

下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）  
「下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト」  
（LOTUS Project）

グリーン・スラッジ・エネルギー技術

低ランニングコスト型混合消化ガス発電システム

に係る技術評価書

技術提案者 JFE エンジニアリング株式会社  
アタカ大機株式会社  
鹿島建設株式会社  
ダイネン株式会社

平成19年3月

下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）委員会

## まえがき

SPIRIT21 (Sewage Project, Integrated and Revolutionary Technology for 21st Century) は、下水道事業における種々の課題の中で特に重点的に技術開発を推進すべき分野について、民間主導による技術開発を誘導・推進するとともに、開発された技術の早期かつ幅広い実用化を目的とした産学官の強力な連携による新たな技術開発プロジェクトであり、平成14年3月にスタートした。

SPIRIT21 の最初の課題として、国土交通省では、「合流式下水道の改善対策に関わる技術」を選定し、平成14年度～平成16年度の3年間で集中的に技術を開発した。さらに、SPIRIT21 の第2の課題として、「バイオマス・ニッポン総合戦略」や地球温暖化対策を下水道事業において推進していくため、下水汚泥を安価に利活用できる新技術の早期かつ幅広い実用化を目指す「下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト (Lead to Outstanding Technology for Utilization of Sludge Project : LOTUS Project )」に取り組むこととなった。

また、下水道政策研究委員会下水道中長期ビジョン小委員会が、平成17年9月に「下水道ビジョン2100～下水道から「循環のみち」へ100年の計」を取りまとめた。本ビジョンでは、下水道は、持続可能な社会、或いは循環型社会構築の中核となる社会資本であり、このような21世紀型の新しい下水道を目指すべきであると提言している。また、本ビジョンで示された「資源のみち」の将来像の実現に向けて「資源のみち委員会」が設置され、下水道分野における資源・エネルギー利用、地球温暖化対策の中期的な施策のあり方等について審議が行われた。同時に、国土交通省は、下水道施設を活用した地域バイオマスの利活用を促進するため、新世代下水道支援事業制度（未利用エネルギー活用型）の拡充等を行ってきた。

LOTUS Project は、上記のような国が進める総合的な施策の一環として計画されたものであり、経済的に実現可能な技術を世に送り出すことによって、「資源のみち」を、目指すべき理想像から現実のものにすることを狙ったものである。

LOTUS Project は、下水処理に伴い必然的かつ永続的に発生する下水汚泥の資源化を推進するため、コストダウンを目標として掲げた技術開発プロジェクトであり、次の2つの技術開発を目指している。

### ①スラッジ・ゼロ・ディスチャージ技術の開発

汚泥の有効利用促進のため、下水汚泥を処分するコストよりも安いコストでリサイクルできる技術

### ②グリーン・スラッジ・エネルギー技術の開発

地球温暖化対策のため、下水汚泥等のバイオマスエネルギーを使って、商用電力価格と同等かそれよりも安いコストで電気エネルギーを生産できる技術

本プロジェクトは、平成15年12月に募集を開始し、選定された技術について、下水道技術開発プロジェクト (SPIRIT21) 委員会を中心に、スラッジ・ゼロ・ディスチャージ技

術開発研究委員会及びグリーン・スラッジ・エネルギー技術開発研究委員会の2つの開発研究委員会を立ち上げ、平成17年度から集中的に技術開発を実施したものである。

本技術評価書は、「グリーン・スラッジ・エネルギー技術開発研究委員会」において開発研究された「低ランニングコスト型混合消化ガス発電システム」について審議・審査して評価書としてまとめ、これを「SPIRIT21委員会」において評価したものである。

平成19年3月

下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）委員会  
委員長 松尾 友矩

# 委員会の構成

(順不同・敬称略)  
(平成19年3月13日 現在)

## 下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）委員会

委員長	東洋大学学長	松尾 友矩
委員	東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授	大村 達夫
委員	佐賀大学理工学部都市工学科教授	古賀 憲一
委員	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻教授	津野 洋
委員	東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授	花木 啓祐
委員	国土交通省都市・地域整備局下水道部長	江藤 隆
委員	国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究官	清水 俊昭
委員	大阪府都市整備部副理事兼下水道課長	北山 憲
委員	札幌市建設局理事	石倉 昭男
委員	東京都下水道局長	前田 正博
委員	横浜市環境創造局長	橋本 繁
委員	大阪市都市環境局理事	山口 登
委員	熊本市都市整備局長	松本 富士男
委員	日本下水道事業団技術開発部長	堀江 信之
委員	社団法人日本下水道協会理事兼技術部長	佐伯 謹吾
委員	社団法人全国上下水道コンサルタント協会専務理事	宮原 茂
委員	社団法人日本土木工業協会関東支部事務局長	阪本 修
委員	社団法人日本下水道施設業協会専務理事	小林 一朗
委員	(株)日立プラントテクノロジー 社会・産業システム事業本部 水処理システム事業部サービス部長	小林 茂樹

## グリーン・スラッジ・エネルギー技術開発研究委員会

委員長	東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授	大村 達夫
副委員長	京都大学大学院工学研究科附属 流域圏総合環境質研究センター教授	藤井 滋穂
委員	信州大学工学部社会開発工学科環境都市コース助教授	松本 明人
委員	国土交通省都市・地域整備局 下水道部下水道企画課下水道技術開発官	那須 基
委員	独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループリサイクルチーム上席研究員	尾崎 正明
委員	大阪府都市整備部下水道課課長補佐（計画グループ長）	稲垣 勝伸
委員	兵庫県県土整備部土木局下水道課主幹	戸島 透
委員	東京都下水道局計画調整部技術開発課長	川本 和昭
委員	横浜市環境創造局環境活動推進部部次長 （環境科学研究所担当課長）	小菅 博明
委員	大阪市都市環境局下水道部水質調査課担当係長	山本 高弘
委員	神戸市建設局西水環境センター西神施設課主幹	高場 徳就
委員	日本下水道事業団技術開発部総括主任研究員	島田 正夫
委員	社団法人日本下水道施設業協会技術部長	松尾 英介
委員	社団法人全国上下水道コンサルタント協会 下水道委員会委員長	渡辺 清風
委員	月島機械(株) 水環境事業本部 ソリューション技術部ソリューショングループリーダー	三井 美典
委員	J F Eエンジニアリング(株) 水エンジニアリング事業部 水システム技術部第一技術室副課長	山本 勝一郎
委員	(株)日立プラントテクノロジー 社会・産業システム事業本部 水処理システム事業部水処理システム技術統括部開発部長	江森 弘祥
委員	カワサキ環境エンジニアリング(株) 技術企画部主事	楠田 浩雅

# 第 I 編 技術評価の要約

## 1. 開発技術の概要

本章では、開発技術の目的、構成要素、特徴について述べる。

### 1.1 目的

本技術では、下水処理場を地域のバイオマス活用施設と位置付け、既設の消化タンクを使って生ごみ等の有機性廃棄物（以下、生ごみとする）を消化処理することにより、今まで未活用であったエネルギーをバイオガスとして取り出し発電により有効利用するものである。

従来のごみ焼却場における焼却処理に比べ本技術の処理費は安価であるため、これらの処理費・処分費を下水道事業に取り入れ、事業の採算性を向上させる。

また、バイオガス量が下水汚泥単独系に比べ増大するので、発電設備の容量が大きくなり、スケールメリットを活かした低コストのバイオガス発電を行うことができる。さらには、発生した消化ガスを生物脱硫の適用により従来技術よりも安価に精製するとともに、シロキサン除去も組み合わせることにより消化ガス発電の信頼性を向上させる。

前者と後者の組合せにて、下水汚泥の有効利用のコストを大幅に削減するものである。

### 1.2 構成要素

本技術の提案イメージを図1-1に示す。本技術は主に、①受入・前処理設備、②消化タンク設備、③消化ガス精製設備、④消化ガス発電設備、⑤脱水設備から構成され、それぞれの要素は以下の機能を有する。

#### ① 受入・前処理設備

生ごみ等の有機性廃棄物を受け入れ、消化タンクに投入するために前処理を行う設備である。

#### ② 既設消化タンク設備

投入した有機物を消化ガスに変換する設備である。本技術では既設備を利用する。

#### ③ 消化ガス精製設備

消化ガスを発電設備に使用するために、消化ガス中のシロキサンや硫化水素を除去し精製する設備である。

#### ④ 消化ガス発電設備

消化ガスを利用しガスエンジンやマイクロガスタービンにより発電を行う設備である。

#### ⑤ 既設脱水設備

消化タンクから発生した汚泥を脱水する設備である。本技術では既設を利用する。

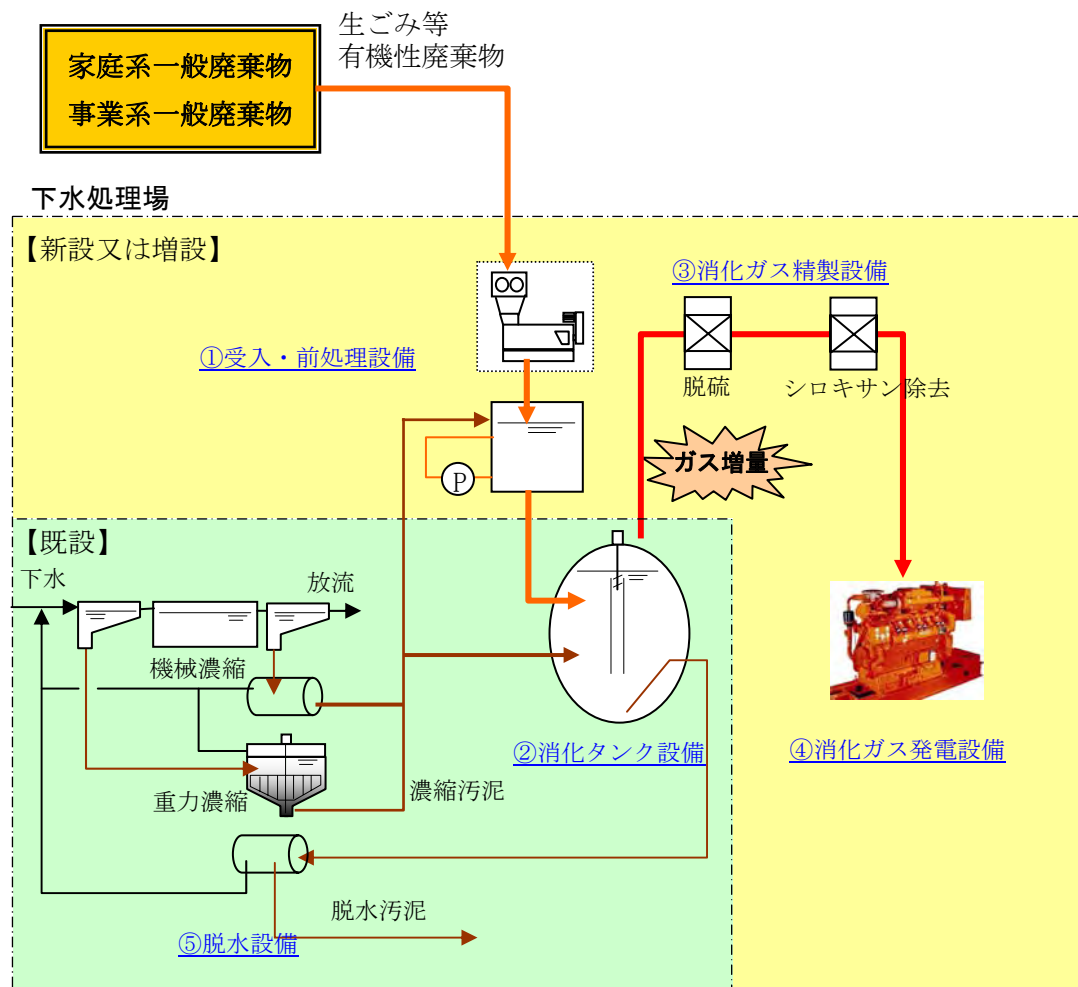


図 1-1 提案技術イメージ

### 1.3 本技術の特徴

本技術では、受け入れた生ごみを適切に前処理することにより、既設消化タンクを利用し消化ガス発生量を増大させることができる。さらには、発生した消化ガスを生物脱硫の適用により従来技術よりも安価に精製するとともに、シロキサン除去も組み合わせることにより消化ガス発電の信頼性を向上させる。

これら技術の組み合わせにより、従来の発電するだけの技術に比べ発電コストを低減することが可能である。



以下に本技術の具体的な特徴について述べる。

#### (1) 混合消化システム

下水汚泥（濃縮汚泥）に生ごみを混合するシステムである。生ごみは、固形物濃度も高く易分解性の有機物割合も下水汚泥に比べて多いため、ガス発生量の増大が期待できる。本提案技術では、前処理設備を新設し、下水処理場にて受入・前処理を実施後、消化タンクに投入する。

前処理設備では破袋分離機を導入し、異物の分離・除去を行う。異物除去後の生ごみは、濃縮汚泥とともに投入され混合タンク循環ポンプ（破砕ポンプ）により、湿式破砕を実施する。これにより、安定的に破砕・混合するとともに、一定量の濃縮汚泥を混合することにより、取り扱いを容易にする狙いもある。

#### (2) 消化ガス発電システム

大中規模処理場ではガスエンジンを、小規模処理場ではマイクロガスタービンの適用を検討する。これらの発電システムはすでに技術が確立されたものであるが、後述のシロキサン除去設備を適用することにより、さらに信頼性を増すことが可能である。

#### (3) 生物脱硫装置

生物脱硫装置は、微生物（硫黄酸化細菌）の機能を利用して、バイオガス中の硫化水素を酸化・除去するものであり、基本原理は下水処理場において硫化水素の除去で適用されている生物脱臭と同じである。本方式は、従来の乾式脱硫や湿式脱硫（アルカリ洗浄）に比べ、維持管理費が非常に低いことが特長であり、安全性、安定性にも優れる。国内の食品工場向け等での施工実績があり、現在、順調に稼働している。

本装置の適用により、脱硫コストを抑え発電コストを低減することが可能である。



図 1-2 生物脱硫装置



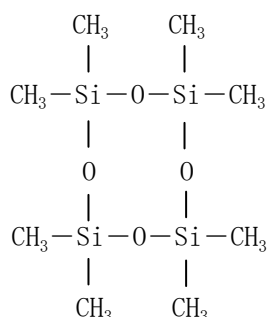
図 1-3 同 ろ材

#### (4) シロキサン除去設備

下水処理場から発生した消化ガスを利用した発電システムは，都市ガスを利用したものに比べ失火等が発生しやすく，また点検整備のインターバル時間を短くせざるを得ないなど課題がある。

これは，消化ガス中に存在する有機ケイ素（**図1-4**参照，以降シロキサンと称す）によるもので，これがエンジン燃焼室内で燃焼することでシリカ（ $\text{SiO}_2$ ---二酸化ケイ素）が生成し，ガスエンジンの部品寿命に悪影響を与えているものと判明している。

本提案技術では，消化ガス中のシロキサンを選択的に吸着する消化ガス精製剤を利用した，シロキサン除去設備を適用することによりこれらの問題を解決している。本装置の適用により，消化ガス中のシロキサンをほぼ完全に除去でき，消化ガス発電システムの信頼性を都市ガス発電システムなみにすることができるとともに，ガスエンジンやマイクロガスタービンの維持管理費を低減し，発電コストを抑えることが可能である。

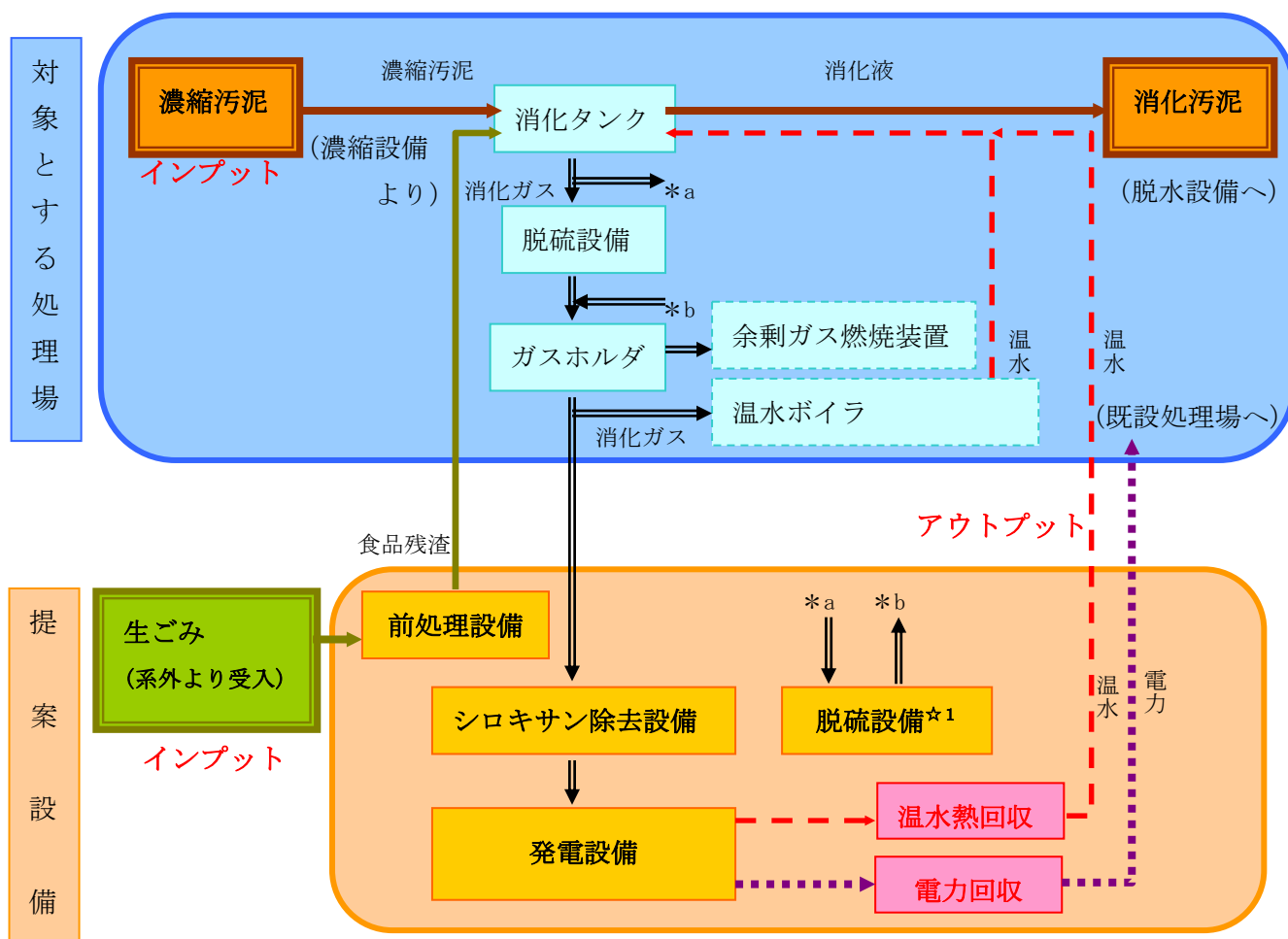


**図1-4** シロキサン（D4分子構造）



**図1-5** シロキサン除去設備

本提案技術の概略フローを図1-6に示す。



☆1 ケースA: 生ごみによるガス増分についてのみ乾式脱硫を設置  
 ケースB, C, D: 下水汚泥も含めガス全量を生物脱硫に置き換える

図1-6 概略フロー

## 2. 開発目標と評価結果

開発目標（必要性能）と評価結果を表2-1に示す。

表2-1 開発目標（必要性能）と評価結果

開発技術	グリーン・スラッジ・エネルギー技術				
技術名称	低ランニングコスト型混合消化ガス発電システム				
技術概要	その他バイオマスを受け入れて下水汚泥と合わせて消化し、消化ガス発生量を増加させ発電する技術。生物脱硫設備の導入によるコスト低減等も検討。				
技術提案者	JFE エンジニアリング株式会社，アタカ大機株式会社 鹿島建設株式会社，ダイネン株式会社				
評価の基本	<p>(1) 本プロジェクトの結果，開発目標に対しシステム全体として実用化できると判断され，国内に適用可能な下水処理場が複数想定しうる技術について，SPIRIT21 委員会において，開発研究結果コスト(条件と根拠が明示されたもの)を，技術提案に基づき委員会が適切と認めた目標コスト及びその評価方法をベースに，評価する。</p> <p>(2) コストの積算は，公共事業に準じて行う。</p> <p>(3) 開発者は，その技術による P F I 提案を合わせて行うことができる。</p> <p>(4) 開発者は，評価後 5 年間，その技術の適用状況について委員会に報告する。</p>				
開発目標	対象処理場の契約種別に応じた全国年間平均電力料金 9.32 円/kWh（高压 B，平成 17 年 10 月～平成 18 年 9 月）以下				
評価条件	規模	日最大処理水量 10 千 m <sup>3</sup> /日以上で消化設備のある下水処理場。			
	場所	全国			
	バイオマスの種類	食堂残渣，食べ残し等の有機性廃棄物を含む一般廃棄物（生ごみ）			
コスト算出条件	受入価格：16,000 円/t，生ごみからのガス発生量が 0.76m <sup>3</sup> /kg-VS 以上，生ごみの有機物分解率が 75.9%以上，脱水汚泥含水率が 80%以下，メタン濃度が 61.7%以上，ガスエンジン発電効率が 32.7%，マイクロスタービーン発電効率 23.5%（ともに発電端）				
評価結果	ケース	ケース A	ケース B	ケース C	ケース D
	処理場規模	100,000m <sup>3</sup> /日	100,000m <sup>3</sup> /日	50,000m <sup>3</sup> /日	20,000m <sup>3</sup> /日
	生ごみ投入量	30 t/日	30 t/日	20 t/日	13 t/日
	濃縮汚泥投入量	500 m <sup>3</sup> /日	500 m <sup>3</sup> /日	250 m <sup>3</sup> /日	100 m <sup>3</sup> /日
	ガス発電形式	ガスエンジン	ガスエンジン	ガスエンジン	マイクロスタービーン
	脱硫方式	乾式脱硫	生物脱硫	生物脱硫	生物脱硫
	発電コスト	<b>6.0 円/kWh</b>	<b>3.7 円/kWh</b>	<b>4.8 円/kWh</b>	<b>5.0 円/kWh</b>
	上記条件においてコストが 9.32 円/kWh 以下と見込まれ，開発目標を達成したと見込まれる。				

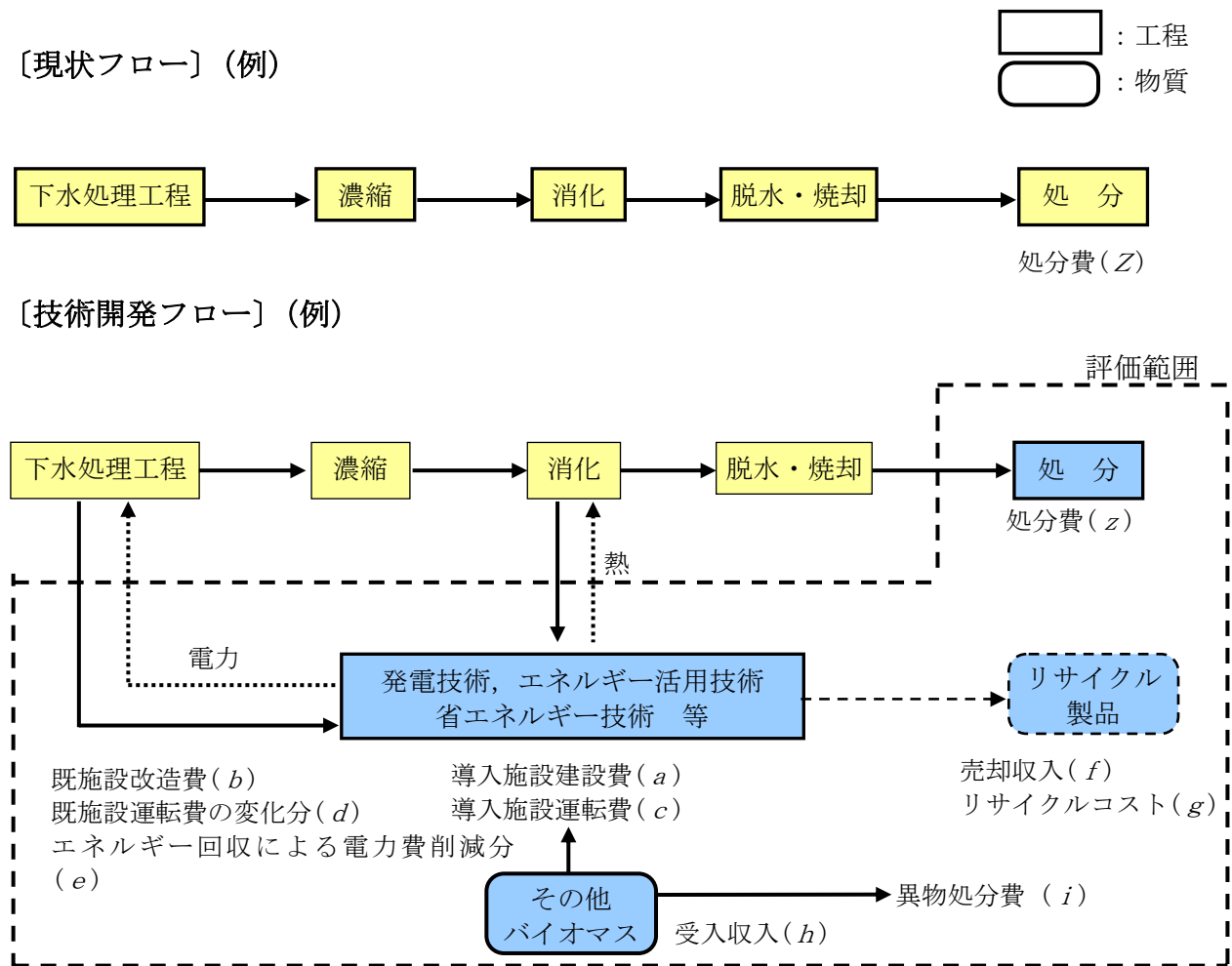
平成 19 年 3 月現在

### 3. 評価方法

本技術のコスト評価は、以下のとおりとした。

#### 3.1 コスト積算の考え方

コスト積算範囲を図3-1に示す。



下水汚泥等のバイオマスを使い、買電と同等以下のコストで電気エネルギーを生産できる技術の開発。

$$\text{電気エネルギー生産コスト} = a + b + c + d - e - f + g - h + i + z - Z < P \cdot Q$$

すなわち、

$$(a + b + c + d - e - f + g - h + i + z - Z) \div Q < P$$

全国年間平均電力料金 (目標コスト)

Q: 発電電力量 (送電端)

図3-1 コスト積算の基本的な考え方

### 3.2 コスト積算の範囲

ケースAのコスト積算の範囲を図3-2, ケースB, C, Dのコスト積算の範囲を図3-3に示す。

※) 太線で囲った設備は新設

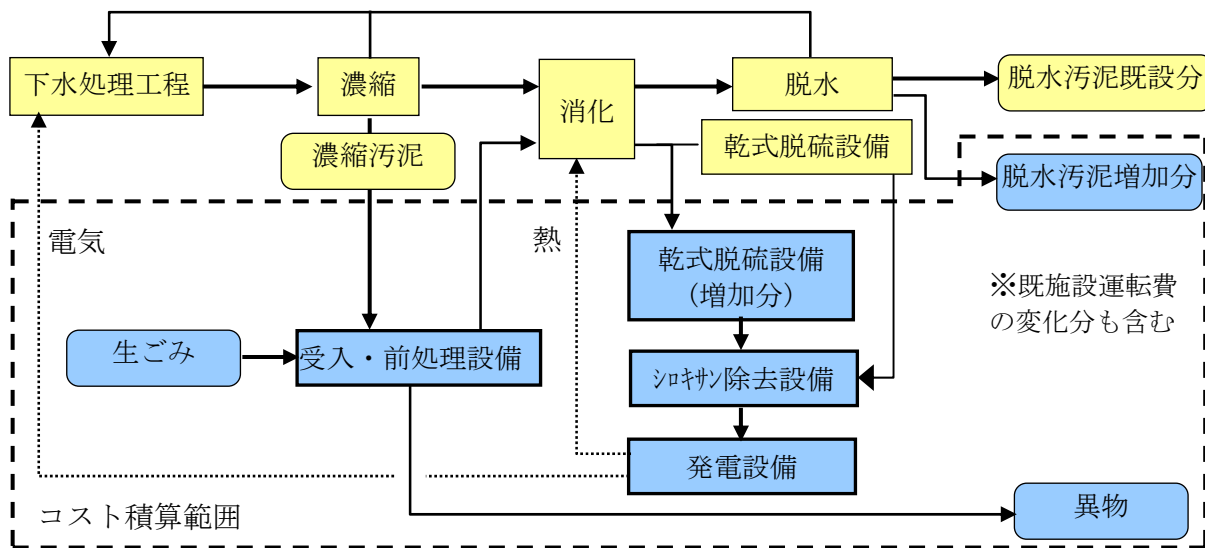


図3-2 ケースA コスト積算の範囲

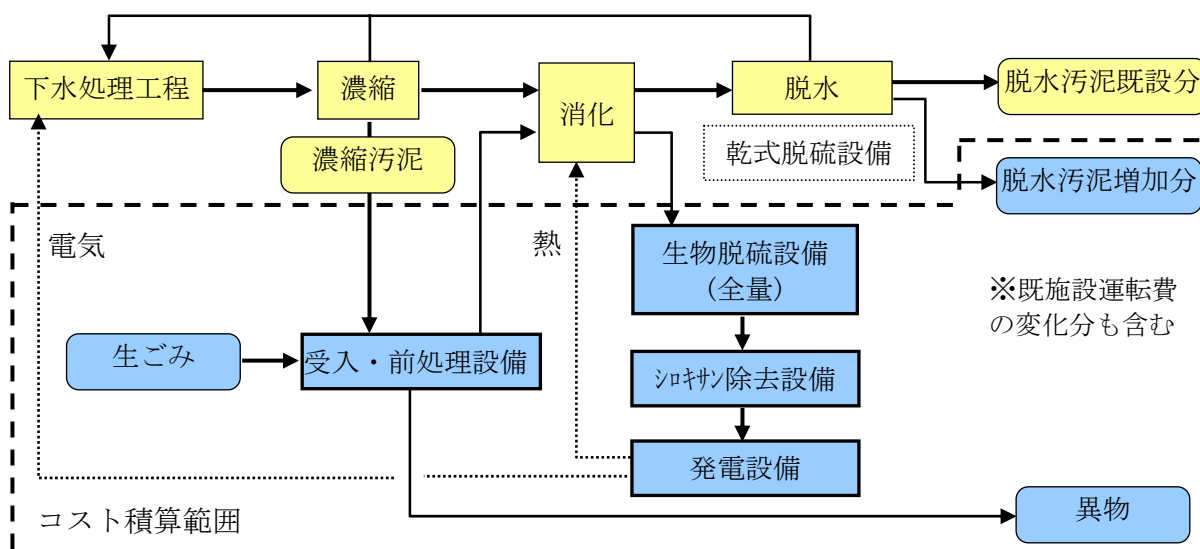
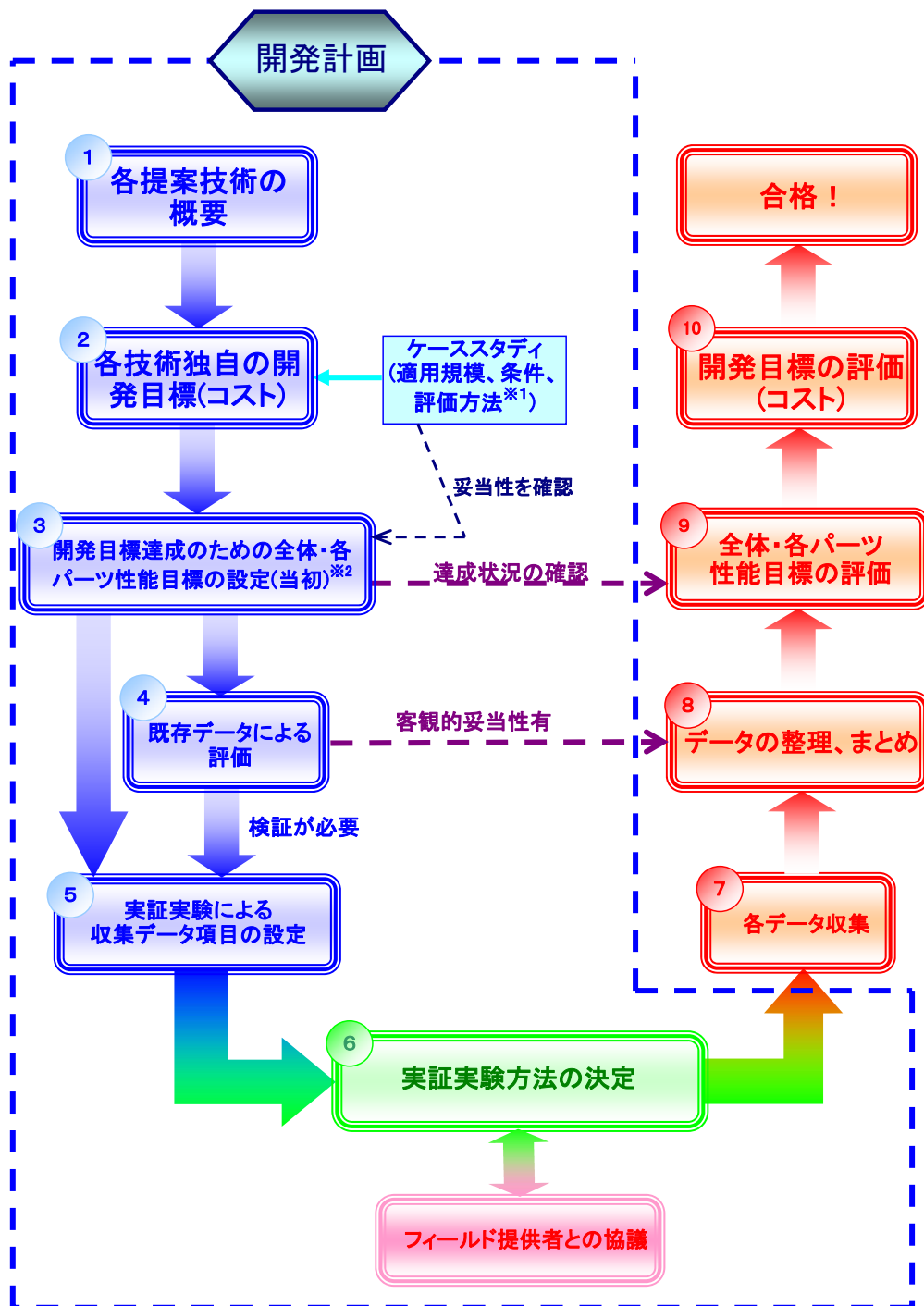


図3-3 ケースB, C, D コスト積算の範囲

### 3.3 評価の判断基準

LOTUS Project 評価までの基本フロー図を図3-4に示す。



注記: ① ※1 において各提案技術について、最終コスト評価時の具体的判断基準が必要。  
 ② 記述されている妥当性の検討以外に、各ステップにおける妥当性の検討は必要。  
 ③ ※2 において性能目標は当初の設定であり、実証実験等の結果により見直すことになる場合がある。この性能目標の見直しにより、目標コストを満足すれば、LOTUS Projectとしては合格となる。

図3-4 LOTUS Project 評価までの基本フロー図

#### 4. 各パーツ目標及び結果

本技術の評価に当たっては、開発目標を達成するために重要となる項目や設備性能などの目安となるパーツ目標を設定し、検証する必要がある。各パーツの設定目標と既存データ又は実証実験での検証結果を表4-1に示す。

表4-1 パーツ目標及び結果

大項目	小項目	目標	目的	実証方法	結果
受入・前処理設備	前処理設備後の原料粒径	3mm以下	スクリーンを通過し消化反応を促進させる	実証実験	0.07mm以下
消化タンク設備	濃縮汚泥に対する生ごみ投入率	13%で発酵阻害無し	発酵の安定性	実証実験	阻害無し
	生ごみからのガス発生量	0.67Nm <sup>3</sup> /kg-VS以上	消化ガス量の確保	実証実験	0.760Nm <sup>3</sup> /kg-VS (0.693～0.879 Nm <sup>3</sup> /kg-VS)
	生ごみの有機物分解率	75%以上	消化ガス量の確保	実証実験	75.9% (69.2～79.2%)
	メタン濃度	60%程度	消化ガスの質の確保	実証実験	61.7% (50～72%)
消化ガス精製設備	脱硫設備出口硫化水素濃度	10ppm以下	発電設備の保護	実証実験	10ppm以下
	シロキサン除去設備出口シロキサン濃度	10mg/Nm <sup>3</sup> 以下	発電設備の保護	既存データ	10mg/Nm <sup>3</sup> 以下
消化ガス発電設備	ガスエンジン発電効率	33%以上	発電量の確保	既存データ	32.7%
	マイクロガスタービン発電効率	24%以上	発電量の確保	既存データ	23.5%
脱水設備	脱水汚泥の含水率	既設と同程度	既設備に影響を与えないため	実証実験	既設と同等



## 5. 本技術の導入効果と将来の展望

本技術の導入効果と将来の展望を表5-1に示す。

表5-1 本技術の導入効果と将来の展望

省エネルギー効果	処理場規模 100,000m <sup>3</sup> /日（濃縮汚泥量 500m <sup>3</sup> /日）において、生ごみを投入する前に比べ、約 900 万 kWh/年の電力使用量を削減することができる。
地球温暖化ガス削減効果	処理場規模 100,000m <sup>3</sup> /日（濃縮汚泥量 500m <sup>3</sup> /日）において、生ごみを投入する前に比べ、地球温暖化ガスを約 2,500 t-CO <sub>2</sub> /年 削減することができる。
その他の項目における技術の導入効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生ごみ等のその他バイオマスは、本技術の導入により、下水処理場を活用して低コストでエネルギー化できる。</li> <li>よって、本技術は、地域のバイオマス（下水汚泥、生ごみ、食品残渣、畜産糞尿など）資源化の、最もコスト的に有利なトータルシステムを提供できる。</li> <li>・生物脱硫装置とシロキサン除去装置の導入により品質の安定した消化ガスが確保される。本技術では発電利用であるが、地域の実情に応じて、その他のエネルギー利用の提案が可能である。</li> </ul>
将来の展望	<p>本技術は、下水処理場を活用した地域のバイオマス資源化に、極めて有利なシステムを提供するものである。以下のような趨勢もあり、今後本技術は広く適用検討されるものと考えている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・下水道における電力消費量は、約 5×10<sup>9</sup>kWh/年と我が国の電力量の 0.6%を消費しており、普及の向上や処理の高度化に伴い今後も更なる増加が見込まれている。このことから、「下水道ビジョン 2100」では、省エネルギー対策、エネルギー自立型下水処理場の構築のために、下水道を資源循環の中核として活用することを掲げている。</li> <li>・ディスポーザー排水の下水道への直接受け入れについて、その影響判定の考え方が国土交通省により整理されたことから、今後分流式下水道地域においてはディスポーザーと下水道ネットワークを活用した生ごみの収集、資源化が普及する見込みである。</li> </ul>

## 6. 留意事項

本技術の導入に当たっては、以下のことを留意する必要がある。

### (1) 土木・建築工事について

・本評価書では、地盤が良質であると仮定し直接基礎とした。地盤条件によっては、建設費の見直しが必要となる。

### (2) 機械・電気設備工事について

・中央監視装置の改造等、既存監視システムの改造費は積算範囲から除外したが、中央にて本設備の監視を行う場合には、別途改造工事が必要となる。

・本設備導入による脱水設備に対する汚泥の増加分に対しては、脱水機運転時間の延長を想定しコストを算出しているが、既存設備の能力によっては脱水設備の増設が必要になる場合もある。

### (3) 消化ガス発電設備について

・下水処理場に対し、系統連系により発電設備を導入する場合には、電力会社との系統連系に関する協議が必要となり、必要に応じ受電部の改造が生じる場合がある。当該改造工事は、その有無も含め導入する下水処理場により異なるため、別途考慮する必要がある。

### (4) 生ごみなどの受入について

・法令による諸手続きなどが必要な場合には、環境部局との調整が必要である。

### (5) 国庫補助について

・「発電」「脱硫」については下水道法施行令第24条の2第1項に定める公共下水道の補助率（10分の5.5）とする。「受入・前処理」については適切な補助率とし、今回の積算では、一例として3分の1を想定する。