



Title	高濃度有機性廃棄物のメタン発酵処理とバイオガス発電に関する研究
Author(s)	小川, 幸正
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/82">https://hdl.handle.net/11094/82</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

高濃度有機性廃棄物のメタン発酵処理と  
バイオガス発電に関する研究

平成 16 年 8 月

小川 幸正

## 目 次

第1章	緒論	
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	研究の構成	3
	参考文献	6
第2章	有機性廃棄物のメタン発酵処理の現状と課題	
2.1	有機性廃棄物処理の現状	7
2.2	メタン発酵技術の現状	13
2.3	メタン発酵に関する研究開発状況	16
2.4	結言	26
	参考文献	27
第3章	バイオガスプラントとしての中温メタン発酵の解析	
3.1	八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様	30
3.2	中温メタン発酵の除去性能と解析	35
3.3	メタン発酵と有機酸生成	42
3.4	メタン発酵槽の加温と余剰熱	44
3.5	結言	47
	参考文献	48
第4章	中温ならびに高温メタン発酵の運転比較	
4.1	八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様	49
4.2	有機物除去性能	53
4.3	微生物・塩類等の除去効果	59
4.4	バイオガスの発生量と成分の比較	60
4.5	脱水・排水処理設備	63
4.6	堆肥施設	67
4.7	液肥利用	69
4.8	建設・運転コスト	73
4.9	中温発酵と高温発酵の特性比較と選択フロー	77
4.10	結言	80
	参考文献	82

第5章	バイオガスプラントのエネルギー生産施設としての評価	
5.1	八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様	84
5.2	八木バイオエコロジーセンターの運転実績	90
5.3	エネルギー生産施設としての評価	98
5.4	日本におけるバイオガスプラントの評価	103
5.5	結言	106
	参考文献	108
第6章	まとめと将来展望	
6.1	まとめ	109
6.2	今後の課題	114
6.3	今後の展望	115
	参考文献	116
謝辞		117

## 第1章 緒論

### 1. 1 研究の背景

古来より、人類は地球に降り注ぐ太陽エネルギーを使って生物により生産されるバイオマスを食べ料・エネルギーや製品原料として利用してきた。我が国においては、高度経済成長とそれに伴う生活水準の向上と共に、大量のバイオマスが輸入・消費され、その廃棄物が自然の浄化能力を超えた結果、水質汚濁、悪臭公害、土壌汚染などの様々な環境問題を深刻化させてきた。その中でも大量に発生するバイオマス系廃棄物としては、家畜排せつ物、生ごみや食品廃棄物、排水処理などから発生する汚泥が挙げられる。ところが、これらのバイオマス系廃棄物は、太陽がある限り持続的に再生可能な資源として見直されて、家畜排せつ物は「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」(1999年11月施行)、生ごみや食品廃棄物は「食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律(略称:食品リサイクル法)」(2001年5月施行)で適正な処理と資源としての利用促進を定めている。

日本政府は、我が国の社会経済の構造を化石資源偏重から、太陽の恵みで生産されたバイオマス資源を利活用する社会に転換するために「バイオマス・ニッポン総合戦略」を2002年12月に閣議決定した<sup>1)</sup>。本総合戦略では、①地球温暖化の防止、②循環型社会の形成、③競争力のある新たな戦略的産業の育成、④農林漁業・農林山村の活性化という4つの大きな方向が定められている。地球温暖化防止に関しては、我が国は京都議定書の締結により、温室効果ガスの1990年比6%削減の義務が課されているが、温室効果ガスの排出は2000年時点で既に8%増を記録しており、現状からは14%以上を削減しなければならず、着手可能な地球温暖化防止対策に早急に取り組む必要がある。バイオマス由来のエネルギーは、大気中のCO<sub>2</sub>を増加させないカーボンニュートラルであるとの特性があることから、CO<sub>2</sub>の排出源である化石燃料由来のエネルギーに置き換えることが、地球温暖化対策推進本部により決定された大綱(2002年3月)に位置付けられている<sup>1)</sup>。こうした点から、バイオマスの利活用は、CO<sub>2</sub>の発生を抑制し、地球温暖化防止への貢献が期待できるので、着実な展開が急務となっている。具体的な数値として、バイオマス由来のメタン発酵によるバイオガス発電、木質発電、ガス化発電等によるバイオマス発電量は、2000年度の原油換算で年間4.7万kℓから、2010年度には34万kℓと約7倍の目標値が設定されている<sup>2)</sup>。これらのことから、バイオマスの中で大きなウエイトを占める家畜排せつ物や生ごみ・食品廃棄物を原料としたメタン発酵でメタンガスを発生させ、発電・熱などに利用する技術がエネルギー面からも注目されている。

環境や新エネルギーの先進地である欧州では、地球温暖化防止のためにバイオマス資源を活用した持続可能な社会の構築を進めている<sup>3)</sup>。その関連で、家畜ふん尿や食品廃棄物などのメタン発酵施設(いわゆるバイオガスプラント)は、ドイツやデンマークなど欧州の中部・北部で1980年代から実施件数が増加している。欧州諸国でバイオガスプラントが普及した理由は、①地球温暖化防止などの見地から、エネルギー政策が再生可能資源の利用促

進を打出したこと、②家畜ふん尿などバイオマス系廃棄物に関する環境規制を強化したこと、③再生可能エネルギーによる電力買取優遇政策が取られている、④環境税の導入などにより再生可能エネルギーを相対的に高価にしている、⑤バイオガスプラント建設に対し、補助金あるいは融資が受けられる等の社会的背景がある、⑥バイオガスプラントの発酵残渣は、液肥として牧草地等へ適正量を散布する社会システムが確立しているなどによる。

前述した状況から、我が国も家畜排せつ物や食品廃棄物の処理と資源化利用ならびにエネルギー回収の面から、バイオマス系廃棄物のメタン発酵が1990年代から注目されてきた。これまで、我が国でも1950年代の第二次世界大戦後のエネルギー不足、1970年代の石油危機をきっかけにメタン発酵が注目されたが、技術面、経済性の面から、化石エネルギーの補完エネルギーとしての地位を占めるには至らなかった。しかし1990年代は、再生可能な化石燃料以外の新エネルギーとして、再度メタン発酵が注目された。国内には2003年現在で、46件の家畜排せつ物や食品廃棄物を原料とするメタン発酵施設があり、その過半は実証プラントとして稼働している。メタン発酵はこれまで、下水汚泥の嫌気性消化、食品工場の濃厚排液処理に多数採用されているが、これらのメタン発酵設備は原料の液量の割にガス発生量が少なく、発生したバイオガスによる熱・エネルギーは施設外へ電気や熱として供給されることはほとんど期待できなかった。しかし、家畜排せつ物や食品廃棄物を原料とするメタン発酵では、原料からのバイオガス発生量が多く施設外への電気や熱の供給が可能になることから、新エネルギーの供給施設として期待されている。即ち国内の本格的な実規模バイオガスプラントの一つとして1998年4月に稼働開始した八木バイオエコロジーセンター(京都府八木町)に次いで、2003年には北海道深川市等にも生ごみのバイオガスプラントが稼働を開始した。しかしながら、我が国にバイオガスプラントが普及するためには、原料に適したメタン発酵の設計・運転方法の確立、建設・運転コストの削減、消化液の衛生問題と活用システムの確立、バイオガスの効率的な活用等の様々な課題が横たわっている。

## 1. 2 研究の目的

国内の家畜排せつ物や食品廃棄物等のバイオガスプラントは、1990年代に運転開始した八木バイオエコロジーセンターが本格的な実用施設の先駆けである。その後、全国に実験施設を中心にバイオガスプラントが建設された。2000年代になって、北海道や南九州の畜産業の盛んな地域で実用規模のプラントが数件建設されたが、これらが広く普及するまでに至っていない。生ごみを原料とするバイオガスプラントでは、一般廃棄物系の生ごみを対象とする施設が北海道・東北地方に4件建設され、2003年4月から運転を開始した。また、産業廃棄物である食品廃棄物を対象にしたバイオガスプラントも2003～4年に2件運転を開始した。しかしながらバイオガスプラントは、原料が家畜ふん尿、食品廃棄物、生ごみ等によって所轄官庁が異なることや施設の社会的な位置付けが違うために、統一的な設計基準や施設指針等は出来ていない。

国内で普及している多くのバイオガスプラントのメタン発酵装置は、欧州からの技術導入が多く、必ずしも日本の実情を反映したものとはいえない。バイオガスプラントにおいては、メタン発酵槽の前処理や発酵残渣の利用に関しては、建設する地域によってその技術が異なってくる。しかし、国内のバイオガスプラントの運転年数が短く、また実績数が少ないことから、運転実績に基づいたデータや日本式のバイオガスプラント設計法や運転法に役立つ技術資料が少なく、明確な設計・運転管理の指針が確立されていないのが現状である。国内の指針としては、下水汚泥やし尿を対象とした下水道施設基準<sup>4)</sup>、し尿処理設計指針があるが、家畜排せつ物に対してはガイドラインとして「家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き」<sup>5)</sup>がある程度であり、今後の指針整備が重要な課題となっている。

以上の観点から、筆者が基本計画、設計、負荷運転を担当した八木バイオエコロジーセンターのメタン発酵施設における1998年4月からの約6年間の実用運転データを基に、本論分では、中温メタン発酵の運転性能の評価、中温と高温メタン発酵の性能比較、エネルギー供給施設としての評価を目的とし、さらに日本におけるバイオガスプラントの将来展望をまとめた。

### 1. 3 研究の構成

本論文は、6章で構成されており、構成の概要を図1.1に示す。

第1章では、家畜排せつ物や食品廃棄物等のバイオマスが処理と資源化利用の観点から法整備がなされ、メタンがカーボンニュートラルなエネルギーとして期待されている背景を述べ、本研究の目的ならびに研究の構成を示した。

第2章では、家畜排せつ物等のバイオマスの処理・資源化ならびにメタン発酵処理の現状と課題を文献から整理した。さらに、メタン発酵における研究開発状況についても文献を含めて整理した。

第3章は、家畜排せつ物や食品廃棄物を中温メタン発酵により処理している「八木バイオエコロジーセンター」における運転実績から、有機物や栄養塩類の除去性能や発酵槽内部の有機酸濃度管理、バイオガス発電による熱回収と発酵槽の加温エネルギー割合等について解析した。この解析結果から、中温発酵によるメタン発酵の性能を評価した。

第4章は、新しいメタン発酵方式として家畜排せつ物や食品廃棄物の高温発酵を取り上げ、その運転実績から高温発酵と中温発酵との比較を行った。特に、消化液中の衛生微生物の消毒効果やバイオガス発生量等の比較から高温発酵が排水処理などへ与える影響について調査し、高温発酵が中温発酵より多くの利点があることを示した。

第5章は、バイオガス発電プラントをエネルギー生産の面から、その有効性を評価した。バイオガス発電はガスエンジンによる発電の実績から、電気・熱の場内使用量ならびに場内使用比率を実測した。このデータを基に、食品廃棄物の受け入れ量アップ、消化液の液肥利用による場内電力量削減効果ならびに施設外へのエネルギー供給可能量等を試算した。

さらに、バイオガスプラントが今後普及することにより、エネルギー供給施設としてどの程度の供給量ができるかについても試算した。

第6章は、2～5章で得られた成果から、日本のバイオガスプラントの課題を整理し、今後日本にバイオガスプラントが普及するための技術面を中心とした対応策を述べるとともに、将来展望についてもまとめた。

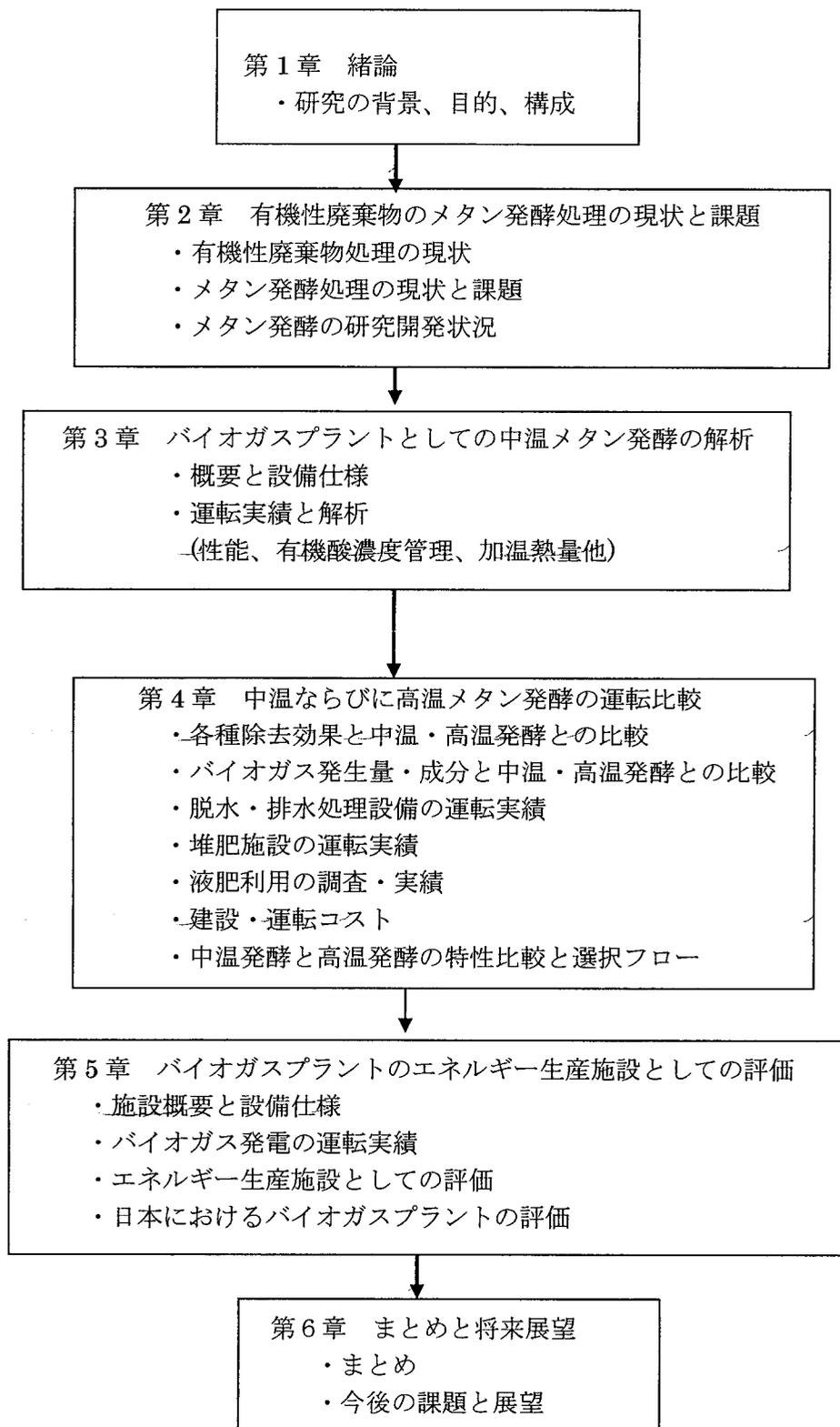


図 1.1 研究の構成

【第1章 参考文献】

- 1) 藤本潔：バイオマス・ニッポン総合戦略の実現に向けて、廃棄物学会誌、Vol.15、No.2、pp.53-59、2004
- 2) 資源エネルギー庁新エネルギー対策課：経済産業省のバイオマス導入促進施策、2003.11
- 3) 松田従三：家畜ふん尿利用のバイオガスプラントの課題、廃棄物学会誌、Vol.15、No.2、pp.70-76、2004
- 4) 日本下水道協会編：下水道施設計画・設計指針と解説、日本下水道協会、2001年版
- 5) 家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理技術研究会：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引書、(財)畜産環境整備機構、2001.8

## 第2章 有機性廃棄物のメタン発酵処理の現状と課題

### 2.1 有機性廃棄物処理の現状

#### (1) バイオマス資源の現状

バイオマスとは、生物資源の量をあらゆる概念で、最近では「エネルギーや素材として利用される再生可能な生物由来の有機性資源」という意味で使われることが多い。具体的には、家畜排せつ物、生ごみや食品廃棄物、製材工場の残材や建築廃材といった「廃棄物」、間伐材や稲わら、もみ殻といった「未利用資源」、ブラジルやアメリカ合衆国で自動車燃料としてガソリンに混合されているエタノールの生産原料であるサトウキビやトウモロコシといった「資源作物」が該当する。これらのバイオマスは、太陽エネルギーと水・二酸化炭素から生物が光合成によって合成した有機物であるため、化石燃料とは違い太陽と生命体がある限り持続可能な枯渇しない資源である。また、バイオマスはエネルギー資源としてみた場合は、大気中のCO<sub>2</sub>を増加させない「カーボンニュートラル」という特徴がある。このため、化石燃料がほとんどなく、アジアのモンスーン地帯の亜熱帯から温帯に位置する日本では、バイオマスを有効な資源として利活用することが求められている<sup>1)</sup>。

日本におけるバイオマス資源の年間発生量や利用可能量を示したのが表2.1.1で、生産資源と未利用・廃資源に分けている<sup>2)</sup>。生産資源の年間成長量は約1.3億トンで利用可能量は約1,200万トンであるが、一方未利用・廃資源では年間発生量が約2.4億トンで利用可能量が約6,500万トンと推定されている。未利用・廃資源のうち年間発生量2,000万トン以上を占めるのは、家畜ふん尿、一般廃棄物中のバイオマス(生ごみ等)、古紙、投棄魚であるが、利用可能量は少ない。表2.1.1から、日本のバイオマス資源のうち利用可能量は年間約7,700万トンと推定されているが、現実には多くが利用されずに廃棄・放置・焼却されている。これはCO<sub>2</sub>換算で約1.27億トンにもなり、1990年における日本のCO<sub>2</sub>排出量11.24億トンの約11%に相当している。COP3で日本に課せられたCO<sub>2</sub>排出量の削減量6%は、利用可能にもかかわらず廃棄、焼却されているバイオマスから発生するCO<sub>2</sub>量の約半分である。このことから、バイオマスのエネルギー利用を促進すれば、化石燃料由来のCO<sub>2</sub>も削減でき、環境保全の達成と共に二重の効果が期待できる。バイオマスからエネルギー生産を行うための変換法として各種の方法が開発されている。図2.1.1に坂<sup>3)</sup>によるエネルギー変換法と得られる各種バイオマス燃料を示す。この図で、生物化学変換を行うメタン発酵は古くから技術開発が進み、すでに実用化されている技術である。

表 2.1.1 バイオマス資源の年間発生量および年間利用量 (単位: 万ト/年) 2)

バイオマスの種類			成長量、発生量	利用可能量	
生物資源	陸地資源	糖質資源	さとうきび	157	0
			てんさい	379	0
		澱粉資源	水陸稲	949	0
			ばれいしょ	296	0
			かんしょ	101	0
			さといも	25	0
	森林資源	青刈リトウモロコシ	480	0	
		針葉樹、広葉樹 (うち里山広葉樹)	5,200 (1,000~1,200)	— 280~330	
	油脂資源	ササ	>607	607	
		タケ	330	<330	
その他	ナタネ	0	0		
	落花生	3	0		
水域資源	海藻類の海面養殖	大豆	19	0	
		牧草	3,115	0	
	野菜	1,261	0		
小計(キチンを除く)	海藻類の海面漁業	52	0		
	キチン	12	0		
			1,000~100,000	—	
			>約13,000	約1,200	
未利用・廃資源	林産資源	林地残材	363	80	
		間伐材	345	197	
		工場残廃材	1,250	216	
		建築廃材	327	206	
		古紙	3,063	280	
	農産資源	稲わら	961	46	
		もみ殻	208	57	
		麦わら	87	33	
		バガス	24	<24	
		その他農産残渣	692	<692	
畜産資源	家畜ふん尿	~9,000	>60		
	動物の死体	11	6		
水産資源	水産加工残渣	280	13		
	投棄魚	2,660	<2,660		
	キチン質 (うちキチン含有量)	39 (1.5)	<39 (1.5)		
産業資源	パルプ廃液	490	62		
	動植物性残渣	313	147		
	廃動植物油	42~56	>4		
生活資源	一般廃棄物中のバイオマス	~3,800	<1,500		
	下水汚泥	240	166		
小計			約24,000	約6,500	
合計(キチンを除く)			約37,000	約7,700	

(注) ・野菜はばれいしょといもを除く値。

- ・工場残廃材の利用可能量には、既にエネルギー利用されている257m<sup>3</sup>が含まれている。
- ・建築廃材のうち解体時に排出されるものについては、解体の届出のあったもののみを対象として推定
- ・水産資源のうち、水産加工残渣とキチン質の発生量は、互いに重複している。
- ・一般廃棄物中のバイオマスの発生量は、紙類を含む。また、一般廃棄物中のバイオマスの利用可能量は、紙類を除外した数値。

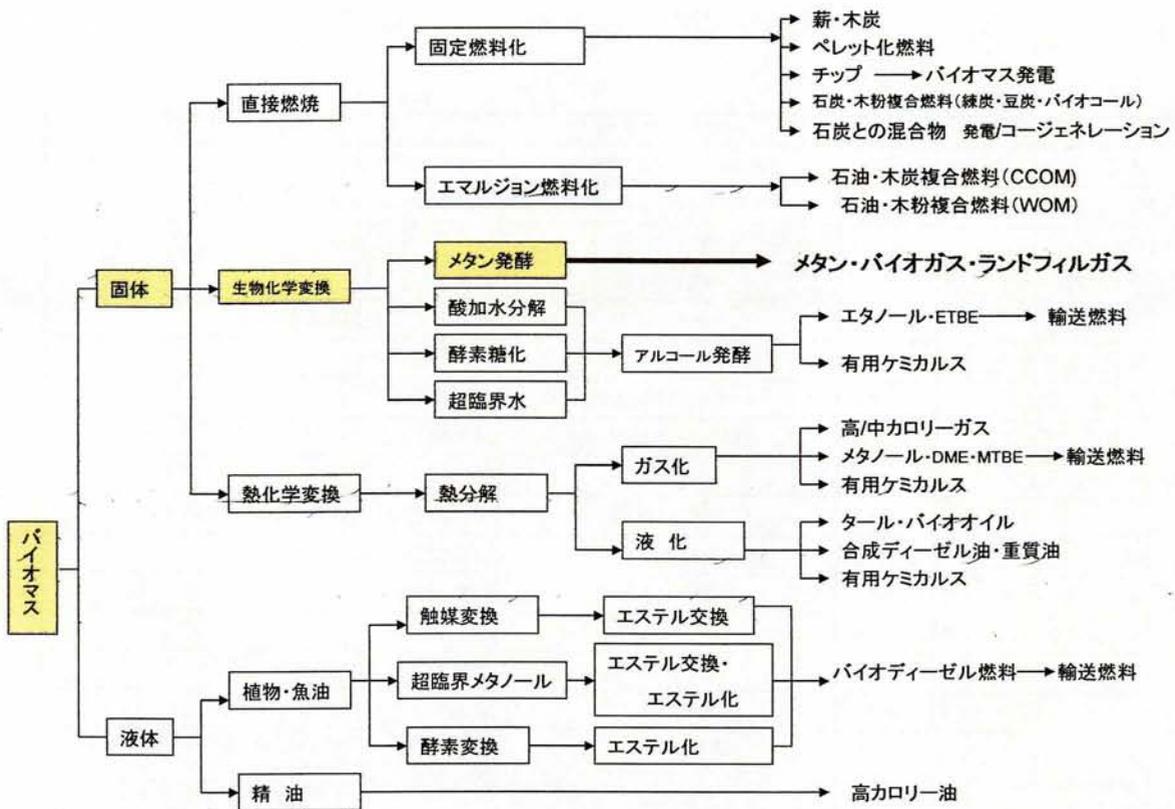


図2.1.1 バイオマスのエネルギー変換法と得られる各種バイオマス燃料<sup>3)</sup>

未利用・廃資源の内訳をみると、廃棄物系の家畜ふん尿や生ごみ・食品廃棄物の量が多いにもかかわらず、利用率は低い。表2.1.2は羽賀<sup>4)</sup>によるこれらの有機系廃棄物の量と利用率ならびに水分含量を示しているが、これらの廃棄物は水分が高くまた資源化率が低い。中でも食品廃棄物や生ごみは飼料として一部が資源化されているが、その量は少ない。その他に、堆肥発酵でコンポストとして農地還元されているが、肥料としての使用量も限られ、特に家畜ふん尿の多い中部・南部九州や東北地方などでは、堆肥を作っても需要が少なく、資源化できていない地域もある。このため、これらの地域では、処理残渣の発生量の少ない方式が求められている。一方、マテリアル利用よりもエネルギー利用に力点を置いた場合、メタン発酵によりバイオマス中のカーボンを経済的に回収できるので、直接発電あるいは水素転換による電力や熱として利用することができる。

表 2.1.2 未利用・廃資源の発生量と性状および利用状況<sup>4)</sup>

	種 類	水 分	年間発生推定量	処理・利用状況	
食品 産 業	ビールかす	80%	700,000~1,050,000t/年	牛の飼料95%	
	焼 耐 か す	94%	336,121KL/年	海洋投棄50%:肥料19%:飼料19%	
	ウイスキーかす	76.4%	379,712t/年	飼料83.5%	
	清 酒 か す		160,165t/年	食用100%	
	オ ー カ ラ	80%	744,600t/年	飼料70%:肥料16%:食品4%	
	果 汁	ミカン果汁	86%	22,500~153,300t/年	飼料86.8%
		缶 詰	84%	31,900~71,600t/年	飼料50.6%
	残 渣	りんご果汁	79.7%	43,800~85,500t/年	飼料64.1%:肥料12.7%
		モモ 缶詰		4,800t/年	廃棄100%
		コ ー ヒ ー か す	65%	600,000t/年	工場内燃料(約10万t/年廃棄物)
		茶 か す	65~70%	60,500t/年	畜舎の敷料:堆肥原料
		醤 油 か す	26.5%	85,877t/年	飼料64.1%
		コーンスターチ副産物	11~53%	784,740t/年	飼料100%
		バレイショ澱粉かす	92%	776,790t/年	飼料70%:廃棄30%
	カンショ澱粉かす	92%	258,341t/年	飼料70%:クエン酸発酵原料30%	
林 産	バ ー グ		6,577,000m <sup>3</sup> /年 (比重0.7として460万t/年)	製材工場のものは、焼却52%:燃料30%:堆肥7%: 畜舎飼料4%:オガライト用2%	
	オ ガ ク ズ	製材時 40%	13,000,000m <sup>3</sup> /年 (比重0.2として260万t/年)	畜産用62%:キノコ用13%:オガライト用10%:工業用 8%	
	廃 オ ガ	50%	500,000t/年		
農 産	ビ ー ト パ ル プ	82%	1,208,758t/年	飼料100%	
	バ ー ガ ス	50%	418,500t/年	工場内燃料89%:堆肥8%:飼料1%	
	モ ミ ガ ラ	11.7%	2,366,408t/年	焼却24.6%:畜舎敷料20.9%:堆肥20.1%: 暗渠資材1.2%:マルチ6.31%:燐炭4.61%	
	イ ナ ワ ラ	10%	11,000,000t/年	鉄込61%:堆肥11%:粗飼料11%: 畜舎敷料6.5%:焼却4.9%:マルチ4.5%	
	ム ギ ワ ラ		728,000t/年	焼却37.7%:鉄込33.5%:堆肥交換29%	
畜 産	牛 ふ ん 尿	88%	49,702,000t/年	ふんは、堆肥94.8%:乾燥5%	
	豚 ふ ん 尿	90%	21,443,000t/年	ふんは、堆肥50%:乾燥16%	
	鶏 ふ ん	78%	14,304,000t/年	乾燥は64%:堆肥12%	
	羽 毛		167,586t/年	飼料100%	
	血 液		25,228t/年	飼料74.4%:あとは廃棄	
	不 可 食 内 臓 等		596,463t/年	飼料97.6%	

## (2) 家畜ふん尿の処理と利用

家畜ふん尿の処理と利用に関して、現在行われている方式を整理すると表 2.1.3 になる。ふん尿処理は、ふん尿混合で処理する方式とふんと尿を分離して処理する方法に大きく分かれる。乳牛や豚のふん尿は、北海道等のふん尿を液肥利用する地域以外は多くがふん尿分離の処理を行っている。

ふん尿分離方式でのふんの処理は、好気発酵による堆肥化が圧倒的に多く、他に乾燥やガス化・炭化がある。堆肥化では、好気発酵時の水分率が重要で、65%程度の水分になる様に副資材を添加する必要がある。乳牛のふんで固液の分離が不十分な場合では、多くの副資材を加えないと好気発酵が進まず、冬期を中心に堆肥化ができていない施設もある。ふんの堆肥化の前処理として天日による乾燥を行っている地域があるが、悪臭公害源となるため、国内では新規に採用するのは困難な状況である。ふんのガス化や炭化は、畜産飼育密度が高い地域で、堆肥化しても需要のない中部・南部九州地域などで採用あるいは検討されている方式であるが、建設費・運転費が共に高価となっている。炭化したふんは、大幅に減量化されており、土壌改良材として使用されている。

また、尿処理は生物的な排水処理を行うが、生尿を処理するため、有機物濃度や窒素濃度が高く、運転管理がかなり難しい設備である。特に、放流水の窒素規制がかかっている場合には生物的な脱窒を行うので、原水の C/N 値を確認しながら運転管理する。ふん尿分離の方式は、ふん尿を液肥として利用できない日本の事情を反映した方式であり、家畜の畜舎もふん尿分離で回収できる構造となっていることが望まれる。しかし、フリーストールのように、ふん尿混合で集める畜舎の場合には、脱水機等による固液の分離が必要となる。また、ふん尿分離方式の代表的なシステムフローを図 2.1.2 に示したが、運転に必要な

表 2.1.3 家畜ふん尿の処理の方式に関する比較

項目	処理方法	利用方法	必要条件	長所	短所	環境への影響	エネルギー消費・生産
ふん尿混合	液体コンポスト	液肥	散布量に見合う圃場面積、大型の貯留槽	・維持管理費が安価	・散布時に悪臭問題がおきる	・悪臭問題で制約あり ・過剰散布による地下水汚染に留意	・電力消費のみ
	メタン発酵・液肥散布	液肥	同上	・維持管理費が安価 ・良質の液肥ができる	・散布時の悪臭はない	・過剰散布による地下水汚染に留意	・バイオガス発電で電力・熱生産
	メタン発酵・排水処理	堆肥、放流	高度な排水処理設備	・適用地域が広い ・二次公害がない	・コストが高い	・影響が少ない	
ふん・尿分離で処理	好気処理(堆肥化)	堆肥	水分調整用の副資材	・良質の堆肥ができる	・ふんの水分で副資材量が変化する	・悪臭問題が起き易い	・電力消費のみ
	乾燥	堆肥	乾燥熱源または広大な天日乾燥床	・容量が少なくなる ・悪臭が少なくなる	・燃料使用では燃料代が高価 ・天日乾燥では悪臭問題を発生する	・悪臭問題の発生	・化石燃料の使用 ・電力の消費
	ガス化・炭化	土壌改良材	ガス化や炭化用の熱源	・残渣の量が大幅に削減される	・コストが高い	・化石燃料使用による温暖化促進	・同上 ・ガス化で発電の方式もある
	浄化処理(活性汚泥法他)	放流	排水処理設備	・放流先の水質保全ができる	・維持管理費がやや高価	・高度な処理を行えば影響は少ない	・電力消費のみ
	液体コンポスト	液肥	散布量に見合う圃場面積、大型の貯留槽	・維持管理費が安価	・散布時に悪臭問題がおきる	・悪臭問題で制約あり ・過剰散布による地下水汚染に留意	・電力消費のみ

電気等は全て外部から購入するエネルギー消費型の方式になっている。

これに対して、ふん尿混合で処理可能なメタン発酵の方式は、発生するバイオガスを使用してガスエンジン等で発電（コージェネレーション）できるので、ふん尿の持っているエネルギーを電気や熱に変換できる特徴を持っている。この発電した電気で施設内の使用電力を賄ったり、余剰電力を電力会社に売電することもできる。メタン発酵の発酵液は臭気もほとんどなく、これを液肥として使用する場合にも、悪臭公害を起こすことがない。発酵液を液肥として使用できない場合は、発酵液を脱水後にろ液は排水処理し放流する。脱水ケーキは、これを堆肥発酵するか乾燥して水分を下げて、堆肥として使用する。メタン発酵では発生するバイオガスを燃料にガス発電できるので、処理に要する電力の全てや一部ならびにメタン発酵での加温熱量を賄うことができ、また余剰熱を暖房・給湯・各種乾燥熱源として利用することが可能である。しかし、発酵液の液肥利用ができないと、脱水・排水処理設備が必要となり、建設ならびに運転コストが高価になり易い。メタン発酵は、有機性廃棄物からバイオガスの形でエネルギーとして取り出せる特徴を生かして、ふん尿以外に食品残渣等バイオガス発生量の多い廃棄物を混合処理することで、施設の事業経費の改善を図ることができる。国内ではまだメタン発酵によるふん尿処理の施設数は少ないものの、ふん尿の混合処理ができ、また電気や熱の形でエネルギーを副産物として回収でき、さらに液肥としての利用も可能である点などから魅力的な方式である。しかし、欧州で開発されたメタン発酵技術が日本の社会・自然環境に適合したメタン発酵システムとして構築することが求められている。

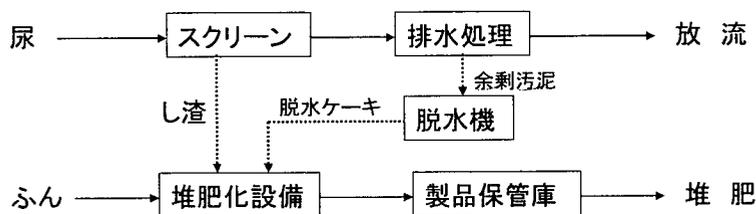


図 2.1.2 ふん尿分離・排水処理・堆肥化のシステムフロー（例）

## 2. 2 メタン発酵技術の現状

### (1) メタン発酵の生化学

有機物を多量に含む濃厚な工場廃液、下水汚泥あるいはふん尿等をメタン発酵槽へ入れると有機物は揮発性脂肪酸を経由して、最終的に炭酸ガスとメタンガスに分解される。この消化過程は、大きく酸性発酵期(第一段階)とアルカリ性発酵期(第二段階)に分けることができる。第一段階では高分子化合物が分解され、揮発性脂肪酸(低級脂肪酸)やアンモニア性窒素が生成し、第二段階では第一段階で生成した揮発性脂肪酸が炭酸ガスとメタンガスに分解される。図 2.2.1 は、各基質がメタンガスに生物的に分解される工程を模式的に示したものである。

第一段階の分解には主として通性嫌気性の酸生成細菌が、また第二段階では絶対嫌気性のメタン生成細菌が関与する。第一段階と第二段階で行われる反応を簡単に表すと①式、②式の様になり、有機物の減少およびバイオガス発生と共に、微生物増殖が認められる。メタン発酵は、このように大きく分けて 2 種類の微生物群の共生により進行するので、発酵槽内で、バランスを保って発酵が進行するように管理することが重要である<sup>5)</sup>。

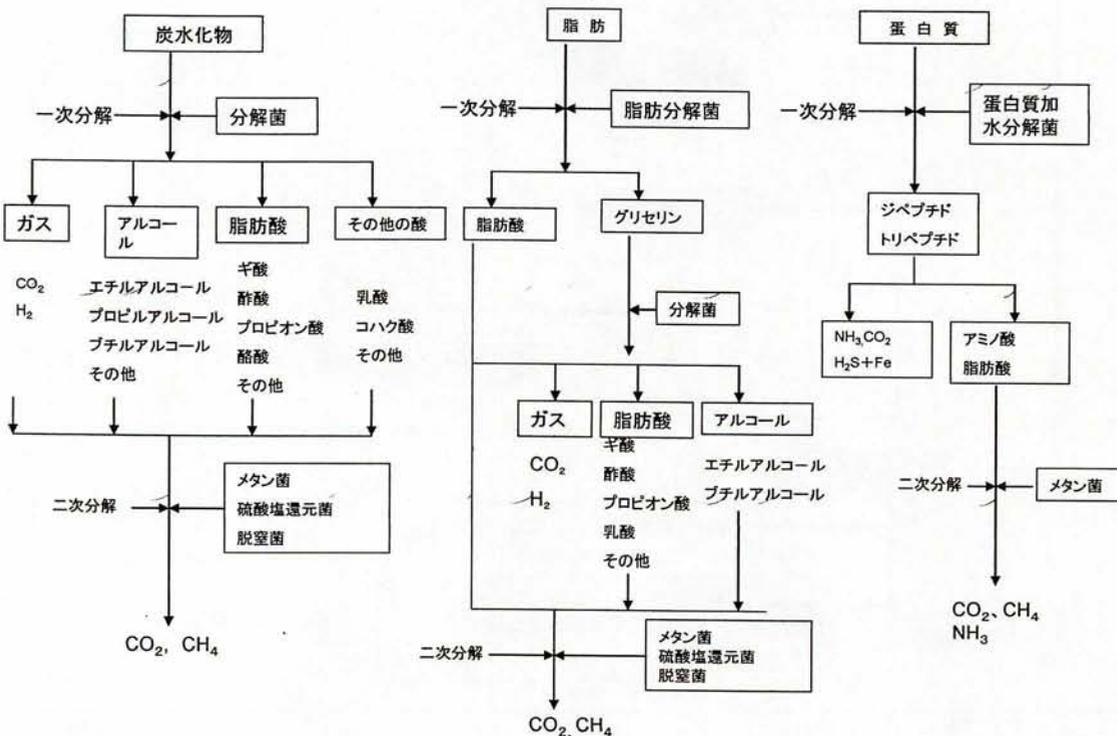
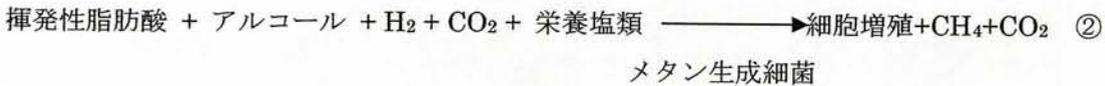
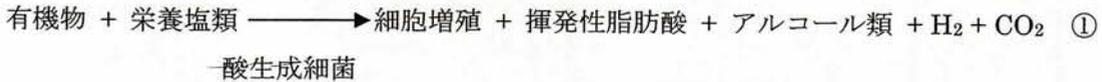


図 2.2.1 蛋白質、脂肪及び炭水化物の嫌気性分解<sup>6)</sup>

(2) メタン発酵の方式

メタン発酵は、し尿や下水汚泥の処理等で開発が進み、その後濃厚排水やふん尿、生ごみ、食品廃棄物等に適用されていった。メタン発酵は、これらの多種類の基質に対応した処理システムが開発された。図 2.2.2 は、メタン発酵法を基質、発酵温度、攪拌方式、発酵過程から分類したものである。本論文で対象とするメタン発酵槽 (BIMA 消化槽\*) は、基質がふん尿・食品廃棄物で水分 90%以上の湿式メタン発酵であり、発酵温度は中温と高温発酵、攪拌は完全混合式でガス圧力を使用した無動力攪拌方式、発酵槽は酸生成とメタン生成過程を 1 相で行う方式のメタン発酵であり、着色した項目が該当している。

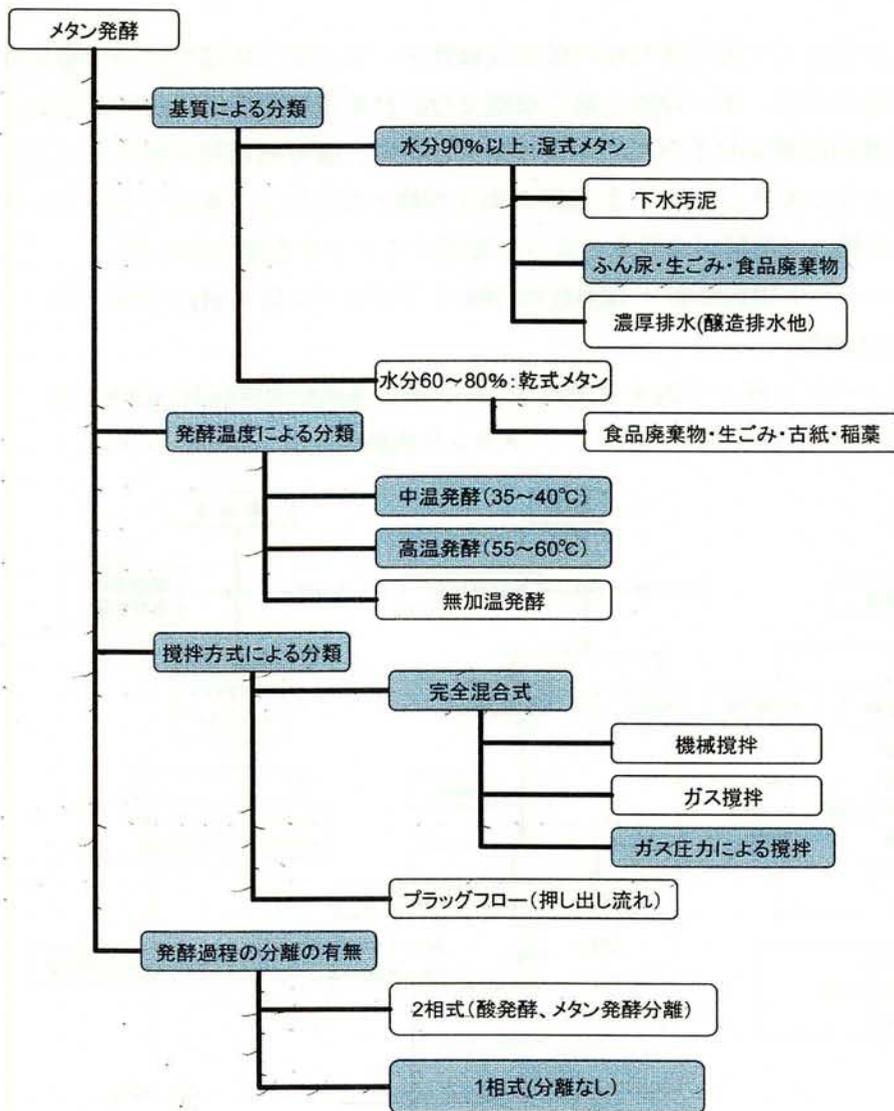


図 2.2.2 メタン発酵の各種方式の分類

\*BIMA 消化槽：オーストリアで開発されたメタン発酵槽で、発生したバイオガスの圧力を使って槽内攪拌することを特徴とし、名称は Biogas の “BI” と開発者の Mr.Manahl の “MA” をつないで命名された。

### (3) 高濃度有機性廃棄物のメタン発酵施設数

家畜ふん尿や生ごみ・食品廃棄物等の高濃度有機性廃棄物を基質とするメタン発酵は、有機物の減量のみならずバイオガスの発生と有効利用を期待することから「バイオガスプラント」と呼び、下水汚泥の消化槽とは区別してきた。バイオガスプラントは、主に欧州で開発され、日本にも 1990 年以降から導入された。国内にあるバイオガスプラントは、本格的な実用化施設は本研究の対象である八木バイオエコロジーセンターを含めても施設数は少なく、多くが実証施設である。表 2.2.1 は、2004 年 4 月現在で入手できたバイオガスプラントの施設数を示す。

表 2.2.1 日本国内のバイオガスプラントの施設数 (2004 年 4 月現在)

区 分	施設数	施設内訳		備 考
		実用施設	実証施設	
家畜ふん尿	29	13	16	少量の食品廃棄物を含む
生ごみ・食品廃棄物	17	9	8	
小計	46	22	24	

バイオガスプラントは欧州に実績が多く、特に中部・北部ヨーロッパで実用施設が稼働しており、各国毎にバイオガスプラントの稼働件数を表 2.2.2 にまとめた。欧州では、以前から家畜ふん尿処理・液肥利用の環境問題対策の一つとしてバイオガスプラントがあり、同時に本プラントから発生するバイオガスが持続可能なエネルギーを生産することから重要視されている。

表 2.2.2 欧州のバイオガスプラントの施設数(2004 年 4 月入手資料)

国 名	施設数	施 設 内 訳			出 典
		共同処理型	個別の農家・ 食品工場型	その他(下水汚 泥、埋立地等)	
ドイツ	約 1,872	(都市ゴミ) 72	約 1800		7)
デンマーク	45	20	25		8)
スウェーデン	236	10	6	220	8)
オランダ	167	3		164	8)
オーストリア	238 以上		100 以上	138	8)
スイス	約 102	2	約 100		8)
イギリス	約 32	7	約 25		8)
ノルウェー	-64		2	62	8)

(注) その他には、下水汚泥、埋立地のバイオガスプラントが含まれる。

## 2. 3 メタン発酵に関する研究開発状況

バイオガスプラントに関わるメタン発酵は、下記の様な問題点があるため、その対策として種々の研究開発が行われている。

(メタン発酵の問題点)

- ①反応速度が遅いため滞留時間を長くしなければならず、おのずとメタン発酵槽の容量が大きくなり建設費が高額になる。メタン発酵槽の容量を削減することが求められる。
- ②家畜ふん尿、食品廃棄物や生ごみ等を原料にして有機物容積負荷を上げていくと、メタン発酵槽内で $\text{NH}_4^+$ が増加して、阻害を起こしメタン発酵が停止してしまう。この阻害を起こさない様なメタン発酵法の開発が必要である。
- ③メタン発酵法には中温発酵と高温発酵があるが、発酵に関与する微生物種類が異なるために施設の目的等によって特徴を生かせる選択をしなければならない。しかし、選択するための判断基準が明らかになっていない。
- ④メタン発酵槽で分解できる有機物は限られており、リグニンやヘミセルロース等は分解に長時間かかるので、通常メタン発酵では分解できない。これらを分解するための前処理方法を開発する必要がある。
- ⑤新たなメタン発酵の処理対象物質としてバイオガス発生量の多い油脂類の効率的な発酵が技術課題として上げられる。
- ⑥メタン発酵残渣の脱水・排水処理プロセスの建設費・運転費が高価になる。このため、発酵残渣を液肥として使用するか、水分含量の少ない有機性廃棄物（水分 60～70%程度）をメタン発酵する（乾式メタン発酵）などで、発酵残渣の排水処理が不要になれば、安価なバイオガスプラントが建設・運転できる。しかし、液肥使用や乾式メタン発酵は開発中の技術である。

上記のメタン発酵の問題点に関して研究開発が行われているので、本論文の内容に関係する主要な研究状況を文献調査から以下に整理する。

### (1) メタン発酵の有機物容積負荷と高効率化

#### 1) メタン発酵の有機物容積負荷

高濃度有機性廃棄物のメタン発酵では、発酵槽の容量を有機物容積負荷と滞留時間から決定することが多い。滞留時間は、メタン発酵槽内でメタン発酵微生物が有機物を可溶化・メタン発酵するために必要な滞留時間を示している。この最低滞留時間以上で、有機物容積負荷に基づき発酵槽の必要容量が決まる。メタン生成菌の世代交代日数は、中温菌で 3～4 日程度、高温菌で 1～2 日程度といわれており、滞留日数は最低でも世代交代日数の 3 倍は必要であることから、余裕をみて中温発酵では 20～30 日、高温発酵で 15～20 日程度となっている<sup>8)</sup>。

有機物容積負荷に関しては、単相式・2相式や分離膜設置型等の新たに開発された方式等によって、発酵槽への有機物容積負荷に若干の違いがある。メタン発酵槽の有機物容積負荷は、VS や COD<sub>c<sub>r</sub></sub> を指標とするが、一般的には分析の容易な VS を使用しており、畜産ふん尿を中心とする場合には中温発酵で 2~3kg-VS/m<sup>3</sup>/日、高温発酵で 5~6 kg-VS/m<sup>3</sup>/日である<sup>9)</sup>。国内のメタン発酵施設で設定している有機物容積負荷を(社)日本有機資源協会が調査した結果<sup>10)</sup>は、表 2.3.1 の通りで厨芥の多い汚泥再生処理センターや厨芥処理では、畜産ふん尿に比べて 2~3 倍の高い値が用いられている。これは、厨芥処理のメタン発酵は可溶化し易い有機物が多いのに比べて、ふん尿は既に動物の消化器官で有機物の分解が行われた後の残物なので、メタン発酵槽内での分解速度が遅くなるためである。なお、国内のメタン発酵施設で、実際に稼動している施設や実験装置の有機物容積負荷を表 2.3.2 に示すが、表 2.3.1 に比べて低くなっている。この理由は、設計値は最大に近い値を設定しているので、実運転では投入量が設計値に比べて低く、また投入する有機物濃度が設計値に比べて低いことが多いので、結果的には有機物容積負荷の実績値は設計値に比べると低いものになるためである。

表 2.3.1 各種処理施設のメタン発酵槽の有機物容積負荷<sup>10)</sup>

処理施設種類	投入物	有機物容積負荷 (kg-VS/m <sup>3</sup> /日)
汚泥再生処理センター	し尿汚泥、厨芥	4.0~8.0
畜産ふん尿処理施設	豚ふん尿	1.0~2.6
	乳牛ふん尿	1.6~3.3
厨芥処理施設	厨芥(食品廃棄物)、紙、剪定枝	4.0~8.0

表 2.3.2 メタン発酵の有機物容積負荷とガス発生量

対象	原料			メタン発酵条件					バイオガス発生量			文献
	TS	VS	VS/TS	有機物負荷		発酵温度	滞留時間	VS分解率	投入原料 当り	投入VS当 り	メタン濃 度	
	%	%	-	kgVS/m <sup>3</sup> / 日	kgCOD/m <sup>3</sup> / 日	°C	日	%	Nm <sup>3</sup> /t	Nm <sup>3</sup> /VS- t	%	
乳牛ふん尿	7.7	5.2	0.68	2.6		35	20.0		11	214	70	8)
	9.2	7.8	0.85	0.93		38		49	31	403	59	8)
	6.5	3.6	0.55	1.7		37	15.7	42.6	11	319	64.5	8)
豚ふん尿	5.5	4.1	0.75		4.4~4.8	35	15.4	52	20~28		66~69	11)
	4.4	3.3	0.75	1.6		36	20.0	49.8	17	510	65	8)
	8.1	6.2	0.77	3.1		36	20.0	47.9	31	495	65	8)
	5.8	4.2	0.72	2.7		35	15.4	52	25	579	65.9	8)
	3.9	3.7	0.95			35	19.0		21	571	72	8)
	8.9	6.6	0.74	3.3		35	20.0	47.4	34	520	65	8)
厨芥	13.2	12.6	0.95	5~50(TOD負荷)		55	3.6	73~93				12)
	16.8	15.4	0.92		18.7	55	9.7	88			61	13)
	16	14.8	0.93	2.2		37	66.7	83	133	918	56.4	8)
	10.1	9.3	0.92	3.6		35	16.0	79.6	58	620	58.4	8)
ふん尿・厨 芥	8.1	6.4	0.79	3.8		55	22.0	42		288	59	8)
	7.3	6.1	0.84	1.5		35	41.6	52.5	25	420	59.6	8)
し尿汚泥・ 厨芥	8.3	6.6	0.80	3.6	6.4	55	22.0	48	19		60	
	9.4	5.2	0.55	4.2	7.2	55	19.0	52	25.8		60	14)

## 2) 2相発酵方式による有機物容積負荷アップ

2相式メタン発酵は、可溶化工程とメタン発酵工程の発酵過程に違いがあり、それぞれ細菌群の最適な生育条件を整えるために、大きさの異なる2つの発酵槽を直列に結合した発酵法である。2相式にした目的は、発酵槽の中で可溶化菌とメタン発酵菌を優先種として保ち、発酵効率を向上させることである。前川<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>は畜産ふん尿のメタン発酵で、従来の1相型のメタン発酵で滞留時間が20~30日間要していたのに比べて、2相発酵を行う事で中温発酵においても5~7日間の滞留時間で発酵が可能であったと報告している。また、有機物容積負荷に関しても、豚ふん尿のメタン発酵では従来法では中温・高温の発酵で2~3kg-vs/m<sup>3</sup>/日が最適であるが、2相式では6kg-vs/m<sup>3</sup>/日が最適で、エネルギー利用を目的にする場合には7.5kg-vs/m<sup>3</sup>/日まで高められるとしている。

### (2) アンモニアによる発酵阻害

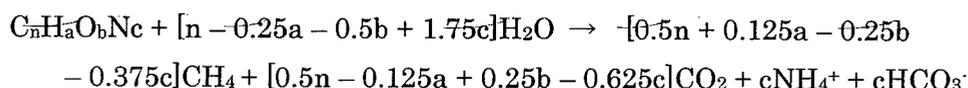
メタン発酵では、発酵槽内部のアンモニア濃度によっては発酵阻害が生じる事があり、過去に畜産ふん尿、下水汚泥、食品工場残渣の場合について報告されている<sup>17)</sup>。畜産ふん尿のメタン発酵では、鶏糞を多く含む場合を除いてはアンモニアによる阻害は少ないが、TSが10%程度以上の高濃度の生ごみでは、メタン発酵槽内部で有機物の分解によるアンモニア濃度が増加し、発酵阻害が発生する濃度になることが予想される。特に、高有機物容積負荷を期待できる高温発酵は、アンモニア阻害を受けやすい。このため、アンモニアによる発酵阻害について、阻害となる濃度やその対策等が研究されるようになった。

メタン発酵槽内でのアンモニアの存在形態は、イオン態アンモニア(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)と遊離態アンモニア(NH<sub>3</sub>-N)の2つの形態があるが、NH<sub>3</sub>-Nがメタン発酵反応の阻害に強く影響する<sup>18)</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-NとNH<sub>3</sub>-Nの比率(F<sub>NH3</sub>)は、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度、温度、pHの3要素で決定される。pHが一定の場合には、温度上昇によりF<sub>NH3</sub>は急激に高くなり、NH<sub>3</sub>-N濃度が増加するため、理論的にもアンモニアによる阻害が強くなる。片岡ら<sup>19)</sup>は、生ごみの中温および高温メタン発酵におけるアンモニア阻害について、模擬生ごみを用いた回分実験で検討している。実験の結果、相対メタン生成活性が50%減少したときのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度をMIC<sub>50</sub>と定義すれば、MIC<sub>50</sub>のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度は、中温発酵で6,020mg/lに対して高温発酵では4,940mg/lであった。また、NH<sub>3</sub>-NのMIC<sub>50</sub>は、中温発酵が185mg/l、高温発酵が398mg/lと計算できる。畜産ふん尿のメタン発酵でメタン生成阻害を受けないレベルがNH<sub>3</sub>-N濃度が80~150mg/lである事や乳牛ふん尿の高温発酵の場合に、NH<sub>3</sub>-N濃度が550mg/l以上(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度2,500mg/l、pH7.9)でメタン生成が阻害されていることが報告されている<sup>20)</sup>が、これらの数値とこのMIC<sub>50</sub>はほぼ同程度であり、高温発酵ではアンモニア阻害を受けやすいことが確認されている。本結果から、片岡らは、生ごみの高温メタン発酵では、アンモニア阻害を回避できれば高負荷運転が可能であり、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度として2,000~2,500mg/l以下、NH<sub>3</sub>-N濃度として300mg/l以下に維持できる様に、生ごみ

の組成 (C/N 値など) に応じて有機物濃度を設定し、メタン発酵槽内でのアンモニアの解離平衡濃度を下げることが重要としている。

奥野ら<sup>21)</sup>は、生ごみと尿汚泥の混合高濃度メタン発酵の室内規模の連続実験で、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度を段階的に高めた実験から、高温発酵の pH 範囲 (7.6~8.0) において、VFA (揮発性脂肪酸) 濃度が遊離アンモニア濃度よりもむしろ  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度に比例して高くなり、全アンモニア濃度が阻害と強く相関していることを示唆している。前記の連続試験でも、発酵汚泥の上澄水の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が 2,700~2,900mg/l となっており、アンモニア阻害が生じるといわれる 2,500mg/l 以上であったことから、メタン生成は維持されているものの、部分的にはメタン発酵阻害が生じていたものと推定している。また、メタン発酵による有機物の分解する現象を化学量論的式で試算しており、ガス生成量、メタン含有率、 $\text{NH}_4^+$ 生成量が試算値と実測値でそれぞれ 84~99%、98~101%、90~120%の範囲でかなり高い精度で再現されたことから、実運転での指標として使えるとしている。なお、化学量論式は下記を使用しているが、メタン発酵する有機物の元素組成 (炭素、水素、酸素、窒素) を求めておく必要がある。

化学量論式：



アンモニアによる阻害は、炭水化物の場合にメタン生成工程のみでなく酸生成工程でも影響を受けることから、影響する濃度や原因の研究も行われている。藤島ら<sup>22)</sup>は、室内実験により、炭水化物の分解がアンモニアによる阻害を受けること、およびその阻害は代謝経路の変化を伴うものであることを明らかにした。アンモニアによる阻害が顕著なのは、加水分解段階が律速段階であり、基質中の炭水化物の割合が高い場合である。基質中に蛋白質が同程度存在する場合には、両成分を資化可能な酸生成細菌は阻害された炭水化物の分解に変わり、蛋白質を優先的に分解するようになり、アンモニアによる阻害をさらに促進する。このような基質は、高濃度下水汚泥や厨芥等である。これまでは、メタン生成細菌へのアンモニア阻害に対して注意が払われてきたが、メタン生成細菌が阻害に順応した場合でも、炭水化物からの酸生成への阻害により、メタン発酵全体の効率が低下する可能性がある。

メタン発酵におけるアンモニアによる阻害を回避するための研究も行われているが、その対応法として、①膜分離によるアンモニアろ過と汚泥の濃縮、②光メタン発酵法、③リン酸水素マグネシウムによるアンモニア除去法について以下に記す。

①液中膜を備えたメタン発酵槽で、精密ろ過膜を使ってあらかじめメタン発酵槽へ投入する有機物を希釈しておき、その希釈水量を透過液として膜を通して引き抜くことで、メタン発酵槽内のアンモニア等の阻害物質濃度を制御する方法である。北海道の生ごみメタン発酵施設では、本法により発酵槽内の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が概ね 2,500mg/l 以下に制御された<sup>23)</sup>。

②光メタン発酵法によるアンモニア対策で、多田ら<sup>24)</sup>は光照射した中温発酵のUASB法において、光を照射することにより、光合成細菌の増殖によるアンモニア吸収ができることを確認している。しかし、高温発酵の光照射では、中温発酵で確認されているアンモニア濃度低下が認められないが、暗条件に比べて約3倍のメタン生成率となり、光合成細菌の存在も確認されている。アンモニア対策としては、中温発酵のみが有効である。

③リン酸水素マグネシウムを用いてアンモニアを除去する方法で、西村ら<sup>25)</sup>はアンモニア吸着剤としてリン酸マグネシウム三水和物(MHP)を用いて、メタン発酵出口水を対象に回分実験している。実験結果では、MHPと40分の接触・反応で $\text{NH}_4^+$ 濃度が $1,700\text{mg/l}$ から $1.9\text{mg/l}$ まで低下させることができた。

### (3) 中温発酵と高温発酵

メタン発酵では、中温発酵と高温発酵が主に採用されているが、発酵温度の違いにより、関与する微生物が異なるため、それぞれに特徴がある。以下に、畜産ふん尿や食品残渣・生ごみなどを対象にメタン発酵する場合の中温発酵と高温発酵に関する既往の文献整理を行った。特に、食品残渣や生ごみを対象とするメタン発酵では、バイオガスによるエネルギー回収を大きな目標としているため、中温ならびに高温発酵の比較に関する研究が開始されたところである。

#### 【畜産ふん尿を原料とするメタン発酵】

豚ふん尿を対象としたメタン発酵では、藤田<sup>26)</sup>が実験データを基に、中温と高温発酵の比較を行っている。

①滞留時間が16日、有機物容積負荷が $2.68\text{kg/m}^3/\text{日}$ と同じ条件では、中温発酵と高温発酵のガス発生量に差はなかった。他の文献からも、有機物容積負荷が $2\text{kg/m}^3/\text{日}$ 以下程度の範囲であれば、中温と高温のメタン発酵によるガス発生量に差は認められない。

②高温メタン発酵のメリットは、中温発酵に比べて高負荷で運転ができる点である。中温発酵では、 $5\text{kg/m}^3/\text{日}$ が実際的な最大負荷量で、 $2.5\text{kg/m}^3/\text{日}$ を越えるとVS除去率は低下する。一方、高温発酵では、 $5\text{kg/m}^3/\text{日}$ の負荷量で最大VS除去率45%を得た。

また、Hashimoto et al<sup>27)</sup>は、肉牛を中心とした畜産ふん尿のメタン発酵ではバイオガス発生量が多い点と発酵残渣が衛生的である面から、高温発酵を魅力的としている。バイオガス発生量は、高温発酵は中温発酵の2~4倍になる可能性があるとしている。また、衛生面からは、伝染病の感染を最小限にできる事と残渣を飼料として供与する場合には、特に重要な点としている。

#### 【生ごみ単独あるいはし尿汚泥との混合処理のメタン発酵】

奥野他<sup>28)</sup>は、汚泥再生センターの建設に伴い、生ごみとし尿汚泥のメタン発酵に関して、中温と高温のメタン発酵を研究しており、下記の結果を発表している。

①生ごみとし尿汚泥を対象にして有機物容積負荷が $2\sim 5\text{kg/m}^3/\text{日}$ の負荷での実験で、加

水分解、酸生成過程では、高温発酵が中温発酵に比べて反応速度が高いことが分かった。しかし、メタン生成速度は、中温と高温発酵ではその差がなくほとんど同一である。高温発酵の速度が速くならないのは、高温発酵では高温条件で生成した VFA の一部分が何らかの阻害因子のため、メタン生成まで行かなかったためと考えられ、その阻害因子はアンモニアと推察される。高温発酵では、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度を 2,500mg/l 以下に管理するために、TS 濃度を 11%以下に調整する必要があるとしている。

②上記のアンモニアによる阻害は、中温発酵で十分馴致したとすれば  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は 3,000mg/l まではないのに対して、高温発酵では  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が 2,000~2,500mg/l 程度から始まり、VFA がまず  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度に比例して蓄積し、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が 3,500mg/l 以上になると、メタン生成速度も急激に低下して発酵は困難になる。

また、Chun-feng et al<sup>21)</sup>は、模擬生ごみを用いて、中温・高温メタン発酵における有機物容積負荷、アンモニア濃度の影響について回分試験による研究を行い、下記の結果を報告している。

①C/N 値 20 以上の生ごみでは、メタン生成量は中温発酵より高温発酵の方が 1.36~1.51 倍多くなった。一方、C/N 値 12 の生ごみを高温発酵した場合に、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度 2,500~2,800mg/l でアンモニアによる阻害が認められた。

②実験データの動力的解析の結果、生ごみのメタン発酵における最適有機物負荷は、中温発酵で 0.18gVS/gVSS、高温は 0.33 gVS/gVSS であり、高温発酵の方が 1.8 倍高かった。また、最大比メタン生成速度は、中温で 141ml  $\cdot\text{CH}_4/\text{g}\cdot\text{VSS}/\text{日}$ 、高温で 303ml  $\cdot\text{CH}_4/\text{g}\cdot\text{VSS}/\text{日}$ であり、高温発酵の方が 2.1 倍高かった。

③メタン生成活性が 50%減少した時の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は、中温発酵で 6,020mg/l、高温発酵で 4,940mg/l であり、高温発酵の方がアンモニア阻害を受けやすいことが動力的解析から示された。

#### 【欧州の状況】

ドイツを中心とする欧州における中温・高温メタン発酵に関して Heinz-et al<sup>29)</sup>は、下記のように報告している。

①有機物の分解プロセスの速度は、温度が高いほど早く進みガスの発生量も多くなって、発酵完了までの時間が短くて済む。しかし、発生したバイオガスのメタン含有比率は小さくなる。但し、滞留時間が長くなれば、温度差によるガス発生量の相違は小さくなる。

②高い温度で活性化する細菌ほど温度変動に敏感で、短時間に温度が変動した場合には、特に敏感に反応する。中温発酵では、1日の温度変化が 2~3°C以内であれば、十分対応できるが、高温発酵ではこの変動は 1°C以内に抑えなければならない。

③ドイツ国内のバイオガスプラントでは多くが中温発酵で稼働しているが、発電設備を持つところはより多くのバイオガス発生量得るために、高温発酵をする傾向にある。

以上の様に、中温発酵と高温発酵は各々特徴があるが、有機物容積負荷が低負荷であればバイオガス発生量や分解速度にはあまり差がないと言われている。また、高負荷運転で

バイオガス発生量を増加することや衛生面の確保を重点にするためには、高温発酵が有効であるといえる。但し、高温発酵では、発酵槽内のアンモニア濃度や温度の十分な管理が求められる。

#### (4) メタン発酵と消毒効果

家畜排せつ物や食品残渣には多くの微生物が存在し、病原性の微生物も多数存在することが考えられる。病原性微生物は Faarah<sup>30)</sup> らの研究で、好気性処理でも嫌気性処理でも高温でより効果的に不活化できることが知られている。図 2.3.1<sup>31)</sup> は、し尿や汚泥中の病原微生物の不活化に及ぼす時間と温度の関係を示しているが、メタン発酵で使用する発酵温度である中温発酵の 37℃と高温発酵の 55℃ならびに発酵槽の滞留日数 30 日を図中に付記し両者を比較しやすくしている。図 2.3.1 から中温発酵の発酵温度 37℃では多くの細菌類は不活化しているが、回虫卵など不活化までには至っていないものが一部あることが解る。

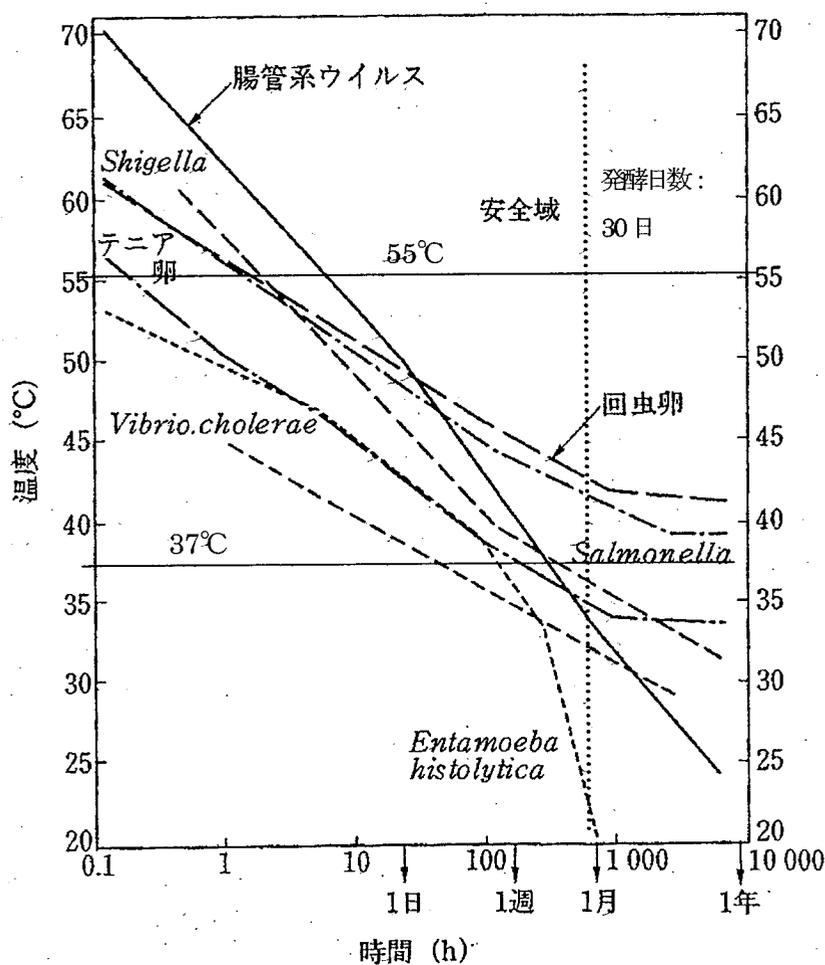


図 2.3.1 し尿および汚泥中の病原微生物に及ぼす時間と温度の関係<sup>31)</sup>

(注) 図中の線は、病原微生物が死に至る関係の上限を示している。

しかし、高温発酵の 55℃では回虫卵を含めて安全域になっており、水温のみから評価しても高温発酵は病原性微生物に対する安全性が高いことが分かる。メタン発酵では、温度による病原性微生物の不活化以外に、メタン発酵に関与する細菌類によるアタックがあり、不活化効果はさらに増加するとされる。Heinz ら<sup>29)</sup>は、病原性細菌の減少は中温発酵で 10 分の 1 から 100 分の 1 程度であり、高温発酵では 10,000 分の 1 の殺菌効果を持っているとしている。また、バイオガスプロセスにおける病原性細菌の減少能力を見極めるために、テスト用に細菌ではサルモネラ・センフトベルグ菌が使用され、またウイルスはパルボウイルスを使用すべきとし、ふん尿のメタン発酵ではこれらの微生物が 10<sup>4</sup>以上減少した場合は、他の全ての関連病原性微生物や寄生虫は既に伝染性を失っていると判断しているが、実際のバイオガスプラントでは、高温発酵 (55℃) のプラントで、ウイルスと細菌は死滅、あるいは検出限界以下に減少していることが確認されている。中温発酵で稼働しているプラントでも、高温発酵で稼働するプラントほど早くはないが、特記すべき程度の病原性細菌の減少が認められており、熱に強い連鎖球菌も高温発酵では 48 時間後に死滅するが、中温発酵でも 144 時間後に死滅している。

畜産系のバイオガスプラントにおける指標微生物について上村ら<sup>32)</sup>は、大腸菌群、大腸菌ファージ、ふん便性大腸菌群およびふん便性連鎖球菌の指標微生物の除去特性や熱殺菌特性を調べている。その結果、乳牛ふん尿の中温メタン発酵や熱殺菌 (70℃で 1 時間) における実測から、大腸菌ファージの除去率が最も低く、ついで大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、ふん便性大腸菌群の順で除去率が高くなった。熱による殺菌試験では、大腸菌ファージが最も不活化しにくく、ついでふん便性連鎖球菌、ふん便性大腸菌群の順で不活化する傾向であった。この結果から、ふん便性大腸菌群を指標微生物として用いると、病原性ウイルスが残存する可能性があることを示している。日本には、消化液を土壌還元する場合の微生物基準がない。しかし、アメリカ環境保護局 (USEPA) が消化下水汚泥を農地に還元する場合の規制値として「ふん便性大腸菌群」を採用し、その数を 2.0×10<sup>6</sup> 個/g・TS 以下と規制しているが、上村らの調査したメタン発酵と熱殺菌後の消化液は、本規制値を満足しており、中温メタン発酵の消化液だけでも本規制値を満足することを報告している。

デンマークでは、畜産ふん尿を液肥として使用していることから衛生規定がある。この中で、バイオガスプラントでは、衛生消毒規定の原則として 70℃で 1 時間を示している<sup>33)</sup>。この消毒処理は、高温発酵のみあるいは中温または高温発酵と消毒槽との組合せで行わなければならないとしている。下記にこの組合せを記述する<sup>34)</sup>。

- ①本定義の高温発酵は、発酵温度が 52℃以上で水理学滞留時間が 7 日間以上であること。消毒槽を設ける場合は、発酵槽の前後どちらでもよい。
- ②本定義の中温発酵は、20~52℃で水理学滞留時間は最低 14 日間であること。
- ③高温発酵槽のみの消毒では、発酵槽の最低保証滞留時間として、52℃で 10 時間、53.5℃で 8 時間、55℃で 6 時間以上を要求しており、これ以上であれば消毒槽の 70℃で 1 時間

と同じ効果がある。

④高温発酵と消毒槽との組合せでは、消毒槽温度とその最低保証滞留時間を 55℃で 5.5 時間、60℃で 2.5 時間、65℃で 1 時間以上を要求しており、これ以上であれば消毒槽の 70℃で 1 時間と同じ効果がある。

⑤中温発酵と消毒槽の組合せでは、消毒槽温度とその最低保証滞留時間を 55℃で 7.5 時間、60℃で 3.5 時間、65℃で 1.5 時間以上を要求しており、これ以上であれば消毒槽の 70℃で 1 時間と同じ効果がある。

なお、参考に人体病原菌および寄生虫の死滅温度を表 2.3.3 に示す。

表 2.3.3 人体病原菌および寄生虫の死滅温度<sup>35)</sup>

種類	温度(℃)	時間 (分)
腸チフス	55~60	30
赤痢菌	55	60
ブドウ球菌	50	10
大腸菌	55	60
	60	15~20
回虫卵	60	15~20
クリプトスポリジウム	60	30
	常温・乾燥	1~4 日間

#### (5) バイオガスプラントにおけるその他の課題

国内において、畜産ふん尿や生ごみ・食品廃棄物を基質とするバイオガスプラントが実用ならびに実証施設として稼動している。国内のバイオガスプラントは、欧州の技術をもとに日本の環境、社会システムに適した形に構築していく必要がある。以下には、バイオガスプラントの全体システムの課題に関してバイマスエネルギー導入ガイドブック<sup>36)</sup>を参考にまとめた。

##### 1) 原料の収集や運搬・性状等に関する課題

- ①原料の収集・運搬に費用やマンパワーがかかり、予定した量まで原料が集らない。
- ②原料中にメタン発酵で障害となる異物が混入する。

##### 2) メタン発酵槽に関する課題

- ①メタン発酵槽内外での異物や汚泥による詰まりで、有効な発酵槽容量が減少したり機器類の運転障害を起こす。
- ②メタン発酵槽の温度管理、投入有機物量の変動、原料中の発酵阻害物質（消毒剤や抗生物質等）で、メタン発酵槽の機能が停止する。

##### 3) バイオガスの利用に関する課題

- ①バイオガスの利用が十分に行えない。特に、バイオガス発電では、電力は施設内外で使用できるが、回収した熱はメタン発酵槽の加温程度の利用で余剰熱は放熱している。

##### 4) メタン発酵消化液の処理と活用に関する課題

- ①メタン発酵消化液は、脱水後に分離液は排水処理して河川等へ放流し、脱水ケーキは堆肥化して農地へ還元するが、建設費・運転費共に高価である。
  - ②消化液を液肥として使用する場合に、水稻や野菜への施肥方法や施肥効果、散布機械、化学肥料との相違、衛生的な安全性等が不明である。
- 5) バイオガスプラントの事業採算性に関する課題
- ①バイオガスプラントで事業運営する場合に、収支バランスが取れない。特に、家畜ふん尿を対象に行っているバイオガスプラントでは、ふん尿の受け入れ単価が安価であるため、収支バランスを取るのは液肥利用地域を除いて非常に困難な状況にある。
  - ②バイオガスプラントの建設費が高価である。日本と欧州では、各種の技術基準が異なること、国内の実績数が少なく汎用機器が開発されていないこと、プラント機器等の信頼性の考え方が異なること等の理由で、日本のプラント建設費は欧州の2倍以上との比較もある<sup>37)</sup>。

## 2. 4 結言

日本で大量に発生する高濃度有機性廃棄物の現状を把握するために、バイオマス資源の観点から発生量・性状ならびにリサイクル状況を整理して、その中で水分の多い有機性廃棄物が処理・リサイクルが難しい状況にある点を明らかにした。また、この水分の多い有機性廃棄物の処理に適しているメタン発酵の原理や現状をまとめ、本論文で扱うメタン発酵槽（BIMA 消化槽：無動力攪拌式）の位置付けも述べた。さらに、メタン発酵における課題ならびに本論文のポイントにおける研究開発状況についてまとめた。メタン発酵槽ならびにバイオガスプラントにおける主な課題や研究開発ポイントは、以下の通りである。

①メタン発酵の有機物容積負荷と高効率化：メタン発酵の原料毎に有機物容積負荷を整理し、高効率化の方法として2相発酵方式についてまとめた。

②アンモニアによる発酵阻害の防止：中温および高温発酵におけるアンモニアによる阻害に関する研究を整理した。高温発酵は、発酵槽内で有機物の分解に伴うアンモニア増加で中温に比べ阻害を受けやすい。特に、メタン発酵の原料として厨芥の様に、アンモニア濃度が増加しやすい場合には、高温発酵で高負荷をかける場合の制限要因になる。

③中温発酵と高温発酵の比較：畜産ふん尿や生ごみ等のメタン発酵で、中温と高温発酵の有機物分解速度やバイオガス発生量などについて、両方式の特性をまとめた。一般的には、高温発酵が有機物容積負荷を高く取れ、バイオガス発生量が多い。しかし、低有機物容積負荷では、中温も高温発酵も有機物分解速度やバイオガス発生量は変わらないとの報告がある。

④メタン発酵による消毒効果：メタン発酵における消毒効果について、温度の効果、中温発酵と高温発酵の差を整理したが、高温発酵は消毒効果が高いことを示している。また、バイオガスプラントの消化液を土壌還元する際の微生物指標として、ふん便性大腸菌群ではウイルス性の病原性微生物が残存している可能性があるとしている。さらに、液肥を使用しているデンマークの衛生規定を紹介し、温度による消毒効果を示した。

⑤バイオガスプラントに関する課題の整理

- ・原料の収集や運搬・性状に関する課題
- ・メタン発酵槽に関する課題
- ・バイオガスの利用に関する課題
- ・メタン発酵消化液の処理と活用に関する課題
- ・バイオガスプラントの事業採算性に関する課題

なお、本論文では、日本の環境に適したバイオガスプラントにおけるメタン発酵で、中温発酵と高温発酵の比較、消毒効果、実用的な運転管理方法ならびに新エネルギーの生産施設としての評価に焦点を当てている。

## 【第2章 参考文献】

- 1) 藤本潔：バイオマス・ニッポン総合戦略の実現に向けて、廃棄物学会誌、Vol.15、No.2、pp.53-59、2004
- 2) 坂志朗編集：バイオマス・エネルギー・環境、アイピーシー、p.102、2001
- 3) 坂志朗：総論バイオマス利活用の動向と将来展望、電気評論、pp.13-18、2003.6
- 4) 羽賀清典：『循環型社会に向けた畜産環境保全について』、畜産環境情報
- 5) 藤田正憲：省資源・省エネルギーからみたメタン発酵について、水処理技術、Vol.21、No.4、pp.313-332、1980
- 6) 井出哲夫：水処理工学、技報堂出版、p.352、1997
- 7) 日本有機資源協会・バイオガス事業推進協議会：エントゾルガ国際見本市と欧州バイオガスプラント視察報告書、pp.67~100、2003
- 8) 家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理技術委員会：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き、(財)畜産環境整備機構、pp.14~18・53~55、2001
- 9) 押田敏雄・柿市徳英・羽賀清典：畜産環境保全論、養賢堂、pp.140~142、1998
- 10) バイオガスシステムの現状と課題：日本有機資源協会、p.42、2003
- 11) 片岡直明・鈴木隆幸・石田健一・山田紀夫・本多勝男：家畜糞尿のメタン発酵処理システム、第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集、廃棄物学会、pp.307~309、1999
- 12) 中川匡・横山尚伸・平野一澄：高温メタン発酵システム実験プラントの運転、第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集、廃棄物学会、pp.343~345、2003
- 13) 間處威俊・上野将・師正史・添田祐二・山本哲也・柴田敏行：膜分離型メタン発酵処理システムの開発、第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集、廃棄物学会、pp.360~362、1998
- 14) 米山豊・竹野勝彦・清水紀久夫・内藤龍雄・板垣文夫・安原義光・中田六雄：し尿系汚泥と生ごみを対象としたメタン発酵実施の処理特性、廃棄物学会論文誌、VOL.15、No.3、pp.155~164、2004
- 15) 前川孝昭：畜産環境対策大事典第2版、農山漁村文化協会、pp.507~518、2004
- 16) 前川孝昭・山沢新吾・吉川誠司・花岡平：2相式メタン発酵装置の開発に関する研究(第1報)、農業施設、第15巻、第1号、pp.7~21、1983
- 17) 李玉友：汚泥・生ごみなどの有機性廃棄物の高温メタン発酵、水環境学会誌、21(10)、pp.644~649、1998
- 18) 加藤明徳、野池達也：農畜産廃棄物の嫌気性消化処理—pH制御によるアンモニアの消化阻害対策—、工業用水、NO.490、pp.18~32、1999
- 19) Chun-feng Chu・片岡直明・宮晶子・鈴木隆幸：生ごみの中温および高温メタン発酵における生ごみ組成の影響と動力学的解析、用水と廃水、Vol.43、NO.3、pp.202~209、2001

- 20) Angelidakim I., Ahring, B. K.: Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 38(4), pp.560~564, 1993
- 21) 奥野芳男・李玉友・佐々木宏・関廣二・上垣内郁夫：生ごみと汚泥を混合処理する高温高濃度メタン発酵における汚泥比率の影響、*廃棄物学会論文誌*、Vol.14、NO.1、pp.27~35、2003
- 22) 藤島繁樹・宮原高志・角田俊司・野池達也：嫌気性消化における酸生成相へのアンモニア性窒素の影響、*土木学会論文集*、NO.650、Vol.15、pp.33~40、2000
- 23) 小島敬良：膜型メタン発酵システムの概要と活動動向、2004年NEW環境展記念セミナー、pp.8~12、2004
- 24) 多田千佳・澤山茂樹：光メタン発酵法によるタンパク質系有機物の嫌気性消化、第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集、*廃棄物学会*、pp.346~348、2003
- 25) 西村和之・大河内由美子・井上雄三・川本克也：リン酸水素マグネシウムによるアンモニア除去、第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集、*廃棄物学会*、pp.349~351、2003
- 26) 藤田正憲：省資源・省エネルギーからみたメタン発酵について、*水処理技術*、Vol.21、No.4、pp.313-332、1980
- 27) Hashimoto A. G., Prior R. L. & Chen Y. R.: Methane and biomass production system for beef cattle manure, Presented at the Great Plains extension seminar on methane production from livestock, Lival, Kansas, February 15, 1978
- 28) 奥野芳男・李玉友・佐々木宏・関廣二・上垣内郁夫：生ごみと汚泥の高濃度混合メタン発酵に及ぼす汚泥比率と発酵温度の影響、*土木学会論文集*、No.734、VII-27、pp.75-84、2003
- 29) Heinz Schulz Barbara Eder・浮田良則訳：バイオガス実用技術、オーム社、pp.19,20,197-201、2002.3
- 30) Faarah, S.R., Scheuerman, P.R., Eubanks, R.D. and Bitton, G.: Bacteria and Viruses in Aerobically Digested Sludge: Influence of Physical and Chemical Treatment on Survival and Association with Flocs under Laboratory Conditions, *Water Science and Technology*, 17, Bilthoven, pp.165-174, 1985
- 31) Feachem, R.G., Bladley D.J., Garelick H. and Mara, D.D.: Appropriate Technology for Water Supply and Sanitation, Health Aspects of Excreta and Sludge Management – A State of the Art Review, The World Bank, 1981
- 32) 土村繁樹・帆秋利洋・友沢孝・大原孝彦・小嶋令一・国井伸隆・大橋晶良・原田秀樹・石田哲也：畜産廃棄物系バイオガスプラントにおける指標微生物の動向、用水と廃水、*Vol.46*、No.5、pp.68-74、2004
- 33) H. J. Bendixen: Safefuards against pathogens in Danish biogas plants, *Wat. Tech.*, Vol.30、No.12、pp.171~180、1994
- 34) 畜産環境整備機構：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き、

畜産環境整備機構、p.156、2001

35) 中央畜産会：堆肥化施設設計マニュアル、中央畜産会、p.15、2000

36) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構編：バイオマスエネルギー導入ガイドブック、(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、pp.147-150、246-247、2002

37) 松田従三：家畜ふん尿利用のバイオガスプラントの課題、廃棄物学会誌、Vol.15、No.2、pp.70-76、2004

### 第3章 バイオガスプラントとしての中温メタン発酵の解析

近年、メタン発酵による畜産ふん尿や生ごみ、食品工場残さ等の有機性廃棄物処理が注目を集めている。メタン発酵法の特長は、発生するバイオガス（バイオガス）によりエネルギーを創出できる点にある。このため、大量に発生する畜産ふん尿を初めとする有機性廃棄物をメタン発酵で適正処理を行うと同時に、エネルギーを回収・活用することにより廃棄物中の有機物を削減し、かつバイオガスによる化石燃料の代替により CO<sub>2</sub> 排出抑制が図れ、地球温暖化防止に寄与することができる。本章では、畜産ふん尿とおからを対象に中温発酵によるメタン発酵およびバイオガスによるガス発電を行った施設として『八木バイオエコロジーセンター』を取り上げ、中温発酵のメタン発酵施設における有機物除去やメタン発酵槽内の有機酸濃度等について、実運転データに基づき解析を行った。

#### 3. 1 八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様

##### (1) 八木バイオエコロジーセンターの施設概要

本センターは、京都府船井郡八木町にあり、1998年4月より試運転調整を開始し、同年7月より本格稼働している。施設は、乳牛・豚のふん尿とおからを受入れてメタン発酵処理を行う「メタン施設」と、肉牛のふんや脱水ケーキを堆肥化するための「堆肥施設」に大別される。メタン施設では、乳牛 650 頭、豚 1500 頭のふん尿とおから 5t/日を受入れる計画で、受入れ量や有機物量の計画値を表 3.1.1 に示す。表 3.1.1 の中で「藁・おがくず」は、乳牛ふん尿中に混入する可能性がある量を示している。これらのふん尿やおからはメタン発酵法により処理し、発生するバイオガスを使って発電を行う。さらに、発電設備から廃熱を温水として回収し、メタン発酵槽の加温や管理用建物の給湯・暖房などに使用する。一方、堆肥施設では、メタン施設で発生する脱水ケーキと別途収集した肉牛 500 頭のふんを混合処理し、最終的に堆肥として農地に還元する。本センターのシステム全体の概要を図 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 有機性廃棄物の受入れ量（計画値）

対象	対象頭数 (頭)	1 頭あたり 廃棄物発生量 (kg/日・頭)	総受入れ量 (t/日)	含水率 (%)	固形物量 (kg/日)	有機物 比率	有機物量 (kg/日)
乳牛	650	50.0	32.5	88	3,900	0.80	3,120
豚(中型)	1,500	5.4	8.1	91	729	0.69	503
藁・おがくず	—	—	0.84	25	630	0.88	554
おから	—	—	5.0	80	1,000	0.95	950
希釈水*	—	—	16.4	100	0	0	0
合計	—	—	62.84*	約 90	6,259	0.82	5,127

※希釈水には、生物汚泥 12.9m<sup>3</sup>/日、生活排水の処理水 1.0m<sup>3</sup>/日を含み、これらの比重を 1.0 とする。

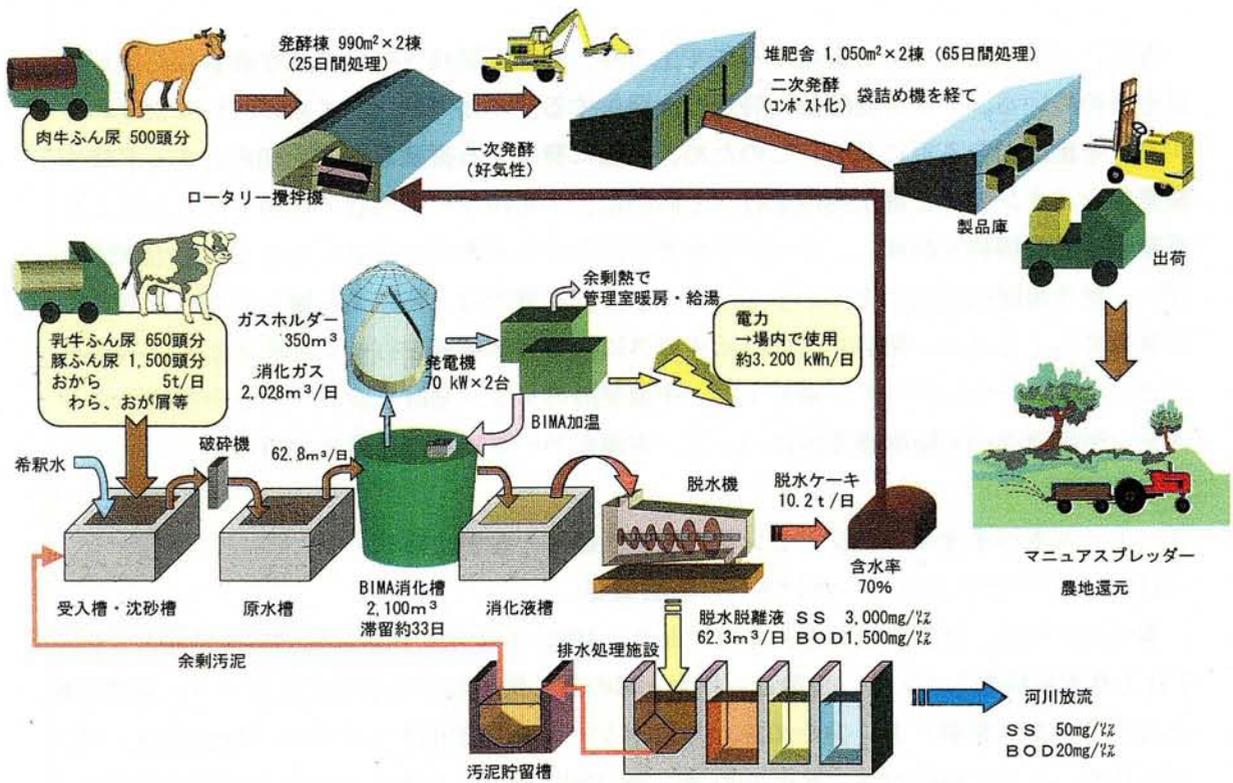


図 3.1.1 八木バイオエコロジーセンターのシステムフロー

(2) メタン発酵の設備仕様

1) メタン発酵のシステム

本センターのメタン施設における受入れ・前処理ならびにメタン発酵槽周りのプロセスフローを図 3.1.2 に、また主要な設備仕様を表 3.1.2 に示す。メタン施設では、乳牛や豚のふん尿とおからを受入れており、また本センター内で発生する排水処理設備の余剰汚泥、生活排水（し尿浄化槽処理水）、ふん尿持込み車両の洗浄排水も合せて前処理設備に流入する。ふん尿や余剰汚泥は受入槽で、おからや生活排水は原水槽で受入れている。ふん尿は受入れ槽で攪拌されてスラリー状になり二軸縦形の破碎機を経て、沈砂槽で小石や砂等が沈殿除去されたのち、破碎ポンプで藁などの長物が破碎されてから原水槽に貯留される。原水槽では、おからやふん尿および余剰汚泥等がよく混合する様に、水中ミキサーを間欠的に運転している。原水槽のスラリーは二段目の破碎ポンプを通過後に間欠的にメタン発酵槽に投入し、ここで約 33 日間滞留させ、液温を 37℃程度に保ちながら中温のメタン発酵を行う。メタン発酵槽からはメタンを約 60%含むバイオガスが 1 日に計画値で 2028m<sup>3</sup>発生する。メタン発酵の消化液は、消化液槽へ排出される。これをスクリュープレス式脱水機で脱水し、脱水ケーキと脱水ろ液に分離する。脱水ケーキは堆肥施設へホイールローダーで運ばれ、肉牛ふんや敷料と合わせて好気発酵し、最終的には堆肥となって農地へ還元される。また、脱水ろ液は排水処理設備で浄化され、近くの河川へ放流される。バイオガスはガスホルダーへ一時貯留され、酸化鉄を充填した乾式脱硫後に 2 台のガスエンジン式

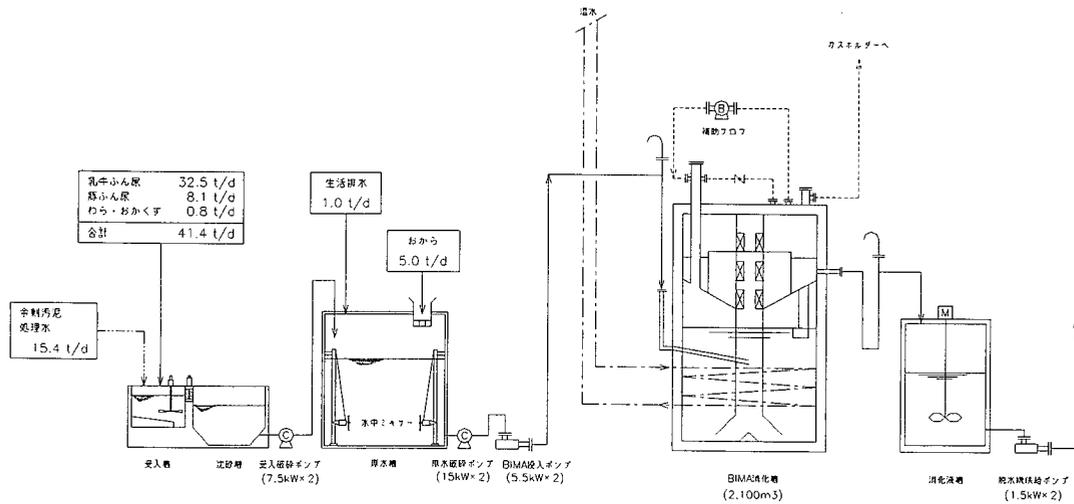


図 3.1.2 中温メタン発酵のプロセスフロー

表 3.1.2 メタン発酵施設の主要設備仕様

名称	項目	仕様
原水槽	容量、構造	150m <sup>3</sup> 、鉄筋コンクリート製、攪拌装置付
BIMA 消化槽	容量、構造	2,100 m <sup>3</sup> 、鉄筋コンクリート製
	形状	内径 14.0m、内部高さ 17.7m
	滞留時間	33 日 (62.8 m <sup>3</sup> /日投入時)
	有機物容積負荷	2.4kg/m <sup>3</sup> /日
	発酵温度	中温発酵 (37℃)
	加温方式	水槽内加温式 (底盤、側壁、内筒の躯体に温水配管埋込み)
	躯体外断熱	壁：スタイロフォーム 100 mm、底盤・屋上：スタイロフォーム 50 mm
	加温熱量	冬期加温熱量 10,116MJ/日
	攪拌回数	6~8 回/日
	攪拌容量	最大 330 m <sup>3</sup> /回
消化液槽	容量、構造	65 m <sup>3</sup> 、鉄筋コンクリート製、攪拌装置付
ガスホルダー	容量	350 m <sup>3</sup>
	形式・材質	ポリエステルと PVC コート膜のガスバック 外部は鋼鉄製格納シェルター
	保有圧力	低圧型 (50mmAq 以下)
発電装置	原動機	希薄燃焼式ガスエンジン、NOX 350ppm
	発電機	三相 210V、70kW、効率 29.2%、台数 2 台
	熱交換器	シェルアンドチューブ式、熱回収効率 52.9%

発電機の燃料として使用する。発電電力は、運転当初本センターのみの動力源等として使用していたが、2001年3月末以降は単独運転検出装置を設置して余剰電力を商用電力系へ逆潮流（売電）する方式へ切り替えた。発電に伴い廃熱回収した温水はメタン発酵槽の加温に使用される。また、余剰の温水は、場内の管理室の給湯や暖房に利用される。

## 2) メタン発酵槽の構造と攪拌原理・効果

本センターで使用している無動力攪拌式消化槽（以降 BIMA 消化槽と呼ぶ）は欧州をはじめ世界で 70 基以上が稼動しており、ユニークな内部構造を持つメタン発酵槽である。BIMA 消化槽は、発生するバイオガスの圧力を利用して攪拌を行う「無動力攪拌」が可能で、畜産ふん尿や食品工場の残さ等の高濃度有機性廃棄物の処理に適している。消化槽の構造は、図 3.1.3 に示す様に水槽内はメタン発酵が主に行われる主発酵部、主発酵部の上部にある上部室、中央部にある細い円筒のセンターチューブからなっている。また、水槽内のガス圧力を調整する均圧弁を水槽屋上に設置しており、水槽内部に機械的な攪拌装置などがないため、メンテナンスが容易で、比較的高濃度（固形物濃度 10%以下）の有機物を直接メタン発酵できる点に特徴がある<sup>2)</sup>。メタン発酵槽の加温は、コンクリート水槽躯体に埋込んである温水パイプに温水を送水して加温するので水槽内を比較的均一温度に加温できる。このため、ふん尿やおからを直接外部加温するための熱交換器は設けていない。

BIMA 消化槽は、図 3.1.4 に示す様に、槽内の攪拌をメタン発酵で発生したバイオガスの圧力を使って行う。この無動力攪拌の原理は、主発酵部で発生したガスの圧力を使って主発酵部の液を上部室に押し上げて、その後均圧弁の操作でガス圧を下げても上部室にある液を主発酵部に落下させることにより、水槽内を攪拌する。攪拌回数は、BIMA 消化槽に投入する有機物の性状により異なるが、本センターでは 1 日に 6～8 回の攪拌を行う。

BIMA 消化槽の攪拌効果を本設計条件に基づいて試算する。BIMA 消化槽は、攪拌時の上部室と主発酵部の最大水頭差が 5m、攪拌時の攪拌液量が 330m<sup>3</sup>、センターチューブの断面積が 3.1m<sup>2</sup> である。1 回の攪拌時の平均水頭差を 2.5m とすれば、攪拌時にセンターチューブ下部の流速は 7.0m/s となる。1 回の攪拌時間は 15.2 秒と試算でき、この攪拌力は 532 kW に相当する。一般的な機械攪拌による消化槽内の攪拌動力を 0.05 kW/m<sup>3</sup> とすれば、2100m<sup>3</sup> の消化槽での攪拌動力は 105 kW となる。このことから、BIMA 消化槽の攪拌能力は、一般的な機械攪拌能力の 5.1 倍となり、間欠的な攪拌ではあるが十分な攪拌能力があることを示している。

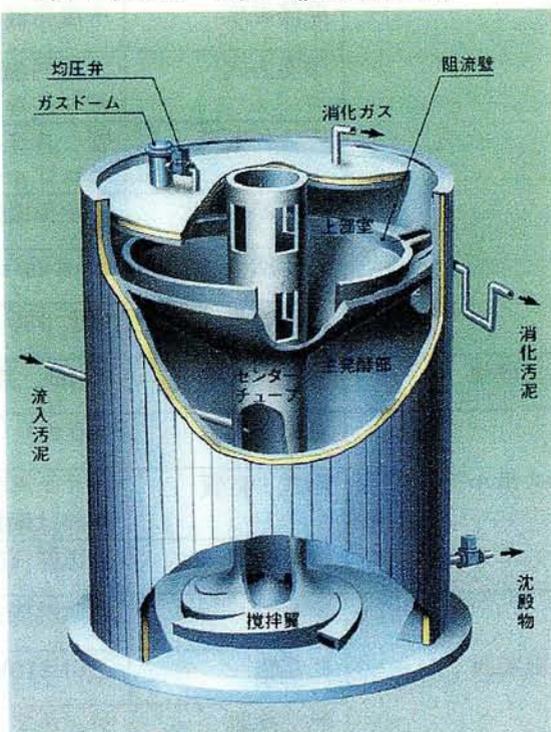
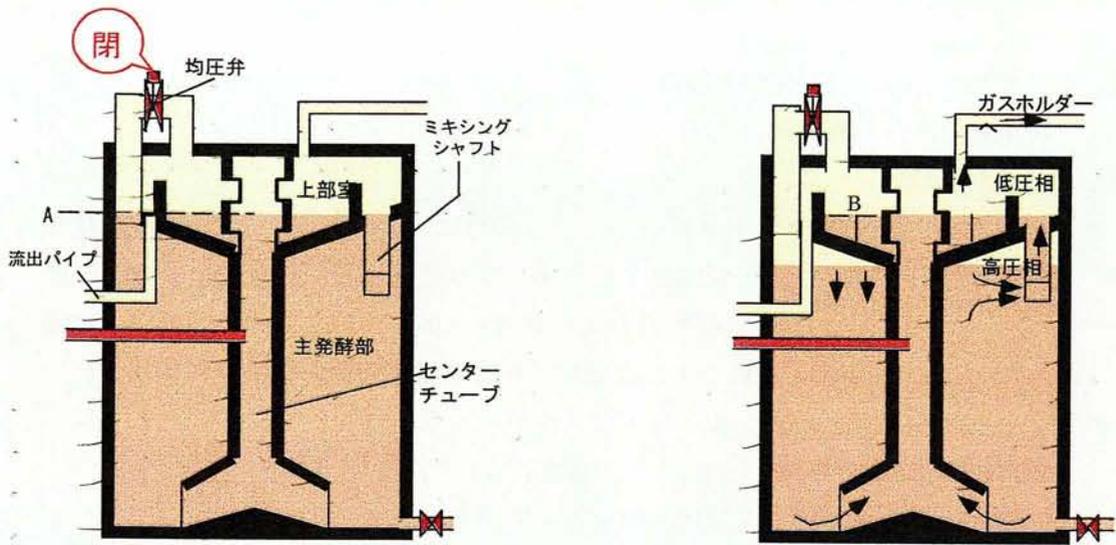


図 3.1.3 BIMA 消化槽の構造図

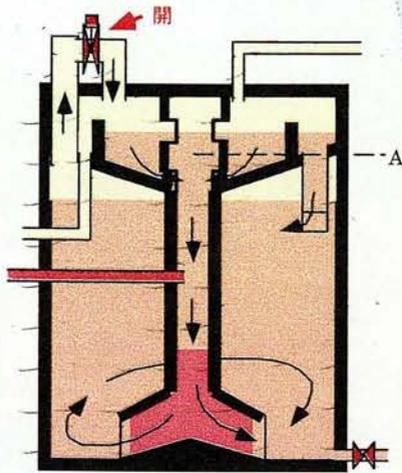


サイクル1 開始

主発酵部と上部室の液面Aは一定になっており、均圧弁は閉じている。少量の沈殿物がある場合は底部から引き抜く。

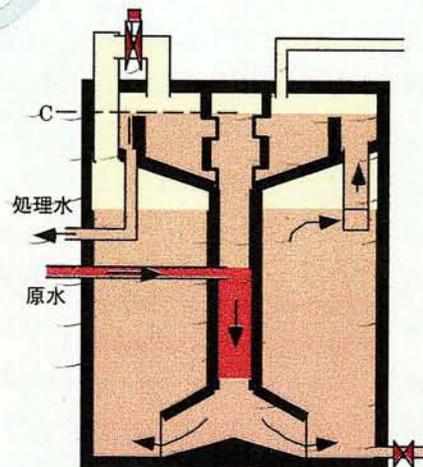
サイクル2 ガス発生による液面差増加

主発酵部内でバイオガスが発生し、ガス圧により液面Aが下降し、センターチューブやミキシングシャフトより液が押し上げられ、液面Bが上昇する。上部室の低圧ガスは自動的にガスホルダーに供給される。



サイクル4 混合

均圧弁を開くと高圧相と低圧相のガス圧が同圧となる。上部室の液はセンターチューブやミキシングシャフトを通して主発酵部へ勢い良く流れ込み、サイクル3で供給された原水と混合・攪拌される。液面はAに戻り。サイクルはサイクル1へ戻る。



サイクル3 原水の供給と処理水の流出

十分なガス発生により、液面Bが最高位Cとなる。この時に、一定量の原水がセンターチューブ内に供給され、投入量と同量の処理液はオーバーフローして流出パイプから排出される。

図 3.1.4 BIMA 消化槽の攪拌原理

### 3. 2 中温メタン発酵の除去性能と解析

#### (1) メタン発酵の原料と消化液の性状

##### 1) ふん尿とおからの受入れ量

本メタン施設で受入れている乳牛と豚のふん尿ならびにおからの量を 2000 年 1 月～2001 年 12 月の月別日平均値として図 3.2.1 に示す。この間の 1 日の受入量は、豚ふん尿が 3.9～7.9 t (平均 5.2 t/日)、乳牛ふん尿が 28.0～42.0 t/日(平均 35.9 t/日)、おからが 2.2～4.5 t/日(平均 3.3 t/日)である。豚のふん尿量は、飼育形態が肥育から一貫経営に変わったため計画値より減少した。また、乳牛は当初スタンション(繋ぎ)牛舎からのふん尿のみを受入れる計画であったが、フリーストール(群飼)牛舎からのふん尿も受入れている。このフリーストール牛舎からのふん尿は、牛舎近くで簡易スクリュープレス式分離機で固液分離をしているので、含水率の高いふん尿が本センターへ持ち込まれている。スタンション牛舎からのふん尿は、ふん尿混合で持ち込まれている。おからの受入量は、豆腐の生産量に応じて変動している。受入れ量の実績では、乳牛のふん尿量が計画値に比べて 3.4 t/日程度多くなっているが、受入れ総量としては計画値に近い値である。受入れ量は週間変動がみられ、2001 年 10 月～12 月における曜日別受入量を図 3.2.2 に示すが、月曜日は本センターが休業している日曜日のふん尿を合わせて搬送するため、受入れ量が多くなっている。また、水・木曜日は逆に受入れ量が少ない傾向がある。この受入れ量の変動は原水槽で調整し、BIMA 消化槽への 1 日投入量を平均化させている。

##### 2) ふん尿とおからの性状

本メタン施設で受入れているふん尿ならびにおからの性状を表 3.2.1 に示す。実際に受入れているふん尿と計画値を比較すると、固液分離していない乳牛ふん尿は、計画値に比べて TS 濃度が 13.7%とやや高いが、固液分離したふん尿は 4.8%と半分以下になっている。豚ふん尿は、実測値が TS6.6%と計画値に比べてやや低かった。おからは TS23.3%であり、計画値に比べて若干 TS 濃度が高かった。有機物比率(VTS/TS)は、乳牛のふん尿・おからが計画値に近い値であったが、豚ふん尿は実測値が 0.84 と計画値 0.69 に比べて 20%程度高かった。

なお、液状成分の分析項目として、pH はガラス電極 pH メータ、VTS、BOD、SS、COD<sub>Cr</sub>、COD<sub>Mn</sub>、揮発性有機酸、T-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、アルカリ度、T-P、T-S、大腸菌群、ふん便性大腸菌は下水道試験法に準拠して測定した。各種有機酸濃度の分析方法は、酢酸、プロピオン酸は食品分析法に準拠して高速液体クロマトグラフ法により測定した。バイオガス成分の CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>は、JISK2301、JISK0108 により測定した。

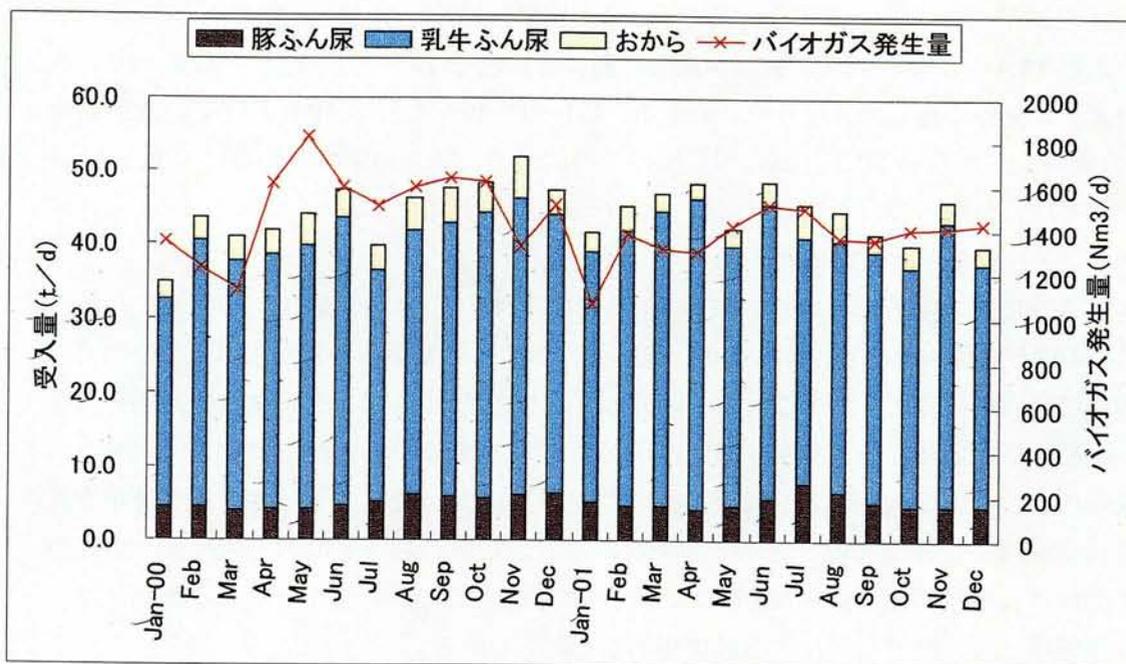


図 3.2.1 ふん尿やおからの受入れ量とバイオガス発生量

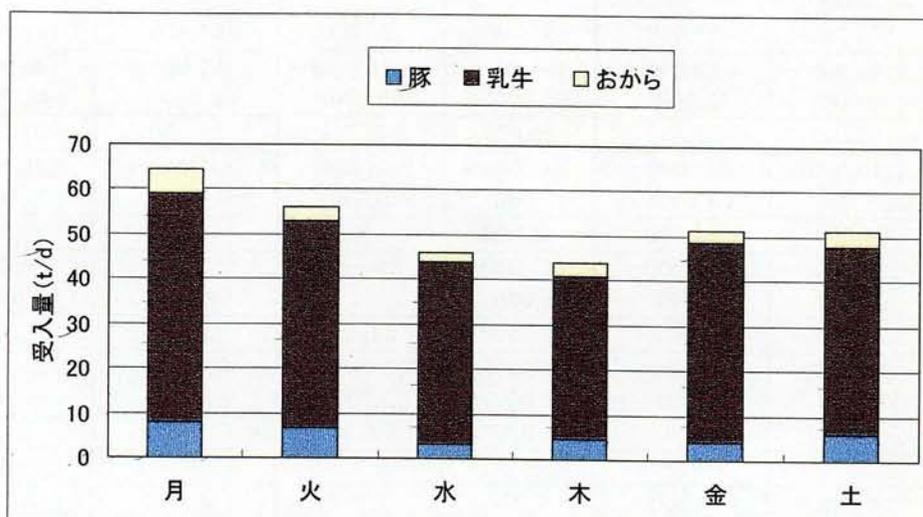


図 3.2.2 曜日別のふん尿・おからの受入れ量  
(2001年10月～12月の実績値)

### 3) メタン発酵投入液の性状

原水槽からメタン発酵槽へ投入するスラリーは、ふん尿やおからが原水槽で水中ミキサーにより十分に攪拌されている。原水槽では、ふん尿やおから以外に、余剰汚泥約 10m<sup>3</sup>/日 (VTS24,000mg/L)、生活排水(し尿浄化槽処理水)0.4m<sup>3</sup>/日がおからの希釈を兼ねて流入する。原水槽は有効容量が 150 m<sup>3</sup>あり、通常は運転水位を下げているので2日程度の貯留容量がある。原水槽における混合液の性状を表 3.2.1 に示すが、メタン発酵槽へ投入している TS 濃度 6.8%、VTS 濃度 5.5%で計画時に比べると、実運転では TS ならびに VTS 濃度

で計画値の67%の投入負荷率になっている。原水槽におけるC/Nは、VTS/T-Nを指標として用いると15.4であり、メタン発酵が最も活発に行われる12~16の範囲<sup>3)</sup>に入っているため、メタン発酵に適したスラリーといえる。C/Nは、豚ふん尿が12.6と低く、乳牛ふん尿が20前後、おからが30.3とふん尿に比べて高いので、豚ふん尿のみの様にC/Nが低い場合などでは、おからの投入によりC/Nが改善されることになる。

#### 4) メタン発酵前処理と粒度分布

本メタン施設で受入れている乳牛のふん尿中にはわらなどが含まれており、これが機器・配管の詰りの原因となり、またメタン発酵槽のスカムの発生要因にもなる。このため、前処理の破砕機や破砕ポンプでこれらを破砕しており、図3.2.3にメタン施設の粒径分布を示す。受入れ槽の採取例では30mm以上のわらなどが乾物重量で約40%含まれているが、前処理設備の破砕後では30mm以上の固形物は含まれていなかった。なお、メタン発酵槽投入原水と消化液槽の粒径分布はほとんど差がないことから、わらなどの固形物はメタン発酵槽内で分解されずに、消化液中に混じって出てきている。このわら類を分解するためには、メタン発酵槽へ投入前で可溶化する必要があると考えられる。

表 3.2.1 ふん尿・おからの性状と中温メタン発酵槽の流入・流出性状

項目		乳牛ふん尿		豚ふん尿	おから	原水槽	消化液槽
		ふん尿混合	固液分離液				
TS	mg/L	136,700	47,500	65,700	233,000	67,570	42,200
		(130,000~ 140,000)	(29,000~ 66,000)	(56,000~ 73,000)	(210,000~ 250,000)	(57,000~ 82,000)	(35,000~ 48,000)
VTS	mg/L	115,000	37,500	55,000	220,600	55,300	31,200
		(110,000~ 120,000)	(21,000~ 54,000)	(45,000~ 62,000)	(201,800~ 230,000)	(45,000~ 69,000)	(25,000~ 36,000)
SS	mg/L	89,000	34,500	44,500	—	46,700	29,500
		(83,000~ 95,000)	(16,000~ 53,000)	(41,000~ 48,000)	—	(39,000~ 52,000)	(29,000~ 30,000)
BOD	mg/L	24,000	6,500	25,500	24,850	26,000	4,200
		(21,000~ 27,000)	(2,000~ 11,000)	(23,000~ 28,000)	(14,000~ 35,700)	(23,000~ 34,000)	(2,100~ 6,300)
pH	—	6.6	7.4	6.1	6.5	6.5	7.7
						(6.1~7.1)	(7.5~7.9)
T-N	mg/L	5,530	1,950	4,370	7,290	3,580	3,330
		(4,800~ 6,100)	(1,600~2,300)	(3,300~ 5,200)	(5,000~ 8,900)	(3,200~3,900)	(2,900~ 4,300)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N	mg/L	2,500	1,200	4,900	2,400	1,740	2,140
						(1,500~2,200)	(1,700~ 2,700)
T-P	mg/L	1,290	395	1,470	1,698	590	595
		(1,260~ 1,300)	(370~420)	(1,210~ 1,900)	(695~3,400)	(480~730)	(480~710)
C/N	—	20.8	19.2	12.6	30.3	15.4	9.4

(Ref.) 1. 各数値は、上段が平均値を、( )内数値は最小値と最大値を示す。

2. C/N値は、VTS/T-Nによる。

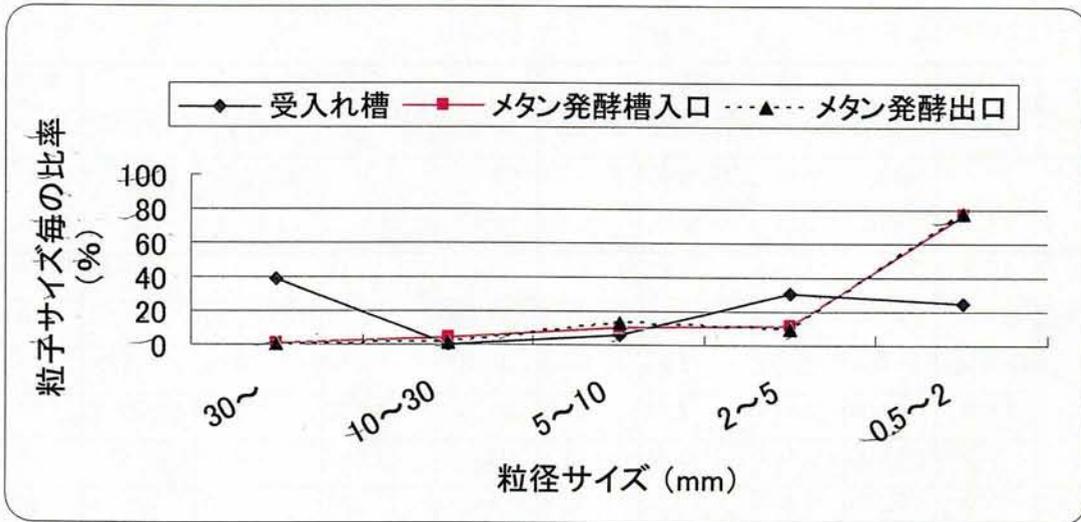


図 3.2.3 メタン施設における固形物の粒径分布

(2) 中温メタン発酵の有機物等除去とバイオガス発生量

1) 中温メタン発酵による有機物等除去

本センターにおけるメタン発酵槽の有機物除去実績の一例を表 3.2.2 に示す。メタン発酵槽の投入量は、原水槽にふん尿等があれば 64t/日(8t/回×8回)程度であるが、ふん尿の受入量が多くなった場合には、短期的に投入量が増加することがある。表 3.2.2 で、メタン発酵の有機物容積負荷と有機物の除去率を示しているが、濃厚な有機物を対象に一般的に使用する VTS を指標にとると、VTS の容積負荷は 1.6kg/m<sup>3</sup>/日と計画値の約 65%とやや低めであり、除去率は平均で 44.4%と計画値に近いものであった。メタン発酵槽での滞留時間は、29～33日である。乳牛のふん尿を中心にメタン発酵を行った場合には、VTS を指標とするとメタン発酵による除去率は 25～35%<sup>4)</sup> が示されている。VTS 以外の有機物の指標を用いた場合でメタン発酵の除去率を比較すると、VTS、COD<sub>Cr</sub>、T-C はほぼ同じ除去率を示した。このことから、高濃度有機性廃棄物のメタン発酵でも、VTS、COD<sub>Cr</sub>、T-C を有機物指標として活用できることが分かった。なお、BOD は他の有機物指標からすると高い除去率を示し、BOD を指標にするとメタン発酵の除去効果を過大に判断する可能性がある。COD<sub>Mn</sub> も VTS などに比べると、除去率を高く判断することになる。

2) バイオガスの発生量と成分

本センターにおける受入量(ふん尿・おから) 1t 当りに発生するバイオガス量を 1999 年 1 月から 2001 年 7 月までの月間データからみると、平均で 32.4Nm<sup>3</sup>/t(22.6～42.4Nm<sup>3</sup>/t) であった。このバイオガスの発生量は、乳牛ふん尿当たり 20～25Nm<sup>3</sup>/t、豚ふん尿当たり 25～30Nm<sup>3</sup>/t といわれており、おからを混合した場合には、メタン発酵原料当たりのバイオガス発生量が多くなることが分かる。バイオガスの性状分析例を表 3.2.3 に示す。バイオガスのメタン濃度は 52～60%の範囲でほぼ安定している。

表 3.2.2 中温メタン発酵槽による有機物、窒素、リン、硫黄、カリウムの除去性能

項目	年月日	2001.2.20				2001.12.6				除去率
		64 t/d (HRT : 32.8d)				72 t/d (HRT : 29.2d)				平均値
		濃度	負荷	容積負荷	除去率	濃度	負荷	容積負荷	除去率	
	mg/L	kg/d	kg/m <sup>3</sup> /d	%	mg/L	kg/d	kg/m <sup>3</sup> /d	%	%	
有機物	VTS	53,000	3,392	1.62	48.5	46,000	3,312	1.58	40.3	44.4
	COD <sub>Cr</sub>	69,000	4,416	2.10	46.3	41,000	2,952	1.41	35.4	40.9
	COD <sub>Mn</sub>	40,000	2,560	1.22	63.4	28,000	2,016	0.96	58.0	60.7
	BOD	34,000	2,176	1.04	81.9	21,000	1,512	0.72	90.2	86.1
	T-C	28,000	1,792	0.85	44.3	23,000	1,656	0.79	31.8	38.1
窒素	T-N	3,500	224	0.11	2.5	3,200	230	0.11	5.0	3.8
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1,600	102	0.05	40.1	2,200	158	0.08	6.4	-16.9
リン	T-P	560	36	0.02	9.5	480	35	0.02	2.0	5.8
硫黄	T-S	350	22	0.01	16.4	320	23	0.01	-7.2	4.6
カリウム	K	2,500	160	0.08	10.3	2,300	166	0.08	-23.6	-6.7

表 3.2.3 バイオガスの成分比較 (八木バイオエコロジーセンターと他施設)

採取日/ メタン発酵原料	八木バイオエコロジーセンター				他の施設		
	2001/12/6	2001/9/17	2001/2/20	1999/12/14	生ごみ <sup>5)</sup>	豚ふん尿	下水余剰汚泥 <sup>6)</sup>
CH <sub>4</sub> %	59.5	57.9	57.4	58.4	63.4	69.4	59.1
CO <sub>2</sub> %	37.1	39	36	38.9		29.8	38
N <sub>2</sub> %	0.2	0.2	1.2	0		<0.5	
O <sub>2</sub> %	<0.1	0.1	0.3	0		<0.5	
H <sub>2</sub> %	<0.1	0	0	0	<0.1		
H <sub>2</sub> S ppm	1200	1884	1109	870	655	935	490
NH <sub>3</sub> ppm	0.1	0.15	0.1	<0.5	28	<0.05	
発酵温度等	中温発酵				高温発酵、実験装置	中温発酵、実験装置	中温発酵

本センターでは、メタン発酵の投入物は乳牛のふん尿の比率が多いので、 $\text{CH}_4$  濃度が豚ふん尿や下水汚泥のバイオガスに比べると低濃度であった。バイオガス中の  $\text{CH}_4$  の発生量をメタン発酵槽での VTS 除去量から計算すると、 $0.5\sim 0.8\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{除去 VTS}\cdot\text{kg}$  であり、本センター以外の実用施設や実験設備では乳牛ふん尿で  $0.486\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{除去 VTS}\cdot\text{kg}$ 、豚ふん尿で  $0.695\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{除去 VTS}\cdot\text{kg}$  になっている<sup>4)</sup>。バイオガスでは  $\text{CH}_4$  以外の残りの多くが  $\text{CO}_2$  濃度であり、他には少量の  $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  が含まれている。バイオガス中の  $\text{H}_2\text{S}$  濃度は  $800\sim 1200\text{ppm}$  であった。厨芥を原料に高温消化のメタン発酵した事例などでは、バイオガス中に  $\text{NH}_3$  が  $28\text{ppm}$  含まれている報告<sup>4)</sup> もあるが、本施設の分析結果からは  $\text{NH}_3$  濃度は低濃度であった。

### 3) メタン発酵における N、P、S、K の除去効果

本施設のメタン発酵槽における N、P、S、K の除去率を表 3.2.2 に示す。T-P、T-S、T-K は検体数が 2 体と少ないが、平均除去率が  $\pm 7\%$  以内に入っておりメタン発酵では除去されていないことが分かる。窒素に関しても、T-N の除去率が  $3.8\%$  と低くメタン発酵では除去されないことを裏付けている。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  濃度はメタン発酵で  $20\%$  程度増加しており、タンパク質の有機態窒素が分解されて、増加したものと考えられる。

### 4) メタン発酵におけるマスバランス

本センターのメタン発酵におけるマスバランスの一例として、2001 年 2 月 13 日～19 日の 7 日間の日間平均値を図 3.2.4 に示す。図 3.2.4 では、前記期間における液量に、同年 2 月 20 日に性状分析した濃度をかけて算出した。この結果、メタン発酵では投入したふん尿やおからの有機物の  $47\%$  が除去され、バイオガスとして回収された。また、消化液は脱水機で固液分離され、消化液の SS 量の約  $95\%$  は脱水ケーキとして回収し、堆肥の原料となっている。

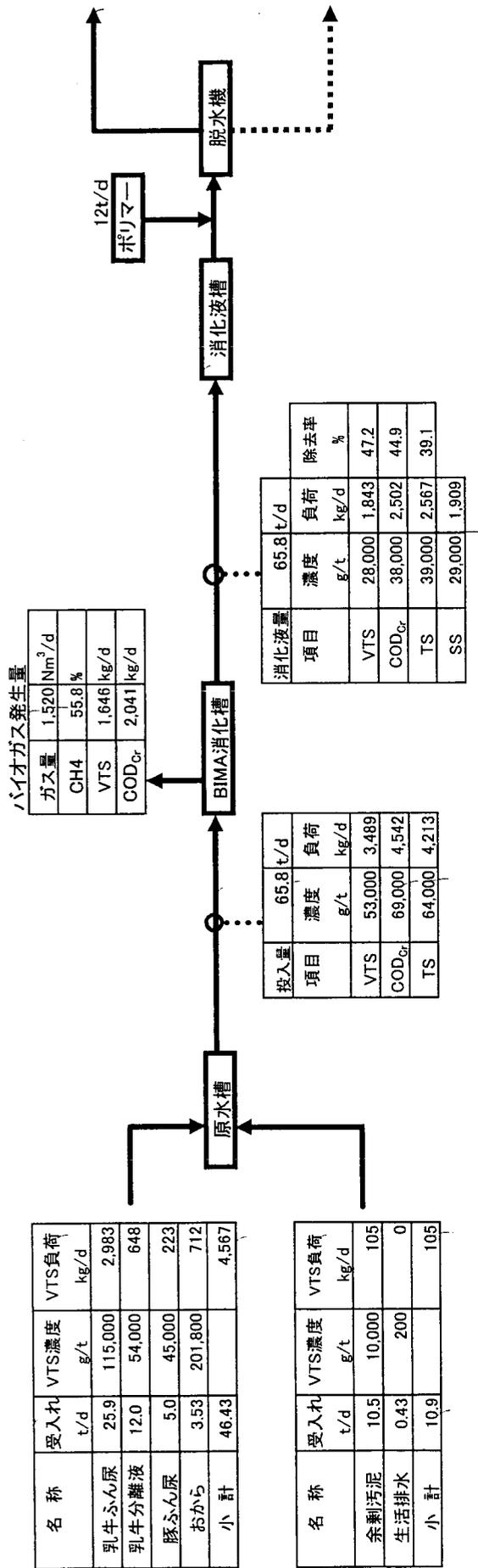


図 3.2.4 中温メタン発酵プロセスにおけるマスバランス  
(データ：2001年2月13～19日)

### 3. 3 メタン発酵と有機酸生成

本センターの原水槽の揮発性有機酸・酢酸・プロピオン酸濃度を図 3.3.1 に、消化液のこれらの有機酸濃度と pH 値を図 3.3.2 に示す。原水槽では 2 日程度の滞留時間であるが、揮発性有機酸濃度が 6,000~12,000mg/l まで増加している。この揮発性有機酸の内、多くが酢酸であり、プロピオン酸も 1,000~3,600mg/l 程度含まれている。このため、原水槽の pH 値は 6.1~7.1 の間で平均 6.5 と弱酸性であった。原水槽の水温は冬期でも 13℃程度あり、揮発性有機酸の濃度変化は季節による影響を受けていない結果となっている。本センターの原水槽でも有機酸生成が一部行なわれており、原水槽の滞留時間の長い施設では、有機酸生成がかなり進むと考えられる。

消化液の各種有機酸濃度は図 3.3.2 に示すが、揮発性有機酸濃度は 1999 年 6 月の 970mg/l と高い数値が一時的にあったが、それ以外は 500mg/l 以下であり、有機酸蓄積が生じていないことを示している。なお、1999 年 6 月には、発酵槽内部の揮発性有機酸濃度が高くなったため、おからの投入を 2 週間控えてメタン発酵槽の回復を図った。メタン発酵槽内の揮発性有機酸は、多くを酢酸が占めており、プロピオン酸濃度の最高値は 54mg/l であった。メタン発酵槽内の pH 値は、7.5~8.1 で安定している。1999 年 6 月に揮発性有機酸濃度が若干高くなった際にも、pH 値は 7.5~7.9 を示しており pH 値からは有機酸蓄積が確認できず、バイオガスの CO<sub>2</sub> 濃度上昇から有機酸蓄積を予想した。また、原水槽のアルカリ度は 4,800~7,000mg/l あり、消化液では 10,000~13,000mg/l まで増加している。消化液における揮発性有機酸/アルカリ度は 0.01 程度あり、揮発性有機酸濃度が 5,000mg/l の様に極端に高くない限り、アルカリ度不足によるメタン化活性の低下はないものと考えられる。海淵ら<sup>7)</sup>は、有機酸濃度とアルカリ度との比でもってコントロールすることが有効で、この値が 0.3~0.4 以上では管理上注意する必要がある、0.8 以上では pH 値が低下し、メタン発酵が阻害されるとしている。前述のことから、本センターではメタン発酵槽内の pH 値ならびにバイオガスの CO<sub>2</sub> 濃度（通常：35~40%）を指標に、メタン発酵槽内の有機酸蓄積を生じない様に運転管理している。

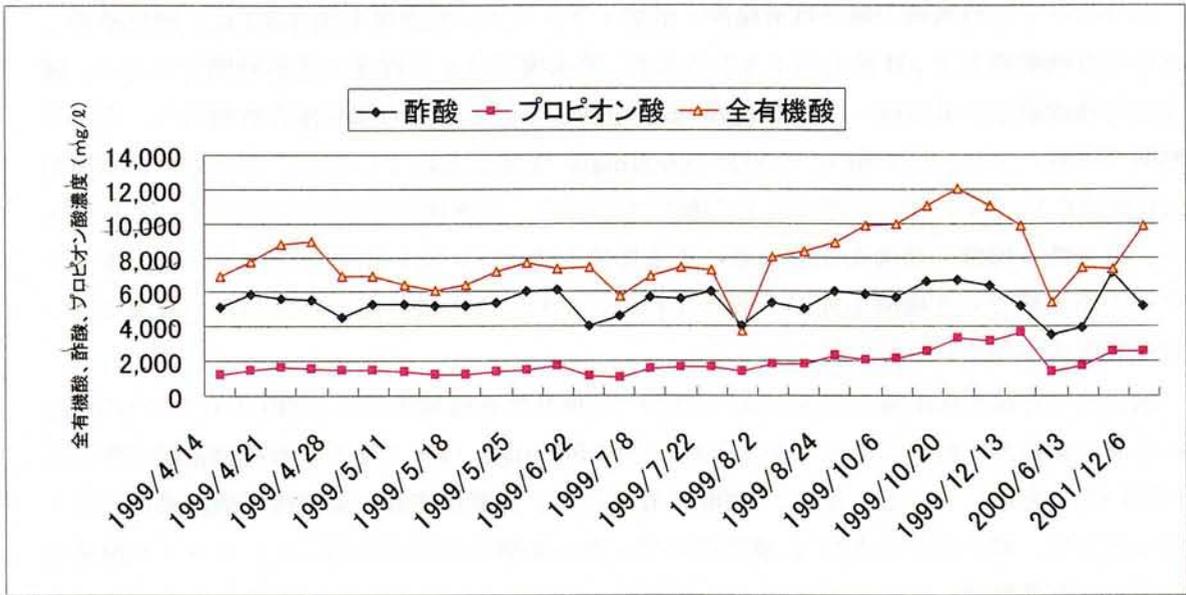


図 3.3.1 原水槽の各種有機酸濃度

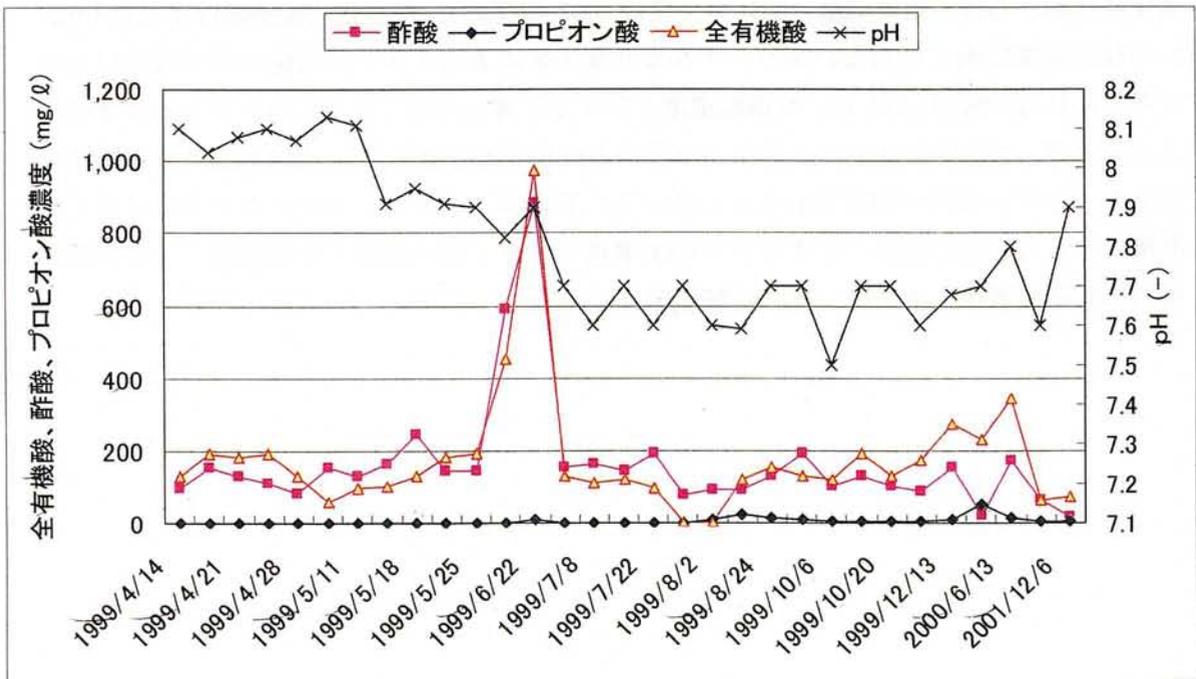


図 3.3.2 メタン発酵消化液の各種有機酸濃度と pH 値

### 3. 4 メタン発酵槽の加温と余剰熱

本メタン発酵槽は、バイオガスのみを燃料とするコージェネレーションを行い、回収した廃熱を使ってメタン発酵槽を加温している。バイオガス発電では、発電能力 70kW/台×2 台のガスエンジン式を使用している。設計値では、1日に 2,028m<sup>3</sup>のバイオガスが発生すれば、連続で 134kW の発電ができる。建設時から 2001 年 3 月末までは逆潮流無しの系統連系を組んでおり、発電量は場内需要電力量のみであった。しかし、逆潮流を起こさない様に一定の電力 (30kW 程度) を商用電力から購入しており、余剰のガスは燃焼装置で燃焼後に大気放散していた。このため、発電装置は常時 1 台が運転している状態で、発生したバイオガスの 60%程度しか発電に使用できないので、2001 年 3 月末に逆潮流ありの系統連系に切り替えた。その後はバイオガスのほぼ全量を発電に使用できるようになった。

バイオガス発電の 2000 年・2001 年における実績を図 3.4.1 に示すが、センターでの使用量と発電量、受電量ならびに発電でまかなえた率 (発電率) は、2001 年 1 月・8 月の発電装置の不調に伴う発電量の低下を除くと、逆潮流切り替え前で発電率約 60%に対して、逆潮流切り替え後には約 80%に増加した。本センターの使用電力量を設備毎に区分すると表 3.4.1 のように試算でされ、メタン設備と排水処理設備がその多くを占めている。

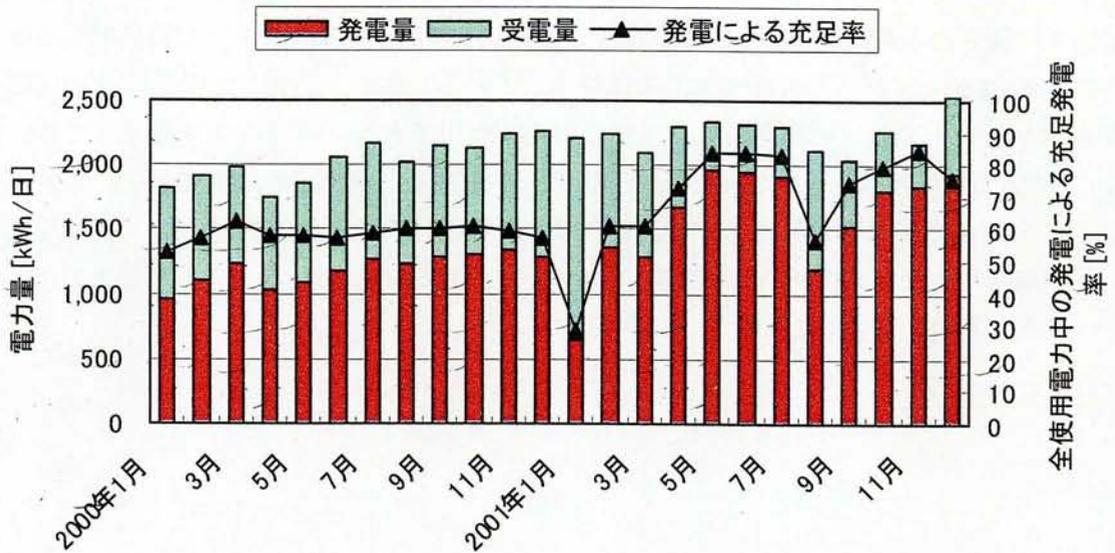


図 3.4.1 発電電力に占める場内使用電力の割合 (2001 年 1、2 月実績)

表 3.4.1 プロセス毎の使用電力量と比率

NO.	名 称	使用電力量 (k Wh/d)	使用電力量 の比率	備 考
1	前処理・メタン発酵設 備・脱水設備	922	40%	
2	排水処理設備	896	39%	
3	堆肥施設	403	18%	袋詰機稼働時間 3h/d
4	建築設備	68	3%	給排水衛生、照明、換気等
	合 計	2,289	100%	

本センターで稼働しているガスエンジン発電装置は、エンジン軸出力 100%で発電効率 29.2%、廃熱回収効率 52.9%であり、エンジン軸出力 75%では発電効率 27.8%、廃熱回収効率 57.7%である。この数値から、2000年と2001年の2年間の発電量より廃熱回収率を計算し、メタン発酵槽の加温に必要な熱量を試算した。試算結果は図 3.4.2 に示したが、逆潮流切り替え前では、発電量が少ないため冬期は廃熱回収熱量の多くを発酵槽の加温に使用することになる。この時期のヒートバランス例として、2001年2月13日～19日の7日間の平均値を表 3.4.2 に夏期と冬期の計画値と共に示すが、ガスエンジン発電装置で回収した熱量の 87%をメタン発酵槽の加温用に使用している。また、夏期には 60%程度の回収熱が余剰となり、メタン発酵槽の加温以外の用途に使用できる。逆潮流切り替え後には、夏期に 75%の余剰熱があり、冬期には 2001年1月の熱量を消化槽の加温熱量と仮定すると 43%の余剰熱量が出ると試算される。この様に、高濃度有機性廃棄物のメタン発酵処理では、逆潮流可能な方式であれば、冬期においても回収熱量の 40%以上の余剰熱量が出るので、暖房や給湯、温室等の加温などに利用することができる。

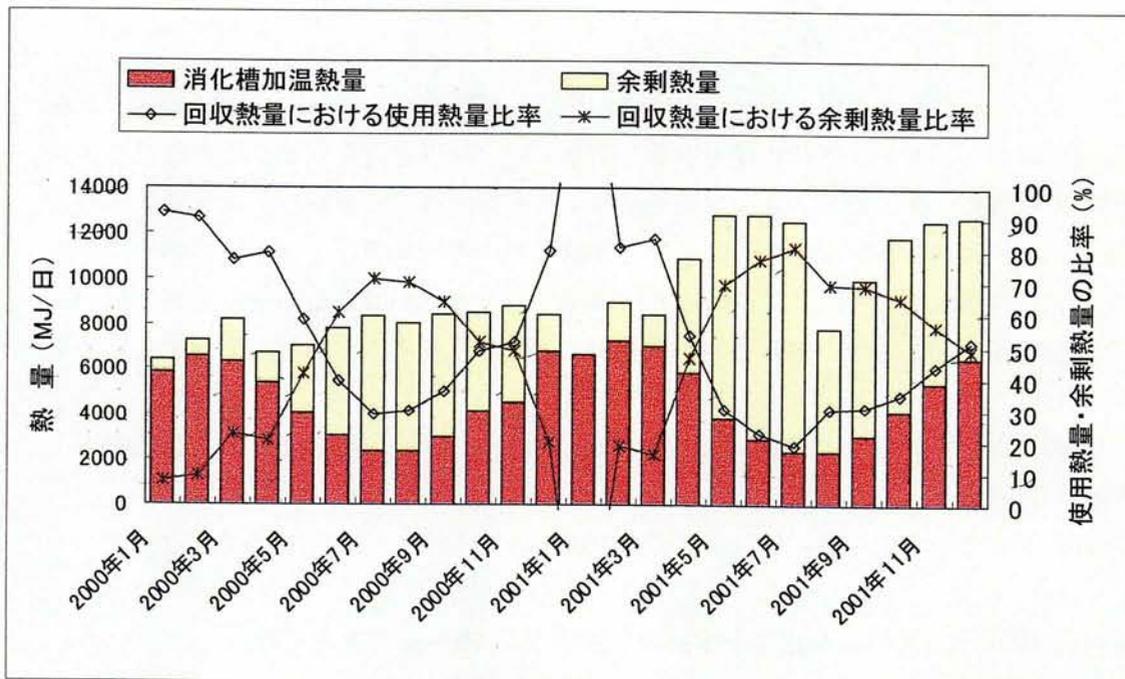


図 3.4.2 CGS からの回収熱量とメタン発酵槽加温熱量

表 3.4.2 中温メタン発酵のヒートバランスの試算値と実測値

季節	項目	バイオガス発生量	発電・廃熱量		使用熱量	
			発電量	廃熱回収熱量	消化槽の加温	余剰熱量
			Nm <sup>3</sup> /d	kWh/d	MJ/d	MJ/d
夏期	計画値	2,028	3,200	21,903	5,559	16,344
冬期	計画値	2,028	3,200	21,903	9,698	12,206
2001年2月13-19日	測定値	921	1,339	9,023	7,814	1,209

### 3. 5 結言

畜産ふん尿やおからなど食品残さの様な高濃度有機性廃棄物をメタン発酵処理する施設の運転実績から、メタン発酵処理を中心とするデータ解析を行なった。その結果、メタン発酵での有機物の除去効果、メタン発酵槽前後の有機酸濃度の挙動、メタン発酵槽の運転指標、バイオガスコージェネレーションと加温エネルギー比率など、下記のいくつかの有益な知見が得られた。特に、実用施設の中温発酵のメタン発酵施設の運転管理においては、有機酸蓄積を起こさない運転管理が重要で、下記の運転指標は日常の管理で必須の項目と考えられる。

①中温のメタン発酵で、VTS 容積負荷が  $1.6\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$  で運転した結果、VTS 除去率が 44.4%

得られたが、この除去率は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、T-C を指標にした場合でも同じような除去率になった。

しかし、BOD や  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  を指標とすると、除去率が 60~86% と高くなった。

②バイオガスの発生量は、ふん尿やおからの受入れ量当りで  $32.4\text{Nm}^3/\text{t}$  発生し、バイオガス中のメタン濃度は 52~60% であった。メタン濃度は、豚ふん尿や生ごみを原料とするメタン発酵に比べると低い濃度であった。

③メタン発酵槽内の有機酸濃度（揮発性有機酸、酢酸、プロピオン酸）の運転データから、有機酸蓄積状態や安定運転のできる有機酸濃度が把握できた。メタン発酵槽内では、酢酸濃度がプロピオン酸濃度に比べて高く、安定運転状態では酢酸濃度が  $200\text{mg}/\text{l}$  以下であった。なお、原水槽で揮発性有機酸濃度が  $10,000\text{mg}/\text{l}$  前後あり、原水槽内で既に

発酵が進んでいることが分かった。

④メタン発酵槽の日常の運転指標として、発酵槽の pH 値やバイオガスの炭酸ガス濃度を指標にすれば、有機酸蓄積等の傾向が読み取れる。

⑤バイオガス発電では、場内負荷のみの発電で回収した熱量は、冬期にはその 87% をメタン発酵の加温に使用するが、夏期にはその 40% 程度しか使用しない。発電を逆流可能な方式に切り替えると、この比率が冬期に回収熱量の 57% をメタン発酵の加温に使用すればよく、冬期でも余剰熱量が多いことが分かった。このため、バイオガス発電の余剰熱量をメタン発酵の加温以外に有効に利用することが求められる。

### 【第3章 参考文献】

- 1) 小川幸正・藤田正憲・中川悦光：ふん尿・食品残さのメタン発酵施設における運転データの解析、廃棄物学会論文誌、Vol.14、No.5、pp.258～267、2003
- 2) 大林組：大林組・BIMA システムカタログ他
- 3) 岩井重久 他：下廃水汚泥の処理、コロナ社、p.52、1976
- 4) 畜産環境整備機構：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き、(財)畜産環境整備機構、pp.20、37～39、2001
- 5) 東郷芳孝：固定床式高温メタン発酵と燃料電池の組合せによる生ごみのエネルギー資源化に関する研究、NEDO 平成 11 年度新規産業創造型提案公募事業報告会予稿集、pp.822～827、2,000
- 6) 石羽澤敏明：旭川市における消化ガス発電システムについて、下水道協会誌、Vol.38、No.462、p.28、2001.4
- 7) 海淵養之助・堤武：下水道終末処理場（汚泥編）、地人書館、p.48、1970

## 第4章 中温ならびに高温メタン発酵の運転比較

日本における畜産ふん尿や食品残渣のメタン発酵施設で、商用運転している施設数はまだ少なく、1998年4月以降運転している京都府内の「八木バイオエコロジーセンター」(以降本センター)は数少ない実例になっている。日本国内で畜産ふん尿や食品残渣等を対象にするメタン発酵施設が本格的に普及しないのは、メタン発酵の消化液を欧米の様に液肥として直接農地還元できる地域が北海道などに限られ、その他の地域では消化液の脱水・排水処理が必要になるため、建設費・運転費が高価になることが大きな理由になっている。本センターの中温発酵に関する運転実績とその解析を第3章で整理した<sup>1)</sup>が、その後本センターは地元の畜産飼育頭数の増加等から、受入れているふん尿や食品残渣の増加に対応するため、新たなメタン発酵槽などの増設工事が行われた。増設工事では、既設の受入・前処理設備を活用して、新たに一系統のメタン発酵ラインが新設されて、高温発酵のメタン発酵槽・ガスホルダー・消化液槽が建設された。また、本センターの運転費削減の一環として、新設の高温発酵の消化液を液肥として水田や畑で使用するため、消化液貯留槽を設置して、消化液の液肥利用促進を図った。高温発酵の消化液は、中温発酵に比べると衛生的に安全性が高く、種子の発芽率も抑えられる事から、高温発酵消化液を液肥に利用することとした。<sup>2)</sup><sup>3)</sup>なお、2基のメタン発酵槽の消化液は、既設と同様に脱水後に排水処理して放流するが、排水処理設備は水量増加と共に放流水の窒素やリンの追加規制へ対応するための性能アップも行っている。

本章では、本センターで2002年6月以降運転している2基の同じ構造のメタン発酵槽が、同一基質を原料とし、“既設の中温発酵(37℃)”と“新設の高温発酵(55℃)”の並列運転をしているので、この性能比較を行っている。メタン発酵の発酵温度は、その目的によって使い分けることになるが、本センターでは、新設時・増設時の目的に応じて、中温発酵・高温発酵を建設することになったので、両発酵における有機物や細菌等の除去性能、バイオガスの発生量や成分などを含めた性能比較をいった。また、本センターの排水処理・堆肥化の運転実績ならびにメタン発酵消化液を液肥利用する試験的使用の結果から、バイオガスプラントにおける中温発酵と高温発酵の評価を行い、方式選定のための提案を行った。

### 4.1 八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様

#### (1) 八木バイオエコロジーセンターの概要

京都府八木町にある本センターは1998年3月に完成し、乳牛と豚のふん尿及びおからを対象とする「メタン施設」ならびに肉牛のふん尿やメタン施設の脱水ケーキを対象とする「堆肥施設」がある。メタン施設の発酵槽では、運転管理が容易で加温エネルギー量も少ない中温発酵(37℃)を行っていた。本センター稼動後は、町内の畜産農家がふん尿処理の作業から解放されたこともあり、生産性向上のため乳牛や豚の飼育頭数の増加が見込まれ、2002年3月にメタン発酵槽等の増設工事が完了し、処理能力が増加した。また、増設後には計画受入量が乳牛ふん尿40.0t/日、豚ふん尿8.8t/日および管理排水等6.4t/日ならびにおからの受入れ量も既設の5t/日から10t/日へと

増加した。さらに廃牛乳を中心とした濃厚廃液の受入も開始し、一定量(2~3t/日)を排水処理設備の生物脱窒プロセスの栄養源とし、残りはメタン発酵に投入することにした。増設工事では、ガスホルダーやガスエンジン式発電装置も増設した。本センターの増設後の全体システムフローを図 4.1.1 に、また主要設備機器の仕様を表 4.1.1 に示す。

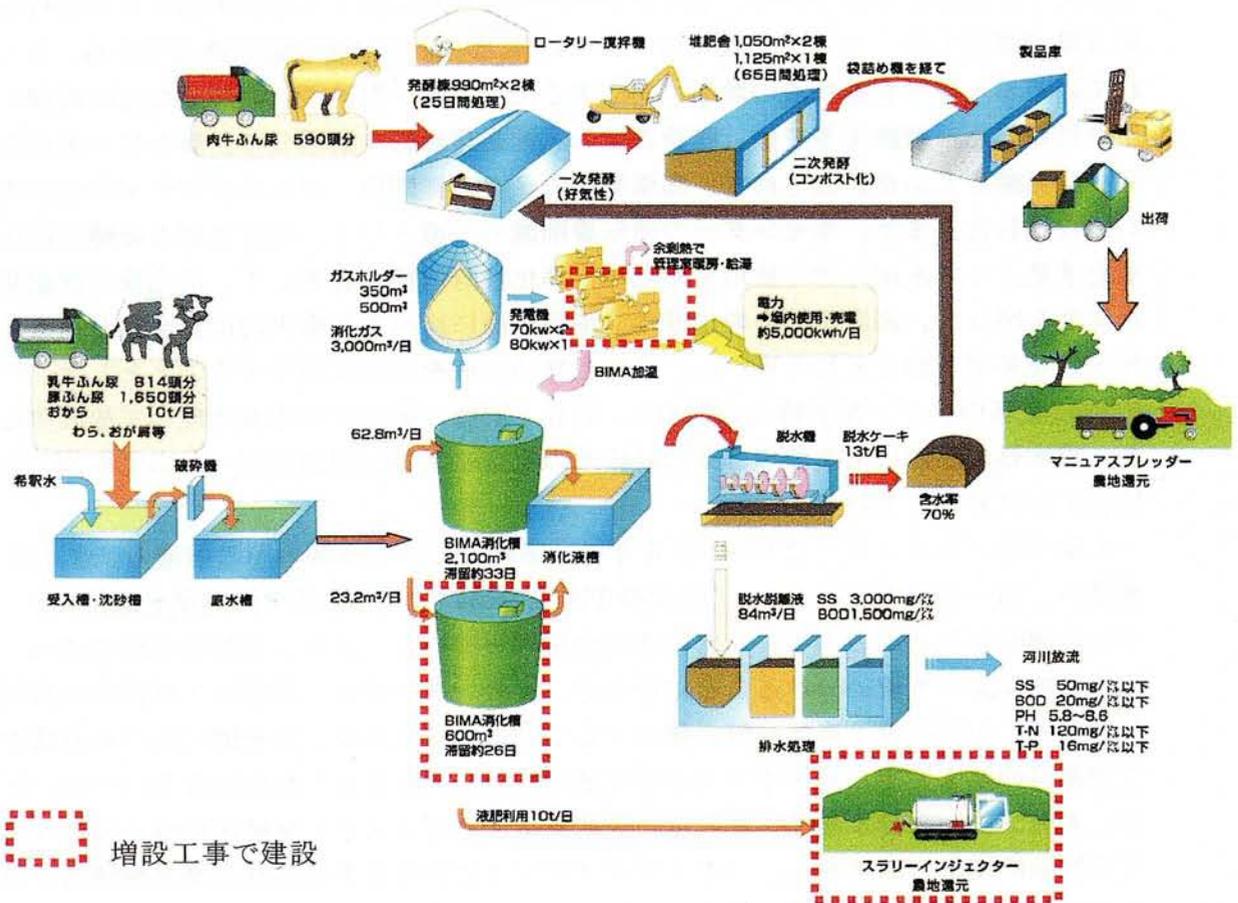


図 4.1.1 八木バイオエコロジーセンターの増設後のシステムフロー

表 4.1.1 主要設備の仕様

名 称		仕 様	
メタン 施設	原水槽	容量：150m <sup>3</sup> 、構造：RC製、水中ミキサー2台	
	メタン発酵槽  (BIMA消化 槽)	・ BIMA 1	中温発酵、容量：2,100m <sup>3</sup> 、処理量：62.8m <sup>3</sup> /日 構造：鉄筋コンクリート製
		・ BIMA2	高温発酵、容量：600m <sup>3</sup> 、処理量：23.2m <sup>3</sup> /日 構造：鉄筋コンクリート製
		・ 加温方式	BIMA躯体内に温水配管埋込み
	消化液槽	数量：2槽、容量：65m <sup>3</sup> ・60m <sup>3</sup> 、構造：RC製、縦型攪拌機各1台	
	消化液貯留槽	数量：1槽、容量：300m <sup>3</sup> 、構造：RC製、汲出・攪拌ポンプ1台	
	ガスホルダー	数量：2基、容量：350m <sup>3</sup> ・500m <sup>3</sup> 、 ガスバック材質：ポリエステル製（PVCコーティング）	
	発電装置	ガスエンジン式3台、70kW×2台、80kW×1台 燃料：バイオガス専焼式	
	排水処理	方式：生物脱窒・膜分離・凝集沈殿・オゾン処理・塩素消毒 処理量：84m <sup>3</sup> /日	
		放流水質：BOD20mg/ℓ,SS50mg/ℓ,T-N120mg/ℓ,T-P16mg/ℓ,pH5.8-8.6（目標値）色度：100度	
堆肥施設	発酵棟	ロータリー攪拌機、攪拌槽：4槽	
	堆肥舎	堆積式、発酵ブロー付	
管理建家	管理室	鉄骨造、部屋面積：42-m <sup>2</sup>	

## (2) メタン発酵施設

本センターのメタン発酵施設における受入れ・前処理ならびにメタン発酵槽周りのプロセスフローを図 4.1.2 に、また中温発酵と高温発酵のメタン発酵槽の仕様を表 4.1.2 に示す。

メタン施設へは日曜日を除く毎日、乳牛や豚のふん尿、おからならびに濃厚廃液等が搬入され、計量後に受入槽等に投入する。受入槽に投入されたふん尿は、破砕機や破砕ポンプでわら等の長物が破砕され、原水槽に送られる。原水槽では、スカム発生抑制とおから溶解ならびに性状の均一化を目的に水中ミキサーで攪拌を行っている。排水処理の生物汚泥も原水槽へ入る。原水槽からは1日8回に分けて原水槽のスラリーを2基のメタン発酵槽(商品名:BIMA 消化槽)へ投入している。BIMA 消化槽の特長は、発生したガスを利用して無動力攪拌ができることである<sup>4)</sup>。

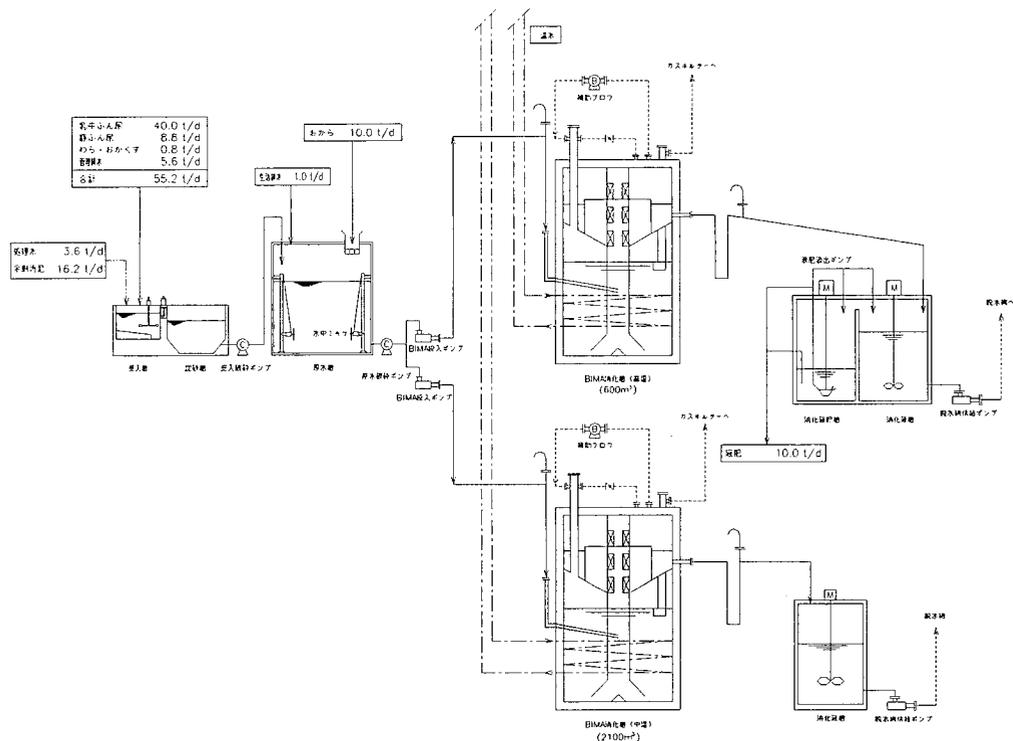


図 4.1.2 高温・中温メタン発酵プロセスのシステムフロー

表 4.1.2 高温・中温メタン発酵槽の仕様

項目		中温発酵槽	高温発酵槽
		1998年2月	2002年3月
水槽容量	m <sup>3</sup>	2,100	600
形状	m	内径14m、高さ17.7m	内径9.0m、高さ12.65m
構造		鉄筋コンクリート	同 左
運転温度		37℃	55℃
設計処理量	m <sup>3</sup> /日	62.8	23.2
設計滞留時間	日	33	26
設計VTS負荷	kg/m <sup>3</sup> /d	2.4	2.9
投入・攪拌回数	回/日	6 ~ 8	
攪拌方式		水頭差利用無動力攪拌方式	
加温方式		壁・底盤に温水コイル埋め込み式	
外断熱材		スタイロフォーム貼付け	壁：発泡ウレタン 200mm
		壁：厚さ100mm	屋上・底盤：スタイロフォーム厚さ100mm
		屋上・底盤：厚さ50mm	

2 基の BIMA 消化槽は並列運転しており、37℃の中温発酵槽（新設時建設：容量 2100m<sup>3</sup>）と 55℃の高温発酵槽（増設時建設：容量 600m<sup>3</sup>）である。2 基の消化槽の設計値は、中温発酵の有機物容積負荷が 2.4kgVTS/m<sup>3</sup>/日で滞留日数が 33 日であり、高温発酵はそれぞれ 2.9kgVTS/m<sup>3</sup>/日と 26 日である。高温発酵は、中温発酵に比べて有機物容積負荷を高く取れ発酵槽の容量を小さくできるメリットがあるが、その反面発酵槽の運転温度範囲が狭いことや加温エネルギーが多量に必要である等のデメリットもあるため、新設時の中温発酵槽は増設後も運転の容易な中温発酵で運転している。メタン発酵槽の加温は、コンクリート水槽躯体に埋込んである樹脂製パイプに温水を送水して加温するので水槽内を比較的均一温度に加温できる。このため、投入スラリーや発酵液の一部を直接外部加温するための熱交換器は設けていない。

2 基の発酵槽で発生したバイオガスはガスホルダーに一時貯留し、ブロワーで加圧後、乾式脱硫塔に送り硫化水素を除去した後に 3 台のガスエンジン式発電装置（70kW×2 台、80kW×1 台）の燃料として使用される。発電した電気は、本センター内ならびに隣接する下水処理場（2002 年 4 月供用開始）で使用し、さらに余剰電力は電力会社へ売電している。発電装置から回収した温水は、2 基の発酵槽の加温、管理室の給湯や暖房に使用している。

メタン発酵された消化液は、スクリュープレス式脱水機で固形分が分離される。分離液は排水処理設備へ送られ、有機物、窒素、リン等が生物脱窒・膜分離・凝集沈殿・オゾン処理・塩素消毒による処理後に河川へ放流される。高温発酵槽からの消化液の一部 10t/日程度は液肥利用するために、液肥貯留槽に貯められ水稻や野菜などの液肥として利用できる設備になっている。

### （3）測定項目と分析方法

液状成分の分析項目として、pH はガラス電極 pH メータ、TS、VTS、COD<sub>Cr</sub>、揮発性有機酸、T-N、NH<sub>3</sub>-N、アルカリ度、T-P、T-S、大腸菌群、ふん便性大腸菌は、下水道試験法に準拠して測定した。各種有機酸濃度は、酢酸・プロピオン酸・ギ酸は食品分析法に準拠して高速液体クロマトグラフ法、酪酸・吉草酸は下水道試験法に準拠してガスクロマトグラフ法により測定した。バイオガス成分の CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S は、JISK2301、JISK0108 により測定した。

## 4. 2 有機物除去性能

### （1）高温メタン発酵槽の立上げ運転

高温メタン発酵槽の立上げのため、2002 年 4 月より種汚泥として隣接する中温発酵槽（37℃で運転）の消化液ならびに発酵槽内汚泥を高温発酵槽に投入した。種汚泥の量は、高温発酵槽の全容量である 600 m<sup>3</sup>とした。高温発酵槽の加温は、一度に高温発酵の運転温度 55℃まで上げて、投入する有機物容積負荷を徐々に上げながら、中温発酵菌を高温発酵に徐々に馴養する方法を採用した。中温発酵菌から高温発酵菌への馴養方法は、2 段階の温度上昇（例：37→45℃、45℃→55℃）をさせる方法もあるが、文献<sup>5)</sup>等から一度に高温発酵の運転温度まで上げた方が立上げ期間が短いと判断し、一段階の温度上昇で立ち上げた。種汚泥の投入を完了した 4 月 16 日に液温が 33℃で

あったが、水槽躯体に埋設した温水配管による加温で、液温を約 1℃/日ずつ上げていった。5月11日には予定した液温 55℃になったので、その後は液温を 55～55.5℃に保持した。

原水の高温発酵槽への投入量は、最初は 5t/日から始めた。高温発酵槽の原水投入量の推移を図 4.2.1 に、高温発酵槽からのバイオガスにおける CH<sub>4</sub>・CO<sub>2</sub> 濃度の推移を図 4.2.2 に示した。高温発酵槽の液温を上げながら、4月20日から 5t/日の投入を開始したが、55℃までの昇温過程でバイオガス発生量ならびにメタン濃度の低下が観察されたので、投入量を 2t/日まで下げた。さらに、投入 TS 濃度が 6%程度にもかかわらず、高温発酵槽内の TS 濃度が 10%以上にまで上昇しメタン濃度も 30%以下まで低下したため、5月21日より投入を 2週間程度停止し、高温菌の馴養を図った。その後、

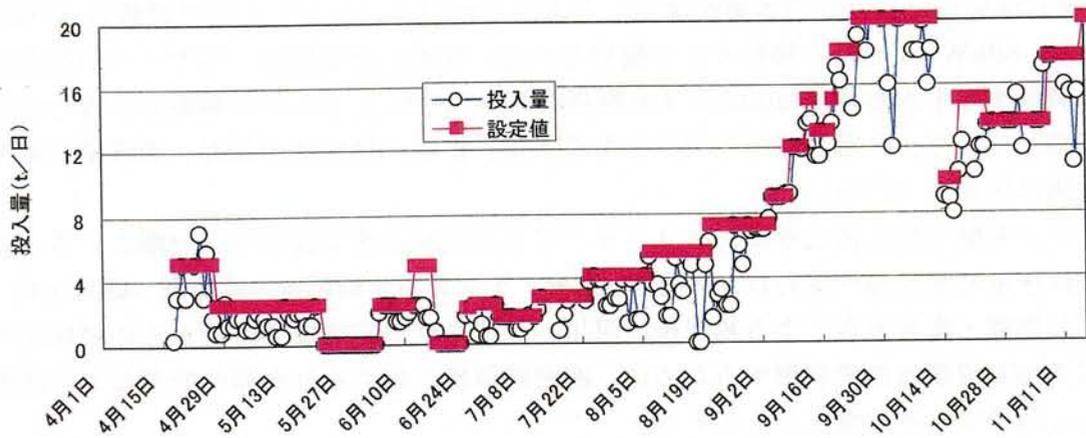


図 4.2.1 高温発酵立上げ運転時の有機物容積負荷の推移 (2002年4月～9月)

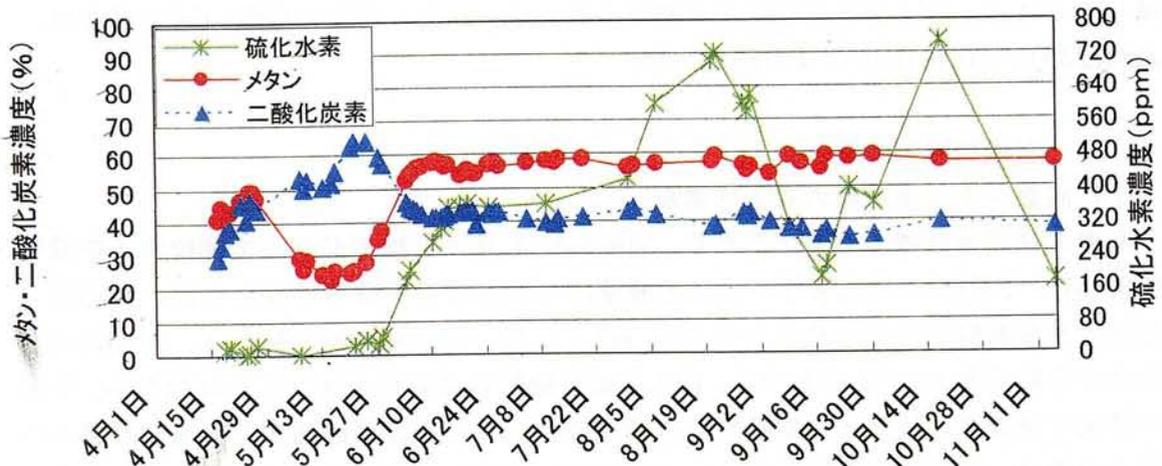


図 4.2.2 高温発酵立上げ運転時のバイオガス濃度の推移 (2002年4月～9月)

メタン濃度の回復と槽内の TS 濃度の低下を確認し、6 月 4 日より投入を再開し、2 週間毎に投入量を 20%程度増加した。同年の 9 月 24 日には、投入量を 20t/日にまで上げて、バイオガスの CH<sub>4</sub>濃度も安定して 50%以上を確保でき、馴養が完了した。なお、馴養期間中の 7,8 月は、投入量の設定値と実際の投入量では違いがあり、実投入量が少なくなっている。この理由は、中温と高温の 2 基の発酵槽が同時に運転しているため、原水槽の水位に応じた投入量のこまめな対応が出来なかったためである。高温発酵槽の立上げ期間は、上述の様に結果として 4~9 月までの約 6 ヶ月かかったが、これは有機酸蓄積を起こさないための安全をみた馴養を行ったためである。

## (2) メタン受入量と性状

本メタン施設で受入れている乳牛と豚のふん尿ならびにおからの量を 2002 年 9 月~2004 年 2 月の月別日平均値として図 4.2.3 に示す。この間の 1 日平均受入量は 62.4t/日で、内訳は豚ふん尿が 3.6~6.2 t (平均 4.7 t/日)、乳牛ふん尿が 45.2~60.9 t/日(平均 52.2 t/日)、おからが 2.1~5.7 t/日(平均 3.5 t/日)、濃厚廃液が 0~6.7 (平均 2.0t/日) である。乳牛や濃厚廃液の受入れ量が月によって変動しているが、豚ふん尿やおからは変動が少ない。週間変動をみると、月曜日は本センターが休業している日曜日のふん尿を合わせて受入れるため、受入れ量が多くなっている。また、水・木曜日は逆に受入れ量が少ない傾向がある。この受入れ量の変動は原水槽で調整し、メタン発酵槽への 1 日投入量を平均化している。

原水槽では、排水処理の生物汚泥、車両の洗浄排水、生活排水(約 0.3m<sup>3</sup>/日)の約 20t/日が流入し、受入れたふん尿等と水中ミキサーでよく混合される。原水槽におけるスラリーの性状を表 4.2.1 に示すが、TS 濃度が平均で 66,250mg/l とふん尿が中心のスラリーとしてはやや低濃度である。この理由は、乳牛のふん尿の約半分は牛舎で固液の分離をして液分をメタン施設へ搬入していることと、SS 濃度が約 10,000mg/l の生物汚泥等が原水槽へ混入しているためである。原水槽では 2 日程度の滞留容量があり、

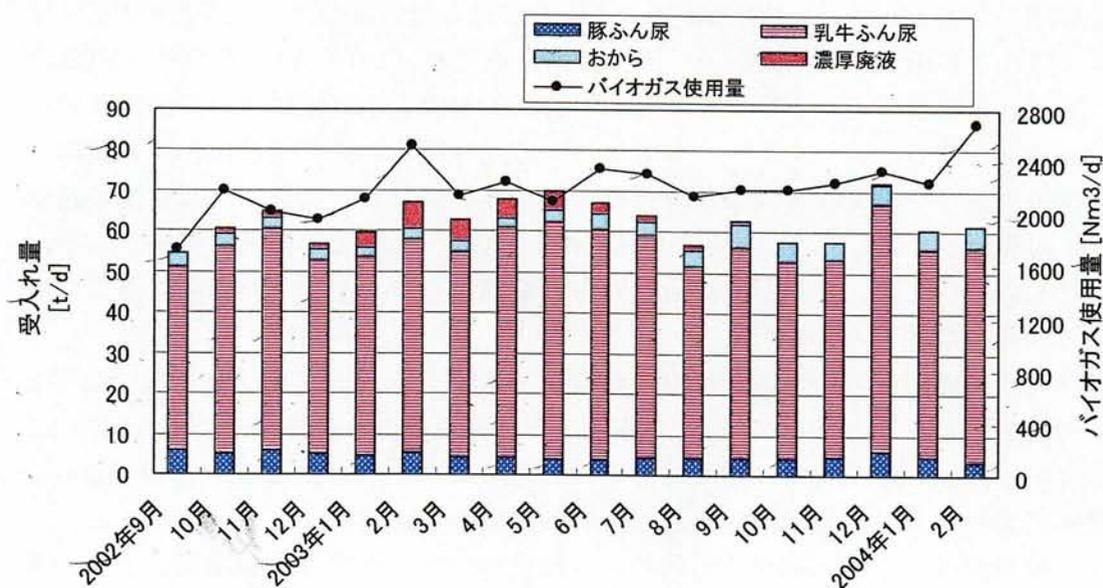


図 4.2.3 ふん尿・おから等の受入れ量とバイオガス使用量

また牛舎におけるふん尿貯留設備での滞留により、原水槽の中で既に揮発性有機酸濃度が 8,520mg/l と高濃度になっている。

### (3) メタン発酵の有機物容積負荷

本センターのメタン発酵槽における有機物容積負荷の 2004 年 1 月 22～28 日の実績値は、平均値として中温発酵が VTS 負荷で 2.2kg/m<sup>3</sup>/日、COD<sub>Cr</sub> 負荷で 3.2kg/m<sup>3</sup>/日(投入量:86.8m<sup>3</sup>/日)であり、高温発酵が VTS 負荷で 2.2kg/m<sup>3</sup>/日、COD<sub>Cr</sub> 負荷で 3.2kg/m<sup>3</sup>/日(投入量:24.6m<sup>3</sup>/日)であった。メタン発酵槽の有機物容積負荷の設計値は、表 4.1.2 の様に中温・高温発酵はそれぞれ 2.4、2.9kg/m<sup>3</sup>/日であるが、原水槽スラリーの TS 濃度がやや低いいため、投入液量は設計値以上であるが、有機物容積負荷は設計値を若干下回る値になっている。特に、高温発酵の有機物容積負荷が設計値に比べて低いが、この理由は本センターではメタン発酵槽の投入量調整を温度管理の容易な中温発酵槽で行っているためである。畜産ふん尿を主体にしたメタン発酵槽の実績では、国内の運転実績値<sup>9)</sup>からみると、中温発酵は平均的な負荷である。高温発酵は、国内のふん尿処理の実績が少なく比較が難しいが、ふん尿以外の食品残渣等の混合系では本センターの 2 倍近い負荷をかけている。このため、本センターの高温発酵の有機物容積負荷は、他の施設と比較すると低負荷になっているが、今後高温発酵槽の負荷を順次増加して、設計値程度を確保できるようにする予定である。

### (4) 有機物の除去効果

中温発酵ならびに高温発酵の消化液の平均的な性状は表 4.2.1 に載せたが、このうちで VTS と COD<sub>Cr</sub> の原水槽・各発酵後の消化液の濃度変化を図 4.2.4 と図 4.2.5 に示す。各発酵消化液の VTS 濃度の平均値(除去率)は、中温発酵が 32,880mg/l (40%)、高温発酵が 34,250mg/l (37%)で中温発酵の除去効果が若干高くなっている。COD<sub>Cr</sub> 濃度の平均値(除去率)で比較すると、中温発酵が 34,250mg/l (53%)、高温発酵が 35,250mg/l (51%)と VTS と同様な傾向になっている。しかし、高温発酵の COD<sub>Cr</sub> 除去率は、2003 年 5 月以降は中温発酵より除去率がやや高くなり 60%近くを示している。前述した 2004 年 1 月 22～28 日の有機物容積負荷時には、中温発酵の VTS 除去率は 46%、COD<sub>Cr</sub> 除去率は 48%、高温発酵それぞれ 42%と 59%であり、VTS を指標にすると中温発酵の除去率が若干高いが、COD<sub>Cr</sub> 除去率は逆に高温発酵が高い結果となった。これらのデータから、本センターでは有機物の除去性能は、高温発酵立上げ後半年程度は中温発酵と高温発酵では大きな違いがなかったが、高温発酵の運転開始後 1 年程度が経過した 2003 年 6 月以降から COD<sub>Cr</sub> の除去率は高温発酵が若干高くなったものといえる。今後、高温発酵の有機物容積負荷を増加しながら、さらに除去効果の確認を継続する必要がある。

メタン発酵の運転においては、槽内の有機酸蓄積によるメタン生成の障害にならない様に細心の注意を払う必要がある。2 基のメタン発酵槽の各種有機酸濃度を表 4.2.2 に示したが、酢酸の平均値では中温発酵が 15mg/l に対して、高温発酵では 350mg/l となっており、高温発酵槽内に残留している酢酸が中温発酵より高濃度である。プロピオン酸濃度は、中温・高温とも同じような数値であった。ギ酸、酪酸、吉草酸濃度は、原水槽では検出されたものの、中温・高温発酵槽では検出限界以下であった。中温発酵と高温発酵では、発酵に関与する微生物に違いがあることもあり、有機酸濃

度の違いがその結果を表していることになる。本センターの中温発酵の運転結果をまとめた先行研究<sup>4)</sup>でも酢酸濃度が常時 200mg/l 程度以下になっており、中温発酵槽では酢酸資化性メタン生成菌の活性が良好であることを示している。また、酢酸やプロピオン酸の濃度からは、メタン発酵槽の運転障害を起こす様な濃度、例えばプロピオン酸 3,000mg/l 以上にはなっていないことが分かる<sup>5)</sup>。

表 4.2.1 メタン発酵の原水と処理水性状 (データ: 2002 年 9 月~2004 年 1 月)

項目		原水	中温発酵 流出液	高温発酵 流出液
pH	-	6.5	7.9	8.1
		(6.2~6.8)	(7.6~8.2)	(7.8~8.5)
TS	mg/l	66,250	44,250	46,880
		(62,000~71,000)	(41,000~46,000)	(40,000~60,000)
VTS	mg/l	54,880	32,880	34,250
		(49,000~62,000)	(30,000~34,000)	(29,000~46,000)
COD <sub>Cr</sub>	mg/l	72,500	34,250	35,250
		(62,000~89,000)	(29,000~42,000)	(30,000~47,000)
揮発性有機酸	mg/l	8,520	50	353
		(7,000~9,700)	(18~76)	(79~590)
T-N	mg/l	3,050	3,040	3,160
		(2,600~3,600)	(2,500~3,400)	(2,800~3,500)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg/l	1,330	1,840	2,090
		(1,000~1,600)	(1,700~2,000)	(1,900~2,300)
アルカリ度	mg/l	6,280	12,120	12,630
		(4,800~9,000)	(8,700~17,000)	(9,800~16,000)
T-P	mg/l	515	490	510
		(430~640)	(400~580)	(430~590)
T-S	mg/l	404	378	448
		(330~610)	(360~420)	(400~550)
大腸菌群数	CFU/mL	722,500	5,300	248
		(330,000~1,300,000)	(2,300~9,800)	(0~900)
糞便性大腸菌	CFU/mL	439,200	1,332	28
		(26,000~1,600,000)	(400~2,500)	(<10~110)

(注) 上段は平均値を示し、下段は最低値~最高値を示す。

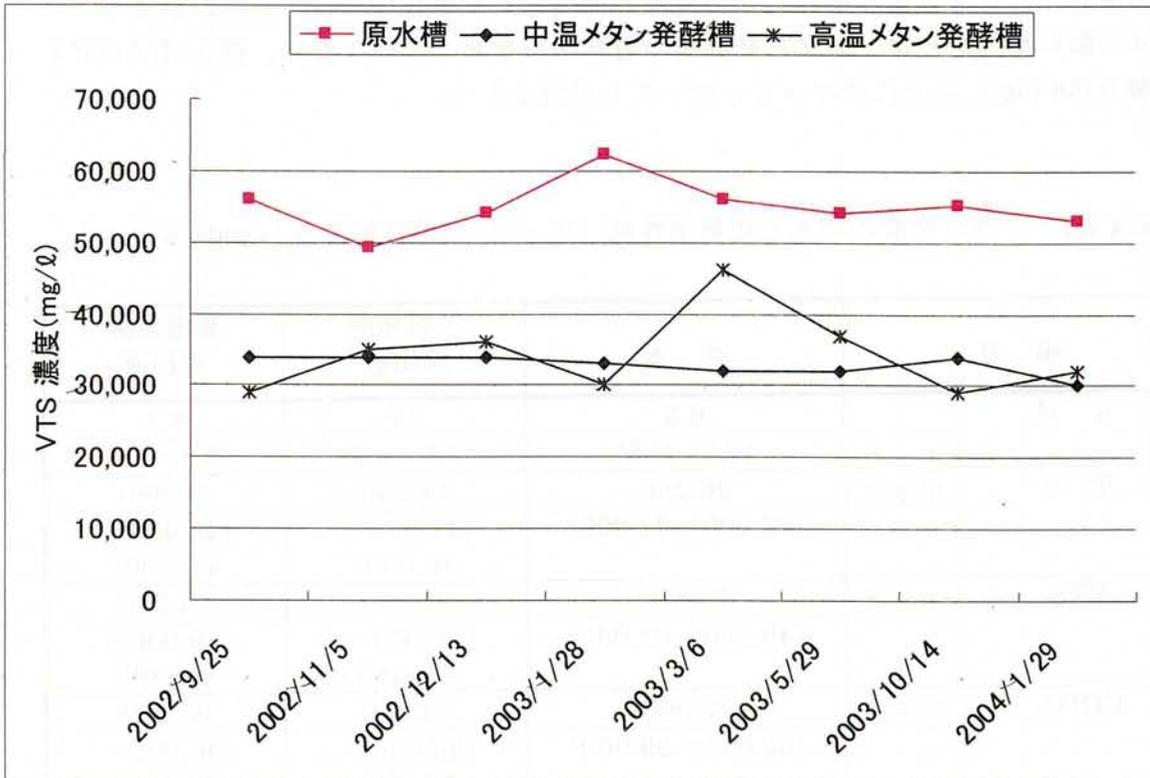


図 4.2.4 中温発酵と高温発酵の VTS 除去性能の比較

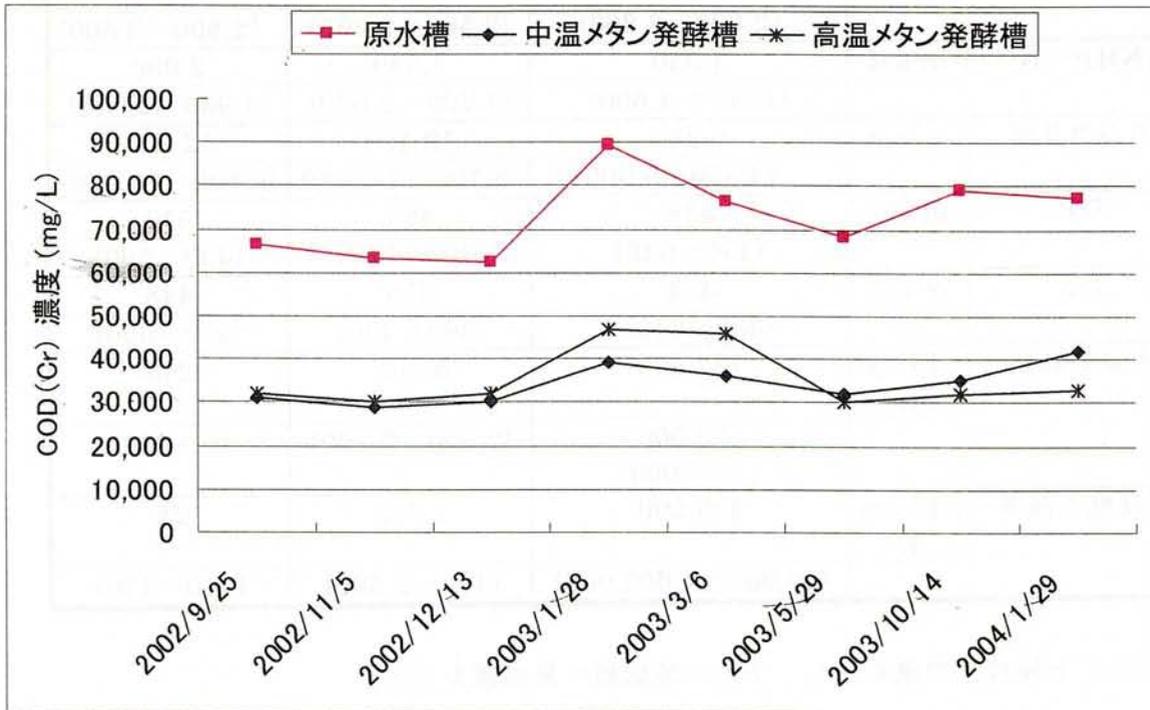


図 4.2.5 中温発酵と高温発酵の COD<sub>Cr</sub> 除去性能の比較

表 4.2.2 中温発酵と高温発酵の有機酸濃度比較

項 目		流 入	消化液	
		原水槽	中温発酵槽	高温発酵槽
採 取 日		2002.9~2004.3		
酢 酸	mg/L	5,375	14.9	350
プロピオン酸	mg/L	2,050	250	260
ギ酸	mg/L	< 5	< 5	< 5
イソ酪酸	mg/L	85	<10	<10
ノルマル酪酸	mg/L	530	<10	<10
イソ吉草酸	mg/L	73	<10	<10
ノルマル吉草酸	mg/L	98	<10	<10

#### 4. 3 微生物・塩類等の除去効果

##### (1) 微生物の除去効果

原水槽、中温・高温発酵槽の消化液の大腸菌群数、糞便性大腸菌の測定結果を表 4.2.1 に示したが、高温発酵による除去効果の高さが顕著であることが分かった。大腸菌群数は、中温発酵での除去率が 99.27%であったのに対して、高温発酵は 99.97%となった。また、糞便性大腸菌数は、中温発酵の除去率が 99.70%であったのに対して、高温発酵では 99.993%と確実に処理性能が高かったといえる。これらの除去効果は、これまでの報告と比べても、似た数値が得られている。すなわち、消化液の液肥利用を行う場合には衛生的な面から高温発酵の消化液がより安全であることが分かる。前記以外に、サルモネラ菌や黄色ブドウ球菌の調査も行ったが、原水槽において定量限界以下になっており、除去効果を期待できなかった。下水汚泥の嫌気消化汚泥における北村ら<sup>8)</sup>の研究では、クリプトスポリジウムのオーシストの生存率の減少に最も効果があったのは 55℃の高温発酵であり、生存率 0%となったとしている。これらの知見ともあわせて、高温発酵における消毒効果は非常に高いことを確認できたものといえる。

##### (2) 塩類等の除去性能

中温発酵と高温発酵による T-N、NH<sub>3</sub>-N、T-P、T-S(硫黄)の除去性能比較を表 4.2.1 に示した。T-N 濃度は、原水槽と中温・高温の両発酵液では変化がなく、メタン発酵での除去が行われていないことがわかる。NH<sub>3</sub>-N 濃度は、中温発酵消化液で原水槽の

1.38 倍に、高温発酵消化液では同 1.57 倍に増加している。これは、原水槽スラリー中の有機性窒素等が分解されて  $\text{NH}_3\text{-N}$  が生成されたことによるものであり、高温発酵の方が 20%程度生成量が多い。それでも高温発酵消化液の  $\text{NH}_3\text{-N}$  濃度は、平均で 2,090mg/l、最高でも 2,300mg/l であることから、発酵槽内の  $\text{NH}_3\text{-N}$  濃度が安定運転できる 2,500~3,000mg/l 以内になっており<sup>9)</sup>、 $\text{NH}_3\text{-N}$  による障害を起こす濃度に至っていないと考えられる。今後、おからや濃厚廃液の受入れ量が増加した場合には、高温発酵の  $\text{NH}_3\text{-N}$  濃度を確認しながら運転することが必要になる。T-P 濃度は、原水槽や両メタン発酵消化液で変化はほとんどなかった。T-S 濃度は、バイオガスにおける  $\text{H}_2\text{S}$  濃度を低く抑える目的で原水槽に塩化第二鉄を少量添加しているため、表 4.2.1 に前掲している。T-S 濃度は、中温発酵、高温発酵の各消化液で 10%程度の増減があるが、発酵槽内で変化があったとは考えられず、原水槽スラリーとほぼ同一濃度とみなされる。

牛ふんには飼料中に含まれる雑草種子が入っているので、これを原料とするコンポストや液肥に残った種子が発芽すると農作物への悪影響が出る。雑草種子の発芽率の抑制効果については、堆肥発酵の文献で、「メヒシバ、ノビエ、カヤツリグサ、オオイヌタデ、イヌエビ」の種子は、55℃未満の堆肥発酵では 8~96%の発芽率であるが、60℃2 日間ではいずれも発芽率が 0%になっている<sup>10)</sup>。このことから、本センターの高温発酵槽では、55℃で 20 日以上メタン発酵をしているので、雑草種子の発芽率はほとんど抑制できているものと考えられる。

#### 4. 4 バイオガスの発生量と成分の比較

##### (1) バイオガス発生量の比較

BIMA 消化槽から発生し発電等に使用されているバイオガス量は、図 4.2.3 に示す 2002 年 9 月~2004 年 2 月における 2 槽の発酵槽合計で平均値 2,203Nm<sup>3</sup>/日（最小 1,721~最大 2,700Nm<sup>3</sup>/日）である。発生したバイオガスはほとんどが発電に使用されているが、一部のバイオガスは発電に使用されずにガスホルダーの安全装置から放出されていた。そこで正確なバイオガス発生量を計測できた 2003 年 10 月 7~13 日の実績値は表 4.2.3 で示す様に、中温発酵が平均で 1,910Nm<sup>3</sup>/日、高温発酵が 600Nm<sup>3</sup>/日であった。このガス発生量に基づきメタン発酵槽投入物当りのバイオガス発生量は、中温発酵が 26.3Nm<sup>3</sup>/t であり、高温発酵が 31.4Nm<sup>3</sup>/t で、高温発酵の方が中温発酵より約 19%バイオガス発生量が多い。この間のバイオガス発生量は、VTS を指標にすると中温発酵で投入 VTS 当り 0.48Nm<sup>3</sup>/VTS·kg、除去 VTS 当りでは 1.21Nm<sup>3</sup>/除去 VTS·kg であった。また、高温発酵では、投入 VTS 当りのガス発生量は 0.57Nm<sup>3</sup>/VTS·kg であり、除去 VTS 当りでは 1.18Nm<sup>3</sup>/除去 VTS·kg となった。COD<sub>Cr</sub> を指標にすれば、中温発酵では 0.33Nm<sup>3</sup>/COD<sub>Cr</sub>·kg と 0.59Nm<sup>3</sup>/除去 COD<sub>Cr</sub>·kg となり、高温発酵では 0.40Nm<sup>3</sup>/COD<sub>Cr</sub>·kg と 0.66Nm<sup>3</sup>/除去 COD<sub>Cr</sub>·kg になった。表 4.2.3 には、バイオガスのみでなくメタンの発生量も掲載しているが、畜産環境整備機構<sup>6)</sup>が報告した乳牛ふん尿からの生成量 0.485CH<sub>4</sub>Nm<sup>3</sup>/除去 VTS·kg よりも多く、豚ふん尿からの生成量 0.695CH<sub>4</sub>Nm<sup>3</sup>/除去 VTS·kg に近い値になっている。これは、本センターでは、乳牛ふん尿以外に豚ふん尿やおから等が入っていることによると考えられ

る。また、Hashimoto et al<sup>11)</sup> も、肉牛ふん尿のメタン発酵実験で約 0.5CH<sub>4</sub>Nm<sup>3</sup>/除去 VTS·kg という値を得ており、類似した結果といえる。中温発酵と高温発酵の比較では、発酵槽の投入物当りや COD<sub>Cr</sub> 当りのガス発生量は高温発酵が 12～19%多い結果となった。藤田<sup>12)</sup> は、2kg-VTS/m<sup>3</sup>/day 程度の低負荷では、高温発酵と中温発酵ではバイオガス発生量にあまり差がないことを示しており、本実績でもそれに近いデータであったといえる。

表 4.2.3 中温発酵・高温発酵からのバイオガス・メタンの発生量比較

項 目		運転データ (2003年10月7～13日)		
		中温発酵	高温発酵	高温/中温
投入量	t/day	72.7	19.1	
有機物容積負荷	kg/m <sup>3</sup> /day	1.9	1.8	
VTS 負荷	kg/day	3,996	1,053	
COD <sub>Cr</sub> 負荷	kg/day	5,740	1,512	
バイオガス発生量	Nm <sup>3</sup> /day	1,910	600	
バイオガス/VTS	Nm <sup>3</sup> /VTS·kg	0.48	0.57	1.19
バイオガス/除去VTS	Nm <sup>3</sup> /除去VTS·kg	1.21	1.18	0.97
バイオガス/COD <sub>Cr</sub>	Nm <sup>3</sup> /COD <sub>Cr</sub> ·kg	0.33	0.40	1.19
バイオガス/除去COD <sub>Cr</sub>	Nm <sup>3</sup> /除去COD <sub>Cr</sub> ·kg	0.59	0.66	1.12
メタン発生量		(メタン濃度、55.4%)		
メタン/VTS	kg/VTS·kg	189	225	1.19
メタン/除去VTS	kg/除去VTS·kg	479	467	0.97
同 上	Nm <sup>3</sup> /除去VTS·kg	0.671	0.654	0.97
メタン/COD <sub>Cr</sub>	kg/COD <sub>Cr</sub> ·kg	132	157	1.19
メタン/除去 COD <sub>Cr</sub>	kg/除去COD <sub>Cr</sub> ·kg	232	260	1.12

## (2) バイオガスの成分比較

本センターにおけるバイオガスの主な成分を図 4.2.6 に示した。メタンや炭酸ガス濃度は、2003年10月14日の分析値を除いて、中温発酵・高温発酵でほぼ同様の値であった。また、H<sub>2</sub>S濃度は、2002年12月13日と2003年1月28日を除けばほぼ同様の濃度であった。H<sub>2</sub>S濃度に差があった2002年12月～2003年1月は、原水槽へH<sub>2</sub>S発生抑制のために塩化第二鉄を断続的に添加していたが、中温発酵と高温発酵で滞留時間の違いがあるため、H<sub>2</sub>S濃度に差が出たと考えられる。なお、塩化第二鉄を添加している2槽の発酵槽内の鉄濃度は270～420mg/lであるが、梅染ら<sup>13)</sup>がメタン発酵に顕著な阻害的な影響を与える濃度を800mg/lとしていることから、塩化第二鉄による悪影響はなかったものと考えられる。

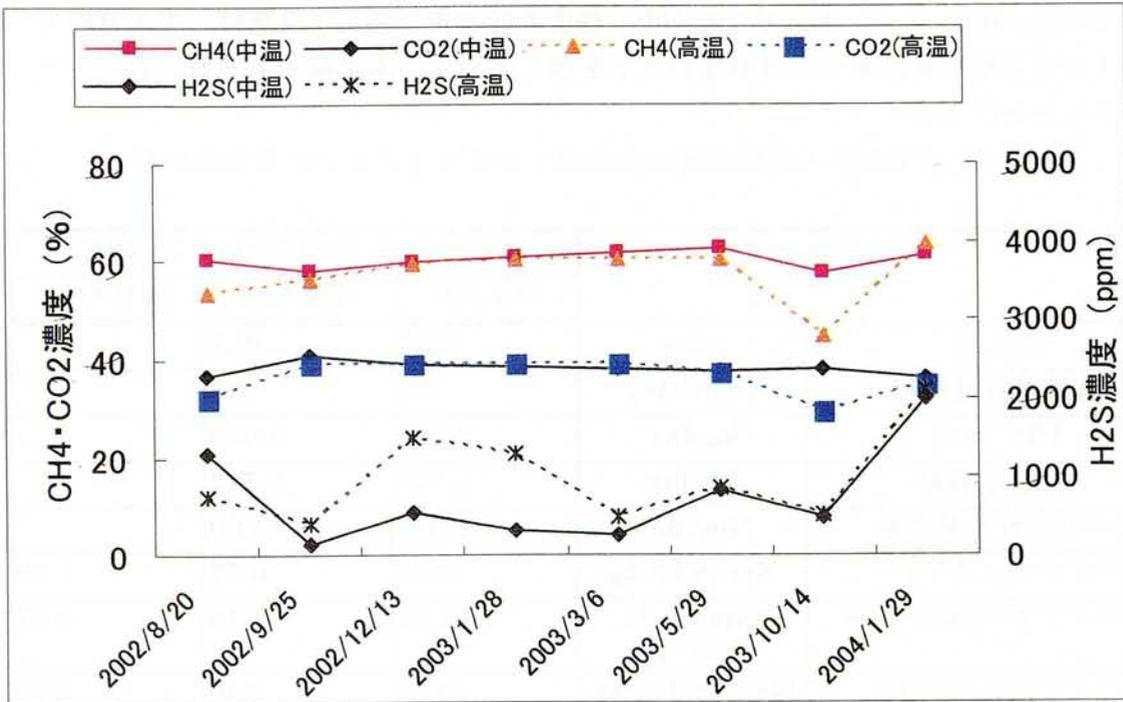


図 4.2.6 中温発酵と高温発酵のバイオガス濃度比較

#### 4. 5 脱水・排水処理設備

##### (1) 脱水・排水処理設備の概要

中温発酵と高温発酵の2基のメタン発酵槽で消化された液は、消化液槽を經由して脱水設備で脱水される。脱水ろ液は、排水処理設備に入り生物脱窒処理や凝集沈殿処理、オゾン処理をした後、塩素消毒して河川に放流している。脱水ケーキは、堆肥施設でここに持ち込まれる肉牛や肥育乳牛のふん尿と混ぜて、堆肥化する。排水処理設備では、放流水の水質規制値がpH5.8~8.6、BOD20mg/l、SS50mg/l、T-N120mg/l、T-P16mg/lであり、色度は100度を目標とした。本センターの脱水・排水処理設備の処理プロセスフローを図4.5.1に示す。生物脱窒プロセスでは、脱水ろ液のBOD:T-Nが1500:2500とT-N濃度が高かったことから、水素供与体としてメタノールを添加したが、使用量が多いため、第一段の脱窒素槽では、メタノールの代わりに廃牛乳を主体とした濃厚廃液を添加している。一方、第二段目の二次脱窒素槽では、水素供与体としてメタノールのみを使用している。生物脱窒素プロセスでは、脱窒素槽と硝化槽の小循環と膜分離槽から脱窒素槽への大循環を行っており、2つの循環水量は流入水の約4倍量である。膜分離槽では、中空糸型の精密ろ過膜(細孔径:0.4 $\mu$ m)を採用し、凝集沈殿では塩化第二鉄・NaOH・高分子凝集剤を添加して、色度除去を行っている。オゾン処理装置は脱色が主たる目的であり、本センターが1998年に建設された時に設置した装置を増設後も使用している。膜分離槽の余剰汚泥は、一定量を原水槽へ送り、凝集沈殿汚泥は消化液槽1へ送り脱水機で固液分離をしている。

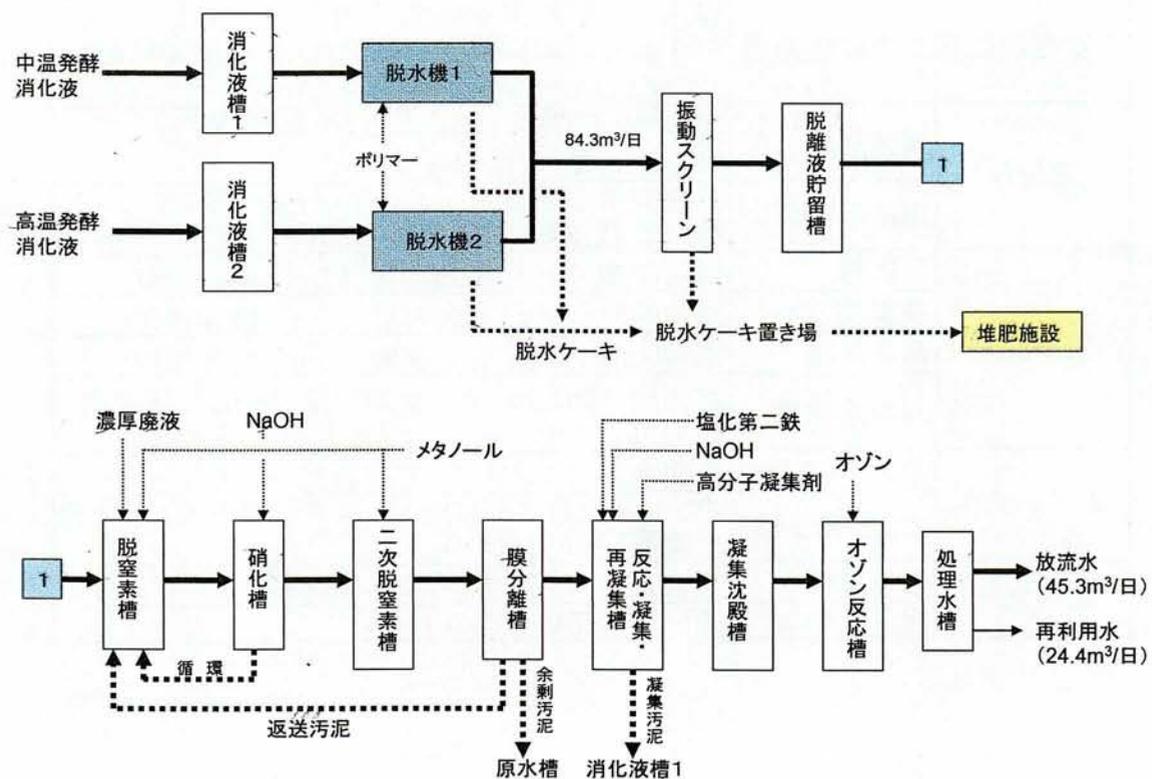


図 4.5.1 排水処理プロセスフロー

脱水設備と排水処理設備の主な機器仕様は、表 4.5.1 に示した。脱水設備では脱水調整用に中性ポリマーを使用し、脱水ケーキの含水率を 70%まで下げている。この脱水ケーキは、受入れている乳牛ふん尿中に含まれるわら等の裁断したものが含まれているので、これが核になって脱水しやすい。膜分離では、中空糸型の精密ろ過膜を使用しており、SS の分離が確実に行われる。膜の洗浄は、膜差圧や透過流量を確認しながら、水洗浄や薬品の浸漬洗浄を行う。

表 4.5.1 脱水・排水処理設備の主要機器仕様

プロセス	機器名称	仕様
脱水設備	脱水機	スクリープレス式、脱水能力60kg-DS/時間、脱水ケーキ含水率70%
排水処理設備	(流入条件)	流入水量:84m <sup>3</sup> /日、流入水質:BOD1,500mg/l、SS3,000mg/l、T-N2,500mg/l
	(放流水質)	pH5.8~8.6、BOD20mg/l、SS50mg/l、T-N120mg/l、T-P16mg/l、(自主目標)色度100度
脱離液貯留	脱離液貯留槽	貯留時間:12時間以上、有効容量67m <sup>3</sup> 、送風量:1.1m <sup>3</sup> /分
生物脱窒素	脱窒素槽	T-N・MLSS負荷:0.11kgT-N/kg・MLSS、MLSS濃度:8,000mg/l、水槽容量:299m <sup>3</sup>
生物硝化	硝化槽	T-N・MLSS負荷:0.11kg/kg、BOD・MLSS負荷:0.2kg/kg、MLSS濃度:8,000mg/l、水槽容量:281m <sup>3</sup>
二次生物脱窒	二次脱窒素槽	流入T-N濃度:464mg/l、T-N・MLSS負荷:0.04kg/kg、MLSS濃度:8,000mg/l、水槽容量:136m <sup>3</sup>
膜分離	膜分離槽	BOD・MLSS負荷:0.1kg/kg、MLSS濃度:10,000mg/l、水槽容量:107m <sup>3</sup> 、
	精密ろ過膜	外圧型中空糸膜、平均孔径0.4μm、膜ユニット数:18、膜運転時間:18時間/日
凝集沈殿	反応槽	滞留時間:10分、有効容量:1.0m <sup>3</sup> 、攪拌機付
	凝集槽	滞留時間:15分、有効容量:1.0m <sup>3</sup> 、攪拌機付
	再凝集槽	滞留時間:10分、有効容量:0.9m <sup>3</sup> 、攪拌機付
	凝集沈殿槽	水面積:10m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ・日、有効容量:56.1m <sup>3</sup> 、污泥掻き機付
オゾン反応	オゾン反応槽	空間速度:0.15/時間、有効容量:33.1m <sup>3</sup> 、
	オゾン発生装置	オゾン発生量:250g/時間、無声放電方式、酸素発生装置:PSA方式、
処理水槽	処理水槽	滞留時間:15分、有効容量:16.9m <sup>3</sup>
	塩素消毒器	固形塩素充填量:15kg

## (2) 運転データ

本センターの排水処理設備における 2002 年 7 月から 2004 年 1 月までの運転データを表 4.5.2 に示す。本運転実績から、pH、BOD、SS、T-P の放流水質は安定しており、規制値以下の水質を確保することができていたが、T-N および色度については水質が不安定となり、必ずしも常に規制値をクリアすることができなかつた。これは、T-N 除去は生物的な脱窒素を行っていることから、水素供与体となるメタノールや濃厚廃液の添加量調整を適正に行うことが求められ、一方色度は無機凝集剤の添加量調整等を行うことが求められるが、ここでは十分な調整ができていなかったためと考えられる。本水質データから、脱水・排水処理設備の運転成績をまとめると以下の様になる。

①脱水ろ液は、BOD が約 700mg/l、SS が約 1100mg/l、T-N が約 1800mg/l であり、設計値に比べると低値となった。T-N の 90% は  $\text{NH}_3\text{-N}$  であり、生物脱窒素では硝化工程を確実に行う必要があることが分かる。COD<sub>Mn</sub> 濃度は 2,913mg/l と BOD に比べ 4.2 倍と高い値となっていたことから、生物処理のみでは高い除去効率を達成することは難しいものといえる。

②膜ろ過水では、BOD がほぼ除去されており、T-N も規制値に近い数値になった。T-N の主成分は  $\text{NO}_3\text{-N}$  であり、硝化が十分に行われていたことが示された。

③放流水の水質は、T-N 濃度を除いて規制値を満足する値になった。T-N 濃度は、先述した様にメタノールや濃厚廃液の水素供与体の供給量の調整不良から、生物脱窒が不十分であった事ために規制を上回ったものと考えられる。COD<sub>Mn</sub> 濃度は、

表 4.5.2 排水処理設備の水質データ (2002 年 7 月～2004 年 1 月)

項目		脱水ろ液	硝化槽	膜ろ過水	放流水	濃厚廃液
pH	—	8.6	—	—	7.1	—
		—	—	—	(5.8~8.1)	—
BOD	mg/l	692	670	4.8	13	70,500
		(320~1,700)	(150~970)	(1.8~9.3)	(4.7~47)	(42,000~91,000)
COD <sub>Mn</sub>	mg/l	2,913	—	—	289	—
		(1,400~7,000)	—	—	(90~790)	—
S S	mg/l	1,118	—	—	7.1	24,650
		(360~1,900)	—	—	(<1~18)	(6,300~43,000)
T-N	mg/l	1,756	1,022	137	131	2,323
		(1,200~2,300)	(850~1,500)	(84~190)	(57~220)	(490~4,300)
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	mg/l	1,570	206	7.9	11.0	—
		(1,300~2,000)	(5.1~710)	(0.08~29)	(5.1~19)	—
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg/l	—	217	80	71	—
		—	(4~550)	(32~160)	(10~170)	—
T-P	mg/l	70.9	—	12	0.8	—
		(10~290)	—	(5~19)	(0.1~1.9)	—
大腸菌群	CFU/ml	—	—	—	16	—
		—	—	—	(0~53)	—
色度	度	2,400	—	1,500	260	—
		(2,000~3,000)	—	(1,000~2,000)	(100~400)	—

(注) 上段は、平均値を示す。下段の( )は、最小値と最大値を示す。

BOD に比べて高濃度であり、本排水に生物処理だけでは除去できない成分が含まれていることを示している。

④色度は、生物処理でも 40%程度除去されているが、凝集沈殿やオゾン処理で色度 100 度までの確実な処理が可能であった。色度を 10～30 度程度の無色に近い程度まで脱色するためには、さらに活性炭吸着等の設備が必要になると考えられる。

⑤濃厚廃液は廃牛乳を中心としたものであり、性状を表 4.5.1 に示した。BOD:T-N が 30 : 1 であり、メタノールの一部の代替として使用できることを示している。濃厚廃液によるメタノールの削減比率は、濃厚廃液の添加量を 3t/日とすれば約 17% となった。

### (3) 考察

メタン発酵の消化液の特徴は、BOD に対して T-N 濃度が高く、生物脱窒は水素供与体を添加しないと困難であることが本センターでも確認された。本センターの排水処理プロセスで、適正な管理を行えば BOD、SS、T-N、T-P の規制を満足することが確認できた。放流水の色度は、凝集沈殿とオゾン処理で 300 度以下程度にはなるが、100 度以下を安定して確保するためには、凝集沈殿での薬剤の添加量のこまめな調整やオゾン添加量の増加が必要であると考えられる。

なお、本センターの脱水ろ液の性状は、畜産ふん尿を中心としたメタン発酵の脱水ろ液性状を代表していると考えられるが、他の濃厚有機性廃棄物を原料にしたメタン発酵の脱水ろ液の性状を含めて表 4.5.3 に比較してみた。表 4.5.3 では、生ごみとし尿汚泥のメタン発酵施設の実績値<sup>14)</sup>と畜産ふん尿を対象にしたバイオガスプラントの手引き<sup>5)</sup>における設計条件を載せて比較している。なお、畜産ふん尿のメタン発酵の脱水ろ液は、し尿処理施設構造指針解説<sup>15)</sup>の脱離液の性状にほぼ準拠しているので、本指針解説が排水処理施設の参考になると考えられる。

表 4.5.3 メタン発酵の脱水ろ液の性状比較

項目	八木バイオエコロジーセンター	汚泥再生処理センター <sup>14)</sup>	家畜排せつ物メタン発酵手引き <sup>5)</sup>	備考
対象物質	ふん尿・食品残渣	生ごみ・し尿汚泥	ふん尿・食品残渣	
pH (-)	8.6		8	
BOD (mg/l)	692 (320~1700)	460	2,500	
COD <sub>Mn</sub> (mg/l)	2913 (1400~7000)		2,400	
SS (mg/l)	1118 (360~1900)	870	1,300	
T-N (mg/l)	1756 (1200~2300)		2,100	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/l)	1570 (1300~2000)	570		
T-P (mg/l)	70.9 (10~290)	8.5 (PO <sub>4</sub> -P)		
色度 (度)	2400 (2000~3000)		2,500	

(注) 八木バイオエコロジーセンターの ( ) は、最小値と最大値を示す。

メタン発酵の脱水ろ液は、下記の様にいくつかの特徴ある性状を示す。この特徴を考慮した排水処理設備が必要であるといえる。

- ①pH 値は、7.5～8.5 程度の弱アルカリである。
- ②BOD 濃度は、発酵する原料や濃度により変わるが、T-N 濃度に比べて低い。これは、メタン発酵にて BOD 物質は大幅に除去されるが、窒素成分は細菌の構成物質に取り込まれる以外は削減しないからである。
- ③窒素濃度が高いが、その多くはアンモニア性窒素である。
- ④COD<sub>Mn</sub> 濃度は、BOD 濃度に比べて高濃度となる。この COD<sub>Mn</sub> 成分は、生物処理では除去しづらい高分子物質であり、色度成分でもある。排水処理でこの COD<sub>Mn</sub> 成分を除去するためには、凝集沈殿やオゾン処理、活性炭吸着等の物理化学的な処理が必要となる。
- ⑤水温が一般的に高い。特に、高温発酵の場合には、発酵液を貯留して温度低下を図るか、冷却装置を通して水温を 40℃以下にまで下げないと生物処理の運転に支障をきたす。
- ⑥脱水ろ液中には多量の炭酸ガスが溶解しており、pH が低下するとこの炭酸ガスが発泡することがある。

#### 4. 6 堆肥施設

##### (1) 堆肥施設の概要

本センターの堆肥施設は、一次発酵がロータリー攪拌機による好気発酵で、二次発酵は堆積発酵している。施設仕様を表 4.6.1 に示す。堆肥施設では、メタン施設の脱水ケーキ 12.5t/日（水分 70%）と肉牛 590 頭および育成乳牛 233 頭のふん尿を合わせて全体で 31.9t/日を受入れて堆肥発酵する。堆肥施設の脱水ケーキやふん尿の搬送は、ホイールローダーで行い、約 3 ヶ月かけて水分 50%以下の完熟堆肥とする。堆肥の年間製造量は計画値で年間 7,000 t であり、堆肥販売はバラ、0.5t のフレコンバック、400の袋詰となっている。

表 4.6.1 堆肥施設の仕様

名 称	仕 様
発酵棟	992.8m <sup>2</sup> ×2 棟（鉄骨造ポリカーボネート葺）、発酵期間：25 日間
攪拌機	ロータリー式攪拌機（22.2 kW）×2 台
堆肥舎	1,051m <sup>2</sup> ×2 棟（鉄骨造スレート葺）、1395m <sup>2</sup> ×1 棟（鉄骨造折板葺）、 発酵期間：65 日間
製品庫	799m <sup>2</sup> ×1 棟（鉄骨造スレート葺）、半自動袋詰機 1 台

##### (2) 運転データ

堆肥の製造量は、年間 2,000～3,000t であり計画値に比べて少なかった。その理由は、肉牛のふん尿の持込み量が 2～3t/日と少なく、また脱水ケーキ発生量もフリーストール牛舎からの固液分離した薄いふん尿が持込まれることから、発生量が少なくな

っていたためと考えられる。堆肥化は、脱水ケーキとほぼ同量の肉牛や肥育乳牛のふん尿とを好気発酵する様に運転している。堆肥の成分例は表 4.6.2 に示すが、中川によれば<sup>16)</sup>、堆肥は肥料成分が一般的な堆肥と違い、窒素分が 2.4%と市販の牛ふん由来の堆肥では 0.5~1.0%程度であるのに対して、その 2 倍以上含まれている。また、この堆肥は無機性窒素が 1.4%、有機性窒素が 1.0%であり、植物の栄養分としてすぐに利用される無機性窒素が半分あるため、追肥として入れられる化学肥料の減量化を図ることができる。堆肥の肥料成分は、メタン発酵が中温か高温かによって違いはほとんどないと考えられるが、脱水ケーキ中の腸内細菌数は高温発酵では中温に比べてかなり減少していることが推測される。表 4.6.2 には、参考にクリプトスポリジウムの検出結果も示したが、受入れふん尿中には存在するものの、堆肥には検出されなかった<sup>17)</sup>。

表 4.6.2 八木バイオエコロジーセンターの堆肥成分と  
クリプトスポリジウムの測定

堆 肥 成 分 (2001.2.20 採取:乾物当り)		クリプトスポリジウム <sup>17)</sup>	
TS	46%	DNA 検出法	
VTS	33%	受入れふん尿	1.3E+01 個/ml
T-C	36%	堆肥	< 1E+01 個/g
T-N	2.5%	RNA 検出法	
T-P	1.9%	受入れふん尿	2.2E+01 個/ml
K	2.3%	堆肥	< 1E+01 個/g
Cl	5,200mg/l		

### (3) 考察

メタン発酵残渣は、それを脱水したケーキであってもメタン発酵槽内で有機物はかなり分解されるため、堆肥施設で十分な発酵熱の発生を期待することはできない。従って、脱水ケーキだけでは発酵の進行を期待できないので、単独の堆積発酵は極めて困難である。脱水ケーキを好気発酵させるためには、発酵熱を生産できる新たなふん尿や食品残渣を添加することが必要である。しかし、メタン発酵後の脱水ケーキは、原料のふん尿に雑草種子が混入していても、非常に高い確率で種子の発芽を抑制できるので、脱水ケーキを直接農地還元することにおけるデメリットは少ないと考える。

なお、本センターでは脱水ケーキと肉牛や肥育乳牛のふん尿を合わせて堆肥化しているが、メタン発酵残渣のみで堆肥化する場合には、好気発酵による発熱を期待できないので、重油等の化石燃料を使用して乾燥する。乾燥後のケーキは好気条件で熟成し、堆肥や土壌改良材として資源化する。脱水ケーキを原料とした堆肥は、一般肥料の扱いになるので、成分の表示が必要になる。

#### 4. 7 液肥利用

本センターでは、メタン発酵の消化液を脱水して脱水ろ液を排水処理しているが、脱水に伴うポリマーや排水処理におけるメタノール等の薬剤費が高額になり、事業運営を圧迫している。消化液は窒素やリンを多く含んでいることから、消化液の一部を液肥として利用することでこのコストを低減する試みを始めており、さらに水稲での使用拡大を目指して実用化調査を推進している。消化液の液肥利用は、欧州では長い歴史を持っているが、液肥の使用は牧草地が主であり、各種の野菜栽培での使用実績は少なく、ましてや水田での使用は全く実績がない。以下に八木町内で行われている八木バイオエコロジーセンターの消化液を使用した、液肥利用に関して調査結果の概要をまとめた。

なお、日本国内では、北海道や九州の一部等で液肥の使用が行われているので、参考に下記に整理している。

- ・北海道では、畜産ふん尿の牧草地等への液肥利用が多数行われている。現状の液肥利用はふん尿を半年間貯留できる容量のスラリータンクに溜めて、春や秋に散布する。貯留期間中に水中ミキサー等により攪拌し、好気発酵している事になっているが、実状は無処理に近い状態で散布されている。このため、液肥の散布時期は、地域周辺全体がふん尿臭がひどく、問題になっている。この点、メタン発酵後の消化液は臭気も少なく、実際に使用している町村牧場（江別市）でも、メタン発酵プラント設置後は以前の苦情が全くなかったと聞いている。メタン発酵プラントの発酵液を液肥として散布するのは、これまで液肥利用している地域では、継続使用が可能と考えられる。

- ・本州以南の地域では、東北地方や九州地方の一部で畜産ふん尿の液肥利用をしている。これらの地域では、水田や畑地への液肥利用を行っている。事例としては、三重県内や佐賀県杵島郡の一部で、畜産糞尿等の水田への液肥利用が行われている。

- ・九州地方を中心に、人のし尿や畜産ふん尿を好気処理し、処理液を液肥として使用している。例として、宮崎県綾町、福岡県椎田町、熊本県菊鹿町、群馬県梟川村、静岡県函南町等がある。

##### (1) 液肥の性状

本センターでは、乳牛や豚のふん尿、おから、濃厚廃液（廃牛乳等）を受入れて、メタン発酵の処理原料にしているが、受入量の多くは乳牛のふん尿である。液肥は、これらのふん尿や食品残渣ならびに排水処理の余剰汚泥をメタン発酵した消化液である。

液肥の成分をふん尿の成分と共に分析したデータを表 4.7.1<sup>8)</sup> に示す。ふん尿は、乳牛の飼育頭数の多い A 牧場と B 牧場の 2 箇所から採取しており、豚ふん尿は一箇所からの採取である。本分析データは、平成 15 年 12 月と 16 年 1 月の 2 回採取したふん尿や液肥のものであり、液肥は消化液として利用している本センターの高温消化の消化液のデータである。本分析は、ふん尿や液肥の肥料成分、重金属などの障害となる成分、大腸菌群等の衛生的項目について行った。表 4.7.1 からふん尿や液肥につい

て、下記のようにまとめられる。

① TS（固形物）濃度は、A牧場の乳牛ふん尿はB牧場に比べて低いですが、これはA牧場が固液分離をしており、液分がメタン発酵の原料として持込まれているためである。消化液は約 70,000~80,000mg/lの濃度であり、メタン発酵のガス化で固形物の一部が減少している。

②T-N、T-P、Kの主要肥料成分は、同じ牧場のふん尿でも採取毎に大きな違いが出ている。これに対して液肥は比較的数値が安定しており、メタン発酵槽の滞留時間が25日程度あるので、質の平均化ができています。A牧場は、B牧場に比べると肥料成分などが低くなっているが、これは固液分離の有無によるものと、管理排水の多少による違いと考えられる。

③T-N濃度は、乳牛や豚のふん尿で3,000~4,300 mg/lであり、液肥では約3,000 mg/lとなっている。T-P濃度は、ふん尿で470~2,000 mg/lと範囲が広いが、液肥では820~830 mg/lと安定している。K濃度は、ふん尿で1,300~3,400 mg/lとなっており、豚に比べて乳牛ふん尿の方が高濃度の傾向がある。液肥のK濃度は、2,700mg/lと安定していた。Ca濃度は、B牧場のふん尿が2,000mg/l以上と他のふん尿に比べると高くこれは給餌に由来していると考えられる。液肥のCa濃度は、1,000mg/l前後とA牧場や豚ふん尿と同程度である。

④ふん尿と液肥のC/N値は、乳牛ふん尿では7.8~17.3で平均値が11.5、豚ふん尿が2.4と8.6で乳牛ふん尿に比べればC/N値は低く、液肥は9.6と11.3でほぼ10である。

⑤ふん尿や液肥に含まれる重金属類としてはCu、Zn、Niが低濃度で検出されている。Cu、Zn、Mg、Mn、Zn、Coは乳牛用の餌に少量含まれており、また畜舎で消毒や乳牛・豚の皮膚炎症予防のため使用されたこと等が考えられる。Cd、As、T-Hgは、検出限界以下であった。Pb、T-Crは、極めて低濃度が検出されている検体もあるが、この発生由来は不明である。

⑥メタン発酵は嫌気性細菌を活用した生物処理であるため、Mg、Mo、Se、Co等のミネラルが発酵に影響することがある。この点と土壌への微量成分の蓄積を見るため、これらの微量ミネラル成分の分析をした。メタン発酵では、液肥（消化液）にMg、Mo、Niが含まれており、Se、Coは検出限界以下であったが発酵障害になるようなミネラル不足にならないことが分かった。

⑥Na濃度の高い養液は植物生育に障害となることがあるが、本センターの液肥の様にNa濃度が1,000gm/l以下の濃度であれば、なんら植物への障害を与える濃度ではない。

表4.7.1 八木バイオエコロジーセンターのふん尿・液肥の分析結果<sup>1)</sup>

項目	試料 採取	乳牛ふん尿 (A 牧場)		乳牛ふん尿 (B 牧場)		豚ふん尿		八木バイオエコロジー センター 液肥	
		15.12.8	16.1.20	15.12.8	16.1.20	15.12.8	16.1.20	15.12.8	16.1.20
TS (固形物)	mg/l	70,000	53,000	120,000	150,000	25,000	180,000	69,000	79,000
T - C	mg/l	30,000	25,000	47,000	71,000	10,000	86,000	26,000	34,000
T - N	mg/l	3,000	3,200	4,300	4,100	4,100	10,000	2,700	3,000
T - P	mg/l	520	470	740	670	560	2,000	830	820
K	mg/l	3,000	2,000	3,200	3,400	1,300	3,000	2,700	2,700
Ca	mg/l	1,100	1,100	2,000	2,200	270	1,300	970	1,400
Cu	mg/l	28	98	5	15	2	38	14	14
Zn	mg/l	12	9	21	19	6	26	9	8
Cd	mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
As	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ni	mg/l	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	1.2	0.4	0.5
Pb	mg/l	0.9	0.7	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
T - Cr	mg/l	<0.2	<0.2	0.4	0.3	<0.2	0.7	0.2	0.2
T - Hg	mg/l	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mg	mg/l							550	810
Se	mg/l							<0.1	<0.1
Mo	mg/l							0.3	0.1
Co	mg/l							<0.2	<0.2
Na	mg/l							610	460
強熱減量	%							85	83
大腸菌群数	個/ml							5,100	97
電気伝導率	m S/m							1,500	1,700
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg/l							1,700	2,000

(注) 1. 分析方法は「詳細肥料分析法」による。但し、T-C、TS、Na、強熱減量、大腸菌群数、電気伝導率は「下水道試験方法」による。

2. 強熱減量は、TS (固形物) に対する百分率で示している。

3. 液肥は、高温発酵の消化液を使用している。

本センターでは、中温発酵と高温発酵の2基のメタン発酵槽が並列運転をしている。液肥に利用しているのは高温発酵の消化液である。高温発酵の消化液を液肥として利用している主な理由は、消化液の衛生的な側面と畜産ふん尿中に含まれる種子の発芽率を抑えられるからである。消化液は、中温でも高温でも生ふん尿の臭いはなく、弱いアンモニアの臭気を感じる程度で不快感はない。高温と中温の消化液における大腸菌群などの分析結果を表4.7.2に示すが、高温発酵の消化液が中温に比べて大腸菌群などの除去率が高いことが分かる。バイオガスプラントの液肥利用における指標微生物に関しては上村らの報告<sup>18)</sup>があり、わが国には消化液を土壌還元する場合の微生物基準は設定されていないが、アメリカ環境保護局（USEPA）では、消化下水汚泥を農地に還元する場合の規制値がふん便性大腸菌群で $2.0 \times 10^6$ 個/g・TS以下となっている。表4.7.2における消化液は、TS濃度が50,000~80,000mg/lであることから、USEPAのふん便性大腸菌群数は、 $1 \sim 1.6 \times 10^5$ 個/ml以下と計算できるので、中温消化液でも高温消化液でも、土壌還元が可能な菌数である。

表 4.7.2 メタン発酵における細菌の分析結果

分析項目	単位	採取日	原水槽	高温消化液	中温消化液
大腸菌群数	個/ml	H15.10.14	480,000	140	4,400
		H16.1.29	330,000	90	2,300
糞便性大腸菌	個/ml	H15.10.14	40,000	110	2,500
		H16.1.29	26,000	30	1,500

## (2) 栽培調査

本センターの液肥を使用した栽培調査を八木町が実施しており<sup>16)</sup>、調査と結果の概要のみを下記に記述する。

### ①露地栽培養液利用

露地栽培では、サトイモ、ナス、トマト、伏見トウガラシ、大豆、キャベツ、ブロッコリー、大根、白菜、タマネギの11種類で調査した。試験栽培は、夏期と秋期の2時期に行っている。生育・収量はいずれの試験区でも良好であった。追肥の施肥方法で、作物体内の硝酸イオン濃度が安全な濃度に低下できる。また、慣行区（化学肥料）と比較しても、収量など差がなかった。

### ②水稲液肥施用調査

水稲への液肥の施用は、基肥と穂肥に分けて行い、流し込み方式で3圃場にて行った。収量調査は同一品種で同一栽培者の隣接した慣行圃場と比較した。その収量調査結果は、全籾重については15%の増加、精玄米重20%の増加となった。千粒重は、5%の増加であったため、増収の要因は籾数の増加によるところが大きいと考えられる。品質調査結果の食味値は、慣行栽培と同じレベルであったが、外観検査で整粒歩合が

低く、いずれも 2 等米となった。液肥利用については、流し込みが可能な条件が限定されるが、非常に簡便な施用方法である。注意点として、用水の流量と液肥の滴下量のバランスが均一散布には重要であり、今後の課題となった。

### (3) 考察

本センターの液肥を露地栽培や水稲で試験栽培した結果、液肥が化学肥料の代替として利用できることが確認できた。しかし、液肥の野菜栽培や水稲での使用実績は少ないため、この後の開発に残された課題もある。本センターの水稲での調査や研究圃場での水稲実験から、梅田<sup>19)</sup>は日本でメタン発酵の消化液を液肥を使用する場合には、相当部分を水田と野菜畑に還元する必要があるとあり、消化液は肥料として使用可能であるとの実験結果を得ているが、水稲は牧草よりはるかに正確な施肥設計を必要とする。消化液は無機肥料と有機肥料の両成分が混在している上、ロットにより窒素含有量が異なるため、肥効時期が化学肥料のように単純でない。また、作物や野菜に不必要な元素を含んでいる可能性もあり、今後さらに広い範囲でのデータ収集を行い、施肥指針を確立する必要があるとしている。

## 4. 8 建設・運転コスト

### (1) 建設費<sup>20)</sup>

本センターは、1998 年 3 月完成の新設工事、2002 年 3 月完成の増設工事という 2 期の事業で建設されており、その事業費を以下に示す。本事業費には、建設地の土地購入費、造成費、外構工事費等も含まれている。

#### ●1998 年 3 月完成の新設工事

メタン施設：畜産再編総合対策事業 事業費 568,000,000 円

堆肥施設：農林漁業同和対策事業 事業費 523,969,000 円

#### ●2002 年 3 月完成の増設工事

メタン施設：畜産振興総合対策事業 事業費 479,999,500 円

堆肥施設：小規模零細地域営農確立促進対策事業 事業費 151,800,000 円

上記の 2 基にわたる建設工事費から、処理能力当りの建設工事業費を試算すると下記になる。

メタン発酵施設 総事業費：1,047,999,500 円

処理能力：65.2t/日（ふん尿・おから）

処理能力当り事業費：16,000,000 円/t

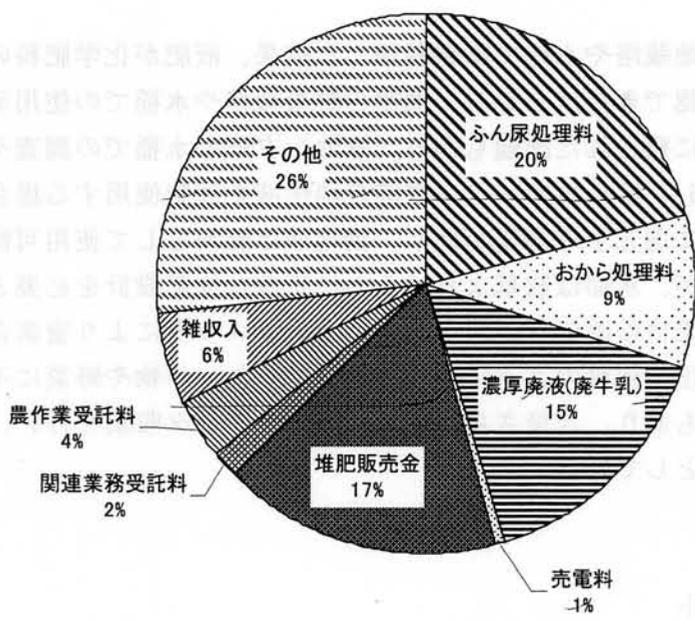
堆肥発酵施設 総事業費：675,769,000 円

処理能力：44.4t/日（ふん尿・脱水ケーキ）

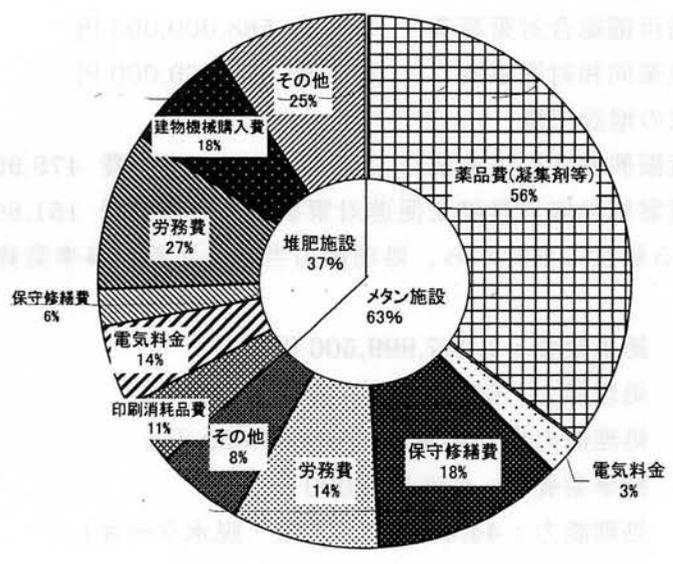
処理能力当り事業費：15,200,000 円/t

### (2) 施設運営費

本センターの運営費について中川<sup>21)</sup>によれば、収入ならびに支出の割合は図 4.8.1 に示す様な値になっている。収入では、受入れ処理料の占める割合が高く、堆肥販売費は製造量が少ない事もあり、17%に止まっている。おからの受入れ処理料は、受入量が当初計画の 10t/日に比べて実績値は約 3t/日と少ないため、収入割合は 9%になっ



八木バイオエコロジーセンターの収入割合



八木バイオエコロジーセンターの支出割合

図 4.8.1 本センターの収支の内訳比率<sup>21)</sup>

ている。なお、受入れ処理料金は、乳牛ふん尿が 15,000 円/年・頭、肉牛が 7,500 円/年・頭、豚が 1,665 円/年・頭、おからは 7,000 円/t、濃厚廃液(廃牛乳)は 9,000 円/t であり、堆肥の販売費は 6,000 円/t となっている。

また、支出費用は、メタン施設が 63% を占めているが、受入れ廃棄物の実績に基づく処理単価で見ると、メタン施設が 2,264 円/t であり、堆肥施設が 5,090 円/t となっており、メタン施設での処理単価が堆肥施設に比べると安価になっている。メタン施設の支出の中でも、脱水設備や排水処理設備で使用するポリマーなどの薬品費の割合が多い。特に、排水処理では、植物の栄養素である窒素やリンの除去を行っているため、メタン発酵の消化液を液肥に利用できると処理に投じるエネルギーや消耗財が不要になり、支出費用も削減する事ができる。なお、欧州のバイオガスプラントでは、メタン発酵の消化液を牧草地などに液肥として散布しており、脱水や排水処理のないシンプルな装置になっている。

### (3) 考察

本センターの建設事業費は、2 期の工事で行われていることもあり、この金額を基に絶対額を論じてあまり意味がないと考えられる。しかし、本センターは臭気対策がほとんどされていない事や見学者対応用の会議室は上記の事業とは別に建設されている事等を考えると、比較的安価に建設された施設であるといえる。また、し尿処理施設は、一般的にし尿 1kℓ 当り 3,000~5,000 万円かかることから、本メタン施設は他の同等の施設からすると安価であると考えられる。

施設運営費は、メタン施設が占める割合が多く、特に脱水・排水処理設備の薬剤費が高価になっている。このため、メタン発酵の消化液を全て液肥として使用すれば、これらの薬剤費は不要になるので、支出金額は約 1/3 が削減される。なお、おからの受け入れ量が計画値の 1/3 程度しかなく、また堆肥の製造量も計画値の 1/2 以下であるため、本センターの収入金額は計画金額よりも少ない。しかし、おからの受け入れ量や堆肥の製造量が計画値に近づくことになれば、施設の減価償却費を計上しなければ、本センターの収支は合う計算になる。

バイオガスプラントの事業性は、設置する地域や社会・環境等の条件で大きく変わってくる。例えば、メタン発酵の消化液を液肥利用できるかどうか等もその大きな要素である。エックス・都市研究所<sup>22)</sup>では、バイオガスプラントが事業として成立するための条件を事業用地費、施設建設費、補助率、事業規模、処理単価、売電単価、発電効率、堆肥単価、対象バイオマスの種類の 9 項目に設定して感度分析を行っている。試算では、バイオガスプラントは、対象とする原料が食品廃棄物、畜産廃棄物、下水汚泥・し尿汚泥の 3 種類とし、メタン発酵の消化液は排水処理と脱水汚泥の堆肥化をするシステムとしている。試算結果では、事業性に大きい影響を与えるのは、事業用地費、施設建設費、事業規模、処理単価、売電単価、対象バイオマスの種類の 6 要因であった。事業性シミュレーションの感度分析結果としては、食品廃棄物の場合には 20t/日程度が、畜産廃棄物が原料の場合には 100t/日程度が、下水汚泥・し尿汚泥の場合には 40t/日程度が事業性を確保できる事業規模の境界値となった。この感度分析は、設定している各種単価が妥当かどうかの検討が必要であるが、一応の目安に

はなるものと考えられ、畜産廃棄物のみの施設では大型のプラントでないと事業性がないとの結果である。なお、本試算で使用した基本条件を表 6.2.1 に示す。また、事業性の考え方は、単年度黒字達成時期が事業開始後何年後かと、累積赤字が解消されるのが事業年度開始後何年になるかを指標として使用しており、単年度黒字達成は事業開始後 8 年以内、累積赤字の解消は 15 年以内が目安になっている。表 4.8.1 では、エックス・都市研究所が設定した値と共に、本センター（八木 BEC）の 2004 年 7 月現在の数値を比較のため記入した。本センターは、メタン施設のみを対象バイオマスが 65.2t/日であり、メタン施設の規模からはエックス・都市研究所が事業成立の 100t/日に満たないが、堆肥化施設の対象バイオマスを含めると 109.6t/日ではほぼ事業成立の規模になる。

表 4.8.1 事業性試算の基本ケースの条件設定 <sup>22)</sup>

項目	設定値		備考	八木BEC(2004年7月現在)
事業用地面積	10,000	(m <sup>2</sup> )		16,000
事業用地費	2,000	(円/m <sup>2</sup> ・年)	借地	
施設建設費	1,000	(百万円)	耐用年数15年、残存価値5%	1,724
補助率	50	(%)	補助対象は施設建設費	60(全体補助率)
維持管理費	30,000	(千円/年)	対施設建設費3.0%	
作業員	5	(人)		5
人件費	4,000	(千円/人・年)		
諸経費等(開業費)	20,000	(千円)	対施設建設費2.0%	
資本金	100	(百万円)	対施設建設費10.0%	
長期借入金金利	3.0	(%)	返済期間15年、据置期間0年	
事業規模	20	(t/日)	対象バイオマスは食品残渣	メタン65.2、堆肥44.4
処理単価	15,000	(円/t)	同上	ふん尿: 600、おから7,000
バイオガス発生量原単位	150	(Nm <sup>3</sup> /t)	同上	35
バイオガス発熱量	22,990	(kJ/Nm <sup>3</sup> )		20,900
発電効率	20	(%)	発電量の50%を売電	28
売電単価	5	(円/kWh)		6.8 (平均)
堆肥製造量	5	(t/日)	対象バイオマス量の25%(重量ベース)	10
堆肥単価	2,000	(円/t)		6,000

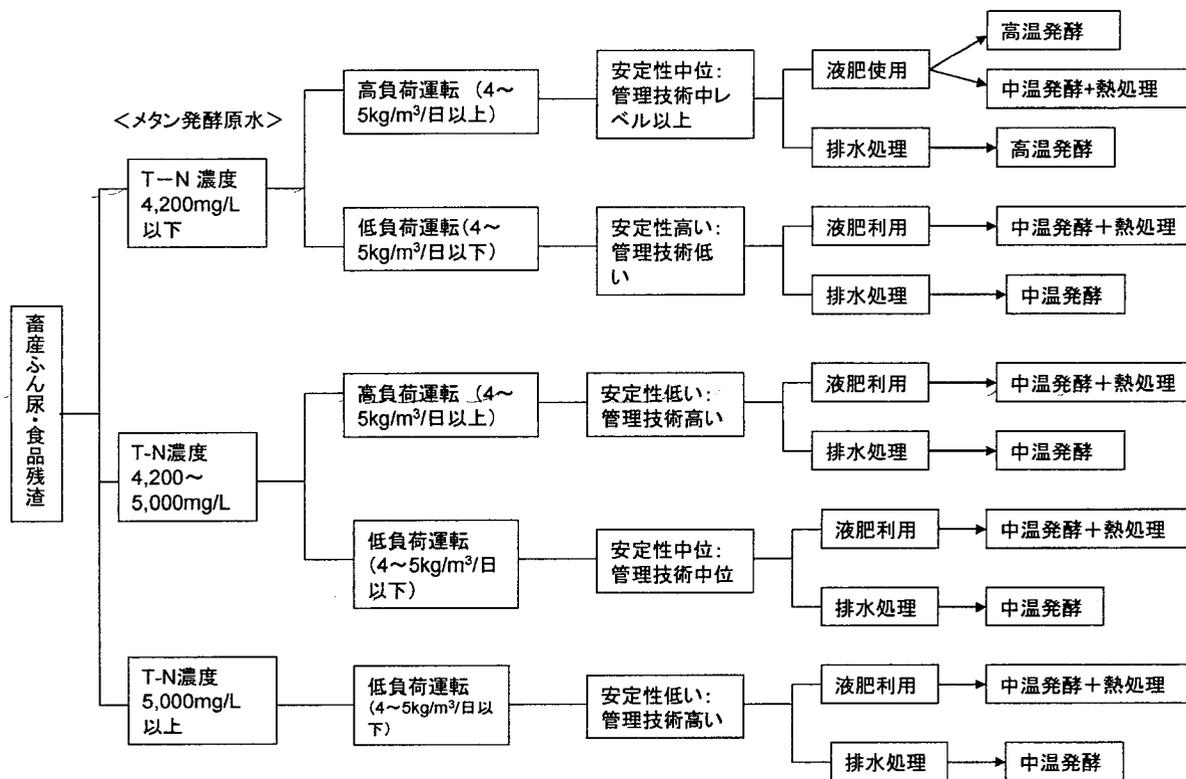
#### 4. 9 中温発酵と高温発酵の特性比較と選択フロー

本章では、メタン発酵における中温発酵と高温発酵に関する各種の比較を行っているが、この成果を李<sup>23)</sup>の中温発酵と高温発酵の比較項目に追加してまとめたのが表 4.9.1 になる。表 4.9.1 は比較項目として、有機物の分解速度と有機物負荷、最大分解率とガス生成量、運転の安定性 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  による阻害)、病原性細菌の消毒効果、液肥の利用、消化液の脱水・排水処理、発酵槽の温度管理、オペレーターの技術力を用いている。比較結果では、高温発酵は有機物の分解速度と有機物負荷、最大分解率とガス生成量、病原性細菌の消毒効果、液肥の利用で性能が良好である。中温発酵では、運転の安定性、消化液の脱水・排水処理への影響、発酵槽の温度管理、オペレーターの高度な技術力を求められない等の長所がある。表 4.9.1 から、畜産糞尿や食品残渣のバイオガスプラントにおけるメタン発酵では、中温発酵か高温発酵かを選択するフローを図 4.9.1 にまとめることができる。図 4.9.1 では、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の阻害濃度を中温発酵で 3,000mg/l とし高温発酵では 2,500mg/l として、メタン発酵槽における  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は原水の T-N 濃度の 60~70% まで高まると仮定している。この T-N 濃度の 60~70% の数値は、表 3.2.1、表 4.2.1 におけるメタン発酵消化液の濃度実績による数値である。図 4.9.1 を要約すると、下記の様に中温発酵と高温発酵の選択を判断することを提案したものといえる。

- ①畜産ふん尿や食品残渣をメタン発酵して、消化液を脱水・排水処理する施設は、中温でも高温でもよいが、オペレーターの技術力が期待できない場合には中温発酵がよい。
- ②①で消化液を液肥として使用する場合には、高温発酵が望ましい。但し、中温発酵でも、熱消毒することで衛生的な液肥が得られる。熱消毒に必要な熱量は、バイオガス発電の廃熱回収で賄える。
- ③食品残渣や生ごみ主体のメタン発酵施設では高温発酵が望ましいが、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の阻害等十分な運転管理術者が運転する必要がある。

表 4.9.1 中温発酵と高温発酵の特性比較

No.	項目	中温発酵	高温発酵
	対象とする有機性廃棄物	畜産ふん尿、各種の食品工場残渣、生ごみ等を対象と考える。	
1	有機物の分解速度と有機物負荷	×	○
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・加水分解・酸生成工程では高温発酵の分解速度が速いが、メタン生成では変わらない。</li> <li>・有機物負荷が2.5kg/m<sup>3</sup>/日以上でVS除去率が低下する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有機物負荷を高く取れ、5kg/m<sup>3</sup>/日でもVS除去率が高い。</li> </ul>
2	最大分解率とガス生成量	同等 (×)	同等 (○)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・低負荷(約2kg/m<sup>3</sup>/日)までは最大分解率とガス生成量は変わらない。</li> <li>・高負荷(4~5kg/m<sup>3</sup>/日以上)では、高温発酵が最大分解率が高く、ガス生成量も多くなる。</li> </ul>	
3	運転の安定性 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -Nによる阻害)	○	×
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nによる阻害は、3,000mg/ℓから影響を受ける。</li> <li>(メタン生成活性は6,020mg/ℓで50%減少)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nによる阻害は、2,000~2,500mg/ℓから影響を受ける。</li> <li>(メタン生成活性は4,940mg/ℓで50%減少)</li> </ul>
4	病原性細菌の消毒効果	×	○
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温発酵の消毒効果は高く、中温発酵は高温発酵に比べると効果は低いが、大きな消毒効果はある。</li> </ul>	
5	液肥の利用	△	⊖
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・液肥使用では消毒効果を高めるため、消化液を55℃で7.5時間消毒することが望ましい。</li> <li>・中温発酵と熱消毒では、加温熱量は高温と変わらないが、熱消毒では蒸気加温でもよい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温発酵は消毒効果が高いので、消化液を液肥として使用できる。</li> </ul>
6	消化液の脱水・排水処理への影響	○	△
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・消化液温度が高温より低く、排水処理で生物処理できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・消化液温度が高く、排水処理で高温による障害を起こすことがある。</li> </ul>
7	発酵槽の温度管理	○	×
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・1日の温度変化は2~3℃以内</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1日の温度変化は1℃以内</li> </ul>
8	オペレーターの技術力	○(高度な技術力は不要)	×(高度な技術力が必要)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・発酵槽内の温度、有機酸、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nに幅あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発酵槽内の温度、有機酸、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nの管理が重要</li> </ul>



(注) 負荷運転は、有機物負荷を示す。また、メタン発酵原水のT-N濃度は、発酵槽内のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが中温3,000mg/L、高温が2,500mg/Lを通常運転の上限とした。原水のT-Nは、その60~70%が発酵槽内でNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nに分解されるとした。

図 4.9.1 中温発酵・高温発酵の選択フロー

#### 4. 10 結言

本センターにおける畜産ふん尿や食品残さの中温発酵と高温発酵の約 1.5 年間における運転結果ならびに考察を 4.1~4.4 節に示した。これらの結果より、下記の様にまとめることができる。

①高温メタン発酵槽の立上げ運転は、本センター内の性状運転している中温発酵槽の消化液や槽内汚泥を使って行い、約 6 ヶ月かけて設計負荷に近い運転ができるようになった。

②上記期間中の中温・高温のメタン発酵槽は、VTS 負荷が  $2.0\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$  前後、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  負荷が  $3.0\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$  前後とほぼ同じ有機物容積負荷をかけた運転をした。VTS 除去率は中温発酵が 40% で高温発酵が 37% であり、また  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率では中温発酵が 53% で高温発酵 51% とほぼ同様の値であった。しかし、高温発酵の運転後約 1 年経過した 2003 年 5 月以降から高温発酵の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率が中温発酵より高くなり、2004 年 1 月のデータでは VTS 除去率は差がほとんどなかったが、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率は中温発酵が 48% に対して高温発酵が 59% と高温発酵の除去率が若干高い傾向にあった。

③メタン発酵槽内の有機酸濃度は、酢酸濃度が高温発酵の方が高く、プロピオン酸濃度は中温発酵と高温発酵はほぼ同じ濃度であった。揮発性有機酸濃度は高温発酵でも最高で  $590\text{mg}/\text{l}$  であり、特にメタン発酵の障害になる様な濃度ではなかった。

④大腸菌群数や糞便性大腸菌数は、中温発酵に比べて高温発酵で高い除去率が得られている。糞便性大腸菌数では、中温発酵の除去率が 99.7% に対して、高温発酵では 99.993% の除去率で高温発酵の消毒効果が高いことが確認できた。

⑤T-N、T-P、T-S 濃度は、中温発酵と高温発酵の両者ではほとんど除去されなかった。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は高温発酵の方が高濃度であるが、高温発酵槽では平均値が  $2,090\text{mg}/\text{l}$  で最高でも  $2,300\text{mg}/\text{l}$  であったことから、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  による障害が起きるような濃度ではないといえる。なお、発酵槽内部の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は、メタン発酵槽へ投入する原水の T-N 濃度の 60~70% であった。

⑥バイオガスの発生量は、2003 年 10 月の実績では発酵槽への投入量当りで比較すると、中温発酵が  $26.3\text{Nm}^3/\text{t}$ 、高温発酵が  $31.4\text{Nm}^3/\text{t}$  であり、高温発酵で 19% 高値となった。また、中温発酵のガス発生量は  $0.48\text{Nm}^3/\text{VTS}\cdot\text{kg}$ 、 $1.21\text{Nm}^3/\text{除去}\text{VTS}\cdot\text{kg}$  で、高温発酵では、 $0.57\text{Nm}^3/\text{VTS}\cdot\text{kg}$ 、 $1.18\text{Nm}^3/\text{除去}\text{VTS}\cdot\text{kg}$  となった。 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  を指標にすれば、中温発酵では  $0.33\text{Nm}^3/\text{COD}_{\text{Cr}}\cdot\text{kg}$  および  $0.59\text{Nm}^3/\text{除去}\text{COD}_{\text{Cr}}\cdot\text{kg}$  となり、高温発酵では  $0.40\text{Nm}^3/\text{COD}_{\text{Cr}}\cdot\text{kg}$  と  $0.66\text{Nm}^3/\text{除去}\text{COD}_{\text{Cr}}\cdot\text{kg}$  になった。この結果から、高温発酵は中温発酵より 12~19% 単位ガス発生量が多いことが分かった。なお、バイオガスの  $\text{CH}_4$  等の成分は、中温発酵と高温発酵ではほとんど差がなかった。

以上の結果から、高温発酵における高い消毒効果が確認でき、液肥利用のためには高温発酵が望ましいことが分かった。有機物の除去性能は、同じ有機物容積負荷であれば中温発酵でも高温発酵でも大きな差がみられなかったが、高温発酵の運転後 1 年以降は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  の除去率が中温発酵に比べて 10% 程度高い傾向が認められた。ガス発生量も高温発酵が若干高い結果が出ており、メタン発酵槽の性能としては高温発酵が中温発酵に比べてやや良いと考えられる。但し、実際の施設へ導入の際には、メタン

発酵の性能以外に、加温エネルギーや建設費・運転費などを含めた総合的な評価を行う必要がある。

また、本センターにおけるメタン発酵設備以外に、脱水・排水処理設備、堆肥設備、液肥利用に関して、運転実績に基づく考察を 4.5～4.7 節で行った。さらに、本センターの建設・運転コストに関しても、4.8 節で整理した。これらの検討から、下記のことになった。

①本センターの排水処理設備では、pH、BOD、SS、T-P の規制を満足する水質が得られているが、T-N 濃度はメタノール等の水素供与体の添加量調整不良等で、若干規制値より高い数値である。色度は、目標値 100 度を上回っていることがあるが、凝集剤の添加量を適正に調整すれば、達成できる設備である。

②メタン発酵の脱水ろ液の水質特性を整理した。脱水ろ液では、窒素処理と COD<sub>Mn</sub> 処理が経済的・技術的に難しい排水である。

③堆肥施設では、堆肥の製造量が少なく、計画値 7,000t/年の半分以下である。この理由は、肉牛ふん尿等の持込み量が少ないこととメタン施設への TS 濃度が低いことによる。堆肥の窒素分が本センターでは多く、2.4%程度あり市販品の 2 倍以上含まれている。

④メタン発酵の消化液を野菜栽培や水稻への液肥利用を実用化レベルで調査している。液肥の栽培調査で、化学肥料と遜色ないことが分かった。しかし、施肥方法や液肥成分変動に関してさらに調査を進め、施肥指針を確立することが必要である。

⑤本センターの運転費は、メタン発酵の脱水・排水処理設備における薬剤費がその 1/3 程度を占めており、メタン発酵の消化液を液肥に使用すると、これらの費用が不要になり、運転費を大幅に削減することができる。また、おからの受入れ量が計画値の 1/3 と少なく、堆肥の製造量も計画値の半分以下であるため、収支バランスは取れていないが、これらが改善されれば収支のバランスは合うことが期待できる。なお、畜産ふん尿を対象にしたバイオガスプラントの事業収益性を試算したエックス・都市研究所の結果からは、ふん尿 100t/日以上以上の施設で、単年度黒字達成が事業開始後 8 年以内で、累積赤字の解消は 15 年以内に達成できると推算されている。本センターは、メタン施設と堆肥施設を合わせれば、この条件に合う規模になっている。

本第 4 章の成果として、畜産ふん尿や食品残渣のバイオガスプラントにおけるメタン発酵で、中温発酵と高温発酵の特性比較を行い、メタン発酵原水性状・有機物負荷・管理技術力・液肥使用の有無等の条件に応じた中温発酵か高温発酵かの選択フローを提案した。

#### 【第4章 参考文献】

- 1) 小川幸正・藤田正憲・中川悦光：ふん尿・食品残さのメタン発酵施設における運転データの解析、廃棄物学会論文誌、Vol.14, No.5、pp. 258-267、2003
- 2) Institute of Biomass Utilization and Biorefinery: The Future of Biogas in Europe Proceedings, Denmark, 1997
- 3) L. Ellegaard: Largescale manure based biogas plants in Denmark Configuration and operation experience, Greenhouse Gases and Animal Agriculture, pp.231-241, 2002
- 4) 伊藤信三：エネルギー再生型廃棄物（汚泥）処理システム、大林組技術資料
- 5) R.E. Speece、(訳) 松井三郎・高島正信：産業排水処理のための嫌気性バイオテクノロジー、技報堂、pp.87・88・92～95、1999
- 6) 畜産環境整備機構：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引、畜産環境整備機構、pp.20、37～39、59～67、2001
- 7) Heinz Schulz, Barbara Eder、(訳) 浮田良則：バイオガス実用技術、pp.197-203、2002
- 8) 北村友一・森田弘昭：嫌気性消化汚泥中の *Cryptosporidium parvum* オーシストの挙動と生残性、Vol.39、No.479、pp.89～97、2002
- 9) Chun-feng Chu・片岡直明・宮晶子・山田紀夫：生ごみの中温および高温メタン発酵特性、第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.298-300、1999
- 10) 中央畜産会編：堆肥化施設設計マニュアル、中央畜産会、p.15、2000
- 11) Hashimoto A. G., Prior R. L. & Chen Y. R.: Methane and biomass production system for beef cattle manure, Presented at the Great Plains extension seminar on methane production from livestock, Lival, Kansas, February 15, 1978
- 12) 藤田正憲：省資源・省エネルギーからみたメタン発酵について、水処理技術、Vol.21、No.4、pp.313-332、1980
- 13) 梅染俊行・高岡昌輝・武田信生・大下和徹：塩化第二鉄凝集剤が嫌気性消化に与える影響、環境衛生工学研究、第16巻、NO.3、pp.90～95、2002
- 14) 米山豊・竹野勝彦・清水紀久夫・内藤龍雄・板垣文夫・安原義光・中田六雄：し尿系汚泥と生ごみを対象としたメタン発酵実施施設の処理特性、廃棄物学会論文誌、Vol.15、No.3、pp.155～164、2004
- 15) 全国都市清掃会議：し尿処理施設構造指針解説、1988
- 16) 中川悦光：ふん尿とエネルギー利用による循環型社会を目指してー八木バイオエコロジーセンターの稼働状況の報告ー、システム農学、システム農学会、19(1)、pp.9～20、2003
- 17) 原弘之・大田美咲・小林美佐子・白井勝久・大河内由美子・西村和之・井上雄三：分子生物学的手法を用いたコンポストからのクリプトスポリジウムの活性オーシストの検出、第37回日本水環境学会年会、日本水環境学会、p.427、2003
- 18) 上村繁樹・帆秋利洋・友沢孝・大原孝彦・小嶋令一・国井伸隆・大橋晶良・原田

- 秀樹・石田哲也：畜産廃棄物系バイオガスプラントにおける指標微生物の動向、用水と廃水、Vol.46、No.5、pp.68-74、2004
- 19) 京都府八木町：バイオマス・メタン発酵設備からのエネルギー有効利用事業調査成果報告書、京都府八木町、pp.71～73、2004
- 20) 京都府八木町：八木バイオエコロジーセンターパンフレット、2002
- 21) 中川悦光：家畜排泄物のエネルギー利用による循環型社会構築を目指して、用水と廃水、Vol.46、No.4、pp.88～95、2004
- 22) エックス・都市研究所：平成14年度バイオマス利活用事業導入モデル検討調査、エックス・都市研究所、pp.1～44、2004.3
- 23) 李玉友：汚泥・生ごみなどの有機性廃棄物の高温メタン発酵、水環境学会誌、Vol.21、No.10、p.24、1998

## 第5章 バイオガスプラントのエネルギー生産施設としての評価

畜産ふん尿、食品残渣や生ごみは発生量が多く、これまで様々な環境問題を引き起こしてきた。しかし、これらの廃棄物系のバイオマスは循環可能な有機資源であり、2002年12月に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」でも、エネルギー利用の面から注目している。具体的な数値として、バイオマス発電は、2000年度の原油換算で年間4.7万kL(6.9万kW)から、2010年度には34万kL(33万kW)と7倍の目標値が設定<sup>1)</sup>されている。循環資源としても、多量に発生する畜産ふん尿に関しては家畜排せつ物法で2004年11月以降の適正処理と資源化利用が求められている。食品リサイクル法では、2007年4月以降の食品廃棄物の20%以上のリサイクルを求めている。このような状況で、バイオマスのメタン発酵は、バイオガスとしてエネルギー回収ができることから、注目されている。また、2002年にはバイオガスが再生可能な新エネルギーに加えられ、「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」で、2003年4月から電力会社は販売電力量の一定割合を新エネルギーで賄うことを義務付けられた。このため、バイオガスで発電した電気は、電力会社が風力発電による電気等と同様の単価で買電することが期待できるので、メタン発酵はエネルギー生産施設としても大きな注目を集めている。

本章では、メタン発酵法によりふん尿や食品残渣を6年以上処理している本センターのバイオガスコージェネレーションの運転実績に基づいて、バイオガス発電の先進地である欧州との比較を行い、日本のバイオガスプラントにおける課題を整理し、バイオガスプラントが日本におけるエネルギー供給施設として果たせる役割について評価した。

### 5.1 八木バイオエコロジーセンターの施設概要と設備仕様

#### (1) 全体概要

本センターは1998年3月に完成し、メタン施設は1998年4月にメタン発酵槽へ種汚泥を投入し運転を開始した。同年7月にはバイオガス発電を開始し、発電した電気は本センター内で使用する方式(逆潮流なしの系統連系方式)で運転していたが、2001年3月に単独運転検出装置を設置して、電力会社へ売電できる方式(逆潮流ありの系統連系方式)に切り替えた<sup>2)</sup>。また、本センター稼働後は第4章で記述した様に、2002年3月にメタン発酵槽等の増設工事が完了し処理能力が増加した。そのため、受入れ量が増加したので、バイオガス発電設備でもガスエンジン式発電装置が1台(発電容量:80kW)増設された。

本センターのシステム全体フローを図5.1.1に示した。主要設備仕様については第4章の表4.1.1に示したが、表5.1.1では主要な動力機器の電気容量をまとめている。さらに、本センターのメタン施設の外観写真を図5.1.2に示したが、外観写真では2基のBIMA消化槽とガスホルダーが写っている。

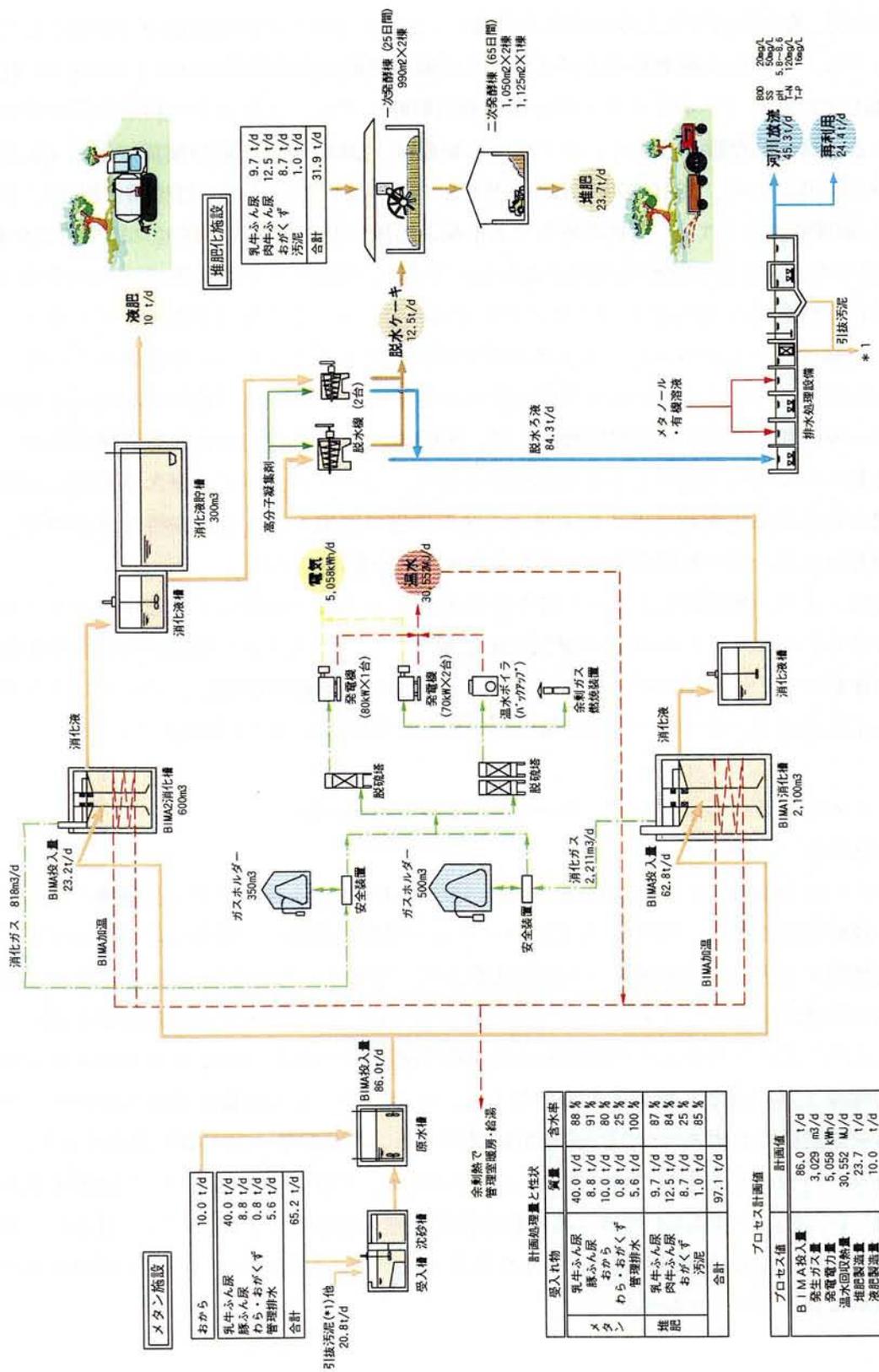


図 5.1.1 八木バイオエコロジーセンター増設後のシステムフロー

計画処理量と性状

受入れ物	質量	含水率
乳牛ふん尿	40.0 t/d	88 %
豚ふん尿	8.8 t/d	91 %
メタン	10.0 t/d	80 %
わら・おがくず	0.8 t/d	23 %
管理排水	5.6 t/d	100 %
堆肥	9.7 t/d	87 %
肉牛ふん尿	12.5 t/d	84 %
おがくず	8.7 t/d	25 %
汚泥	1.0 t/d	85 %
合計	97.1 t/d	

プロセス計画値

プロセス値	計画値
B I M A投入量	86.0 t/d
発生ガス量	3,029 m <sup>3</sup> /d
発電機出力	5,058 kWh/d
温水回収熱量	30,552 MJ/d
堆肥製造量	23.7 t/d
液肥製造量	10.0 t/d

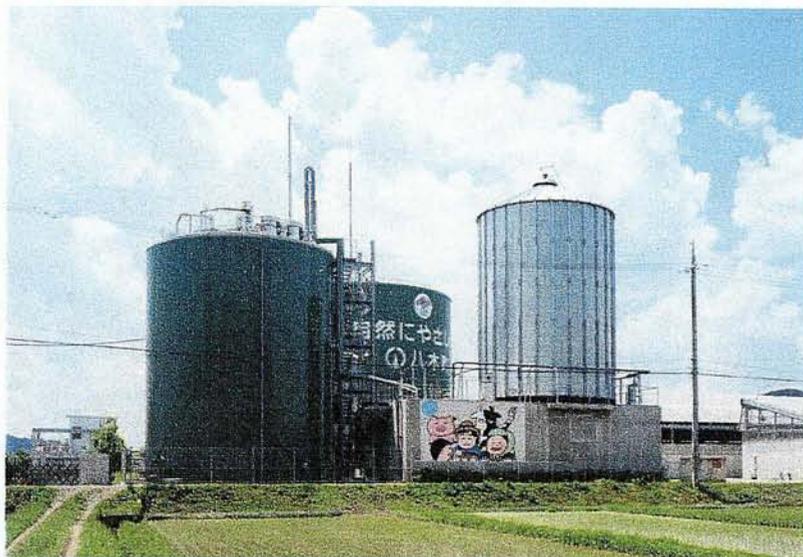


図 5.1.2 メタン発酵施設の外観写真

表 5.1.1 主要機器の電気容量

設備区分	機器名称	容量	設置台数	運転台数	運転時間
		kW	台	台	時間/日
メタン設備	受入槽攪拌機	3.7	1	1	8
	破碎機	7.5	1	1	8
	受入用破碎ポンプ	11.0	2	1	10
	BIMA投入ポンプ1	3.7	2	1	4
	BIMA投入ポンプ2	5.5	2	1	4
	水中ミキサー	5.6	2	1	20
	原水破碎ポンプ	15.0	2	1	11
	補助ブロワ1	18.5	1	1	4
	補助ブロワ2	11.0	1	1	4
	消化液槽攪拌機	7.5	2	2	24
	消化液汲出ポンプ	15.0	1	1	20
	凝集剤貯留槽攪拌機	2.2	1	1	24
	脱水機1	5.5	1	1	24
	脱水機2	1.7	1	1	24
	脱水機洗浄ポンプ	5.5	1	1	3
	濃縮スクリーン洗浄ポンプ	2.2	1	1	3
排水処理	間欠ばっ気ブロワ	15.0	2	1	4
	脱離液貯留槽攪拌ブロワ	2.2	1	1	24
	硝化用ブロワ	22.0	3	2	24
	膜分離ブロワ	15.0	2	1	24
	原水投入ポンプ	2.2	2	1	24
	再利用水ポンプ	3.7	1	1	3
	オゾン発生装置	5.5	1	1	24
	オゾン用コンプレッサー	11.0	1	1	24
堆肥施設	ロータリー攪拌機	22.2	2	2	4
	発酵ブロワ1~4	4.5	4	4	8
	発酵ブロワ5,6	2.2	2	2	8
	製品庫(袋詰機など)	23.0	1	1	8.5

## (2) メタン施設の概要

メタン施設における運転概要は第4章に記載したが、ここでは表5.1.1に示した機器の運転を中心に記述する。

ふん尿や食品残渣は、月曜から土曜の8:30~17:00に受入れを行っているので、この時間帯は受入れ設備の機器類が稼働している。日曜日は受入れがないため、受入れや前処理の機器類は原水槽の水中ミキサー等を除いて運転していない。BIMA消化槽以降のプロセスは、24時間連続運転しており、曜日による運転変動はない。補助ブロウは、BIMA消化槽の動力攪拌に必要なバイオガスの発生量が得られない場合に運転するもので、本センターの受入れは乳牛ふん尿が中心であるため、受入れ有機性廃棄物当りのガス発生量が35m<sup>3</sup>/t程度と少ないことから攪拌時に短時間運転する。2基のBIMA消化槽でメタン発酵された消化液は、消化液槽に入るが、ここでは汚泥の沈殿防止のため、たて型の攪拌機による緩速攪拌を行っている。消化液は、2基のスクリュープレス型脱水機で固液分離するが、脱水機はドラム細孔の目詰まり防止のため、井水を使用して定期的に洗浄ポンプで加圧して洗浄している。表5.1.1では、大型の機器のみを列記したが、これらの機器には小型の各種ポンプ等付属機器類が付設されている。

脱水機からのろ液は排水処理設備へ送られ、生物的脱窒・膜分離・凝集沈殿・オゾン処理・塩素消毒により処理されるが、これらの機器類は水槽水位などにより24時間連続で自動運転している。排水処理設備の主な動力機器はブロウであり、硝化用ブロウは連続で運転している。一方、間欠ばっ気ブロウや膜分離ブロウは、タイマー設定で決めた間欠運転をしている。また、オゾン発生装置は連続運転している。排水処理設備は、ブロウ等の電気消費量の大きい機器の運転時間が長いため、電力消費量が多くなる傾向がある。

増設工事で設置された高温発酵のBIMA消化槽からの消化液は、新設時と同様に脱水・排水処理工程へ送られるが、一部10t/日程度は液肥利用するために、消化液貯留槽に貯められ水稲や野菜などの液肥として利用できるような設備になっている。

## (3) 堆肥施設の概要

脱水ケーキや肉牛・育成乳牛のふん尿は、混合して好気発酵槽に入れられて、ロータリー攪拌機で25日間攪拌しながら一次発酵する。ロータリー攪拌機は2基あり、一日に1回攪拌を行うが、運転時間は1基が4時間程度である。二次発酵では、堆肥舎に搬送されて堆積発酵するが、約2週間に一度、ホイールローダで切り返しながら約65日間で発酵を終了する。一次発酵ならびに二次発酵の一部のエリアでは、発酵を促進するため床に空気配管を設置して、発酵ブロウからの空気を送っている。送気時間は、ブロウの運転タイマーで設定するが、一日8時間程度である。堆肥施設で製造された完熟堆肥は、バラあるいはフレコンバックや袋詰めして出荷するが、袋詰機の運転は堆肥の注文に応じてマニュアルで行う。

## (4) コージェネレーションシステム

本センターでは商用電力と発電電力を系統連系しており、発電電力は本センター内で使

用するとともに、余剰分については隣接する浄化センター（小規模下水処理場）や電力会社への売電を行っている。本センターの電気系統単線結線図を図 5.1.3 に示すが、商用電力からの引き込みは本センターと浄化センターを併せて引き込んでいる。

本センターのバイオガス発電設備には 3 台のガスエンジン式発電機が設置されており、発電および温水による熱回収のコージェネレーションを行っている。発電装置の仕様を表 5.1.2 に示す。3 台の発電装置は、発電機 1・2 の 2 台がオーストリア社製品で、残りの 1 台が米国社製品である。バイオガス用で発電容量が 100 kW 以下程度の比較的小型の発電機は、国内では需要が少ないためか国産の製品は少ない。3 台のガス発電機による発電で使用する燃料は、メタン発酵によって得られたバイオガスのみである。ガス発電機へは、バイオガス中の硫化水素濃度を乾式脱硫装置で 10ppm 以下に脱硫してから供給している。発電機 1・2 は、熱回収をジャケットならびに排ガスから行っているが、発電機 3 はジャケット部からの廃熱回収のみが行われ、排ガスからの回収は行っていない。発電機 3 は増設時に設置したが、冬期でも廃熱がメタン発酵槽の加温熱量以上にあつたので、排ガスからの廃熱回収は行わなかったためである。3 台の発電機の運転方法は、ガスホルダーの貯留容量に応じた 3 台の運転台数制御で、24 時間連続運転である。但し、運転の順序としては、増設時に設置した発電機 3 がベース運転しており、発電機 1・2 はガスホルダー容量に応じて、運転・休止を自動で行っている。バイオガス発電に伴う廃熱回収と温水利用のシステムを図 5.1.4 に示す。温水ボイラはバイオガスと重油のダブルフューエルタイプであり、本センターの運転開始時に重油を使用してメタン発酵槽の加温をするために必要である。また、メタン発酵の立上げ時にバイオガスのメタン濃度が安定しない初期の段階では、バイオガスを燃料にメタン発酵槽の加温を行う。以降バイオガス発電が順調に稼働していれば、温水ボイラを運転することはほとんどない。なお、ガスエンジンの廃熱回収は温水で行うが、熱の利用先として 2 基のメタン発酵槽と管理室の給湯・暖房があるが、余剰熱はラジエーターで放熱する。

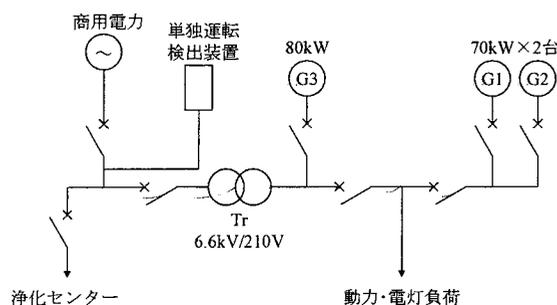


図 5.1.3 電気全体系統図

表 5.1.2 バイオガス発電装置の仕様

		発電機 1・2	発電機 3
発電機	出力	70 [kW]	80 [kW]
	電圧	210 [V]	208 [V]
	周波数	60 [Hz]	60 [Hz]
	相数	3φ	3φ
原動機	タイプ	ガスエンジン	ガスエンジン
	出力	76 [kW]×1,800 [rpm]	86 [kW]×1,800 [rpm]
	シリンダー数	直列 6 気筒	直列 6 気筒
熱回収	形態	温水	温水
	回収箇所	ジャケット・排ガス	ジャケット

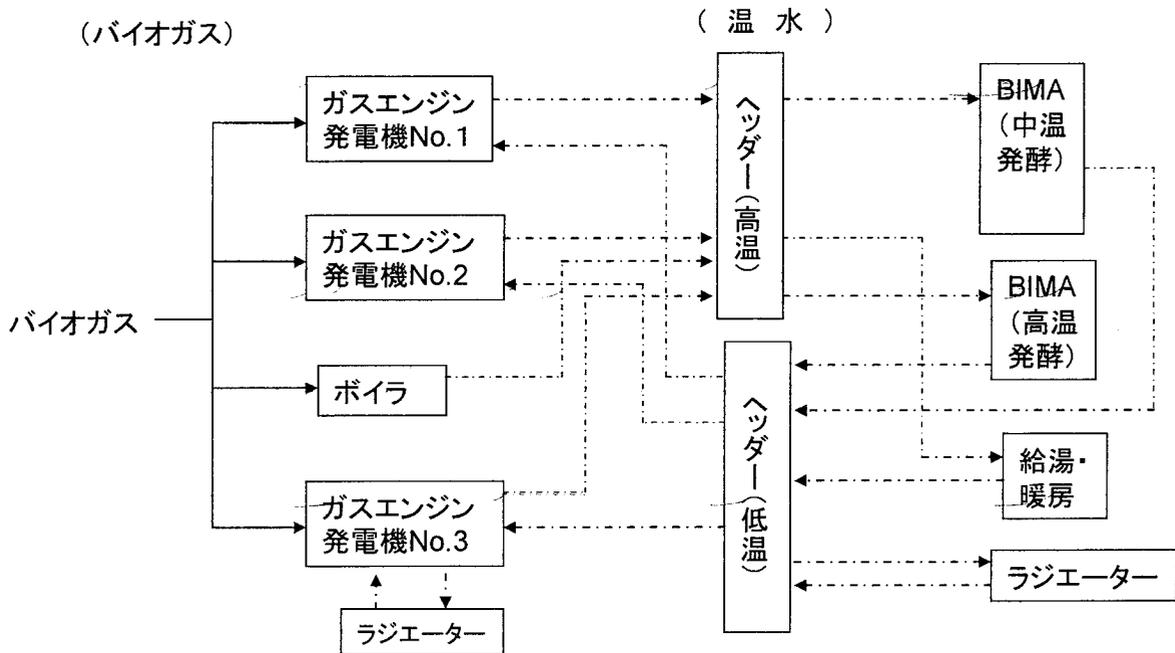


図 5.1.4 バイオガス発電の廃熱回収と温水利用のシステム

## 5. 2 八木バイオエコロジーセンターの運転実績

本節では、本センターのバイオガス発電を中心とした運転実績を増設後の運転が安定した2002年11月から2003年10月の1年間の値を以下に示す。

### (1) 受入量とバイオガス発生量

本センターで受入れたふん尿等の実績値を図5.2.1に示す。2002年11月～2003年10月の月平均の1日当りの受入量は、豚3.7t～5.9t(平均4.5t)、乳牛47.6t～58.6t(平均52.5t)、おから2.1～5.7t(平均3.2t)、肉牛2.6～7.1t(平均4.2t)、濃厚廃液1.6～8.7t(平均4.8t)である。合計受入量は平均値で69.2t/日となり肉牛ふん尿を対象にした堆肥施設の受入量を除き、概ね計画した量を受入れている。メタン施設の受入量は、豚・乳牛のふん尿、おから、濃厚廃液(2t/日程度は排水処理で使用)で、平均値で63t/日となり、乳牛ふん尿がそのうち83%を占めている。ふん尿・おから、原水槽、中温・高温発酵の消化液の各性状は表5.2.1に示す。BIMA消化槽への投入量は、上記の受入物以外に、排水処理の生物汚泥を約20t/日、場内の生活排水0.3t/日、各種洗浄排水などを含めて約86t/日である。投入スラリーの性状は表5.2.1に示す通り、TS(固形物)濃度が6.7%と、ふん尿混合としてはやや低濃度であるが、これは固液分離した乳牛のふん尿の受入れが多いのと排水処理の生物汚泥を混入させていることによる。また、本期間におけるBIMA消化槽の平均的な有機物容積負荷量は中温発酵槽が1.7kg-VTS/m<sup>3</sup>/日で高温発酵槽が2.0kg-VTS/m<sup>3</sup>/日である。

BIMA消化槽から発生し発電に使用されているバイオガス量は、図5.2.1に示す通り2槽の消化槽(投入量約86t/日)で平均値2,120Nm<sup>3</sup>/日(最小1,749～最大2,470Nm<sup>3</sup>/日)である。発生したバイオガスはほとんどが発電に使用されているが、一部のバイオガスは発電に使用されずに安全装置から放出されていた。そこで正確なバイオガス発生量を求めたと

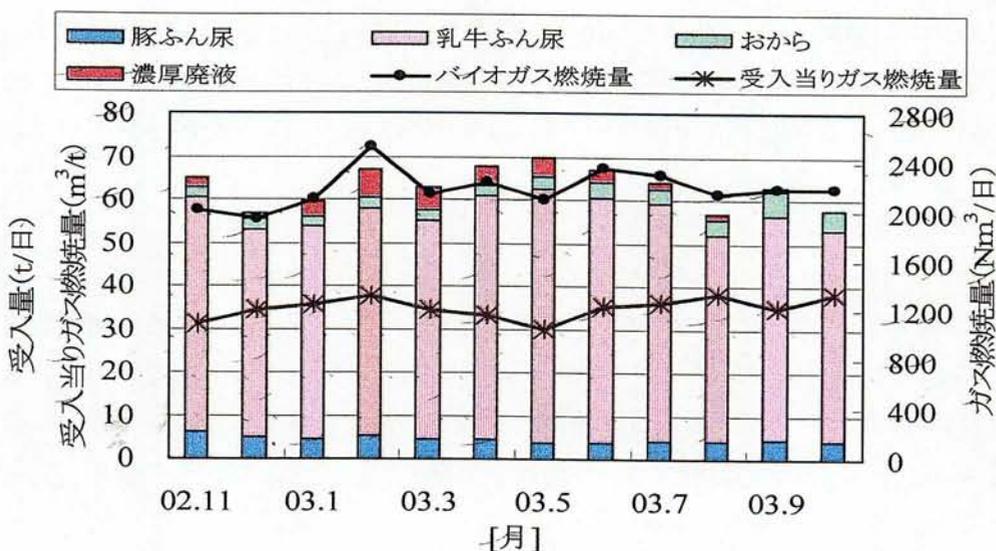


図 5.2.1 メタン施設の日平均受入量 (2002.11～2003.10 実績)

表 5.2.1 各受入物、原水およびメタン発酵消化液の性状

分析項目	乳牛ふん尿		豚ふん尿	おから	原水槽	消化液	
	混合	液分				中温メタン	高温メタン
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
TS(固形物)	135000	47500	62000	230000	66700	44500	47300
TS除去率	—	—	—	—	—	33.3%	29.1%
VTS(有機物)	112500	37500	51500	215900	55100	33300	34600
VTS除去率	—	—	—	—	—	39.6%	37.2%
COD(Cr)	130000	64000	82000	840000	71900	33100	35600
COD除去率						54.0%	50.5%
備考	1999年～2001年分析値				2002.9～2003.10の分析値		

ころ、2003年2月の実績では、中温消化槽が平均で2,489Nm<sup>3</sup>/日で、高温消化槽が747Nm<sup>3</sup>/日であった。このガス発生量に基づき受入れたふん尿や食品残渣当りのバイオガス発生量は、中温発酵が48.5Nm<sup>3</sup>/tであり、高温発酵が65.7Nm<sup>3</sup>/tで、高温発酵の方が中温発酵より約35%バイオガス発生量が多いことが分かった。バイオガス中のメタン濃度は53～60%で安定しており、中温発酵と高温発酵では、ほぼ同等のメタン濃度になっている。

本センターのメタン発酵では、2003年10月の調査で受入れしている有機物量の62%が乳牛のふん尿であり、おからが28%で乳牛ふん尿の占める割合が高かった。また、表5.2.1に示した様に、消化槽に投入された有機物の内約40%（VTSを指標）が分解されてバイオガスになっている<sup>3)</sup>。

## (2) バイオガス発電

### 1) 電力バランス

本センターにおける電力量のバランスを図5.2.2に示す。本センターにおける使用電力量は概ね発電電力によって賄えており、電力的には処理に必要な電力は自前で賄えているといえる。特に2003年に入ってから濃厚廃液の受入量が増えた事等によりバイオガスの発生量がやや増え、発電量は約3,500kWh/日前後を記録している。また、その結果、受電量の減少および売電量の増加にもつながっている。

次に、本センターにおける時刻毎の使用電力量を図5.2.3に示すが、平日と休日では主に昼間に運転パターンの違いが現れる。平日は畜産農家のふん尿や食品残渣の受入れがあり、

その他にも堆肥化装置や堆肥袋詰機などの運転により昼間の使用電力量が多くなる。それに対して、夜間については排水処理設備等 24 時間自動運転の機器のみの稼動のため、平日・休日ともに、似た運転パターンを示している。

本センターでは、発電機の運転は発生ガス量による運転台数制御を行っているため、多少の変化はあるものの、概ね一日を通して平滑な発電を行っている。その結果、先に述べ

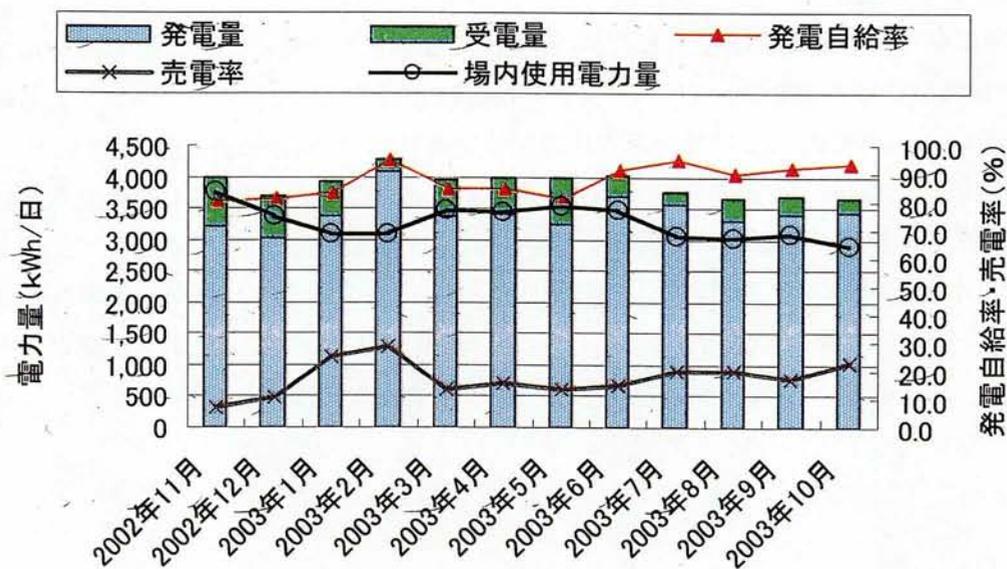


図 5.2.2 発電自給率と売電率

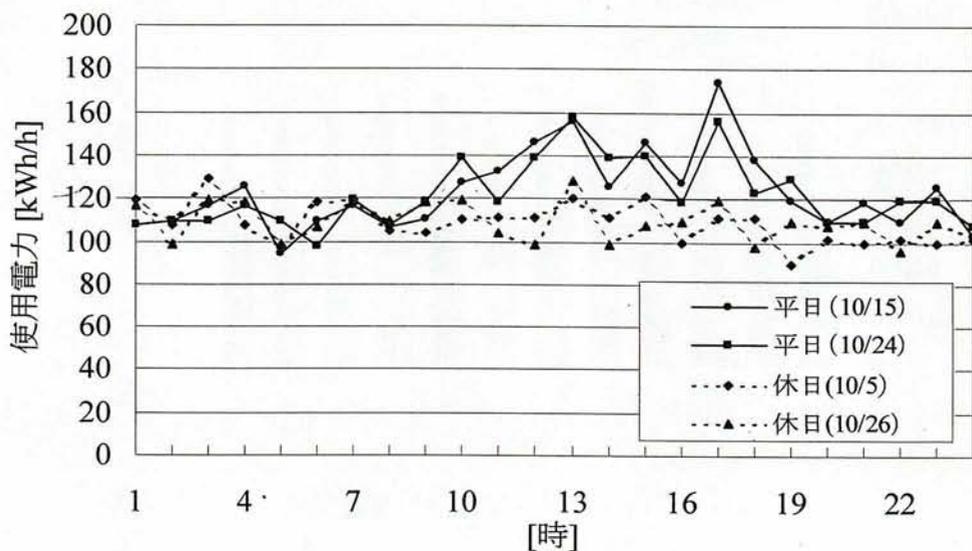


図 5.2.3 時間毎の電力使用量 (2003 年 10 月)

た通り月間値では場内使用電力を発電電力でほぼ賄えているものの、平日昼間の電力使用量のピーク時には、部分的に不足分を受電する結果となっている。図 5.2.2 は、本センターにおける使用電力量に占める発電電力量の割合を発電自給率として示している。ピーク時の受電により、本センター使用電力量における発電電力量の割合は 80~94%程度である。なお、1ヶ月当りの電力量での比較では、発電により 2003 年以降は場内負荷を賄えており、場外への売電率も発電電力の 7~29%を示している。

## 2) 発電効率と熱回収

図 5.2.4 に発電機の運転実績を示したが、発電機は 3 台とも季節による変動もほとんど無く 27%~30%の発電効率を示しており、安定的な運転を行っている。次に表 5.2.2 に発電機の各効率を示す。発電機 1・2 は廃熱回収用の配管を共有しているため熱回収効率は 2 台合わせての評価となるが、発電効率が 28.9%、温水による熱回収が 48.8%で総合効率として 77.8%を記録しており、安定した運転を行っている。3 号機は発電効率が 27.2%で、ジャケット水のみからの廃熱回収で排ガスからの回収を行っていないため、熱回収効率が発電機 1・2 より低い 36.6%であり、総合効率としては 63.8%にとどまっている。但し、排ガスからの回収を行えば発電機 1・2 と同様の総合効率が期待できると考えられる。

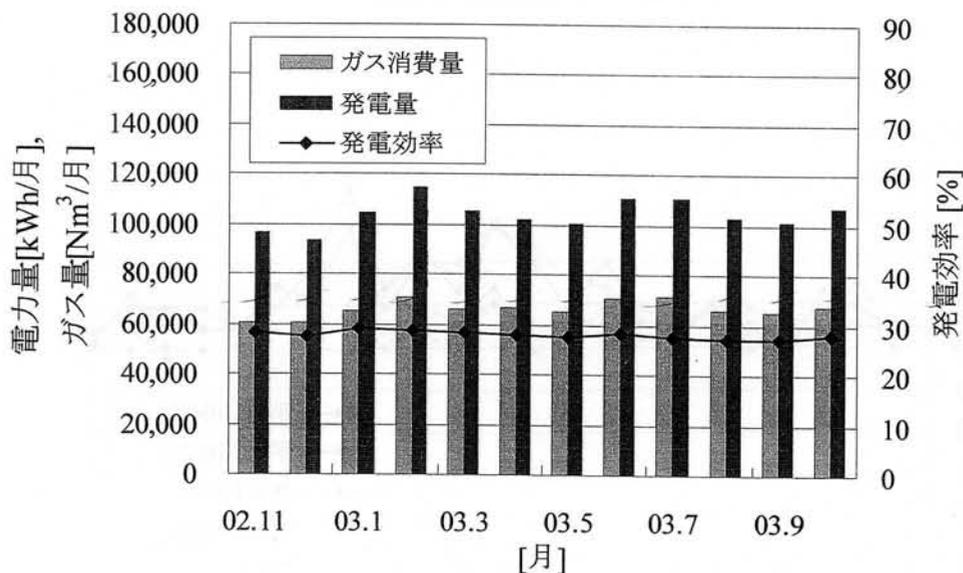


図 5.2.4 ガスエンジン発電機の発電効率

表 5.2.2 発電機 1,2,3 の各効率 (2003 年 2 月 8 日～3 月 1 日)

名称	発電量 (kWh)	発電効率 (%)	冷却水回収熱量 (MJ)	熱回収効率 (%)	総合効率 (%)
発電機 1・2	45,930	28.9	278,936	48.8	77.8
発電機 3	36,240	27.2	175,767	36.6	63.8
合計	82,170	28.1	454,703	43.2	71.4

### 3) ヒートバランス

本センターにおいては、施設内で必要な熱は全て発電機からの廃熱回収で賄っている。2003 年 1～2 月における発電機から回収した熱量の使用実測値を図 5.2.5 に示すが、回収熱量のうち約 43%程度はメタン発酵の加温に必要な熱量として使用し、その他に施設内の暖房・給湯に約 1%使用するものの 50%以上の熱が余剰分として大気に放熱されている<sup>4)</sup>。また、メタン発酵の加温に使用する熱量は、中温発酵が廃熱の 23% (5003MJ/日) で高温発酵が廃熱の 20% (4259MJ/日) であった。この間の各発酵槽への投入量と投入量当りの使用熱量を表 5.2.3 に示すが、投入量当りの熱量を比較すると高温発酵 (発酵温度 55℃) は中温発酵 (発酵温度 37℃) の約 3.8 倍である。本センターの場合には、増設の配置関係から高温発酵の温水配管が中温に比べて約 1.5 倍と長いことによる熱ロスの要素もあるが、高温発酵における加温エネルギーの観点からすると、中温発酵の方が効果的であることが分かる。

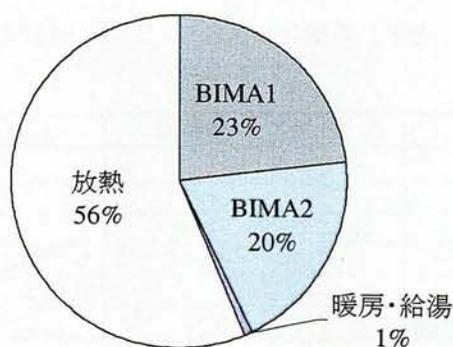


図 5.2.5 バイオガス発電の回収熱量の使用割合 (2003 年 2 月実測値)

表 5.2.3 中温・高温のメタン発酵の加温熱量比較 (2003 年 2 月実測値)

発酵種類 (発酵温度)	使用熱量 (MJ/日)	発酵槽への投入量 (t/日)	熱量/投入量 (MJ/t・日)
中温発酵 (37℃)	5,003	72.0	69.5
高温発酵 (55℃)	4,259	16.1	264.1

#### 4) 中温発酵と高温発酵における加温熱量

本センターにおける中温発酵と高温発酵の加温熱量は、表 5.2.3 で示したが、本測定結果と計算値の比較検討を行った。本センターの発酵槽における加温熱量の計算では、表 5.2.4 の計算条件に基づき試算した。試算で使用した中温・高温発酵槽の伝熱係数や総括伝熱係数は、本センターの発酵槽の構造に基づき表 5.2.5 となる。加温熱量の試算では、冬期の計算を行い、その際のメタン発酵への投入原水や外気温度などの設定値を表 5.2.6 に示す。これらの条件に基づき、中温発酵・高温発酵の冬期の加温熱量を試算した結果を表 5.2.7 にまとめた。2 基のメタン発酵槽の加温熱量に関して、計算結果と実測値の比較をしたものが表 5.2.8 になるが、この比較結果では中温発酵の加温熱量の実測値は計算値の 61%であり、高温発酵では実測値が計算値の 133%になっている。実測値と計算値では、原水の液温データが少ないことで計算値は正確さに劣るが、中温発酵の加温熱量は実測値が少ないので、温水循環水量の変動等の詳細な実測を再度行う必要があると考える。また、表 5.2.7 では、本センターにある中温発酵槽（容量 2,100m<sup>3</sup>）と高温発酵槽（600m<sup>3</sup>）で、断熱材の仕様を変えて運転温度を中温から高温へ、高温から中温へ変更した場合についても試算したので、その結果のみを記載した。断熱材は、中温発酵では壁が 100mm で屋上・底盤が 50mm、高温発酵では壁が 200mm で屋上・底盤が 100mm として計算している。発酵温度を中温（37℃）から高温（55℃）にすると、加温熱量は約 1.6～1.7 倍になるとの計算結果である。

表 5.2.4 中温発酵と高温発酵における加温熱量の計算条件

項目	名称	単位	中温発酵	高温発酵	備考
消化槽形状	容量	m <sup>3</sup>	2,100	600	
	外筒内径	m	14	9.7	
	内筒内径	m	2	1.5	
	槽高内寸	m	17.7	12.65	
	外壁材質		鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート	
	温水パイプ埋込み位置	m	0.04	0.04	液面からの位置
消化槽断熱	外壁材質		フォームポリスチレン	発泡ウレタン	
	外壁断熱厚さ	mm	100	200	
	屋上・底盤材質		フォームポリスチレン	フォームポリスチレン	
	同上断熱厚さ	mm	50	100	
運転条件	設計投入量	m <sup>3</sup> /日	62.8	23.2	
	最低投入液温(冬期)	℃	15	15	
	同上(夏期)	℃	20	20	
	運転温度	℃	37	55	
	原水比熱	MJ/t・K	4.186	4.186	
外気温 (設計値)	冬最低外気温	℃	0.5	0.5	冬期
	夏最低外気温	℃	23.2	23.2	夏期

表 5.2.5 中温・高温発酵槽の伝熱係数と総括伝熱係数

熱伝達率			総括伝熱係数 (w/m <sup>2</sup> ・K)			
$\alpha 1$ :	壁-気体(大気・ガス)の熱伝達率	23.3 W/m <sup>2</sup> ・K	区分	中温発酵	高温発酵	
$\alpha 2$ :	壁-スラリーの熱伝達率	348.8 W/m <sup>2</sup> ・K	①消化槽天井面	0.567	0.316	
$\alpha 3$ :	壁-土壌の熱伝達率	5.8 W/m <sup>2</sup> ・K	②消化槽壁面(気層部)	0.313	0.166	
$\lambda 1$ :	断熱材の熱伝導率	0.035 W/m・K	③消化槽壁面(液相部)	0.317	0.167	
$\lambda 2$ :	壁材の熱伝導率	1.6 W/m・K	④消化槽壁面(地上部)	0.317	0.167	
$\delta 1$ :	断熱材の厚さ	天井(R)	0.1 m	⑤消化槽壁面(地下部)	0.305	0.164
		側壁(W)	0.2 m	⑥消化槽底盤面	0.506	0.299
		底盤(B)	0.1 m			
$\delta 2$ :	壁材の厚さ	天井(R)	0.35 m			
		側壁(W)	0.35 m			
		底盤(B)	0.5 m			

(注)  $\alpha$  及び  $\lambda$  値は、下水道施設設計指針と解説(1984年版)p.456による。

表 5.2.6 メタン発酵への投入原水や外気温度などの設定値

名称	単位	中温発酵 (冬期)	高温発酵 (冬期)
槽内温度	°C	37	55
投入温度	°C	15	15
外気温	°C	0.5	0.5
投入量	t/日	62.8	23.2
原水比熱	MJ/m <sup>3</sup> ・k	4.186	4.186
原水加温熱量	MJ/日	5783.4	3884.6

表 5.2.7 中温発酵・高温発酵の冬期における加温熱量の試算結果

項目	発酵槽容量	m <sup>3</sup>	2,100		600	
			冬期		冬期	
設定	シーズン		中温(運転)		高温(計算)	
	発酵区分		中温(計算)		高温(運転)	
	投入量	t/日	62.8	62.8	23.2	23.2
加温熱量	原水加温	MJ/日	5,783.4	10,515.2	2,136.5	3,884.6
	放散熱量	MJ/日	2,098.5	2,332.7	541.5	622.2
	合計熱量	MJ/日	7,881.9	12,848.0	2,678.1	4,506.8
	単位熱量	MJ/t・日	125.5	204.6	115.4	194.3
熱量差	高温-中温	MJ/日	4966.1		-1828.7	
熱量比率	高温/中温	%	163.0		168.3	

表 5.2.8 中温・高温発酵の加温熱量の計算結果と実測値の比較

		区 分		中温発酵	高温発酵
実測値	期 間		2003年2月8日～3月1日		
	加温熱量	MJ/日	5003	4259	
	投入量	t/日	72	16.1	
	単位熱量	MJ/t・日	69.5	264.1	
計算値	期 間		冬期		
	単位熱量	MJ/t・日	113.7	198.6	
	実測/計算	%	61.1	133.0	

### 5. 3 エネルギー生産施設としての評価

#### (1) 八木バイオエコロジーセンターの評価<sup>4)</sup>

メタン発酵施設は、発酵槽の加温エネルギーが最も多い冬期はエネルギーバランスが悪くなり、発酵槽への投入物当りのバイオガス発生量が少ないと外部からの加温熱量が必要になる。ここでは本センター内で熱量を最も消費する冬期の実績をもとに、余剰エネルギーによるエネルギー生産施設としての検討を行う。本センターの冬期のエネルギーバランスの一例として、図 5.3.1 に 2003 年 2 月～3 月における測定値を示す。測定結果から、電力に関しては総電力量の 5%程度受電をしているもののほとんどが発電電力で、そのうち約 75%を本センター内で使用し、残りの 25%を売電している。それに対して、熱に関しては温水による廃熱回収熱量の約 43%程度をメタン発酵に必要な熱量として使用し、その他暖房・給湯にわずかに使用する以外は、56%の熱が余剰分として大気に放熱されている。発電機 3 が排ガスからの熱回収を行っていないことを考えると、実際には、余剰熱はさらに増えることとなる。また、夏期ではメタン発酵の加温熱量が少なくなることから大気放熱量はさらに多い。本センターではこの熱の有効利用として植物の温室栽培実験を行っているが、現時点ではまだ余剰熱が多い。この熱の有効利用を行うことによって、バイオガスプラントが電力のみでなく熱利用を含めた総合的なエネルギー生産施設としての価値を高めることになる。

上記の図 5.3.1 は本センターにおける実測値であるが、この間のおから受入量は 2.2t/日であり、本センターの計画受入量 10t/日に比べると 22%でしかない。おからはバイオガスの発生量が多いため、図 5.3.1 の受入量にさらにおからが 5t/日増量し、おからの受入量が 7.2t/日になった場合を試算した。試算結果は図 5.3.2 に示すが、試算に当っては発電機の発電効率を 29%、熱回収効率を 49%とし、おから 5t/日の増量によるバイオガス発生量は 700Nm<sup>3</sup>/日とした。試算結果では、発電量は 1,210kWh/日増加して全てが売電量と扱えるので売電量が実測値の 2.1 倍になり、また温水は余剰熱量が 19,601MJ/日で実測値の 1.6 倍になる<sup>5)</sup>。



図 5.3.1 エネルギーバランス実測値  
(2003年2月8日～3月1日：おから受入れ量 2.2t/日)

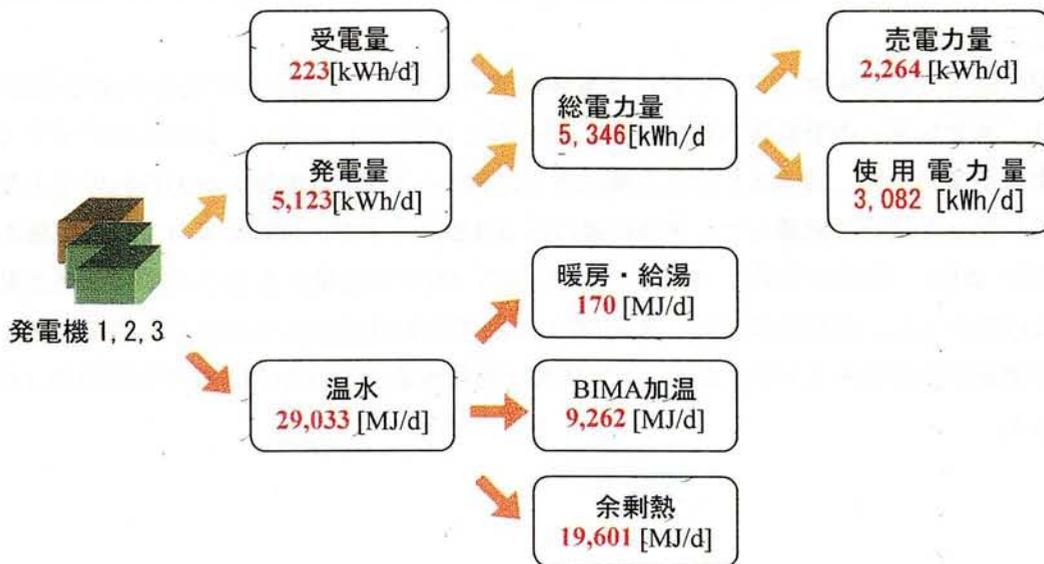


図 5.3.2 エネルギーバランス試算値<sup>5)</sup>  
(おから 7.2t/日、他は 2003年 2.8～3.1 実測値による)

表 5.3.1 は、本センターの使用電力を各設備毎に実測した内訳<sup>5)</sup>を示している。測定結果から分かる様に、メタン発酵設備で使用する電力は使用電力量の 1/3 程度である。特に多いのが排水処理設備で、全体使用電力量の半分近くを占めており、脱水・排水処理設備ならびに堆肥化設備での使用電力が 2/3 を占めている。現在日本では、固形堆肥を有機肥料として使用しているが、消化液を液肥で使用できると、使用電力の 64%を占めている脱水・排

水処理・堆肥化設備が不要となり、売電出来る電力比率が大幅に増え、バイオガスプラントのエネルギー生産施設としての評価も高まる。欧州のバイオガスプラントでは消化液を液肥として利用できる施設が多く、発電した電力の多くが売電されている<sup>6)</sup>。日本国内でも消化液を水稻や野菜栽培等に使用する試みがされており、京都府八木町では液肥使用のマニュアルを作り、普及・促進を目指している<sup>7)、8)、9)</sup>。

表 5.3.1 主要設備毎の使用電力量 (2003.12)<sup>5)</sup>

設備名称	使用電力量 [kWh/d]	比率 [%]
前処理・メタン発酵・管理建家設備	1,122	36.1
脱水設備	118	3.8
排水処理設備	1,747	56.1
堆肥化設備	123	4.0
合計	3,110	100.0

図 5.3.2 は、本センターで消化液を全量液肥利用した場合を想定して、表 5.3.1 の脱水・排水処理・堆肥化の各設備に使用していた電力を売電できた場合を示している。この様に消化液を液肥として利用することにより、発電電力量の約 70%を売電できる試算となる。また、回収した熱も建物や温室の暖房ならびに各種の乾燥などに利用すれば、電気・熱の総合利用効率が大幅に向上する。特に、熱利用は、余剰熱が多くなる夏期や中間期にいかにも有効利用するかが、今後の課題でもある。その他に脱水・排水処理設備は薬品の使用量も多いことから、液肥の利用は運転費のかかる薬品使用量を減らすことにもなり、二重の効果が得られる。また、今後このような畜産ふん尿や食品廃棄物といった有機性廃棄物の処理が義務づけられていく中で、処理に必要なエネルギーをカーボンニュートラルなバイオガスのエネルギーで賄うことは CO<sub>2</sub> 排出量の抑制にも多いに貢献できる。

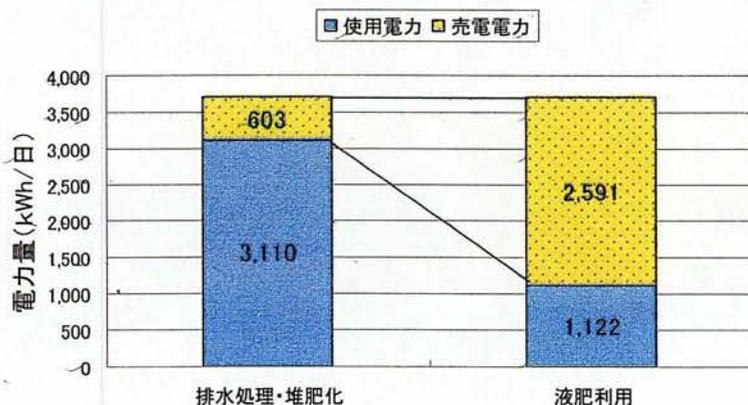


図 5.3.2 液肥利用による売電電力量の増加予測 (2003.12 実績より)

## (2) 欧州におけるバイオガスプラントとエネルギー供給

欧州では、バイオガスプラントを電気・熱のエネルギー供給施設として位置付けている。欧州のバイオガスプラントでは、畜産ふん尿や食品残渣や生ごみなどを原料にして、バイオガスによる発電で電力を電力会社へ売電し、余剰廃熱を地域暖房へ熱供給している。消化液は液肥として圃場へ還元している。そのため、欧州のシステムからすると本センターにある脱水や排水処理設備ならびに堆肥設備が不要なので、バイオガスプラントにおける場内での電気や熱の利用量は少なく、プラント場外へ供給できるエネルギーが多くなっている。デンマークのバイオガスプラントで共同処理を行っている約 20 施設の総括では、プラント内の電力消費量が受入れているバイオマス 1t 当り 4~5kWh で、熱の消費量が 15~25kWh (メタン発酵の加温や建家暖房など) である。この消費量は、バイオマス 1t から約 30m<sup>3</sup> のバイオガス (熱量: 23MJ/m<sup>3</sup>) が回収できたとして、14~21% のエネルギーを消費している<sup>10)</sup>。本センターの実績では、電力消費量が受入れバイオマス 1t 当り 52kWh、熱の消費量が 33kWh になっている。本センターの電力と熱消費量が多いのは、消化液の脱水・排水処理設備や堆肥設備があることと、排水処理設備の余剰汚泥もメタン発酵に入れていること等の理由による。表 5.3.2 は、デンマークのバイオガスプラントにおける電力と熱の消費割合の一例を示したもので、2 施設の電力消費はそれぞれ 5.4% と 10.8% である。また、熱の消費割合はそれぞれ 7.7% と 9.8% である。これらの数値から、この 2 施設が場外へ供給できる電気と熱を合わせた割合は、それぞれ約 87% と 80% にもなる<sup>11)</sup>。

デンマークやドイツのバイオガスプラントでは、畜産ふん尿だけでなく、各種の有機性残渣や生ごみを少量受入れている。この理由は、ふん尿のみよりバイオガス発生量が多くなることや単価の高い受入れ費で収入が改善されることもある。図 5.3.3 は、デンマークにおける共同処理場 20 施設のふん尿以外に受入れている有機性残渣の比率とバイオガス生産効率を示したものである<sup>11)</sup>。この図から、ふん尿のみではメタン投入原料 1t 当り 20m<sup>3</sup> 程度であるが、有機残渣を入れることにより 40~100m<sup>3</sup> にまで増加していることが分かる。

表 5.3.2 欧州バイオガスプラントの電気・熱の場内使用と場外供給 <sup>1)</sup>

プラント名称		Ribe Plant	Lintrup Plant
		(デンマーク)	(デンマーク)
運転開始	年	1990年	1990年
バイオマス受入量	トン/年	15,534	14,516
バイオガス発生量	m <sup>3</sup> /年	369,000	465,000
発電量	k Wh/年	893,000	1,013,000
バイオガス熱量	k Wh/年	2,574,419	3,244,186
発電効率	%	34.7	31.2
プラント消費熱量	k Wh/年	198,000	317,100
プラント消費熱量割合	%	7.7	9.8
プラント消費電力	k Wh/年	48,500	109,400
プラント消費電力割合	%	5.4	10.8
電気・熱外部供給割合	%	86.9	79.4
備考		バイオガス熱量 : 25,080 k J/m <sup>3</sup>	

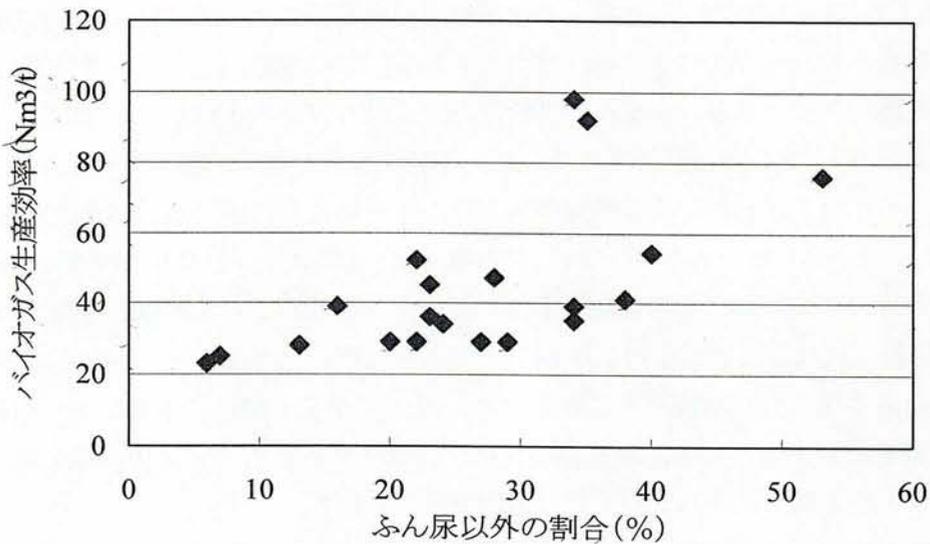


図 5.3.3 ふん尿以外の有機性残渣とバイオガス生産効率 <sup>1)</sup>  
(デンマークの共同処理施設 20 施設)

#### 5. 4 日本におけるバイオガスプラントの評価

本センターの運転実績に基づき、日本のバイオガスプラントにおけるエネルギー施設としての試算を行ったので、その結果を表 5.4.1 に示す。表 5.4.1 では、本センターの 1 年間の実績値ならびに消化液を全量液肥として利用した場合およびおから 5t/日（バイオガス発生量：140Nm<sup>3</sup>/t）の受入れ量が増加して計画値に近づいた場合の電気・熱の外部供給量と割合を試算した。また、日本国内で発生する畜産ふん尿（発生量約 90 百万 t/年）や食品残渣ならびに生ごみ（発生量約 19 百万 t/年）<sup>12)</sup> の 40%を本センターと同様の施設でメタン発酵したと想定して、バイオガスプラントの発電量・余剰熱を試算した。試算結果より、下記のように整理できる。

①本センターでメタン発酵消化液を全量液肥利用することで、発電電力の約 75%を外部へ供給できる。

②本センターでおからの受入れを 5t/日増加することにより、発電電力の 25%を外部へ供給できる。

③本センターで全量液肥利用し、おからの受入れ量を 5t/日増加すると外部へ供給できる電力容量は 135kWである。

④日本国内のふん尿や食品残渣・生ごみの 40%をバイオガスプラントでメタン発酵することにより、2.0Gm<sup>3</sup>/年のバイオガスが得られる。ガスエンジンによるコージェネレーションを行うことで、3.3GWh/年の電力と 4.7GWh/年の廃熱回収ができる。

⑤④の発生エネルギーの内、脱水・排水処理を行う本センターの方式であれば、56.2%の電気・熱を外部へ供給できる。外部への供給電力は発電量の約 35%であるが、1.15GWh/年（電力容量：13 万 kW）で原油換算量は 29 万 kL/年になる。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できると、外部への供給電力は 2.60GWh/年（電力容量：30 万 kW）で原油換算量は 65 万 KL/年と試算できる。この外部供給電力量は、2002 年 12 月に閣議決定されたバイオマスニッポン総合戦略の新エネルギー導入目標値であるバイオマス発電 33 万 kW に近い電力量である<sup>13)</sup>。なお、燃料電池は、ガスエンジンに比べて発電効率（40～50%）が高いので、将来燃料電池によるバイオガス発電が普及すれば、発電量は本試算の 1.5 倍程度になることが予想される。

また、畜産ふん尿や食品残渣・生ごみのバイオガスプラントでは、本センターの運転実績や上記の試算結果から、有機性廃棄物のメタン発酵で発生するバイオガス量と発電量ならびにプラント使用電力に関して、下記のようにまとめられる。

①有機性廃棄物のメタン発酵で、持込み廃棄物 1t から 30～35Nm<sup>3</sup>のバイオガス発生量があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式でもプラント内の使用電力量を賄える。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の 75%程度をプラント外部へ供給できる。

②持込み有機性廃棄物 1t から 40～45Nm<sup>3</sup>のバイオガス発生量があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式では、プラント使用電力量を賄えかつ外部へ発電電力量の 25～

表 5.4.1 日本のバイオガスプラントにおける電気・熱供給量の試算

プラント名称		八木バイオエコロジーセンター試算				国内バイオガスプラント試算		
		2002/11~ 2003/10 実績	全量液肥利用試 算	おから5t/d増量	おから5t/d増量 +全量液肥利用	排水処理・堆肥+ おから5t/d増量	全量液肥利用+ おから5t/d増量	
計算条件		A	B	C	D	E	F	
試験ケース		あり	なし	あり	なし	あり	なし	
脱水・排水処理設備		あり	なし	あり	なし	あり	なし	
液肥利用		なし	あり	なし	あり	なし	あり	
おから5t/d増加		なし	なし	あり	あり	あり	あり	
受入量	バイオマス受入量	t <sub>干</sub> /年	23,003	23,003	24,503	24,503	43,955,600	43,955,600
	ふん尿量	t <sub>干</sub> /年	20,805	20,805	20,805	20,805	36,195,600	36,195,600
	残渣・生ゴミ	t <sub>干</sub> /年	2,227	2,227	3,698	3,698	7,760,000	7,760,000
バイオガス量	バイオガス発生量	m <sup>3</sup> /年	772,940	772,940	982,940	982,940	1,991,290,000	1,991,290,000
	ふん尿由来	m <sup>3</sup> /年	---	---	---	---	904,890,000	904,890,000
	残渣・生ゴミ由来	m <sup>3</sup> /年	---	---	---	---	1,086,400,000	1,086,400,000
	受入当りガス発生量	m <sup>3</sup> /t	34	34	40	40	45	45
発電・熱回収	発電量	kWh/年	1,250,388	1,250,388	1,590,106	1,590,106	3,306,467,581	3,306,467,581
	回収熱量	kWh/年	2,500,776	2,500,776	3,180,212	3,180,212	4,723,525,116	4,723,525,116
	発電効率	%	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
プラント消費量	プラント消費熱量	kWh/年	-750,233	750,233	-750,233	750,233	-1,362,623,600	1,362,623,600
	受入当り消費熱量	kWh/t	33	33	31	31	31	31
	プラント消費熱量割合	%	30.0	30.0	23.6	23.6	28.8	28.8
	プラント消費電力	kWh/年	1,194,818	317,599	1,194,818	403,848	2,153,824,400	703,289,600
	受入当り消費電力	kWh/t	52	14	49	16	49	16
	プラント消費電力割合	%	95.6	25.4	75.1	25.4	65.1	21.3
外部供給量	電気・熱外部供給割合	%	48.1	71.5	-59.2	75.8	56.2	74.3
	電気・熱外部供給量	kWh/年	1,806,113	2,683,333	2,825,267	3,616,236	4,513,544,698	5,964,079,498
	原油換算量	kl/年	452	671	706	904	1,128,386	1,491,020
	電気外部供給量	kWh/年	55,570	932,789	395,288	1,186,257	1,152,643,181	2,603,177,981
	原油換算量	kl/年	14	233	99	297	288,161	650,794
外部供給電気設備容量	kW	6	106	45	135	131,580	297,166	

(試算条件)

- ①国内のふん尿発生量は 90,489 千 t/年、食品残渣・生ごみの発生量は 19,400 千 t/年とし、<sup>12)</sup> その 40%をバイオガスで受入れるとした。
- ②バイオガスの熱量は、21.3MJ/Nm<sup>3</sup>とした。
- ③バイオガス発生量は、ふん尿が 25Nm<sup>3</sup>/t、食品残渣・生ごみが 140Nm<sup>3</sup>/tとした。
- ④ガスエンジン式発電で発電効率は 28%、熱回収効率は 40%とした。
- ⑤原油換算は、1kWh=0.250 とした。

35%を供給することができる。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の75～80%程度をプラント外部へ供給できる。

なお、畜産ふん尿処理をメタン発酵以外の方式で実施した場合には、処理に要する全電力を外部からの供給電力に依存することになるので、その電力消費量を試算する。メタン発酵以外の畜産ふん尿処理の方法は前掲の表 2.1.3 に示したが、メタン発酵消化液を脱水・排水処理するバイオガス方式に相当するのは、ふん尿の分離と排水処理・堆肥化の方式であり、処理システムフローの例を図 2.1.2 に示した。このふん尿分離・排水処理・堆肥化方式の使用電力量は、放流水の窒素規制がある場合でかつふん尿処理能力が 50t/日規模であれば、受入れるふん尿 1t 当りに 40～50kWh と考えられ、バイオガス方式に近い電力使用量である<sup>14)</sup>。このふん尿分離・排水処理・堆肥化方式のふん尿処理に伴う単位使用電力量から、日本国内の畜産ふん尿発生量の 40%を処理すると次の使用電力量になる。

$$36,195,600\text{t/年} \times 40 \sim 50\text{kWh/t} = 1,448,000,000 \sim 1,810,000,000 \text{ kWh/年}$$

上記の使用電力量を年間 365 日、一日 24 時間一定とすれば、165,000～207,000kW の電気容量になる。この数値は、表 5.4.1 の国内バイオガスプラントで排水処理・堆肥化する方式（ケース E）で試算した外部へ供給できる電力容量である 131,580kW の 1.3～1.6 倍に相当する。この試算結果から、国内の畜産ふん尿や食品残渣・生ごみをバイオガスプラントで処理する場合には、メタン発酵消化液を排水処理する方式においても、外部へ供給できる電力容量が 131 千 kW 確保されるが、メタン発酵以外の方式では畜産ふん尿の処理だけでこの電気容量の 1.3～1.6 倍に相当する電力量が消費されることになる。電力使用量の側面からみると、家畜ふん尿や食品残渣・生ごみのバイオガスプラントでは電力を自給し一部を外部供給できるが、メタン発酵以外の方式で行う場合にはプラント使用電力を外部から購入することになり大きな違いがあることが分かる。

以上のことから、畜産ふん尿や食品残渣・生ごみのバイオガスプラントによる処理とエネルギー回収は、電気や熱を外部供給できること等から、有効な方法であることが分かる。

## 5. 5 結言

畜産ふん尿やおから等を受入れてメタン発酵している本センターの2002年11月～2003年10月における1年間の運転実績を整理した。この運転データから、メタン発酵を利用したエネルギー自立型有機性廃棄物処理が行えることを確認でき、またバイオガスプラントの日本におけるエネルギー供給施設としての評価を行った。

①本センターでは、2003年2月の実績では受入れた有機性廃棄物は乳牛のふん尿が中心で約63t/日であるが、バイオガス発生量は受入れ量当り中温発酵48.5Nm<sup>3</sup>/t、高温発酵65.7Nm<sup>3</sup>/t発生した。

②3台のガスエンジン発電機による発電で、発電効率27.2～28.9%が得られた。総合効率は、ジャケット・排ガスからの熱回収している発電機が熱回収効率48.8%で総合効率が77.8%であった。また、ジャケットのみから熱回収している発電機は同36.6%で総合効率が63.8%であった。

③本センターは、発酵残渣を脱水→堆肥化・排水処理しているが、2003年以降は発電電力で場内負荷をほぼ賄っている。また同時に、余剰電力が発電量の7～29%発生している。

④廃熱回収した熱は、冬期でもその半分程度は余剰熱として放熱されている。熱の有効利用が今後の課題である。

⑤中温発酵と高温発酵の加温エネルギーの実測値と計算値の比較を行った。中温発酵では計算値の61%の加温熱量で、高温発酵は同133%であった。中温発酵の加温熱量が計算値に比べて低いので、再調査が必要である。

⑥欧州のバイオガスプラントでは、場外への電力・熱供給割合が高いが、本センターでも発酵残渣を全て液肥として使用できれば、発電電力の70%程度を外部へ供給することができる。

⑦日本の畜産ふん尿・食品残渣・生ごみの40%をバイオガスプラントでメタン発酵し、本センターと同様にコージェネレーションを行うと、外部への供給電力は1.15GWh/年（電力容量：13万kW）で原油換算量は29万KL/年になる。また、消化液を全量液肥利用できると、外部への供給電力は2.6GWh/年（電力容量：30万kW）で原油換算量は65万KL/年と試算でき、この外部供給電力量は、バイオマスニッポン総合戦略が示した2010年の新エネルギー導入目標値であるバイオマス発電33万kWに近い電力量である。

⑧畜産ふん尿や食品残渣・生ごみのバイオガスプラントでは、有機性廃棄物のメタン発酵で発生するバイオガス量と発電量ならびにプラント使用電力に関して、下記にまとめられる。

・有機性廃棄物のメタン発酵で、持込み廃棄物1tから30～35Nm<sup>3</sup>のバイオガス発生があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式でもプラント内の使用電力量を賄える。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の75%程

度をプラント外部へ供給できる。

・持込み有機性廃棄物 1t から 40~45Nm<sup>3</sup> のバイオガス発生量があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式では、プラント使用電力量を賄えかつ外部へ発電電力量の 25~35% を供給することができる。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の 75~80% 程度をプラント外部へ供給できる。

⑧バイオガスプラントでは、外部へ電力や熱の供給ができるが、他の方式ではバイオガスプラントで使用すると同程度の電力を購入する必要がある。この点からもバイオガスプラントが、エネルギー供給施設として有効であることが分かる。

## 【第5章 参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁新エネルギー対策課：経済産業省のバイオマス導入促進施策、2003.11
- 2) 中川悦光・小川幸正・筒井直義：エネルギー再生型畜産廃棄物処理システムにおけるコージェネレーションシステム、コージェネレーションシンポジウム'98 発表抄録集、日本コージェネレーションセンター、pp.191～199、1998.11
- 3) 小川幸正・藤田正憲・中川悦光：ふん尿・食品残渣のメタン発酵施設における運転データの解析、廃棄物学会論文集、Vol.14、NO.5、pp.258～267、2003
- 4) 小川幸正・加藤顕・原達己・中川悦光：バイオガス発電プラントの運転実績と考察（その1・その2）、空気調和・衛生工学会 平成15年度学術講演会講演論文集、pp.1781～1788、2003.9
- 5) 京都府八木町：バイオマス・メタン発酵設備からのエネルギー有効利用事業調査成果報告書、京都府八木町、pp.9～33、2004
- 6) Heinz Schulz・Barbara Eder・浮田良則訳：バイオガス実用技術、オーム社、pp.214～216、2002.3
- 7) 中川悦光：ふん尿とエネルギー利用による循環型社会を目指してー八木バイオエコロジーセンターの稼動状況の報告ー、システム農学、19（1）、pp.9～20、2003.9
- 8) Kun-Zhi Li, Tatsuya Inamura, Mikio Umeda: Growth and Nitrogen Uptake of Paddy Rice as Influenced by Fermented Manure Liquid and Squeezed Manure Liquid、 Soil Sci. & Plant Nutr.、49(3)、pp.463～467、2003
- 9) 八木町農業技術者会：やぎバイオグリーン液による野菜の施肥方法、2003
- 10) L.Ellegaard: Large scale manure based biogas plants in Denmark Configuration and operation experience, Green house Gases and Animal Agriculture、GGAA、pp.239～240、2002
- 11) 佐々木市夫他：欧州諸国における循環型農業の発展とバイオ熱エネルギー市場の形成に関する比較研究、平成12～14年度科学研究費補助金研究成果報告書、pp.24～35、2003.3
- 12) 環境省ホームページ、2004.1
- 13) 経済産業省ホームページ、2003.11
- 14) 小川幸正・原達己・中川悦光：畜産ふん尿処理における消化ガス発電と地球温暖化抑制の効果、クリーンエネルギー、日本工業出版、2000.6、pp.40～44、2000

## 第6章 まとめと将来展望

### 6.1 まとめ

本研究は、日本国内に大量に発生する家畜ふん尿、食品残渣、生ごみなどの水分の多い高濃度有機性廃棄物の処理とエネルギー回収の方法としてメタン発酵とバイオガスによるコージェネレーション技術ならびにエネルギー自立型バイオガスプラントの運転管理に関するものである。メタン発酵は古くから実用化されている技術ではあるが、高濃度有機性廃棄物への採用は、技術的な問題や他のエネルギーとの経済比較等から、日本では広く普及するまでには至らなかった。本研究では、畜産ふん尿や食品残渣を対象にメタン発酵・ガス発電・コージェネレーションを採用している八木バイオエコロジーセンターを事例として、中温メタン発酵の運転性能、中温と高温メタン発酵の実運転データからの比較、エネルギー供給施設としての評価を通じ、エネルギー自立型バイオガスプラントを提案することを目的に行われた。本研究の成果をまとめると以下ようになる。

第1章では、家畜排せつ物や食品廃棄物等のバイオマスが処理と資源化利用の観点から法整備がなされ、メタンがカーボンニュートラルなエネルギーとして期待されている背景を述べ、本研究の目的ならびに研究の構成を示した。

第2章では、日本で大量に発生する高濃度有機性廃棄物の現状を把握するために、バイオマス資源の観点から発生量・性状ならびにリサイクル状況を整理して、その中で水分の多い有機性廃棄物が処理・リサイクルが難しいことを明らかにした。次いで、これらの水分の多い有機性廃棄物のメタン発酵に関する最近の研究状況を本研究に関連する項目に絞って整理し、メタン発酵の課題をまとめた。

①メタン発酵の有機物容積負荷と高効率化：メタン発酵の原料毎に有機物容積負荷を整理し、高効率化の方法として2相発酵方式についてまとめた。

②アンモニアによる発酵阻害の防止：中温および高温発酵におけるアンモニアによる阻害に関する研究を整理した。高温発酵は、発酵槽内で有機物の分解に伴うアンモニア増加で中温に比べ阻害を受けやすい。特に、メタン発酵の原料として厨芥の様に、アンモニア濃度が増加しやすい場合には、高温発酵で高負荷をかける場合の制限要因になる。

③中温発酵と高温発酵の比較：畜産ふん尿や生ごみ等のメタン発酵で、中温と高温発酵の有機物分解速度やバイオガス発生量などについて、両方式の特性をまとめた。一般的には、高温発酵が有機物容積負荷を高く取れ、バイオガス発生量が多い。しかし、低有機物容積負荷では、中温も高温発酵も有機物分解速度やバイオガス発生量は変わらないとの報告がある。

④メタン発酵による消毒効果：メタン発酵における消毒効果は、高温発酵が中温発酵に比べて高いことを整理した。また、バイオガスプラントの消化液を土壌還元する際の微

生物指標として、ふん便性大腸菌群ではウイルス性の病原性微生物が残存している可能性があるとしている。さらに、畜産ふん尿のメタン発酵消化液を液肥に使用しているデンマークの衛生規制を紹介し、温度による消毒効果を示した。

⑤バイオガスプラントの課題と対応策の整理を行った。

- ・原料の収集や運搬・性状に関する課題
- ・メタン発酵槽に関する課題
- ・バイオガスの利用に関する課題
- ・メタン発酵消化液の処理と活用に関する課題
- ・バイオガスプラントの事業採算性に関する課題

なお、本論文では、日本の環境に適したバイオガスプラントにおけるメタン発酵で、中温発酵と高温発酵の比較、消毒効果、実用的な運転管理方法ならびに新エネルギーの生産施設としての評価に焦点を当てた。

第3章では、畜産ふん尿やおからなど食品残さを中温発酵でメタン発酵する本センターの運転実績から、中温のメタン発酵を中心とするデータ解析を行なった。その結果、メタン発酵での有機物の除去効果、メタン発酵槽前後の有機酸濃度の挙動、メタン発酵槽の運転指標、バイオガスコージェネレーションと加温エネルギー比率などを明らかにした。特に、実用施設の中温発酵のメタン発酵施設の運転管理においては、有機酸蓄積を起こさない運転管理が重要で、下記の運転指標は日常の管理で必須の項目と考えられる。

- ①中温のメタン発酵で、VTS容積負荷が $1.6\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$ で運転した結果、VTS除去率が44.4%得られたが、この除去率は $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、T-Cを指標にした場合でも同じような除去率になった。しかし、BODや $\text{COD}_{\text{Mn}}$ を指標とすると、除去率が60~86%と高くなった。
- ②バイオガスの発生量は、ふん尿やおからの受入れ量当りで $32.4\text{Nm}^3/\text{t}$ 発生し、バイオガス中のメタン濃度は52~60%であった。メタン濃度は、豚ふん尿や生ごみを原料とするメタン発酵に比べると低い濃度であった。
- ③メタン発酵槽内の有機酸濃度（揮発性有機酸、酢酸、プロピオン酸）の運転データから、有機酸蓄積状態や安定運転のできる有機酸濃度が把握できた。メタン発酵槽内では、酢酸濃度がプロピオン酸濃度に比べて高く、安定運転状態では酢酸濃度が $200\text{mg}/\ell$ 以下であった。なお、原水槽で揮発性有機酸濃度が $10,000\text{mg}/\ell$ 前後あり、原水槽内で既に酸発酵が進んでいることがわかった。
- ④メタン発酵槽の日常の運転指標として、発酵槽内のpH値やバイオガスの炭酸ガス濃度を指標にすれば、有機酸蓄積等の傾向が読み取れる。
- ⑤バイオガス発電では、場内負荷のみの発電で回収した熱量は、冬期にはその87%をメタン発酵の加温に使用するが、夏期にはその40%程度しか使用しない。発電を逆流流可能な方式に切り替えると、この比率が冬期に回収熱量の57%をメタン発酵の加温に使用すればよく、冬期でも余剰熱量が多いことが分かった。このため、バイオガス発電の余

剰熱量をメタン発酵の加温以外に有効に利用することが求められる。

第4章では、本センターにおける同じふん尿や食品残渣を原料にした中温発酵と高温発酵の約1.5年間における並列運転結果から、両発酵における発酵性能やバイオガス発生量・性状を明らかにした。また、本センターのメタン発酵設備以外に、脱水・排水処理設備、堆肥設備、液肥利用に関して、運転実績に基づき下記のことが分かった。

#### (1) 中温発酵と高温発酵の比較

①上記期間中の中温・高温のメタン発酵槽は、VTS 負荷が  $2.0\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$  前後、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  負荷が  $3.0\text{kg}/\text{m}^3/\text{日}$  前後とほぼ同じ有機物容積負荷をかけた運転をした。VTS 除去率は中温発酵が40%で高温発酵が37%であり、また  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率では中温発酵が53%で高温発酵51%とほぼ同様の値であった。しかし、高温発酵の運転後約1年経過した2003年5月以降から高温発酵の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率が中温発酵より高くなり、2004年1月のデータではVTS 除去率は差がほとんどなかったが、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  除去率は中温発酵が48%に対して高温発酵が59%と高温発酵の除去率が若干高い傾向にある。

②メタン発酵槽内の有機酸濃度は、酢酸濃度が高温発酵の方が高く、プロピオン酸濃度は中温発酵と高温発酵はほぼ同じ濃度であった。揮発性有機酸濃度は高温発酵でも最高で  $590\text{mg}/\text{l}$  であり、特にメタン発酵の障害になる様な濃度ではない。

③大腸菌群数や糞便性大腸菌数は、中温発酵に比べて高温発酵で高い除去率が得られている。糞便性大腸菌数では、中温発酵の除去率が99.7%に対して、高温発酵では99.993%の除去率で高温発酵の消毒効果が高いことが確認できた。

④ $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は高温発酵の方が高濃度であるが、高温発酵槽では平均値が  $2,090\text{mg}/\text{l}$  で最高でも  $2,300\text{mg}/\text{l}$  であることから、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  による障害が起きるような濃度ではない。なお、発酵槽内の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は、投入原水のTN濃度の60~70%を示していた。

⑤バイオガスの発生量は、2003年10月の実績では発酵槽への投入量当りで比較すると、中温発酵が  $26.3\text{Nm}^3/\text{t}$ 、高温発酵が  $31.4\text{Nm}^3/\text{t}$  であり、高温発酵はガス発生量が19%多かった。また、単位有機物当りに直すと高温発酵は中温発酵より単位ガス発生量が12~19%多いことが分かった。

⑥バイオガスの  $\text{CH}_4$  等の成分は、中温発酵と高温発酵ではほとんど差がなかった。

以上の結果から、高温発酵における高い消毒効果が確認でき、液肥利用のためには高温発酵が望ましいことが分かった。有機物の除去性能は、同じ有機物容積負荷であれば中温発酵でも高温発酵でも大きな差がみられなかったが、高温発酵の運転後1年以降は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  の除去率が中温発酵に比べて10%程度高い傾向がある。ガス発生量も高温発酵が若干高い結果が出ており、メタン発酵槽の性能としては高温発酵が中温発酵に比べてやや良いと考えられる。但し、実際の施設へ導入の際には、メタン発酵の性能以外に、加温エネルギーや建設費・運転費などを含めた総合的な評価を行う必要がある。

#### (2) 脱水・排水処理設備、堆肥設備、液肥利用について

- ①本センターの排水処理設備では、pH、BOD、SS、T-P の規制を満足する水質が得られているが、T-N 濃度はメタノール等の水素供与体の添加量調整不良等で、若干規制値より高い数値である。色度は、目標値 100 度を上回っていることがあるが、凝集剤の添加量を適正に調整すれば、達成できる設備である。
- ②メタン発酵の脱水ろ液の水質特性を整理した。脱水ろ液では、窒素処理と COD<sub>Mn</sub> 処理が経済的・技術的に難しい排水である。
- ③堆肥施設では、堆肥の製造量が少なく、計画値の半分以下である。この理由は、肉牛ふん尿等の持込み量が少ないこととメタン施設への TS 濃度が低いことによる。堆肥成分では、窒素分が本センターでは多く、2.4%程度あり市販品の 2 倍以上含まれている。
- ④メタン発酵の消化液を野菜栽培や水稻への液肥利用を実用化レベルで調査した。液肥の栽培調査で、化学肥料と遜色ないことが分かった。しかし、施肥方法や液肥成分変動に関してさらに調査を進め、施肥指針を確立することが必要である。
- ⑤本センターの運転費は、メタン発酵の脱水・排水処理設備における薬剤費がその 1/3 程度を占めており、メタン発酵の消化液を液肥に使用すると、これらの費用が不要になり、運転費を大幅に削減することができる。また、おからの受入れ量が計画値の 1/3 と少なく、堆肥の製造量も計画値の半分以下であるため、収支バランスは取れていないが、これらが改善されれば収支のバランスは合うことが期待できる。なお、畜産ふん尿を対象にしたバイオガスプラントの事業収益性を試算したエックス・都市研究所の結果によれば、ふん尿 100t/日以上以上の施設で、単年度黒字達成が事業開始後 8 年以内で、累積赤字の解消は 15 年以内に達成できると試算されており、本センターはメタン施設と堆肥施設を合わせれば、この条件に合う規模になっている。

### (3) 中温発酵と高温発酵の特性比較と方式選択フロー

第 4 章の成果として、畜産ふん尿や食品残渣のバイオガスプラントにおけるメタン発酵で、中温発酵と高温発酵の特性比較を行い、メタン発酵原水性状・有機物負荷・管理技術力・液肥使用の有無等の条件に応じた中温発酵か高温発酵かの選択フローを提案した。

第 5 章では、本センターの最近 1 年間のバイオガス発電におけるエネルギーに関する運転実績を整理した。この運転データから、メタン発酵を利用したエネルギー自立型有機性廃棄物処理が行えることを確認でき、またバイオガスプラントの日本におけるエネルギー供給施設としての評価を行った。

- ① 3 台のガスエンジン発電機によるバイオガス発電で、発電効率 27.2~28.9% が得られた。総合効率は、ジャケット・排ガスからの熱回収している発電機が熱回収効率 48.8% で総合効率が 77.8% であった。また、ジャケットのみから熱回収している発電機は同 36.6% で総合効率が 63.8% であった。
- ②本センターは、発酵残渣を脱水・排水処理・堆肥化しているが、2003 年以降は発電電力で場内負荷をほぼ賄っている。また同時に、余剰電力が発電量の 7~29% 発生している。

③廃熱回収した熱は、冬期でもその半分程度は余剰熱として放熱されている。熱の有効利用が今後の課題である。

④欧州のバイオガスプラントでは、場外への電力・熱供給割合が高いが、本センターでも発酵残渣を全て液肥として使用できれば、発電電力の70%程度を外部へ供給することができる。

⑤日本の畜産ふん尿・食品残渣・生ごみの40%をバイオガスプラントでメタン発酵し、本センターと同様にコージェネレーションを行うと、外部への供給電力は1.15GWh/年（電力容量：13万kW）で原油換算量は29万kL/年になる。また、消化液を全量液肥利用できると、外部への供給電力は2.6GWh/年（電力容量：30万kW）で原油換算量は65万KL/年と試算でき、この外部供給電力量は、バイオマスニッポン総合戦略が示した2010年の新エネルギー導入目標値であるバイオマス発電33万kWに近い電力量である。

⑥畜産ふん尿や食品残渣・生ごみのバイオガスプラントでは、有機性廃棄物のメタン発酵で発生するバイオガス量と発電量ならびにプラント使用電力に関して、下記にまとめられる。

- ・有機性廃棄物のメタン発酵で、持込み廃棄物1tから30~35Nm<sup>3</sup>のバイオガス発生量があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式でもプラント内の使用電力量を賄える。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の75%程度をプラント外部へ供給できる。

- ・持込み有機性廃棄物1tから40~45Nm<sup>3</sup>のバイオガス発生量があれば、メタン発酵消化液を排水処理する方式では、プラント使用電力量を賄えかつ外部へ発電電力量の25~35%を供給することができる。また、メタン発酵消化液を全量液肥利用できれば、バイオガス発電した電力量の75~80%程度をプラント外部へ供給できる。

⑦バイオガスプラントでは、外部へ電力や熱の供給ができるが、他の方式ではバイオガスプラントで使用すると同程度の電力を購入する必要がある。この点からもバイオガスプラントが、エネルギー供給施設として有効であることが分かる。

以上において、第1章から5章までのまとめを行ったが、本論文における成果としては下記の3点に集約できる。

①八木バイオエコロジーセンターの中温メタン発酵の運転実績から、中温メタン発酵の性能ならびに運転管理指標を見出した。

②本センターにおける中温と高温メタン発酵の運転性能の比較から、両方式の特性比較を行い、方式選択のフローを提案した。

③本センターのバイオガスコージェネレーションの運転実績を基に、国内の畜産ふん尿や食品残渣を原料とするバイオガスプラントのエネルギー供給施設としての試算を行い、その有効性を評価した。また、有機性廃棄物のメタン発酵によるバイオガス発生量とバイオガスプラントの余剰電力比率の目安を示した。

## 6. 2 今後の課題

本研究では、畜産ふん尿や食品残渣のメタン発酵とバイオガス発電を実稼動している八木バイオエコロジーセンターを事例として取り上げている。本センターの運転実績から整理された課題は、日本の高濃度有機性廃棄物のメタン発酵処理の課題ともなるので、以下に項目ごとに整理した。

### (1) メタン発酵に関する課題

①メタン発酵の前処理で、メタン発酵では分解しづらい有機物の可溶化を促進する方法の開発が必要である。畜産ふん尿等でメタン発酵による分解率を向上できれば、バイオガス回収量の増加と発酵残渣の減量化が期待できる。

②メタン発酵槽の運転指標として、比較的容易に測定できる発酵槽内の pH 値やバイオガスの炭酸ガス濃度が使用できるが、さらに有機酸蓄積を早期に察知するためには、簡単に有機酸を測定できる装置が望ましい。このような簡易に迅速に有機酸を測定できる装置の開発が必要と考える。

③高温発酵では、食品残渣や生ごみ等の投入有機物容積負荷を中温に比べて高く取れるが、発酵槽の中でアンモニア濃度が増加すると、アンモニア阻害を起こして発酵が停止する。この阻害を受けない様な原料組成とアンモニア濃度を保持する運転をすることが必要である。

④原水槽では、滞留時間が長いとここで酸発酵が促進し、揮発性有機酸が 10,000mg/l 程度まで増加する。このため、原水槽の pH 値が低下して強酸になることがあり、メタン発酵槽への投入の仕方によっては有機酸による阻害を受けることもある。

### (2) 関連設備に関する課題

①メタン発酵後の消化液を脱水した脱水ろ液は、BOD 濃度に比べて T-N 濃度が相対的に高く、脱水ろ液の生物脱窒素では水素供与体としてメタノール等の添加が必要である。このため、運転費が高価になるので、安価に脱窒できる排水処理法の開発が求められる。なお、この可能性のある生物的な脱窒法として古川<sup>1)</sup>の ANAMMOX 法の実用化開発が望まれる。

②メタン消化液の脱水ろ液は、BOD 濃度に比べて COD<sub>Mn</sub> 濃度が高く、生物的には COD<sub>Mn</sub> の処理が難しい排水である。COD<sub>Mn</sub> を確実に除去するためには、凝集沈殿法やオゾン処理法、活性炭吸着法等が考えられるが、運転費が高価になる。また、脱水ろ液は色度が高く COD<sub>Mn</sub> の成分の構成因子でもあるが、色度処理も COD<sub>Mn</sub> と同様な処理が必要になる。メタン発酵消化液の脱水ろ液は、COD<sub>Mn</sub> と色度の処理に高度処理を採用せざるを得ないので、建設費・運転費共に高額になることから、放流水質が厳しい地域ではメタン発酵後の脱水ろ液を排水処理して放流する方式は採用しづらい。

③メタン消化液の脱水設備では、ポリマーを添加して脱水性能を向上しているが、このポリマーの使用量が多く運転費もかさむので、無薬注脱水あるいは薬剤添加が少量ですむ脱水方式の開発が求められる。

### (3) エネルギー利用に関する課題

①バイオガスはコージェネレーションで電気と熱に変換するのが容易である。電気は施設内使用や場外への売電ができるが、熱はメタン発酵槽の加温や施設内の暖房程度の使用用途しかない。この余剰の熱を植物の温室栽培の熱源や堆肥施設の加温等に有効に使用することが、今後のメタン発酵施設の課題である。

②バイオガス発電を効率よく行うためには、バイオガス発生量の多い食品残渣や生ごみを原料にすることである。しかし、これらを原料としたメタン発酵の残渣をコンポスト等として使用できるかが今後の確認事項である。

### (4) バイオガス発電施設全体

①メタン発酵の消化液は、これを液肥として利用できれば、脱水・排水処理設備・堆肥化設備が不要となり、建設費・運転費が大幅に削減できる。液肥を野菜栽培や水稻等に使用できることは確認されているが、散布する農機具の開発や液肥利用のインフラ整備ができていないので、構築が必要である。

②バイオガスプラントの事業採算性を考えると、畜産ふん尿以外に食品残渣を原料にすることがよい。食品残渣は引取り単価が高額であるため、施設の収入金額を大幅にアップすることができる。しかし、食品残渣は重金属等のメタン発酵への障害となる成分を含んでおらず、また発酵残渣を農地還元する場合に土壤汚染の原因にならないよう微量成分についても十分把握しておく必要がある。

## 6. 3 今後の展望

バイオマスのメタン発酵によるエネルギー回収と発酵残渣の資源化技術は、日本の廃棄物系バイオマス技術で中核技術になっていくものと考えられる。その理由は、メタン発酵で回収されるバイオガスは、カーボンニュートラルなエネルギーであり、高温・高圧を要せずに比較的簡易な技術で得られる燃料である。また、発酵残渣は、今後の技術開発に期待する点もあるが、植物の栄養素としてバイオマス循環に載せられるものである。以下にメタン発酵の今後の展望と本研究の成果の活用についてまとめる。

(1) メタン発酵は地域の状況により、都市部では厨芥や食品工場残渣を原料に、また農村部では畜産ふん尿や農業廃棄物等を原料にしてプラント建設が可能である。発生したバイオガスによる発電で、ローカルエネルギーの安定供給が可能となり、分散型電源の電力供給施設になりうる。本研究成果は、主に農村型メタン発酵に関して、中温発酵や高温発酵の安定した運転のための基礎データが整理されているので、活用が期待できる。

(2) バイオガス中のメタンは、精製や変換により各種の使用用途が考えられ、工業製品の

原料にもなる。例えば、燃料電池の燃料、水素ガスの製造原料、ガス自動車の燃料、ベンゼンやナフタリンの原料などが考えられる。

(3) メタン発酵槽へ投入する前の前処理で、バイオマスを可溶化する技術の開発により、バイオマスから回収できるメタンガス量が大幅に増加する可能性がある。このことは、メタン発酵残渣の量が減少することになり、残渣処理が簡易になる。

(4) 清掃工場で焼却している可燃性ごみの中から生ごみなどの水分の高い有機物を分けることにより、メタン発酵によるエネルギー回収施設と焼却施設とを併設し、それぞれの効率を高めることができる。横須賀市<sup>2)</sup>では、小型実証装置の運転データから、清掃工場とメタン発酵施設を建設することにより、両施設を総合した建設費と運転費が清掃工場単独に比べて安価になる試算をしている。

(5) 発展途上国にメタン発酵施設を建設することで、その地域のバイオマスを活用して電力や熱の供給が可能になる。また、日本企業がメタン発酵施設を海外で建設することで、CDM 事業が行え、炭酸ガス取引にも貢献することができる。本研究成果は、高度な管理技術者が確保できない様な発展途上国でも安定運転に参考となるデータが入っており、成果の活用を期待したい。また、メタン発酵消化液の液肥利用に関しては、東アジア地域では水田での利用が不可欠であり、本研究成果を参考にして普及する事を希望する。

以上のように、バイオマスのメタン発酵によるエネルギー生産と発酵残渣の資源化利用は、地球温暖化防止にも役立つ将来に向けて期待の大きい技術であると結論することができる。

## 【第6章 参考文献】

- 1) 古川憲治:嫌気性アンモニア酸化 (Anammox) を活用する窒素除去、化学工学、Vol.66 、No.6 、 pp.1~3、2002
- 2) 横須賀市：横須賀市ホームページ、2004.2

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの方からご指導、ご協力を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の藤田正憲教授には、本研究を進め、論文を取り纏めるに際して、終始一貫して懇切丁寧なご指導を賜りました。常に幅広い知識から研究の方向性、内容に対して丁寧にご教示頂き、心からお礼申し上げます。また、大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の池助教授には、数々の貴重なご助言を頂き深く感謝申し上げます。

本論分の審査に際しましては、大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の水野稔教授、大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻の西嶋茂宏教授に、大変有意義なご指摘、ご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

本論分を取り纏めることができましたのは、株式会社大林組から社会人として大阪大学大学院工学研究科で有機性廃棄物のメタン発酵処理とバイオガス発電に関する研究の機会を与えて頂いたおかげです。

本論分の対象事例とした「八木バイオエコロジーセンター」の建設に際しては、株式会社大林組のエンジニアリング本部はじめ関連部署の協力の下に行われました。関係者の方々には、感謝申し上げます。また、本センターの建設、運転、データ解析には、京都府八木町中川農林振興課課長補佐はじめ多くの役場の方々に大変お世話になり、感謝申し上げます。さらに、本センターの松本施設長はじめ施設の運転を担当されている方々からも、多くの有益なご意見を頂き感謝しております。なお、本論文をまとめるに当たり、株式会社大林組エコロジーエンジニアリング部の方々や妻訓子に多くの協力を頂きましたので、感謝申し上げます。