

下水汚泥のエネルギー利用 に関する調査

1. はじめに

我国の電力消費量は年々増加しているが、それに対する供給能力は極めて逼迫しており、夏期のピーク時には綱渡りの様相を呈している。このような状況を考えると、今後は下水処理場のような大口需要家サイドで、本来は瞬間停電時の緊急的避難用に用いられてきた自家用発電設備を常用発電設備として考えていく必要があるものと考えられる。また、オンサイトの発電であれば、従来発電所で有効利用されていない排熱の有効利用も図れるものと考えられる。

このような背景のもとに本調査では、自家発電の積極的利用と排熱利用による汚泥処理の効率化に関する調査を行うものである。調査内容は、買電に頼らず処理場内に発電設備を設置した場合の特質、とりわけ経済性について検討調査する。即ち、汚泥を燃料あるいは有機質肥料とするのに必要なエネルギーを発電排熱から得るものとして、処理規模別、汚泥処理フロー別に必要な発電設備を含めて、建設費及び維持管理費を従来の方式と比較する。

2. 調査の方法

(1) エネルギー供給系統（従来型と自立型）

従来型のエネルギー供給系統は、処理施設内の電力需要を全て電力会社の買電により賄い、買電の支障時にのみ非常用発電設備から電力を受けるものである。これに対して自立型エネルギー供給系統は、処理施設内の電力需要を全て発電設備により供給し、

総合的なエネルギー効率を上げるため、発電設備排熱を有効に利用するものである。従来型のエネルギー供給系統と自立型のエネルギー供給系統を各々図-1及び図-2に示す。

(2) 調査検討のフロー

検討にあたっては、まず自立型システムとして考えられる汚泥処理フローを想定し、流量 100,000 m³/日の規模の施設について熱収支計算を行い、この結果から可能性のある処理フローを抽出した。最後に、これらのフローについて経済性の検討を行った。図-3に調査フローを示す。

図-1 従来型のエネルギー供給系統

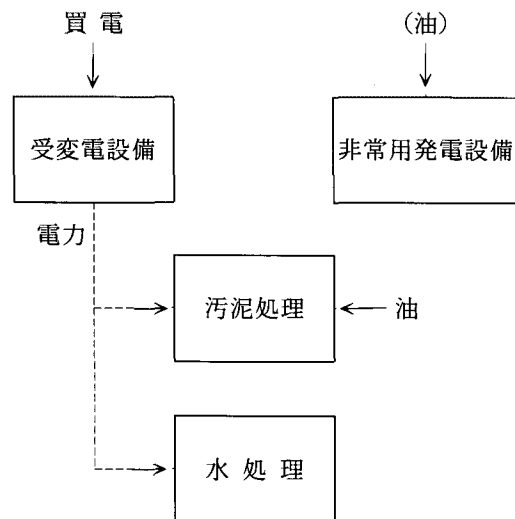
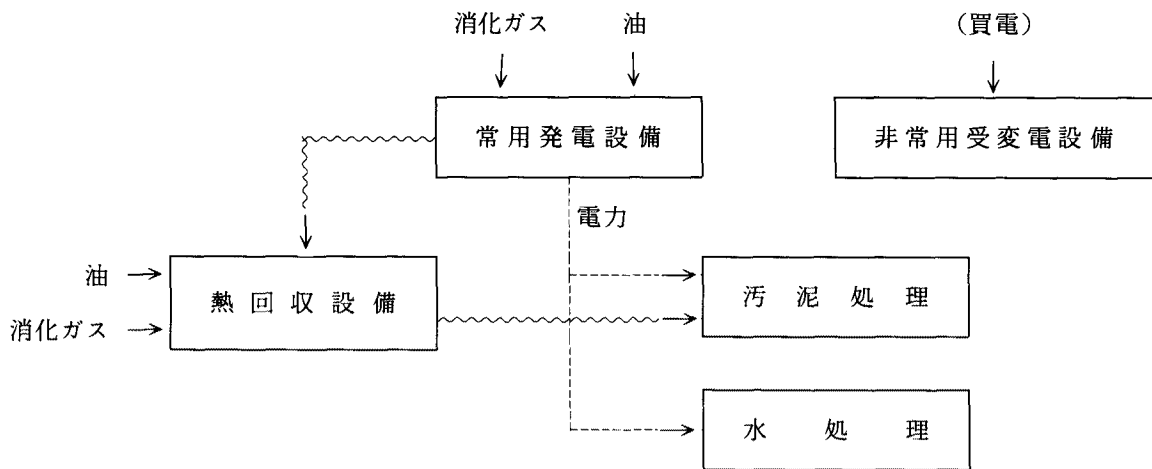


図-2 自立型のエネルギー供給系統



また、検討対象汚泥処理フローとしたものを図-4に示す。これらの汚泥処理フローの水処理プロセスは全て標準活性汚泥法とした。

検討に用いた汚泥の含水率・回収率等の設計諸元、各設備の稼働条件等については、「下水道施設設計指針と解説、日本下水道協会、1984年版」等を参考にして決定した。

これらの条件において、物質収支を作成し、プロセス別電力消費量を設定した。

(3) 発電設備の設定

下水処理施設における熱利用併用型発電設備には、以下のものが考えられる。

- ① 往復動機関発電設備
- ② ガスタービン発電設備
- ③ 蒸気タービン発電設備
- ④ 複合サイクル発電設備

①の往復動機関発電設備は、液体燃料や消化ガスを燃料とする往復動機関により発動機を駆動するもので、液体燃料専用、ガス燃料専用のものと、ガス及び重油等を併用するデュアル形式のものがある。発電端効率としてはほぼ20～30%であり、残りの70～75%は排熱となり、比較的効率の悪いエネルギー回収方式となる。

②のガスタービン発電設備は液体燃料及び消化ガスを燃料としガスタービンによって発電機を駆動するものである。発電端効率はほぼ10～20%であり、80～90%は排熱であり、往復動機関発電設備よりさらに熱効率の悪いエネルギー回収方式となる。

③の蒸気タービン発電設備については、ボイラと組み合わせて蒸気によりタービンを駆動し、これに発電機を連結したもので、ボイラの燃料には可燃性のものであればほとんどが使用できる。発電端効率はほぼ25～35%であり、大規模発電設備に多用される方式である。

④の複合サイクル発電設備は、排気温度の高いタービンと、この排気熱による蒸気タービンを組み合わせて発電設備の熱効率を高めるもので、一般的に発電効率を10%高くできるとされる。

発電設備には以上のようなものがあるが、下水処理施設において電力を生産するときに最も考慮しなければならない条件としては、発電効率の高いことがあげられる。このため、発電効率が高い複合サイクル発電を電力自立型処理施設における発電設備として考えることとした。

複合サイクル発電には、図-5に示すようなものがあるが、本調査では発電プラントの構成が単純で建設費が安い排熱回収複合サイクル発電によることとした。

(4) 熱収支計算

前述したように処理規模100,000 m³/日について各処理フロー毎に熱収支計算を行った。

(5) 経済性の検討

熱収支計算の結果から数ケースについて経済性の検討を行った。主な計算条件については以下の通りである。

① 建設費

図-3 調査フロー

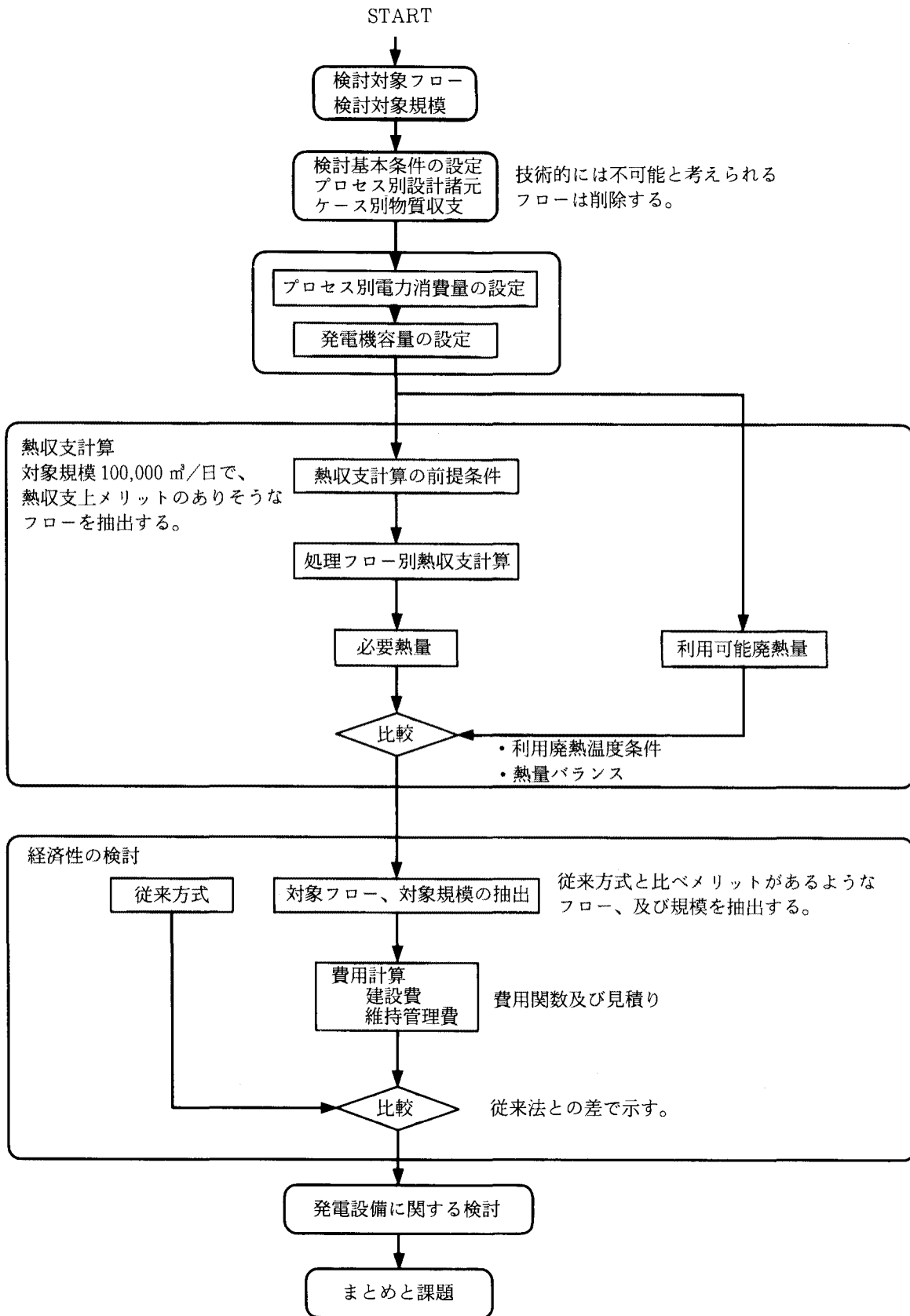
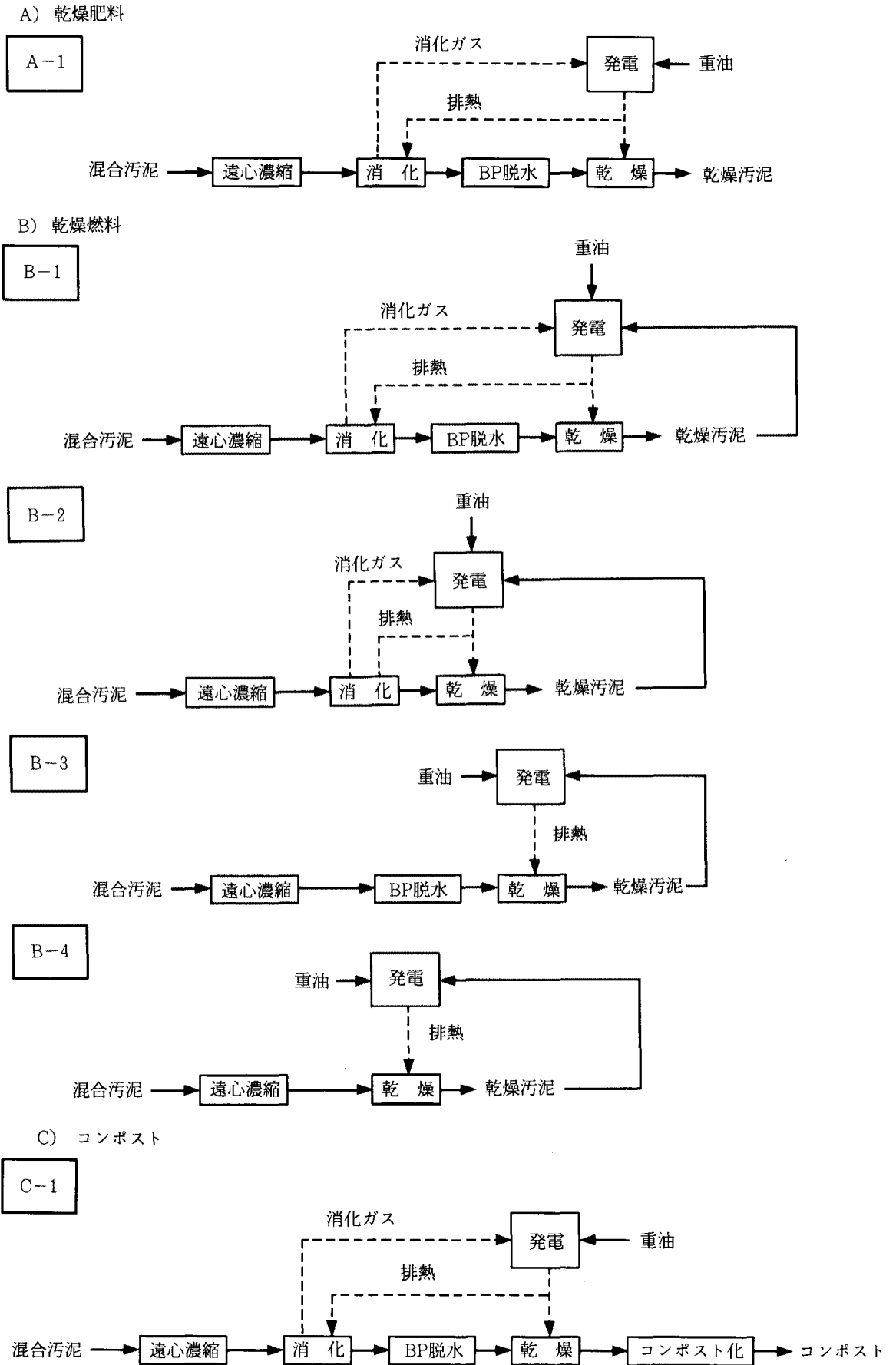
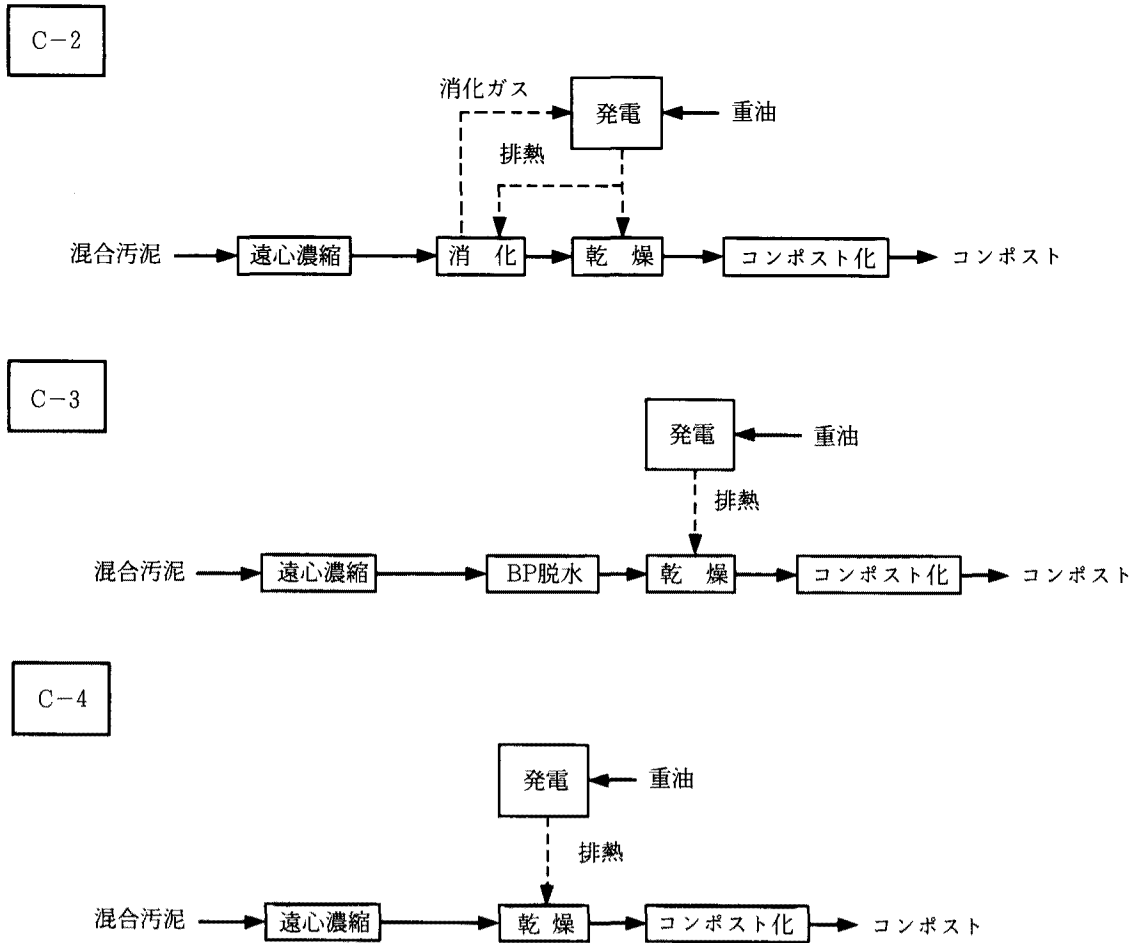


図-4 プロセス別汚泥処理フロー





建設費は、プラント設備、電気計装設備、土木・建築工事とし、前二者についてはメーカー見積りにより、土木・建築工事はRC構造・直接基礎とし1 m³当たり 300 千円とした。

② 維持管理費

- ・ 運転費については、維持管理費に大きく影響を与える消費電力量と消費燃料を計上する。
- ・ 電力量単価(全電力会社平均)は、基本料金についてはkW・月当たり 1,239 円とし、使用量料金についてはkW 当たり 12.27 円とする。ただし、自立型については買電を常時使用しないため、通常料金の 10%割増しに対し、20%を支払うものとする。
- ・ 燃料単価はA重油を使用するものとして、1 ℓ 当たり 33 円(建設物価全国平均)とする。
- ・ 人件費単価は、5,000 千円/年・人とする。
- ・ 維持管理費は、プラント設備と電気計装設備建築費の 2%を計上する。
- ・ 減価償却については、土木・建築は 50 年定額とする。また、プラント及び電気計装設備は対象によって異なるものの、ここでは 15 年定

額とし、残存価格を 10%とした。

3. 結果と考察

(1) 熱収支計算結果について

各処理フロー毎の熱収支計算結果を集計整理した結果を表-1に示す。この表より、まず、脱水設備を持たないB-2, B-4, C-2, C-4については発電設備への入熱量に対し有効利用している割合は高いが、その他の重油使用量が大きく、発電設備排熱のみでは汚泥処理に必要な熱量を賅うことができない。従って、これらの汚泥処理フローは経済性の検討を行うまでもなく、脱水設備を有するフローより不経済であると判断される。

脱水設備を有するB-1, B-3については、発電設備からの排熱を有効利用している割合が低い。これは、焼却炉排熱を優先的に有効利用しているためである。

以上の検討から、B-1, B-2, B-3, B-4, C-2, C-4を除外するとA-1, C-1, C-3の3ケー

表-1 水量規模 100,000 m³/日における処理フロー別熱収支

ケース	濃縮 汚泥量 (m ³ /日)	消化 汚泥量 (m ³ /日)	消化ガス 発生量 (m ³ /日)	脱 水 ケーキ量 (T/日)	乾 燥 ケーキ量 (T/日)	消 費 電力量 (KWH/h)	重油使用量 ℓ/日		
							発電用	その他	合 計
A-1	2,300	316	4,740	42.6	11.7	1,653	13,750	0	13,750
B-1	2,300	316	4,740	42.6	18.8	1,743	11,490	0	11,490
B-2	2,300	316	4,740	消化汚泥 316	18.8	2,203	27,070	11,800	38,870
B-3	2,334			63.8	30.6	1,728	12,790	0	12,790
B-4	2,334			消化汚泥 316	30.6	2,190	26,910	11,770	38,680
C-1	2,300	316	4,740	42.6	18.8	2,249	17,840	0	17,840
C-2	2,300	316	4,740	消化汚泥 316	18.8	2,219	27,260	18,980	46,240
C-3	2,334			63.8	30.6	1,726	16,600	770	17,370
C-4	2,334			消化汚泥 316	30.6	2,239	27,510	20,820	48,330

ケース	発電設備 への入熱量 (×10 ⁴ kca ℓ/日)	発 電 総合効率 (%)	有効利用 している熱量 (×10 ⁴ kca ℓ/日)	有効利用して いる割合 (%) 入熱に対して	備 考	今 後 の 検 討 対 象 ケ ー ス
A-1	11,909	28.6	2,662	22.4	乾燥肥料	○
B-1	11,928	30.2	1,012	8.5	乾燥燃料	
B-2	22,735	20.0	8,949	39.4	〃	
B-3	10,742	33.2	0	0	〃	
B-4	22,601	20.0	8,136	36.0	〃	
C-1	16,774	27.7	2,527	15.1	コンポスト	○
C-2	22,901	20.0	9,022	39.4	〃	
C-3	13,944	25.5	2,480	17.8	〃	○
C-4	23,107	20.0	8,359	36.2	〃	

図-5 複合サイクル発電プラントの種類 (電気学会誌 Vol. 113. 1993より)

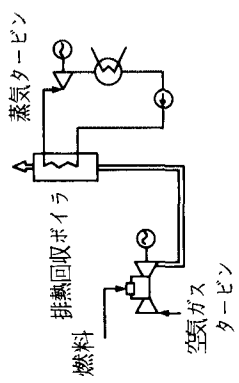
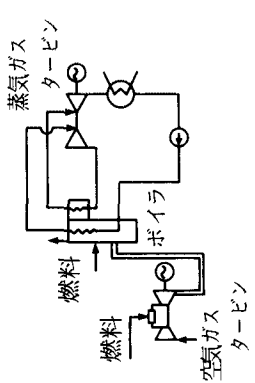
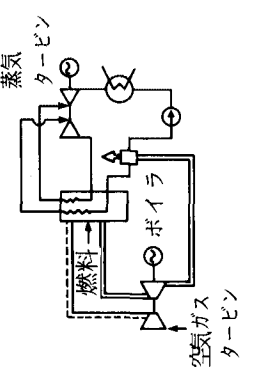
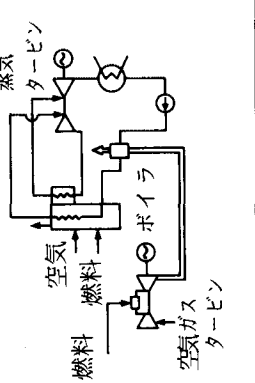
方式	系統	特徴	特徴
排熱回収		<ol style="list-style-type: none"> 1. システムが簡単。 2. ガスタービン出力比が大きい。 3. ガスタービンの高温化するほどプラントの熱効率上昇割合が大きい。 4. 起動時間が短い。 5. 蒸気タービンの単独運転は不可能。 6. プラント出力当たりの温排水量が少ない。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. システムが単純である。 2. 蒸気タービン出力を大きくしないと、効率向上効果が小さい。 3. ボイラ燃料はガスタービンと無関係に選択できる。 4. 蒸気タービンの単独運転は可能。 5. 既設火力のリパワーリングとして適用できる。
排気再燃		<ol style="list-style-type: none"> 1. 運転制御系が複雑となる。 2. 蒸気タービンの出力比が大きい。 3. ボイラに使用する燃料はガスタービンと無関係に選択できる。 4. 熱効率はガスタービン排気を最大に利用する蒸気プラント容量とする場合に最適となる。ただし、ガスタービンの高温化により、排ガス中の残存酸素量が少なくなるため押込通風機によりボイラ燃焼空気を補う必要がある。 5. 蒸気タービンの単独運転が可能 (100%容量の押込通風機を設置した場合)。 6. 既設プラントのリパワーリングに適用可。 	
過給ボイラ		<ol style="list-style-type: none"> 1. 蒸気タービン出力比がやや大きい。 2. ガスタービン入口ガス温度を下げる事ができる。 3. ボイラ使用燃料はガスタービンによって制約される。 4. 蒸気タービンの単独運転は不可能である。 5. 既設プラントのリパワーリングには適用不可。 	
給水加熱			

表-2 ケース別建設費

概略仕様	A 1		C 1		C 3	
	従来型	自立型	従来型	自立型	従来型	自立型
非常用発電設備	660,000千円	—	660,000千円	—	660,000千円	—
ボイラ設備	—	—	120,000千円	—	130,000千円	—
(小計)	(660,000千円)	(—)	(780,000千円)	(—)	(790,000千円)	(—)
土木・建築工事	135 m ² (9m×15m) 135 m ² ×300千円/m ² = 40,500千円	—	189 m ² (9m×15m+9m×6m) 189 m ² ×300千円/m ² = 56,700千円	—	189 m ² (9m×15m+9m×6m) 189 m ² ×300千円/m ² = 56,700千円	—
ガスタービン+ 廃熱ボイラ設備	—	1,000,000千円	—	1,130,000千円	—	960,000千円
蒸気タービン設備	—	200,000千円	—	330,000千円	—	270,000千円
電気計装設備	—	380,000千円	—	460,000千円	—	390,000千円
(小計)	(—)	(1,580,000千円)	(—)	(1,920,000千円)	(—)	(1,620,000千円)
土木・建築工事	—	520 m ² (20m×26m) 520 m ² ×300千円/m ² = 156,000千円	—	520 m ² (20m×26m) 520 m ² ×300千円/m ² = 156,000千円	—	520 m ² (20m×26m) 520 m ² ×300千円/m ² = 156,000千円
合計	700,500千円	1,736,000千円	836,700千円	2,076,000千円	846,700千円	1,776,000千円
差額(従来-自立)	—	-1,035,500千円	—	-1,239,300千円	—	-929,300千円

表-3 ケース別維持管理費 (その1)

	A 1		C 1		
	従来型	自立型	従来型	自立型	
運 転 費	基本料金 (1,239円/kw)	$3,636 \text{ kw} \times 1,239 \text{ 円/kw} \times 12 \text{ カ月} \times 10^{-3} = 54,060 \text{ 千円/年}$	$3,636 \text{ kw} \times 1,239 \text{ 円/kw} \times (1.1 \times 0.2) \times 12 \text{ カ月} \times 10^{-3} = 11,893 \text{ 千円/年}$	$4,948 \text{ kw} \times 1,239 \text{ 円/kw} \times (1.1 \times 0.2) \times 12 \text{ カ月} \times 10^{-3} = 16,184 \text{ 千円/年}$	
	電力 料金	$1,653 \text{ kw} \times 12.27 \text{ 円/KWH} \times 24 \text{ H/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 177,673 \text{ 千円/年}$	—	$2,249 \text{ kw} \times 12.27 \text{ 円/KWH} \times 24 \text{ H/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 241,734 \text{ 千円/年}$	—
	(小計)	(231,733 千円/年)	(11,893 千円/年)	(315,301 千円/年)	(16,184 千円/年)
	燃料料金 (33円/ℓ)	$1,750 \text{ t/日} \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 21,079 \text{ 千円/年}$	$13,750 \text{ t/日} \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 165,619 \text{ 千円/年}$	$820 \text{ t/日} \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 9,887 \text{ 千円/年}$	$17,840 \text{ t/日} \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 214,883 \text{ 千円/年}$
経 費	(計)	(252,812 千円/年)	(177,512 千円/年)	(231,067 千円/年)	
費	人件費 (5,000 千円/年・人)	—	$5 \text{ 人} \times 5,000 \text{ 千円/年} \cdot \text{人} = 25,000 \text{ 千円/年}$	$5 \text{ 人} \times 5,000 \text{ 千円/年} \cdot \text{人} = 25,000 \text{ 千円/年}$	
	維持補修費 (設備費の2%/年)	$660,000 \text{ 千円} \times 0.02 = 13,200 \text{ 千円/年}$	$1,580,000 \text{ 千円} \times 0.02 = 31,600 \text{ 千円/年}$	$780,000 \text{ 千円} \times 0.02 = 15,600 \text{ 千円/年}$	
減 価 償 却 費	合 計	266,012 千円/年	209,112 千円/年	269,467 千円/年	
	① 耐用年数 ・設備15年 ・土木・建築50年	$660,000 \text{ 千円} \times 0.9 \times 1/15 \text{ 年} + 40,500 \text{ 千円} \times 1/50 \text{ 年} = 40,410 \text{ 千円/年}$	$1,580,000 \text{ 千円} \times 0.9 \times 1/15 \text{ 年} + 156,000 \text{ 千円} \times 1/50 \text{ 年} = 97,920 \text{ 千円/年}$	$780,000 \text{ 千円} \times 0.9 \times 1/15 \text{ 年} + 56,700 \text{ 千円} \times 1/50 \text{ 年} = 47,934 \text{ 千円/年}$	
維持管理費計	② 残存価格 ・設備10% ・土木・建築無し	$306,422 \text{ 千円/年} (100\%)$	$307,032 \text{ 千円/年} (100.2\%)$	$388,722 \text{ 千円/年} (100\%)$	
	差額 (従来 - 自立)	—	- 610 千円/年	+ 935 千円/年	

表-3 ケース別維持管理費 (その2)

		C 3		
		従 来 型	自 立 型	
運 転 経 費	電 力 料 金	基本料金 (1,239円/kw)	$3,797 \text{ kw} \times 1,239 \text{ 円/kw} \times 12 \text{ カ月} \times 10^{-3} = 56,454 \text{ 千円/年}$	$3,797 \text{ kw} \times 1,239 \text{ 円/kw} \times (1.1 \times 0.2) \times 12 \text{ カ月} \times 10^{-3} = 12,420 \text{ 千円/年}$
		使用料金 (12.27円/KWH)	$1,726 \text{ kw} \times 12.27 \text{ 円/KWH} \times 24 \text{ H/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 185,519 \text{ 千円/年}$	—
		(小計)	(241,973千円/年)	(12,420千円/年)
		燃料料金 (33円/ℓ)	$(3,470 \text{ ℓ/日} + 770 \text{ ℓ/日}) \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 51,071 \text{ 千円/年}$	$(16,600 \text{ ℓ/日} + 770 \text{ ℓ/日}) \times 33 \text{ 円/ℓ} \times 365 \text{ 日/年} \times 10^{-3} = 209,222 \text{ 千円/年}$
		(計)	(293,044千円/年)	(221,642千円/年)
		人件費 (5,000千円/年・人)	—	$5 \text{ 人} \times 5,000 \text{ 千円/年} \cdot \text{人} = 25,000 \text{ 千円/年}$
		維持補修費 (設備費の2%/年)	$790,000 \text{ 千円} \times 0.02 = 15,800 \text{ 千円/年}$	$1,620,000 \text{ 千円} \times 0.02 = 32,400 \text{ 千円/年}$
	合 計	308,844千円/年	254,042千円/年	
減価償却費		$790,000 \text{ 千円} \times 0.9 \times 1/15 \text{ 年} + 56,700 \text{ 千円} \times 1/50 \text{ 年} = 48,534 \text{ 千円/年}$	$1,620,000 \text{ 千円} \times 0.9 \times 1/15 \text{ 年} + 156,000 \text{ 千円} \times 1/50 \text{ 年} = 100,320 \text{ 千円/年}$	
① 耐用年数 ・設備 15年 ・土木・建築 50年				
② 残存価格 ・設備 10% ・土木・建築無し				
維持管理費計		357,378千円/年 (100%)	354,362千円/年 (99.2%)	
差額(従来-自立)			+ 3,016千円/年	

スが残るが、これらのケースでも熱の有効利用割合は小さく、熱回収率をいかに上げるかが自立型システムのポイントである。

(2) 経済性の検討

A-1, C-1, C-3の3ケースについて、経済性の検討を行った。この結果を建設費については表-2に、維持管理費については表-3に示す。

経済性の計算結果から、次のことがわかる。

① 建設費について、従来型と自立型を比較するといずれのケースも自立型の建設費が10億円程度高くなっている。

② 運転経費については、いずれのケースも自立型のほうが6~7千万円/年程度低くなっている。

③ 維持管理費(施設・設備の減価償却費+運転経費)では、ほとんど両者に差がない。

4. まとめ

処理場規模100,000 m³/日で以下の汚泥処理フローについて、常用発電設備を導入し、その排熱を汚泥処理の熱源として利用するシステムの可能性について熱収支及び経済性から検討した。

A-1 濃縮-消化-脱水-乾燥-農業利用

- | | | |
|-----|----------------------------|---|
| B-1 | 濃縮-消化-脱水-乾燥-燃料 | 用 |
| B-2 | 濃縮-消化-乾燥-燃料 | C-3 濃縮-脱水-乾燥-コンポスト化農業利 |
| B-3 | 濃縮-脱水-乾燥-燃料 | 用 |
| B-4 | 濃縮-乾燥-燃料 | C-4 濃縮-乾燥-コンポスト化農業利用 |
| C-1 | 濃縮-消化-脱水-乾燥-コンポスト化
農業利用 | その結果, A-1, C-1, C-3 のフローについて
は, 自立型システムが熱収支と経済性の観点から導
入の可能性があると判断された。 |
| C-2 | 濃縮-消化-乾燥-コンポスト化農業利 | |

● この調査に関する問い合わせは

建設省土木研究所下水道部

汚泥研究室長 渡部 春樹

研究員 落 修一

研究員 水落 元之

(財)下水道新技術推進機構

技術部長 村上 忠弘

技術部技術課長 村上 孝雄

研究第二部研究員 深尾 忠司