高粘度汚泥に対応する汚泥乾燥機の開発と実機運転

Development and Actual Operation of New Type Sludge Dryer for High Viscosity Sludge

林 星辰[*1] Xingchen Lin
遠藤 弘毅[*2] Kouki Endou
江草 知通[*3] Tomomichi Egusa
貝田 裕彦[*4] Hirohiko Kaida
松寺 直樹[*5] Naoki Matsudera
胡 静波[*1] Jingbo Hu

三菱重工環境・化学エンジニアリング(株)(以下,当社)は，都市ごみ・下水汚泥などの廃棄物処理施設の開発，設計・製作，据付及びアフターサービス・運転管理を行っている。

近年，国内外の下水処理場において，汚泥排出量の増大と最終埋立処分地の逼迫による汚泥減容化が求められている。このため，汚泥乾燥機のニーズ拡大が期待されており，特に中国や東南アジア等の諸外国では社会経済活動の高度化により，汚泥性状が多様化しているため，乾燥が難しい高粘度汚泥にも適切かつ安定的に乾燥できる汚泥乾燥機が必要となっている。

本報では，汚泥の高粘度化など多様化する汚泥性状に適した汚泥乾燥機について，当社が独自に開発した汚泥乾燥機の概要と運転状況について述べる。

1. はじめに

近年，国内外では社会経済の高度化による汚泥排出量の増大と最終埋立処分地の逼迫による汚泥減容化が求められている。特に中国では，下水道インフラ整備の普及に伴い汚泥発生量が急増しており，汚泥埋立処分場の逼迫が社会問題化している。中国では，埋立処分できる汚泥含水率の規制が強化されており，下水汚泥処理が重要施策として盛り込まれている。また，汚泥減容化のみならず，汚泥再資源化を目的とした汚泥乾燥機のニーズ拡大が期待されている。中国の他，東南アジア等諸外国では社会経済活動の高度化により汚泥性状が多様化しているため，乾燥が難しい高粘度汚泥も適切かつ安定的に乾燥できる汚泥乾燥機の開発が必須な状況であった。

本報では，汚泥の高粘度化など多様化する汚泥性状に適した汚泥乾燥機について，当社独自に開発した汚泥乾燥機の概要と運転状況について述べる。

2. 開発経緯

汚泥の高粘度化など多様化する汚泥性状に適する汚泥乾燥機の開発経緯を図1に示す。

まず，小型乾燥試験(小型試験機：伝熱面積 0.9m^2)とシミュレーション解析(個別要素法(DEM)を用いた粉粒体解析)により，汚泥乾燥機の基本構造(ディスク形状・角度，ディスク間隔，回転方向など)を決定した。次に，高粘度汚泥を対象とした中国現地での実証機(MSD-20：公称伝熱面積 20m^2)による実証試験・検証結果による基本構造の改良とスケールアップ相似則

*1 三菱重工環境・化学エンジニアリング(株) プラント事業部 プラント設計部
*2 菱重環環境技術服務(北京)有限公司 副総経理
*3 三菱重工環境・化学エンジニアリング(株) 技術総括部 技術開発部 主席 技術士(上下水道部門，総合技術監理部門)
*4 三菱重工環境・化学エンジニアリング(株) サービス事業部 メンテナンス技術部 グループ長
*5 三菱重工環境・化学エンジニアリング(株) プラント事業部 プラント設計部 主席

等の検討により，実機（MSD-200：公称伝熱面積 200m²）を設計・製作した。

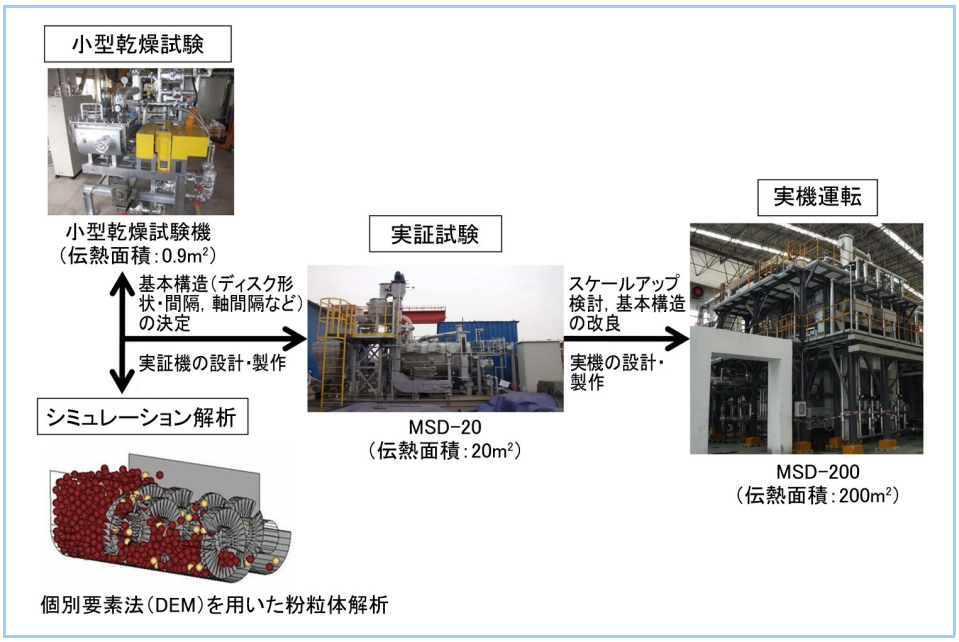


図1　高粘度汚泥乾燥機の開発経緯

3. 基本構造・原理と技術的特徴

当社が開発した高粘度汚泥対応汚泥乾燥機（MSD-200）の外観を図2に示す。本装置は，下水処理場等で発生する脱水汚泥（含水率 80%以上）を間接加熱方式により含水率 30%以下まで乾燥する汚泥乾燥機であり，従来，乾燥が難しかった高粘度汚泥に対しても乾燥可能な汚泥乾燥機である。

本乾燥機の構造・原理と技術的特徴について以下に述べる。

図2　汚泥乾燥機（MSD-200）の外観

(1)　間接加熱式

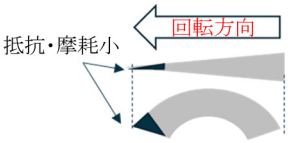
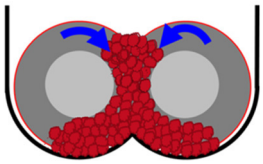
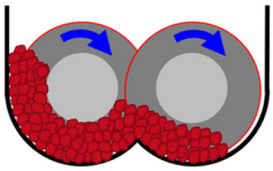
直接加熱式（熱風乾燥機，気流乾燥機，ベルト乾燥機等）は多様な汚泥性状に対して比較的安定かつ大容量の処理を行うことが可能であるが，大量に排出される排ガスに臭気が同伴されるため，大規模な脱臭設備が必要になるとともに熱源温度が高いため燃料消費量が高くなる傾向がある。一方，間接加熱式は熱媒（蒸気等）による間接式熱交換であるため熱効率が高く，排ガス（臭気ガス）量が少ないため，ランニングコストが低くなり脱臭設備の簡素化も可能である。

(2) ディスク形状と回転方向

本装置のディスクには，高粘度汚泥に対する高い搬送性とディスクやケーシングに付着した汚泥を掻き取る効果を持たせている。

表1に示す通り，ディスク形状は，先端が回転方向に向かって汚泥を切り込むような効果があるため，高粘度汚泥に対しても汚泥による抵抗が小さく，摩耗が少ない構造となっている（二軸または四軸）。

表1 本装置の基本構造と技術的特徴

No.	項目	従来技術	開発技術	原理・特徴
1	ディスク形状			先端が回転方向に向かって高粘度汚泥を切り込む（掻き取る）構造。 抵抗が小さく，摩耗が少ない。
2	基本構造 及び 回転方向	回転方向  高粘度汚泥がディスク間に押し込まれることにより，汚泥が滞留・閉塞しやすい。	回転方向  高粘度汚泥に適したディスク間隔・軸間隔により，汚泥の滞留・閉塞を抑制。	高粘度汚泥に適した基本構造（ディスク形状・ディスク間隔・軸間隔等）及び回転方向 ディスク・軸間に汚泥が滞留しないため，高粘度汚泥でも閉塞を抑制 高い搬送性
3	回転数	－	従来技術に比べ低回転 （各軸で任意に制御可能）	摩耗が少ない。 汚泥性状や処理量に適した回転差が設定可能。

また，他の間接加熱式汚泥乾燥機（二軸／四軸ディスク式・パドル式乾燥機など）に比べ，高粘度汚泥に適したディスク形状，ディスク間隔，軸間隔などにより，ディスク及び軸間に汚泥が滞留しない構造としたことで，高い搬送性と汚泥の閉塞防止が可能となり，多様な汚泥に対しても安定的な運転が可能となっている。

回転方向については，二軸を同一の回転方向にすることで，汚泥は片側へ引き寄せられ，軸間に汚泥が滞留しないため，高粘度汚泥であっても閉塞を抑制することが可能となっている。

(3) 乾燥用熱源として蒸気を利用

乾燥用熱源として，隣接する汚泥焼却炉，ごみ焼却炉，発電プラント等或いは工場内の余剰蒸気を有効利用できれば，ランニングコストを更に大幅に低減することが可能である。

4. 装置の概要

汚泥乾燥機（MSD-200）の設計仕様を表2に，設備フローを図3に，同系列の乾燥機の標準寸法表を図4に示す。

図3に示す通り，脱水汚泥（含水率 80%以上）は汚泥供給ポンプの下流に設置した電磁流量計で流量を測定し，配管圧送にて汚泥乾燥機に直接投入後，機内で撹拌・乾燥・搬送され，排出ゲートから乾燥汚泥（含水率30%以下）を排出する。乾燥熱源である蒸気は軸内配管及びディスク，ケーシングジャケット（伝熱面）内へ投入した後，蒸気ドレンとして乾燥機系外へ排出する。また，汚泥からの蒸発水分（ベーパー）は，排ガスファンにてサイクロンへ送気され，ダストを除去した後，熱交換器で水分を凝縮し，系外へ排出される。

表2 汚泥乾燥設備(MSD-200)仕様

項目	MSD-200 仕様
伝熱面積	200m^2
汚泥投入量	2570～3860kg/h
飽和蒸気圧	0.64～0.71MPa
回転数	1～9rpm
汚泥含水率 入口	80%
汚泥含水率 出口	30%

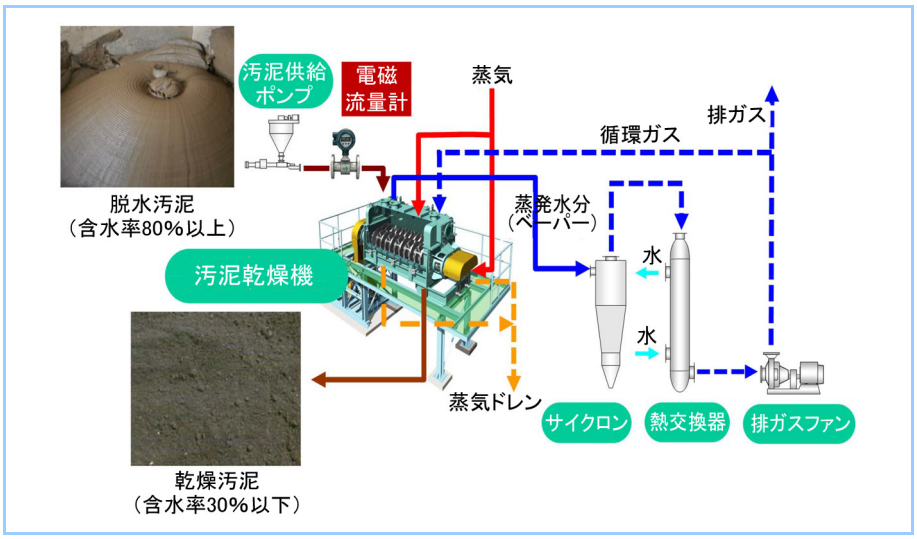
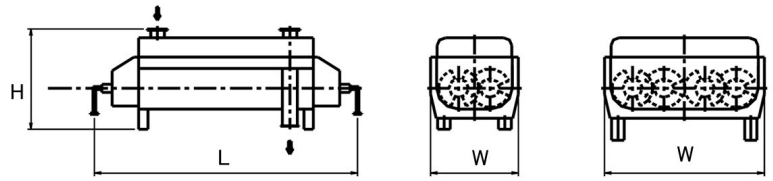


図3 汚泥乾燥機の設備フロー



型式		MSD-50	MSD-100	MSD-120	MSD-200	MSD-240
概略寸法	全長L (mm)	7700	10800	12000	10800	12000
	全幅W(mm)	2500	3000	3000	5200	5200
	全高H (mm)	2800	3600	3600	3600	3600
重量 (t)		17	34	38	65	71

図4 汚泥乾燥機 標準寸法表

5. 運転結果と評価

本装置では，以下の項目について検証・評価を行った。

(1) 汚泥性状分析

供試汚泥の性状分析結果を図5に示す。脱水汚泥含水率及び固形物中の灰分，可燃分はJIS M8812 により測定した。また，脱水汚泥は非ニュートン流体であり，コーンプレート型粘度計等による実際の粘度測定は困難であるため，乾燥機軸動力から汚泥の見掛け粘度を算出して汚泥粘度を評価した。

中国国内にあるA，B，C処理場の汚泥性状は，一般的な日本国内の下水汚泥であるX，Y処理場と比較して，灰分が高くかつ汚泥粘度が高い性状であることが分かった。(X処理場：消化汚泥，Y処理場：混合生汚泥)

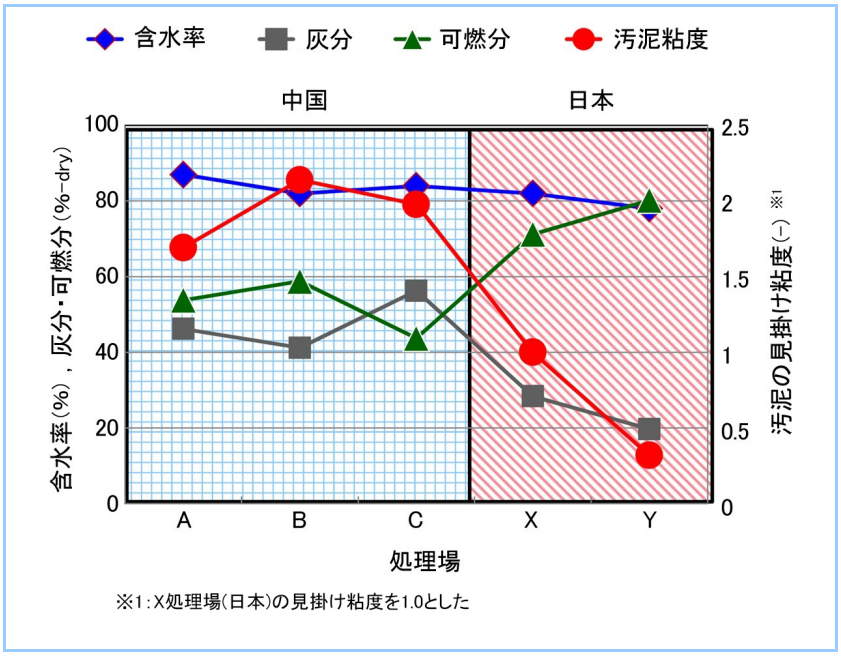


図5 汚泥性状分析結果

(2) 乾燥性能の評価

汚泥乾燥機の運転結果を表3に示す。当社実証機(MSD-20：伝熱面積 20m^2)の実績値に比べ，単位伝熱面積当たりの蒸発速度が5～13%向上，蒸気消費量が6～11%削減，電力消費量が 12～24%削減し，いずれにおいても性能が向上していることを確認した。

表3 汚泥乾燥機(MSD-200)の運転結果

項目	運転結果	目標値
汚泥投入量	3850kg/h	3790kg/h
汚泥含水率 入口	84%	＞80%
汚泥含水率 出口	19%	＜30%
蒸発速度 ＊	105～113	＞100
蒸気消費量 ＊	89～94	＜100
電気消費量 ＊	76～88	＜100

＊当社実証機(MSD-20，公称伝熱面積 20m^2)の実績値を 100 とした場合。

(3) 安定運転の評価

汚泥粘度が高いC処理場の汚泥を用いて連続運転を実施し，高粘度における乾燥性能及び搬送性能の安定性について評価した結果を図6に示す。搬送性能評価として，脱水汚泥供給量と乾燥汚泥排出量を計測した。また，乾燥性能評価として，蒸気消費量を計測し，脱水汚泥含水率と乾燥汚泥含水率から蒸発水分量を算出した。この結果，夏季・冬季における季節変動及び汚泥性状変動や汚泥投入負荷変動等の時間変動に対しても安定的な連続運転を確保していることを確認した。

(4) 導入効果(経済性及び温室効果ガス排出量)の評価

高粘度汚泥対応汚泥乾燥機の導入試算例(脱水汚泥処分量：91t/日，脱水汚泥含水率：84%，乾燥汚泥含水率：30%の場合)を図7に示す。脱水汚泥を乾燥することにより，投入汚泥を乾燥前と比較し約 23%まで減容化することができるため，汚泥の埋立処分費を大幅に低減可能となった。

このため，これまでは乾燥が難しかった高粘度汚泥に対しても本装置を導入することにより，乾燥により減容化した汚泥の埋立処分費と汚泥乾燥機のライフサイクルコスト(機器費・燃料費・電力費・メンテナンス費を合わせた費用)は，脱水汚泥を直接埋立処分した場合の処分費よりも安価になり，ライフサイクルコストは 45%(余剰蒸気を使用する場合は 27%)まで低減する

ことが可能となった。更に，乾燥汚泥を混焼することにより，ライフサイクルコストは 22%（余剰蒸気を使用する場合は4%）まで低減することが可能となった。（ライフサイクルコスト：20 年で評価）

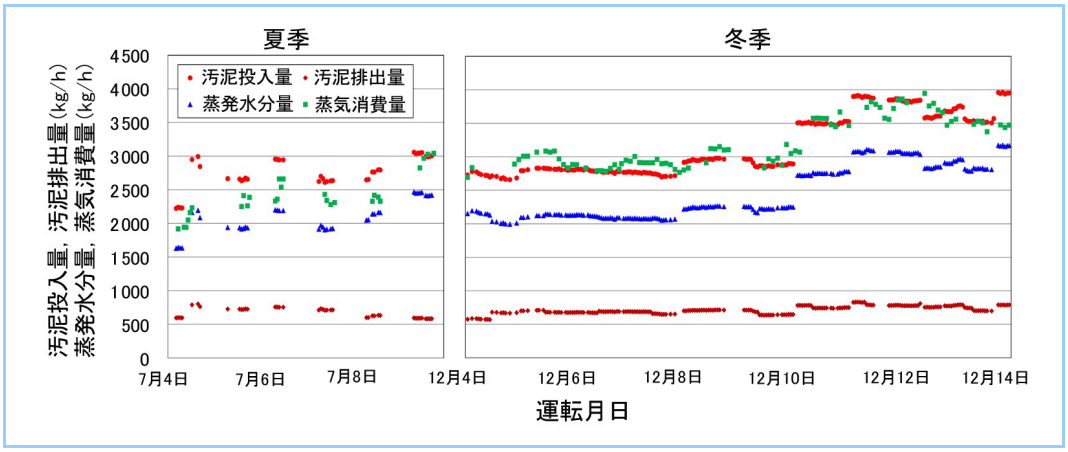


図6 汚泥乾燥機の運転結果

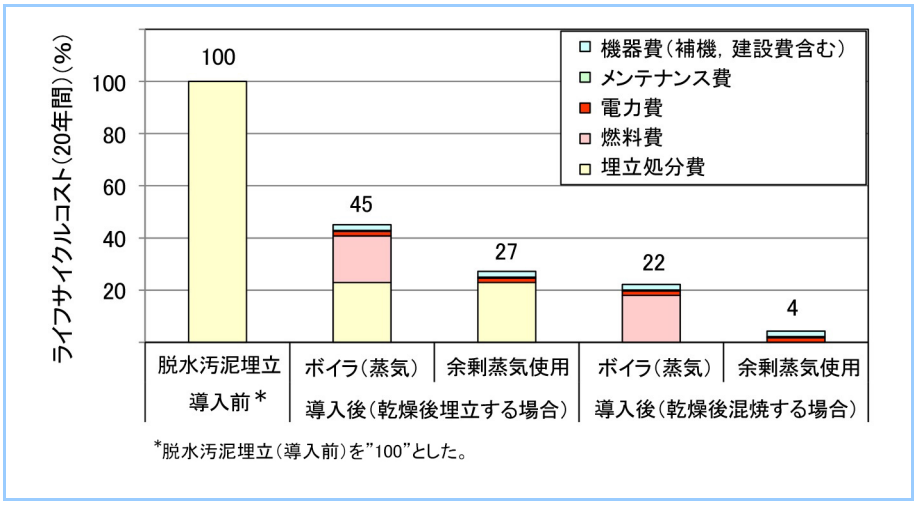


図7 導入効果（ライフサイクルコストの評価）

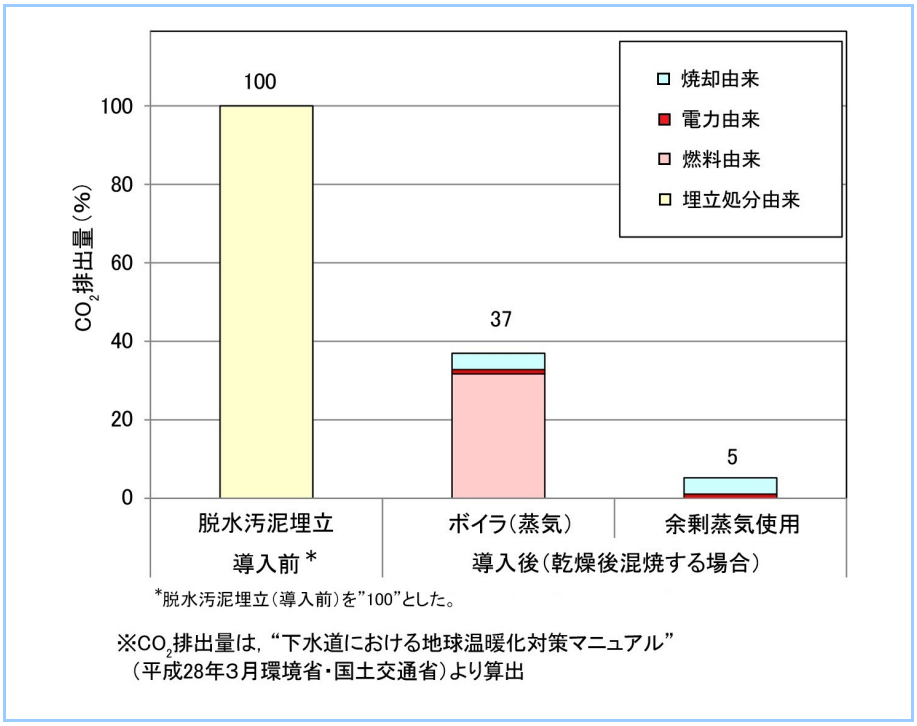


図8 導入効果（CO_2排出量の評価）

また，温室効果ガス低減の観点から，二酸化炭素（CO_2）排出量を試算した結果を図8に示す。従来埋立処分していた高粘度脱水汚泥を本装置により乾燥することで，乾燥汚泥の混焼が可能になることから，燃料・電力・焼却由来のCO_2排出量は，脱水汚泥埋立の場合の排出量と比べて 37%まで低減することが可能となり，更に余剰蒸気を使用する場合，排出量は5%まで低減することが可能となった。

6. まとめ

汚泥の高粘度化など汚泥性状の多様化にも適した汚泥乾燥機（MSD-200）を開発した。運転結果により，安定的な連続運転と乾燥性能を確認することができた。これにより，従来埋立処分していた高粘度脱水汚泥を汚泥乾燥機により乾燥することで，埋立処分量の大幅減容化，或いは混焼が可能となるため，ライフサイクルコスト及び温室効果ガス排出量の低減が可能となった。

以上の実績を踏まえて，2018 年3月，中国南部の汚泥処理施設に MSD-240×4台（タイトル写真）を納入した。更に，MSD-240×5台を受注し，現在製作に取り組んでいるところである。今後，日本国内の他，東南アジア等の諸外国においても普及が見込まれている。

また，汚泥性状の多様化に対して適した乾燥機であることから今後は，各種排水汚泥や種々バイオマスなど幅広い分野への適用とバイオマス燃料化への展開も期待される。

参考文献

(1) 江草知通ほか，高粘度汚泥対応型汚泥乾燥機の開発，三菱重工技報 Vol.51 No.3 (2014) p.8～13