

ライフサイクルエネルギーに基づいた 省エネルギー污水収集システムに関する研究

秋永薫児¹・柏谷衛²

¹正会員 工修 株式会社日水コン東北下水道部 (〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉 5 丁目3-36)

²フェロー会員 工博 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-0022 千葉県野田市山崎2641)

この研究は、公共下水道として使用されてきた標準型自然流下式、揚水併用型自然流下式、圧力式および真空式からなる污水収集システムに関する素材、製造、運搬、建設、運転管理、廃棄にいたるライフサイクルエネルギー(LCE)についてデータを収集、整理し、エネルギー特性を比較評価したものである。エネルギー算定に当っては、素材は文献値に拠ったが、製品製造は国内会社の協力を得て、各工場の生産量と電力、燃料の消費量の実データを用いた。建設のエネルギーは積算基準の工種、数量に基づき、維持管理のエネルギーは実態調査による作業内容に基づき算定した。各システムのエネルギー特性より省エネルギー的な代替システムの検討を行い、11のシステムについて郊外の住宅地を想定した面積20ha、人口密度70人/haで、LCEの年間換算値および経年変化での比較検討を行った。

Key Words: life cycle energy(LCE), conventional gravity system, alternative gravity system with pumping station, pressure system, vacuum system

1. はじめに

公共下水道の面整備における污水収集システムは現在、標準型自然流下式下水道、揚水併用型自然流下式下水道、圧力式下水道、真空式下水道が利用できる。しかし、収集方式の選定にあたっては費用面の比較にとどまり、下水道施設そのものの環境への影響については考慮されてはこなかった。これまでも、幹線管路から処理場にいたるまでの大規模な下水道施設のライフサイクルエネルギー(LCE)およびCO₂発生量に関する研究^{1), 2)}、下水道管材を対象とした単体のエネルギー解析^{3), 4)}や電器製品のLCA解析の中でのエネルギー比較⁵⁾は国内外で行われてきた。現在、我が国の下水道普及率は56% (平成9年度末) に達しており、都市の周辺域や集落における面整備が今後の下水道事業の中心となっていく現況に鑑み、筆者らは下水道面整備の代替案の検討手法の一つとしてLCEによる評価を行うこととした。小口径管路による自然流下式、圧力式、真空式といったシステムの代替案は産業連関表に基づくマクロな手法では評価のための解析が困難である。そこでこの研究ではエネルギー評価を積上げ法によるミクロな解析によって行うため、製品のエネルギーデータの収集に力点を置いた。この結果、管路施設に関しては、管径別、管材別、製品別、機械設備の機種・能力別によるLCEの解析が可能となった。エネルギーの算定にあたっては、素材エネルギーは主に

文献値によったが、製品の製造エネルギーに関しては、国内の製造会社に協力を得て、当該工場の生産量と消費電力量および燃料消費量のデータを収集し、それをもとに個々の製品単位重量あたりの製造エネルギーを算定した。中小規模の下水道施設の大部分は管路施設によって占められており、収集システムの選定の如何によって環境への影響をより小さくできると考えられる。本文では下水道面整備のケーススタディとして下水道幹線の最小受持ち面積20ha規模を想定して、各代替案のLCEの比較研究を行い、エネルギー面での収集方法の評価を行なうこととした。

2. 単位エネルギーの算定

(1) 基本的な考え方

エネルギーの算定は積上げ法によった。対象とするものが小型で多種多様な素材、製品および規模であるため、産業連関表による方法ではこの違いを十分に表現できないためである。基本的なデータの収集は、素材については文献、報告書等既存の資料により、製造に関しては複数の国内製造会社に協力を求めて、製品、部品の月あたりの製造量(t)及び燃料、電力等として消費されたエネルギー(kcal)とから単位重量あたりのエネルギーを算定し、その各平均値から製品、部品1個の重量に応じたエネルギーを算出した。算定にあつ

ては、燃料はその低位発熱量を、電力は平均電力原単位として化石燃料の発熱量を含んだ一次エネルギー²、250kcal/kWhを用いた。

鋳鉄、鋼材については文献値⁶⁾および工場の実データを合わせて、ポンプのケーシング等の鋳造に用いられる電気炉による消費エネルギーを用いた。この際、電気炉で消費される鉄屑については文献値⁶⁾よりその製造エネルギーを求め、素材エネルギーとして加算した。鋳造工程で型枠に砂が用いられ、熟磨耗により消費される。昨今この砂を輸入によっている事情から、文献⁶⁾より輸入砂(ケイ砂)の素材エネルギーを加味した。各製品のデータは、ネジ、コンデンサー、コード線といった小さな部品を除きすべて収集できており、この点から製品のエネルギーの精度はほぼ満足されたと考えている。施設の建設にあたっては、直接消費されるエネルギー(電力、燃料、砂、セメント等の消費資材)を直接エネルギーとして捉え、仮設材や建設機械の素材、製造エネルギーについては間接エネルギーとして考慮した。施設の維持管理にかかるエネルギーは作業に用いられる機器の電力、燃料消費量、清掃に用いる水の使用量を作業時間、頻度に応じて耐用年数期間積み上げた。ポンプ、制御盤の部品交換は、作業エネルギーに各部品の製品エネルギーを加算した。運転は各ポンプの消費電力量からエネルギーを算定した。廃棄は更新時の撤去と運搬に要するエネルギーを計上した。補修は作業エネルギーと使用材料(補修材)の製品エネルギーを計上した。

(2) エネルギー原単位

算定に用いたエネルギー原単位は次の通りである。

電力 2,250 kcal/kWh⁷⁾

用水 1,100 kcal/m³

日本の浄水場の維持管理・処理にかかる平均エネルギー量として算定⁸⁾

燃料 各々低位発熱量を用いた。

重油9,300 kcal/l 軽油9,200 kcal/l

ガソリン8,400 kcal/l⁶⁾

3. 素材・製造エネルギー

(1) 素材エネルギー

汚水収集システムとして用いられる製品、部品の素材を整理し、各エネルギーを算出した。主な素材エネルギーを表-1に示す。

このうちセメントは、国内セメント製造におけるエネルギー量を製造量あたりで割り戻した値(文献⁹⁾中の統計値)を用い、砂および砂利は、山

表-1 主要な素材エネルギー (kcal/kg)

素材	エネルギー	主用途	出典
鋳鉄	6,800	ポンプ	開取り値
鋼板	8,060	タンク	開取り値、文献6)
ステンレス鋼	7,970	ポンプ主軸	開取り値
銅	13,000	モーター	文献6)
アルミ	34,004	モーター	文献6)
ケイ砂	21.2	鋳鉄型枠	文献6)
電磁鋼板	8,980	モーター	開取り値
セメント	996	管 材	文献9)
砂	76	細骨材	計算値
砂 利	55	粗骨材	計算値
PVC樹脂	5,877	管 材	文献6)
PE樹脂	4,265	管 材	文献6)
PP樹脂	12,996	真空弁	文献6)

注) 開取り値：各国内製造会社より入手したデータの平均値
計算値：製造工程の各機械の消費エネルギーと能力より算定
PP：ポリプロピレン

砂として破碎、ふるいわけ等の工程に用いられる機械の消費エネルギー量と処理能力より、単位量あたりのエネルギー量を算定した。この砂は細骨材および管路の基礎材として扱った。ステンレス鋼、電磁鋼板は製造工場の電力消費量、燃料消費量のデータを手し、これに鉄鋼の素材エネルギーを加味して単位エネルギーを算定した。

(2) 製品エネルギー

製品エネルギーは素材エネルギーに国内製造会社の各生産工程で消費されるエネルギーを加えて算定した。CRC管(遠心力鉄筋コンクリート管)は3社、PVC(塩化ビニル)管及びPE(ポリエチレン)管は2社、人孔及びコンクリート柵は3社のデータの平均値を用いた。鋳鉄製品(ポンプ、弁、弁箱)は国内でGP(グラインダーポンプ)を製造している3社の鋳鉄製造(電炉)のデータから、各部品重量(3社)当たりにエネルギーを算定した。モーターの巻線、試験、部品の加工、梱包にかかるエネルギーも同製造会社から別途データを収集し、製品エネルギーに計上している。PVC製の弁は1社の製品重量と電力消費量から、弁成型にかかるエネルギーを算定した。PVC柵は重量が公表されていないため、重量をヒヤリングし、PVC製弁の単位重量当たりの製造エネルギーを参考にして算定した。真空弁は各部品重量と素材を製造会社より入手し、カバー、スプリング、弁、コントローラについてエネルギーを算定し、組立て、梱包エネルギーを加算した。FRPの貯水タンクは該当する製品のデータを直接入手できなかったため、製造会社で生産中の組立式タンクの消費電力量を入手し、タンク容量あたりのエネルギーを算定した。制御盤は盤の製造会社にて消費電力量と制御盤重量から単位エネルギーを、盤内の計測器、スイッチ類は、

表-2 主要な製品/部品エネルギー
(備考に掲載以外は Mcal/個)

製 品	エネルギー	構 成		備 考
		素材 (%)	製造 (%)	
CRC管	32.8-481.8	92	8	φ150~900, Mcal/m
PVC-VU管	7.9-361.9	90	10	φ75~600, Mcal/m
PVC-VP管	3.6-163.5	90	10	φ30~300, Mcal/m
PE管	2.2-121.4	76	24	φ30~250, Mcal/m
人孔(1号)	2,100-3,900	92	8	深1.5~6.0 m
人孔(2号)	3,990-6,900	92	8	深1.5~6.5 m
樹 (コンクリート)	247	92	8	φ450
樹 (PVC)	120	94	6	φ150
仕切弁 (鋳鉄)	80-1,210	80	20	φ40~250
仕切弁 (PVC)	47-84	38	62	φ40~150
GP	381-682	76	24	1.2~2.2 kW
真空弁	130	87	13	
貯水タンク(宅内)	1,060	95	5	FRP製
貯水タンク(公道)	2,062	92	8	1号人孔, 埋設深2 m
真空ポンプ	1,200-8,500	88	12	3.7~55 kW
送水ポンプ	283-2,150	80	20	0.75~11 kW
真空タンク	12,900 -31,200	88	12	3.0~12.0 m ³
制御盤 (GP用)	900	95	5	1.2~2.2 kW
制御盤 (真空ステーション用)	9,000 -10,000	95	5	30~60 kW

記) Mcal:10³kcal, GP:グラインダ*ポンプ

各製造会社にデータの提供を依頼し、ブレーカー類、遮断機、開閉器、接触器、電流計について製造エネルギーを算定した。真空タンクは鋼板の製造エネルギーに制御盤の加工エネルギーを参考にして、タンク重量あたりのエネルギーを算定した。アスファルト混合物は、原油の輸送エネルギー0.276Mcal/l (Mcal=10³kcal) 及び総石油精製エネルギー¹⁰⁾を重量按分して得られた精製エネルギーをアスファルト分として、それに混合物の素材エネルギーを各々加算してアスファルト混合物の素材エネルギーとした。さらにアスファルトプラントの製造能力から製造エネルギーを算定し、タンクローリーによる輸送エネルギーを加え、製品エネルギーを算定した。アスファルト乳剤は文献¹¹⁾によった。

プラスチック製品の場合、製品そのものに含有する原油成分の発熱量を加味する第1種資源エネルギーと製造工程で消費された分(工程ロス等)のエネルギーを捉えた第2種資源エネルギーの2種類がある。第1種では廃棄後、処分を行う場合にその熱量を考慮する必要のある工程にて考慮されるものであり、環境への影響を対象とした場合、排出される原油由来の炭素等は第2種資源エネルギーに含まれる。欧米では収集されたPVC材やPE材が粉体にされ、再生用として販売されており、下水道用パイプの成形プログラムが実行されている¹²⁾。そこで、使用されるプラスチック製品は焼却処分ではなく、将来何等かの形で再利用されるものと

考え、第2種資源エネルギーを用いて、素材エネルギーとした。主要な製品/部品のエネルギーと素材、製造のエネルギー構成を表-2に示す。

管材を比較すると、管径200mmではCRC管が約42 Mcal/mに対しPVC管は45Mcal/m、管径500mmではCRC管153Mcal/m、PVC管234Mcal/mとなり、同管径での製品エネルギーはPVC管が10~50%程度大きくなるため、自然流下式の管材ではCRC管のほうが製品エネルギーは小さくなる。自然流下式の管路には人孔が加わり、埋設深の増加とともにその製品エネルギーは大きくなっていく。例えば、土被り4mの場合、1号人孔は約3,000Mcal/個の製品エネルギーがかかり、1スパン30mとすれば、1m当り、100Mcalのエネルギーが管路の製品エネルギーに加わっていくことになる。圧力式用および真空式用の管路では使用管径が小さく、人孔も設けないため、施設の製品エネルギーは小さくなる。例えば圧送管径50mmの場合、PVC管で8Mcal/mの製品エネルギーであり、自然流下式でCRC管径200mmの約20%となる。自然流下式の樹は、一般にコンクリート製が用いられ、その製品エネルギーは247Mcal/個(径450mm)と計算された。PVC製樹は径が200mmと小さく、肉厚も管材より薄くなるため、製品エネルギーは120Mcal/個となった。圧力式のGPユニットはGP、貯水タンクおよび制御盤から構成され、宅内設置の場合、約2,400Mcal/基の製品エネルギーが必要である。真空弁ユニットは約1,430Mcal/基と圧力式の約60%となる。しかし真空ステーションは真空ポンプ、送水用汚水ポンプ、タンク、制御盤および建屋からなるため、10,000Mcal規模の製品エネルギーを必要とする。

建設機械はバックホウ(0.08m³級,重量3.3t)の製造エネルギーを調査した。製造工程でかかる電力および燃料使用量から製造エネルギーは4,100 Mcal/台、素材エネルギーは鋳鉄、鉄鋼及びゴムの各重量より87,050Mcal/台と算定し、合計を製品エネルギーとした。運転1時間当りの損料率0.000166よりこのバックホウについて15.1Mcal/台/時のエネルギー損料が求められた。これをもとに他の能力のバックホウの製品エネルギーおよびエネルギー損料を算定した。

また、その他の資材として矢板を考慮した。矢板の重量当りの素材エネルギーは鋼板の8,060 Mcal/tを適用し、掘削深2~6mで軽量鋼矢板426~670Mcal/m²、鋼矢板735~1,530Mcal/m²となる。

4. 建設にかかるエネルギー

(1) 基礎エネルギー

建設エネルギーの算定に当り、まず建設機械の

表-3 主要な建設機械の工事用基礎エネルギー^{17), 18), 19)}

機 械	エネルギー	備 考
バックホ(0.35m ³)	7.6 Mcal/m ³	掘削
バックホ(0.6m ³)	7.4 Mcal/m ³	掘削
グラブホ(0.6m ³)	7.4 Mcal/m ³	掘削
ブルドーザー	1.1 Mcal/m ²	地均し
トラッククレーン	586 Mcal/日	矢板吊り上げ
ダンプ	77.3 kcal/時	運搬
バックホ(0.35m ³)	5.6 kcal/m ³	埋め戻し
散水車	50 Mcal/時	舗装
モータレーダ	71 Mcal/時	締め固め
タンバ	5.0 kcal/時	締め固め
路盤破砕機	143 Mcal/時	路盤破砕
パイロハンマー	16.7 Mcal/m	矢板打込み
アスファルトフィニッシャー	133 Mcal/時	舗装
路盤カッター	1.6 kcal/m	路盤切断
ロードローラ	46 Mcal/時	舗装
タイヤローラ	66 Mcal/時	舗装
振動ローラ	120 Mcal/時	舗装

記) Mcal:10³kcal

燃料消費量を算定し、使用する燃料の発熱量からエネルギーを算定した。単位作業量は下水道積算資料及び土木工事積算資料に基づいて積算し、作業項目に応じて整理した。^{13), 14), 15), 16)}

工事で使用される主要な建設機械の単位作業エネルギーを表-3に示す。

(2) 建設エネルギー

建設エネルギーの算定は積算資料^{13), 14), 15), 16)}の工種、数量に基づいて、消費電力(kwh)、消費燃料(t)および使用される砂、砂利等の製品エネルギーを計上した。工事は開削工事では路盤破砕から掘削～埋め戻し、締め固めまでの土工事と管、人孔等の敷設工事、残土処分および路盤舗装工事に関し、管径、土被りで分類、算定した。矢板(軽量鋼矢板および鋼矢板)は損料の考え方が適用できないため、使用回数は、切り梁の使用回数を参考として10回と設定した。掘削深が6mを越える場合、推進工法(オーガー掘削工法)²⁰⁾とし立坑はライナープレート²⁰⁾によるものとした。ライナープレートは全損として立坑エネルギーを計上した(表-4)。推進管の敷設はφ250mmで3,300Mcal/mと算定した。

地下水位は2mとして、水替工によるエネルギーを加算した。ここで水替工のエネルギー算定方法は、次の通りである。地下水ハンドブック²¹⁾によると、ウェルポイント工法における地下水排水をそのポンプ能力から1セット1.5~1.75m³/分としており、これを目安にしてポンプ運転エネルギーを算定した。算定条件は、設置・撤去、1スパン50m、水替日数を掘削、管敷設、埋め戻し、人孔設置1箇所の施工日数として7日、作業時排水方式として1日8時間の運転時間と設定した。これより、

表-4 推進工立坑土工エネルギー

深 さ	(立坑径2,000mm) (Mcal/箇所)				備 考
	6.0 m	8.0 m	10.0 m	12.0 m	
発進立坑	120,470	156,100	191,730	227,360	楕円形
到達立坑	119,350	154,640	189,930	225,220	円形

記) Mcal:10³kcal

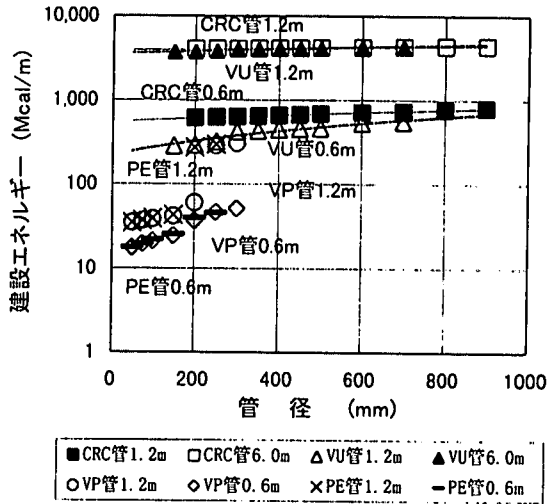


図-1 建設エネルギーの比較(管路)

設置・撤去に322Mcal/箇所、運転として16Mcal/m(揚程10m以下)、21Mcal/m(揚程10mより大)のエネルギーを消費する。図-1に示すように建設エネルギーは土被りと管径によって大きく影響される。また、矢板の有無、種類によっても影響を受ける。このため、小口径で浅い埋設深の圧力式、真空式の管路の建設エネルギーは自然流下式と比べ桁違いに小さくなる。

a) 管路

管路の基礎は、地下水の影響のない部分のCRC管にはコンクリート基礎、PVC-VU管には砂基礎(下部200mm、上部100mm)とした。地下水位下ではCRC管にコンクリート巻き立てとし、PVC-VU管では砂基礎(下部400mm、上部200mm厚)とした。掘削深さに応じて仮設工法を素掘(掘削深1.5mまで)、軽量鋼矢板打込み(掘削深3.0mまで)、鋼矢板(3.0mより深)とし、水替え工により対応するとした。敷設工としてクレーン運転による消費燃料を考慮した。圧力式及び真空式では土被り1.2mで埋設する場合、管径250mmまでは地下水の影響を受けないとした。

PVC-VU管とCRC管の建設エネルギーを比べると、管勾配を小さくでき、敷設工にエネルギーをあまり消費しないPVC-VU管がCRC管より150Mcal/m程度低エネルギーとなっている。この結果、製品エネルギーでの差は解消され、PVC-VU管がやや省エネルギーとなる。

表-5 取付管の建設エネルギー

延長 (m)	最大土被り (m)	建設エネルギー (Mcal/m)
10	0.63	69.4
20	0.66	70.4
50	0.75	73.6
100	0.90	78.9

記) Mcal:10³kcal

b) 人孔、貯水タンク (GP, 真空弁)

人孔は組み立て人孔として、開削工法で施工し、中間人孔には1号人孔、会合人孔および推進工法の路線には2号人孔を用いた。1号人孔では人孔深さが5.5mを越えると深形を用い、2号人孔では6.5mを越えると深形人孔を用いた。深さに応じた仮設工法を管路と同条件で設定した。敷設工としてクレーンの運転による消費燃料を考慮した。

また、宅内用タンクの建設エネルギーとして設置工によるトラッククレーンの運転エネルギーを算定し、13Mcal/箇所、公道下では1号人孔2.0m深の機械掘削、設置、埋め戻しのエネルギーとして1,011Mcal/箇所とした。

c) 樹、取付管

標準型自然流下式ではコンクリート製汚水樹を各戸に設置し、φ150mmの取付け管 (PVC-VU, 地上延長5m) を開削工法の路線の本管に接続する。推進工法の路線では新たに収集管路を建設しそこへ接続する。施工エネルギーの算定条件 (仮設等) は本管管路と同様にした。樹の基礎は碎石 (厚150mm)、取付管の基礎は管路と同様とした。コンクリート製の樹の建設エネルギーは13Mcal/箇所、PVC製樹は9Mcal/個、自然流下式の取付管の建設エネルギーは土被り0.6~6.0mで36~3,500Mcal/mの範囲となる。圧力式、真空式のユニットまでの取付管はPVC-VU管φ150mmを路肩または歩道への埋設として、起点土被り0.6m、勾配を3%とした。樹に径200mmの塩ビ樹を用いる。取付管の建設は素掘りにより表-5のように算定した。

d) 真空ステーション (機械・電気設備を除く)

土木、建築 (素材:コンクリート, モルタル, 鉄筋, ガラス, 杭を含む)^{22), 23)} について入手した設計資料より、2箇所真空ステーションのエネルギー値を算出し、その平均値 20,227Mcalをステーションの土木・建築エネルギーとし、機械・電気設備は水量規模に応じて必要設備を選定し各々計上した。

5. 運搬エネルギー

ここでは建設において現場へ運搬される製品、材

表-6 運搬エネルギー

項目	エネルギー	備考
重機運搬 (往復)	1,840 Mcal	一式
仮設材 (往復)	90 Mcal/t	
GP, 水中ポンプ, 真空弁, 弁類	3.9 Mcal/個	180台/8t車
貯水タンク (FRP), 制御盤	17.5 Mcal/個	40基/8t車
真空ポンプ機器, 配管, タンク	1,400 Mcal	一式
真空ポンプ用重機 (往復)	1,380 Mcal	一式
真空ポンプ建設用コンクリート	920 Mcal	一式
シートパイル	700 Mcal	φ400, 22m 4本

記) Mcal:10³kcal

料、機械の運搬エネルギーを算定した。製造された製品は工場からストックヤードへ運搬され、そこから現場へ運搬される。運搬距離は、ある管材製造会社の例をもとに次のように設定した。

国内に5箇所工場から20箇所のストックヤードへ運ぶものとし、国土面積 (377,837 km²) を幅250km, 長さ1500kmの長方形に想定し、5等分すると250km×300kmのブロックに別れる。対角線は約400kmとなり、中心部からの最大距離は200km, ブロック端からの最大距離は400kmであるので平均として300kmをストックヤードへの距離とした。ストックヤードもしくは工場から現場へ資材を運ぶとして、国土面積を20等分すると100km×125kmのブロックとしてその対角線は160km, 中心からの最大距離を80kmであるので、平均120kmより平均運搬距離は概ね100kmとした。建設機械、資材は現場に近いリース会社等から運ぶとして主要な市内から近郊の町や村までの距離を平均50kmとした。

運送トラックは8t車を使用し、管材、人孔、樹、資材は重量から台数を算定し、建設機械はその重量に応じた運搬車もしくは自走の燃費よりエネルギーを算定した。GP, 水中ポンプ, 貯水タンク, 真空弁は梱包による積載個数からトラック台数を算定し、燃費からエネルギーを算定した。表-6に主な製品・資材の運搬エネルギーを示す。

6. 維持管理、運転にかかるエネルギー

(1) 基本的な考え方

維持管理作業として、点検、清掃、補修、部品交換の燃料消費量、清掃水量、補修材、部品の製品エネルギーを作業時間、頻度、内容に応じて、耐用年数期間で算定した。運転エネルギーとしてはポンプの電力エネルギーを算定した。維持管理作業は、自然流下式では既存の調査報告書²⁴⁾よりデータを整理し、圧力式、真空式および揚水用ポンプ場では、実際に維持管理作業を行っている会

表-7 自然流下式の作業頻度 (最大～中間)

作業	施設	頻度 (年)	
		使用年数 1～30年	31～50年
巡視点検	人孔, 樹	1～5	1～3
清掃	管路, 取付管, 樹	1～5	1～3
	人孔	1～5	1
目視調査	人孔, 樹	1～5	1～3
漏水調査	管路, 取付管	5～10	5～7
補修	管路, 取付管	5～10	5～7

表-8 自然流下式の維持管理作業エネルギー

作業	施設	エネルギー
清掃	本管(800mm未満)	2 Mcal/m
	取付管	3 Mcal/箇所
	樹	1.5 Mcal/箇所
	人孔	11 Mcal/箇所
漏水調査工	本管(800mm未満)	3 Mcal/m
	取付管	11 Mcal/箇所
目視調査 (清掃付)		98 Mcal/箇所
揚水用ポンプ場 清掃		15.5 Mcal/箇所
補修(パッカー工法) (800mm未満)	本管	290 Mcal/箇所
	取付管	286 Mcal/箇所
補修(ライナー工法) (800mm未満)	本管	105 Mcal/m
	人孔間50m	5,250 Mcal/50m

記) Mcal:10³kcal

社の資料およびヒヤリング調査(日本, オランダ, イギリス)によって, 実態を把握した. 頻度, 作業時間にバラツキのある項目は中間値を用いて整理した.

(2) 維持管理エネルギー

a) 定期的作業にかかるエネルギー

点検, 調査では自然流下式では700mm以下の管路を対象として, 巡視点検, 人孔, 樹の目視, 人孔内調査, ポンプ設備は制御盤での稼動確認, 電流値測定を行うとし, その移動(ライトバンとして25Mcal/時)にかかるエネルギーを算出した. 自然流下式はその作業頻度にばらつきが大きかったため, 最大頻度と中間頻度とを整理した(表-7).

清掃は移動, 作業に用いる車の燃料(高压洗浄車40Mcal/時, 給水車41Mcal/時)及び使用する用水量1箇所あたりのエネルギーとした(表-8). 補修は, 自然流下式では漏水調査後に行われるものとして, 下水道施設維持管理積算要領²⁵⁾にあるパッカー工法およびライニング工法としてインライナー工法による単位長当りのエネルギーの平均値を用いた. 自然流下式の場合, 年間の管理エネルギーを延長1mあたりに換算すると1.6～6.5(中間～最大)Mcal/年のエネルギーが必要となる.

揚水用ポンプ場, 圧力式, 真空式の機械設備の部品交換は実態に基づく耐用年数での交換とし, ポンプ, 真空弁はすべての部品を交換することに

表-9 ポンプ部品交換頻度 (単位:年)

部品名	GP (1.2-3.7 kW)	汚水ポンプ (0.75-11 kW)	真空ポンプ (5.5-11 kW)
カニカシール	10	10	5
パワークラップ	10	10	5
シーリングオイル	2	1	1
モーター	10	15	10
ケーシング	10	15	10
羽根車	10	10	15
グライダー	10	-	-
制御盤	25	25	25
スイッチ類	3	3	3

記) 汚水ポンプ: 揚水用および真空ステーションでの送水用に用いられる水中汚水ポンプ

よるリニューアルが可能と考え, 部品の交換を繰り返す方式をとった. 定期的部品交換頻度は表-9に示す. 圧力式のGPおよび真空弁の定期点検, およびユニット清掃作業は年1回, 真空ステーションの機器類の点検は週1回, 清掃は5年に1回の頻度で行う. 揚水用ポンプ場では巡視点検を年12回, ポンプ引き上げによる点検を年1回, 清掃を年4回行うと設定した. 圧力式の定期的作業エネルギーはGPユニットあたりに換算して73Mcal/年, 真空式では, 真空弁ユニット1基あたりに換算すると, 30Mcal/年のエネルギーがかかる. 自然流下式の揚水用ポンプ場では1基当たり800Mcal/年が消費される.

b) 緊急対応作業にかかるエネルギー

ヒヤリング結果から自然流下式では管の閉塞が年に2回発生するものと仮定した. 緊急対応作業として清掃作業にて閉塞を解除する. 圧力式, 真空式では故障項目別の故障率より規模別年間件数を算定し, 交換する部品の製造エネルギー, 各作業時間を考慮してエネルギーを算定する事ができる. 故障率は年間の発生件数を台数または管路延長および年間日数(365日)の積で除して求める. 主な故障率を表-10に, 交換する部品エネルギーを表-11に示す.

圧力式GPユニットの緊急対応作業エネルギーは48Mcal/基・年, 真空式の真空弁ユニット当たりとして約4Mcal/基・年, 揚水用ポンプ場では130Mcal/基・年となり, 自然流下式では延長により異なるが, 延長1m当り数kcalのエネルギーとなる. これら下水道の管理に要するエネルギーは, 50年間で, GPでは5,670～7,730Mcal/基(1.2～3.7kW), 真空弁は1,172Mcal/基, 揚水用ポンプでは1,173～16,580Mcal/基(0.75～11.0kW), 真空ステーションでは77,170～95,540Mcal/箇所(真空ポンプ3.7～11.0kW/基, 汚水ポンプ3.7～7.5kW/基)を要する.

(3) 運転エネルギー

標準型自然流下式では運転エネルギーは計上せず,

表-10 故障率(平均値)

システム	故障項目	故障率(%)
圧力式	ポンプ故障	0.01433
	羽根車閉塞	0.03762
	タンク内高水位	0.15392
	警報故障	0.03209
	圧送管破損	0.0370
真空式	真空弁故障	0.00433
	真空弁閉塞	0.03557
	タンク内高水位	0.01442
	警報故障	0.00010
	真空管離脱	0.00058

表-11 部品エネルギー (Mcal/個)

部品名	GP (1.2-3.7 kW)	汚水ポンプ (0.75-11 kW)	真空ポンプ (3.7-11 kW)
カニカメ	1.5-2.7	1.2-9.8	1.5-2.7
パナケブル	0.05-0.09	0.04-0.23	0.05-0.09
シリングオイル	0.03-0.05	0.02-0.18	0.03-0.05
モーター	110-200	90-740	363-867
ケーシング	206-369	160-1,360	254-550
羽根車	19-33	15-123	77-112
グライダ	7.3	-	-
メッキ類	10	10	10

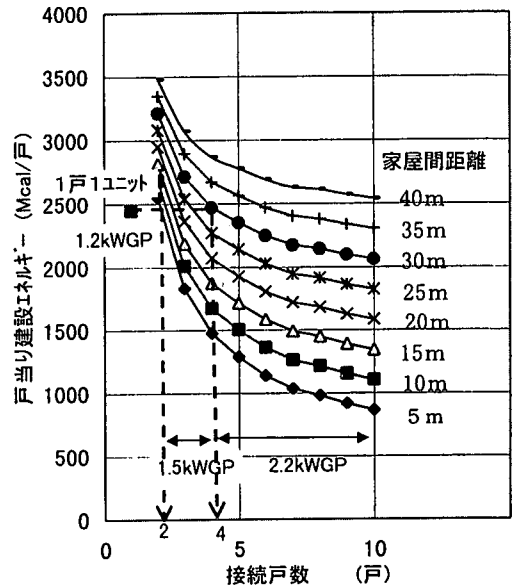
記) Mcal:10³kcal, 汚水ポンプ:揚水用および真空ステーションでの送水用に用いられる水中汚水ポンプ

揚水用ポンプ場は設置地点上流の汚水量から1日の運転時間, 出力数, ポンプ効率より電力エネルギーを算定した。圧力式は多くのGPを用いるため, 流量計算表に基づく各吐出量と汚水量から各GPについて1日の運転時間を算定し, ポンプの出力数, 効率を考慮して, 電力エネルギーを算出した。真空式は真空ステーションでの真空ポンプ, 汚水ポンプの運転時間を総汚水量より算出し, 各々電力エネルギーを算定する。

GPの全揚程を10mとすれば1.2kW-GP/戸の吐出量は90ℓ/分, ポンプ効率0.8とすれば年間電力エネルギーは280Mcal/戸である。1.5 kW-GPの場合, 年間電力エネルギーは260Mcal/戸, 2.2 kW-GPでは, 150 Mcal/戸となる。揚程と汚水量により接続戸数は変わってくるが, GP出力数が大きくなっても, 接続数を増やすことができれば1戸当りの運転エネルギーも小さくする事ができる。

7. 廃棄エネルギー

廃棄エネルギーは撤去にかかるエネルギーと運搬にかかるエネルギーとして計上した。土工事等は新しい施設の建設エネルギーと見なした。廃棄物運搬は資材, 製品の運搬量と同じと見做し, 運搬距離を100km(県内処分)として, 175Mcal/台(8t積みトラック)とした。



記) Mcal:10³kcal

図-2 圧力式の接続戸数と1戸当りのGPユニット建設エネルギー(製品及び建設エネルギー)

8. ケーススタディ

(1) モデルの検討

ここでは省エネルギーシステム代替案を建設, 運転・維持管理の面から個々に比較検討し, 標準型自然流下式システムと比較検討した。

まず, 省エネルギーシステムの設定にあたり, 次の検討を行った。

a) 圧力式, 真空式の接続戸数の検討

家屋間距離とGPユニットおよび真空弁ユニットへの接続戸数について, 製品および建設エネルギーとから検討を行った。

図-2より, 圧力式では, 家屋間距離が5m以上では3戸以上, 30m以上では4戸以上で収集しなければ各戸にGPを設置するより低エネルギーとならないことがわかる。つまり, 家屋間距離が長くなるほど取付け管の初期エネルギーが大きくなり, 1戸1ユニットが省エネルギーとなる。

運転管理エネルギーについては6章(3)の運転エネルギーの比較結果に部品交換等の管理エネルギーを考慮して検討すると, 接続戸数の増加により1戸当りのエネルギーは減少する。

図-3に示すように真空式では真空弁の製品および建設エネルギーが小さく, 取付け管の建設エネルギーが全体の初期エネルギーに大きく影響するため, 家屋間距離が15mでは接続戸数8戸以上でない

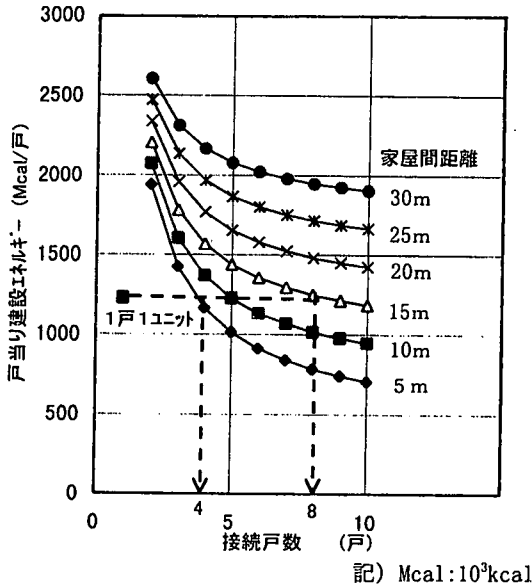


図-3 真空式の接続戸数と1戸当り真空弁ユニット建設エネルギー（製品および建設エネルギー）

と接続戸数1戸より省エネルギーとならない。

真空ステーションについては、エネルギー効率を向上させるための研究が行われており、真空ポンプの回転数制御によって電流値を一定にする方法やファジィ制御により気液比を一定に保つ方法で、運転時間を短縮することができる^{26), 27)}。短縮率はまだ明らかになっていないが、将来の技術開で運転制御率が30%可能になると仮定すると、表-12に示す水量別の真空ステーションの運転エネルギーの比較から、およそ20%のエネルギー削減が可能となる。

b) 管路の土被り別建設エネルギーの比較

4章の図-1で示したように土被りによる建設エネルギーの差は大きく、特に管径が大きくなるに伴い、その差は拡大する。土被り1.2mのPVC管では管径250mm、PE管では管径200mm以上になると掘削深1.5mを越えるため矢板を用いることになり、その結果エネルギーは急増する。このことから、圧力式および真空式では、一部の路線について2条管にすることで管径を小さくすることができるため、システム全体の建設エネルギーを減少させる可能性がある。

c) 樹・取付管の検討

自然流下式では一般に取付管を本管に接続するため、本管の土被りの増大とともに取付管の建設エネルギーは増大する（表-13）。このため樹・取付管の建設エネルギーを減少させる代替案として、路肩もしくは歩道に塩ビ樹を設置し、φ150mmのPVC-VU管の横引き配管により人孔へ接続する。この方法により取付管土被りを小さくでき、建設エ

表-12 真空ポンプのファジィ制御による真空ステーションの運転エネルギーの比較

項目		水量 (m ³ /日)		
		200	400	600
汚水ポンプ	出力(kW)	3.7	3.7	3.7
	運転時間(時間/日)	3.3	6.7	10.0
真空ポンプ	出力(kW)	3.7	5.5	7.5
	運転時間(時間/日)	7.7	8.9	9.3
ON-OFF 運転 (A)	汚水ポンプ運転エネルギー(Mcal/日)	27.5	55.8	83.3
	真空ポンプ運転エネルギー(Mcal/日)	64.1	110.1	156.9
	A合計(Mcal/日)	91.6	165.9	240.2
制御運転 (制御率 30%) (B)	汚水ポンプ運転エネルギー(Mcal/日)	27.5	55.8	83.3
	真空ポンプ運転エネルギー(Mcal/日)	44.9	77.1	109.9
	B合計(Mcal/日)	72.3	132.9	193.1
比率 (B/A)		0.79	0.80	0.80

記) Mcal:10³kcal

表-13 樹・取付管の建設エネルギー(1)

コンクリート樹・PVC取付管(本管接続)	
本管土被り (m)	エネルギー (Mcal/戸)
2	3,600
3	4,500
4	6,300
5	8,300
6	10,400

記) Mcal:10³kcal

表-14 樹・取付管の建設エネルギー(2)

横引き方式 (人孔接続)	
1戸当り取付管延長(m)	エネルギー(Mcal/戸)
5	560
10	990
15	1,440
20	1,880
25	2,320

記) Mcal:10³kcal

ネルギーを減少できる。例えば、表-13、表-14に示すように、本管土被り2mへ取付管を接続する場合、1戸当り3,600Mcalかかるが、横引き方式にすると、家屋間距離5m~25mでも2,500Mcalを下回り、大幅な省エネルギーとなる。

d) 揚水用ポンプ場の検討

本管の土被りを浅くするために揚水用ポンプ場を設ける場合、本管延長別、汚水量別にLCEを比較した。ポンプ場の設置位置として、本管の最大土被りが2.5mとなる点とした。この点は矢板が軽圧鋼矢板から鋼矢板に代わる土被りであり、建設エネルギーの変化点である。地下埋設物の影響が無い場合(ケース1)、自然流下式の土被りは最大

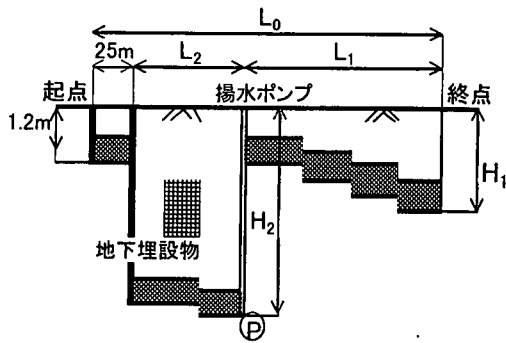


図-4 揚水併用型の縦断模式図（地下埋設物）
（ケース2）

2.7~4.2m（延長500~1,000m）と大きくないため、揚水用ポンプの基数の増加によって初期エネルギーは大きくなってしまふ。そこでケース2として、図-4に示すような地下埋設物の影響により本管の第2スパンから土被りが大きくなる状況を想定し、管底高を最大2mまで下げ、揚水用ポンプ場を1箇所設ける場合（ケース2）を検討した。

揚水用ポンプ場の位置は、図-4に示したように、上流最大土被り（ H_2 ）より、最下流土被り（ H_1 ）が大きくなる最大延長とした。地区内発生汚水量を100~600 m^3 /日（20haで12~72人/ha人口密度規模）で設定した。これより、標準型自然流下式と揚水併用型自然流下式との50年LCEを比較すると表-15のようになる。地下埋設物の影響のない状況では延長の短いケースの揚水用ポンプ場は不利であり、延長も1,000m以上が必要となる。表-16より最大土被りが3mを越えると揚水用ポンプ場を設けても省エネルギーとなること分かる。埋設深が大きくなり、建設エネルギーが増加する状況では揚水用ポンプ1箇所の設置は省エネルギーの観点から効果的である。

(2) 条件

ケーススタディは各システムの適用可能な平坦地を対象として幹線につながるまでの20haについて作成した。人口密度は郊外住宅地を想定し、70人/haとし、総管路延長は式(1)により人口密度と面積から4,291mが求められた。配管ルートの基本型を図-5に示す。各戸は平均3.5人として家屋数は412戸、平均家屋間距離は11mとした。

システム形態は8章(1)の検討結果より省エネルギーモデルを作成し、標準型自然流下式下水道システムを対照として比較する。ケーススタディのシステムを表-17に示す。

自然流下式では①本管にCRC管、最小管径200mm、最小勾配3.0‰による施設を標準型自然流下式1（自然1）とし、維持管理の頻度は中間頻度とした。

表-15 揚水併用型と標準型自然流下式のLCE比較
（ケース1）

（表中の比率は揚水併用型/標準型）

本管延長 (m)	ポンプ場 (箇所)	汚水量 (m^3 /日)		
		100	300	600
人口密度 (人/ha)		12	36	72
500	1	0.97	1.32	1.65
750	2	1.43	1.67	1.99
1,000	3	1.40	1.58	1.79

*)人口密度20haでの換算値

表-16 揚水併用型と標準型自然流下式のLCE比較
（ケース2）

（表中の比率は揚水併用型/標準型）

管底高下げ巾 (m)	本管延長 (m)	500	750	1,000
0	最大土被り (m)	2.2 m	2.5 m	3.1 m
	比率	1.37 ~2.05	1.05 ~1.37	0.96 ~1.20
1.0	最大土被り (m)	2.6 m	3.0 m	3.5 m
	比率	1.00 ~1.32	0.86 ~1.10	0.80 ~0.98
2.0	最大土被り (m)	3.4 m	3.6 m	4.0 m
	比率	0.68 ~0.99	0.57 ~0.74	0.52 ~0.63

管路延長²⁸⁾

$$L_p = 0.770 \times A \times (37.9\sqrt{P} - 70) + 491 \quad (1)$$

L_p : 管路延長 (m)

A : 地区面積 (ha)

P : 人口密度 (人/ha)

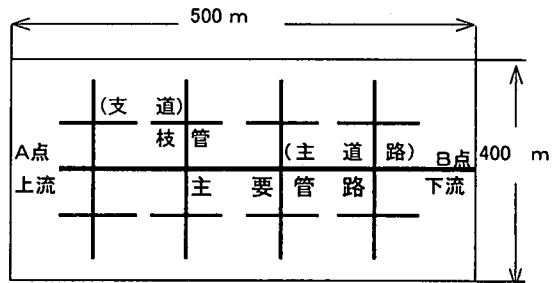


図-5 配管ルートの基本型

②同施設で最大頻度での維持管理を行うシステムを自然流下式2(自然2)とした。③本管をPVC-VU管とし、最小管径200mm、最小勾配2.0‰による施設に横引き榊(PVC-VU)による取付管の人孔接続方式を取り入れたシステムを自然流下式3(自然3)(図-6参照)とした。④最大土被りが3mを越えるため、8章(1)のdの結果より、自然3に揚水用ポンプを設けて本管の最大土被りを2mとした揚水併用型自然流下式下水道を自然流下式4(自然4)とした。

圧力式は運転エネルギーの軽減による省エネルギーを図るため、基本的に1ユニットに複数戸を

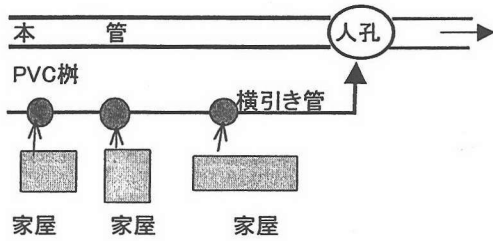


図-6 横引き樹方式

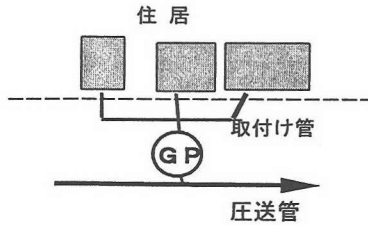


図-7 圧力式2, 3の模式図

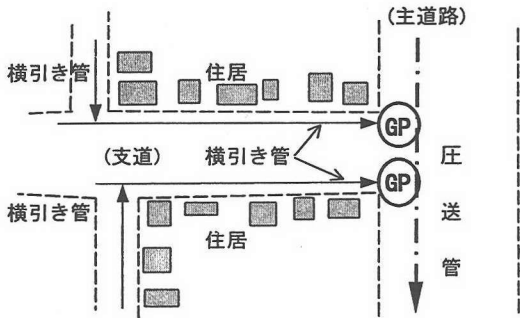


図-8 圧力式4の模式図

接続する。①比較対照の原案として1戸に1ユニット(1.2kW-GP)を設置するシステムを圧力式1(圧力1)とした。このシステムでは中継ユニットを4個所設置した。②1.5 kW-GPに3~4戸を接続し、1条管で収集するシステムを圧力式2(圧力2)、③2.2kW-GPに4~8戸を接続し、主要管路を路肩に浅く(土被り0.6m)埋設するシステムを圧力式3(圧力3)とする(図-7参照)。④2.2 kW-GPは吐出量が大きく、より多くの戸数を集水すれば、GPユニット数を減少することができるため、自然流下式との組み合わせ形として支道に横引き樹方式で路肩/歩道埋設にて主道路まで集水し、主道路沿いにGPユニットを配置するシステムを圧力式4(圧力4)とした(図-8参照)。この場合、ユニットには14~15戸が接続される。

真空式は全体水量で真空ステーションの規模が決まり、使用管径は圧力式ほど多くなく、ユニットの初期エネルギーは圧力式に比べ小さいためユニット数の減少や細かな配管検討による大幅な省エネルギー効果は期待できない。しかし、このモ

表-17 システム形態

システム名	略名称	特徴	概要
標準型 自然流下式1	自然1	コルネット樹, CRC管 維持管理 : 中間頻度	普通土 地下水位 2m 本管延長 4,291 m 最小管径 200 mm
標準型 自然流下式2	自然2	コルネット樹, CRC管 維持管理 : 最大頻度	普通土 地下水位 2m 本管延長 4,291 m 最小管径 200 mm
自然流下式3 (横引き樹方式)	自然3	塩ビ樹, PVC管 横引き樹方式 (管径 150 mm)	普通土 地下水位 2m 本管延長 4,291 m 最小管径 200 mm
自然流下式4 (揚水併用型 +横引き樹方式)	自然4	塩ビ樹, PVC管 揚水用ポンプ場 横引き樹方式 (管径 150 mm)	普通土 地下水位 2m 本管延長 4,291 m 最小管径 200 mm
圧力式1	圧力1	1戸に1ユニット (宅内設置) GP 412台, 1.2 kW 中継ユニット4基 1条管	管径50~150 mm 土被り 1.2 m 本管延長 4,291 m
圧力式2	圧力2	3~4戸に1ユニット GP 100台, 1.5 kW 1条管	管径50~250 mm 土被り 1.2 m 本管延長 4,291 m
圧力式3	圧力3	4~8戸に1ユニット GP 72台, 2.2 kW 主要管路2条管	最大管径 150 mm 土被り 0.6~1.2m 本管延長 4,788 m
圧力式4	圧力4	14~15戸に1ユニット GP 28台, 2.2 kW 本管2条管 横引き方式との合併型	最大管径 150 mm 土被り 0.6~1.2m 本管延長 1,000 m
真空式1	真空1	1戸に1ユニット (宅内設置) 真空弁数412基 1条管	本管延長 4,291 m 土被り 1.2 m 真空ポンプ 5.5kW 圧送ポンプ 3.7kW
真空式2	真空2	6戸に1ユニット 真空弁数 69基, 主要管路2条管	本管延長 4,788 m 土被り 0.6~1.2 m
真空式3	真空3	6戸に1ユニット 真空弁数 69基, 主要管路2条管 運転短縮率30%	本管延長 4,788 m 土被り 0.6~1.2 m

デル地区では家屋間距離が11 mであることから図-3より接続戸数を6戸以上にする事で省エネルギーに繋がると考えた。①1戸に1ユニットを設置し、1条管による収集システムを真空式1(真空1)、②ユニット数の減少による初期エネルギーと管理エネルギーの減少を期待して、真空弁の吸引能力から1ユニットに6戸接続するシステムを真空式2(真空2)として検討した。ここで主要管路を2条管とした。③真空2の施設において、制御運転による真空ポンプの運転時間の短縮を考慮して制御率30%での運転エネルギー低減によるLCEの低下を期待す

るシステムを真空式3(真空3)とした。圧力式および真空式でのユニットまでの取付け管及び樹はPVC製とし、自然流下式取付け管の維持管理エネルギーを参考にしてその延長、個数分を計上した。

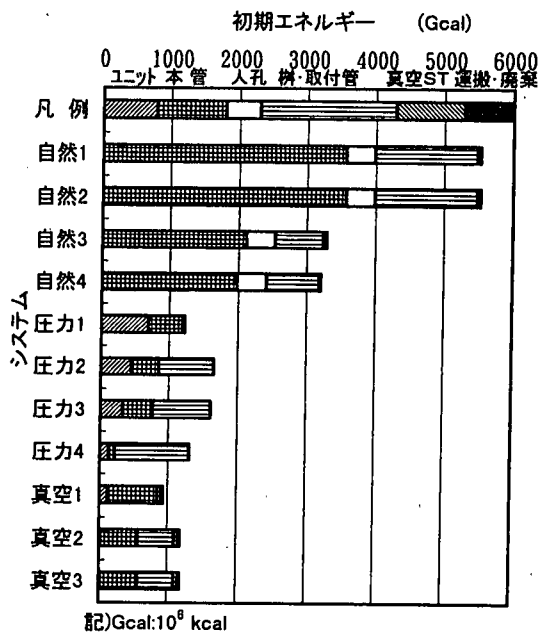
管路材の耐用年数については特定が難しいが、ある調査報告²⁹⁾によると、既設の自然流下式下水道の管路については30～35年経過後に陥没などの障害の発生件数が最大となり、この時期に耐用年数を迎えると分析している。また圧力式、真空式下水道の維持管理を長年行っているオランダの維持管理会社の資料³⁰⁾によると、圧送管(PVC)の耐用年数を50～60年と設定している。これからこのケーススタディでは、CRC管の耐用年数を標準で30年として自然1のケースに適用し、最大頻度での維持管理を行うことで施設の寿命を伸ばすことができると仮定して、自然2の耐用年数を35年と設定した。圧力式および真空式の管路の耐用年数は50年、機械設備は各々実耐用年数にて部品交換する条件で廃棄も含めた50年間での総エネルギー量をLCEとして算定した。自然4に用いる揚水用ポンプも同様に部品交換を耐用年毎に行っていくものとした。

(3) 初期エネルギー

図-9は各ケースの初期エネルギーとその施設構成を示したものである。図に示すとおり、標準型自然流下式(自然1, 2)は、圧力式、真空式の3～4倍のエネルギーを要し、その施設構成は管路に60%、樹・取付管に30%、人孔は10%である。管路、樹をPVCにし、横引き管による浅い埋設によって、樹・取付管エネルギーを50%にすることができる(自然3)。揚水用ポンプによる土被りの減少はこのケース(20ha)では2%省エネルギーであった(自然4)。圧力式はユニットの数を減らすことでは樹からユニットまでの取付管のエネルギーが増加するために、全体的には省エネルギーには繋がらなかった。真空式では各戸にユニットを設置することで樹・取付管が不要となり、やや省エネルギーとなった。管路を一部2条管にすることは、対象延長が短いため全体にほとんど影響しなかった。真空弁製造に掛かるエネルギーは圧力式GPに比べて小さく、ユニットの占めるエネルギーは10%程度と小さいため、数の減少は初期エネルギーの大幅な減少にはならない。むしろ樹からユニットまでの取付管のエネルギーが全体の初期エネルギー増につながっており、真空式の場合、各戸へユニットを設置することによって初期エネルギーを小さくできる。

真空ステーションも管路、樹・取付管のエネルギーに比べると小さく、全体の5%程度を占めるに過ぎない。また、どのシステムも運搬にかかるエネルギーは1～3%程度である。

初期エネルギーに占める製品エネルギーの割合



記)Gcal:10⁶ kcal

図-9 初期エネルギーと構成(1)

表-18 初期エネルギーと構成(2) (%)

システム	製品	施工	運搬
自然1	11.8	87.1	1.1
自然2	11.8	87.1	1.1
自然3	24.5	73.7	1.8
自然4	19.5	79.5	1.0
圧力1	45.1	54.5	0.4
圧力2	43.7	55.9	0.4
圧力3	42.1	57.5	0.4
圧力4	34.0	65.6	0.4
真空1	37.7	58.2	4.1
真空2	54.0	43.1	2.9
真空3	54.0	43.1	2.9

は、表-18より、自然流下式では12%から25%、圧力式では34%～45%、真空式では38～54%である。施工エネルギーは自然流下式では74～87%、圧力式では55～65%、真空式では43～58%を占めている。自然流下式が建設に多大なエネルギーを費やし、圧力式や真空式では製品の占める割合が大きい。

(4) 維持管理エネルギー

図-10に年間換算した維持管理エネルギーの比較とその作業構成を示す。維持管理はその作業頻度の設定条件で大きく変わり、標準型自然流下式の平均的な作業頻度と最大の頻度とでは3倍の開きがある。このため最大の頻度では圧力式や真空式に比べて2倍～4倍になる。標準型自然流下式の作業項目におけるエネルギー構成は頻度に関係なくバランスしているが、圧力式では、定期点検および修理で90%を占め、真空式では定期点検が60～70%を占める。

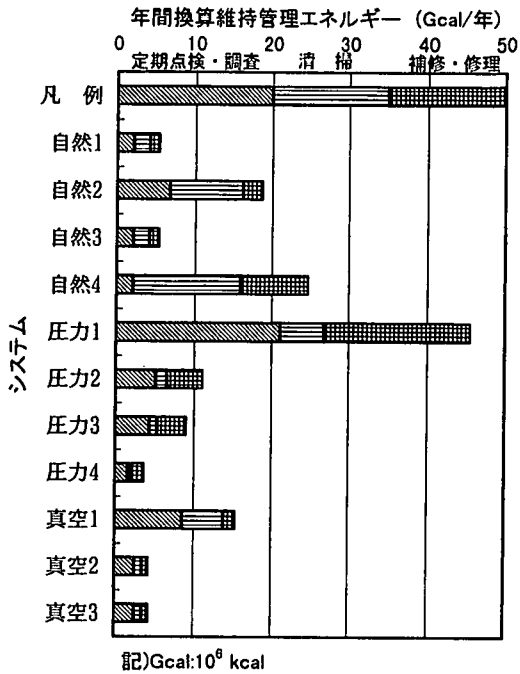


図-10 維持管理エネルギーと構成 (1)

真空式の修理エネルギーは圧力式より小さい。これは真空弁が主にプラスチックによって製造されているのに対し、圧力式のGPが鋳鉄などの金属で構成されているため、部品の製品エネルギーが大きくなるためである。また真空ステーションにかかる維持管理エネルギーはこのケースでは1,600Mcal/年であり、全体の10~30%を占める。

圧力式と真空式とは基本的にはポイントメンテナンス（ユニットを中心とした拠点を対象としたものであり、自然流下式のようにラインもしくは面的な管理ではない）であるため、ユニットの個数が大きく影響する。表-19に示すように、部品交換に伴う製品エネルギーは圧力式で72~76%、真空式で49~62%を占め、移動や作業に伴う燃料のエネルギーは自然流下式95~96%、圧力式24~28%、真空式38~51%である。部品交換の頻度の低下とリサイクルによる製品エネルギーの減少が省エネルギーに大きく影響する。

(5) 運転エネルギー

運転エネルギーは、電力エネルギーを計上しているため、標準型自然流下式では0 kcalとした。圧力式ではGPの台数及び運転時間に依りて増減する。各ケースの平均運転時間は表-20の通りである。真空式はステーションの真空ポンプ(5.5kW)が1日に9.3時間稼働し、ステーション外への送水用汚水ポンプ(3.7kW)が8時間稼働するためにその電力エネルギーはあわせて182 Mcal/日となる。圧力式では

表-19 維持管理エネルギーと構成 (2) (%)

システム	部品	燃料	その他
自然1	0.0	95.4	4.6
自然2	0.0	96.2	3.8
自然3	0.0	95.4	4.6
自然4	0.2	95.7	4.1
圧力1	71.5	28.3	0.2
圧力2	71.7	28.1	0.2
圧力3	75.0	24.8	0.2
圧力4	75.8	24.0	0.2
真空1	48.5	51.4	0.1
真空2	61.8	37.8	0.4
真空3	61.8	37.8	0.4

表-20 GPの平均運転時間

システム	平均運転時間 (分/日)	平均運転エネルギー (Mcal/台・日)	備考
圧力1	13.2	0.6	1.2kW
圧力2	26.6	1.5	1.5kW
圧力3	22.4	1.8	2.2kW
圧力4	24.4	2.0	2.2kW

記) Mcal:10³kcal

1日の運転時間は短く、ポンプの出力数も1.2~2.2kWと小さいために、GP台数を制限することで運転エネルギーは真空式よりも小さくすることができる。

(6) LCEの比較

表-21はLCE年間換算値の比較を示したもので、維持管理の頻度を最大にして耐用年数を5年伸ばした自然2は自然1より約7%省エネルギーとなる。維持管理を確実にすることで総エネルギーは大きくなるが、耐用年数が伸び、年間当たりに換算した場合に省エネルギーとなってくる。自然3ではPVC-VU管を用いることで初期エネルギーが低下し、LCE年間換算値が自然1、自然2にくらべ38~33%小さくなっている。圧力式は運転・維持管理エネルギーがLCEの70~86%を占めるが、初期エネルギーが14~36%であるため、LCE年間換算値は自然流下式より小さくなる。

また、耐用年数後の再構築では建設・製品エネルギーにGP等の機械類は含まれなくなるため、図-11に示すような100年間の経年変化では総エネルギーをやや押さえることができる。真空式は運転エネルギーがLCEの67~83%を占めるが、圧力式同様、初期エネルギーを小さくできるため、LCE年間換算値が自然流下式より小さくなっている。維持管理エネルギーのLCEに占める割合は標準型自然流下式、揚水併用型自然流下式、圧力式および真空式ともあまり大きくない。自然流下式にとっては初期エネルギー、そして圧力式、真空式にとっては運

表-21 LCEの年間換算値による比較

システム	耐用年数 (年)	LCE (Gcal)	LCE年間換算 (Gcal/年)	年間換算内訳 (Gcal/年)			
				初期	維持管理	運転	運搬・廃棄
自然1	30	5,760	192.0	184.9	5.2	0.0	1.9
自然2	35	6,260	178.9	158.4	18.8	0.0	1.6
自然3	30	3,580	119.3	110.1	7.4	0.0	1.9
自然4	30	4,070	135.7	107.4	7.9	18.5	1.9
圧力1	50	9,110	182.2	24.7	46.1	111.2	0.1
圧力2	50	7,410	148.2	33.3	12.3	102.4	0.1
圧力3	50	5,210	104.2	32.5	10.4	61.3	0.1
圧力4	50	4,540	90.8	26.5	4.9	59.3	0.1
真空1	50	5,810	116.2	17.1	15.6	82.9	0.7
真空2	50	5,590	111.8	23.0	5.3	82.9	0.7
真空3	50	4,800	96.0	23.0	5.2	67.1	0.7

記)Gcal:10⁶kcal

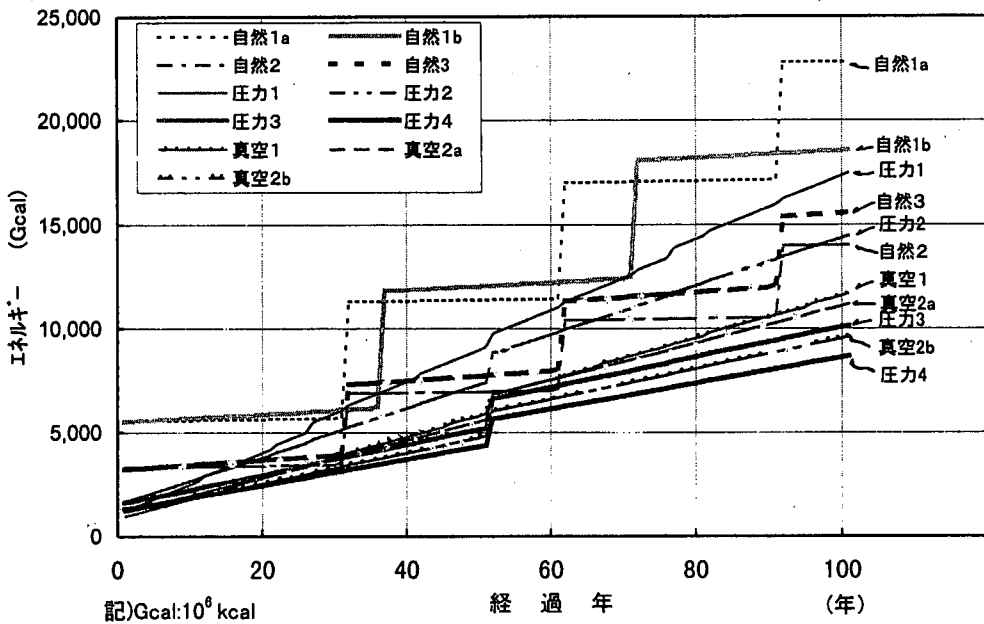


図-11 LCEの経年変化

転エネルギーがLCEの大きな影響因子である。初期エネルギーは地形、土質など現場の状況に大きな影響を受けるため、初期エネルギーの小さいシステムはLCE算定における不確定要素が少なく、省エネルギーシステムを構築する際のリスクが小さいと言える。

圧力1と圧力4の比較から、圧力式はGPの台数を減らすことで、運転エネルギーを約半分にすることができ、真空2と真空3の結果から、運転制御により運転エネルギーを減少させることが可能である。図-11の運転・維持管理エネルギーの経年変化がほぼ直線を示すことから、機械電気設備の修理・交換はエネルギーを大きく変化させる要素にはなっておらず、運転エネルギーに経年変化の傾

きが依存していることがわかる。真空式は弁の個数を変えても初期エネルギーを小さくすることは難しいが、運転管理の制御によって経年変化に影響を与えることができる。

9. まとめ

基礎素材、製造、運搬、建設、運転、管理および廃棄に至るライフサイクルエネルギーでの下水道代替システムのエネルギー特性とモデルケース(20ha, 平坦地)での比較を行い、11ケースのシステムについて検討を行った。

- 製品エネルギーのうち素材エネルギーの占める割合が大きく、低エネルギーの代替素材がシステムの省エネルギー化に効果をもつ。
- 圧力式や真空式では製品エネルギーが34～54%程度を占め、そのうち素材エネルギーは76～95%を占めることから、素材のリサイクルが可能となれば、維持管理エネルギーを25～50%減少させることができる。
- 標準型自然流下式では初期エネルギーがLCEの90%以上を占め、そのうち建設にかかるエネルギーが90%程度を占める。これより、現場の施工性がLCEに大きな影響を与える。
- PVC-VU管による土被りの減少は初期エネルギーを40%減少させた。
- 揚水併用型自然流下式下水道は、初期エネルギーを2%減少させることができたが、運転管理エネルギーが約16%増加した。
- 維持管理の頻度を高くすることによる施設の延命が、省エネルギーにつながる。
- 標準型自然流下式は横引き柵等浅い埋設の可能な部分を活用していくことで省エネルギーが可能である。
- 圧力式はGP (1.2～2.2kW) の運転・維持管理エネルギーが0.6～2.0 Mcal/台・日であり、GP数の減少が省エネルギーに大きく影響する。
- 真空式では、真空ステーションの運転エネルギーがLCEの大部分を占めるため、真空ポンプの運転制御が今後の省エネルギーへの課題である。

10 おわりに

下水道幹線への接続を前提として、20haを対象に標準型および揚水併用型自然流下式、圧力式、真空式のエネルギー比較を行った。多くの機械設備を伴う圧力式および真空式でも標準型および揚水併用型自然流下式より省エネルギーとなりうるということがわかった。面積20haの平坦地のみについての検討であったが、土被りの小さい、圧力式や真空式を適用することで、幹線の土被りの減少、ルートの短縮化といった波及効果による省エネルギーも考えられる。普及率が56% (平成9年度末) に達し、今後整備の進む地区は地形や地盤状況も様々な性格を有すると予想される。地形をうまく利用し、これらのシステムを組み合わせることで、さらに省エネルギー下水道システムを実現することが可能である。

謝辞：データの収集にあたっては、多くの会社、工場の方々にご協力いただきました。突然の電話

依頼にも係らず、貴重なデータを測定、提供していただきました。個々のデータについては社外秘扱いのものであり、ご協力頂いた会社名、担当者名は控えさせていただきます。紙面をかりて厚くお礼申し上げます。また、作業開始時点では圧力式下水道システム研究会の方々へ貴重なアドバイスをいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 森下兼年, 池田秀昭: 下水道システムのライフサイクルアセスメント: LCEおよびLC-CO₂による評価, 土木学会論文集, No. 552/VII-1, 75-84, 1996. 11.
- 2) 鶴巻峰夫, 藤岡荘介, 内藤弘: 下水道終末処理施設のライフサイクルでの環境負荷の定量化について, 第4回地球環境シンポジウム, pp. 57-62, 1996.
- 3) Arthur Williams: A comparison of energy requirements for making polyethylene, unplasticised polyvinyl chloride and ductile iron water pipes, *Institution of Water officers Journal*, No. 2, 8-1, 1992. 28.
- 4) R. Jeschar, Clausthal-Zellerfeld, E. Specht, A. Steinbrück, Magdeburg: Energieverbrauch und CO₂-Emission bei der Herstellung und Entsorgung von Abwasserrohren aus verschiedenen Werkstoffen, *Korrespondenz Abwasser*, pp. 537-549, 1995.
- 5) 和田安彦: 家電製品のリサイクルへのLCAの適用, エネルギー資源, Vol. 17, No. 6, pp. 38-42, 1996.
- 6) (社) 化学経済研究所: 基礎素材エネルギー解析調査報告書, 1993.
- 7) (財) 省エネルギーセンター: エネルギー・経済統計要覧, pp. 301, 1996.
- 8) (社) 日本水道協会: 水道統計 施設・業務編, 第77-1, pp. 658-659, 1994.
- 9) 小野崎保: セメント産業におけるエネルギー消費動向, エネルギー経済 第15巻, 第8号, pp. 8-22, 1989.
- 10) 桑原修: ライフサイクルアセスメント (LCA) 環境調和社会の新技术, (4)-④石油製品, エネルギー資源, Vol. 17, No. 6, pp. 55-60, 1996.
- 11) (社) アスファルト同業会: アスファルト及びその応用, 1967.
- 12) R.J. Ehrig: プラスチックリサイクリング, 工業調査会, 1993.
- 13) (社) 日本下水道協会: 下水道用設計積算要領-管路施設 (開削工法) 編一, 1992.
- 14) 下水道工事積算研究会編: 建設省下水道工事積算基準, 1994.
- 15) (財) 建設物価調査会: 土木工事積算基準マニュアル, 1995.
- 16) (財) 建設物価調査会: 建設工事標準歩掛, 1995.
- 17) 建設機械研究会編: 建設機械ハンドブック, 鹿島出版会, 1996.
- 18) 建設機械研究会編: 建設機械ハンドブック, 鹿島研究所出版会, 1971.
- 19) (社) 日本建設機械化協会: 建設機械等損料算定表, 1993.

- 20) (社) 日本下水道管渠推進技術協会：推進工法用設計積算要領 小口径管推進工法編，1996.
- 21) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック，(株) 建設産業調査会，pp. 819, 1979.
- 22) 浜松市村櫛町：村櫛処理分区（真空式）管渠および中継ポンプ場築造工事設計資料，1992.
- 23) 鳥取県三朝町：山田真空ポンプ場ポンプ設備工事設計資料，1992.
- 24) (社) 日本下水道管路維持管理業協会：下水道管路施設の維持管理方法に関する調査報告書，1996.
- 25) (社) 日本下水道協会：下水道施設維持管理積算要領—管路施設編—，1993.
- 26) 長昭寛他：真空式下水道システム（第2報），エバラ時報，第149号，1990.
- 27) 川口恭司，長昭寛：容積形流体機械の可変速動力制御による性能向上：エバラ時報，第176号，1997.
- 28) 下水道計画研究会：下水道計画の手引き，(財) 全国建設研修セミナー，1997.
- 29) (社) 日本下水道協会：第5回 下水道技術セミナー（維持管理部門）テキスト—管渠の補修・更新工法—，pp. 58-69, 1995.
- 30) *MECHAMISCHE RIOLERING A ANBEVELINGEN BEHEER EINDRAPPORT ONDERZOEKSPROJECT 92-03, FEBRUARI 1994 CIP-GEGEVENS BBUREAU/KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG., 1992.*

(1998. 4. 14 受付)

STUDY ON ENERGY SAVED ALTERNATIVE SEWER SYSTEMS BY LIFE CYCLE ENERGY(LCE) ANALYSIS

Kunji AKINAGA and Mamoru KASHIWAYA

To calculate life cycle energy (LCE) of sewer systems like conventional gravity system only, alternative gravity system with pumping stations, pressure system and vacuum system, unit energy values of materials were referred from papers but energy consumption of producing process were collected from many factories in Japan. Construction energy was calculated based on standards of cost estimation. Operation and Maintenance energy of pressure/vacuum systems were estimated based on the investigation by interviewing and questionnaire. Energy saved alternatives were considered in each sewer system and 11 alternatives were compared in the condition of 20 ha area, 70 persons / ha, flat and 2m ground water level from surface by LCE converted into annual value and annual change in case study.