

特 集

エネルギーの複合利用技術

畜産廃棄物のメタン醗酵によるエネルギー有効利用

Energy Utilization by Anaerobic Digestion from Animal Waste

小 暮 忠 宏*・安 藤 見**

Tadahiro Kogure Akira Ando

1. はじめに

農水省統計¹⁾によれば、我国の養豚飼育頭数は昭和55年度に1,000万頭を超え、同年の農政審議会答申²⁾においては、昭和65年度には約1,300万頭に達すると予測されている。養豚飼育頭数の増大につれて、排出される糞尿量も比例的に増大し、今や、産業廃棄物として難問題がクローズ・アップされて来ている。

糞尿の処理にあたって、嫌気性醗酵による消化処理を行い、減容化と無害化を達成する方法が当然推奨される訳であるが、その際発生する消化ガス（主成分はメタン）をエネルギー源としてとらえ、地域社会において有効に利用することが発想される。

ここでは、養豚糞尿の消化醗酵による消化ガスを利用する2つのケースについて想定を行った。

その1つは、ある規模の養豚事業所が、そこで発生する糞尿の消化ガスを、自からの養豚施設のエネルギー源として利用するケースであり、他の1つは、ある養豚地域で発生する糞尿を集中処理し、その地域の中心的地方都市の都市ガス供給事業において、消化ガスを都市ガス源の一部として混合利用するケースである。

2. 養豚事業における消化ガスの自家利用

このケースは豚舎から排出される糞尿を嫌気醗酵により消化処理し、その際発生する消化ガスを熱、および電力として養豚経営に利用しようとするものである。

このようなシステムが成立するためには、養豚経営の規模がある程度以上に大形化することが、経済性から要求されるところである。

養豚経営規模の推移は、農林水産省統計¹⁾によると昭和45年頃以降次第に大形化しており、特に飼養頭数（在舎頭数）1,000頭以上の規模の養豚場の伸びが顕著

である。この傾向は今後とも継続すると予測され、昭和75年（西暦2,000年）には、全国的全飼養頭数の半数以上が1,000頭以上の規模で飼育されるようになり、その戸数は5,000戸を超えるであろうと推算される。

養豚経営規模が大形化に向かう状況にあるだけに、以下に紹介する糞尿エネルギー有効利用システムの社会的有用性が期待されるわけである。

2.1 システムの概要

システムのフローシートを図-1に示す。糞尿はまず受け槽に集められ、固液分離ののち、消化処理温度にまで加温して、醗酵槽へ送り込む。加温熱源としては、このシステム内からの廃熱を利用する。醗酵槽において糞尿は消化され、消化ガスを発生して、消化汚泥となる。消化汚泥は凝集、脱水し、脱水汚泥は堆肥として市場に提供し、滲液には必要な水処理が施される。醗酵槽で発生した消化ガスは、脱硫して、一旦ガスホルダーに貯留するが、このガスはガスエンジン駆動発電機で発電して、豚舎内の所要電力および消化処理設備、脱水設備などの所要電力をまかなう。またエンジン冷却水ならびに排気ガス熱回収器によって回収した廃熱は、糞尿の醗酵前の加温に利用するほか、消化ガスの一部は温水ボイラーの熱源として利用し、豚舎の暖房用として利用する。

1,000頭規模の養豚経営の場合を想定すると、豚舎から排出される糞尿は1日当り約4,900kgであり、この糞尿から発生する消化ガスの量は1日当り225m³である。

2.2 システムのエネルギーバランスと経済性

100頭一貫^(注)の養豚経営に必要な熱および電力は表1に示すように、季節によって異なっており、養豚に必要なエネルギーは冬季が圧倒的に大きく、電力では205kWh/日、そして熱としては780,000kcal/日を必要とする。したがって、冬季における所要エネルギ

(注) 母豚100頭を擁して経営する場合に相当し、したがって、在舎豚数としては1,000頭規模である。

* 大機ゴム工業㈱東京工場計画設計課長

〒277 柏市新十番二丁目

** 日立造船㈱ 調査役

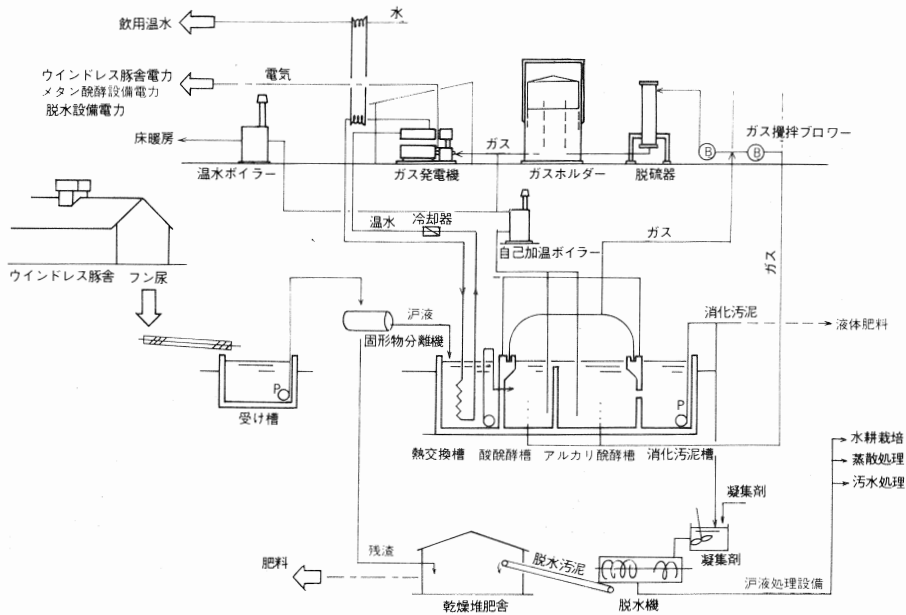


図-1 消化醱酵による熱電併給システムのフローシート

表 1 100 頭一貫豚舎の経営に必要なエネルギー

季節 \ 設備	冬 (1月~3月)		春・秋 (4月~6月 10月~12月)		夏 (7月~9月)	
	電力(kWh/日)	熱(kcal/日)	電力(kWh/日)	熱(kcal/日)	電力(kWh/日)	熱(kcal/日)
豚舎	155	565,000	115	0	135	0
メタン醱酵設備	25	145,000	25	130,000	25	6,000
脱水設備	25	—	25	—	25	—
合計	205	710,000	165	130,000	185	6,000

ーが満足されるならば、他の季節では余剰を生ずる。

1,000 頭規模 (100 頭一貫) の養豚経営において、本システムを採用した場合のエネルギーバランスは図-2に示したとおりである。表 1 に示したエネルギー需要、すなわち電力として 205 kWh/日、そして熱として 780,000 kcal/日を、すべて消化ガスをエネルギー源として供給することができる。

1,000 頭規模の養豚経営において本システムを採用する場合の設備費用は、豚舎 (環境調製機能のすぐれたウィンドレス豚舎) を含めて、約 1 億 5 千万円である。一方、その場合の経営収支は表 2 に示すとおりである。表に示すように、初期投資額の函数である。

$$\text{修繕費 } a) + \text{減価償却費 } b) + \text{金利 } c)$$

に割くことのできる費用は 1,650 万円/年となる。今、減価償却期間を 15 年 (1 割残存)、借入金は金利 8 % 10 年返済 (年間平均利息 4.4 %) とし、修繕費 (年間) は設備費の 2 % とすると、

$$a + b + c \leq 1,650 \text{ 万円}$$

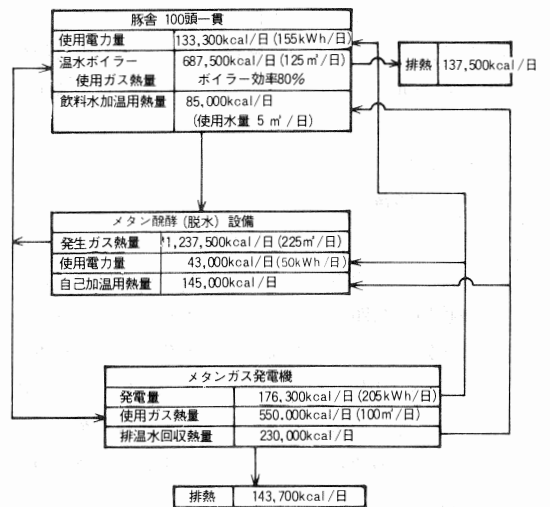


図-2 エネルギーバランス (冬期)

であるから投資限界を Y とすると

$$\frac{0.9}{15} Y + 0.044 Y + 0.02 Y \leq 1,650 \text{ 万円}$$

表2 1,000頭規模の経営収支(年間)

		総額 (円)	
生産物数量		肥育豚 2,037 頭 候補数 33 頭	
経営費用 (A)	生産費用	飼料代	45,000,000
		家族労働費	6,000,000
		診療衛生費	2,800,000
		小農具費	300,000
		ランニングコスト	3,600,000
		修繕費	(a)
		雑費	100,000
	固定費用	減価償却費	(b)
		“(種雄豚) * 1	2,000,000
		租税公課	250,000
経費	金利	(c)	
	販売経費 * 2 一般管理費 * 3	3,000,000 1,400,000	
計		63,450,000 + a + b + c	
粗収益 (B)	枝肉	78,500,000	
	皮代	1,500,000	
	内臓代	3,300,000	
	廃豚 種雄豚	200,000	
	種雌豚	1,500,000	
計		85,000,000	
事業利益 (B - A)		5,000,000	
所得 (事業利益 + 家族労働費)		11,000,000	

(注) * 1 - 50万円/頭 × 4頭/年

* 2 - 屠畜代および売上手数料

* 3 - 交通通信費, 保険料など

そこで

$$Y = 13,350 \text{ 万円 (1 億 3 千 3 百 5 十 万円)}$$

となり, 本システムの設備費約1億5千万円は投資限界を若干越えている。そこで, このような設備導入に対しては, 国あるいはその他の公共体による助成制度の適用が要望される。

2.3 問題点

消化汚泥の消化汚液の処理は, 公害規制の強化に伴って, 処理費用が増大し, それが養豚経営における経費負担の問題の一つである。本システムでは消化汚液は蒸散される方式を採用すると想定し, 設備費として約2,500万円, そして年間の運転経費として売電による電力費が約240万円1年と, 大きな金額となっている。今後の課題として, 汚泥の水処理の経済性向上が挙げられる。

3. 糞尿消化ガスの都市ガスとの混用システム

このケースは養豚廃棄物としての糞尿を, 都市ガス供給事業所の近傍に集荷し, そこで消化処理を行い,

得られた消化ガスを都市ガスに混入し, 地域エネルギーとして利用しようというものである。

消化ガスを都市ガスに混入する場合には, 次の諸条件を考慮することが必要である。

①都市ガス供給事業所の供給種別を変更しないこと。

②現用のガス器具で安定した炎で完全燃焼すること。

ガス事業法³⁾では表3に示すように, ウォッペ指数(W.I.)と燃焼速度指数(C.P.)の組合せによって, 14種別に分類している。したがって混合ガスは, 現在の当該都市ガス供給事業が該当しているガスの分類種別のW.I., C.P.の範囲内におさまることが, 肝要である。

表3 ガス事業法による分類種別

分類種別	燃焼速度の類別	ウォッペ指数		C.P.の巾
		最大	最小	
4 A	A(遅い)	4280	3720	21~56
5 A N	“	4970	4320	22.3~58.4
5 A	“	5400	4700	23~60
6 A	“	6740	5860	25.5~64.7
11 A	“	12000	11000	36~85.7
12 A	“	12850	11750	37.5~88.8
13 A	“	13800	12600	39.2~92.2
4 B	B(中間)	4330	3770	38~66
5 B	“	5350	4650	41~73
6 B	“	6850	5950	49~86
4 C	C(速い)	4550	3950	47~80
5 C	“	5890	5110	55~96
6 C	“	6530	5670	60~105
7 C	“	7060	6140	60~105

消化ガスは一般に, メタン(CH₄)50~70%, 炭酸ガス(CO₂)50~30%の構成比であって, 発熱量は5,000~6,000kcal/m³である。消化ガスのCH₄, CO₂の構成比が変れば, そのW.P.およびC.P.は表4のとおりになる。

消化ガス混入の適否は, 消化ガスの発熱量を6,000kcal/m³と想定した場合, ガス分類種別でいう, 4A, 4B, 4C~6A, 6B, 6Cの範囲が適合しやすく, 11A, 12A, 13Aに対しては適用が困難である。しかし消化ガスに対して脱CO₂を施すなどしてCH₄比率

表4 消化ガスのW.IおよびC.P.

CH ₄	CO ₂	W I	C P
50%	50%	4,660	14.7
60	40	5,870	18.5
70	30	7,230	22.8
80	20	8,780	27.7
90	10	10,589	33.4

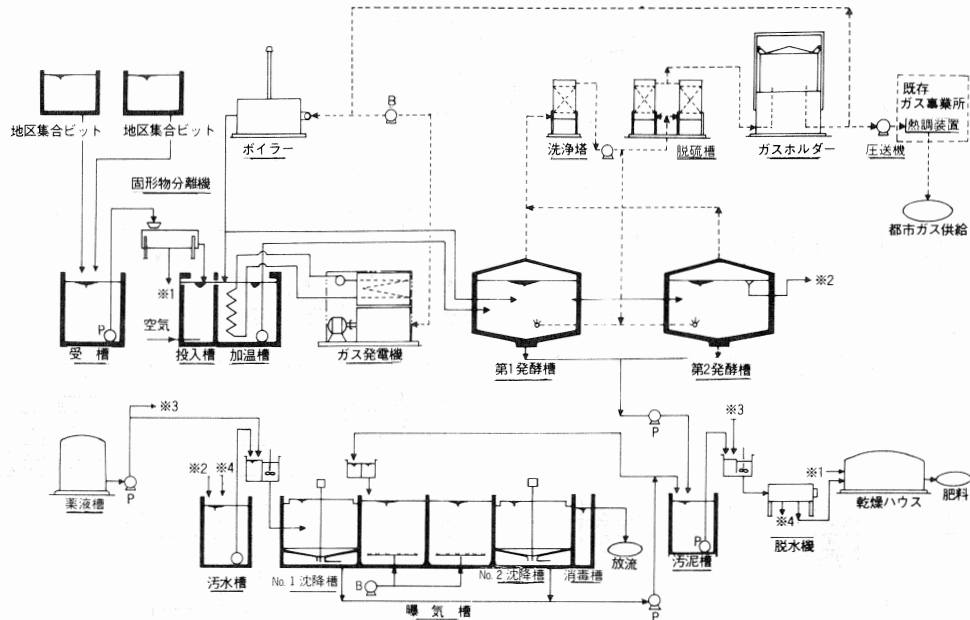


図-3 畜産廃棄物複合利用システムのフロー図

を上げれば適合性は向上する。

3.2 システムの概要

このシステムのフロー図を図-3に示す。豚舎から排出された糞尿は各戸から地区集合ピットに集められ、さらにメタン醗酵基地の受槽まで輸送される。受槽の糞尿は固形物分離機で粗大物を分離したのち投入槽に送られ、冬季は加温槽で必要温度35℃まで加温される。加温熱源はガスエンジン発電機の廃熱および消化ガスを利用したガスボイラーで生産した蒸気である。メタン醗酵（消化処理）は2槽式醗酵槽を使用して中温醗酵にて行う。消化処理後の脱離液は污水处理設備へ送り、消化汚泥は脱水機で脱水処理して堆肥化し沼液は污水处理設備へ送られる。

醗酵ガス（消化ガス）は、洗浄塔でミストを除去し脱硫塔で硫化ガスを除去した後、ガスホルダーに貯留される。その際、付臭器で付臭される。ガスは需要に応じて都市ガス事業者の事業所に圧送機を通じて送り出され、そこで熱量調節設備によって、必要な燃焼性を持つ混合ガスに調節される。前述の脱離液および沼液は污水处理設備によって放流先河川等の排出基準に適した水質までに処理した上、放流される。このメタン醗酵基地ではガスエンジン発電機を設置し、基地内の所要電力は外部電力に頼ることなく、自給するという考え方である。

3.3 システムのエネルギーおよびマテリアルバランス

本システムのエネルギーおよびマテリアルバランスの一例を図-4に示す。ここでは、ある養豚地域を仮定し、その地域の中心的な地方都市の都市ガスに、消化ガスを混入利用する場合を想定している。その地域の養豚飼育頭数のうち、集荷上の条件を満足する11,000頭分の糞尿を集荷してメタン醗酵基地で消化処理するケースである。豚一頭当りの糞尿から得られる消化ガス量は1日当り0.2 m³と考えれば、1日当り2,200 m³の消化ガス（メタンガス比率60%、発熱量5,725 kcal/m³と仮定）が発生する。そのうち800 m³/日はガスエンジン発電機に利用し、また300 m³/日はガス焚ボイラの燃料として利用し、ともに基地内の所要エネルギー（冬季最大需要時）をまかなう。したがって残り半量の1,100 m³/日が、都市ガスに混入するために送り出されるガス量である。すなわち日量にして、6.29 × 10⁶ kcal/m³の熱量を消化ガスとして、都市ガス供給業に提供できることとなる。

マテリアルバランスとしては日量約99 tの糞尿等が搬入され、2,200 m³の消化ガス（うち1,100 m³は所内消費）が生産され、137 t/日の汚水が污水处理されて、うち102 m³が放流され、また日量34 tの消化汚泥から13.5 t/日の堆肥が生産されることになる。

3.4 システムの可能性

本システムは養豚廃棄物の消化処理に際して発生す

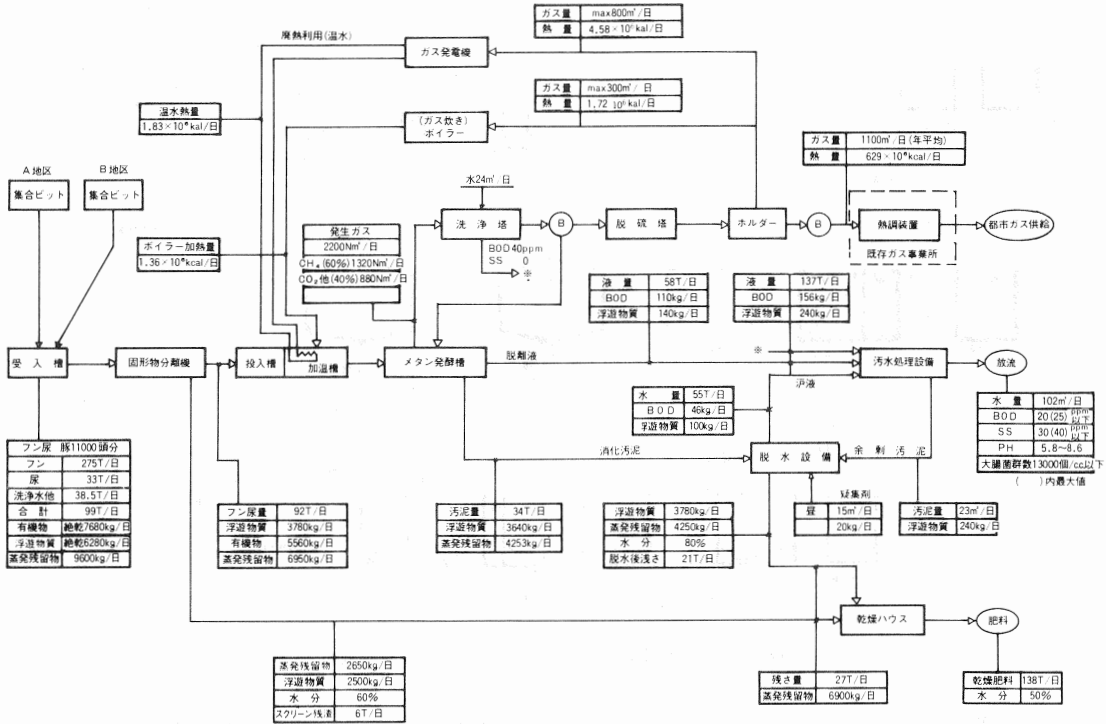


図-4 畜産廃棄物複合利用システムのエネルギーバランス

る消化ガスの都市ガスへの混入供給というシステムであって、本システムが成立するためには、次の諸条件が満足されねばならない。

- ① ガス供給事業が、養豚地域の中心点地方都市に存在すること。
- ② ガス供給事業所を中心とした、養豚地域の半径は、廃棄物輸送距離との関連から15km以内程度がのぞましい。
- ③ 消化ガス (CH₄ : CO₂ = 60% : 40%、発熱量は約6,000 kcal/m³) の特性からすると、このガスと混合する対象となる都市ガス供給事業のガスの分類種別としては、次の順位で適合性が高い。

- 1位 6A
- 2位 6B, 6C, 5A, 5AN, 5B, 5C, 4A, 4B, 4C
- 3位 11A, 12A, 13A (ただし脱CO₂が必要)

消化ガスの増熱操作 (脱CO₂などの) を行わずに、混合することを前提とするならば、対象の都市ガス分類種別としては

6A, 6B, 6C, 5A, 5AN, 5B, 5C, 4A, 4B, 4C が該当する。したがって全国の子ガス供給事業³⁾の都市ガスに対して、本システムにおける消化ガスを混合使用できるのは116事業所の都市ガスが、それに該当す

る。ただ、現在でも総飼育豚頭数が250,000頭を越える養豚都道府県は、北海道、岩手、宮城、福島、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、新潟、静岡、愛知、愛媛、長崎、熊本、宮崎、鹿児島、沖縄であって、これらの道府県において、上記のごとき消化ガスとの適合性を有するガス事業所に絞れば、58事業所となる。これらは有数の養豚県であるので、その県内の養豚場の分布と地方都市の所在地との距離関係を仔細に調査して適地を選定する必要がある。

いま、適地選定に当たって、都市ガス供給事業の規模 (Q) と、これに対応する養豚飼育数 (N) との関係は

$$N = \frac{r \cdot Q}{q} \tag{1}$$

で示される。ここに

Q : 都市ガス供給事業の規模 (年間販売量) (kcal/年)

q : 豚一頭当りの消化ガスのうち、消化槽の自己加温用および基地の自家発電用に利用する量を除いて、都市ガス用として有効に利用できる量であって、

$$q = 0.219 \times 10^6 \text{ kcal/年}$$

である。すなわち、豚一頭、一日当りの糞尿から発生する消化ガス量は0.2 m³/頭・日であり、自己消費率は

約50%、消化ガス中のメタンガス含有率約60%、したがって、その発熱量は6,000 kcal/m³として算出した値である。

r：都市ガスへの消化ガスの混入可能な比率であって、ウォッペ指数と燃焼速度指数の適合性をベースに個別に厳密に決定しなければならないが、ここでは簡単のために、一応

$$r = 0.18$$

とした。

したがって都市ガス供給事業の規模Qと、養豚飼育数との関係は表5に示すとおりである。

表5 ガス供給事業に対応する飼育豚数

都市ガス供給事業の規模 (年間販売量) (×10 ⁶ kcal/年)	消化ガス混入可能量 (×10 ⁶ kcal/年)	消化ガス供給量を満たすに必要な養豚飼育数
6,000	1,080	～ 5,000
12,000	2,160	～ 10,000
24,000	4,320	～ 20,000
36,000	6,480	～ 30,000

ウォッペ指数で約4,000～6,000である4A～6Cのガスを供給している地域的都市ガス供給事業の規模は10,000～30,000×10⁶kcal/年の範囲のものが多い。

一方、現在のところでは、前記養豚県における飼育密度からすれば、糞尿集荷の経済規模は30,000頭以下と考えるのが妥当であろう。

そこで、養豚糞尿集荷規模と地方都市ガス事業規模との適合性は高いといえる。すなわち、本システムが規模的には成立する可能性は高いと考えられる。

3.5 経済性の考察

本システムにおける養豚糞尿集合醱酵基地(すなわち、前掲の図-3の範囲の設備費を表6に示してある。

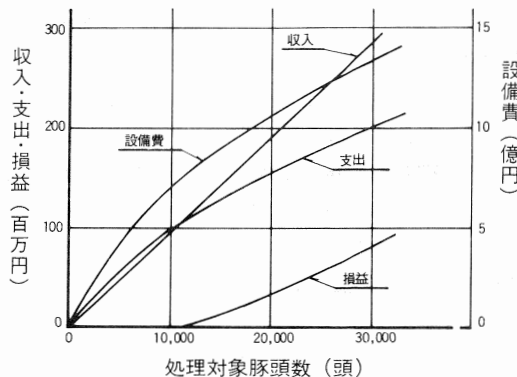


図-5 処理対象豚数とシステムの経済性

表6 設備規模と設備費

設備規模 (処理対象豚頭数)	設備費 (百万円)
5,000	430
10,000	710
20,000	1,070
30,000	1,350

この費用には①集荷設備、②メタン醱酵設備、③ガス精製設備、④自家発電設備、⑤汚水処理設備、⑥堆肥設備に要する費用が含まれている。

本システムの経済性を検討するに当たって、収入として考慮すべき項目は次の通りである。

① 糞尿処理費：養豚業者から頭数当たりとして徴収する。(処理対象豚数に比例する)

② 堆肥売却費：堆肥を市場出荷する。(処理対象豚頭数に比例する)

③ 消化ガス売却費：都市ガス業者への売却による収入。(処理対象豚頭数に比例する)

一方、支出として考慮すべき項目は次の通りである。

① 薬品費：脱水用凝集剤、消化ガス用脱硫剤、消毒剤の購入費(処理対象豚頭数に比例する)

② 用水費：設備内で使用する水道水の費用(処理対象豚頭数に比例する)

③ 補修費：設備費に比例する。

④ 人件費：対家豚数30,000頭までの設備では、3名以下で運転する。

⑤ 業務委託費：糞尿集荷業務を依頼する(処理対象豚頭数に比例する)

⑥ 減価償却費：設備費に比例する。

⑦ 金利：設備費に比例する。

⑧ その他：租税課金、土地借代、事務経費など
今、仮に設備費の50%を補助金、残余を借入金(金利年3%、1年据置、9年返済)の条件でまかなうとして、処理対象豚頭数に対応して試算すると図-5が得られる。

この図では、横軸に処理対象豚頭数をとり、縦軸には、本システムの設備費用および本システムを運用する場合の収入・支出・損益をとって、その採算性を示している。上記のような資金条件においては、飼育頭数10,000頭以上を対象とする場合には、経済的に成立し得る可能性を物語っている。

3.6 問題点

(1) 技術的問題点

糞尿集荷に当たって、糞尿以外の雑用排出の混入量が問題である。雑用排水の混入量が増大すると

- ① 醗酵滞留日数が不足し発生ガス量の減少を来たす。
- ② 加温用エネルギー消費が増大する。
- ③ 設備能力的に設計計画値を満足しなくなり、経済性を圧迫する。

などの問題が起って来る。この点、設計計画値以上の雑用排水の混入が起らないよう、受入基準を管理することが要求される。

(2) 経済的問題点

本システムの経済性に大きく影響する要因は次の3点である。

- ① 糞尿収集費用
- ② 消化ガスを都市ガス基地まで送出する導管布設に要する費用
- ③ 消化処理後の汚水処理費用

①については、処理対象豚の分布密度が最大の問題である。②については、両施設間の距離が問題であり、①とともに立地選定に当って慎重な考慮が必要である。③については、河川放流規制値の範囲内で、より経済的な水処理プロセスを選定することが必要であって、さらにより合理的なプロセスの技術開発が期待される。

(3) 社会的問題点

本システムが持っている本質的な社会的問題点は次の諸点である。

- ① 都市ガス供給業者との供給条件等に関する合意。

- ② 環境問題に関して立地地点の地元との合意。
- ③ 養豚業者との間の糞尿提供の永続性に関する合意。

これらの社会的合意は本システム成立上、欠くべからざるところであって、このような社会的コンセンサスの確立が必要である。

4. おわりに

畜産廃棄物としての養豚糞尿の処理プロセスに消化処理をとり入れ、発生する消化ガスを地域的なエネルギーとして有効に利用し、もって糞尿を環境的に完全に処理するとともに、エネルギー利用するという、二重効果を得る方法について、二つの試案を紹介した。

これらは、技術的にも、経済的にも、社会的にも、なお、多くの解決を要する課題をかかえてはいるが、その解決に向って、社会的合意が得られ、実現に向って進め得られる日が来らんことを期待する。

参 考 文 献

- 1) 畜産統計，昭和57年2月，農林水産省経済局
(財)農林統計協会
- 2) 80年代の農政の基本方向・農産物の需要と生産の長期見通し。(昭和55年10月，農政審議会答申)(財)農林弘済会
- 3) ガス事業便覧，昭和59年，(社)日本ガス協会

協賛行事あんない

第2回触媒燃焼に関するシンポジウム

主催 触媒学会

協賛 日本化学会，石油学会，窯業協会，日本燃焼研究会，燃料協会，エネルギー・資源研究会

日時 昭和61年11月5日(水)13時～17時

会場 京大会館(京都市左京区吉田河原町15-9，
TEL 075-751-8311，京都駅より市バス，17または特17系統に乗車「荒神口」下車，または206系統に乗車「東一条」下車)

プログラム

1. 生治関連機器用燃焼触媒(松下電器)西野 敦
2. 水素と一酸化炭素の燃焼触媒
(大工試)春田正毅

3. 接触燃焼における複合酸化物触媒の素質

(東大工)御園生誠

4. 触媒燃焼の動力発生機への利用

(日本触媒)小野哲嗣

参加費 (資料代を含む)当日会場で申し受けます。
会員 5,000円，学生会員 1,000円，
非会員 7,000円

世話人 御園生誠(東大)，乾 智行(京大)，荒井弘通(九大)，福沢 久(電力中研)，松田臣平(日立中研)

連絡先 〒606 京都市左京区吉田本町 京都大学工学部石油化学教室 乾 智行
TEL 075-751-2111 内線5682