

メタン発酵処理技術の現状と課題

特定非営利活動法人 バイオガスシステム研究会 理事長
前(財)畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所
亀岡 俊則

近年、世界的に家畜ふん尿処理におけるメタン発酵法が注目され、特にドイツでは年間ほぼ800施設が建設されており、再生可能エネルギーの内の11%を代替することが見込まれているようである。ちなみにドイツでは、メタン発酵で生産した電力を購入電力より高く売電できる制度により、エネルギー生産事業としての位置付けで普及が進んでいる。

一方、我が国の現状は、実証施設を含めて50数箇所のメタン発酵施設が稼動している。その内の大部分は酪農のふん尿スラリーを原料としたものであり、消化液は牧草地へ液肥利用されている。養豚では、数箇所の実施例があり、その消化液は浄化処理して放流されている。また、近年ではバイオマスタウン構想が50数カ所の市町村で検討が進められているなど、地域に合ったメタン発酵法による資源循環の構築に向けた議論が活発化している。

これまでメタン発酵法は処理コストが高く、しかも上手く運用されている実施例も少ない、などのことから検討のテーブルにつく前に門前払いされるケースもあった。その一方では、メタン発酵法はカーボンニュートラルの処理で地球温暖化防止に大きく貢献できるとともに、資源循環型でもあるとした見方から最近急速に事業化に向けた取組みの動きがある。

そこで本稿では、メタン発酵法はどのような利点と欠点があり、家畜ふん尿処理の中でメタン発酵処理を採択するメリットと、実施上残された課題の整理、また今後普及が期待できる低コストな養豚のメタン発酵処理事例などについて紹介する。

1. メタン発酵処理の特徴

1) 利点及び欠点

メタン発酵処理の目的は、家畜ふんの有機物分解によりメタンガスのエネルギーを生産し、熱や電気に変換してふん尿処理に必要なエネルギーを賄い、さらに

余剰エネルギーの利用もできること、また消化液は窒素成分の無機化や悪臭が低減しているなど衛生的に液肥利用の効果が高まることが最も大きな利点である。また、ふん尿混合スラリーのように非常に高濃度汚水を直接処理できる特長があり、家畜ふん尿に生ごみなどを混合して消化ガスの発生をより多く生産し、むしろエネルギー生産型のメタン発酵システムを組むことができる。

欠点は、液肥利用ができない場合であり、メタン発酵後の消化液には未だBOD等の汚濁物質が高濃度に含まれているためそのまま河川等への放流ができないので、浄化処理が必要になってくる。その場合、消化液中には窒素が無機化されてそのまま高濃度で残存しているため、活性汚泥処理では脱窒や脱色の高度処理を行うことになり処理経費が高む要因となっている。また、家畜ふんの性状に伴い畜種によりメタン発酵の有機物分解率が異なり、エネルギー生産量や消化液の浄化処理の適否が異なることである。すなわち、乳牛ふんは分解率が低く、また消化液の浄化処理が非常に難しいことと、鶏ふんのメタン発酵はアンモニア阻害の問題が大きく農産残渣物等の混合がないと極めて困難であるなど、これらを克服するための条件設定が必要で処理経費が高むことになる。

また、メタン発酵処理の周辺技術や設備機器の点では、消化ガスのエネルギーポテンシャルは大きく、十分に活用することで前述のエネルギー活用型の処理が可能になってくる。しかし、現状の課題で最も大きなことは処理施設の運転動力は主に電気であり、また畜舎で用いるエネルギーの大部分が換気扇等の電気利用であるが、この発電については多くのメンテナンスを要しており、この体制が未だ不完全であるため発電機を整備しても十分な実利が得られていないことが問題で、今後の対応が急がれる。

これらのことを十分に熟知した上で、かつ畜舎構造

や飼養環境など全体の経営条件を踏まえメタン発酵処理の施設整備計画が必要である。

2) メタン発酵システムの組み方

メタン発酵処理の基本的な普及型処理体系は、酪農は液肥利用を前提とし、養豚は液肥利用が困難であるため消化液は浄化処理が前提条件となる。その基本的フローは、酪農は「ふん尿スラリー⇒スクリーン⇒メタン発酵⇒貯留槽⇒液肥利用」であり、養豚では「ふん尿混合汚水⇒搾汁処理⇒メタン発酵⇒消化液浄化処理⇒放流」のシステムになり、この両者は適正に設定することにより非常に有効で安定かつ持続的処理法として位置付けができる。

この設定において留意する点は、メタン発酵投入液に難分解性のものや砂等の混入が多いと、攪拌装置が設置されていてもこれがメタン発酵槽内に蓄積し、数年の内にメタン発酵槽内の1/4~1/3を蓄積汚泥で占めることになり、有効容積の減少から分解率の低下、ガス発生量の減少を招きメタン発酵性能に大きな障害になるので、そうした物の投入を避けることと蓄積汚泥を定期的に抜き取る装置を予め備えておくことが大事である。

3) 畜種別のガス発生量とエネルギー利用

表1に各家畜ふん尿の中温メタン発酵によるガス発生量を示している。この条件は、家畜ふんを固液分離しており、固液分離しないものと比較すると分解率が高くなっている。豚ふんや鶏ふんは有機物のほぼ50%が分解しガス化されるが、牛ふんは30%に達しないので、特に小規模で冬季などでは発酵温度の35℃を保持するためのエネルギー確保の留意が必要である。残飯は非常に分解率が高く、特に残飯を豚ふんに混合すると豚ふんの分解率は相乗効果によりガス発生量は一段と高くなり非常に有利な処理ができる。

表1 固液分離した家畜ふん等の有機物(VS)当りのガス化率(35℃)

	豚ふん	鶏ふん	牛ふん	残飯	豚ふん残飯
ガス化率(L/g VS)	0.53	0.52	0.27	0.84	0.78

消化ガス中にはCH₄がほぼ65%、CO₂がほぼ35%含まれるため、熱量はほぼ5,500Kcal/m³である。また、硫化水素が通常1,000~5,000ppm含まれ、燃焼機器の腐食防止のため生物脱硫法や酸化鉄製剤を用いた脱硫処

理が必要である。

表2に養豚の規模別の汚水処理に係る電気料金とメタン発酵で生産されるエネルギー量及び余剰電力量を示している。比較は、ふん尿分離方式の汚水浄化の場合とふん尿混合のメタン発酵で発電するケースで試算している。結論的に、規模が大きくなるに従いメタン発酵法では余剰電力の多くが得られ豚舎で使用する消費電力を代替することができる。

表2 運転経費及び消費電力量の比較

	豚1000頭		豚10000頭		豚10000頭+食品残渣
	浄化	メタン	浄化	メタン	メタン
運転経費(円)	555	575	459	183	+630
電気料比(%)	65.6	0	60.0	0	0
消費電力(kWh)	112.4	185	848.6	1164	1413
ガス発生量(m ³ /日)		150		1530	3970
生産電力(kWh/日)	—	200	—	2200	6090
余剰電力(kWh/日)	—	+15	—	+1036	+4677

(単位)：運転経費は出荷豚当たり円、生産電力は発生ガスによる発電量、余剰電力は消費電力との相殺。

消化ガスの利用は、一般的には発電により系内利用する方法が合理的であるが、現在の発電設備は殆どが外国製品であり、前述のように小規模ではメリットも少なく表2のようにエネルギーバランスは合っているが必ずしも大きなプラスになっていないため、採用に当たっては、養豚では子豚の暖房など発生ガスを直接燃焼によって熱利用する方法が有利であり、現場の条件に合わせたエネルギー利用の検討が必要である。

4) 消化液の液肥利用条件

メタン発酵消化液は、窒素の形態は有機態からアンモニアの無機態に分解しており、作物に対する肥料的効果が高まって液肥利用には非常に好都合である。メタン発酵槽から排出した時点では液温も高いこともあって多少のアンモニア臭があるが、貯留槽に静置すると殆ど悪臭は消失している。

消化液の窒素濃度は酪農の場合ほぼ3,000mg/Lであり、作物別に施用量の肥料設計を行い施用する必要がある。例えば、水稻の場合10a当たり10kgの窒素施用量であれば約3.3m³の消化液を水田の水口から用水と共に流し込むことになる。また、牧草では窒素量を20kg/10aにすれば約6.7m³の施用量となる。

この液肥利用に当たっては作物に対して「適期に適正量」を施用することが作物の品質や収量の点で最も

重要なことである。ところが、消化液は毎日一定量が排出し、作物に必要な液肥は元肥と追肥の時点で必要であることから、当然ながら消化液を貯留して必要な時期に必要な量を施用することが肝心なところである。そのため、貯留槽容積の確保が必要で、ほぼ半年分といわれているが、消化液の排出量に対する作物の栽培条件によって異なってくるので現場に合わせた貯留容量の設定が必要になる。特に問題なのは、集合処理等において5～10km以上の遠距離輸送の場合である。液肥は牧草等作物の生育に合わせ施用するが、その施用適期が1～2週間程度であれば、それまで貯留していた消化液の全てをその期間内に撒き切らなくてはならない。そのため、作業配分に無理が生じ、適正な液肥利用ができないことに問題がある。その対策案としては、日常の作業配分の中で消化液貯留槽を小分けし、圃場近くに中継槽を設置することや、地域のコントラクター活用などにより適正な液肥利用を進める必要がある。

5) 消化液の浄化処理の条件

消化液のBOD/N比は、1～2程度と窒素比が極めて高く、活性汚泥処理の場合はアンモニア阻害などで十分な処理性能を得ることができない。しかも、処理水は窒素や強い色度が残留するため脱窒や脱色処理が必要になる。この対策には、少なくとも2～3倍の水で消化液を希釈することと、多様な微生物相が構成できる接触酸化法などにより浄化処理を行うことにより十分な性能を得ることができる。ただし、酪農の場合はさらに希釈水を増やすなどの必要がある。

2. なぜメタン発酵なのか

酪農のふん尿混合スラリーは水分が88～90%であり、非常に粘性が高く通常のぼっ気処理では攪拌効果が小さく十分な好氣的腐熟処理効果が得られない。しかも、冬季は液温が低いため殆ど腐熟が進まないのが実状である。このような未熟スラリーを多量に牧草に施用すると品質的に粗悪な牧草になってくる。この解決には、自己エネルギーで加温し消化が促進できるメタン発酵法がより有効であることは明らかである。

養豚におけるふん尿処理の課題は、ふん尿混合の高

濃度スラリーの処理対策と、堆肥化処理で発生する悪臭対策、また堆肥の減量化である。ふん尿混合の場合、堆肥化処理では水分調整材の確保、汚水処理では高濃度高負荷に対する処理性能の限界と処理コストが非常に高くなることが問題である。また、豚舎構造において豚ふんと尿を分離した場合、この分離ふんは尿が混合するため水分が高くなり、しかも強いアンモニア等の悪臭を伴うため適正な堆肥化処理を行わないと強烈な悪臭の発生源になる。

前述のように分離ふんは高水分であり、粘性が高いため堆肥化処理のためには水分60%以下にして通気性を確保するための水分調整をしないと良好な好気性発酵が得られない。この好気性条件が確保されない限り良質堆肥に仕上がらないことと、嫌気性の分解状態になるため堆肥自体が強烈な悪臭を発生することになる。多くの現場においては、この水分調整に必要とするおが屑や籾殻の入手が困難であったり、副資材の購入経費が高くなることから、戻し堆肥を水分調整材として堆肥化処理が行われている場合が多い。この戻し堆肥の利用では水分バランスを間違えると次第に堆肥の水分が上昇し、処理は悪循環に陥り、ついには嫌気状態となって強烈な悪臭発生の元凶となってくる。

これらの改善対策には、水分調整材を確保するか、ハウス乾燥法などで乾燥して分離ふん自体の水分を下げるか、分離ふんを搾汁処理して水分を下げるか、の方法が挙げられる。

これらの点を整理してマニュアル通りに母豚500頭規模の堆肥化処理の設計計算をすると、表3のようになり、分離ふんの水分が80%でも水分調整に必要なおが屑の量は毎日3.4tが必要である。水分84%の条件では戻し堆肥を利用する場合はハウス乾燥等を併設しないと水分バランスが崩れ、何れ堆肥化処理は悪循環に陥ることになる。

一方、ふん尿混合スラリーを搾汁処理し搾汁液をメタン発酵し、その消化液を浄化処理するケースでは、搾汁した分離ふんと浄化汚泥の混合水分は74.5%で、堆肥化処理に必要なおが屑は0.86tと少なく、前述の水分80%の分離ふんに対して1/3であり、しかも堆肥の生産量は1/2以下になることが分かる。このようにメタン発酵法は、現場で困難視されているふん尿混合

汚水の処理や堆肥化処理の悪臭低減の手段として非常に有効な処理法であることが分かる。このことは、筆者が関係した養豚のメタン発酵処理の現場で証明されている。

表3 母豚500頭分の分離ふんの水分の違いによる堆肥化処理の比較

	分離ふん1	分離ふん2	搾汁ふん・汚泥
分離ふん水分(%)	84	80	74.5
分離ふん排出量(t)	11.7	9.28	5.69
堆肥仕込み水分(%)	55	57	60
おが屑必要量(t)	5.56	3.47	0.86
戻し堆肥水分(%)	40	45	40
戻し堆肥量(t)	11.5	8.5	2.61
堆肥仕込み量(t)	28.6	21.25	9.17
発酵槽容積(m ³)	1,670	1,240	535
堆肥生産量(t)	9.56	4.86	2.17
堆肥水分(%)	44.3	44.7	37.3

○分離ふん1のケースは、仕上がり堆肥水分が44.3%にしか低下しないため、別途戻し堆肥用に水分40%まで乾燥処理する必要がある。

○搾汁ふん・汚泥は、ふん尿を搾汁処理し搾汁液はメタン発酵処理するケース。

3. メタン発酵処理は地球温暖化防止にも大きく貢献する

近年、地球温暖化が叫ばれ京都議定書が採択されCO₂削減に向けて世界的な動きが本格化している。2005年2月にロシアの批准により京都議定書が発効され、我が国は、1990年を基準年として2008年～2012年までに12億3,700万トンのCO₂排出量を6%削減した11億6,300万トンに抑える数値目標が課されている。しかし、実際は基準年から比べてさらに8.3%増加していることから、14%の削減が必要になり、その対策が緊急的なものとなっている。この緊急的な対策として、国連によるCDM（クリーン開発メカニズム）プロジェクトの動きが活発化しつつある。このCDMプロジェクトは、経済発展途上国で温室効果ガスの削減を実施することで、その国の持続可能な開発を行うと同時にCO₂削減した分を自国の目標達成に利用できるクレジットを得る国連の制度であり、わが国ではすでに電力会社がチリの養豚場においてふん尿汚水をメタン発酵処理し、CO₂の約21倍の温室効果があるメタンガスを回収して焼却することにより年間約CO₂換算で40万トンの大幅な温室効果ガスの削減が見込まれるクレジットを獲得している。

このように、家畜ふん尿をメタン発酵処理することにより、大幅な温室効果ガスの発生量を削減できると

ともに、発生したエネルギーを有効活用することでさらに石油等蓄積資源の消費削減ができるなど地球環境と資源の保全に大きく貢献できる。

4. 処理経費の考察

メタン発酵法は、一般的な概念として設備費が高額で処理経費が高いとしたイメージが強いと思われる。確かに高い一面もあるが、ふん尿処理は基本的に堆肥化と汚水処理の2系列が必要であり、この両者の合計処理費がどのようになるかが肝心なところである。表4に「家畜ふん尿処理施設・機械ガイドブック」に掲載されている処理経費を示している。養豚では、ふん尿分離方式による堆肥化処理（機械攪拌方式）と浄化処理（脱窒、脱リンの高度処理）の合計処理経費は出荷豚あたり約2,650円を要している。一方、ふん尿混合方式で、後述する低コストメタン発酵法では1,740円で、堆肥化処理は表3に示しているように堆肥化原料及び堆肥化施設ともに1/2以下であることから約560円に見積もられ、この合計は約2,300円であり、ふん尿分離式の従来の方法から比べて低コストになることが分かる。酪農においても、ふん尿分離方式の堆肥化処理（機械攪拌方式）と、尿汚水の手作り簡易ばっ気法式の処理経費約5,000円を加えると54,550円（頭・年）であり、スラリーのメタン発酵処理の53,380円（頭・年）より高がついているのが実状である。

このように、今後は、ふん尿の安定化処理を目指す場合には、原料の性状や物性、また、堆肥や液肥としての利用実態等を十分に把握した上で処理方法の選択を行うべきである。加えて、地球温暖化防止対策は世界的な動きであり、エネルギー資源の持続的社会的構築に配慮した施設整備の導入が望まれる。

表4 処理方式による処理経費の比較 (円/頭)

	メタン発酵	堆肥化処理	浄化処理	合計
養豚	分離			2,650
	混合	1,740	560	2,300
酪農	分離	49,550		54,550
	スラリー	5,380	5,000	53,380

処理経費の出典は、畜産環境整備機構編「家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック」による。

5. 普及型低コストメタン発酵処理施設の実証施設

本実施例は、環境情報第31号に紹介しているので詳細はそちらを参照してください。

本実証施設は、畜産環境技術研究所の研究成果によるもので、畜産環境整備機構の研究助成事業によりT社及びM社の設計施工によりT牧場の豚4,000頭規模の処理施設として設置され、平成16年3月に実証を終了しその後実用施設として稼動している。実施プラントのシステムフローを図に、処理施設を写真1に示す。概略の処理工程は、豚舎から排出したスラリー状の豚ふん尿混合汚水を搾汁脱水機で粗大物を除去した後、搾汁液をメタン発酵槽へ投入し、有機物の分解により消化ガスを発生して、ガス発電を行い、発電した電気は処理施設の消費電力として使用し、余剰が発生すると養豚場内で自家消費する。回収した排熱は温水に変換して前処理設備で豚ふん尿搾汁液の加温に利用する。また、メタン発酵処理から排出する消化液は、カキ殻等を充填した接触酸化法により硝化・脱窒の浄化処理を行い河川放流する。

この処理システムの主な特徴は、メタン発酵槽内汚泥をSS4%程度まで高密度化して分解率を高めること、消化液の浄化処理ではカキ殻など低コスト資材を用いて処理コストの低減と浄化性能を高めることである。

2年間の実証の結果、メタン発酵槽の消化汚泥濃度をSS3.8%に高めることにより、低負荷運転でのガス発生量は約0.64m³/VS-kgで、設計値の通常負荷条件では0.68m³/VS-kgと一段と高く、これまでの豚ふん尿搾汁液の0.53m³/VS-kgに対して20~28%効率化された。

消化液の浄化処理では、廃食油を脱窒の炭素源として添加することにより良好な脱窒性能が得られ、処理水のTN59mg/L、BODは11mg/Lに低下し、また処理水にポリ鉄添加により色度は270に低減した。

マイクロガスタービン式発電は、低負荷運転では約620kWh/日で消費電力の約80%を賄い、通常運転では逆に約20%の余剰電力が得られる。

以上の結果から、1年間の処理コストを求めると表5のとおりである。本実証施設においては建設費の1/2の補助の元に出荷豚1頭当りのトータルコストが低負荷条件では1,263円/頭であったが、計画設計値の

通常負荷運転では1,055円/頭となり、ふん尿分離式の尿汚水の活性汚泥処理法とほぼ同額であり、ふん尿混合で低コストメタン発酵システムを実現することが実証されている。

表5 4,000頭規模のメタン発酵処理トータル処理コスト試算結果 (単位:円/頭)

	低負荷実証	通常負荷実証	備考
出荷豚1頭当りのランニングコスト	647	566	
出荷豚1頭当りの設備償却費	616	489	機械設備1.5億円 補助率50%、定額・15年償却、 残存価格10%
出荷豚1頭当りの設備償却費	1,263	1,055	

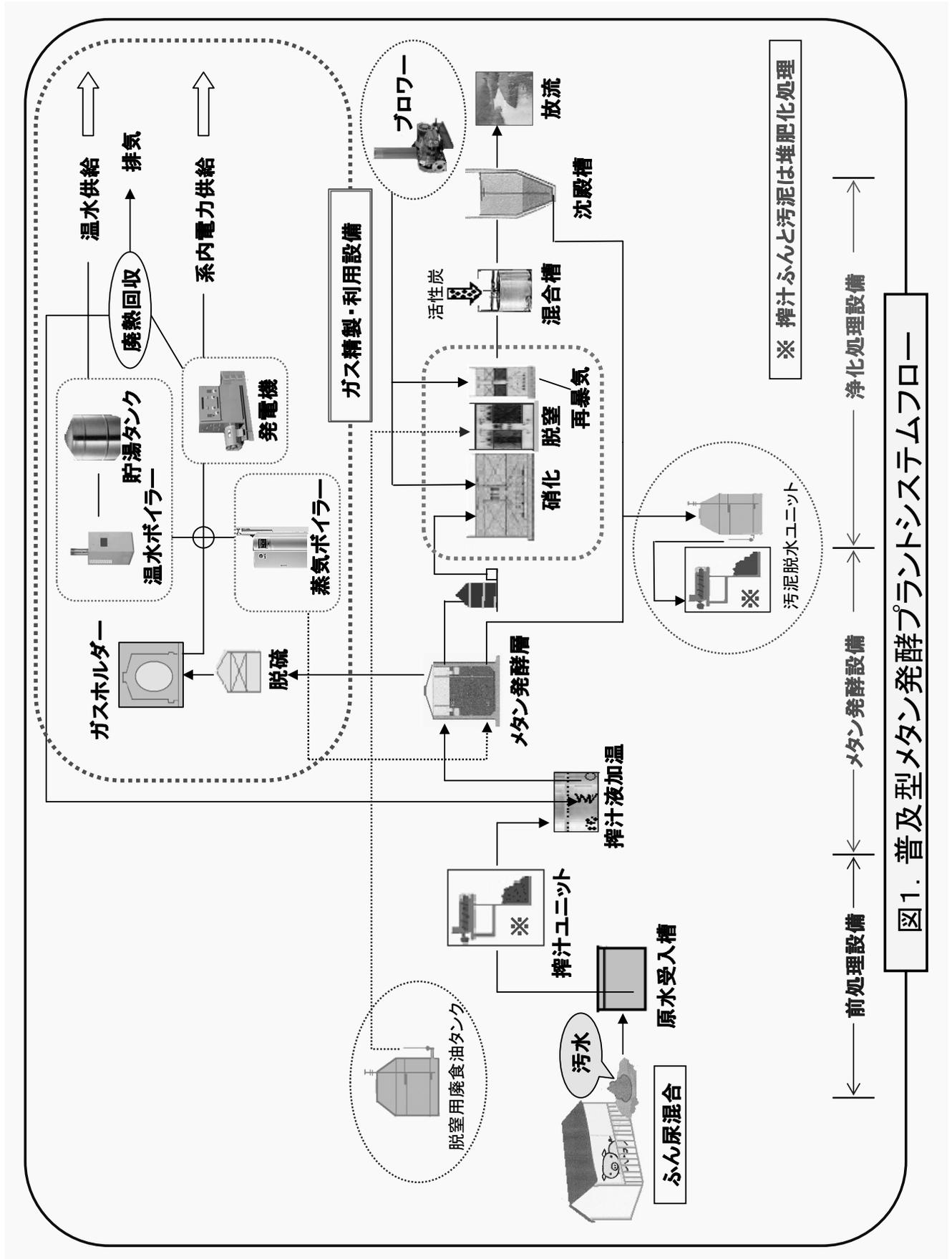
6. まとめ

メタン発酵処理はカーボンニュートラルであり、世界的にも地球環境に優しい処理法として各種有機性廃水の処理システムの一選択肢とし期待されている。メタン発酵は、基本的にエネルギーと液肥の利用が有効に働くことが決め手になるが、他の処理法に対して処理コストが低いこと、またメタン発酵処理を取り入れることによりスラリー状の極めて高濃度汚水の処理が可能で、畜舎等の悪臭発生が抑えられ、堆肥の生産量が半減するなど畜産の現場では多くの利点がある。こうした利点を現場の条件に合わせ総合的に検証し処理施設の整備計画を立てることが最も大事なことである。また、メタン発酵処理は残された課題もあり、これらのことを十分に検証されないまま施設整備を実行し性能が発揮されていない現場もあり、それが普及の足かせになっているのも事実である。

今後は、これらのことを反省し資源循環型処理の大きな位置付けの元、メタン発酵処理のメリットを十分に理解し、技術の完成度の高い安定型処理システムの普及に向けて関係各方面での取り組みが望まれる。

参考文献

- 1) 亀岡俊則、メタン発酵消化液の低コスト処理技術の開発、畜産環境整備機構：畜産環境技術研究所年報、第5号、p40~49、2002
- 2) 和田浩幹、中西英夫、入江直樹、豚ふん尿汚水メタン発酵処理実証プラントの試験報告、タクマ技報、VOL.12、NO.2、2005
- 3) 財団法人畜産環境整備機構、家畜排泄物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き、平成13年8月
- 4) 亀岡俊則、崎元道男、因野要一、家畜ふんに食品廃棄物を混合したメタン発酵について、日畜会報、57(3)、1986



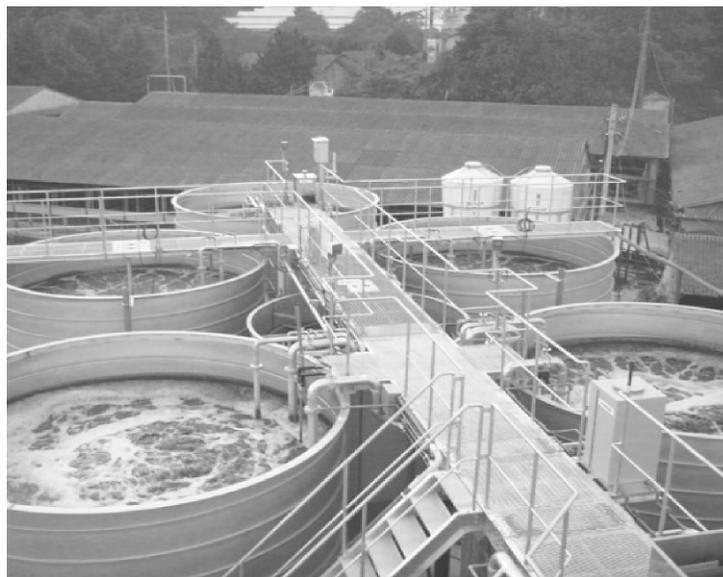


写真1 上：メタン発酵層とガスホルダー、下：消毒液の浄化処理設備



写真2 消化槽に充填したカキ殻付着汚泥