

技術論文

インド農村部のスマートVillage化を目指した
サーキュラーバイオシステム技術構築への取り組み久城 款
Yoshimi Kushiroヴェンガテサン
B. Vengatesanダヌシュ・クマル
Danush Kumaar

図1 バイオメタン製造システム設置サイト

概要

新興国(インド)における農村部と都市部とでは経済格差は年々拡大しておりそれを是正するために農村部の生活面・経済面の向上を図るスマートVillage化が急務である。その実現に向けてサーキュラーバイオシステム技術構築をインド実証サイトで実施したので紹介する。(図1)

1. はじめに

新興国の中で特に近年、経済発展著しいインドにおけるエネルギー事情および環境問題は悪化の一途を辿っている。CO₂排出量は世界3位、PM2.5は世界最悪の状況である。

一方、インド政府は2050年までの実質CO₂排出量ゼロ目標のため、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーの導入に力を入れている。特に、乳牛約2億頭(水牛と合わせて3億頭以上)を有する世界一の酪農国家であることから、LPGをバイオガス(牛糞をメタン発酵させることにより製造される)に代替する取り組みや、バイオCNG車の普及、消化液(肥料)利用など国策として積極的に推進している。

また、現在14億人を超えた人口は今後も増加が予測されており、大きな経済成長が見込まれる(表1)。

表1 インドの都市部と農村部の人口比率

		インド	
人口	都市部	35.0%	4億9700万人
	農村部	65.0%	9億2300万人
	合計	100.00%	14億2000万人

出典:United Nations, population Divi.(2024年)

しかし、都市部と農村部における経済格差は年々広がり、社会問題にもなっている。農村部(Ruralエリア)の生活向上を図るためには収入源であるミルク販売、野菜・果物などの農業生産性を向上させる必要がある。上記を成し遂げるためには、エネルギー源として家畜排せつ物、食品廃棄物などを用いたサーキュラーバイオ技術システムを導入した農村部のスマートVillage化が必要である。スマートVillage化とは、地産・地消によるエネルギー循環システムを構築し、有機肥料による農作物の生産性向上、電気・ガス・飲料水獲得による衣食住の生活

向上、バイオCNG車、バイクによる移動・運搬の利便性向上など農村部の経済活性化と自立化を図るものである(図2)。



図2 インドにおけるスマートVillageイメージ

2. サーキュラーバイオガスシステム技術について

このシステムは、家畜糞尿・食品廃棄物をメタン発酵させバイオガス(メタン:60%~65%,CO₂:35%~40%)を生成し、さらにメタン濃縮したものをバイオCNG車やLPG代替えに利用する。また、メタン発酵の副産物である消化液は無機質の(N・P・K)窒素・リン・カリウムを含む有機肥料として利用し、また消化液を浄化して水として再利用する。具体的な技術は、原料(牛糞)加水時の微細化技術、発酵技術、消化液の高付加価値肥料生成技術、消化液の浄化技術、バイオメタン濃縮・貯蔵技術など個々の技術を統合したシステム技術である。このようにその土地ですべて無駄なくエネルギーの再循環を行い自然と調和しながら持続可能な農村社会を築く技術である(図3)。



図3 サーキュラーバイオガスシステムの流れ

3. サーキュラーバイオガス技術課題

サーキュラーバイオガスシステムは、個々の技術(発酵効率向上、脱硫、バイオガス発電、消化液浄化、高付加価値肥料製造、メタン濃縮など)の融合で成り立っており、その具体的な内容に関しては、バイオガス発電機、脱硫装置技術はアイシン技報(Vol.22 2018年)に記載しているが、それに記載されていない主な技術課題を下記に示す(図4)。

- ①原料である牛糞は繊維質が多く(セルロース・リグニンなどの難分解性有機物)HRT(発酵槽内の滞留時間)が長くなり発酵槽が³大きくなる。
- ②バイオガスには、CO₂が35%~40%含まれておりCNG車やLPG代替え用として利用するためにはメタンを90%以上に濃縮する必要がある。CNG車用においては95%以上必要である。それも小型低コストで実現することが大きな課題である。
- ③消化液は、有機肥料として化学肥料の代替として以前から利用されており、広い土地と年間通じて消費出来ることが必要であるが消化液が消費出来ず余った消化液の処理が課題である。
- ④消化液は、固液分離して固分はコンポスト有機肥料として利用出来るが、P(リン)、N(窒素)、K(カリウム)などを添加調合してより付加価値の高い農業作物にあった高付加価値肥料を安価で製造する技術が課題である。
- ⑤消化液が年間通じてすべて消費出来る場所は限られたりするので、消化液を浄化して再利用出来るようにする技術が課題である。

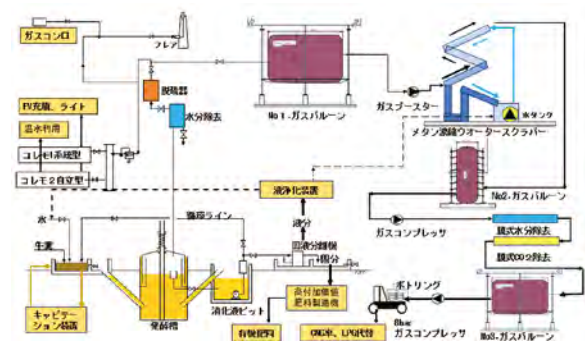


図4 サーキュラーバイオガスシステムEFD

4. サーキュラーバイオガス技術対応と結果

- ①難分解性の繊維質を多く含む原料に急激な減圧を生じさせ空洞(キャピティ)による衝撃波により繊維質を粉碎・微細化するキャピテーション技術を応用し対応した(図5)。
- キャピテーションによりタンパク質、脂質、炭水化物などの有機物の分解速度が早まることは当然であるが難分解性のセルロース、リグニンなどを微細化するため分解スピードが速くなり発酵効率が向上した。これにより、発酵のHRT(滞留時間)を短く出来て発酵槽を小さくすることも可能となった。実証サイトの試験では、牛糞600kg+加水量600Lの原料に対して1m³/hの流量でピット内の原料を1時間循環させた結果はガス発生スピードがキャピテーション無:1.42m³/h、有:1.66m³/hで約17%向上した。



図5 キャビテーション装置外観図

②メタン濃縮技術には、PSA、ウォータースクラバー、膜分離、アミンスクラバーなど多々あるが小型、低コスト化と高濃縮度を図るためにウォータースクラバーと膜分離のハイブリッド化を考案し実現させた。メタン濃度60～65%をガス圧10～20kpaの低圧ウォータースクラバーでメタン濃度90%濃度まで高めさらにエネルギー消費の少ないガス圧6barの低圧膜分離でメタン濃度96%以上まで高めた(図6)。

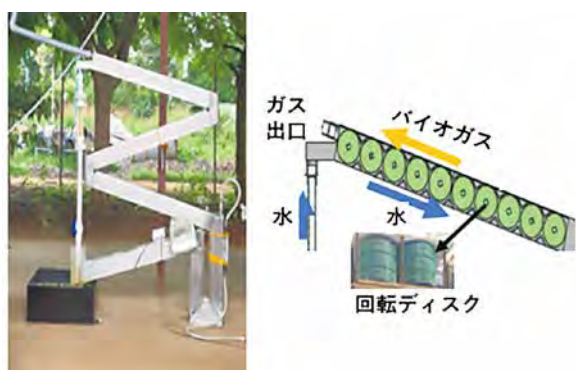


図6 ウォータースクラバー外観&概略図

ウォータースクラバーの特徴は図6に示すような回転接種ディスク(RCD)を用いることによりガスと水との吸収接種面積が多く取れ、局部接種圧力も高く水へのCO₂溶解度が高まる。また、CO₂を豊富に含んだ水は水頭圧と流速による減圧と複数のディスクで空気中にCO₂を脱着し再循環出来る小型低コスト化を図った(表2)。

表2 ウォータースクラバーメタン濃縮試験結果

入口 メタン濃度 (%)	ガス 圧力 (kpa)	ガス 流量 (m ³ /h)	水 流量 (m ³ /h)	出口 メタン濃度 (%)
64	14.5	4.2	7	91

膜分離によるメタン濃縮は、図7に示すように中空糸状の膜でストロー上の中空繊維の壁面に微細な孔が無数にあいておりガス分子の大きさで透過を制御する。

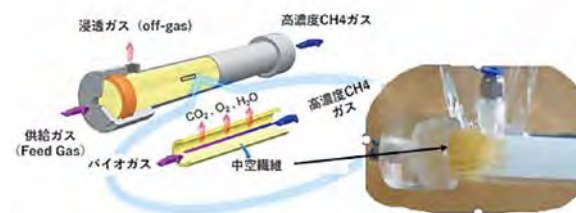


図7 メンブレン概略構図と写真

図8の膜分離試験配管系統図(EFD)に示すようにウォータースクラバーで90%程度濃縮させたガスは水分率が高いため膜分離で水分除去を行いそれから膜分離でCO₂を除去する。CO₂除去の場合はメタン濃度を高め、OFF-GAS中のメタン排出量を抑えメタン回収率を上げることが重要である。

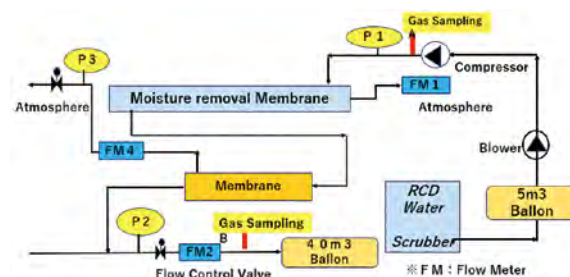


図8 メンブレン試験配管系統図(EFD)

通常膜分離式CO₂除去はガス圧が高いほどガス分離率が高いため高圧15bar程度である。しかし、今回PESO(インドにおける圧縮ガスなどの危険物に対する安全法規)の法規制適用外の圧力8bar未満の低圧5～6barで行った(図9)。



図9 メンブレン試験装置写真

表3に示すように最終メタン濃度は98%まで濃縮が出来た。また、OFF-GASのメタン回収率を上げるためにP3圧力(図8中)を絞りCH₄含有量を出来る限り減らした。その結果メタン回収率94.7%を得た。

表3 メンブレン式メタン濃縮試験結果

OFF-GAS (m3/h)	FM4	0.6
Main flow (m3/h)	FM2	5
P1 INLET press (kg/cm2)		4.5
P2 OUTLET press (kg/cm2)		4.2
P3 Off-gas press (kg/cm2)		1.5
CH4 (%) Gas Sampling A INLET		90
CH4 (%) Gas Sampling B INLET		90
CH4 (%) Gas Sampling C OUTLET		98
1st Moisture+CO2 removal (m3/h)	FM1	0.15
Off-gas CO2 Rate (%)		54.2
CH4 Recovery Rate (%)		94.7

③消化液の固液分離

消化液の含水率は、95%～96%でありTS(固形分)は4～5%程度である。固液分離した液分の成分は、窒素(N)、カリウム(K)が多く即効性の高いN-K肥料である。固分は、含水率が75%程度で窒素(N)、リン(P)が多いN-P肥料として活用出来る(図10)。

固分は、液分に比べて図11のようにコンポストとして袋詰めし運搬・販売など持ち運びに便利である。

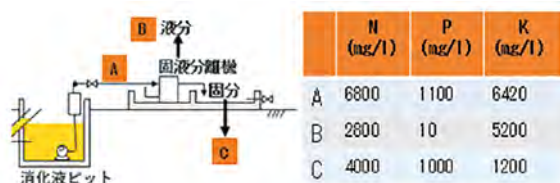


図10 固液分離後のN・P・K成分



図11 固液分離機とコンポスト

④高付加価値肥料

肥料の品質、価格、流通を規制するFOC (Fertilizer Control Order) 規定をクリアすると高付加価値肥料PROM(リン豊富有機肥料)として販売出来る。規定はC/N比が20以下とか全リン含有量が8%以上とか多くの基準がある。そのために消化液を固液分離した固形分にリン等を調合し好気発酵とミキシングを行い基準をクリアした肥料を製造する(図12)。これにより化学肥料の代替えとして作物の収穫も増える。



図12 高付加価値肥料製造装置

⑤消化液の浄化システムは、図14に示すように固液分離により固形分と液分に分離する。固形物(SS分)をより多く分離するために安価で肥料化に適した凝集剤を使用する。次に曝気槽で酸素を供給して発酵槽で分解出来なかった有機物の分解や窒素化合物(アンモニア)を硝酸塩や亜硝酸に変換する。その後UF膜を通して最終的にRO膜(逆浸透膜)で処理する。

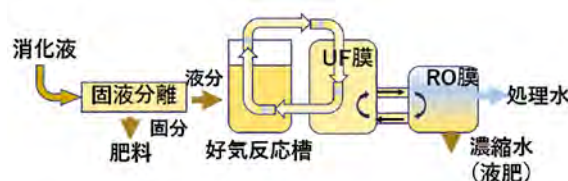


図13 消化液浄化フロー図



図14 消化液浄化システム写真

この処理水は、無色透明で日本の排出基準も十分満たしており(表4)作物農地への利用やメタン発酵における加水、CO₂除去用ウォータースクラバー用の水などへの再利用が可能となった。それとRO膜を通過出来なかった高濃度液は植物の生育に必要な栄養素を豊富に含んだ高品質な肥料として利用出来る。(図14)

表4 消化液の浄化試験結果

	消化液	浄化処理後	排水基準
TSS (mg/l)	26700	2.1	100~200
TDS (mg/l)	41300	126	<500
CODcr (mg/l)	16700	<5	<10
BOD (mg/l)	2320	<3	<5
PH	8.2	8.4	6.5~8.5

5. おわりに

インド全土において農村部のVillage数は60万以上ありその人々の生活が向上するためにサーキュラーバイオシステムを導入して収入の糧になる農業・畜産業での収益向上を図り、持続的に地産地消を実現することが重要と考える。また、本システムを普及させることでエネルギー不足を解消して、人々の暮らしを豊かにするだけでなく、CO₂排出量を削減し循環型社会を実現して、環境問題の解決へ向け少しでも寄与出来ることを願っている。

6. 謝辞

現地法人のAisin Automotive Haryana Private Limited (AHL) およびAisin Automotive Karnataka Private Limited (AKL), NEDO, JETRO, 現地製造会社, 社内関係部署など多くの関係者のご理解とご協力に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) United Nations: population Division (2024)
- 2) 河合 泰典 他(アイシン精機株式会社): 小型分散型バイオガス発電システムによる循環社会の実現に向けて アイシン技報 (Vol.22 2018)
- 3) 久城 款他: 農業の持続的生産とスマート農業研究 公益財団法人中部圏社会経済研究所 (Vol.220 2022.09)

筆 者



久城 款

新事業創出部 ビジネス化推進室
バイオガス事業化に従事 (技術統括)



B. Vengatesan

Aisin Automotive Haryana Private Limited (AHL)
R&D センター
バイオガスプロジェクトに従事 (技術)



Danush Kumaar

Aisin Automotive Haryana Private Limited (AHL)
R&D センター
バイオガスプロジェクトに従事 (評価)