

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

消化促進による汚泥減量と消化ガス発電

に係る技術評価書

技術提案者 株式会社日立プラントテクノロジー  
栗田工業株式会社

平成20年1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「消化促進による汚泥減量化と消化ガス発電」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20年1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20年1月9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	藤生 和也
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	小松崎 隆
委員	大阪市建設局理事	永澤 章行
委員	熊本市都市建設局長	松本 富士男
委員	日本下水道事業団技術開発部長	河井 竹彦
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 環境システム事業本部 水処理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	京都大学大学院地球環境学堂環境調和型産業論教授	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准教授	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	三宮 武
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）	小林 保
委員	兵庫県県土整備部土木局下水道課副課長	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環境科学研究所担当課長	川井 英夫
委員	大阪市建設局下水道河川部担当係長	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) 研究開発部開発企画グループ 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 環境システム事業本部 事業企画本部技術開発統括部システム開発部長	江森 弘祥
委員	カワサキプラントシステムズ(株) 化学プラント部主事	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

従来の嫌気性汚泥消化処理では、下水汚泥中に生物分解しにくい不活性な有機物が多く含まれるために、消化率（汚泥有機物の分解率）は 50%程度と低く、発生ガス量は少ないものである。そのため、現状、消化ガスによるガス発電は積極的に利用されていない。

本技術では、「オゾンを用いた消化促進装置」を従来の嫌気性消化処理に組み合わせて、従来よりも汚泥処分量を減量化するとともに、増加する消化ガスを燃料としたガス発電を行うことで、システム全体で発電コストの低減を図るものである。

### 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嫌気性消化槽設備（既設）、②固液分離設備、③オゾン処理設備、④消化ガス精製設備、⑤消化ガス発電設備、⑥脱水設備（既設）から構成され、それぞれの構成要素は以下の機能を有する。

#### ①嫌気性消化槽設備（既設）

投入した汚泥中の有機物を消化し、汚泥を減量すると共に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。

#### ②固液分離設備

高濃度消化運転を行うために、消化汚泥の一部及び消化槽投入前の既設濃縮汚泥を混合して固液分離する設備と、余剰消化汚泥の引抜きにおいて無機固形物を優先的に排出する設備である。遠心分離機、凝集剤添加装置などにより構成される。

#### ③オゾン処理設備

消化汚泥の一部をオゾン処理し、汚泥中の不活性有機物を生物分解可能な形態に改質する設備であり、前曝気槽、オゾン反応槽、気液分離槽、オゾン発生機、脱臭器などにより構成される。

#### ④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、消化ガス中に含まれる硫化水素やシロキサンを脱硫剤やシロキサン吸着剤（活性炭）により除去し、ガス精製する設備である。

なお、本技術では、従来システムに比べて消化ガス発生量が増加するが、消化槽への汚泥の投入を均一化させて行うため、消化ガス発生量のピーク値は従来システムに比べて同等以下になる。そこで、本技術の脱硫装置については既設備を利用する。

一方、シロキサン除去装置については発電に使用するガス量に対応したものを新設する。

⑤消化ガス発電設備

上記④で精製された消化ガスを利用し、ガスエンジンにより発電を行う設備であり、電力と熱（温水、蒸気）を製造する。

⑥脱水設備（既設）

上記②に示した汚泥引抜き用の遠心分離機により排出される、無機固形物が多く含まれた余剰消化汚泥を脱水する設備である。本技術では既設を利用する。

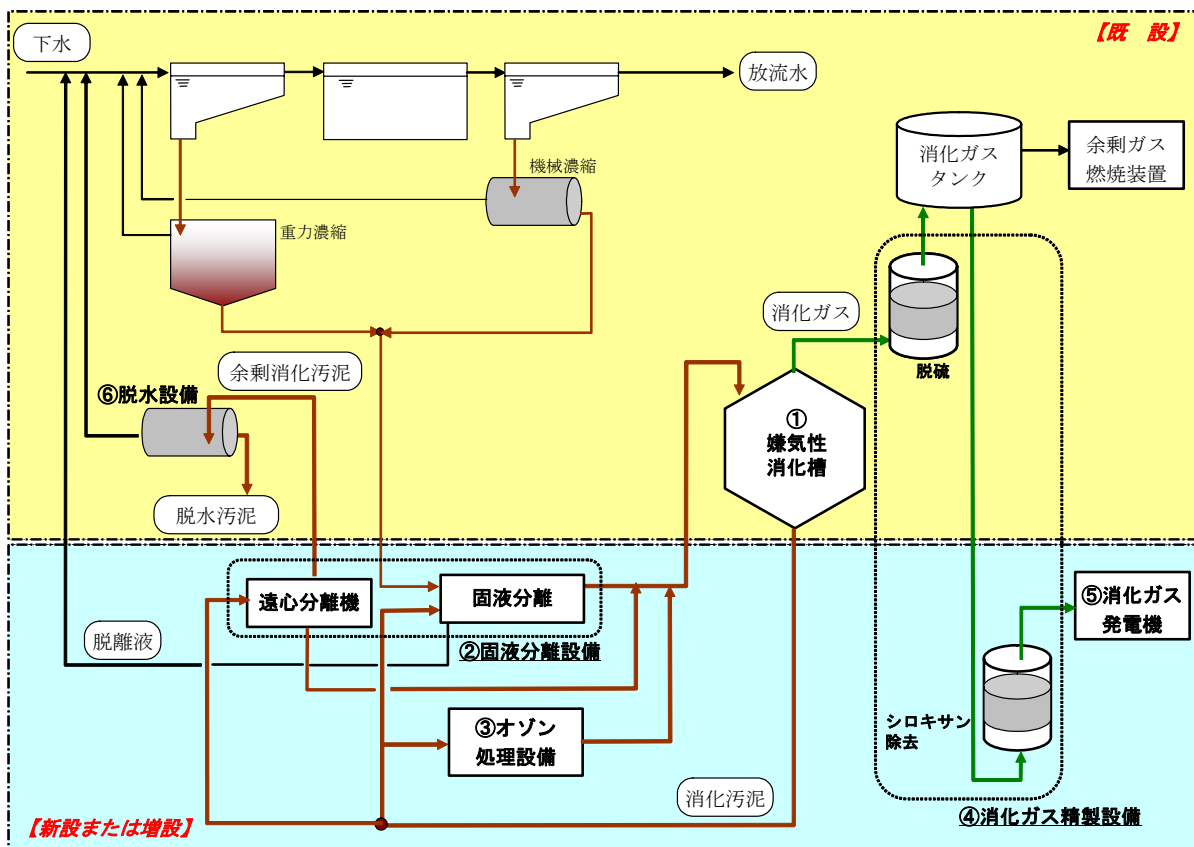


図 1-1 提案技術イメージ

嫌気性消化槽の構成  
 ケース 1：中温消化  
 ケース 2：高温消化＋中温消化

1.3 本技術の特徴

本技術では、従来の嫌気性消化に消化汚泥のオゾン処理と固液分離を付加して消化を促進することで、下水汚泥中の有機物がより分解されるとともに、余剰消化汚泥の引抜きにおいて遠心分離により無機固形物を優先的に排出し、脱水汚泥の含水率が低減されるため、汚泥処分量を減量化できる。また、生ごみなど下水汚泥以外のバイオマスを受け入れることなく、消化ガス発生量を増加させることができる。

一方、消化ガス発生量が増加することで、消化ガス発電のスケールメリットが得られ、



シロキサン除去などの消化ガス精製設備を組み合わせることにより、安定した消化ガス発電が可能となる。

本技術は、このようにシステム全体で発電コストの低減化を図ったものである。

以下に各構成要素・設備の特徴について述べる。

### (1) オゾン処理設備

図1-2にオゾン処理設備フローを示す。消化汚泥の一部をオゾン処理し、汚泥中の不活性有機物を生物分解可能な形態に改質させた後、消化槽へ返送する。これにより、従来システムに比べて、消化率や消化ガス発生量が向上する。

なお、気液分離槽で排オゾンと処理汚泥を分離することで、消化槽への酸化剤（排オゾン）混入を防止するとともに、排オゾンを分解・脱臭し、無害化してから大気放散するなど安全管理を図っている。

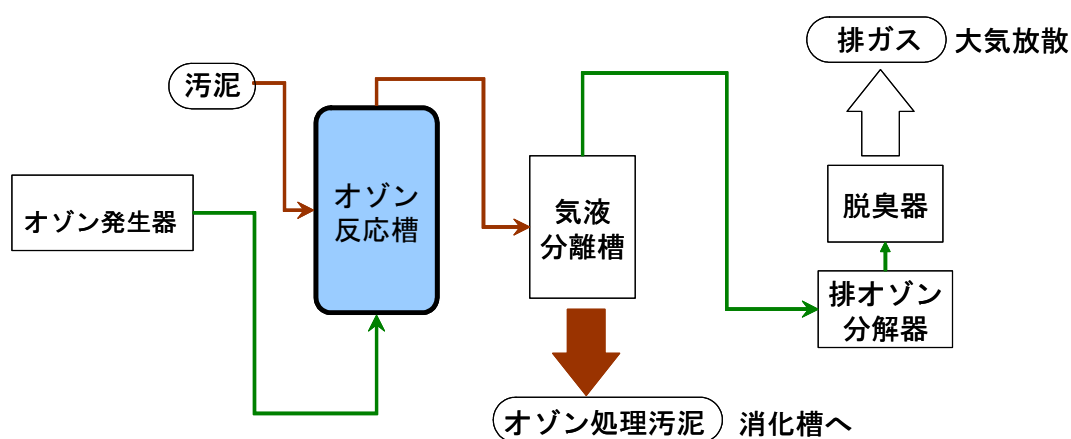


図1-2 オゾン処理設備フロー

### (2) 固液分離設備

消化汚泥の一部を遠心分離機により固液分離し、分離された汚泥を消化槽へ返送するため、高濃度消化の運転が行われるとともに、消化槽内でのSRT（固形物滞留時間）も延長化し、消化反応の高速化が可能となる。

また、余剰消化汚泥の引抜きにおいては、凝集剤を添加せずに低い固形物回収率での遠心分離を行うことにより、比重の大きい無機固形物を優先的に排出するため、脱水汚泥の含水率が低下し、汚泥処分量をさらに減量化できる。

### (3) 消化ガス精製・消化ガス発電設備

従来システムに比べて増量した消化ガスを燃料とするため、発電機の規模を大きくすることが可能となり、スケールメリットが得られる。また、消化ガス中の不純物（シロキサン〔有機ケイ素〕、硫化水素など）を除去した上で、ガス発電を行うため、発電機の稼働状態を従来よりも高めることができ、安定したガス発電が可能となる。

#### (4) 消化槽設備

本技術では、消化槽の構成として、**図 1-3**に示す 2 ケースを適用する。それぞれの特徴として、ケース 1：中温消化プロセスは、国内で多く採用されている中温消化への適用を考慮したものである。一方、ケース 2：高温消化と中温消化の組合せプロセスは、複数の消化槽があるケースに対して、中温消化プロセスよりさらに消化効率を高めることで、より高負荷の消化槽においても十分な消化率の向上とそれに伴うガス発生量の増加効果を得ることができる。

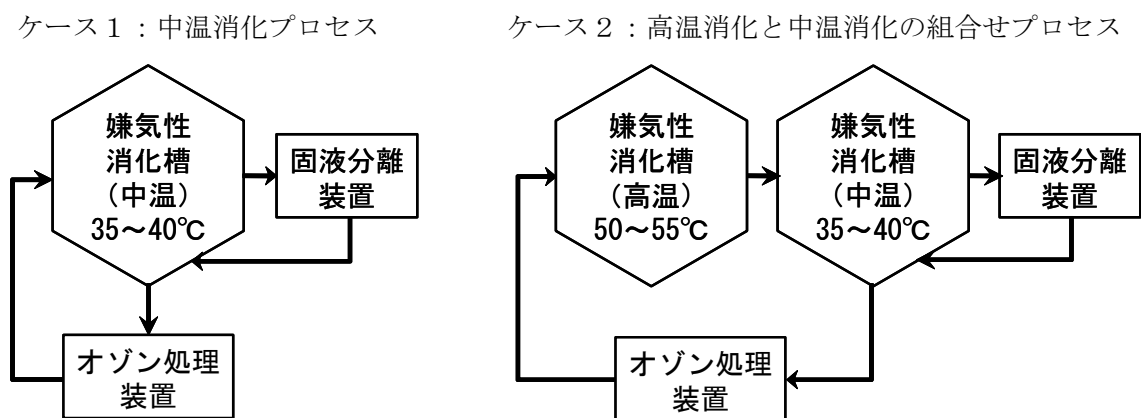


図 1-3 消化槽の構成

## 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**に記した条件において、発電コストは9.32円/kWh以下と試算され、開発目標を達成したと見込まれる。

なお、本技術では、既施設からの投入汚泥を消化汚泥の一部と混ぜて固液分離し、濃縮された汚泥を消化槽へ投入する。そのため、投入VS量に対して消化槽容量が大きい（消化槽VS負荷が低い）方が、見かけの消化日数は長くなり、固形性有機物減少率が向上する。

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	消化促進による汚泥減量と消化ガス発電						
技術概要	消化汚泥をオゾン処理と固液分離することにより消化を促進し、汚泥の減量化を図るとともに、消化ガス発生量を増加させ発電する技術。						
技術提案者	株式会社日立プラントテクノロジー 栗田工業株式会社						
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（高圧 B，平成 17 年 10 月～平成 18 年 9 月）以下						
評価条件	規模	流入水量 43,000 m <sup>3</sup> /日(汚泥量 7.74 t-TS/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	-					
コスト算出条件	汚泥処分単価：16,000 円/t， 既設消化槽投入汚泥 VS/TS 比：83% 初沈汚泥と余剰汚泥の混合比率：58：42（TS 比）， 既設消化日数：30 日， 既設固形性有機物減少率：50%， 既設脱水汚泥含水率：83%， 汚泥処分形態：脱水汚泥， ガスメタン濃度：60%， 発電設備の発電効率：32.1%（発電端）						
評価結果	プロセス	中温消化プロセス			高温消化と中温消化の組合せプロセス		
	処理場規模	53,000 m <sup>3</sup> /日		43,000 m <sup>3</sup> /日	53,000 m <sup>3</sup> /日		43,000 m <sup>3</sup> /日
	発生汚泥量	9.54 t-TS/日		7.74 t-TS/日	9.54 t-TS/日		7.74 t-TS/日
	消化槽 VS 負荷	1.1 kg/m <sup>3</sup> ・日	0.97 kg-VS/m <sup>3</sup> -消化槽・日		1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> -消化槽・日		0.97 kg/m <sup>3</sup> ・日
	消化槽容量	7,155 m <sup>3</sup>	8,178 m <sup>3</sup>	6,633 m <sup>3</sup>	7,155 m <sup>3</sup>	5,805 m <sup>3</sup>	6,633 m <sup>3</sup>
	固形性有機物減少率	80.0%	80.5%	80.5%	80.2%	80.2%	83.1%
	脱水汚泥含水率	69.5%	68.9%	68.9%	68.4%	68.4%	65.3%
	発電コスト	8.94 円/kWh	4.95 円/kWh	9.29 円/kWh	4.06 円/kWh	8.98 円/kWh	6.77 円/kWh
	上記条件において、コストが 9.32 円/kWh 以下となり、開発目標を達成した。						

平成 20 年 1 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

コスト積算の範囲を図3-1に示す。

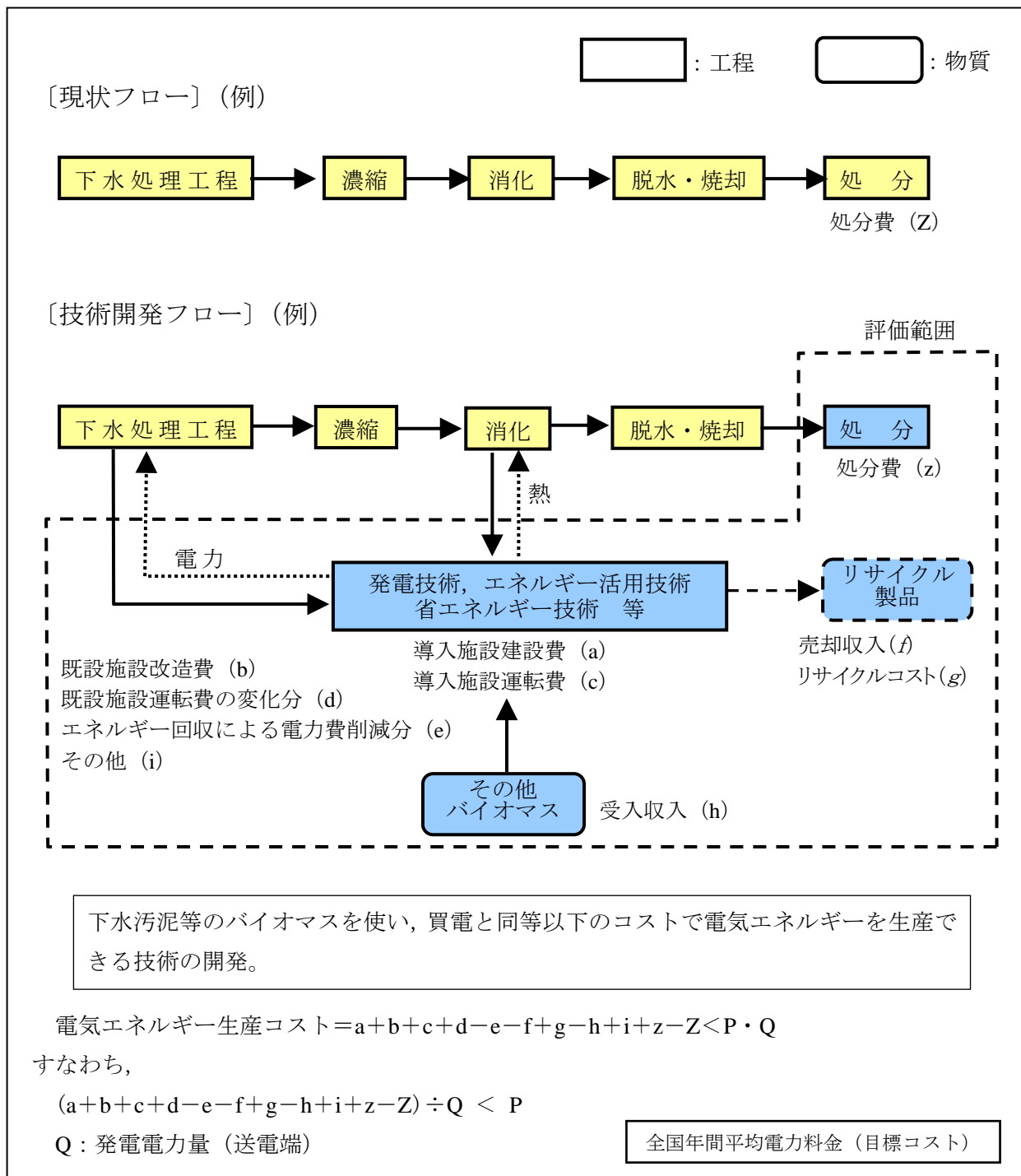


図3-1 コスト積算の基本的な考え方

### 3.2 コスト積算の範囲

コスト積算の範囲を図3-2に示す。

なお、図3-2の破線で示す範囲内にかかる設備費、運転費及び既設処理の運転費変化分がコスト積算の範囲である。

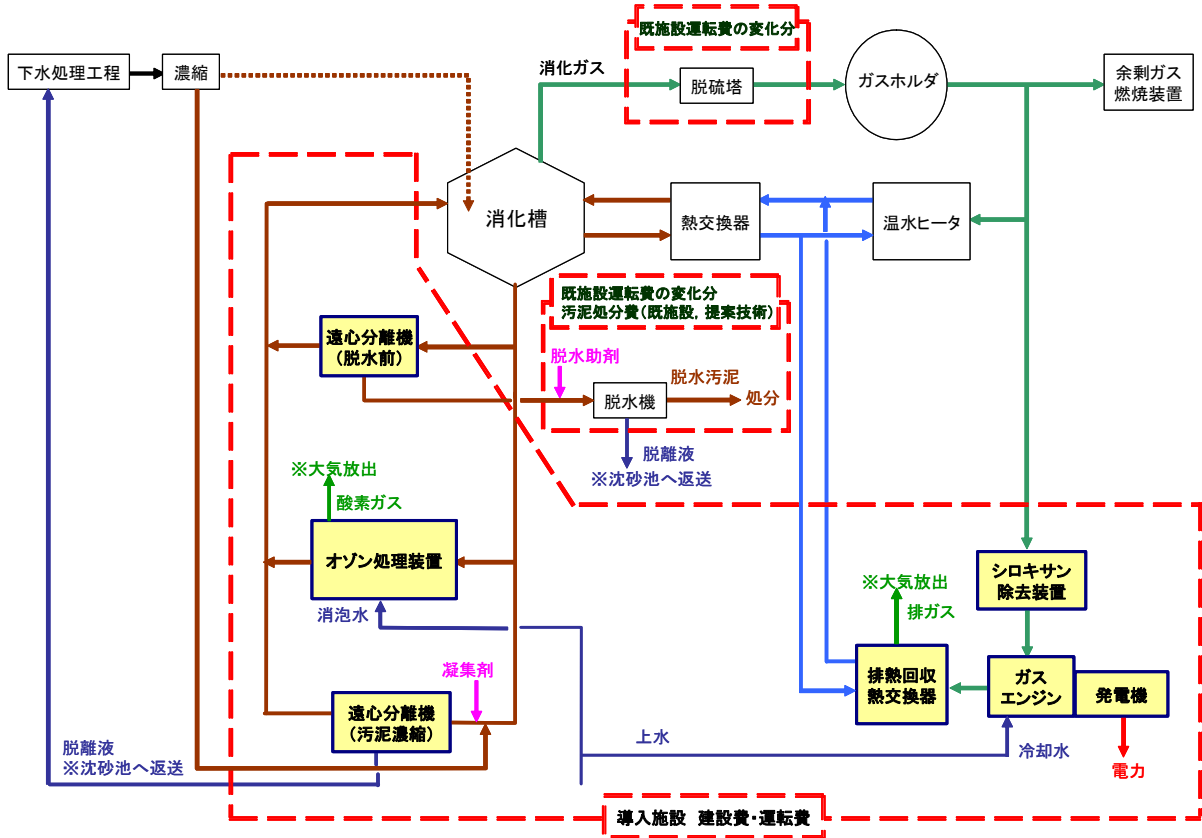
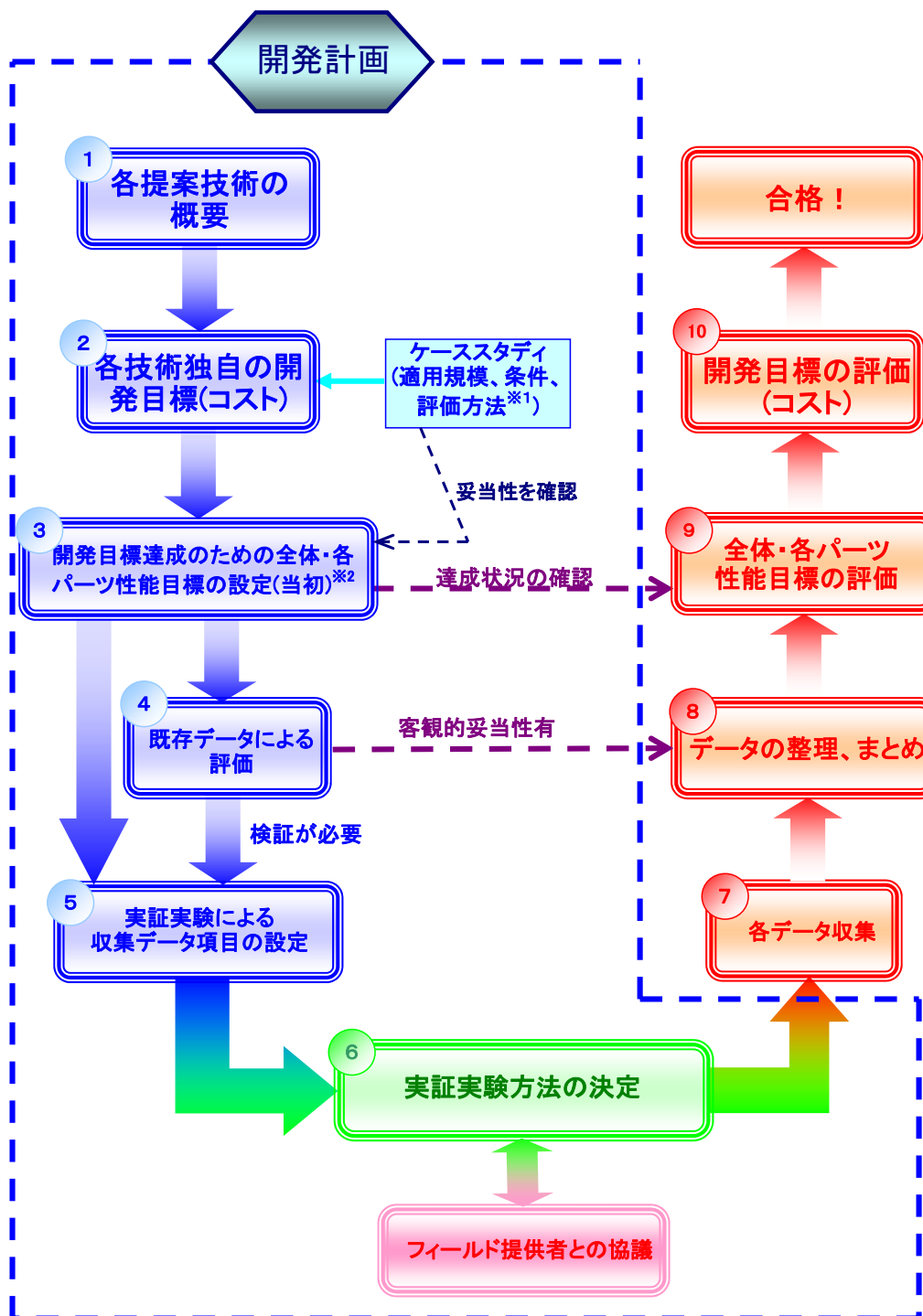


図3-2 コスト積算の範囲

### 3.3 評価の判断基準

LOTUS Project 評価までの基本フロー図を図3-3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3-3 LOTUS Project評価までの基本フロー図

#### 4. プロセス全体・各パーツでの性能目標及び検証結果

本技術の評価に当たっては、開発目標を達成するためのプロセス全体での性能目標、及び、重要となる項目や設備性能などについて目安となるパーツ目標を設定し、検証する必要がある。プロセス全体での性能目標と検証結果を表4-1に、各パーツ目標と既存データ又は実証実験での検証結果を表4-2に示す。

表4-1 プロセス全体での性能目標及び検証結果

項目	目標値	検証方法	検証結果
脱水汚泥処分量削減率	60%以上	既存データならびに 実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 70.5% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)  <b>【高温+中温プロセス】</b> 71.2% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)
発電電力量	0.158 kWh/m <sup>3</sup> -流入下水以上	既存データならびに 実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 0.178 kWh/m <sup>3</sup> -流入下水 (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)  <b>【高温+中温プロセス】</b> 0.176 kWh/m <sup>3</sup> -流入下水 (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)



表4-2 各パーツ目標及び検証結果

大項目	小項目	目標値	目的	検証方法	検証結果
消化槽設備 固液分離設備 オゾン処理設備	固形性有機物 減少率	平均 76% 程度以上	・消化ガス量 の確保 ・汚泥処分費 の低減	既存データ ならびに 実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 80.0% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日) <b>【高温+中温プロセス】</b> 80.2% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)
	メタン濃度	60%程度	消化ガスの 質の確保	実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 従来プロセスと同等によ り, 一般的なメタン濃度 60%を確保可 <b>【高温+中温プロセス】</b> 従来プロセスと同等によ り, 一般的なメタン濃度 60%を確保可
消化ガス 精製設備	燃料消化ガス 性状 (硫化水素)	10 ppm 以下	発電設備の 保護	実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 10 ppm 以下 <b>【高温+中温プロセス】</b> 10 ppm 以下
	燃料消化ガス 性状 (シロキサン)	0.5 mg/Nm <sup>3</sup> 以下	発電設備の 保護	実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 0.5 mg/Nm <sup>3</sup> 以下 <b>【高温+中温プロセス】</b> 0.5 mg/Nm <sup>3</sup> 以下
消化ガス 発電設備	発電効率 (発電端)	29%程度以上	発電量の 確保	既存データ (カタログな ど)	<b>【調査結果】</b> 32.1% (負荷率 100%時)
脱水設備	脱水汚泥 含水率	平均 72% 程度以下	汚泥処分費 の低減	既存データ ならびに 実証実験	<b>【中温消化プロセス】</b> 69.5% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日) <b>【高温+中温プロセス】</b> 68.4% (負荷 1.1 kg-VS/m <sup>3</sup> ・日)

## 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	<p>処理規模 53,000 m<sup>3</sup>/日（濃縮汚泥量 9.54 t-TS/日，投入汚泥濃度 4.0%）の下水処理場に本技術を導入すると，従来システムと比較して，以下のとおり電力消費量を削減することができる。</p> <p>○中温消化プロセス : 約 60 万 kWh/年 ○高温消化+中温消化プロセス : 約 130 万 kWh/年</p>
地球温暖化ガス削減効果	<p>処理規模 53,000 m<sup>3</sup>/日（濃縮汚泥量 9.54 t-TS/日，投入汚泥濃度 4.0%）の下水処理場に本技術を導入すると，従来システムと比較して，以下のとおり地球温暖化ガス排出量を削減することができる。</p> <p>※脱水汚泥の処分方法は様々あるため，以下の数値は脱水汚泥の最終処分による地球温暖化ガス排出を含んでいない。本技術では脱水汚泥の含水率が著しく低減されるため，焼却による最終処分を実施した場合には，補助燃料等を大幅に削減でき，地球温暖化ガス排出量の削減効果は以下よりも高くなる。</p> <p>○中温消化プロセス : 約 50 t-CO<sub>2</sub>/年相当 ○高温消化+中温消化プロセス : 約 320 t-CO<sub>2</sub>/年相当</p>
その他の項目における技術の導入効果	<p>○オゾン処理設備及び固液分離設備により，従来システムに比べて，汚泥処分量（費）を大幅に削減することができる。</p> <p>○投入汚泥を固液分離してから消化槽に投入するため，消化槽の加温に必要な熱量が少なくて済む。それゆえ，発電設備の回収廃熱により消化槽の加温が可能となり，既設加温用ボイラーの運転が不要である。</p>
将来の展望	<p>○本技術は，下水汚泥だけを対象とした技術であり，今までの下水道事業の枠組み内で技術適用することができるため，早期適用が期待される。</p> <p>○本技術は，下水汚泥の消化効率の促進及び脱水汚泥の低含水率化をキーポイントとしたものであり，発電事業を行わない処理場においても本技術の一部の適用が期待される。</p> <p>○将来的に期待されている生ごみ等のバイオマスに対しても，別途技術の「生ごみ等のその他バイオマスの受入れ」を組み合わせ対応することが可能である。</p>

## 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場合がある。

### (2) 機械・電気設備工事について

- 本設備の導入に当たり、既設脱水設備の仕様によっては、脱水汚泥を低含水率にする運転を行おうとすると機械的に問題を生じて、安定運転ができない場合がある。
- 本設備の導入に当たり、脱水設備に使用される凝集剤種類が不適切になる場合があり、そのような場合には、凝集剤種類の選定見直しが必要となる。
- 中央監視装置の改造など、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。
- その他既設の状況や周辺環境によっては、装置の機種、仕様や積算範囲外の作業など見直しが必要となる場合がある。

### (3) 消化ガス発電設備について

○下水処理場に対して、系統関係により発電設備を導入する場合には、電力会社との系統関係に関する事前協議が必要であり、必要に応じて受変電設備の改造を求められる場合がある。当該改造工事は、その有無を含め導入する下水処理場により異なるため、積算範囲から除外しており、別途考慮する必要がある。

### (4) 国庫補助について

○「発電」「脱硫・ガス精製」「オゾン処理」「固液分離」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。