

38. 湿式メタン発酵技術によるバイオガス発電事業 の成立要因分析と将来展望 —沖縄県石垣島を事例として—

山下 達也^{1*}・松下 潤²

¹横浜国立大学大学院環境情報学府（〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7）

²中央大学研究開発機構（〒112-0003 東京都文京区春日1-13-27）

*1 E-mail: yamashita-tatsuya-wj@ynu.jp

我が国では、地球温暖化や循環型社会の構築の観点からバイオマス利活用の重要性が認識されている。特に、バイオマスを低コストでエネルギー回収できる技術としてメタン発酵が注目されており、新規事例として沖縄県石垣島で導入計画が進められている。しかし、残渣の処理方法や経済性の面から導入課題が見られ、本稿では、先進事例の成立要因を挙げた上で、同様に沖縄県石垣島の成立要因について分析を行った。その結果、共に事業内部から資金創出するシステムを構築し、それを地域課題の解決策と結びつけて体系的に取り組むことが必要であることが明らかとなった。今後、沖縄離島地域では、主に耕畜農業を対象とした地域課題の解決に向けて期待されており、どのような事業効果があるかについて示した。

Key Words : methane fermentation, biogas generation, renewable energy, model case, recycling society

1. 研究背景と目的

(1) 我が国のエネルギーとバイオマス利活用

これまで我々の生活は、エネルギーを代表的に石油や石炭などの化石資源に依存してきた。しかし、化石資源の大量消費、大量廃棄の社会システムは、地球温暖化や廃棄物、有害物質の増加といった環境問題を引き起こしている。このような状況を踏まえ、限りある資源やエネルギーを持続的に利用する循環型社会への構造転換が必要とされており、我が国においても、2002年に閣議決定された「バイオマスニッポン総合戦略」を契機に、地球温暖化や循環型社会の構築の観点から、バイオマス利活用の重要性が認識されている。バイオマスとは、生物資源 (bio) の量 (mass) を表す概念で、動植物などから生まれた生物資源の総称であり、一般的には、「再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの」をバイオマスと呼ぶ。バイオマスの種類には、廃棄物系バイオマス、未利用バイオマス、資源作物（エネルギーや製品の製造を目的に栽培される植物）があり、バイオマス資源量全体のうち約7割が廃棄物系バイオマスと考えられる。

(2) 廃棄物系バイオマス処理の現状

平成 20 年度廃棄物発生量の 3.2 億 t (55%) をバイオマス系資源が占めており、家畜排泄物や下水汚泥、厨芥類などの廃棄物系バイオマス資源が挙げられる。バイオマス系資源は、水分及び有機物を多く含むため、発生量に対し自然還元率が 27%、循環利用率が 17%、減量化率は 53%、最終処分率が 2%と焼却や脱水による減量化の割合が高いことが特徴として挙げられる。¹⁾環境負荷は依然として高いままであり、廃棄物量を減らすだけでなく、環境負荷の掛からない技術の選択も必要である。

近年、バイオマス系資源の循環利用量の拡大及び最終処分量の削減に向けて、農業分野での肥料、飼料としての受入れ拡大や、下水汚泥や家畜排泄物に見られる水分含量の多いバイオマスから低コストでエネルギー回収できる技術として、メタン発酵が注目されている。また、2012年7月に固定価格買取制度 (FIT制度) が導入されたことにより、今後、さらなる導入が全国で進むことが考えられる。そこで、事業が成立する要因は何か、そして導入された多くの事業には、地域での環境問題が背景にあり、その解決に向けてどのような役割を果たすことができるか明らかにする必要がある。

(3) 研究目的

本研究では、メタン発酵技術を用いたバイオガス発電事業の成立要因を明らかにするとともに、発電事業が地域課題の解決に向けて必要な点について明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

図1に本研究のフローチャートを示す。本研究では、我が国におけるメタン発酵の導入実績について調査・分析を行う。その結果から先進事例を取り上げ、対象地域である沖縄県石垣島の事例と比較し、成立要因を明らかにする。そして、成立要因から今後バイオガス発電事業がどのような点で貢献できるのかを考察する。

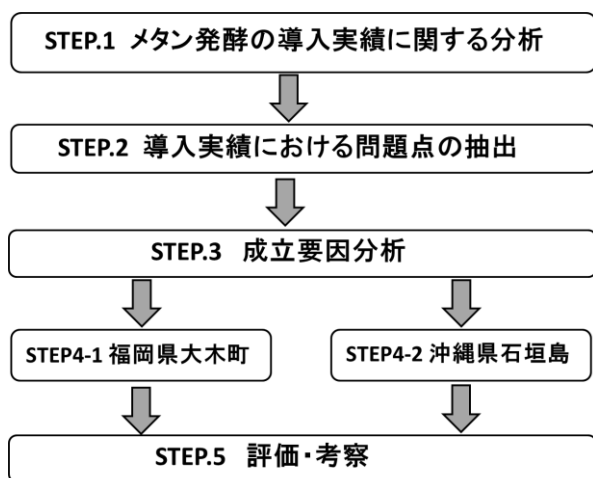


図-1 研究フローチャート

3. 我が国におけるメタン発酵技術の導入実績

(1) メタン発酵とは

メタン発酵は、酸素のない嫌気的条件下においてメタン発酵微生物の代謝作用により有機物をメタン（CH₄）と二酸化炭素（CO₂）まで分解する生物化学的反応であり、自然界の炭素循環において重要な役割を果たしている。雑多な微生物の集団により進行する反応であるため、同一プラントで家畜排泄物やし尿、下水汚泥、厨芥類など多様な廃棄物を同時に処理することができる技術である。

(2) 我が国における導入実績

表-2 に、(社)地域資源循環技術センターが取りまとめる「バイオマス利活用技術情報データベース Ver2.1」²⁾における我が国の導入実績を示す。2011 年 4 月時点でのメタン発酵施設の登録数は、59 施設である。また、網羅的に把握できていないが登録外の施設も合わせると 94 施設³⁾あり、小規模の施設も近年増加傾向にあるため、実際はそれ以上あると考えられる。我が国で

表-2 我が国におけるメタン発酵導入実績

主要処理原料		処理規模(t/日)			
		1～16	16～50	50～100	100～
件数	乾式				
	家畜排泄物(鶏糞)	0	0	0	0
	下水汚泥、し尿・浄化槽汚泥	0	1	0	0
	食品廃棄物	3	1	0	0
件数	湿式				
	家畜排泄物(豚・牛糞)	26	11	10	2
	下水汚泥、し尿・浄化槽汚泥	1	0	0	1
	食品廃棄物	14	9	3	6
	その他	3	0	0	1

は、家畜排泄物や食品廃棄物、下水汚泥等の実用化例しなく、また処理規模が 1～50t/日の施設が集中しており、50t/日以上処理規模の大きい施設は、普及していないことが分かる。処理規模が 1～50t/日の比較的中小規模の施設は、北海道の牧場施設や本州、九州のし尿・浄化槽汚泥、下水汚泥の施設に見られ、先程も述べた通り、発酵消化液の散布できる農地が確保できるか、もしくは水処理の適正範囲で行える環境が整っていることが必要である。一方、50t/日以上処理規模の大規模な施設は、食品廃棄物を取り扱う食品製造加工業や外食産業の施設に見られる。家畜排泄物や下水汚泥等の施設で大規模なものがない理由としては、やはり発酵消化液を散布できる農地が確保できないことや既存の肥料との共存が難しいといった農業面での問題が考えられる。メタン発酵登録施設 59 施設のうち液肥利用している施設は 31 施設であり、北海道が 15 施設と最も多く、九州で 7 施設、東北・関東で 7 施設となっており、北海道では牧草地中心、九州では水稲中心の循環利用システムが構築されている。

(3) 導入実績における課題

我が国の導入実績において、発電プロセスと発酵残渣の処理プロセスの観点から課題を示す。

メタン発酵法による事業は、前処理設備、メタン発酵設備、エネルギー回収設備、消化液処理設備から構成され、メタン発酵後の消化液の農地還元など消化液利用の有無によって液肥貯留設備が必要となり、水処理施設や堆肥化施設を併設する場合もある。発生したバイオガスから電気をつくることができるが、処理規模が小さいものが多く、ほとんどが施設内で電力を自家消費しているため、事業の主たる目的とする事例は少ない。

一方、発酵残渣の処理過程では、残渣として液状の発酵消化液と嫌気性微生物の死骸等の固形物が発生する。残渣の約97%は液状の発酵消化液であり、固形分は極めて少なく、また発酵消化液のBOD等の数値は高く、かつ投入した原料そのものは殆ど減少しないため、発酵消化液は農地還元により再資源化するが、水処理または焼却処理などにより無害化処理する必要がある。水処理では

最終的に下水道または公共水域に放流され、焼却では焼却灰が最終処分場で処理されることになる。発酵消化液の処理方法としては、窒素等の有用成分を活用すべく農地還元することが望ましいが、それが出来ない場合は、水処理して公共水域へ放流する等の処理がなされている。コンポスト（堆肥）化の方法もあるが、これは発酵消化液を液肥としてそのまま散布できない場合の回避的な対応である。

発酵消化液を堆肥にするためには、大量の水分を分離させる必要があり、大量の薬剤やエネルギーを使用する。発酵消化液を処理する場合、施設建設費の中で消化液処理設備の費用が大きくなり、また、維持管理費の中で消化液処理費が大きなウエイトを占めるため、プラントの採算性を悪化させる大きな要因となっている。さらには、エネルギーや排水処理薬品等の資源を使って発酵残渣に含まれる窒素等を大気中に無駄に捨てていることになる。このため、消化液は出来るだけそのままの形で液肥利用することが望ましいと考えられている。

しかし、散布先である農地の確保や液肥散布費用の負担等、液肥利用における課題もあり、事業者だけでなく利用者（農家）との関係を考慮しなければならない等、既往事例ではこれらが阻害要因となっている。その中でも、福岡県大木町と熊本県山鹿市の取り組みが年間液肥製造量が多く、発酵消化液を全量液肥利用しており、特に福

岡県大木町の事例では、メタン発酵を中心とした地域内循環システムを構築していることから先進事例と考えられる。

4. メタン発酵導入の先進事例ー福岡県大木町ー

(1) 事業概要

福岡県大木町の事業は、発酵消化液を全量液肥利用することで、廃棄物処理の問題の解決だけでなく、農業面からも改善策として有効活用されている。

福岡県大木町がメタン発酵プラントの導入を決めた背景には、最終処分地の逼迫と財政上の負担から焼却ごみの減量が必要であったことと、し尿及び浄化槽汚泥の海洋投棄禁止措置（ロンドン・ダンピング条約）への対応に迫られていたことが挙げられる。さらには、クリークで発生する水草が腐敗することで、農業用水路が富栄養化、汚染することも大きな課題であった。ごみが発生するだけで自治体が処理し、財政負担は増大する一方という状況を転換する方法を検討した際、多様な有機性廃棄物を合わせて処理することができ、エネルギーと液状肥料を得ることができるメタン発酵に着目し導入された。

(2) 成立要因

福岡県大木町の成立要因について、図-4 を基に分析する。し尿・浄化槽汚泥、生ゴミなど投入された原料はメタン発酵槽を通じて液肥へ変わり、農地へと還元される。液肥を利用して栽培された作物は、学校給食の食材や直売所の商品として利用し、排出された食品廃棄物を生ごみの分別化をすることで、再度メタン発酵槽に投入できるよう収集体制を構築し、また資源循環だけでなく、従来の焼却処理から技術転換したことで得られたコストメリットを液肥の料金へ還元するシステムまで構築されていることが、福岡県大木町の事例の成立要因である。

表-3 分析結果（福岡県大木町）

福岡県三浦郡大木町		導入前(平成17年度)		導入後(平成21年度)		備考
		処理量(t)	負担額(万円)	処理量(t)	負担額(万円)	
廃棄物処理	燃やすごみ 焼却	3,005	8,646	1,679	5,845	大川清掃センター焼却処理費48.97%削減
	燃やすごみ 収集	-	3,358	-	3,168	立花商事
	し尿・浄化槽汚泥 海洋投棄	9,448	6,401	-	-	福岡県環境整備事業協同組合連合会へ委託
資源化	生ごみ 資源化	-	-	1,172	6,639	おおき循環センター生ごみ収集費含む
	し尿・浄化槽汚泥 資源化	-	-	10,178		
廃棄物処理計		12,453	18,404	1,679	9,013	廃棄物処理費14.95%削減
資源化計		0	0	13,029	6,639	
合計			18,404		15,652	2752万円/年のコスト削減

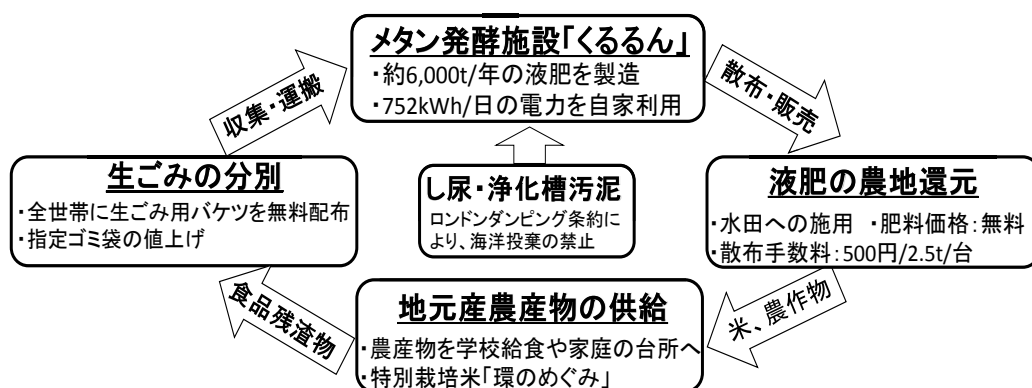


図-4 福岡県大木町の資源循環システム³⁾

5. ケーススタディー沖縄県石垣島ー

(1) 概況

沖縄県石垣島は、日本の最西端に位置する八重山諸島の主島であり、人口 48,775 人 (22,133 世帯)、総面積 229 km²の離島である。石垣市は、沖縄県八重山諸島の政治、経済、産業、交通の中心地で、世界有数のサンゴ礁がある石垣島と西表島の間に広がる石西礁湖を始めとした景勝地を活かした観光業や、気候・地理特性を活かした農業・畜産業が基幹産業である。

また、沖縄県では新たな振興計画となる沖縄 21 世紀ビジョン基本計画において、「持続可能な循環型社会の構築」、「低炭素島嶼社会の実現」などが位置づけられ、石垣島においても第 4 次総合計画や石垣市エコアイランド構想を策定し、美しい自然の保全と、離島ゆえの生活や経済活動などの条件を踏まえ、再生可能エネルギーの活用を推進するなど、環境保全、市民生活、産業振興のバランスの上に、環境と共生したまちづくりを図ろうと計画している。

(2) バイオマス資源賦存量

石垣島のバイオマス賦存量は、林業が存在しないことから間伐材等の木質系が少なく、水分含量の少ないバイオマス全体の賦存量は170MJ (40.2%) で、家畜排泄物等の水分含量の多いバイオマスは253MJ (59.8%) と多い。水分含量の多いバイオマスは前述に説明する通り、メタン発酵によるバイオガス発電が適していると考えられる。さらに発電を前提条件とすると、草本系バイオマス（稲わら、籾殻、ススキ）も利用可能で、その分も含めると約6,570kW出力の発電の可能性が試算される。なお、これらの試算には製糖工場の製糖廃棄物（パガス約20,000t、廃糖蜜約2,100t、フィルターケーキ約5,500t、トラッシュ約13,800t）が含まれておらず、これらを算入するとより大きな可能性が見込まれる。

(3) 事業計画

石垣島バイオガス発電事業協議会が主体となり、メタン発酵技術を利用したバイオガス発電事業を計画している。表-5 に示すように、石垣島の事業計画ではメタン発酵投入原料として、刈草やトラッシュ等の植物繊維や、製糖廃棄物である廃糖蜜やフィルターケーキを原料とすることを特徴としている。しかし、我が国のメタン発酵では、下水汚泥や家畜排泄物、生ごみ・食品廃棄物しか実用化例がないことから、植物繊維等を原料として豊富な稼働実績があるイタリアの BTS-Biogas 社のシステムの導入を前提に事業が計画されている。また、バイオガス発生量及び発電量の推計結果についても表-5 に示す。推計結果は、BTS-Biogas 社のデータベースを基に収集原料サンプルの実験結果からバイオガス発生量を算出し、その後注釈の計算式を用いて発電量を推計した。

表-5 沖縄県石垣島の事業計画⁴⁾

	原料投入量	メタン発生量		発電量	発電出力
	t/日	N m ³ /t	N m ³ /日	kWh/日	kW
肉牛糞	62.2	46.7	2,905	11,552	481
刈草 (乾草・アグリス)	0.30	54.0	16	66	3
フィルターケーキ	9.3	82.1	764	3,113	130
トラッシュ	11.6	31.9	370	1,506	63
廃糖蜜	6.2	226.2	1,402	5,717	238
屠殺廃物	0.30	54.0	16	66	3
廃魚類	2.40	26.3	87	355	15
下水汚泥	19.1	7.2	137	560	23
し尿	3.8	5.0	19	78	3
生ゴミ	3.4	65.0	221	901	38
計	119	598	5,937	23,914	997

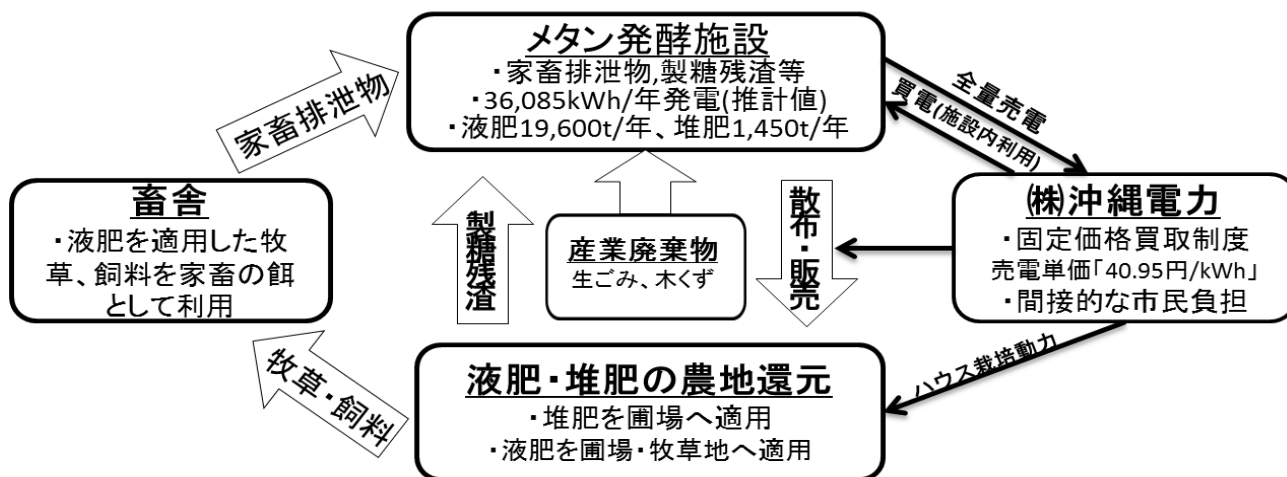


図-6 沖縄県石垣島の資源循環システム

表-7 分析結果（沖縄県石垣島）

沖縄県石垣市	導入前(平成23年)	導入後(推計値)	変化量	備考
処理量 (t/年)	家畜排泄物	12,000	21,900	△9,900 導入前: (株)堆肥センターで家畜排泄物を処理
	刈草	0	14,600	△14,600 -
	栽培作物	0	14,600	△14,600 栽培作物(1%が)の栽培
	生ごみ (産業廃棄物)	21,339	10,950	▲ 導入後: 生ごみ(産業廃棄物)(平成23年度比:51.3%を計画処理)
	計	33,339	51,100	-
総収益 (万円/年)	2,912	52,166	△49,254	事業費内訳(導入後): 売電収入48,182万円、液肥販売1,988万円、 堆肥販売630万円
総支出 (万円/年)	3,489	25,722	△22,233	事業費内訳(導入後): 人件費1,397万円、施設維持管理費5,210万円、原料調達費 12,155万円、減価償却費6,154万円、その他806万円
総計	-577	26,444	-	-

(4) 成立要因

沖縄県石垣島の成立要因について、図-6 を基に分析する。沖縄県石垣島では、年間 12,521,495kWh の発電量が見込まれ、それらを固定価格買取制度によって(株)沖縄電力へ売電し、それによって事業収入が見込まれる。発酵消化液は固液分離を経て、液肥と堆肥が製造され、液肥は牧草地への散布を中心とし、堆肥は農協等を通じて販売されるか、露地作物に適用される。原料の収集や運搬については、家畜排泄物の収集は、現在の収集業者に委託する方式で処理費用は無料であり、刈草と製糖廃棄物は持ち込み式で運送料込みの買い取り方式とし、その他については持ち込み式で若干の処理費を徴収する方式を考えている。

メタン発酵施設で発電された電力は、(株)沖縄電力を通じて地域住民に提供され、それに伴い圃場に散布する水のポンプ消費電力や栽培ハウスの動力として賄われ、発酵消化液は液肥や堆肥として牧草地や圃場など農地還元される。牧草は家畜飼料用として利用され、液肥を利用した牧草を食べた家畜から排出される排泄物を従来の収集方式に比べ効率的に回収できる。事業者としても、発電した電力は全量売電によって利益を生み出し、また課題とされる液肥散布面積の確保についても、広大な牧草地を中心地があり、従来の肥料供給機能に比べて安価に大量に得ることができる仕組みが構築されている。

6. 発電事業の成立要因分析

成立要因分析の結果を踏まえ、内部から資金を生み出す仕組みがバイオガス発電事業の成立要因として必要であることが分かった。

従来の導入実績では、表-2 の導入実績に示す通り、一部を除いてこれまでは中小規模の事業が多く、発電量及び売電収入は見込まれなかった。しかし、先進事例である福岡県大木町の事例に見られる様に、生ごみの焼却処理費用の財政圧迫という問題に対して、メタン発酵施

設による処理へ転換したことによって、創出されたコストを液肥散布サービス料に還元やごみ処理の市民負担による生ごみ分別化を可能としたことで資源循環システムが構築でき、液肥利用の促進にもつながったことが成立要因であることが分かる。

一方、本研究の対象事業である沖縄県石垣島の事例は、これまでに無い比較的大規模な家畜排泄物を中心とした事業である。当然1t当たりの発電量も多く、固定価格買取制度の全量買取制度によって、売電収入という形で資金の間接的な市民負担によって事業採算性は確保できると考える。さらに、発電された電力を利用して栽培ハウスを設置し、ソルガムなどの新たな作物の生産を行うことで利益を創出することができる。また、発生する発酵消化液の量も多く、液肥利用とコンポスト化により農地還元される計画であるが、牧草地やサトウキビ圃場を始め、広大な農地面積への適用が期待される。特に石垣島では、農業従事者の高齢化を背景に、耕作放棄地が増加しており、そこへネビアグラスの生産を事業として導入することで、液肥散布農地の確保だけでなく、農家経営の支援にもつながり、成立要因になると考えられる。

7. 沖縄県石垣島における今後の課題

(1) エネルギー自立度への貢献

沖縄県八重山諸島の中心である石垣島を始めとして、沖縄離島地域のエネルギー資源は、液体・気体燃料とともにほとんどが島外からの移入に依存している。温室効果ガスを大量に排出する石油火力発電によって、エネルギーが供給されており、エネルギーセキュリティの面からも「再生可能エネルギー」の導入や対策が緊急の課題である。石垣市では「第4次総合計画」の中で、“環境共生社会の先進都市づくり”を目標に掲げている。

本事業の発電可能推計量は、発電出力に対し8,321MWh/年である。現在、(株)沖縄電力がガスタービン発電所及び内燃力発電2カ所で30万MWh/年の電力を供給しており、バイオガス発電による電源構成は約2.7%になる。平成23年度年間販売電力量が13.4万MWh/年であり、1,272世帯分の電力を供給することが可能となる。

(2) 堆肥製造機能の改善

沖縄県石垣島で散布・販売される堆肥の一部は、計画処理量を確保できなかったことから、一部を島外から輸入し、堆肥センターでその堆肥を加工したものを散布、販売していた。⁵⁾そのため、散布・販売コストが高くなり、事業者、利用者共に経済的な負担が掛かっている。現在の堆肥センターは平成20年8月に竣工し、指定管

理者（株石垣島堆肥センター）が 20 年契約で運営を行っている。同施設の計画処理量は、肉牛糞尿 89.2t/日、水分調整用戻し堆肥 133.2t/日の計 222.4t/日で、堆肥計画生産量は、年間 6,900t でその内 4,000t が 3,000 円/t で農家に販売される計画だった。しかし、現状肉牛糞尿の投入量は 40～45t/日程度に留まり、含水率の 78%より高いものはエネルギーコストが掛かることから受け入れていない。平成 23 年度総収益 2,912 万円に対し、製造原価（製造単価 3,774 円/t）等の総支出は、3,489 万円で差し引き 576 万円の赤字である。そのため、堆肥販売価格も散布代込みで 6,500 円/t と高騰しており、購入農家には石垣市が 50%の助成を行っているなど、持続不可能な経営状態にある。このような問題に対して、バイオガス発電事業は肥料提供や農家経営状態の改善が期待される。

8. まとめ

以上、メタン発酵導入実績における先進事例と沖縄県石垣島のバイオガス発電事業を対象とし、我が国でバイオガス発電事業が成立するための要因について明らかにした。沖縄県石垣島の事業が開始により、今後は、バイオガス発電事業の分析を踏まえた上で、発電事業におい

て沖縄県石垣島におけるエネルギー自立度や農家経営にどのように貢献していけるのか明らかにしていくことが求められる。

謝辞

本研究の実施にあたり、多大なご協力をいただいた石垣島バイオガス発電事業協議会（代表：入嵩西正治氏）の方々より貴重な情報や意見をご提供いただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 平成 23 年版環境白書(第 3 章第 2 節廃棄物等の発生、循環的な利用及び処分の現状)，環境省，2011 年
- 2) (社)地域資源循環技術センター(JARUS)，バイオマス利活用技術情報データベース，2011 年 4 月時点
- 3) 新エネルギー財団，バイオマス技術ハンドブック，p314-355 2008 年
- 4) 農業生産法人(有)石垣島ファーマー，平成24年度地域調和型エネルギーシステム構築検討委託業務報告書，2013年3月
- 5) 内閣府沖縄総合事務局農林水産部，第41次沖縄農林水産統計年報，2012年