

4. 5 運転制御

ストーカ式焼却炉は燃焼温度、ボイラ蒸気発生量などを一定とするため、ごみ送り速度、燃焼空気量を制御する。ごみ質変動に伴い燃え方が不安定となるため、ストーカごとの送り速度、燃焼空気量の高度な制御も考えられている。

堅型ストーカ式焼却炉において炉底から供給する空気は、炭化物および熱分解ガスの一部を燃焼するのに用いられる。ガス化・熱分解に必要な一定の熱発生が目的なので、空気量をごみ質変動に合わせて制御する必要はない。「一次燃焼空気」「空気比」はいずれもストーカ炉などでの「燃焼」を念頭においた用語だが、ガス化を経由した燃焼を行う堅型ストーカ式焼却炉は「炉底から空気比0.4程度の空気を供給して炭化物および熱分解ガスの一部を燃焼し、ガス化・熱分解用の熱を供給する」との表現が正しいだろう。ストーカ式焼却炉は燃焼空気の大部分を一次燃焼空気とするが、堅型ストーカ式焼却炉で炉底から供給するのは2～3割程度である。燃焼室における二次燃焼空気量は可燃ガス発生量に応じて制御すればよい。また燃焼室では主として可燃ガスを燃焼し、しかも炉断面方向のばらつきがないので排ガス制御はストーカ式焼却炉に較べて容易となる。

5. おわりに

設計要領においてごみ焼却施設は表3(a)のように分類されているが、図4の分類に基づいて並べ替えると、表3(b)となる。

石炭燃焼¹³⁾には固定層の火格子燃焼、流動層燃焼、微粉炭燃焼が用いられている。ごみ焼却では低品位炭燃焼から開発されたストーカ式が最も一般的であり、流動層式、キルン式を併せた3形式が焼却施設の種類となっている。ガス化溶融は流動床式、キルン式と、

表3 焼却施設の分類

(a)設計要領¹⁰⁾における焼却施設の分類

焼却施設	焼却	ストーカ式 流動床式 キルン式	
	ガス化溶融施設	一体方式	シャフト炉式
		分離方式	キルン式 流動床式
	ガス化改質施設	一体方式	シャフト炉式
分離方式		キルン式 流動床式	

(b)処理目的別に見た主な利用技術

バイオマスガス化		石炭火力発電	ごみ焼却施設	
			焼却	ガス化溶融
火格子式	移動なし	火格子燃焼		
	移動あり(ストーカ)		ストーカ式	
流動床式	バブリング式	気泡流動層	流動床式	流動床式
	循環式	循環流動床		
噴流式		微粉炭燃焼		
キルン式	内熱式		キルン式	
	外熱式			キルン式 シャフト炉式

高炉技術の応用であるシャフト式に分類される。この表からわかるように、熱処理技術にはさまざまな方法があり、石炭、バイオマス、廃棄物といった処理対象物、そして燃料回収、焼却、残渣溶融という最終目的に応じて、適当な技術が選択されている。

3. 1で述べたようにごみの完全燃焼を図るため現在のようなストーカ式焼却炉の技術が発展してきたが、同時に、薄く広げることによる課題が発生し、その解決のための努力が重ねられてきた。堅型ストーカ式焼却炉はもともと、後燃焼段の完全燃焼のための「厚焚き」からスタートし、現在の炉形状に至った独自技術である。結果として炉内現象はアップドラフト型ガス化炉と類似するが、石炭と違って水分、灰分が多く、しかも質変動の大きい廃棄物への適用に成功し、ストーカ式焼却炉の課題の多くを解決できていることは、「発明」といってよいレベルの技術開発と言える。

ごみ焼却施設の施設選定においては最初に、ストーカ式あるいは流動床式などと、炉形式を条件とすることがある。しかしごみ処理本来の目的を達成する方法は、表3(b)のように多くの選択肢・可能性がある。「形式」を絶対視するとさらなる工夫の余地を狭めてしまうし、ストーカ式の中でもメーカーによって、あるいは処理条件によって性能が大きく異なる可能性がある。最も重要なことは処理の「性能」であり、定量的評価によって技術を選択すべき¹⁴⁾である。

参考文献

- 1) 東京二十三区清掃一部事務組合 <https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/shiro/shori/kanen/higoshi.html>
- 2) 松藤敏彦：堅型ストーカ炉内の現象に関する考察，第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.303-304，2018
- 3) 松藤敏彦：廃棄物焼却における堅型式ストーカ焼却炉の技術的位置づけ，第40回全国都市清掃研究・事例発表会，2019
- 4) 水谷幸夫，燃焼工学，森北出版，p.179，1977
- 5) 科学的に見るSDGs時代のごみ問題(第2章)，丸善出版，2019
- 6) 笹内謙一，バイオマスの熱分解ガス化による発電利用，日本燃焼学会誌，第47巻第139号，pp.31-39，2005
- 7) 林潤一郎，石炭ガス(石炭エネルギーセンター，第4回石炭基礎講座) http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/material/2012_09_hayashi.pdf
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，NEDO再生可能エネルギー技術白書(第2版)，2014
- 9) 辻本徳三，最近の欧米における燃焼装置について，燃料機械誌33巻10号，pp.513-519，1954
- 10) 全国都市清掃会議，ごみ処理施設整備の計画・設計要領，2006
- 11) 杉島和二郎：ごみ焼却におけるストーカ式焼却炉の考証(1)～(4)，環境施設，No.63-66，1996
- 12) 石部健輔，山田裕史，島田和宗，堅型ストーカ式焼却炉における廃棄物の炉内滞留時間の検証，第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.247-248，2021
- 13) 辻博文，石炭発電技術-微粉炭燃焼技術(石炭エネルギーセンター，第5回石炭基礎講座)，http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/material/09_tsuji.pdf
- 14) 松藤敏彦：ごみ処理施設の科学的合理性について考えるⅢ 処理施設の選定プロセスと評価基準，都市清掃，第73巻第358号，pp.638-647，2020.