

コンパクトメタン発酵システムの開発

Development of Compact Methane Fermentation System

川尻 聡 Satoshi Kawajiri*¹

梗概

従来よりもコンパクトで発酵時間が短いコンパクトメタン発酵システムを開発した。この技術の適用検討として、馬鈴薯澱粉製造工場の排水・廃棄物及び食品廃棄物を用いてそれぞれ実施した。

また、地域活性化における農業の六次産業化を促進するために食品廃棄物処理に本技術を応用した事例の報告も行った。

キーワード：バイオマス，水熱可溶化，メタン発酵，六次産業化

Summary

We have developed a compact methane fermentation system that is more compact and shorter in fermentation time than before. As an application study of this technology, wastewater / waste from potato starch manufacturing factory and food waste were used respectively.

We also reported examples of applying this technology to food waste disposal to promote the sixth-order industrialization of agriculture in regional revitalization.

Keywords: biomass, hydro-thermal liquefaction, methane fermentation, sixth-order industrialization

1 はじめに

当社におけるバイオマスの研究は、2005年から本格的に開始した。2005～2008年には、環境省の委託研究として、建物で発生する生ごみの超臨界ガス化処理の実証研究を行い、高温高压の反応場に直接生ごみを注入する方式で10分程度の短時間で水素、メタンを主成分とするガス化とその燃料ガスを用いた発電試験を実施した。ただ、高温高压の超臨界水を用いたこと、高温・高压の反応場に生ごみを直接注入する方式を採用したことなどにより、装置が堅牢かつ大型化したことから実装の点で課題が残った。

生ごみはその殆どが水分であることから、高压熱水の特性は利用しつつも実装可能な条件での反応を志向し、2008～2011年に、馬鈴薯澱粉製造工場で排出される残渣（排水と固形残渣（澱粉粕））を原料としたエタノール製造の実証試験を実施した。当該研究では、固形廃棄物を亜臨界水の特性を利用して液体化するとともに糖化を促進することでエタノール発酵における効率向上をはかった。エタノール発酵の際には、発酵の原料となるグルコースの回収効率を向上させるために、有機膜による分離と濃縮を行った。当初のエタノール製造目標は達成したが、製造したエタノールの利用において解決すべき課題が残った。

2011～2014年には、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究により、前述の馬鈴薯澱粉製造工場で発生するハイドロサイクロン排水（澱粉の濯ぎ水）と固形残渣（澱粉粕）を用いたコンパクトメタン発酵システムの実証研究を実施した。大量に発生するが濃度が薄く、かつ微量の固形を含むハイドロサイクロン排水から固形物除去するとともに濃縮を行い、固形残渣と混合した上で水熱可溶化反応を行い、その可溶化液からメタン発酵の原料となる有機酸を濃縮した状態で分離してメタン発酵に要する時間と発酵槽の小型化に成功した。

2015年からは、有望な市場として想定されている農業分野への参入検討のため、コンパクトメタン発酵システムによる食品廃棄物処理を組み込んだ農業の六次産業化推進、地方活性化を検討している。2016年には、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受け、地域自立システム化実証事業のFS事業として、「都市と農業地域を繋ぐ循環型バリューチェーン構築を目的とした実証開発の事業性評価」を実施して適

*1 技術研究所 エコエンジニアリング部 環境浄化グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

用範囲の拡大について検討した。本報告では、コンパクトメタン発酵システムの概要から適用について報告を行う。

2 コンパクトメタン発酵システム

2.1 システムのコンセプト

従来のメタン発酵技術のうち、生ゴミ等の廃棄物を処理可能な湿式メタン発酵法は、生ゴミを直接発酵槽に投入し、発酵するシンプルな方法であるが、中温メタン発酵（発酵槽温度35～37℃）は、資化（ガス化）するまでに2週間から3週間の時間を要するため、処理すべき廃棄物量（日量）の14～20倍程度の発酵槽容量が必要である。また、発酵後の残渣は消化液と言われる液体と発酵不適物の固体からなり、投入廃棄物量と同等の副産物が発生するという課題もある。そこで、従来よりもコンパクトで、発酵時間の短い新たなメタン発酵技術を確立するために当社先行技術である水熱処理技術を用いた処理の検討を行った。メタン発酵は、メタン菌が有機物を摂取し、代謝する過程でメタンを発生させるが、メタン菌が摂取可能な有機物は酢酸などの有機酸であり、分子量が小さい有機物を対象としている。いかにして固体有機物を低分子化するかが発酵時間の短縮に寄与するため、水熱可溶化処理を行い、固体有機物の液体化、液状有機物の低分子化を同時に実施した。可溶化した有機物の分子量分布は広範であり、また、水熱可溶化処理後の可溶化液は、排水としての濃度が薄く、発酵の効率が低いため、発酵に適した成分のみを濃縮し、発酵時間の短縮と発酵槽のダウンサイジングを目論んだ。

2.2 システムの構成

コンパクトメタン発酵システムは、前述のとおり、固体を含むバイオマス（廃棄物）を水熱可溶化処理で、液体化することと、得られた液体のうち、メタン発酵に必要な成分のみを分離・濃縮することの特徴としたシステムである。Fig. 1にシステムの概要を示す。

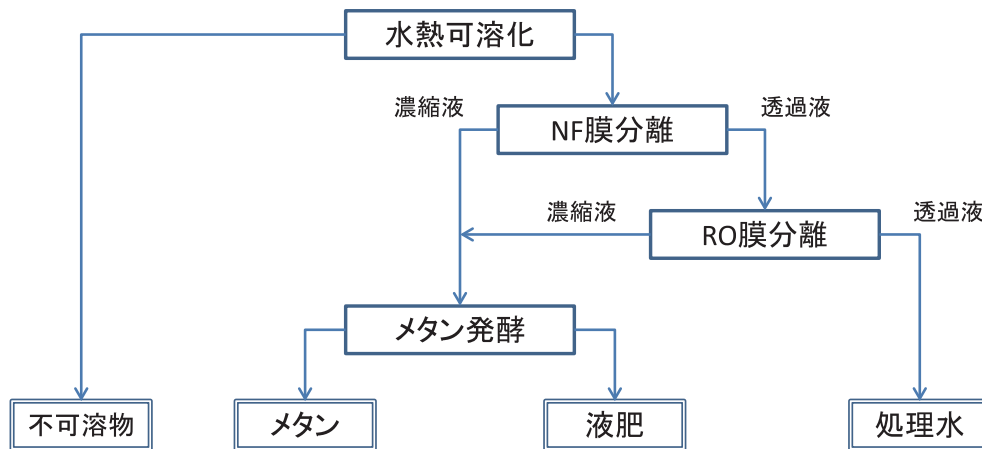


Fig. 1 コンパクトメタン発酵システムの概要
Outline of compact methane fermentation system

水熱可溶化処理は、水の特性を利用した処理方法である。Fig. 2に水の相図を示す。図中の○で囲まれた領域を反応に用いる。廃棄物中の水分は、飽和溶解度から乖離した水分を基質（廃棄物中の固体）に与えて乾こうとする。それが、溶解や分解の推進力になる。反応温度と圧力は、それぞれ、130～160℃、3MPa程度である。この処理温度において、廃棄物中の有機成分は、繊維質（セルロースとリグニンの一部）を除いて、液体化する。

得られた固液混合物は固液分離して液体を回収し、NF膜分離工程へと進む。NF膜は、 MgSO_4 （分子量120）を阻止できる程度の分画が可能である。この膜を透過した液は、RO膜（ NaCl 、分子量59を阻止）に供する。RO膜は海水の淡水

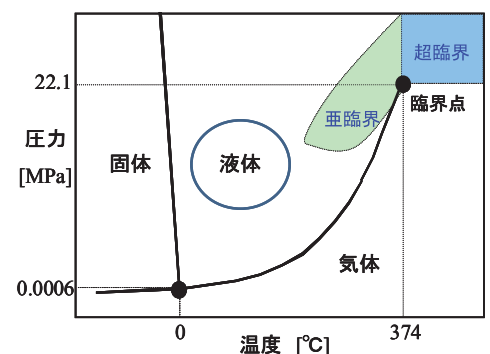


Fig. 2 水の相図
Phase diagram of water

化に使用される膜であり、食塩はじめ、無機化合物の多くを濃縮する。有機成分としては、有機酸の殆どを濃縮する。NF膜とRO膜で濃縮された液をメタン発酵槽に供給する。一方、全ての膜を透過した液体は、処理水として再利用する。

3 馬鈴薯澱粉製造工場における実証試験

3.1 実証システムフロー

北海道網走郡美幌町に所在する、美幌地方農産加工農業協同組合連合会（以下、ビホロ農工連）の協力のもと、コンパクトメタン発酵システムの実証試験を実施した。Fig. 3に実証システムのフローを、Photo 1に外観写真、Fig. 4に実証装置とその仕様を示した。

Fig. 1で説明したコンパクトメタン発酵システムに、ハイドロサイクロン排水から固形を除去し、かつ排水の濃縮を行う浸漬膜分離工程を加えたシステムで実証を行った。各処理の概要を以下に示す。

①浸漬膜分離工程

ハイドロサイクロン排水内に存在する数%の固形物を除去しかつ5～10倍に濃縮する工程であり、セラミック製の浸漬膜を用いて固液分離と液体成分の濃縮を日量最大140トン/日規模で実施した。

②水熱可溶化工程

①で得られた濃縮液と含水率90%程度の澱粉粕を混合し、反応温度140～160℃、反応圧力3MPaの条件下で、水熱可溶化し、繊維質を除く有機物の60～70%可溶化した。

③多段膜分離工程

水熱可溶化工程で得られた固液混合物をフィルタープレスで固液分離し、そのうちの液体を多段の膜分離（NF膜、RO膜）で酢酸を主とする有機酸を10倍程度濃縮分離した。

④メタン発酵工程

③で得られた濃縮された有機酸をUASB型のメタン発酵槽に供給してメタン発酵を行った。当初目標では、発酵時間を5日としていたが、実証により、最大2日で発酵が完了することが確認された。

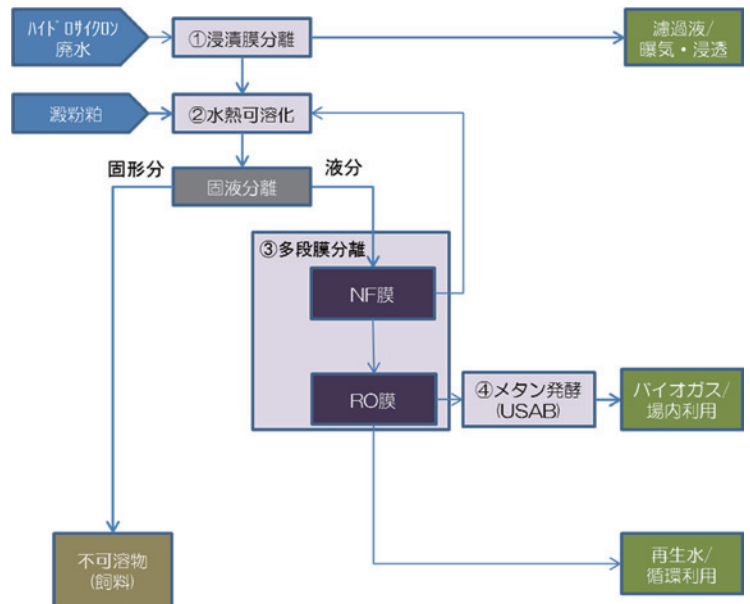


Fig. 3 ビホロ農工連におけるコンパクトメタン発酵システムフロー
Compact methane fermentation system flow at Bihoro agricultural processing agricultural cooperative association

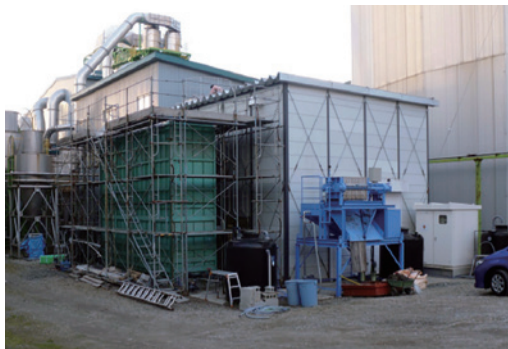


Photo 1 馬鈴薯澱粉工場におけるコンパクトメタン発酵システム外観
Compact methane fermentation system in potato starch plant

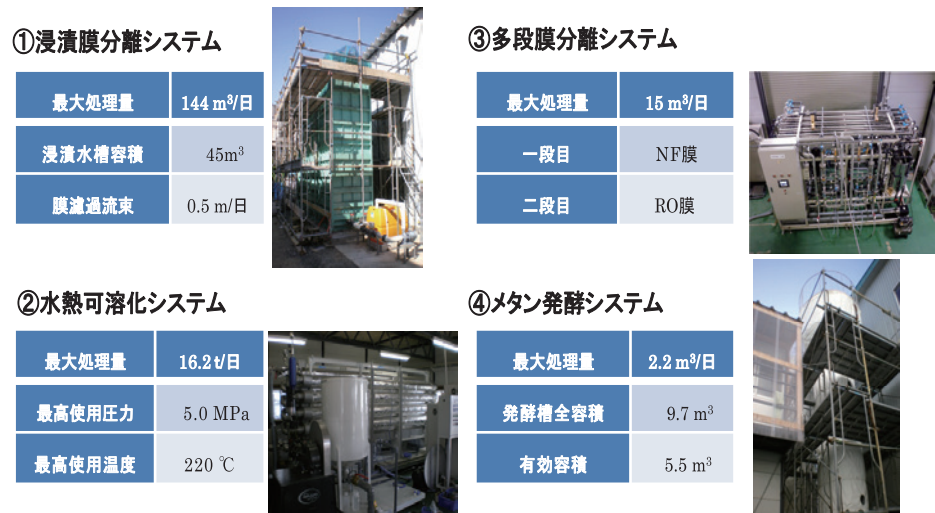


Fig. 4 馬鈴薯澱粉工場におけるコンパクトメタン発酵システム構成装置
Compact methane fermentation system construction equipment in potato starch plant

3.2 実証試験結果
(1) 水熱可溶化試験

①試験条件

浸漬膜分離工程で濃縮されたハイドロサイクロン排水及び固形物と澱粉粕の混合物を水熱可溶化工程で処理した。試験の条件をTable 1に示す。

Table 1 水熱可溶化試験条件
Hydrothermal liquefaction test condition

No	反応管温度	反応管圧力	滞留時間
1	140℃	3MPa	30min
2	160℃	3MPa	30min
3	180℃	3MPa	30min

②試験結果

水熱可溶化試験後、固液分離した可溶化液のTOC，COD_{Cr}の分析結果をFig. 5 (a) に，TN，酢酸濃度の分析結果をFig. 5 (b) に示した。TOC，TN，COD_{Cr}は可溶化温度によらず，同程度の値を示したが，酢酸濃度は可溶化温度の上昇とともに増加した。澱粉粕の主成分は澱粉とセルロース，ペクチンであり，一般的にセルロースの可溶化開始温度は230℃付近，澱粉とペクチンの可溶化開始温度は120～160℃付近とされる。

本試験の可溶化温度範囲において，澱粉とペクチンは十分に可溶化が進むが，セルロースは殆ど可溶化が進行しないため，可溶化液中のTOC，TN，COD_{Cr}濃度は可溶化温度の影響をあまり受けなかったと考えられる。一方で，可溶化した有機分の低分子は可溶化温度の上昇により促進され，酢酸濃度が上昇したと考えられる。

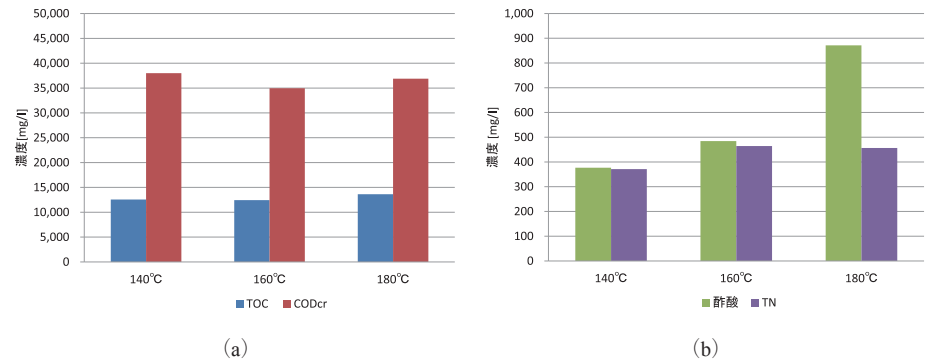


Fig. 5 可溶化液性状分析結果
Results of solubilizing liquid property analysis

(2) 多段膜分離試験結果

水熱可溶化工程で得られた固液混合物から液体を分離し、それをNF膜、RO膜の順に処理した。Fig. 6は、分画された液中の有機酸濃度を示している。メタン発酵槽に供給するNF膜濃縮液とRO膜濃縮液には、多くの乳酸が含まれていることが確認された。これは、発酵槽に供給するまでに原料液を一定量貯留するが、その過程で乳酸発酵によって乳酸量が増加したと考えられる。

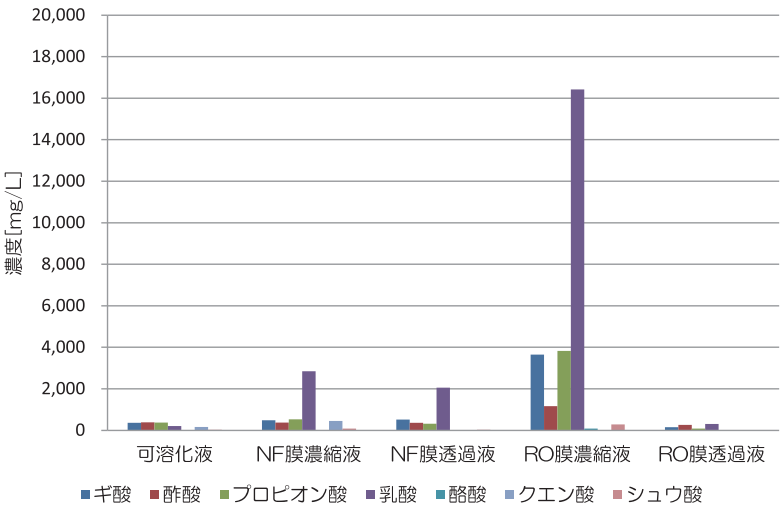


Fig. 6 膜分離液の有機酸濃度
Organic acid concentration of membrane separation solution

(3) メタン発酵システム試験結果

①試験概要

水熱可溶化温度がRO膜濃縮液のメタン転換率（(1) 式）とメタン転換速度（(2) 式），に与える影響を評価するためにバッチ試験を実施した。バッチ試験は122mlのバイアル瓶に基質洗浄したグラニュール汚泥を分注し、リン酸バッファと微量栄養塩を投入，窒素パージ後に，試験温度で12時間保持してから，RO膜濃縮液を投入した。RO膜濃縮液投入時刻を試験開始時刻とし，定期的にガス発生量と発生ガス組成を測定し各時間のメタン生成量を算出した。

$$\text{メタン転換率}[\%] = \frac{\text{累積メタン生成量}[\text{mlCH}_4] \times \text{メタンCOD当量}[\text{mgCOD/ml}]}{\text{原料中COD濃度}[\text{mgCOD/L}] \times \text{原料投入量}[\text{L}]} \times 100 \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{メタン転換速度}[\text{mgCOD/mgVSS/日}] = \frac{\text{累積メタン生成量}[\text{mlCH}_4] \times \text{メタンCOD当量}[\text{mgCOD/ml}]}{\text{バイアル瓶中全生物濃度}[\text{mgVSS}] \times \text{経過日数}[\text{日}]} \quad \dots\dots (2)$$

②試験条件

試験条件をTable 2に示した。

Table 2 メタン発酵バッチ試験条件
Methane fermentation batch test conditions

試験温度	37 ℃
バイアル容量	122 ml
液量	50 ml
投入汚泥量	100 mg-VSS/vial
振とう速度	120 rpm
バイアル瓶内CODcr濃度	2,000 mg-CODcr/L

③試験結果

RO膜濃縮液のメタン転換率をFig. 7に示した。24時間、72時間、144時間のいずれの時点でも可溶化温度180℃のRO膜濃縮液が最も低いメタン転換率となった。可溶化温度が高くなり、メタンへの転換が困難なフルフラールなどの過分解物の生成が進行し、メタン転換率が低下したことが考えられる。

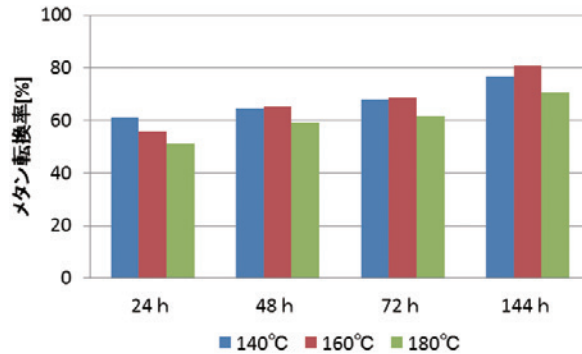


Fig. 7 水熱可溶化温度とRO膜濃縮液のメタン転換率
Hydrothermal solubilization temperature and methane conversion rate of RO membrane concentrate

4 食品廃棄物を原料にした基礎検討

馬鈴薯澱粉製造工場の排水・廃棄物で検証したコンパクトメタン発酵システムを、食品廃棄物に適用するために基礎的な検討を行った。馬鈴薯澱粉製造工場の排水・廃棄物には、タンパク質が殆ど含まれていなかったが、食品廃棄物には、タンパク質の含有が懸念された。タンパク質は、メタン発酵分解の過程で、発酵の阻害となるアンモニアを発生させること、タンパク質は回収できれば、メタンガスよりも付加価値が高い資源として活用可能であることから、事前に除去できるプロセスを考案した。プロセスの概要をFig. 8に示した。

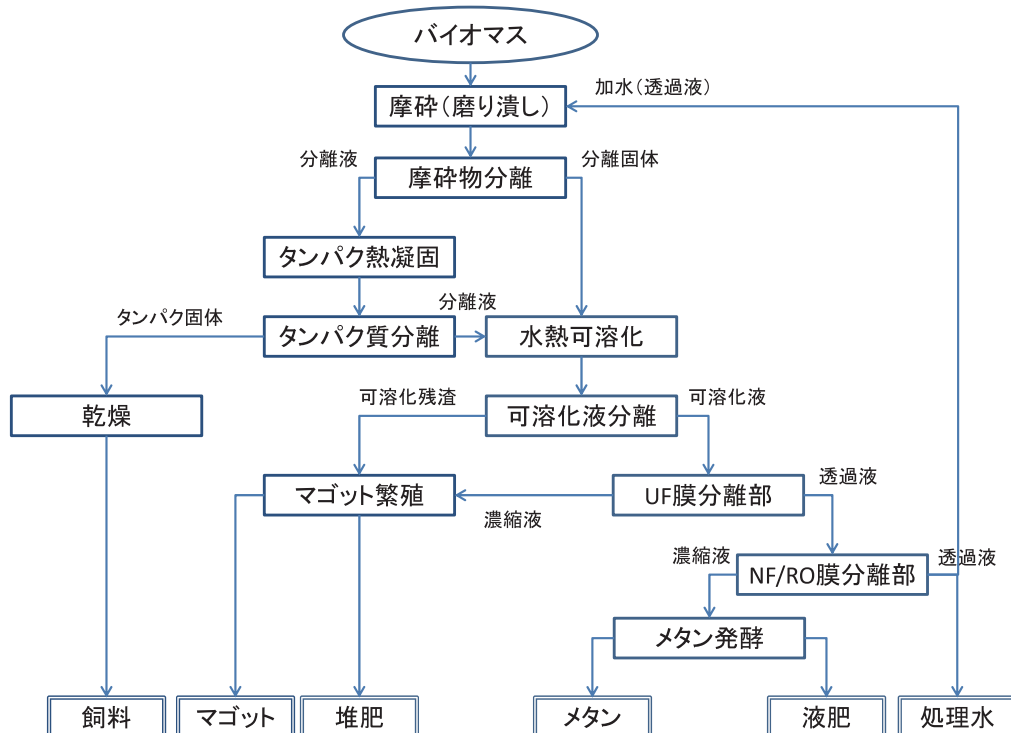


Fig. 8 食品廃棄物を対象としたコンパクトメタン発酵システムの概要
Compact methane fermentation system flow for food waste

メタン発酵によるメリットを十分に享受するためには、発酵の際に副産物として発生する液肥成分の有効活用が重要である。また、メタンガスは、エネルギーとして利用可能であるが、単価が安く、メタンガス製造のためだけに、プロセスを構築することは、コストメリットを出しにくい。そこで、食品廃棄物の処理においては、メタンガスよりも付加価値の高い副産物を同時に製造可能なシステムとする必要がある。以下に各工程の説明を示す。

①摩砕工程

生ゴミ系バイオマス（以下、原料）はまず、摩砕機によって流動性の高いスラリー状に磨りつぶしを行う。このとき、一連の処理の処理水を一部加水するなどして流動性を向上させる。これは、固体状態での移送を円滑にすること、水溶性タンパク質を固体からの液体に溶解させて分離することを目的としている。摩砕は、概ね数百 μm 程度まで行う。

②タンパク質回収工程

磨りつぶされた原料は、フィルタープレスで固液分離する。分離された液体は、常圧下、80℃程度でタンパク質の熱変性を利用して凝固させる。熱凝固後に固液が混合した状態の原料分離液を遠心分離機で液体とタンパク質固体とに分離する。タンパク質固体は乾燥の後、高タンパク飼料として家畜等の餌にする。

③水熱可溶化工程

タンパク質が取り除かれた原料摩砕分離液と摩砕分離固体を混合して水熱可溶化処理を行う。反応条件は、温度150℃程度、圧力3MPa以下で10～30分で行う。水熱可溶化処理によって得られた反応物は、可溶化液分離工程で可溶化液と可溶化残渣に分離する。

④UF膜分離工程

分離された可溶化液は、まずUF膜分離部にて、10倍程度まで濃縮する。この分離では、分子量1,000程度の分離膜を利用し、分子量が1,000未満の成分は透過して次のNF膜分離部に供される。UF分離膜の役割は、NF膜における分離効率を向上、ひいてはメタン発酵効率の向上のため、高分子液体成分を除去することと、後段のマゴット繁殖の栄養分確保のために設置する。

⑤マゴット繁殖工程

UF膜の濃縮液は、可溶化残渣と混合してマゴット繁殖用の餌とする。マゴットとはハエの蛆であり、今回の検討では、観賞用魚や養殖用飼料として実績のあるイエバエの蛆の繁殖を行った。イエバエの卵を上記混合物重量に対して0.3%配して、蛆の育成を行う。孵化後、概ね1週間で蛹化する直前（体長10mm）まで成長したマゴットを回収し、煮沸、乾燥後、飼料とする。

マゴットは、可溶化残渣とUF濃縮液の混合物を摂取するために、唾液等により分解しながら行うが、その唾液によりこれら残渣の有機物は分解され堆肥として利用可能となる。

⑥NF／RO膜分離工程

NF膜は、分子量で120（ MgSO_4 除去）を分離基準としている。UF膜を透過した液のうち、この分子量を透過できないものを濃縮液として回収する。濃縮は10倍程度とした。NF膜の濃縮液は、後段のメタン発酵原料とする。NF膜を透過した液は、次工程のRO膜分離部に供給される。

RO膜は、分子量で59を分離基準としている。NF膜を透過した液のうち、この分子量を透過できないものを濃縮液として回収する。濃縮は10倍程度とした。RO膜の濃縮液も後段のメタン発酵原料として供給する。RO膜と透過した液は、農地散布に用いる他、一連の処理の先頭である摩砕処理において用いることも想定している。Fig. 9に、分離膜と分離される物質の関係を示した。タンパク質は、殆どUF膜で濃縮されて分離され、その透過液には含まれないことが確認できる。液肥の成分となる水溶性の塩類は、NF膜とRO膜で濃縮されることも確認できる。この原理を用いて、メタン発酵の阻害物の除去と液肥成分の濃縮を実現した。

⑦メタン発酵工程

メタン発酵は、馬鈴薯澱粉工場の排水・廃棄物で検証したグラニューールを充填した縦型発酵槽（UASB）に原料液を供給する方式で検証した。発酵は概ね2日間の滞留時間で完了し、発酵効率は、85%程度となった。発酵残渣は液体で回収され、液肥として利用できる。この液肥成分は、事前にタンパク質を除去しているため、アンモニア成分が少なく、農場で散布、収穫後の土壌の残留窒素が少なくなることから連作障害などを引き起こしにくい特徴を持っている。

大きさ(μm)	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100
分子量	200	20,000	100,000	500,000		
分離手法ごとの適用範囲	分離膜(RO)	分離膜(UF)	分離膜(MF)	遠心分離(ディスク型)		
分離される主な物質	金属イオン 水溶性塩類 糖類 アミノ酸	ウイルス 澱粉 タンパク質	胞子	細菌	酵母	砂

Fig. 9 分離膜と分離物質の関係 (アルファラバル(株)のカタログを参考に作成)
Relationship between separation membrane and separated material (Plotting with reference to the catalog of Alfa Laval Co.)

Fig. 10には、一連の試験において得られた物質収支と炭素収支を想定処理量の30トン/日規模に換算した結果を示した。生ごみを原料として処理を行う場合、原料の変動が大きいと考えられるが、一定の水熱条件下で溶解する原理と溶解した成分は、膜の分子量によって分画される原理により、得られる製造物の量の変動はあっても質の変動がないようなシステム構成となっている。

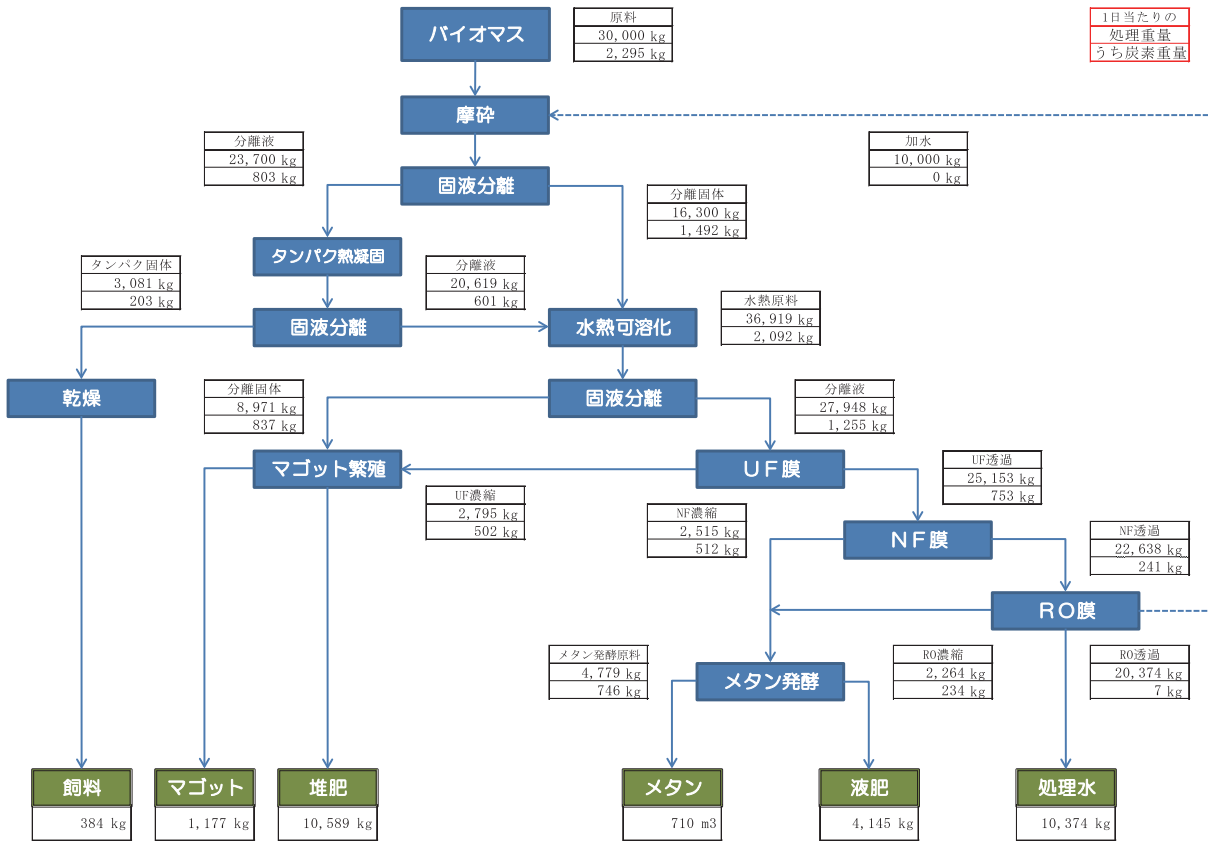


Fig. 10 コンパクトメタン発酵システムによる食品廃棄物処理の重量及び炭素収支
Weight and carbon balance of food waste treatment by compact methane fermentation system

5 農業六次産業化への適用

前章で検討した食品廃棄物を用いたコンパクトメタン発酵システムを農業地域のエネルギー自立と活性化のために適用することを想定し、以下の前提のもと事業性の評価を実施した。

廃棄される事業系の食品残渣バイオマスについて、

- ・従来、産業廃棄物処理業者が行ってきた処理を、農業法人が実施する。
- ・エネルギー変換処理の過程で発生する肥料などの副産物を農業法人が利用する。
- ・農業法人が必要とする肥料量から逆算してバイオマス処理量を決定する。
- ・農産物は、事業性食品系バイオマス排出者が優先的に購入する。

その結果、1日30トンの生ごみを当該プロセスで処理する場合、処理に必要な電力及び熱量の全てを賄ったうえで、事業者として想定している広域農業法人における電力の85%相当とハウスの加温熱源として、年間48,883LのA重油の削減が可能であると推算された。

加えて、メタン発酵残渣は液肥として有用であり、農業生産に大きく寄与すること、その他の副産物製造なども農業生産の収益改善に寄与することが確認された。

事業性評価において、想定するシステムの一連の収支、処理物の物性について把握することができた。またシステムを構成する実機規模の機器類の性能についても検証できた。ただ、各工程をバッチ的に処理したため、質的変動が考慮される生ごみについて、連続的な処理の知見が得られておらず、安定的な稼働に対しては検証が必要である。メンテナンス費用、消耗品類の実勢的な数値の把握もできておらず、実証的な検討が課題である。Fig. 11に食品廃棄物を用いたコンパクトメタン発酵システムの事業スキームの概要を示した。

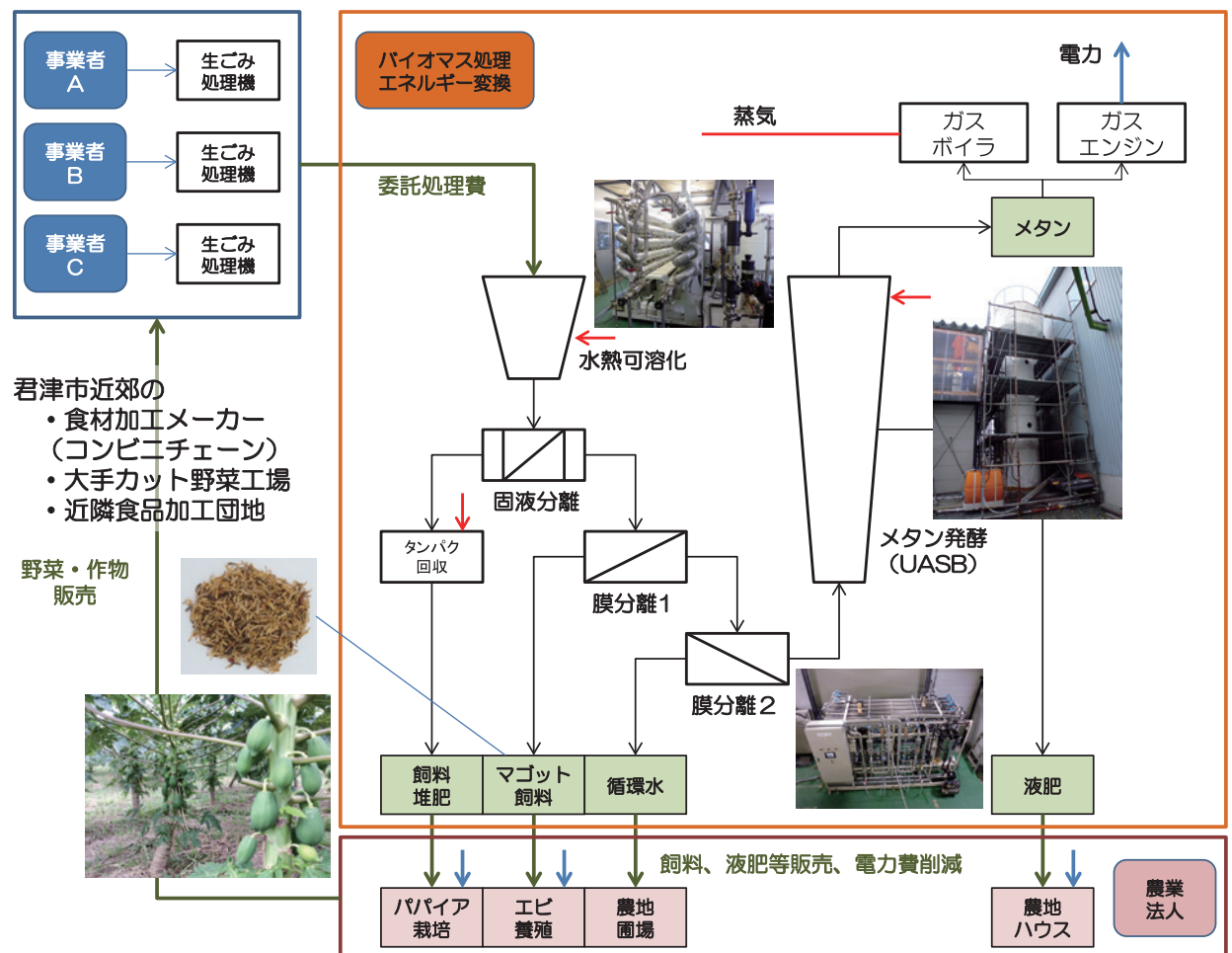


Fig. 11 食品廃棄物を用いたコンパクトメタン発酵システムの事業スキームの概念
Concept of business scheme of compact methane fermentation system using food waste

6 結言

未利用バイオマスのうち、生ごみなど湿潤系のバイオマスは、その水分が原因で利活用が進んでいない。コンパクトメタン発酵システムを構成している、水熱可溶化処理は、その水分を溶媒として利用できる有効な方法であると考えている。但し、水熱可溶化だけでは、有機物濃度が薄く、その後の処理が困難である。そこで、濃縮・分離と組み合わせたコンパクトメタン発酵システムは、湿潤系バイオマス処理に有効であると考えている。

馬鈴薯澱粉製造工場においては、本格的な実証が完了し、実装にむけて調整を進めている。農業の六次産業化に資する食品廃棄物処理については、基礎実験とそこから得られる知見における事業性評価が完了したが、実証的な検証を踏まえなければ、実装することはできない。今後、実証的な検討に向けて関係者と協議を重ねていく。