

下水汚泥と生ごみの混合嫌気性消化システムの普及方策に関する検討

五十嵐 正¹・古市 徹²・石井 一英³・藤山 淳史⁴

¹正会員 大成建設株式会社 環境本部（東京都新宿区西新宿一丁目25-1）

E-mail: igarashi@dev.taisei.co.jp

²正会員 北海道大学客員教授 大学院工学研究院（北海道札幌市北区北13条西8丁目）

E-mail: t-furu@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院（北海道札幌市北区北13条西8丁目）

E-mail: k-ishi@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 北海道大学特任助教 大学院工学研究院（北海道札幌市北区北13条西8丁目）

E-mail: fujiyama@eng.hokudai.ac.jp

下水汚泥のエネルギー利用の方策として、バイオガス回収量の増加が見込める生ごみとの混合処理が注目されているが、実際の取組み事例は少なく、その普及は進んでいない。そこで、下水汚泥と生ごみの混合嫌気性消化システム導入の課題とその解決の方向性を整理し、実存する下水処理場をモデルとして、既存の施設を活用した場合の事業収支の試算と導入推進策の検討を行った。その結果、混合消化システム導入により、バイオガスの回収量が約60%増加する一方、支出は約197百万円/年増加することが試算された。また、混合消化システム導入前の施設状況、運営状況の違いが導入の経済的効果とどのような関係があるかを検討した結果、導入以前は生ごみを埋処分していた場合の効果が最も高い結果となった。混合消化システムの導入による経済的評価では、焼却施設の更新費用を加味した場合に、経費削減効果があることが示された。

Key Words : sewage sludge, kitchen waste, fermentation, sewage treatment plant, digestion gas, biogas

1. はじめに

混合嫌気性消化システムとは、下水処理場内に汚泥処理施設として導入されている嫌気性消化設備を活用し、現状では焼却もしくは埋処分されている生ごみを下水汚泥と混合して嫌気性消化を行う一連の技術および設備である。（以下、混合消化システム）

嫌気性消化は、メタン発酵とも呼ばれている技術で、下水処理場から発生する汚泥の減容化を目的に普及してきた経緯がある。昨今、固定価格買取制度（FIT）を活用し、嫌気性消化で発生したバイオガスによる発電事業への取組が行われているが、下水汚泥の有するメタン発生ポテンシャルはそれ程大きくはないため、有機性廃棄物の中でもメタン発生ポテンシャルの高い生ごみが注目され、これらを混合して嫌気性消化させることでエネルギーの回収量を増やすという気運が高まってきた。

混合消化システムは、国土交通省と環境省の施策にも盛り込まれており、例えば、環境省の技術開発支援として「地域循環型バイオガスシステム構築モデル事業」

（平成 26 年度事業）等、企業や自治体を対象とした補助制度が制定され、普及に向けての取り組みがなされている。

全国約 2,150 箇所の下水処理場の内、消化槽を有する下水処理場は、約 280 箇所（約 13 %）である。下水汚泥と生ごみを混合して嫌気性消化を行っている事例は、図-1 に示すように全国で 11 件あるが、この内、下水処理場の既存の消化槽を活用した例は、僅か 3 件に留まり、その他は、消化槽を新設した例が 2 件と、汚泥再生処理



図-1 混合消化システムの導入状況

センターにおいて、し尿、浄化槽汚泥、下水汚泥、生ごみを混合して処理する施設である。（小規模な実証試験を除く）

そこで、混合消化システムの普及のため、導入の課題を整理し、導入促進の方向性を探るとともに、実在の都市をモデルに経済性の検討を行った。

2. 混合消化システム導入の課題と解決の方向性

表-1に、混合消化システムの導入に関わる課題と解決の方向性等を、技術、経済、制度、環境の4つの面から整理した。

(1) 技術面

投入する生ごみの質や量の変化による下水汚泥の嫌気性消化（メタン発酵）の反応阻害、返流水（消化後の下水汚泥（消化汚泥）を固液分離した液分）増加による下水処理への負荷増大、消化汚泥の増加と処分方法の確保などが課題となる。

異物の混入を防止するための排出者への分別の協力、ごみ質の平準化を図るための貯留槽の追加、ごみ質把握と下水処理や消化システムの処理能力に見合った生ごみ投入に関する事前シミュレーションなどが重要になる。

また、消化汚泥を緑農地還元する場合は、農地の確保とともに、消化汚泥の品質評価、普及啓発も重要である。

(2) 経済面

経済面では、初期投資の回収と運転経費の増加要因への対応がある。

設備投資の削減のため、下水処理施設、生ごみ処理施設双方の既存設備を流用できるシステムを構築する。補助金の受給を可能にするため、既存施設の補助金効力が

経過した後に混合消化の設備を検討する必要がある。

また、生ごみの収集費用や汚泥処理等の費用が増大するため、既存インフラを活用した効率的な収集体系の整備、バイオガス活用による運転経費削減、さらに、自治体の広域連携によるスケールメリットやPFIなど民間経営ノウハウの採用など、経済性確保の策を検討すべきである。

(3) 制度面

下水道部門と廃棄物担当部門と所管が違う場合が多く、下水道は公営企業で運営する場合も多い。部門の統合が好ましいが、現実的には困難が伴うため、将来の廃棄物行政を鑑み、同一自治体内の所轄部署間で、協力体制を構築し、予算面でも負担の平等性が重要となる。

補助事業に関しても、国交省、環境省と所管が違うため、補助事業取扱窓口の一本化や各省庁間の共管事業の創設が望まれる。

また、廃棄物処理法では、下水汚泥は産業廃棄物で都道府県の所管、生ごみ、し尿および浄化槽汚泥等は一般廃棄物で市町村の責任処理となっているが、この類別が、施設設置や許認可手続きの煩雑さを招かないよう、適切な運用が望まれる。既存施設で産業廃棄物と一般廃棄物の双方を受け入れ、様々な排出源の生ごみを容易に資源化できる環境を整えるべきである。

(4) 環境面

環境面の課題のひとつに、温室効果ガス（GHG）排出削減効果が見えづらい点がある。混合消化システム導入による下水処理場への生ごみの運搬や前処理、消化槽運転等、使用エネルギーが増加（GHG増加）するが、それを上回るバイオガス回収・利用等によるGHG削減効果を“見える化”することが重要である。

消化汚泥の増加に伴う汚泥乾燥時のエネルギー使用量

表-1 導入の課題と対策の方向性

項目	課題・未普及の原因	解決の方向性・検討事項
技術	生ごみの質と量の安定性 下水処理への負荷増大 消化汚泥処理	住民の分別協力、啓発活動 ごみ収集有料化、戸別収集 選別技術の導入、ディスボザーの導入、下水処理能力と生ごみ投入量のバランス見極め、脱窒設備の整備、消化汚泥の品質評価技術の一般化
経済	初期投資財源 収集、汚泥処理等費用の増大	既存インフラの活用、既存施設の更新メニューへの組み込み 広域連携によるスケールメリット、PFI化、民間委託による民間ノウハウ活用 ガス利用による運転経費削減、消化汚泥の農業利用等有効性の認知拡大による付加価値化
制度	所管部課局の違い 所管省庁、補助事業の違い 一般廃棄物と産業廃棄物の類別	連携、負担の平等化 事業取扱窓口の一本化 共管事業、更新時の導入が有効、規制緩和
環境	GHG排出量削減効果に疑問 汚泥の乾燥で使用エネルギー増大 処理場周辺での臭気	GHG排出量削減効果の見える化、熱のカスケード利用 焼却施設の排熱の活用 周辺住民とのコミュニケーション、密閉型施設の導入

また、生ごみを新たに分別収集すると、収集場所、収集車が通る沿線および処理場周辺での臭気を指摘されることが多いため、防止策と周辺住民の理解が重要となる。

札幌市近郊の实在の都市をモデルに、混合消化システムの導入シミュレーションを行った。

モデルとした都市は、札幌市のベッドタウンである一方、郊外では稲作や牧畜も盛んな地域で、下水道の概要は表-2に示すとおりである。

図-2にモデル都市の混合消化システム処理フローを示す。モデル都市では、現状で既に下水汚泥から消化ガスを回収し、ボイラーで熱を回収、余剰ガスで発電し、場

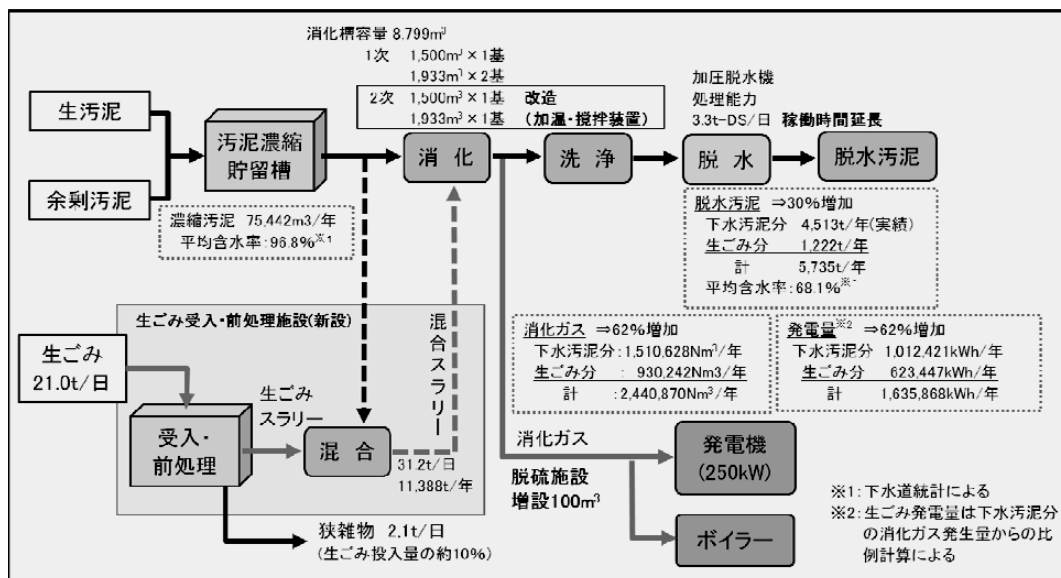
事業認可区域面積	2,720 ha
認可区域内計画人口	117,000 人
計画汚水量	51,000m ³ /日
消化ガス回収量	約 4,000Nm ³ /日, 約 1,510 千 Nm ³ /年
消化ガスの利用	消化槽加温, 発電 (1,000MWh/年)
下水汚泥の処理	全量を緑農地還元 (農地約 180ha)
下水道事業の収支	純利益: 184 百万円

混合消化システム導入により、消化ガスの回収量は62%増加することとなるが、追加となる施設は、生ごみ受け入れ・前処理施設と消化ガスの脱硫施設のみで、その他は現状の施設を一部改造、一部稼働時間の延長で対応できる。

追加する施設の建設費は「下水処理場へのバイオマス（生ごみ）受入れマニュアル」（2011.3 下水道新技術推進機構）¹⁾および「嫌気性プロセス導入支援ツール」（日本下水道協会）²⁾による費用関数を用い、また、初期投資を年間の経費に換算した建設費年価は以下の式により算出した。

n: 耐用年数, i: 利率=4%, p: 残存割合=10%

導入設備		建設費 (百万円)	耐用年数 (年)	建設費年価 (百万円/年)
生ごみ 前処理 施設	機械・電気設備	560	15~20	39.2
	土木・建築工事	319	40	14.5
	小計	879		53.7
混合設備	機械・電気設備	99	35	6.8
	土木建築工事	56	40	2.5
	小計	155		9.3
脱硫塔	増設 (機械)	29	20	2.4
消化槽 改造	機械電気設備	361	15	29.3
	土木工事	298	40	13.5
	小計	659		42.8
合計		1,722		108.2



- 349 -

混合消化システム導入時の建設費は、表-3の通り、新設（増設含む）が1,063百万円、既存改造が659百万円の合計1,722百万円となる。

資金は、国土交通省「新世代下水道事業支援制度（リサイクル推進事業—未利用エネルギー活用型）」による補助金等を想定するが、事業収支試算では、事業費総額の50%を補助金で賄い、その他を借入金（耐用年数の期間の費用）とした。

(3) 事業収支の試算

混合消化システム導入の事業収支の試算を行うが、全ての数値について、導入前の費用からの増減額で評価する。

a) 収入増（又は経費削減）

図-2に示す通り、発電量が年間623 MWh増加し、1 kWhあたり12円の電気料金に換算すると、約7,500千円/年の経費削減となる。

また、ごみ処理施設運営委託費として、1 tあたり2,602円を支出していたが、生ごみを21 t/日、年間約6,900 tを焼却処理から混合消化に変更することで、約18,000千円/年の経費削減となる。

b) 支出増（又は収入減）

生ごみの収集運搬費用として、現状の収集運搬費用の1回分、約107百万円の支出増となる。また、消化汚泥は全て緑農地還元とするが、消化汚泥輸送量の増加分が約6百万円、その他薬品代等、処理経費が約27百万円増加する。さらに、生ごみの分別を推進するために、現在実施中のごみの有料化を取り止めた場合には、約16百万円の収入減となる。

c) 事業収支表

新設または増設した施設の運転費は、建設費と同様に「下水処理場へのバイオマス（生ごみ）受入れマニュアル」の費用関数をを用い、建設費は補助金を考慮して表-3で算出した建設費年価の50%を計上する。

(4) 事業収支試算結果

モデル都市での混合消化システム導入後の事業収支は、表-4の通り、年間約197百万円（生ごみを有料とした場合は約181百万円/年）の支出（経費）増という結果になった。

その要因は、以下の通りと考えられる。

- ・ 生ごみの収集運搬に多くのコストが必要。
- ・ 既存施設を活用したが、前処理や改造に多くのコストを要した。
- ・ 耐用年数が機械設備15年、電気設備20年と年間の負担額が大きい。
- ・ 上記負担増に対して、生ごみ導入による消化ガス回収量増加だけでは追いつかない。

また、生ごみを混合処理システムに移行し、焼却施設や最終処分場等、他の施設の処理量が減少することによる更新費用、更新後の運転経費の削減も加味する必要があるのではないかと考えられた。

4. 導入前の設備整備状況との関係

次に、導入前の施設状況、運営状況の違いが混合消化システム導入の経済的効果とどのような関係にあるかを検討した。

(1) 検討ケース

下水処理場の規模、下水や生ごみの発生量等はモデル都市と同じとし、混合消化システム導入前の施設の整備状況と生ごみの処理状況の違いにより検討ケースを設定した。表-5に検討ケースを示す。

即ち、現状の下水処理施設が消化槽にて嫌気性消化を行っているかどうか、行っている場合に発電しているかどうかの3ケースと、それぞれの場合に、生ごみの処理方法が、埋立処分、焼却処理、資源化のどのケースであるかの合計9ケースとした。生ごみの処理方法による大

表-4 モデル都市事業収支表

区分		諸元	金額 (百万円/年)
収入	電気料金削減	623 MWh/年	7.5
	運営委託変動費（焼却）	-6,900 t/年	18.0
	計		25.5
支出	有料ごみ収入減	20 円/10 L	16.0
	生ごみ収集運搬費用	週1回追加	107.2
	緑農地還元費用	1,222 t/年	6.1
	その他運転経費		26.5
	修繕費	工事費の0.5%	8.5
	変動費計		164.3
	人件費（運転）	1名	4.5
	設備投資年価	利子率4%	53.9
	固定費計		58.4
	計		222.7
収入－支出			-197.1

表-5 検討ケース

ケース 名称	混合消化システム導入前状況			
	下水処理施設		ごみ処理方法	
	消化 (加温)	発電	生ごみ 処理状況	生ごみ 分別収集
1-1	×	×	埋立	×
1-2	×	×	焼却	×
1-3	×	×	資源化	○
2-1	○	×	埋立	×
2-2	○	×	焼却	×
2-3	○	×	資源化	○
3-1	○	○	埋立	×
3-2	○	○	焼却	×
3-3	○	○	資源化	○

混合消化システム導入前に、○：設備を保有している

×：設備を保有していない

きな違いは、焼却処理施設および最終処分場での処理量削減量と分別収集の有無である。

(2) 諸元算定

生ごみの受け入れ量は、モデル都市での検討と同様、1日あたり21.0 t（不純物10％）とし、下水汚泥206 t/日と混合する。処理フローもモデル都市と同様である。

モデル都市との違いは、整備する施設の種類の、ガス発生量、発電量の増加分、生ごみ収集その他経費の増加分である。表-6 に本検討で考慮する施設整備項目および整備費用、運転費を示す。運転経費等は、混合消化システム導入の前後の増加分および削減分である。

(3) 焼却施設更新費用

多くの場合、ごみ焼却施設の更新や最終処分場の更新が混合消化システム導入の契機となることから、これらの更新費用に対する混合消化システム導入の効果、即ち、ごみ焼却施設や最終処分場の処理量から混合消化とした生ごみ量を差し引くことによる更新時の建設費や運転費の減少分を加味した検討を加えることにする。

本ケーススタディでは、ごみ焼却施設の更新時に混合消化システムを導入することを想定し、導入しない場合よりも、焼却能力が21 t/日少ない施設を整備したとして、建設費の削減額を試算した。（表-7）（建設費削減額は、モデル都市と同様に費用関数を使用）

(4) 各ケースの事業収支試算結果

図-7に各ケースの事業収支試算結果を示す。
ごみ焼却施設の更新を加味した場合、従前に生ごみを資源化していたケース以外は、生ごみを混合消化に移行

した分、焼却施設の建設費、維持管理費共に大きな削減効果があり、経済性は大きく好転する。

混合消化システム導入前の施設整備状況による違いとしては、消化槽や発電施設等の導入前の設備が整っているほど、経費削減額は小さいという点である。

生ごみの処分状況による違いは、混合消化システム導

表-6 施設整備項目および整備費用

項 目		処理量等	建設費 年価 (百万円/年)	運転経費 (百万円/年)
下水 処理 場	生ごみ前処理施設	21.0 t-wet/日	53.66	21.14
	混合設備	300 m ³	9.33	3.69
	発電設備	6687 Nm ³ /日	62.18	15.26
	脱硫塔	増設時	100 m ³ /時	2.36
		新設時	300 m ³ /時	5.45
	ガスホルダー	3,000 m ³	27.84	1.65
	消化タンク改造費	3,433 m ³	42.79	5.40
	消化タンク新設	1,038.68 m ³ /日	93.03	25.63
	脱水施設	88.01 m ³ /日	26.20	18.93
	新規発電	1,637,000 kWh/年	12 円/kWh	-19.64
	発電増	624,000 kWh/年	12 円/kWh	-7.49
	新規緑農地還元	5,735.00		28.16
焼却 施設	緑農地還元量増加	1,222.00 t-wet/年		6.10
	分別収集経費増	6,900 t-wet/年		107.20
最終 処分 場	焼却施設運転費	6,900 t/年	2,600 円/t	-17.94
	最終処分量削減	24,000 円/t	ケース1：生ごみ削減 ケース2,3：焼却灰削減	
その他	人件費	450 万円/人	ケース1：2名 ケース2、3：1名の増加	

表-7 焼却施設更新時建設費等削減額

項目		建設費 (百万円)	建設費年価 (百万円/年)
ごみ焼却施設 建設費削減分	土木・建築 (25%)	367	16.71
	機械・電気 (75%)	1,102	89.23
	計	1,470	105.94
ごみ焼却施設補修費、運転費削減分		149.47	

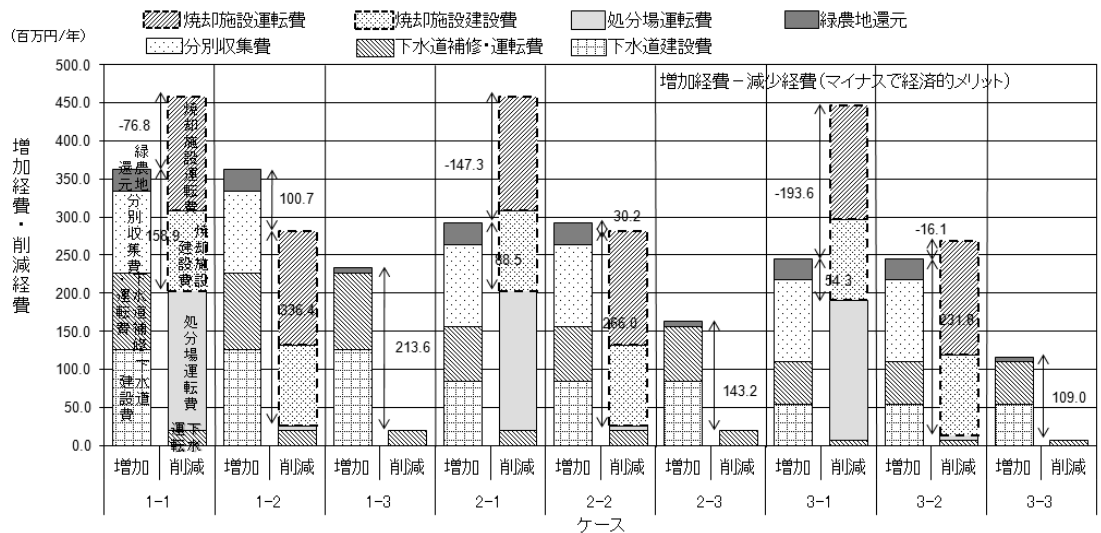


図-3 各ケースの事業収支試算結果（焼却施設の更新費用等を考慮）

入前、生ごみが埋立処分されていた場合は、埋立費用が大幅に削減される。また、従前に生ごみを埋立処分又は焼却処理しており、生ごみを分別収集していなかった場合には、生ごみの収集費用が大きく増加する。

最も効果が大きいのは、下水処理場に消化槽があり発電も行っており、生ごみは埋立していた場合（ケース 3-1）で、焼却施設の更新費用を加味した場合、その効果は年間約 193 百万円であった。先に述べたモデル都市の場合（ケース 3-2）でも約 16 百万円/年の削減効果と試算された。

6. モデル都市での温室効果ガス (GHG) 排出量削減効果

モデル都市では、混合消化システム導入前においても 1,511 千 Nm³/年のバイオガスを回収し、下水処理場内で利用されているため、施設内のエネルギーが全て化石燃料の場合に比べ、1,657 t-CO₂/年が削減されていた計算になる。混合消化システム導入により、バイオガス回収量が 930 千 Nm³/年増加し、全てを施設内で消費することにより、CO₂排出量はさらに 1,021 t-CO₂/年削減される。

また、焼却施設の更新を考慮する場合、生ごみを処理しなくなる分、助燃材の使用量が削減され、2,240 t-CO₂/年のCO₂がさらに削減される。（年間の助燃材使用量：約900 kL/年）

7. おわりに

本研究により混合消化システムの普及に向けて重要と考えられたものは、以下の 5 点に集約される。

- 各家庭に分別の協力を求め、その生ごみを効率良く収集すること。
- 下水処理、ごみ処理といった廃棄物処理全体での経済的メリットに加え、波及効果をも見据えた評価が重要であること。
- 省庁、部局を超えた連携とリーダーのけん引力が求められること。
- 地域住民とのコミュニケーションを重視し、インセンティブが与えられること。
- 地域の廃棄物処理、エネルギー計画に明確なビジョンがあり、地域振興につながる施策であること。

本研究で取り上げた下水汚泥と生ごみの混合だけではなく、家畜ふん尿や農業残渣、水産加工残渣などウエット系のバイオマスを混合して処理・利活用することも可能であり、一般廃棄物、産業廃棄物の類別にとらわれない処理、地域の産業構造などに適合した利活用の実現が、エネルギーの地産地消や循環型社会の実現の観点からも望まれるところである。

謝辞：本研究は北海道大学大学院の寄附講座「エコセーフエナジー分野」の研究会活動として実施したものである。参画された北海道、道内自治体、寄附会社等の関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 下水道新技術推進機構：下水処理場へのバイオマス（生ごみ）受入れマニュアル，2011。
- 2) 日本下水道協会：嫌気性プロセス導入支援ツール，2012。

(2015. 7. 16 受付)

STUDY ON STRATEGIES TO PROMOTE THE USE OF CO-FERMENTATION SYSTEMS FOR PROCESSING SWAGE SLUDGE AND KITCHEN WASTE.

Tadashi IGARASHI, Toru FURUICHI, Kazuei ISHII, Atsushi FUJIYAMA

The anaerobic digestion system of the mixture of sewage sludge and kitchen waste (co-fermentation system), which is expected to produce higher amount of biogas, is recently attracting a great deal of interest. However, the application of co-fermentation system is still limited, hindering wide spread of this system. The obstacles for the promotion and the strategies to overcome them were listed. The business balance was simulated by introducing the co-fermentation system at the existing sewage treatment plant as a model. The simulation showed that the introduction of co-fermentation system increased the production of biogas by 60%, as well as increased the total operation cost by 197million Yen/ year. The case study in the facility with reclamation of kitchen waste showed highest cost performance by introducing co-fermentation system.