

## 第2章 技術の概要と評価

### 第1節 技術の概要と特徴

#### §5 技術の目的

本技術の目的は、自己熱再生型のヒートポンプ技術を利用する乾燥方式によって、高効率、省エネルギー、低コストで乾燥汚泥を生産し、これを活用することにより、中小規模処理場における汚泥の処分費縮減と肥料化・燃料化有効利用の用途拡大を図ることを目的とする。

#### 【解説】

中小規模の下水処理場では焼却、溶融化及び炭化等の大規模な設備投資は難しい。また、乾燥による減量化や肥料化、固形燃料化においても多くのエネルギーを使うことから処理場の事業性を得ることができず、多くの処理場では脱水汚泥を外部へ搬出して委託処分しているのが実情である。しかし、脱水汚泥は水分を多く含むために、その質量及び容積が大きく、脱水汚泥の運搬費用及び委託処分費用が施設の維持管理費を圧迫するという懸念事項がある。

そこで、ヒートポンプ技術を応用した汚泥乾燥技術により、高効率、省エネルギー、低コストで乾燥汚泥を生産することが可能となり、これを活用することにより、多くのエネルギーと費用を必要としていた汚泥処理の課題の解決につながる。なお、本技術では、15%W.B.から30%W.B.までの乾燥汚泥を生産することが可能であり、乾燥汚泥の利用用途（肥料化・燃料化）に応じて、乾燥汚泥の含水率を調整することとなる。

本技術の適用範囲を図2-1に示す。

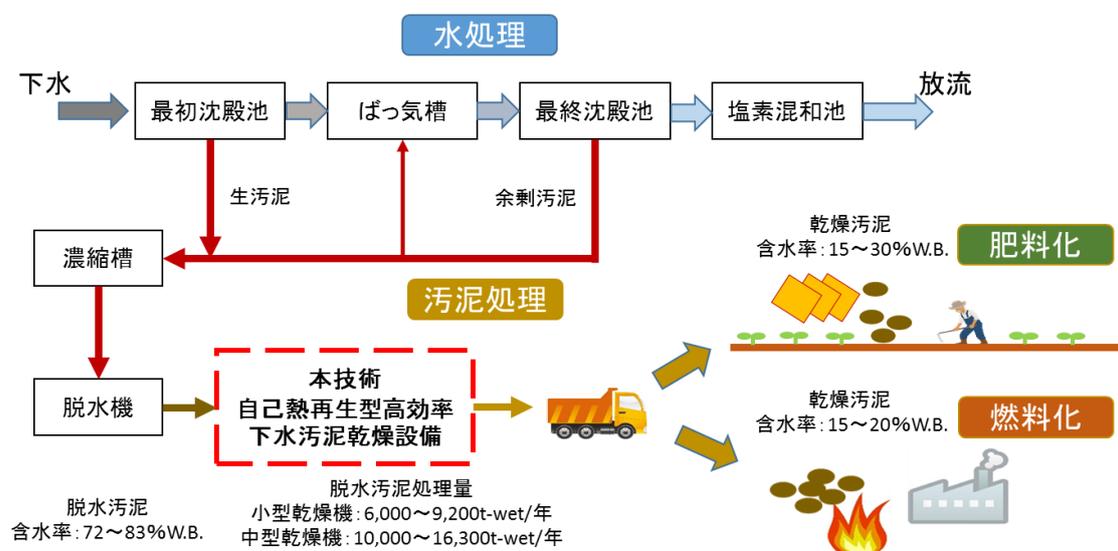


図2-1 本技術の適用範囲

§6 技術の概要

- (1) 間接加熱型乾燥機をヒートポンプサイクルに組み込んだ高効率なシステム
- (2) 熱交換器で乾燥排気から熱回収して熱源として再利用(自己熱再生)
- (3) 凝縮することで極小風量となり脱臭設備の負荷が小さい乾燥排気

【解説】

本技術の概要を図2-2に示す。

本技術は、間接加熱型乾燥機をヒートポンプサイクルに組み込み、これまで利用できなかった乾燥排気の潜熱まで回収し、熱源蒸気ドレンを蒸発、再圧縮して乾燥用熱源に自己熱再生する技術である。

実現には乾燥排気中の空気を減らすことが必要で、系内への漏れ込み空気（リーク空気）が少ない汚泥ポンプによる脱水汚泥投入、乾燥機へ導入するキャリアガスをキャリア蒸気（過熱蒸気）とするなどにより乾燥排気中の空気を減らしている。

乾燥機から出た熱源蒸気ドレンは、ヒートポンプ熱源となる乾燥排気よりも低温で蒸発するよう膨張弁で減圧され、熱交換して蒸発して減圧蒸気となる。減圧蒸気は、負圧吸入の蒸気ブロウと高圧縮の蒸気圧縮機を組み合わせた2段圧縮システムにより再圧縮されて熱源蒸気となる。

これにより、補助ボイラ蒸気が熱源蒸気量の約1割程度で済むことから省エネかつ低コストの乾燥ができる。

更に、乾燥排気中の空気低減により熱交換器及びコンデンサを経た排気は極めて小風量になるため、脱臭設備の負荷も低い（資料編1 図資1-48及び図資1-49[p.220～223]参照）。

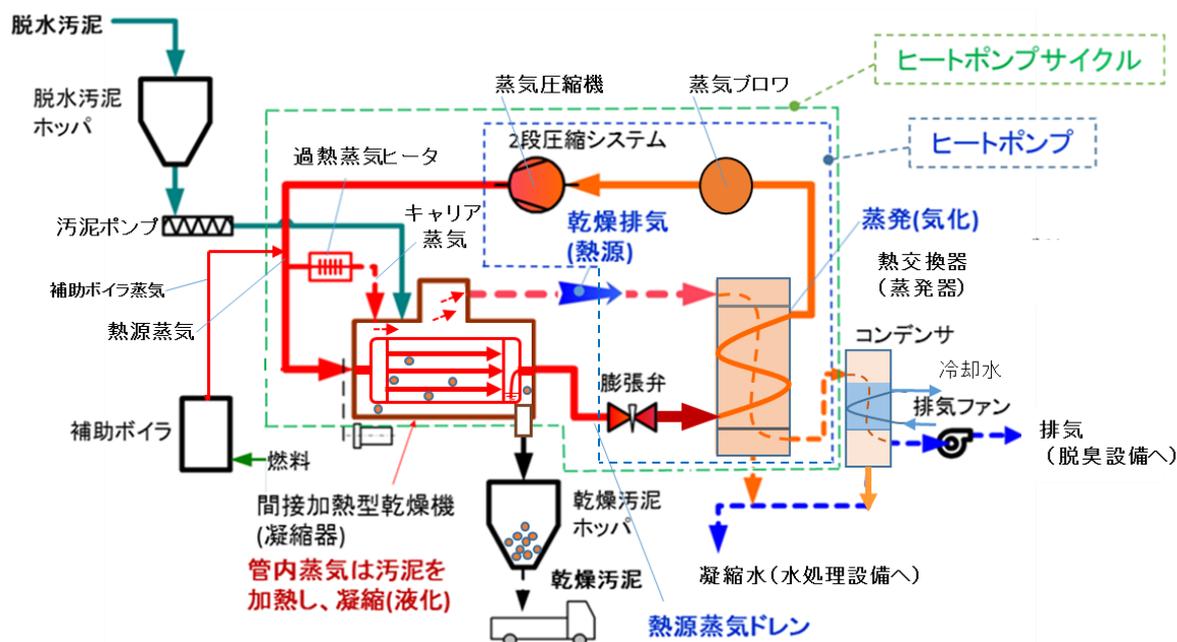


図2-2 本技術の概要

§7 技術の特徴

本技術の特徴は高効率、省エネ、低コスト乾燥であり、以下の特徴を有している。

- (1) 乾燥排気からの熱回収(自己熱再生)
- (2) 2段圧縮システム(蒸気再圧縮)
- (3) キャリアガスに過熱蒸気を用いる乾燥
- (4) 肥料および燃料としての適性

【解説】

本技術は、高効率、省エネ、低コストで脱水汚泥を乾燥させることが可能となる点が特徴であり、後述の要素技術を組み合わせることで実現している。

水の蒸発には概ね 2.5 MJ/kg の蒸発潜熱を必要とし、熱を受け取り水蒸気となった水分は潜熱を内包する乾燥排気となる。従来の乾燥機では乾燥排気に空気を多く含むため凝縮温度が低く潜熱回収ができないが、本技術ではこれを回収し熱源蒸気に再生することができる。

本技術では乾燥機のキャリアガスに空気をいれず代わりに過熱蒸気を用いて蒸発水分を運ぶので、蒸発水分と過熱蒸気は空気を殆ど含まない乾燥排気となり、ヒートポンプサイクルの熱交換器で顕熱だけでなく熱量の大半を占める潜熱まで回収される。一方で、熱源蒸気ドレンはこの潜熱を受け、さらに2段圧縮システムを経て熱源蒸気となる。ゆえに、汚泥に加えた熱量の殆どを再利用することができ、ヒートポンプ動力と僅かな補助蒸気で運転が成り立つ。

蒸発潜熱相当の熱量で乾燥ができれば熱効率は概ね 100%となるので、2段圧縮システムにより乾燥排気の蒸発潜熱まで回収し熱源蒸気に再生する本技術の熱効率は、100%を大きく上回る。

熱効率は従来の乾燥機で約 60% (資料編 1 表資 1-13[p. 152]参照)、本技術は 173% (計画値、資料編 1 図資 1-4[p. 128]参照) と極めて高効率となる。計画時の設定条件と熱効率を以下に示す。

なお、本技術の電力の一次換算後の熱効率は約 75%となる。

<i>F1</i>	脱水汚泥処理量	1,300	[kg-wet/h]	<i>F2</i>	乾燥汚泥発生量	455	[kg-wet/h]
<i>W1w</i>	含水率	72	[%W.B.]	<i>W2w</i>	含水率	20	[%W.B.]
<i>W1d</i>	含水比	257.1	[%D.B.]	<i>W2d</i>	含水比	25.0	[%D.B.]
<i>Ds</i>	乾物処理量	364	[kg-ds/h]	<i>W</i>	乾燥機蒸発量	845	[kg/h]
<i>Q1</i>	乾燥必要熱量	637	[kW]	<i>Q2</i>	熱源熱量	369	[kW]
$\eta$	熱効率	173	[%]	$\eta = Q1 \div Q2 \times 100$			

また、空気を殆ど含まない乾燥排気は熱交換器で凝縮して極めて小風量となる。

従来の乾燥機と比較し、本技術は、高効率熱回収と排気風量低減により、乾燥及び脱臭で使用するエネルギーが大幅に低減でき熱源にかかる費用(燃料費+電力費)が低く抑えられるので高効率・省エネ・低コストである。

各技術のフローと熱効率を図 2-3 及び図 2-4 に示す。

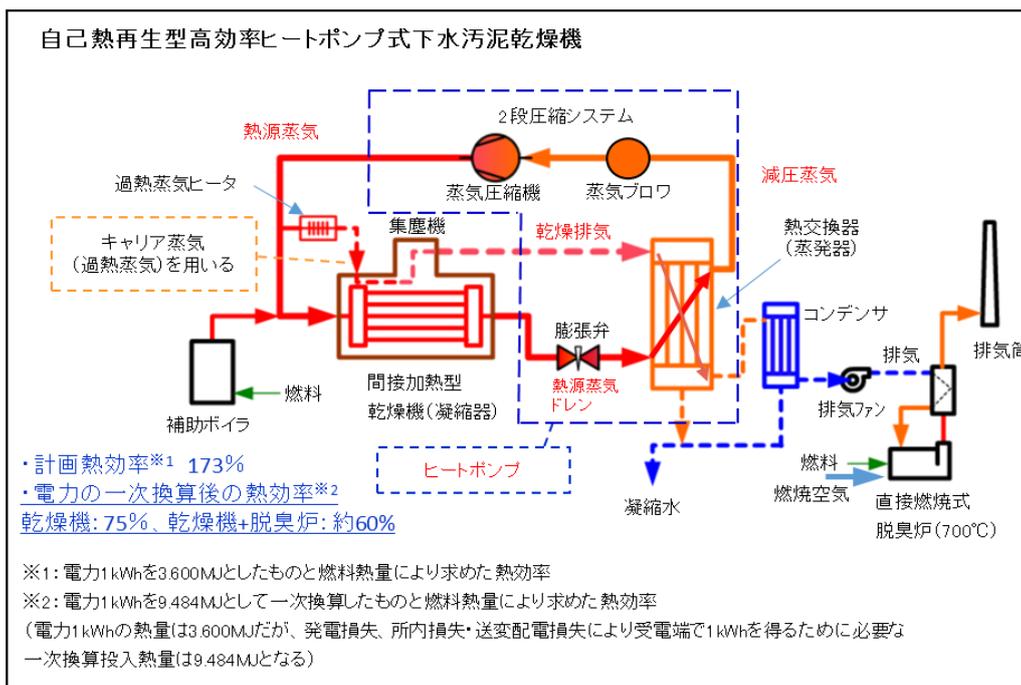


図 2-3 本技術の乾燥フロー及び熱効率

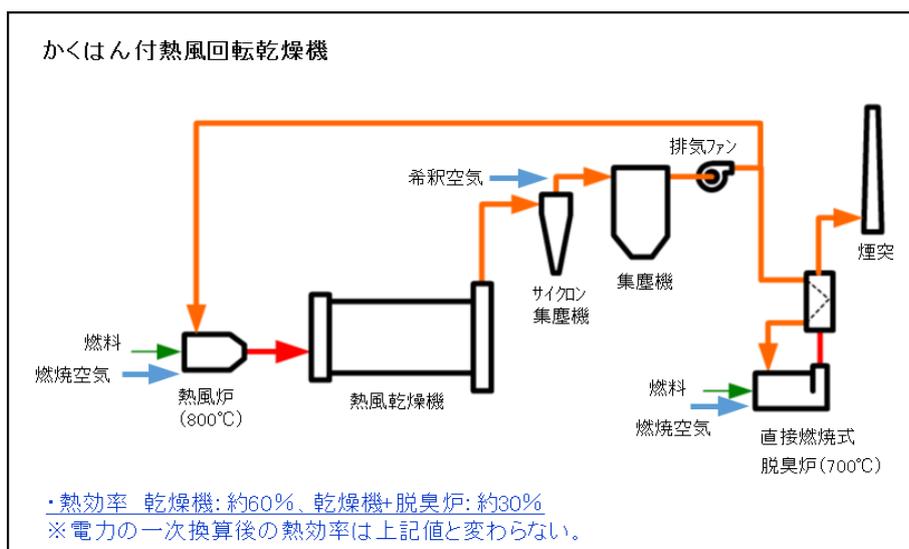


図 2-4 従来技術の乾燥フロー及び熱効率

技術の特徴について以下 (1) ~ (4) に解説する (図 2-5 参照)。

(1) 乾燥排気からの熱回収(自己熱再生)

汚泥乾燥に使われた熱源蒸気ドレンは膨張弁で減圧され、蒸気ブロワで熱回収可能な圧力・温度 (約-0.023MPaG, 飽和温度 93°C) に制御される。一方、熱エネルギーを大量に保有する乾燥排気は大気圧の水蒸気であるため約 100°Cで凝縮し、熱交換器で熱源蒸気ドレンを加熱する。熱源蒸気ドレンは蒸発して減圧蒸気となり蒸気ブロワに吸引される。

(2) 2段圧縮システム (蒸気再圧縮)

減圧蒸気を乾燥機の熱源蒸気として用いるには、補助ボイラで発生させる高圧・高温蒸気と同等の状態まで圧縮する必要があるため、2段圧縮システムを用いる。減圧蒸気は1段目の蒸気ブロワで $-0.023\text{MPaG}$ から $0.06\text{MPaG}$ まで、2段目の蒸気圧縮機で $0.06\text{MPaG}$ から $0.44\sim 0.6\text{MPaG}$ まで昇圧されて乾燥機の熱源蒸気として十分な圧力となる。

熱源蒸気エネルギーの大部分は乾燥排気から回収したもので、圧縮に使用するエネルギーは実証においては下記のように圧縮機動力の約1/3と低く、また、圧縮時に蒸気の過熱防止及び機器保護用に注水する冷却水も蒸発して熱源蒸気の一部となるため高効率なシステムとなる。

実証では小型乾燥機 (第3章 表3-10 [p.54]参照) の最適条件の加熱温度 $157^{\circ}\text{C}$ で $1,028\text{kg/h}$  ( $788\text{kW}$ ) の飽和蒸気を、約1/3の圧縮機合計動力 ( $235\text{kW}$ ) で得ている (資料編1 図資1-50 [p.224]参照)。

(3) キャリアガスに過熱蒸気を用いる乾燥

本技術では間接加熱型乾燥機で汚泥より発生した水蒸気を排除するキャリアガスとして、従来用いられる空気に代わって過熱蒸気を用いているため、従来の乾燥機と比較して乾燥排気風量に占める空気量がわずかである。熱交換器とコンデンサで乾燥排気中の水蒸気は凝縮除去されるためコンデンサ後の排気量は従来の乾燥機より大幅に低減される (資料編1 図資1-48 [p.220]及び表資1-47 [p.221]参照)。

乾燥排気は臭気が強く脱臭処理が必須であるが、本技術では従来の乾燥機に比べ排気風量を大幅に低減しているため、脱臭装置の負荷が大幅に減る。

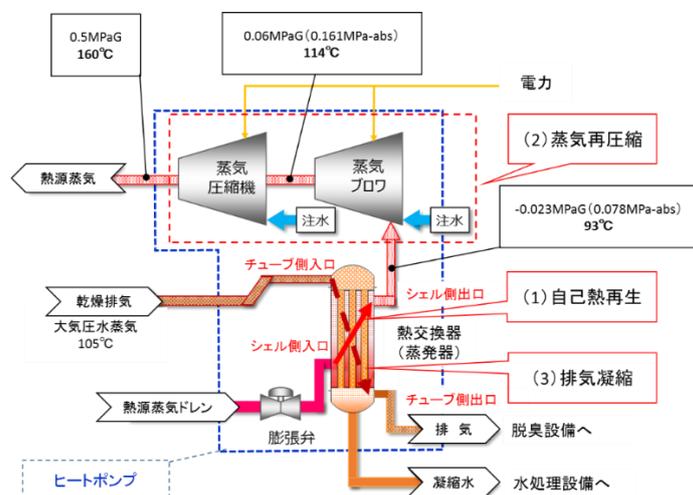


図2-5 要素技術 (自己熱再生、蒸気再圧縮、排気凝縮)

(4) 肥料および燃料としての適性

本技術の乾燥汚泥含水率調整範囲は $15\% \text{W.B.} \sim 30\% \text{W.B.}$ で、肥料・燃料用途に対応する。四季を通じて肥料化および燃料化として利用できる。

肥料としての適性分析と市場性、燃料としての適性分析や安全性、市場性などの調査および分析の結果では適性良好を確認している (第3節 [p.28~30]参照)。

§8 高効率乾燥装置の概要と特徴

本装置は、本体シェル内に設けられた多管式間接加熱管内（図2-8[p.16]参照）に熱媒体（飽和蒸気）を流し、これを回転させて、加熱管（束）と汚泥の接触により乾燥を行うものである。以下の機器等により構成する。

- (1) 汚泥ポンプ
- (2) 間接加熱型乾燥機

【解説】

高効率乾燥装置は、汚泥ポンプ及び間接過熱型乾燥機により構成され、下記に概要を示す（図2-6参照）。

乾燥排気から効率よく潜熱を回収するためには乾燥機内部に漏れこむ空気量を抑える必要があり、脱水汚泥の投入には漏れ込み空気量が少ない汚泥ポンプを用いている。

乾燥機内部には約160℃の飽和蒸気が内部を流れる多管式加熱管束が回転しており、乾燥機内部温度は概ね100℃より高く保たれている。投入された脱水汚泥は、乾燥機内部の乾燥した滞留物と混ぜ合わされ、加熱管束に固定されたリフターにより掻き揚げられ、落下しながら加熱管束と接触し、これを繰り返すことで乾燥が進む。乾燥汚泥は乾燥機本体シェル端部の排出装置より排出される。

乾燥排気は、乾燥機上部に設置したバグフィルタ式の集塵機で除塵され、熱交換器で冷却される。乾燥排気に含まれる水蒸気は凝縮し、水処理設備へ送られる。冷却後の乾燥排気はコンデンサでさらに減温除湿され、排気ファンにより脱臭設備へ送られる。キャリアガスに空気を使用しないため、熱交換器とコンデンサを通過した乾燥排気は最終的に極めて少風量となり、脱臭設備の負荷が低減される。

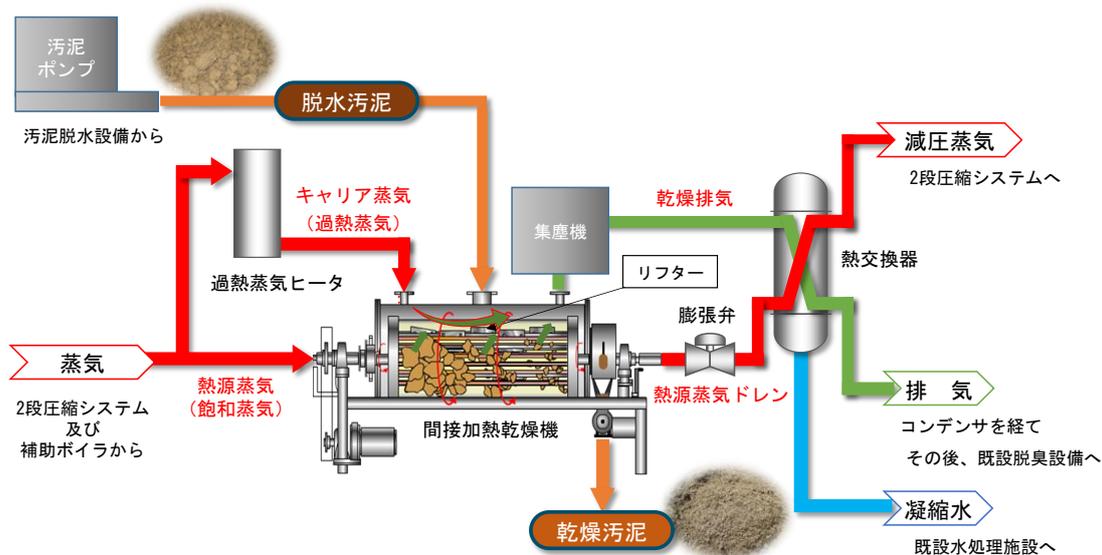


図2-6 乾燥設備フロー（圧縮機ライン省略）

(1) 汚泥ポンプ

脱水汚泥は汚泥ポンプにより乾燥機投入弁に送られ、複数の投入弁により分散投入される（図2-7参照）。乾燥機への投入速度は、汚泥ポンプの回転速度を増減させることで調整する。脱水汚泥含水率の短期変動（日単位）による乾燥汚泥含水率の調整は汚泥ポンプの回転速度を変更させて行なう。

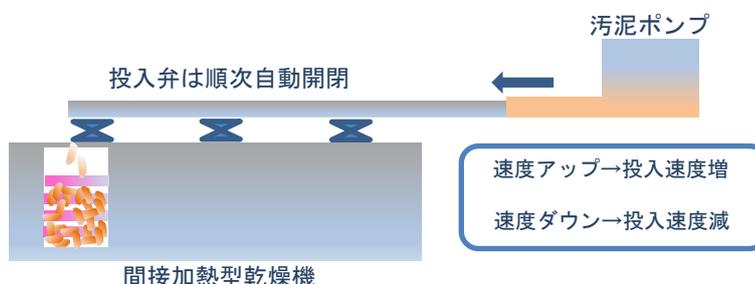


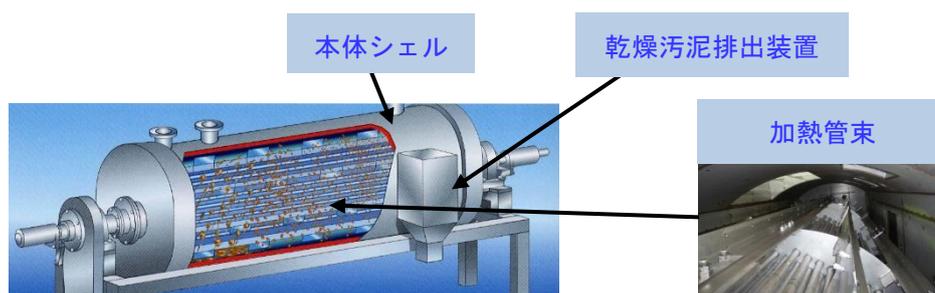
図 2-7 間接加熱型乾燥機、汚泥ポンプ、投入弁

(2) 間接加熱型乾燥機

間接加熱型乾燥機は、固定された本体シェル内部で熱源蒸気が流れる多管式加熱管束が毎分複数回転の速さで回転し、汚泥を間接的に加熱して乾燥する装置である（図2-8参照）。

安定運転のために機内滞留量を一定に保つ必要があり、加熱管束駆動モータの電流値や機内滞留量（レベル計検知）を基に乾燥汚泥排出装置のダンパ開閉頻度を自動調節することで排出速度を制御している。

蒸発水分を機外へ排気するキャリアガスとして、従来用いられる空気の代わりに、少量の蒸気を大気圧に減圧し、過熱蒸気ヒータで過熱したキャリア蒸気を用いている。この際、乾燥排気が乾燥機から噴出しないようにするため、排気ファンで乾燥排気を誘引し、機内が負圧になるようにしている。また、図2-8には記載していないが本体シェルの外面に蒸気を流す銅管を敷設しており、乾燥機内の結露を低減させている。



適用規模	乾燥機型式	シェル			加熱管束		
		巾	高さ	長さ	直径	長さ	伝熱面積
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]
小型乾燥機	ITR-250	2.4	3.0	6.0	2.1	4.9	250
中型乾燥機	ITR-450	3.0	3.4	7.2	2.6	7.0	450

図 2-8 間接加熱型乾燥機のイメージと適用規模乾燥機主要寸法

### §9 ヒートポンプシステム設備の概要と特徴

本技術は、従来の乾燥機では利用できなかった乾燥排気の潜熱を熱交換器で回収することで省エネ効果を向上させるという特徴を有している。乾燥機からの熱源蒸気ドレンを減圧蒸気にし、2段圧縮システムで熱源蒸気圧力まで圧縮し乾燥熱源として再利用する。間接加熱型乾燥機、膨張弁（スチームトラップ）、熱交換器、圧縮機が冷媒（蒸気）配管で接続されたヒートポンプサイクルであり、間接加熱型乾燥機の伝熱管（束）が凝縮器、スチームトラップが膨張弁、熱交換器が蒸発器、2段圧縮システムが圧縮機の役割となる。システムは主に以下の機器から成る（図2-9参照）。

- (1) 間接加熱型乾燥機
- (2) 膨張弁（スチームトラップ）
- (3) 熱交換器
- (4) 2段圧縮システム
  - 1) 蒸気ブロワ
  - 2) 蒸気圧縮機
- (5) システム用ヘッダ

#### 【解説】

##### (1) 間接加熱型乾燥機

§8に示す間接加熱型乾燥機で、内部で回転する伝熱管束の内部の冷媒（蒸気）が外部の汚泥を間接加熱し冷媒は凝縮して熱源蒸気ドレンとなる。伝熱管束内の熱源蒸気ドレンは伝熱管束のサイフォン管により選択的に後段の膨張弁側に排出される。

##### (2) 膨張弁（スチームトラップ）

ドレンを選択的に後段に流す汎用機器のスチームトラップであるが、本技術では熱源蒸気圧力のドレンを選択的に圧縮機入口の負圧となったドレンタンクに排出する膨張弁に該当する。

##### (3) 熱交換器

熱交換器はシェル&チューブ式（詳細は後述の第4章の図4-6[p.92]参照）。ドレンタンクの熱源蒸気ドレンをポンプで送り、シェル内の水位を所定位置に保ち、チューブ側を通気する乾燥排気と熱交換する。シェル内の熱源蒸気ドレン温度は蒸気ブロワ吸込圧力に依存する。

##### (4) 2段圧縮システム

2段圧縮システムは、蒸気ブロワと蒸気圧縮機で構成され、熱交換器で発生した減圧蒸気を熱源蒸気の圧力に圧縮する。

###### 1) 蒸気ブロワ

1段目圧縮機の蒸気ブロワでは熱交換器で熱回収し再蒸発させた減圧蒸気（78kPa-abs）を（161kPa-abs）まで圧縮する。本技術ではルーツブロワ式を採用。圧縮による過熱防止用に補給水を注入する。

###### 2) 蒸気圧縮機

2段目圧縮機の蒸気圧縮機では1段目出口蒸気をさらに圧縮しシステム用ヘッダの圧力（0.5MPaG）の飽和蒸気とする。本技術ではスクリュウ圧縮機式を採用。蒸気ブロワ同様、過熱防止用に補給水を注入する。

(5) システム用ヘッダ

2段圧縮システムからの吐出蒸気（循環蒸気）は、蒸気ボイラから補助蒸気により圧力を一定に保たれたシステム用ヘッダへ送られ、乾燥設備の熱源蒸気として使用される。

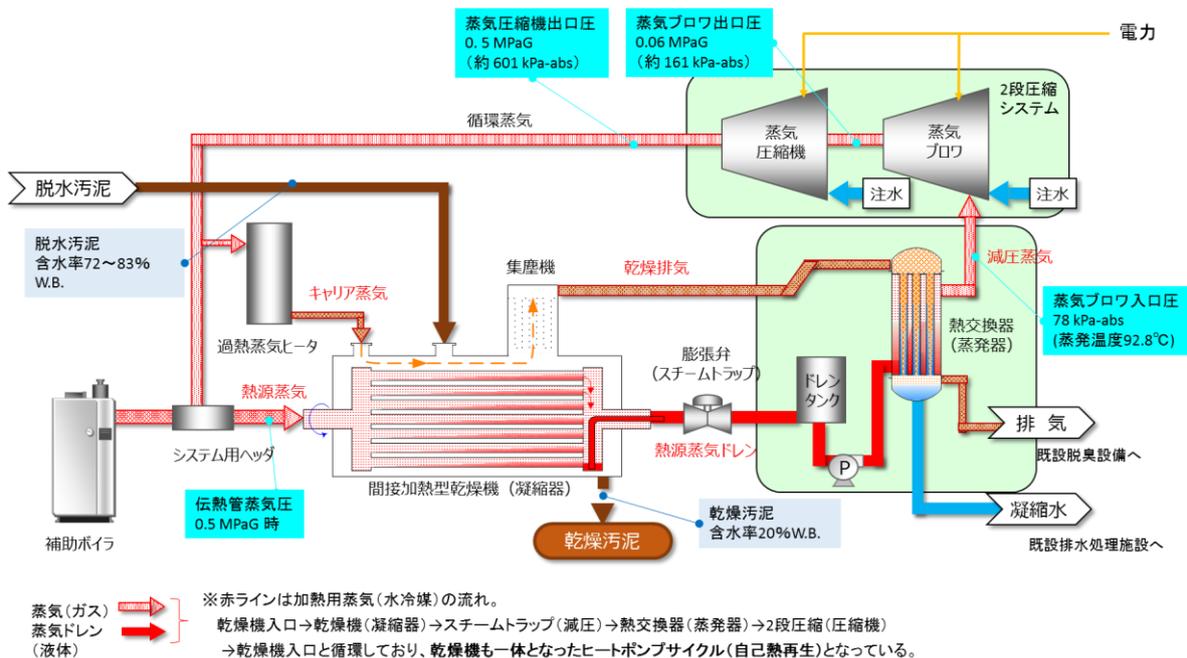


図 2-9 システムの構成

以上の機器で乾燥機の廃熱を利用するヒートポンプシステムが構築される。

間接加熱型乾燥機内では、システム用ヘッダから送り込まれる高温の冷媒（蒸気）を用いて、脱水汚泥を乾燥し、汚泥内部の水分を蒸発させる。その際の蒸気を含んだ排気のことを乾燥排気と定義している。間接加熱型乾燥機から排出される高温の乾燥排気は、集塵機から熱交換器へと移行する。

一方、冷媒（蒸気）は、熱を放出することで凝縮して冷媒（液体）となり、間接加熱型乾燥機から膨張弁へ移動する。冷媒（液体）は、膨張弁において減圧されることで温度が低下し、この低温・低圧の冷媒（液体）は、熱交換器において、高温の乾燥排気から熱を供給され、低温・低圧の気体状態となり蒸気ブロワに移行する。この低温・低圧の冷媒（蒸気）は、蒸気ブロワ及び蒸気圧縮機によって、2段階で加圧され、温度も上昇する。この高温・高圧の冷媒（蒸気）は、システム用ヘッダまで循環することとなる。

なお、熱交換器内において、高温の乾燥排気（蒸気）は、低温・低温の冷媒と熱交換を行うことで、温度低下し、凝縮する。その際に、乾燥排気（蒸気）に内包する潜熱を冷媒に移行することが可能となるため、高効率なエネルギー回収につながる事となる。

従来の乾燥技術における乾燥機の熱効率は約 60%で乾燥排気燃焼脱臭設備を含めた全体の熱効率は約 30%となる。含水率 78%W.B. の脱水汚泥 8,280t-wet を年 7,200h で 20%W.B. に乾燥するときの維持管理でのエネルギー使用量合計は 44,992GJ（第 3 章の表 3-15[p. 62]）で、1 時間あたりで示すと 1.15t-wet の脱水汚泥を乾燥するのに約 6.2 GJ の熱量が必要と言える。

一方、本技術における維持管理でのエネルギー使用量合計は24,280GJ(第3章の表3-15[p.62])であり、同様に1時間あたりで示した場合、約3.4GJで1.15t-wetの脱水汚泥を乾燥し、さらに排気を脱臭できる(本技術、従来の乾燥機とも一次換算投入熱量)。

汚泥乾燥におけるランニングコスト縮減は下水脱水汚泥の利活用で乾燥による肥料化や燃料化を考える場合に重要で、自治体負担経費も軽減できる。

これまで自己又は他者の廃熱やエネルギーを利用する多くの技術が開発されてきたが、本技術は自己で完結するヒートポンプシステムであり、省エネ、かつ低コストの汚泥乾燥技術として非常に有効なものといえる。

## 第2節 技術の適用条件

## §10 技術の適用条件

本技術は、下水処理における脱水汚泥の乾燥に適用される。本技術の導入効果は、汚泥性状や処理場の条件等によって異なるため、「適用条件」を満たすことを基本とし、その中でも導入効果の高くなることが予想される「推奨条件」を併せて示す。

## 【解説】

本技術は、下水処理における脱水汚泥の乾燥に適用する。

本技術が適用可能となる適用条件、導入効果が高くなる推奨条件を下表に示し解説する。

表 2-1 適用条件と推奨条件

	小型乾燥機 <sup>※1</sup>	中型乾燥機 <sup>※1</sup>
適用条件	年間脱水汚泥処理量 6,000～9,200[t-wet/年]	年間脱水汚泥処理量 10,000～16,300[t-wet/年]
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 未消化脱水汚泥</li> <li>・ 脱水汚泥含水率 72～83%W. B.</li> <li>・ 設置場所は臭気対策のため屋内</li> </ul>	
推奨条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 乾燥肥料化物の有価又は無償配布先が確保できる処理場</li> <li>・ 燃料原料として利用先が確保できる処理場</li> <li>・ 脱水汚泥処分費用単価の高い処理場</li> <li>・ 既設建屋が存在し省コストで導入可能な処理場</li> <li>・ 既設脱臭設備が使用可能な処理場</li> </ul>	
備考	※1 適用規模により小型乾燥機または中型乾燥機で対応する	

## (1) 適用条件

本技術の適用条件を以下に示す。

## 1) 脱水汚泥

- ① 未消化の脱水汚泥を対象とする
- ② 適用含水率は、72～83 %W. B. の範囲を対象とする

※実証フィールドは未消化脱水汚泥、脱水汚泥含水率は②の範囲内のとおり。

※実証試験では乾燥汚泥含水率を安定的に 15, 20, 25, 30%W. B. とする自動調整運転を確認。

(資料編 1 図資 1-10～図資 1-13[p. 137～138]参照)

2) 年間脱水汚泥処理量 [t-wet/年]

ヒートポンプシステムの容量はひとつに限定されるため、表 2-2 に示す 2 通りの処理量から選択する。本技術の熱源蒸気温度の設計最大値は 165℃で、同温度の単位伝熱面積当りの水分蒸発量実証値は 4.1kg/(m<sup>2</sup>・h)となる（資料編 1 図資 1-18[p. 142, 143]参照）。さらに脱水汚泥発生量の年間変動 10%を考慮した水分蒸発量から乾燥機の必要面積を求めると小型乾燥機、中型乾燥機はそれぞれ 220m<sup>2</sup>、450m<sup>2</sup>となる。

間接加熱型乾燥機のラインナップ（表 2-3 及び資料編 1 図資 1-49[p. 223]参照）から、小型乾燥機を伝熱面積 250m<sup>2</sup>、中型乾燥機を最大機種種の 450m<sup>2</sup>を選択した。また、中型乾燥機はヒートポンプシステム 2 系列での対応となる（資料編 1 表資 1-9～表資 1-11[p. 142～146]参照）。

表 2-2 適用条件（年間脱水汚泥処理量、間接加熱型乾燥機選定、ヒートポンプ系列数）

ケース		年間脱水汚泥処理量 <sup>※1</sup>		水分蒸発量		必要面積	乾燥機型式	圧縮機
		適用範囲	設計値	設計値	110%値			
No.	適用規模 <sup>※2</sup>	[t-wet/年]	[t-wet/年]	[kg/h]	[kg/h]	[m <sup>2</sup> ]	ITR-	系列数
1	小型乾燥機	6,000～9,200	8,280 <sup>※1</sup>	834	917	220	250	1
2	中型乾燥機	10,000～16,300	16,296	1,669	1,836	450	450	2

※1 小型と中型の狭間の条件については導入検討対象外とする

※2 FS 検討計画値 8,280 t-wet/年。本実証フィールドの計画値は 9,630 t-wet/年

表 2-3 本技術で選定可能な間接加熱型乾燥機型式ラインナップ

乾燥機型式		ITR-	150	170	200	250	300	450
伝熱面積		[m <sup>2</sup> ]	150	170	200	250	300	450
適用規模			非該当	非該当	非該当 実証機	小型 乾燥機	非該当	中型 乾燥機
シェル	巾 [m]		1.9	1.9	2.3	2.4	2.4	3.0
	高さ [m]		2.2	2.3	2.8	3.0	3.0	3.4
	長さ [m]		5.8	6.6	6.6	6.0	7.1	7.2
加熱管束	直径 [m]		1.6	1.6	1.9	2.1	2.1	2.6
	長さ [m]		4.9	5.5	5.3	4.9	5.9	7.0
	伝熱面積 [m <sup>2</sup> ]		150	170	200	250	300	450

脱水汚泥処理量から本技術の投入脱水汚泥 1 t 当りの総費用（年価換算値）（万円／脱水汚泥 t-wet）の概算を求める関数を表 2-4 に示す（第 3 章の図 3-11、図 3-12[p. 64]、図 3-18、図 3-19 [p. 71]参照）。

本関数の適用範囲は脱水汚泥処理量が小型乾燥機（6,000～9,200 [t-wet/年]）、中型乾燥機（10,000～16,300 [t-wet/年]）のいずれかのうちとなる。また、維持管理費など詳細を確認したい場合は、年間水分蒸発量 (t/年) を求め科目ごとの関数から算定することができる（第 3 章 [p. 49] 参照）。

表 2-4 脱水汚泥処理量対投入脱水汚泥 1 t 当りの総費用（年価換算値）  
（万円／脱水汚泥 t-wet）

	8ヶ月間肥料化、4ヶ月間燃料化	通年燃料化
小型乾燥機	$Y=1.93E-02X^2-4.38E-01X+4.05$	$Y=1.93E-02X^2-4.38E-01X+4.36$
中型乾燥機	$Y=6.17E-03X^2-2.42E-01X+3.88$	$Y=6.17E-03X^2-2.42E-01X+4.18$
備考	肥料化：無償配布 運搬費 5,000 円／t-wet 燃料化：ごみ発電 22,000 円／t-wet 運搬費込み Y:投入脱水汚泥 1 t 当りの総費用（年価換算値）（万円／t-wet） X:年間脱水汚泥投入量（千 t-wet/年） Y<脱水汚泥処分単価（運賃含）の場合に導入メリットあり	

### 3) 設置場所

臭気対策のため屋内設置とする。

#### (2) 推奨条件

乾燥肥料化物の有価又は無償配布が可能、あるいは燃料原料として利用先が確保できる処理場、脱水汚泥処分費用単価の高い処理場、既設建屋が存在し省コストで導入可能な処理場、既設脱臭設備が使用可能な処理場が推奨条件となる。

§11 導入シナリオ例

本技術の導入シナリオは以下のとおり。

- (1) 機械脱水のみで外部委託処理している処理場に本技術を導入する場合
- (2) 既設汚泥乾燥設備の更新時に本技術を導入する場合

【解説】

本技術の導入シナリオ例と期待できる導入効果を以下に示す。

(1) 機械脱水のみで外部委託処理している処理場に本技術を導入する場合 (図 2-10 参照)

現在、下水汚泥を機械脱水のみで外部委託処理している処理場において、本技術を導入するシナリオが考えられる。地域によって、条件は様々であるが、以下の2パターンのケースの導入効果を例示する(第3章 §19 導入効果検討事例の結果に結果を記載)。

1) 乾燥汚泥を肥料として有効利用できる(受入れ先が確保可能、確保済み)場合

肥料需要期と非需要期を考慮し、需要期の8ヶ月間は無償配布(運搬費5,000円/t-wet)、非需要期の4ヶ月間に生産した乾燥汚泥は全量ごみ発電施設で燃焼(乾燥汚泥引取単価22,000円/t-wet 運搬費込み)させる場合についてFSを行なった。

2) 乾燥汚泥を燃料として有効利用できる(受入れ先が確保可能、確保済み)場合

乾燥汚泥を肥料化できないケース、すなわち燃料としての有効利用を想定し、生産した乾燥汚泥は全量ごみ発電施設で燃焼させる場合(乾燥汚泥引取単価22,000円/t-wet[運搬費込])としてFSを行なった。

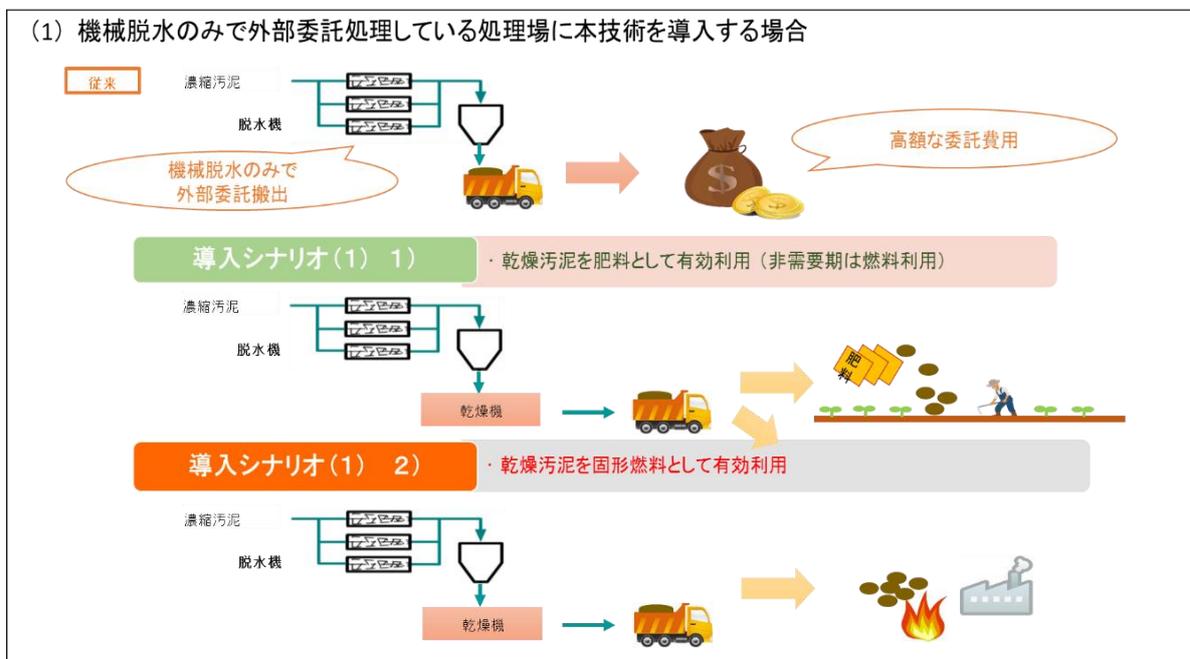


図 2-10 導入シナリオ例 (1)

(2) 既設汚泥乾燥設備の更新時に本技術を導入する場合 (図 2-11 参照)

現在、汚泥乾燥設備を有しており、汚泥乾燥設備の更新を予定している処理場において、本技術を導入するシナリオが考えられる。地域によって、条件は様々であるが、以下の2パターンのケースの導入効果を例示する。

1) 乾燥汚泥を肥料として有効利用できる (受入れ先が確保可能、確保済み) 場合

肥料需要期と非需要期を考慮し、需要期の8ヶ月間は無償配布 (運搬費 5,000 円/t-wet)、非需要期の4ヶ月間に生産した乾燥汚泥は全量ごみ発電施設で燃焼 (乾燥汚泥引取単価 22,000 円/t-wet 運搬費込み) させる場合についてFSを行なった。

2) 乾燥汚泥を燃料として有効利用できる (受入れ先が確保可能、確保済み) 場合

乾燥汚泥を肥料化できないケース、すなわち燃料としての有効利用を想定し、生産した乾燥汚泥は全量ごみ発電施設で燃焼させる場合 (乾燥汚泥引取単価 22,000 円/t-wet [運搬費込]) としてFSを行った。

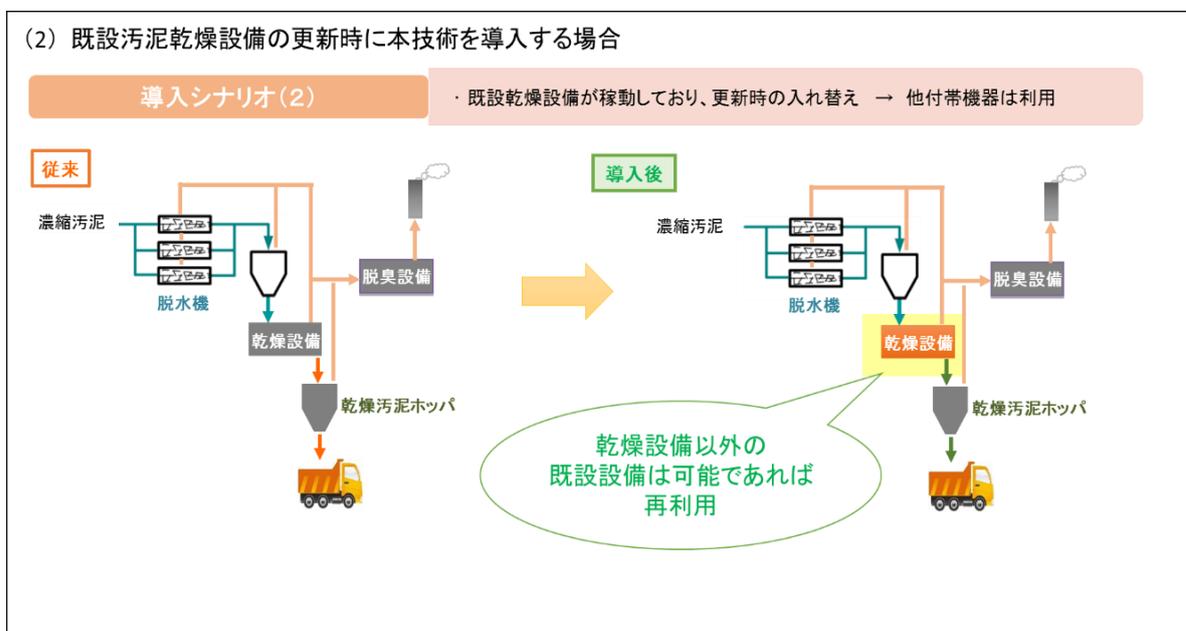


図 2-11 導入シナリオ例 (2)

## 第3節 実証研究に基づく評価の概要

## §12 技術の評価項目

実証研究に基づく本技術の評価項目を以下に示す。

- (1) 総費用（年価換算値）
- (2) 維持管理でのエネルギー使用量
- (3) 維持管理での温室効果ガス排出量
- (4) 肥料としての適性、市場性
- (5) 燃料としての適性、市場性
- (6) 既設設備への影響確認（凝縮水、臭気）

## 【解説】

本技術の評価するにあたり、総費用（年価換算値）、維持管理でのエネルギー使用量、維持管理での温室効果ガス排出量について年間を通じた実証フィールドの運転で確認調査及び試算を行った。試算施設規模は、§10 技術の適用条件の規模とした（表 2-5 参照）。実証フィールドの施設規模は表 2-5 小型乾燥機となる。また、評価項目について表 2-6 記載の全量外部委託及び従来の乾燥機と比較を行なった。

表 2-5 施設規模条件

ケース	脱水汚泥処理量		乾燥機伝熱面積	圧縮機系列数
	[t-wet/年]	[kg-wet/h]	[m <sup>2</sup> ]	[-]
1 小型乾燥機	6,000～9,200	1,150	250	1
2 中型乾燥機	10,000～16,300	2,263	450（最大面積）	2 ※ <sup>1</sup>

※1 圧縮機は小型乾燥機用圧縮機と同じスケールのもを2系列とする。

表 2-6 比較技術

比較技術	内容
本技術	§11 (2) の条件で肥料化、燃料化
全量外部委託	脱水汚泥外部委託処理
従来の乾燥機	一般費用関数による F S ※ <sup>1</sup>

※1 一般費用関数は、全国の乾燥設備を保有する処理場のうち、投入脱水汚泥量 50 t-wet/日以下程度の乾燥設備を有する処理場 12 ヶ所にアンケート調査を実施し、費用関数を作成したもの（国土交通省国土技術政策総合研究所調べ）。

前述各条件の試算を行い、総費用（年価換算値）、維持管理でのエネルギー使用量、維持管理での温室効果ガス排出量において以下に解説する。

## (1) 総費用（年価換算値）

建設費、維持管理費を試算し、下記算定式を用いて評価した。

$$\begin{aligned} \text{総費用（年価換算値）} &= \text{建設費年価} + \text{維持管理費} \\ \cdot \text{建設費年価} &= \text{建設費} \times \alpha \\ \alpha &= i + \frac{i}{(i+1)^n - 1} \quad \left\{ \begin{array}{l} i: \text{ 利率} = 0.023 \text{ (2.3\%)} \\ n: \text{ 耐用年数} = 45 \text{ 年 (土木)、20 年 (機械・電気)} \\ \alpha: \text{ 係数} = 0.03590 \text{ (土木)、0.06294 (機械・電気)} \end{array} \right. \\ \cdot \text{維持管理費} &= \text{汚泥処理費} + \text{電力費} + \text{燃料費} + \text{補修費} + \text{薬品費} + \text{人件費} \\ \text{総費用（年価換算値）縮減効果} &= \left( 1 - \frac{\text{総費用（年価換算値）}_{\text{本技術}}}{\text{総費用（年価換算値）}_{\text{従来技術}}} \right) \times 100 \end{aligned}$$

## 1) 建設費

建設費は土木建築費、機械設備費及び電気設備費からなる。

## ① 土木建築費

土木建築費は、建屋を新築するものとして、費用関数（国土交通省 日本下水道協会 発行「バイオソリッド利活用基本計画」[p. 90～91]）（資料編 1 表資 1-33[p. 201]、表資 1-37[p. 205]参照）を用いて求めた。

## ② 機械設備費

機械設備費は、脱臭設備を新設するものとして、積算して求めた（資料編 1 表資 1-34[p. 201]、表資 1-38[p. 205]参照）。

## ③ 電気設備費

電気設備費は、電源を新設するものとして、一般費用関数（資料編 1 表資 1-33[p. 201]、表資 1-37[p. 205]参照）を用いて求めた。

## 2) 維持管理費

維持管理費は脱水及び乾燥汚泥の処理費と乾燥設備及び関連設備の運転経費から成る。また、設備排気の脱臭設備については燃焼脱臭設備を導入することを前提に試算した。

## ① 汚泥処理費

## ・脱水汚泥の運搬・委託費

本技術では脱水汚泥を全量乾燥するものとして試算した。

全量外部委託の脱水汚泥搬出、委託単価については資料編 1 表資 1-36(p. 204)、表資 1-40(p. 208)、表資 1-50(p. 226)に示す。

## ・乾燥汚泥の運搬・委託・販売費

製造した乾燥汚泥を肥料又は固形燃料として運搬・委託する場合について試算を行った。各単価はヒアリングなどの調査結果から設定した（資料編 1 表資 1-18[p. 162]、表資 1-24[p. 177]、表資 1-50[p. 226]参照）。

## ② 運転経費

運転経費は電力費、燃料費、補修費、薬品費及び人件費からなる。

本技術のユーティリティ費（電力、燃料、薬品）と人件費については実証研究から得られた数値データを用いて算定した（資料編1 表資1-29[p.192~199]参照）。

補修費は実証機の補修計画（資料編1 表資1-8[p.141]参照）に基づいて試算した結果、機械建設費の約3.3%相当であった。

本技術との比較対象の試算は一般費用関数<sup>※1</sup>を用いて計算した（資料編1 表資1-33[p.201]、1-37[p.204]参照）。

各ユーティリティ単価については資料編1 表資1-28(p.191)に示す。

※1 一般費用関数は、全国の乾燥設備を保有する処理場のうち、投入脱水汚泥量50t-wet/日以下程度の乾燥設備を有する処理場12ヶ所にアンケート調査を実施し、費用関数を作成したもの（国土交通省国土技術政策総合研究所調べ）。

## 3) 解体・廃棄費（解体撤去費+廃棄費）

設備の耐用年数使用後の解体・撤去に関わる費用として、解体・廃棄費については、下記条件より建設費（機械設備・電気設備）の10%として算定した。

解体撤去費については「下水道用設計標準歩掛表平成24年-第2巻 ポンプ場・処理場-（公益社団法人日本下水道協会）p.102」を参照して建設費の6%とし、さらに廃棄費（建設費の4%）を足して建設費の10%とした。なお、解体・廃棄費については、総費用（年価換算値）に含むものではないため、参考値である。

### （2）維持管理でのエネルギー使用量

実証に基づく評価の維持管理でのエネルギー使用量の算定は、ユーティリティ（電力、燃料）の使用に係るものを対象とした。換算係数は資料編1 表資1-32(p.200)を参照。

### （3）維持管理での温室効果ガス排出量

維持管理での温室効果ガスの排出にあたっては、下記CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>Oについて算定した。

#### 1) 二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)

本技術及び従来の乾燥機に用いるユーティリティ（電力、補助燃料）を対象とした。排出係数は資料編1 表資1-30(p.200)を参照。

#### 2) 亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O)

乾燥排気（燃焼脱臭設備）から排出されるN<sub>2</sub>Oについては、国土交通省；下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン-改訂版-(平成27年3月)p.82 汚泥乾燥(乾燥[混合焼却])の排出係数を用いて算定しCO<sub>2</sub>排出量に換算した（資料編1 表資1-31[p.200]）。

#### (4) 肥料としての適性、市場性

##### 1) 肥料としての適性

肥料としての適性確認のため、年間を通じた乾燥汚泥性状四季変動調査として四季の乾燥汚泥を試料採取し、表 2-7 の項目で分析・測定を行った。また、植害試験、肥料効果試験、肥料登録を行った。下水汚泥の肥料登録には、表 2-7 の①～④の分析項目が必須となっており、登録の手順等については資料編 1 図資 1-26、図資 1-27、表資 1-16、表資 1-17(p. 157～160)に示す。

さらに、肥料利用者は、運搬時や施肥時等で周囲環境へ配慮する必要があることから、乾燥汚泥の臭気について分析し、使用者等へヒアリングを行った(資料編 1 表資 1-18～表資 1-20[p. 162～163]参照)。

表 2-7 肥料としての適性評価項目

測定項目	測定内容・評価方法等
① 肥料有効成分	肥料有効/主要成分 (N/窒素、P/リン酸、K/カリウム等) の分析。 下水汚泥肥料については植物に有効な成分 (N, P, K) について最低限必要な含有量等は設けられていないが、登録の際には保証成分量を設定、保証票に記載する必要がある <sup>※1</sup> 。 成分表記は有姿状態が一般的であり含水率も一緒に列記する。
② 肥料有害成分	含有を規制されている有害成分 (カドミウム、クロム、水銀、鉛、ニッケル、ヒ素) を分析し、許容値以下 <sup>※2</sup> であることを確認。
③ 重金属溶出試験	産業廃棄物に係る判定基準で定められた 23 項目 <sup>※3</sup> の重金属について溶出量が許容値以下であることを確認。
④ 植害試験	植物試験の調査を受け植物に対する害がないことを確認。
⑤ 肥料効果試験	国内で流通している肥料と比べて、どの程度植物に対して効果があるのか調べることで、その肥料の有効性を調査。

※1 農林水産省；告示第 337 号、下水汚泥の主要な成分の指定 (平成 13 年 4 月)

※2 農林水産省；告示第 1146 号、十二汚泥肥料等 (平成 26 年 9 月)

※3 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令 (昭和 48 年総理府令第 5 号, 別表第一)

##### 2) 肥料としての市場性

汚泥乾燥設備が既存で稼動している 7 自治体に対し、アンケート・ヒアリングを実施した。販売価格や、無償配布しているところでは、その無償配布可能条件 (汚泥性状や臭気等)、宣伝方法、配布先用途、ストック方法等を調査した。また、肥料としての価値についても実証フィールドの乾燥汚泥性状と比較してヒアリングした (資料編 1 表資 1-18, 表資 1-19[p. 162]参照)。

他、発酵肥料の水分調整材など、中間処理業者等に価格・要件・運搬方法等ヒアリング調査を行った (資料編 1 表資 1-20[p. 163]参照)。

(5) 燃料としての適性、市場性

1) 燃料としての適性

燃料としての適性確認のため、年間を通じた乾燥汚泥性状四季変動確認として四季の乾燥汚泥を試料採取し、表 2-8 の項目の分析・測定を行った。品質目標値は下水汚泥固形燃料の JIS 規格 (JIS Z 7312) を考慮のうえ設定した。

表 2-8 燃料としての適性評価項目

測定項目	評価方法等
含水率	品質目標値；本設備で 20%W. B. 以下に調整できることの確認
発熱量	品質目標値；8MJ/kg 以上であることの確認
工業分析	灰分量、揮発分、固定炭素の把握による燃焼性の評価
元素分析	C、H、N、O、S、Cl、P 測定による燃焼特性の把握・評価
重金属含有量	Cd、Cr、CN、Hg 等 <sup>※1</sup> の測定による有害物質量の把握・対策
重金属溶出量	CCl <sub>4</sub> 、Cd、C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> S <sub>4</sub> 等 <sup>※2</sup> の測定による有害物質量の把握・対策
灰分組成	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、融点、軟化点等の測定による燃焼特性及び、固形燃料利用者灰処分時の留意事項の調査

※1 土壤汚染対策法における第二種特定有害物質：指定基準（土壤含有量基準）を超える場合は直接埋立て処分ができず、不溶化処理が義務付けられる。

※2 土壤汚染対策法に定める第一～三種特定有害物質：指定基準（土壤溶出量基準）を超える場合は直接埋立て処分ができず、不溶化処理が義務付けられる。

2) 燃料としてのハンドリング性

燃料としてのハンドリング性の評価に関する測定項目を表 2-9 に示す。

表 2-9 燃料としてのハンドリング性

分析項目	評価方法等	分析方法
比重	基礎物性として把握	※1
粒度分布	ハンドリング性を確認	※2
粉碎性	HGI (粉碎性指数) の把握	※3

※1 JIS R 9301-2-3 4. 準拠

※2 JIS K 1474 準拠

※3 JIS K 8801 準拠

## 3) 燃料としての安全性

燃料としての安全性に関する評価方法を表 2-10 に示す。

なお、実証時の各々分析結果は後述の表 2-17[p. 38]に示す。

表 2-10 燃料としての安全性確認に関する評価項目

分析	確認内容	評価及び対策	分析方法
自然発火性試験(SIT) 50、80、100、120℃	自然発火の有無	安全対策検討根拠	自然発火装置を用いた試験 ※1
自然発火性試験 (ワイヤーバスケット試験)	運搬時における 自然発火の有無	同上	※2
可燃性ガス発生試験 26±1℃, 11 日間静置	水素、メタン、一酸化 炭素の発生確認	可燃限界以下である ことの確認	※3
発酵可燃性ガス発生試験 50±1℃, 11 日間静置	発酵条件下での水素、 メタン、一酸化炭素の 発生確認	同上	※3
示差熱分析 TG-DTA	熱酸化分解開始温度	安全対策検討参考値	※4
粉じん爆発試験	着火、爆発の有無、 見掛けの爆発下限濃度 爆発下限界濃度評価	見掛け下限濃度が十 分高く、爆発性は低 いことの確認	※5
CO 連続測定モニタリング	乾燥汚泥貯留槽におけ る燃焼有無確認	CO 爆発限界以下 安全対策検討根拠	現場測定装置 定電位電解法
温度測定モニタリング	乾燥汚泥貯留槽におけ る内部温度確認	自然発火温度以下 安全対策検討根拠	熱電対※6

※1 SIT-2(Spontaneous Ignition Tester-2)試験法。

※2 IMDG コード(International Maritime Dangerous Goods Code) : 2.4.3.2 Classification of class 4.2 substance. に規定する試験方法。

※3 「下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル」日本下水道事業団(H20.3)5.2.2 準拠

※4 JIS K 0129 に準拠。

※5 JIS Z 8818 に準拠。

※6 資料編 1 図資 1-29～図資 1-35(p. 166～176)に測定方法、検証内容についてを示す。

## 4) 燃料としての市場性

全国ランダム選抜にてバイオマス発電、サーマル利用設備が稼働している中間処理業者等に対し、インターネットアンケート調査を実施し、15社から回答を得た。アンケート内容・結果を資料編 1 図資 1-36(p. 179～189)に示す。また、販売価格や、汚泥引取条件(汚泥性状や臭気等)、引取可能量、用途、運搬方法等を調査し、燃料としての価値についても実証フィールドの乾燥汚泥性状と比較してヒアリングを行った。

燃料としての価値、性状を石炭と比較し評価した。

## (6) 既設設備への影響確認（凝縮水、臭気）

実証試験では、実証設備を導入した場合に発生する凝縮水の影響、乾燥排気や乾燥汚泥の臭気を評価するため、表 2-11 の項目の分析を行った。

表 2-11 既設設備への影響評価に関する分析項目

対象	評価分析項目
乾燥排気 (脱臭前、脱臭後)	臭気指数
	悪臭 22 物質
	ばいじん
乾燥汚泥	臭気指数
凝縮水	臭気指数
	悪臭 4 物質
	水質 (BOD 等)

§ 13 技術の評価結果

実証研究に基づく本技術の評価結果を以下に示す。

- (1) 総費用（年価換算値）
- (2) 維持管理でのエネルギー使用量
- (3) 維持管理での温室効果ガス排出量
- (4) 肥料としての適性、市場性
- (5) 燃料としての適性、市場性
- (6) 既設設備への影響確認（凝縮水、臭気）
- (7) 総費用（年価換算値）への影響

【解説】

本項で示す結果は、上記（1）～（7）の小型乾燥機規模（実証規模）における結果とし、同規模、2倍規模、比較技術との試算結果比較を以下に示す。

（1）総費用（年価換算値）

脱水汚泥処理量 1,150 kg-wet/h (27.6t-wet/日、含水率 78%W. B.) の処理場において導入する際における、従来の乾燥機（一般費用関数、資料編 1 表資 1-33[p. 201]参照）と本技術の費用試算及び従来の全量外部委託処理費と比較を行なった。試算により、本技術は全量外部委託と比較し 24%、従来の乾燥機とでは、40%縮減する結果を得た（図 2-12 参照）。試算結果の詳細は第 3 章の表 3-3 (p. 48) 及び表 3-4 (p. 49) に示す。

また、乾燥汚泥を全て燃料化するものとして試算を行った結果、肥料化と比較して汚泥処理費が高額にもかかわらず、本技術により総費用（年価換算値）が縮減されることが分かった（図 2-13 参照）。

ケース 1 本技術／肥料化・燃料化  
 乾燥汚泥 処理費 10,667 円/t-wet（運搬費含）  
 （内訳）8ヶ月間：肥料化 無償<sup>※1</sup>+運搬費 5,000 円/t-wet  
 4ヶ月間：燃料化（需要減時期）22,000<sup>※2</sup> 円/t-wet（運搬費含）  
 ※1 肥料化調査結果、G市 p.162 参照  
 ※2 燃料化調査結果、A市 p.177 参照

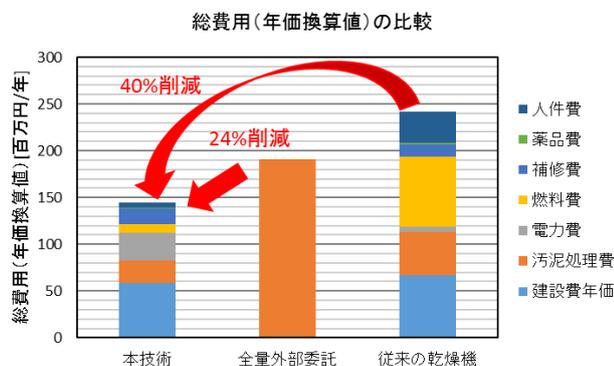


図 2-12 総費用（年価換算値）縮減効果（小型乾燥機 肥料化・燃料化）

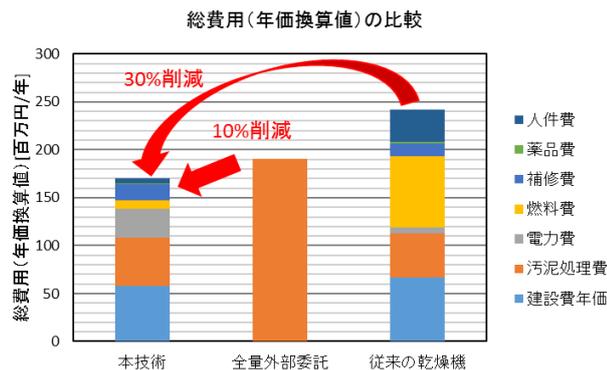


図 2-13 総費用(年価換算値) 縮減効果 (小型乾燥機 燃料化)

なお、従来の乾燥機について、汚泥処理費を本技術と同額として想定したケースについても試算を行っており、各々の試算結果については資料編 3(p. 244)を参照。

### (2) 維持管理でのエネルギー使用量

脱水汚泥処理量 1,150 kg-wet/h (27.6t-wet/日、含水率 78%W. B.) の処理場において導入する際における、従来の汚泥処理技術(全国の乾燥設備を保有する施設・処理場において、実施したアンケートを元に算定した一般費用係数; 国土交通省 国土技術政策総合研究所調べ 資料編 1 表資 1-42[p. 214]、図資 1-43[p. 214]参照)と本技術の維持管理でのエネルギー使用量の試算比較を行った(表 2-12 参照)。

維持管理でのエネルギー使用量は一次換算係数を用いた電力使用量、燃料使用量からの一次換算投入熱量である。本技術は、従来乾燥汚泥処理技術に比べ、約 46%の維持管理でのエネルギー使用量削減効果があることが確認された。算定方法を第 3 章(p. 52)に示す。

表 2-12 維持管理でのエネルギー使用量の削減効果

項目	本技術	従来	削減率
維持管理でのエネルギー使用量 [GJ/年]	24,280	44,992	約 46 %

### (3) 維持管理での温室効果ガス排出量

脱水汚泥処理量 1,150 kg-wet/h (27.6t-wet/日、含水率 78%W. B.) の処理場において導入する際における、従来の汚泥処理技術(全国の乾燥設備を保有する施設・処理場において、実施したアンケートを元に算定した一般費用係数; 国土交通省 国土技術政策総合研究所調べ)の維持管理での温室効果ガス排出量と本技術の維持管理での温室効果ガス排出量の試算を行った(表 2-13 参照)。

維持管理での温室効果ガス排出量は二酸化炭素換算係数を用いた電力使用量、燃料使用量からの換算である。本技術は、約 51%の維持管理での温室効果ガス削減効果があることが確認された。算定方法を第 3 章(p. 53)に示す。

表 2-13 維持管理での温室効果ガス排出量の削減効果

項目	本技術	従来	削減率
維持管理での温室効果ガス排出量 [t-CO <sub>2</sub> /年]	1,520	3,130	約 51 %

#### (4) 肥料としての適性、市場性

##### 1) 肥料としての適性

肥料化に関する実証フィールドの乾燥汚泥における適性分析の結果を表 2-14 に示し、詳細結果は資料編に示す。また、資料編 1 図資 1-26[p. 157]に示す手順で肥料登録申請を行い、下水汚泥肥料として肥料登録を完了した。

表 2-14 肥料適性分析の結果

測定項目	測定結果
① 肥料有効成分	肥料有効/主要成分 (N/窒素、P/リン酸、K/カリウム等) を含む。
② 肥料有害成分	含有を規制されている有害成分 (カドミウム、クロム、水銀、鉛、ニッケル、ヒ素) は許容値以下。
③ 重金属溶出試験	産業廃棄物に係る判定基準で定められた 23 項目の重金属について溶出量が許容値以下。
④ 植害試験	植物試験の調査を受け植物に対する害がないという結果。
⑤ 肥料効果試験	いずれの施肥試験植物においても乾燥汚泥が肥料として有効。

※ 詳細結果：①②資料編 1 表資 1-15(p. 156)、③資料編 1 表資 1-49(p. 226)、④資料編 1 図資 1-25(p. 157)、⑤資料編 1 図資 1-28(p. 161)

##### 2) 肥料としての市場性

###### ① 委託コスト

既設汚泥乾燥設備を有数する自治体におけるヒアリングでは、7自治体のうち、4自治体で無償、又は有償にて乾燥汚泥を委託処理しており、その共通点として広大な農地が近隣にある処理場で無償処理が期待できることが分かった。

なお、得られた複数の結果をまとめると概ね以下のとおりである。

- ・乾燥汚泥肥料としての評価は概ね良好で、乾燥肥料化を継続している。
- ・乾燥汚泥を無償または有償にて配布し、運搬費や分析費を自治体が負担している。
- ・需要期と非需要期がある自治体では、需要期が 8 ヶ月間程度で非需要期は乾燥汚泥をヤードなどにストックしている (北海道 B 市 : 700t-wet/年、愛知県 G 市 : 7,000 t-wet/年)。

調査結果から需要期 8 ヶ月間の無償期間が見込まれた。

一方で中間処理業者、肥料生産業者の乾燥汚泥委託処理費は運搬費含み 24,000 円/t-wet (B 社 : 片道 90 km) の調査結果であった (資料編 1 表資 1-18[p. 162]、表資 1-20[p. 163]参照)。

② ニーズ

肥料化無償配布以外のニーズとして、肥料生産業者における発酵肥料の水分調整材として用途が挙げられる。オガ粉等の有価水分調整材の代替として使用するもので、肥料生産業者のコスト削減効果があり発酵肥料の水分調整材としてのニーズもある。

(5) 燃料としての適性、市場性

1) 燃料としての適性

① 含水率

含水率の実証値は15%W.B.～30%W.B.であったが、自動含水率調整運転で20%W.B.以下に調整可能であることを実証した(図2-14参照)。

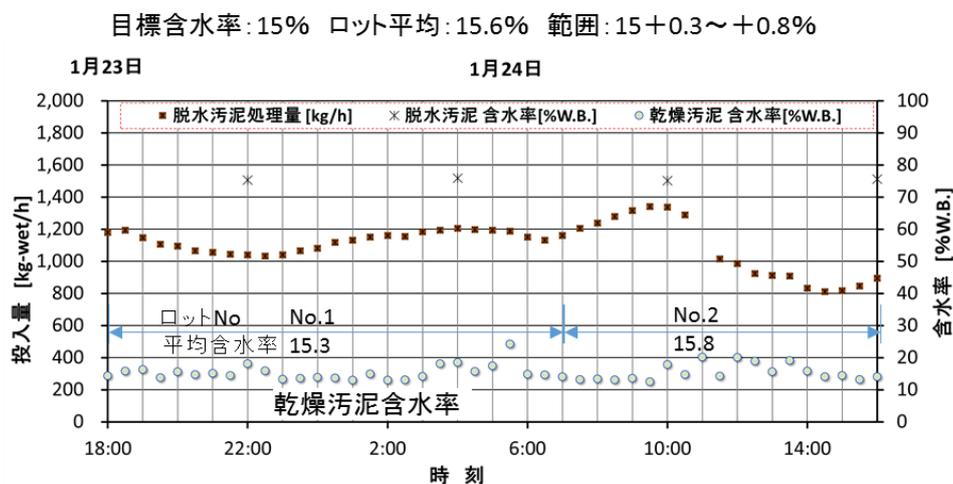


図 2-14 自動含水率調整運転結果

② 発熱量

実証フィールドの乾燥污泥総発熱量は湿量基準で15.3～19.2 MJ/kgであった。

国土交通省の原案を基に制定された下水污泥固形燃料 JIS 規格では、発熱量によって2種類あり、総発熱量15MJ/kg以上はBSF-15、8MJ/kg以上はBSFと規定されている。本実証フィールドの乾燥污泥はより高品質な規格、BSF-15相当であった(表2-15参照)。

③ 工業分析、元素分析

実証フィールドの乾燥污泥灰分は概ね10%程度、揮発分は75%程度、固定炭素は14%程度であった。その他の元素分析結果も安定していた(表2-15参照)。

④ 重金属含有・溶出量

実証フィールドの乾燥污泥の重金属含有量・溶出量は土壌汚染防止法に定める記載値を下回っていた(表2-16参照)。

⑤ 灰分の分析結果

実証フィールドの乾燥污泥から得た灰試料の熔融点は石炭と同程度であった(表2-16参照)。

表 2-15 乾燥汚泥の工業分析結果

試験項目／サンプル採取日		H28.2.7	H29.6.29	H29.9.14	H29.11.21	JIS Z 7312	石炭(参考)	備考
発熱量	総発熱量 [MJ/kg-wet]	19.2	17.4	17.7	15.3	15以上	26～29	石炭:瀝青炭
	真発熱量 [MJ/kg-dry]	20.6	20.0	20.0	20.8			
基本物性	含水率 [%W.B.]	12.7	19.2	10.7	26.4 ※1	20以下	2.0～5.1	
	灰分 [wt%]	9.9	7.5	7.6	6.7	分析値報告	7.0～18.5	
	揮発分 [wt%]	76.9	77.7	76.3	79.8		23.9～41.6	
	固定炭素 [wt%]	13.6	14.8	14.1	13.5		38.1～59.8	
	油分 [wt%]	12	8.2	8.0	5.8		—	
元素分析	C [wt%]	47.6	47.2	48.3	46.1		66.3～84.9	
	H [wt%]	6.41	6.76	6.35	6.48		3.7～5.2	
	N [wt%]	5.99	6.62	5.31	4.73	分析値報告	0.6～1.8	
	O [wt%]	29.6	31.4	32.0	35.8		0.6～9.8	
	S [wt%]	0.57	0.50	0.43	0.08	分析値報告	0.2～1.0	
	塩素 [wt%]	0.06	0.05	0.04	0.04		0.1～1.0	
	P [wt%]	1.22	1.08	1.01	0.84		0.03～4.0	
磨耗性	評価	—	低い	—	—		やや高い	
臭気	臭気指数	36	36	40	29			

※1 引取先要請から、乾燥汚泥含水率を調整した。

表 2-16 乾燥汚泥の重金属含有・溶出試験及び灰の分析結果

試験項目／サンプル採取日		H28.2.7	H29.6.29	H29.9.14	H29.11.21	石炭(参考)
重金属	カドミウム [mg/kg-ds]	0.6	0.2	0.4	0.3	0.2
	ヒ素 [mg/kg-ds]	2.4	1.9	2.1	1.5	1～55
	鉛 [mg/kg-ds]	12	6.2	6.4	3.4	1.5～60
	六価クロム [mg/kg-ds]	<0.5	<0.5	<1.0	<0.5	1.5以下～30
	総水銀 [mg/kg-ds]	0.33	0.19	0.12	0.15	0.026～0.4
	セレン [mg/kg-ds]	<0.5	0.8	0.7	<0.5	0.21～2.5
	フッ素化合物 [mg/kg-ds]	68	140	46	120	50～500
	ホウ素 [mg/kg-ds]	13	12	12	<10	1.5～300
	重金属溶出試験		許容値以下※1	許容値以下※1	許容値以下※1	許容値以下※1
灰分	酸化ケイ素 [wt%-dry]	20	29	21	22	50.2～74
	酸化アルミニウム [wt%-dry]	19	15	15	11	16.4～38.3
	酸化カルシウム [wt%-dry]	12	9.1	12	15	0.1～6.2
	酸化マグネシウム [wt%-dry]	<0.1	—	—	6.5	0.2～2.2
	リン酸 [wt%-dry]	32	34	29	35	0.1～1.4
	酸化ナトリウム [wt%-dry]	4.0	1.3	4.4	1.8	0.1～1
	酸化カリウム [wt%-dry]	1.5	1.5	2.0	1.7	0.4～3.1
	灰融点(酸化／還元) [°C]	1,060/1,050	1,350/1,350	1,100/1,075	1,170/1,195	1,290～1,570

※1 環境庁: 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令(平成28年6月20日環境庁令第十六号)、乾燥汚泥は特別管理産業廃棄物には非該当

## 2) 燃料としてのハンドリング性

### ① 比重

本実証試験において、比重は約 480～540kg/m<sup>3</sup>であることを確認した（平成 29 年度 11 月迄の分析値、資料編 1 表資 1-23[p. 165]参照）。なお、乾燥汚泥の含水率、流入する汚水の排水源、汚泥性状、脱水方式及び薬剤の種類・量によって多少異なる場合がある。上記は乾燥汚泥の含水率約 20%W. B. 時の比重である。

### ② 粒度分布

本実証試験において、乾燥汚泥平均粒度は約 2mm であることが確認された（平成 29 年度 11 月迄の分析値、資料編 1 表資 1-23[p. 165]参照）。

### ③ 破碎性

本実証試験において、乾燥汚泥はやわらかく、破碎試験の実施ができなかった。

## 3) 燃料としての安全性

## ① 分析結果

安全性評価に関する分析結果並びに評価及び対策について表 2-17 に示す。

表 2-17 安全性評価に関する分析結果

分析	確認内容	評価及び対策
自然発火性試験 (SIT) ※ <sup>1</sup> 50、80、100、120℃	自然発火の有無	結果：80℃以上で発熱 対策：乾燥汚泥の冷却、CO 値連続モニタリング、温度上昇時水噴霧
自然発火性試験※ <sup>1</sup> (ワイヤーバスケット試験)	運搬時における自然発火の有無	自己発熱性 非該当
可燃性ガス発生試験※ <sup>3</sup> 26±1℃, 11 日間静置	水素、メタン、一酸化炭素の発生確認	可燃限界以下
発酵可燃性ガス発生試験※ <sup>3</sup> 50±1℃, 11 日間静置	発酵条件下での水素、メタン、一酸化炭素の発生確認	可燃限界以下
示差熱分析 TG-DTA※ <sup>4</sup>	熱酸化分解開始温度	熱酸化分解開始温度 140℃ 安全をみて 70℃以下で管理
粉じん爆発試験※ <sup>5</sup>	着火、爆発の有無 見掛けの爆発下限濃度 爆発下限濃度評価	爆発性危険：なし 爆発下限濃度：150～160g/m <sup>3</sup> 爆発下限濃度評価：危険性低い
CO 連続測定モニタリング※ <sup>6</sup>	乾燥汚泥貯留槽における燃焼有無確認	CO 爆発限界以下 上昇時水噴霧の制御
温度測定モニタリング※ <sup>6</sup>	乾燥汚泥貯留槽における内部温度確認	自然発火温度以下 上昇時水噴霧の制御

※1 SIT-2 (Spontaneous Ignition Tester-2) 試験法。資料編 1 表資 1-23 [p. 165] に分析結果を示す。

※2 IMDG コード (International Maritime Dangerous Goods Code) : 2.4.3.2 Classification of class 4.2 substance. に規定する試験方法。資料編 1 表資 1-23 [p. 165] に分析結果を示す。

※3 「下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル」日本下水道事業団 (H20. 3) 5. 2. 2 準拠。資料編 1 表資 1-23 [p. 165] に分析結果を示す。

※4 JIS K 0129 に準拠。資料編 1 図資 1-29 [p. 166] に分析結果を示す。

※5 JIS Z 8818 に準拠。資料編 1 表資 1-23 [p. 165] に分析結果を示す。

※6 資料編 1 図資 1-29～図資 1-35 (p. 166～176) に測定方法、検証内容についてを示す。

## ② 乾燥汚泥貯留槽における安全対策の妥当性

実証試験では、乾燥汚泥貯留槽において、CO 濃度・温度を監視し、上昇時には水を噴霧する制御としており、発火等の問題は起きていない。しかしながら、乾燥汚泥ホップ貯留時における夏場の気温上昇時、貯留物が自己発熱している可能性がデータから示唆された。実機における安全対策としては、乾燥汚泥貯留槽を小型化することがあげられ、本研究では放熱を増やし昇温開始温度を高くする検討計算を行った (資料編 1 図資 1-29～図資 1-34 [p. 166～169] 参照)。

## ③ 安全対策

下水汚泥は有機物を多く含み、その乾燥汚泥は温度が高い場合や過乾燥の状態であれば発熱する可能性があることから、安全対策は計画設計の段階から検討することを推奨する。対策としては以下の方法が挙げられる。詳細は第4章、第5章に示す。

- a) 乾燥汚泥の過乾燥(10 %W. B. 以下)防止
- b) 乾燥汚泥ホッパ内での乾燥汚泥の発火防止
- c) 長期貯留時での発火対策

## 4) 燃料としての市場性

インターネットアンケート調査（バイオマス発電、サーマル利用設備が稼働している中間処理業者等）では15社から回答があり、そのうち3社が乾燥汚泥を受入れ可能との回答であった。

このうち乾燥汚泥引取単価が最安価なものは運賃を含み22,000円/t-wetであった（資料編1表資1-24[p.177]参照）。不可と回答した事業者と受入れ可能と回答のあったアンケート結果を比較し、受入れ可能と回答した事業者は、設備改造が不要で、臭気対策も不要であることが大きな理由であることが分かった。なお、新規に近隣で燃料利用の設備計画がある場合は、より有価な処理が期待でき、有価の引取りの例も確認された。

燃料利用先のボイラにおいて乾燥汚泥を石炭と混焼した場合、乾燥汚泥の灰が石炭灰の軟化温度以下でもボイラ伝熱面に付着するファウリング性や、高温領域でボイラ伝熱面に溶融し、付着するスラッキング性の懸念があることから、灰などの組成分析（資料編1表資1-21[p.164]）なおよび評価が必要となる。

## (6) 既設設備への影響確認（凝縮水、臭気）

既設設備への影響については以下の分析を行った。

## 1) 凝縮水

水処理設備への影響を確認する目的で凝縮水BOD値分析を行なった結果、負荷影響はごく小さく問題ないことが分かった（表2-18及び資料編1図資1-47[p.219]参照）。

表2-18 凝縮水BOD値分析結果

試料採取日		H29.2.7	H29.8.30	H29.11.21
凝縮水BOD分析結果	[mg/L]	1,600	4,700	2,300
凝縮水量測定値	[kg/h]	851	781	739
凝縮水BOD負荷量	[kg/日]	33	88	41
処理場への凝縮水BOD負荷	[%]	0.4	1.1	0.5
処理場流入水量	[m <sup>3</sup> /日]	40,000		
処理場流入水BOD	[mg/L]	200		
処理場流入水BOD負荷量	[kg/日]	8,000		

2) 臭気

① 乾燥排気脱臭前の悪臭 22 物質及び臭気指数の分析

乾燥排気の臭気指数分析結果を表 2-19 に示す。脱臭前の悪臭 22 物質測定結果は資料編 1 表資 1-48 (p. 225) に示す。

表 2-19 脱臭前の乾燥排気臭気指数

測定日	H29. 2. 7	H29. 8. 30	H29. 11. 21
臭気指数	52	72	64

② 乾燥排気の脱臭後の敷地境界での臭気分析

敷地境界線上及び周辺 12 箇所での敷地境界臭気定点測定結果と、排出口臭気指数測定結果を表 2-20 及び表 2-21 に示す。

a) 敷地境界線上及び周辺 12 箇所での定点測定結果 (1 号基準 1 種地域：規制基準 10)

乾燥設備稼働開始後の平成 29 年 8 月に乾燥汚泥の粉塵が活性炭脱臭装置に付着して閉塞を起こし、敷地境界の 2 箇所では規制基準の臭気指数を超過した。

乾燥汚泥ホッパや搬出場所の臭気吸込み口に粉塵フィルタを設置対策後は、すべての測定箇所では規制基準の臭気指数を下回った。

表 2-20 敷地境界線上及び周辺 12 箇所での臭気測定結果

測定年月	規制基準超過箇所	備考
H28 年 12 月	なし	実証設備稼働前
H29 年 2 月	なし	実証設備稼働開始
H29 年 5 月	なし	
H29 年 6 月	なし	
H29 年 8 月	2	活性炭が乾燥汚泥粉塵で閉塞
H29 年 10 月	なし	粉塵フィルタ設置、活性炭定期交換後
H29 年 12 月	なし	

b) 排出口臭気指数測定結果

粉塵フィルタによる対策成果を確認するために排出口の臭気指数測定を実施し、排気口の臭気指数が環境省 2 号規制基準算定ソフト (においシミュレーター) による規制基準計算値以内であることを確認した。

表 2-21 排出口臭気指数測定結果

測定年月	排出口臭気指数測定値	規制基準計算値	判定
H30 年 2 月	22	25	良

(7) 総費用（年価換算値）への影響

1) 排水処理設備（凝縮水処理）

本技術の導入で既存の排水処理設備に影響を及ぼすものに乾燥設備からの凝縮水があげられる。実証期間を通じて処理設備への影響を確認したが、排水量が少ないこともあり水処理への負荷増加は特になく、排水処理のコストは増加しなかった（表 2-22 参照）。以上のことから既設排水処理設備の改造は不要と判断し、総費用（年価換算値）には計上していない（資料編 1 図資 1-47[p. 219]参照）。

2) 脱臭設備（排気および臭気処理）

実証フィールドでは乾燥設備からの排気や汚泥を貯留するホップ内臭気を既設薬液活性炭脱臭設備で処理した。各ホップには集塵フィルタを設け、脱臭設備に飛散する粉塵量を抑制したが、活性炭前段階の薬液（次亜塩素酸ソーダ）使用量を増やす対応が必要なのがわかり、その分の薬品代が増加した（表 2-22 参照）。

一方で乾燥により脱水汚泥の貯留が減ることから、搬出時に硫化水素発生抑制の目的で使用する消臭剤が減ったため、薬品代としては差し引き年間 744 万円の減額となった。

なお、本ガイドラインにおいて小型乾燥機、中型乾燥機の総費用（年価換算値）等を検討しているが、試算においては実証した乾燥設備の排気量を基に燃焼脱臭設備を導入するものとして維持管理費を求めている（資料編 1 表資 1-35～表資 1-36[p. 203～204]、表資 1-39～表資 1-40[p. 206～208]、図資 1-53[p. 230]、図資 1-56[p. 233]参照）。

表 2-22 実証フィールドにおける汚泥処理費用（実証結果）

項目		単位	従来／全量外部		結果／乾燥 <sup>※1</sup>		備考
脱水汚泥	含水率／処理量	[%W.B.] [kg-wet/h]	72	1,300	72	1,300	
	年間発生量	[t-wet/年]	9,360		9,360		
	年間委託処分費	[万円/年]	21,060		0		フィールドの単価:22,500円/t-wet
乾燥汚泥	含水率／生産量	[%W.B.] [kg-wet/h]	—	—	20	455	
	年間発生量	[t-wet/年]	0		3,276		
	年間委託処分費	[万円/年]	0		7,862		フィールドの単価:24,000円/t-wet
維持管理費	電力	[万円/年]	/		3,699		加熱温度157℃
	燃料	[万円/年]			680		起動時の使用燃料含む(週1回)
	補修費	[万円/年]			1,560		建設費の3.3%(計画2%)
	薬品費	既設薬品増額 [万円/年]			△ 744		脱臭設備 薬液増量(104万円/年) 硫化水素抑制消臭剤減量(△848万円/年)
	小計	[万円/年]					5,195
ランニングコスト合計		[万円/年]	21,060		13,058		
ランニングコスト縮減額		[万円/年]			△ 8,002		
縮減率		[%]			38		

※1 計画仕様(脱水汚泥投入量1,300kg/h、水分72%W.B.)へ換算し、維持管理費を算出。乾燥機は、加熱面積200m<sup>2</sup>から250m<sup>2</sup>へサイズアップし、脱水汚泥9,360t/年を全量乾燥処理として計算。