

経済産業大臣賞 「脱水乾燥システム」

月島アクアソリューション株式会社 / 日本下水道事業団

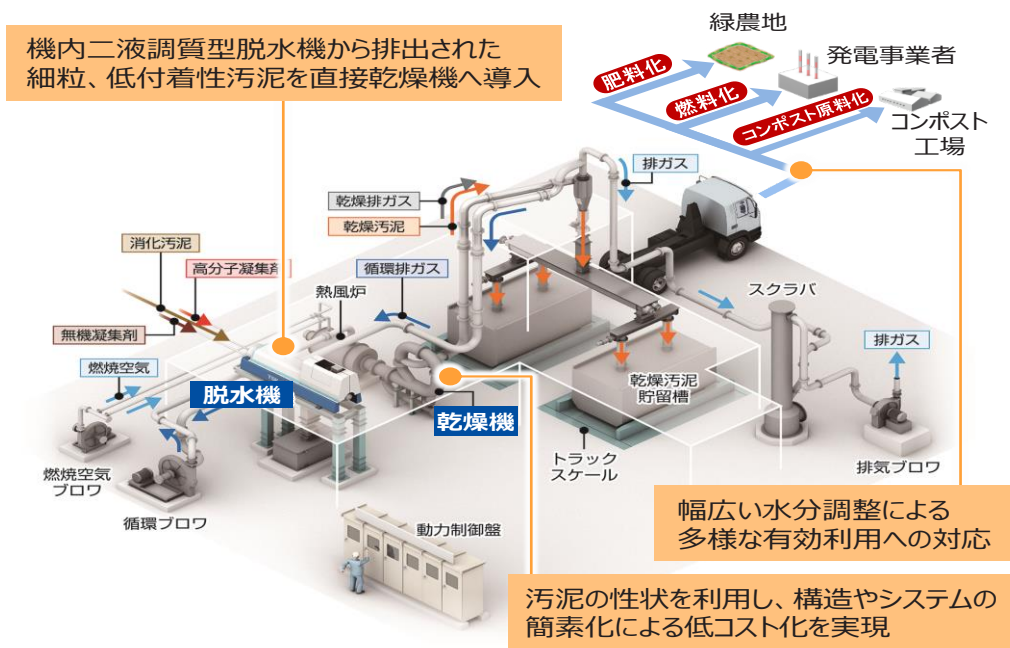
1. 装置の詳細説明

(1) コンセプト

脱水乾燥システムの概要を図表1に示す。本システムは、脱水機に高分子凝集剤と無機凝集剤を別々に添加する脱水方法を用いた機内二液調質型遠心脱水機を採用している。機内二液調質型遠心脱水機から排出される脱水汚泥は、従来の高分子凝集剤のみを添加する脱水方法に比べて、低水分かつ細粒状で粘性が低いという特徴がある。そのため、解砕機や搬送機器を排除した円環式気流乾燥機と組み合わせることが可能である。

機内二液調質型遠心脱水機と円環式気流乾燥機を組み合わせることにより、下水汚泥の脱水・乾燥処理を一体的に行うことで、システムの簡素化によるコストの削減に加え、乾燥効率の改善により省エネルギー化（従来技術に比べ45%低減）が可能である。

また、本システムでは、熱風温度を調整することにより10%から50%までの乾燥汚泥の水分調整ができ、様々な用途での有効利用が可能である。



図表1 脱水乾燥システム概要

(2) 全体フロー

設備フローを図表2に示す。脱水乾燥システムは大きく分けて、脱水設備と乾燥設備から構成されている。脱水設備は、機内二液調質型遠心脱水機、供給ポンプ（汚泥・高分子凝集剤・無機凝集剤）、振分コンベヤ及び排水槽から構成されている。乾燥設備は、円環式気流乾燥機、サイクロン、熱風炉、燃焼空気ブロワ、循環ブロワ、スクラバ、循環ポンプ、排気ブロワから構成されている。

処理対象となる汚泥は高分子凝集剤、無機凝集剤とともに遠心脱水機に供給され、機内の遠心場において固液分離作用を受け、脱水汚泥として排出される。脱水汚泥は乾燥機へ搬送される。

円環式気流乾燥機に供給された脱水汚泥は、熱風炉から供給された250～500℃程度の熱風と直接接触し、空気輸送にて円環内を循環しながら乾燥される。乾燥された汚泥は排気とともに空送され、サイクロンにて固気分離され、コンベヤを介して乾燥汚泥貯留槽に貯留される。

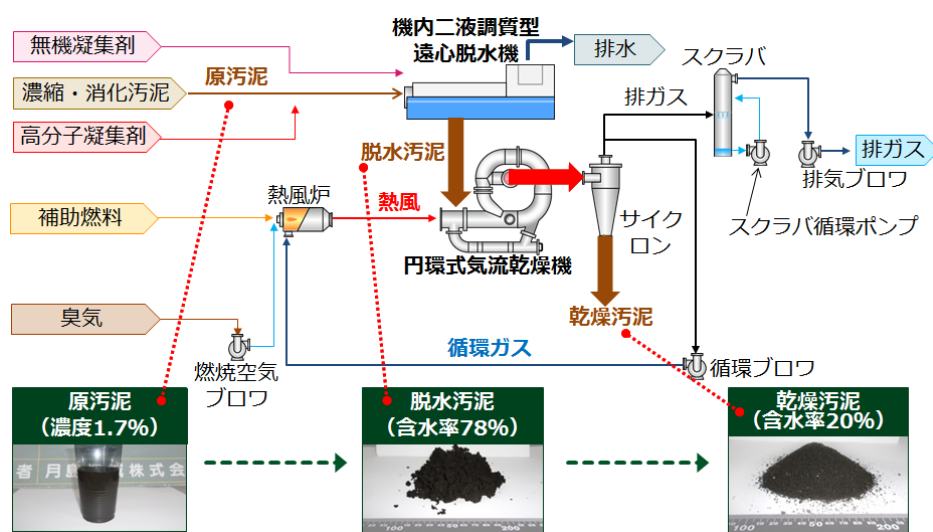
以上のように、脱水設備と乾燥設備をダイレクトに組み合わせることにより、機器点数が少ない低コストかつシンプルなプロセスを実現した。

(3) 各技術の解説

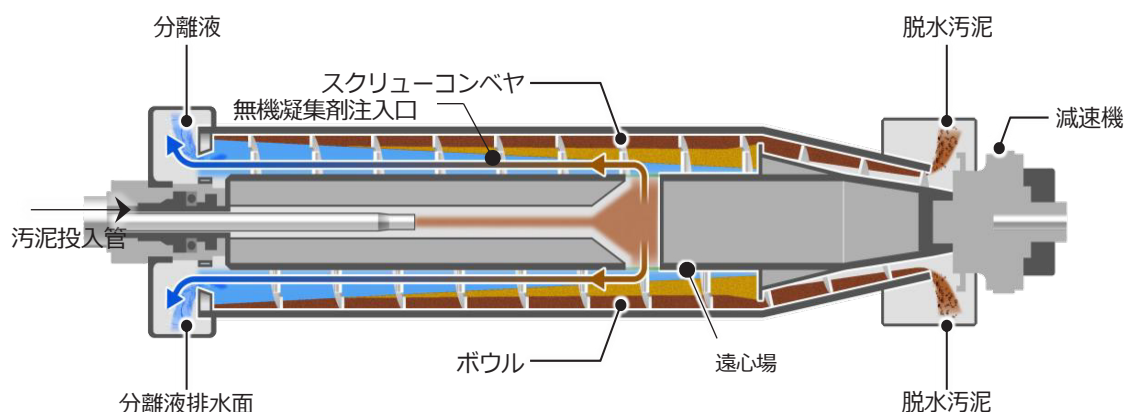
1) 機内二液調質型遠心脱水機

図表3に機内二液調質型遠心脱水機の基本構造を示す。

従来の遠心脱水技術では、汚泥と高分子凝集剤を汚泥配管にて混合し、脱水機に供給するが、本技術では、これに加えて無機凝集剤を機内の汚泥層に直接注入する。この無機凝集剤に含まれる鉄イオン（Ⅲ価）が汚泥粒子表面のマイナス荷電を中和することで、含水率が低減できると考えられている。また、鉄イオン（Ⅲ価）はpH3～4以上においては水酸化第二鉄を形成するが、この水酸化物は細かい粒子などを取り込み沈殿する作用（共沈作用）があり、汚泥粒子の固液分離性や圧密性の向上に寄与する。



図表2 設備フロー



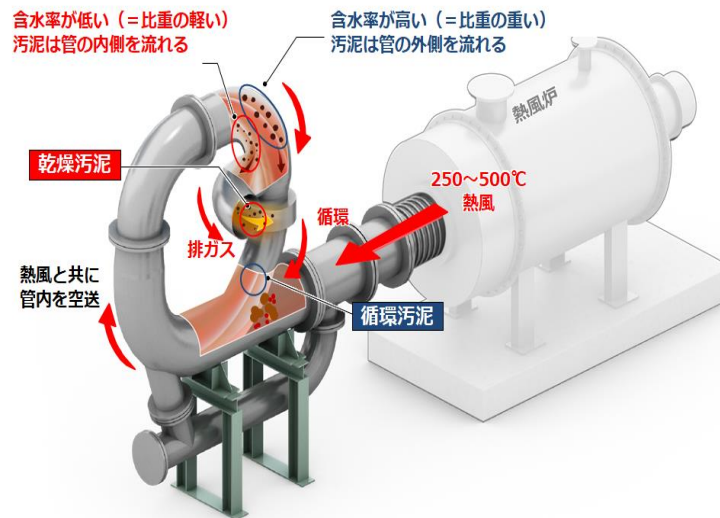
図表 3 機内二液調質型遠心脱水機の基本構造

本技術は、機内二液調質型遠心脱水機から排出される脱水汚泥が低含水であることに加え、脱水汚泥の形状が細粒状かつ低付着性であることに着目しており、後述する円環式気流乾燥機において気流に乗って空気搬送されやすい性状を有している。また、後述するベルトプレス脱水機と円環式気流乾燥機との組合せ試験について記載した。ベルトプレス脱水機の脱水汚泥は、板状の汚泥が脱水機より排出され、スパイラルコンベヤなどで運ばれていくうちに細かくなっていくので、円環式気流乾燥機での乾燥が可能である。

2) 円環式気流乾燥機

下水汚泥の乾燥処理に用いられてきた乾燥方式は、汚泥への伝熱方法によって分類されており、気流式や攪拌羽式等の熱風と汚泥を直接接触させる「直接加熱式」と、蒸気などを熱源として間接的に汚泥に伝熱する「間接加熱式」がある。本技術で採用した円環式気流乾燥機は、食品分野等で粉粒体の乾燥機として使用されてきたものであり、前者の直接加熱式に分類される。

円環式気流乾燥機は、図表 4 に示すように配管が鉛直方向に円環状に組み合わせられ、円環部の下側横に気流の入口、円環の途中の内側に気流の出口が設置されている。まず、この円環に気流を供給した場合、気流は円環に沿って循環しようとする流れと出口からの排出される流れに二分される。この状態で図中の円環部の下側に供給された汚泥は気流と接触し、そこで表面が乾燥されることでより付着しにくい状態となり、気流とともに円環状の配管で循環する。投入当初の汚泥は水分も多く比重が高いため遠心力により円環の外側を循環するが、循環している間に熱風と接触することで乾燥が進み、乾燥により比重が低くなった汚泥や粒径の小さい汚泥は円環の内側を循環するようになり、汚泥滞留時間が数秒～数分程度で円環の内側に設けられた排気口から排気と共に排出され、サイクロンにて固気分離される。



図表 4 円環式気流乾燥機の構造及び原理

2. 開発の経緯

(1) 開発経緯

近年、バイオマス資源として下水汚泥の利活用促進が国家的な施策として掲げられ、大規模処理場を中心に下水汚泥の燃料化事業が普及しつつある。

一方、中小規模処理場では依然として脱水汚泥は外部委託処分しており、下水汚泥の有効利用のため、新たな設備投資は財政的にも難しい状況にある。

このため、中小規模処理場における下水汚泥の有効利用の促進には、低コストかつ多様な有効利用用途に対応できる汚泥処理設備の確立が急務である。

こうした背景から、月島機械株式会社（当時^{※1}）を代表とする共同研究体は、機内二液調質型遠心脱水機と円環式気流乾燥機を組み合わせ、建設・維持管理費が低減でき、乾燥汚泥含水率の調整により多様な有効利用に対応できる脱水乾燥システムを開発した。

2016年度には国土交通省下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）として栃木県鹿沼市黒川終末処理場にて実証設備を建設し、性能評価を行い、2019年度に「脱水乾燥システムによる下水汚泥の肥料化、燃料化技術導入ガイドライン（案）」が発刊されている。さらに実証後も設備を継続活用し、乾燥汚泥の有効利用の一環として、栃木県鹿沼市及び渡辺パイプ株式会社と協力し、肥料や融雪剤としての有効利用にも成功している。開発の経緯としては以下のとおりである。

2014年度	開発プロジェクトスタート
2015年度	実験設備による現地実証試験スタート
2016～2017年度	B-DASH 実証研究
2018年度	B-DASH 終了後の自主研究並びに実運用開始、第1号機納入

¹ 現・月島ホールディングス株式会社。後に月島アクアソリューション株式会社が水環境事業を承継。

(2) 共同開発

本システムは、月島アクアソリューション株式会社、日本下水道事業団、鹿沼市、サンエコサーマル株式会社、鹿沼市農業公社が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は、次のとおりである。

- ・月島アクアソリューション株式会社：
設備設計・施工、試運転、運転管理、データ収集、実証評価
- ・日本下水道事業団：
研究計画の立案、設備設計・施工管理、試運転管理、有効利用検討
- ・鹿沼市：
フィールド提供、運転管理、データ収集
- ・サンエコサーマル株式会社：
有効利用検討（燃料利用）
- ・鹿沼市農業公社：
有効利用検討（肥料利用）

(3) 技術導入

特に無し

3. 独創性

本システムは以下に示す3つの独創性がある。

独創性1：脱水設備と乾燥設備を一体化することによるシステムの簡素化

独創性2：有効利用の用途に応じた幅広い含水率の調整機能の実現

独創性3：高効率な脱水技術と乾燥技術の組み合わせによる燃費低減（従来比45%減）

以下に解説を示す。なお、独創性3については性能に関する項目であることから、「5. 性能」で述べる。

(1) 独創性1：脱水設備と乾燥設備を一体化することによるシステムの簡素化

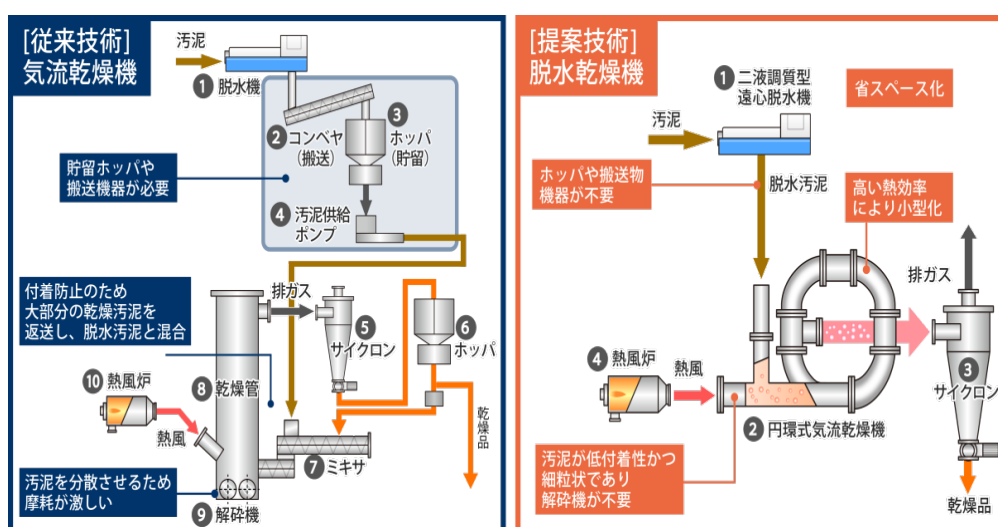
脱水乾燥システムは、機内二液調質型遠心脱水機と産業・食品分野等で利用されている乾燥機(円環式気流乾燥機)を組み合わせたシステムである。従来下水処理の脱水汚泥は塊状であり、さらに加熱面への付着性が強いことから、これを解消するために汚泥の分散や混合を行うための攪拌羽が必要であり、乾燥時間に長い滞留時間を要することから、過大な設備が必要であった。本システムでは、機内二液調質型遠心脱水機から排出される汚泥性状（低付着性および細粒状）に着目し、さらに乾燥機への気流の吹き込み位置及び量を最適化することで、従来では下水汚泥には適用が不可能と考えられていた気流乾燥機を採用することが可能となった。

図表5に示すように従来の気流乾燥技術では、汚泥の付着対策のため、乾燥汚泥の大部分を返送し、脱水汚泥と混合して乾燥機に再投入する必要があり、システムが複雑化していた。また、乾燥機内においても汚泥を分散させるために必要な解砕機の摩耗が激しく補修費が高額であった。

本システムでは、機内二液調質型遠心脱水機から排出された低付着性・細粒状の脱水汚泥が、円環式気流乾燥機で熱風と直接接触し分散作用を受けることで、複雑な付着対策構造が不要となる。これにより、従来技術に比べ、主要な機器点数の低減（従来10点→提案技術4点）や省スペース化（従来比50%低減）を実現し、建設費、維持管理費の縮減が可能となる。建設費、維持管理費の縮減については、「6. 経済性」で述べる。

(2) 独創性2：有効利用の用途に応じた幅広い含水率の調整機能の実現

図表6に従来の乾燥技術における適用含水率とその課題について示す。また、図表7に各種有効利用における適用範囲を示す。従来の技術では乾燥機の機構や原理上の制約から適用できる含水率領域が限定されていた。



図表5 従来の気流乾燥機との比較

図表6 従来の乾燥技術の適用可能な乾燥汚泥含水率とその課題

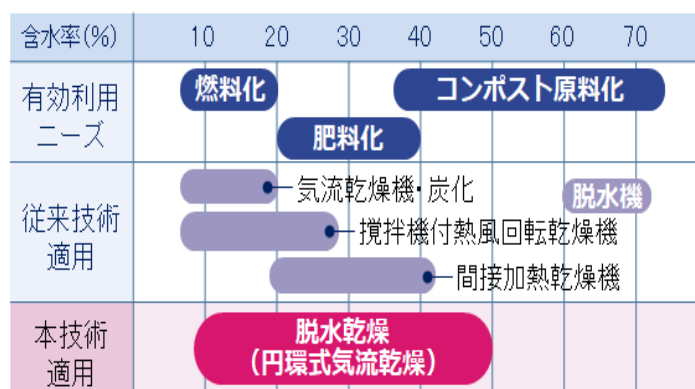
機種	気流乾燥機	間接加熱式乾燥機	攪拌羽根付熱風乾燥機
概要	<p>低含水率かつ低比重な汚泥のみ回収 風速 4~5m/s 熱風 高含水率な汚泥は沈降</p>	<p>高含水率汚泥は塊状になり不適用 低含水率の汚泥はディスク摩耗の原因となる</p>	<p>高含水率汚泥は塊状になり攪拌羽根の強度不足や摩耗が激しい</p>
適用含水率	10~20%	20~40%	10~30%
課題	高水分では乾燥管内や解砕機への汚泥の付着があり低水分では解砕機の摩耗が激しい。	高水分では塊状となり、かつ付着の問題により排出できない。排出可能だが、ディスクの摩耗が激しい。	攪拌羽根の強度不足のため、運転できない。排出可能だが、攪拌羽根の摩耗が激しい。

一方、有効利用の用途によっては、含水率 10%~50%程度の幅広い範囲で要求される。このため、乾燥設備導入後に社会情勢などの影響により有効利用の用途を変更することが難しく、結果的に乾燥設備導入の大きな障壁となっていた。

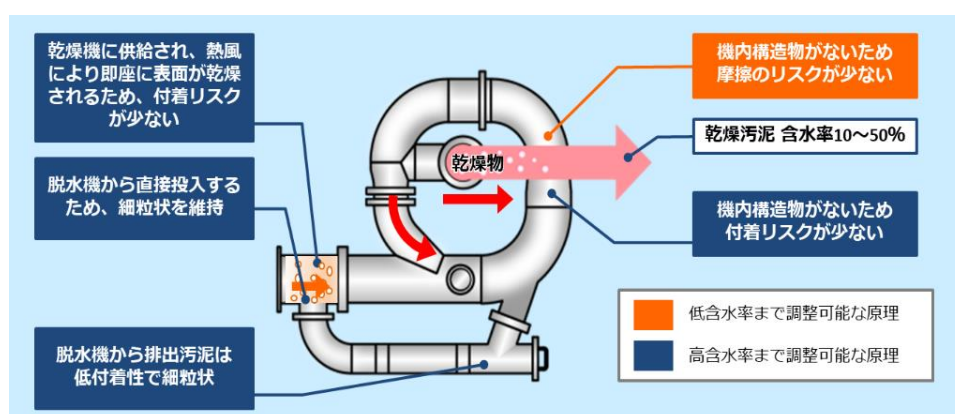
図表 8 に円環式気流乾燥機における適用含水率とその特徴を示す。脱水機から排出される水汚泥の性状（低付着性及び細粒状）を維持したまま乾燥機に直接投入し、汚泥表面を熱風で瞬時に乾燥させることで、付着性の問題を解消している。

このため、含水率 50%程度の高含水率の領域についても安定的に運転することが可能である。また、円環式気流乾燥機の特長として、熱風の温度を上げることで乾燥汚泥含水率 10%程度に調整することが可能であり、機内構造物がないことから他の乾燥機では解決できなかった摩耗の問題も改善している。

以上より、高含水率汚泥による付着の問題及び低含水率汚泥による摩耗の問題を解消し、乾燥汚泥含水率を 10~50%程度に調整することで、様々な有効利用に対応できる。



図表 7 各種有効利用への適用範囲



図表 8 円環式気流乾燥機の特徴

4. 特許

次のとおり、特許 5 件を取得済み。

特許番号：第 6565097 号 / 名称：有機性廃棄物の処理装置および処理方法

特許番号：第 6678263 号 / 名称：有機性廃棄物の処理装置および処理方法

特許番号：第 6846920 号 / 名称：有機性廃棄物の処理方法および処理装置

特許番号：第 6869126 号 / 名称：汚泥の処理方法および処理装置

特許番号：第 7116606 号 / 名称：有機性廃棄物の処理方法および処理装置

5. 性能

(1) 高効率な脱水技術と乾燥技術の組み合わせによる燃費低減（従来比 45%減）

「3. 独創性」の独創性 3 の解説として記載する。

脱水乾燥システムは、低含水率化が可能な脱水技術の適用により蒸発水分量を低減し、さらに熱効率の高い乾燥技術を組み合わせることで、これらの相乗効果により、従来に対して乾燥に要する熱量を 45%低減（同じ固形物量を処理した場合）できる。

$$\text{低減率} = 100\% - (\text{蒸発水分量の低減}^1) 78\% \times \text{乾燥必要熱量の低減}^2) 70\% = 45\%$$

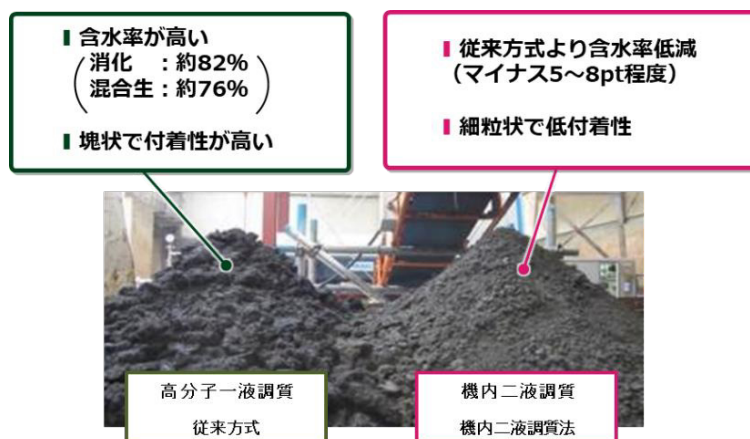
式中の 1) 及び 2) について、以下に述べる。

1) 蒸発水分量の低減（従来比 78%）

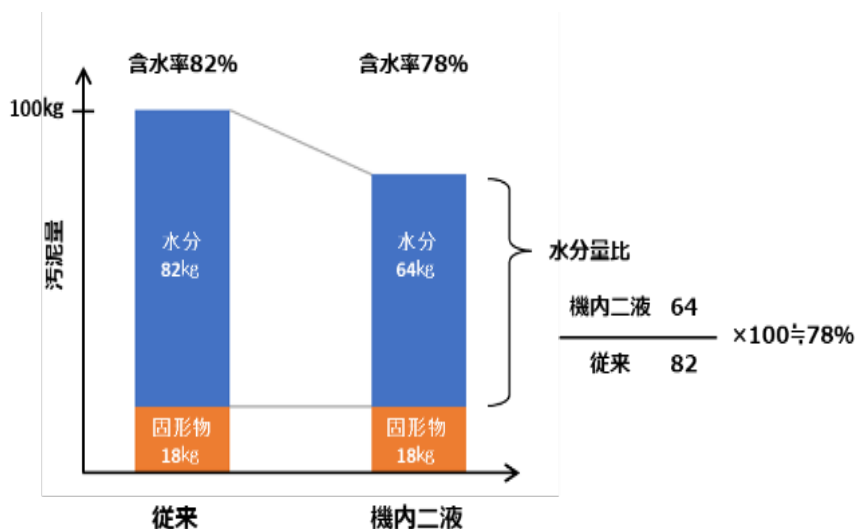
「1. 装置の詳細説明」にて前述したように、機内二液調質型遠心脱水機は無機凝集剤を脱水機内に直接供給することで脱水汚泥の含水率を低減することが可能である。

図表 9 に脱水汚泥の含水率とその状態を示す。消化汚泥に対する従来の脱水技術（高分子一液調質）での含水率が 82%程度であるのに対し、本技術では 74~77%以下の含水率が達成可能である。

図表 10 に汚泥中の水分量における従来（含水率 82%）と機内二液（含水率 78%）の比較を示す。本技術を適用し、含水率を 4pt 低減することで乾燥工程における蒸発水分量が 78%程度に低減できることがわかる。



図表 9 脱水汚泥の状態と水分



図表 10 汚泥中の水分量の比較

2) 乾燥必要熱量の低減 (従来比 70%)

図表 9 に示したように機内二液調質型遠心脱水機から排出された汚泥は粒状であり固／気界面が大きい特徴がある。また、「1. 装置の詳細説明」に記載したように円環式気流乾燥機は大量の熱風を使い、管内を循環させる乾燥原理を有する。このため、本システムではこれらの相乗効果により、従来の気流乾燥機に比べて、乾燥熱効率が低い利点がある。具体的には従来の気流乾燥機の乾燥熱効率が 50% (当社比) であるのに対し、円環式気流乾燥機では 70～75% と 1.5 倍程度の効率が得られる。

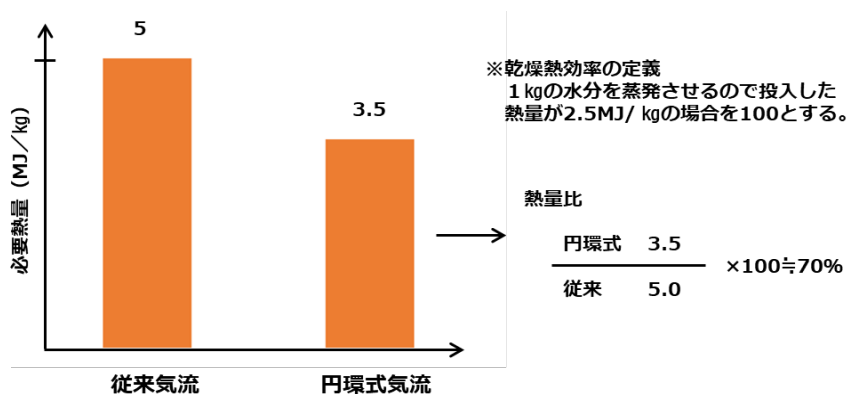
図表 11 に 1 kg の水分を蒸発させるのに要するエネルギー量の比較を示す。乾燥熱効率が低い円環式気流乾燥機では従来の気流乾燥機に対して、70% 程度のエネルギーで同量の水分を蒸発させる能力を有している。

(2) 乾燥汚泥の有効利用について

1) 肥料利用

図表 12 に乾燥汚泥の肥料成分の分析結果を示す。分析結果から窒素及びリンを豊富に含み、また、有害成分・溶出試験 (データは割愛) にも問題がなく、肥料として利用可能であることが確認された。

次に、この乾燥汚泥を鹿沼市農業公社の圃場で実際の作物に施肥した結果について報告する。図表 13 に大豆、飼料米を栽培した結果を示す。成分分析結果からも分かるように下水汚泥は窒素やリンを豊富に含む良質な肥料原料であるが、カリウム分が極端に少ない。このため使用に際しては、化学肥料を併用しカリウム分を補充することで、対照区 (化学肥料のみを施肥) と同等以上の収量が得られた。こうしたことから、特性に合わせた使用方法を示すことにて十分肥料としての活用が可能であるといえる。



図表 11 単位蒸発水分量あたりの必要熱量

図表 12 肥料成分 分析結果

対象汚泥	結果
亜鉛 mg/kg	433
窒素 %	5.83
りん酸 %	4.26
加里 %	0.2
石灰 %	1.51
銅 mg/kg	466
水分 %	16.8
C/N 比	5.91

図表 13 肥料利用試験結果

作物	大豆		飼料用米		
	試験区	対照区	試験区	対照区	
圃場	15a	15a	28.5a	31.6a	
施肥	化学肥料	20kg	30kg	塩化カリ 9kg/10a	50kg
	汚泥肥料	180kg	—	172kg/10a	—
収量	26kg/a	23kg/a	73.0kg/a	66.3kg/a	

2) 燃料利用

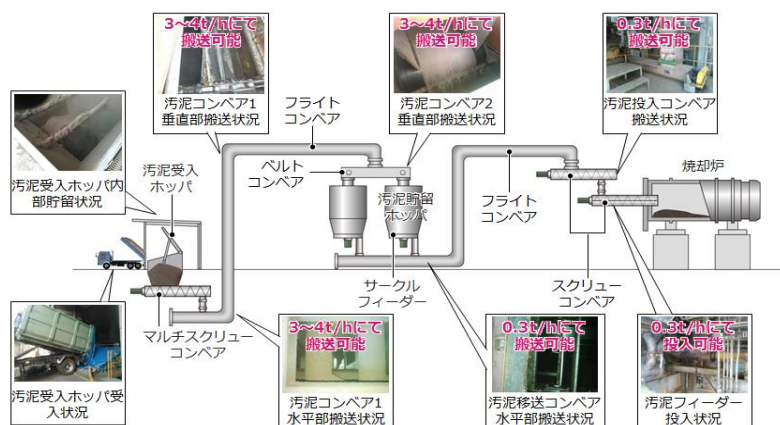
図表 14 に乾燥汚泥の燃料成分の分析結果を示す。

成分分析結果から消化、混合生両汚泥ともに発熱量、含水率ともに JIS Z7312 (BSF-15) を満足していることが確認された。また、共同研究体の構成員であるサンエコサーマル株式会社の焼却発電設備にて年間を通じて乾燥汚泥（消化汚泥）を使用結果については、搬送や貯留などの設備面については図表 15 に示す。

乾燥汚泥は搬送、貯留工程や燃焼工程においても問題がなく、実用上燃料として活用可能であることが確認された。

図表 14 燃料成分分析結果

対象汚泥		消化	混合生	JIS BSF-15
含水率	%	12	14	20 以下
灰分	%	18	11	—
総発熱量 MJ/kg	乾基準	19	20	
	湿基準	17	17	15 以上



図表 15 サンエコサーマルにおける乾燥汚泥利用フロー

6. 経済性

脱水乾燥システムを導入した場合の経済的なメリットを示す。前述したように中小規模の下水処理場では、有効利用や焼却設備が無く、脱水汚泥を外部委託処理するケースがほとんどである。以上より、ここでは従来の処理方法として脱水処理との比較を示す。

(1) 検討条件

図表 16 に試算の対象となる処理場の処理条件と単価設定を示す。

(2) 試算条件

1) 建設費

建設費については設備一式の機械工事も掌分（機器、据付・配管・機械基礎、動力制御盤及び二次側配線工事）を想定し、比較には耐用年数 15 年とした場合の年価にて評価を行った。なお、建設費には交付金、補助金は考慮しないものとした。

2) 維持管理費

図表 17 に維持管理費の試算条件を示す。維持管理費としては、補修費、薬剤（高分子凝集剤、無機凝集剤）、電力費及び燃料費を考慮した。処理性能に関わる数値は、B-DASH 実証研究のガイドライン（国総研資料 第 1058 号 B-DASH プロジェクト No. 23 脱水乾燥システムによる下水汚泥の肥料化、燃料化技術導入ガイドライン（案））の値を使用した。燃料費は場内の消化ガスの有効利用を図ることを前提とし、費用は計上しないものとした。（概ね処理場で発生する消化ガスの 50～70%程度を使用） 人員については、日勤は脱水担当者が兼任し、夜間は中央監

視室の夜勤にて対応することを前提とし、増員は考慮しないものとする。なお、本運用方式は第1号機での実運用を元としている。

(3) 試算結果

図表 18 に試算結果を示す。従来の脱水設備のライフサイクルコストは汚泥処分費が全体7割程度大きなウエイトを示していることが分かる。一方、脱水乾燥システムは、従来の脱水設備単体よりも建設費、電気代、補修費などが増加する傾向にあるが、乾燥による汚泥の減容化並びに燃料・肥料としての付加価値の創出により、汚泥処分費が大幅に低減できる傾向があり、ライフサイクルコスト合計で約20%以上の低減効果があることが分かる。

図表 16 対象処理場の処理条件と単価設定

処 理 条 件	汚泥種	消化汚泥		
	水処理方式	標準活性汚泥法		
	汚泥濃縮方式	分離機械濃縮		
	汚泥処理方式	消化→脱水		
	汚泥量 t-ds/日	最大	3.75	
日平均		3.00		
単 価 設 定	汚泥処分費	有効利用	利用先までの運搬費として 5,000 円/t	
		産廃処分	運搬費込みで 23,000 円/t	
	薬品費	高分子	1,000 円/kg	
		無機	50 円/kg	
	電力	15 円/kg		
燃料	処理場で発生する消化ガスを使用する			

図表 17 維持管理条件

		従来	脱水乾燥システム
脱 水	高分子注入率	1.9%	1.9%
	無機注入率	0%	20%
	脱水汚泥含水率	82%	78%
乾 燥	燃料原単位	—	275L/t-ds
	乾燥汚泥含水率	—	20%
そ の 他 条 件	電力原単位	3kw/m ³	635kW/t-ds
	稼働条件	335 日/年、24h 稼働	
	補修費	メーカー想定値とする	

図表 18 試算結果

		従来（脱水）	脱水乾燥システム
建設費	建設費年価	14	40
維持 管理費	高分子凝集剤	11	11
	無機凝集剤	0	6
	電気	1	6
	汚泥処分	69	3
	補修	4	12
合計		100	78

7. 将来性

(1) 脱水乾燥システムを活用したエネルギー循環型バイオマス集約モデルについて

脱水乾燥システムを導入した下水処理場をバイオマス集約拠点としたエネルギー循環型のモデルを図表 19 に示す。

本モデルは、中核となる下水処理場を周辺処理場の汚泥や WET 系バイオマスの集約拠点施設として位置づけることが出発点といえる。まず、小規模の下水処理場においてはその規模や立地に合わせ、濃縮汚泥や脱水汚泥の形態で集約し、拠点施設において消化、乾燥処理を行うことで、エネルギー化が図れる。同様に、従来は他部局で管理されていたし尿や生ゴミといった WET 系バイオマスについても集約することで、エネルギー化が可能となる。最後に乾燥された汚泥は地域社会で燃料化物や肥料としての活用に加え、現在 B-DASH 実証研究中のバイオマスボイラを拠点施設に導入することで、場内で汚泥のエネルギーを活用することが可能となる。

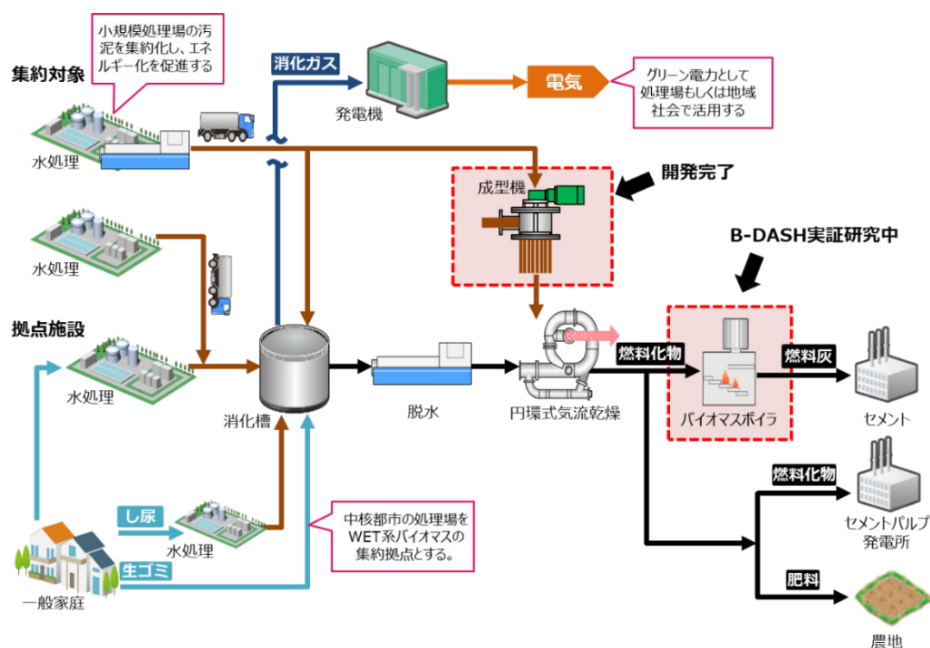
これはあくまで一例ではあるが、各市町村の財政、立地、状況に合わせて、これらの技術を組み合わせることで、全国の自治体が抱える広域化の推進、バイオマスの利活用等の課題解決と経済合理性を両立することができる画期的なモデルが確立できる。

(2) 更なる技術開発について

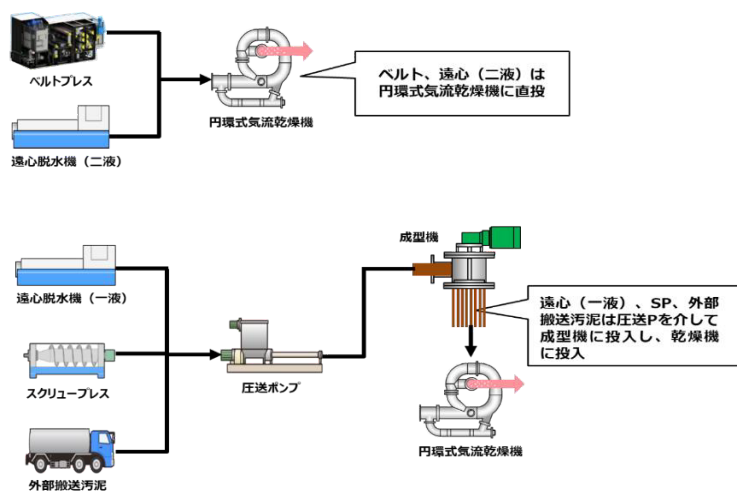
以下に、新たな技術開発を紹介する。

1) 各種脱水機種への円環式気流乾燥機の適用

脱水乾燥システムの最大のポイントは脱水汚泥をそのまま乾燥機に投入することで、システムの簡素化や乾燥の効率化が図れる点である。一方、処理場の更新計画においては、既設脱水機を更新することができず、このシステム全体を納入することが難しいケースもある。こうした事例に対応するため、様々な脱水機種と円環式気流乾燥機の適用性について検討を行った。この結果、ベルトプレス、機内二液遠心脱水機は乾燥機に直接投入することが可能であり、その他の機種については脱水汚泥を乾燥しやすい形状に調整する成型機を開発することで、現在下水道事業で採用されているすべての機種が適用可能となった。また、外部の処理場から運搬された汚泥についても適用が可能となった。



図表 19 脱水乾燥システムを活用したエネルギー循環型バイオマス集約モデル



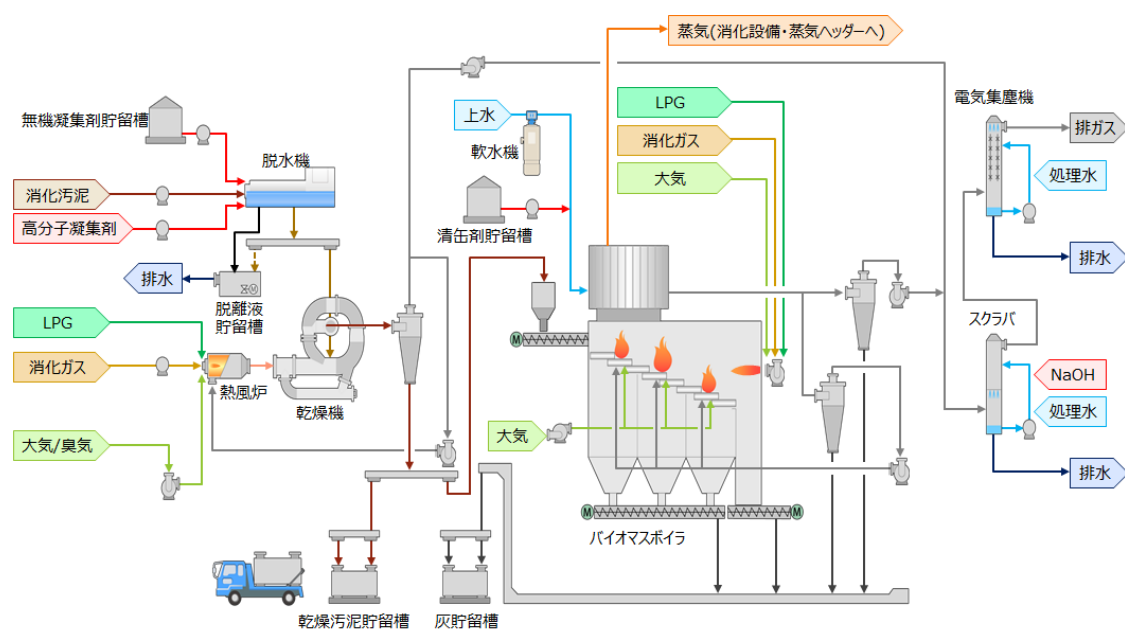
図表 20 各種脱水機との組み合わせパターン

2) バイオマスボイラによる乾燥汚泥のエネルギー利用

乾燥した汚泥が地域社会で有効活用できることが最も理想的なスキームといえるが、処理場の立地、ユーザーの存在、汚泥運搬などすべて要素を満足する必要がある、全国の処理場でこれが成立することは難しいといえる。

こうした処理場においては、場内で燃料化物をエネルギー資源として活用する手段も有効であると考え、本システムから発生する乾燥汚泥を燃料として熱利用をバイオマスボイラの開発に着手し、2020年度採択のB-DASH実証研究において実証試験を実施している。(図表21に実証フローを示す)

このボイラを活用すれば、乾燥汚泥のエネルギーを廃熱、蒸気、温水といった形で、処理場内で有効活用することができることから、近隣に有効利用ユーザーが存在しない地域での一つの打開策になると考えられる。



図表 21 脱水乾燥システムとバイオマスボイラを組合せたフロー