

1.背景

下水汚泥や家畜糞尿といった有機性廃棄物の嫌気性消化で発生するバイオガスは、主にメタン(以下 CH₄)約60%と二酸化炭素(以下 CO₂)約40%からなる。一般的な気体分離技術には、溶液吸収法、深冷分離法、吸着法、膜分離法などが挙げられ、その中でも、下水処理場の様な小規模施設では、吸着法と膜分離法が装置の規模から適している。膜分離法は相変化を伴わないため吸着法に比べ省エネルギーであり、簡易な装置で構成できることが特徴である。回収 CO₂ を植物に添加し、成長促進を効率的に行う管理型農業に着目し、CO₂ の効率的回収システムの開発が求められている。バイオガスは、可燃性である CH₄ を含むため、回収 CO₂ 濃度は高める必要がある。

2.目的

本研究では、高濃度 CO₂ 回収することを目的としており、CH₄ 濃度については考えないものとする。よって、省エネルギー・小規模化することができ、低コストシステムが可能であると考えた。CO₂ の効率的な回収システムを開発し、植物や藻類への利用を検討する。

3.1.目標精製濃度の設定

本研究におけるバイオガスを用いた分離プロセスは、CH₄ の精製をほとんど行わず、CO₂ のみを高濃度に精製することを目的としている。CO₂ と CH₄ を同時に回収する必要がないため、用いる膜や処理量に余裕ができ、簡易システムで低コスト分離プロセスを構築できると考えた。

バイオガスから精製 CO₂ を利用する場合、用途により要求される CO₂ 濃度は異なるが、植物や藻類利用に要求される濃度は ppm オーダーであるため、バイオガスの CO₂ 濃度 40%でも十分利用可能である。さらに高濃度化させることで、供給するときのガス量が減ることで環境制御が用意になることや機械設備等を縮小することができるなどの利点があげられる。しかしながら、バイオガスの 60%は CH₄ であり、可燃性ガスであるため、閉鎖型の植物工場などに供給する場合、事故を引き起こす危険性がある。よって、

低濃度にするのが必須である。CH₄ の燃焼(爆発)濃度の範囲は 5~15%であることから、本システムでの CH₄ 濃度は、2%以下に抑えることとし、同時に CO₂ 濃度は 98%と設定した。

3.2.膜分離プロセスの構築

CO₂ のためのバイオガス利用のため、CO₂ を効率的に回収することのできるシステムを構築する必要がある。また農業利用を視野に入れるため、低コストで簡易システムが望まれる。そこで、本研究では安価で汎用的な有機膜を用いたシステムの構築を考えた。

また、バイオガス利用においては、CH₄ 中の CO₂ が入っていても可能なこと、一方で CO₂ が利用されていないことを背景に、バイオガス発電機の前段に膜を導入することを想定した。よって、バイオガスから CO₂ は高純度に回収し、CH₄ はほぼ損失無く発電機に送ることで、バイオガス全体の利用率の向上を見込めると考えた。そこで、本システムでは CH₄ の高純度化をせず、CO₂ の高純度・高効率回収システムの構築を行う。また、CO₂ のみに着目することでより CH₄・CO₂ 同時回収技術よりも簡易システムで省エネルギー・小規模化が図れると考えた。

膜分離プロセスでは精製 CO₂ 濃度を高めるために、単位膜面積あたりの供給流量を大きく、精製 CH₄ 濃度を高めるには単位膜面積あたりの流量を小さく設計する必要がある、その両者はトレードオフの関係にある。それらを高い濃度で両立させるためには、高い分離係数が必要となるが、CO₂ 濃度のみを高濃度化させるため、透過側ガスを2回分離するシステムに着目した。図1のシステムは、CO₂ 濃度を高めて再分離できるため、分離係数が約 50 程度の膜でも CO₂ 高濃度化が可能であると考えた。低コスト化を図るためにコンプレッサを用いず、各膜に対して背圧弁による圧力分配を行うことを考えた。コンプレッサを1台にすることで、小規模化につながることや所要エネルギーの削減が期待できることが大きなメリットであると考えた。得られる CO₂ 回収量は低い、大きな供給流量を必要とせず、

低コストで小規模な分離システムの構築が可能であるとし、本システムを採用した。

実証実験は、長岡浄化センターで発生する乾式脱硫塔通気後のバイオガスの分岐供給を受けて、実証施設に導入し、圧縮機で昇圧、シロキサン・硫化水素・水分の除去用の前処理を行った上で、分離膜に供給する。

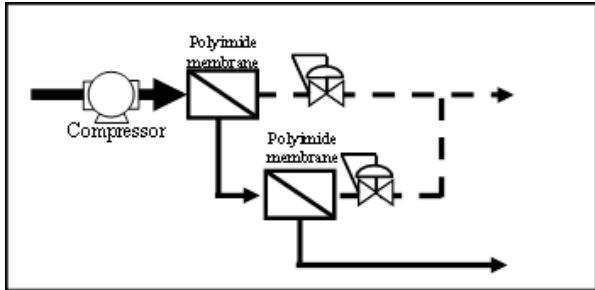


Fig.1 Permeation 2-stage process

3.3.膜分離プロセスの比較

2 段分離の対称系として、膜分離プロセス 2 つのシステムを構築し、比較を行った。実験条件は、供給流量 40L/min、総圧力:0.9MPa、1 段目圧力:0.8MPa、2 段目圧力:0.1MPa、分離係数 $\alpha = 58, 54$ とした。

有機膜単段システムにおいて、透過側 2 段システムと供給流量と圧力を統一し分離を行った場合、CO₂ 濃度 85.7%となった。透過側 2 段システムと比較すると、膜面積あたりの供給流量は 2 倍となっているが、目標濃度には到達しなかった。さらに、流量を可変させ、25L/min、45L/min、55L/min の 3 条件に振り、供給圧力による影響の確認をした。結果を Fig.4-4-1 に示す。結果より、CO₂ が一番高濃度になった条件は、55L/min であり、92.9%となった。得られる CO₂ 量は、CO₂ 濃度と CO₂ 回収率を乗じた値になる。本実験では、各流量の濃度差がそれぞれ、88.4%、91.5%、92.9%となっているのに対し、CO₂ 回収率が 81.7%、73.2%、61.7%と違いが大きいため、回収率が一番高い 25L/min が一番多く CO₂ を得ることができる条件であった。CO₂ は供給流量に比例し濃度が増加し、CO₂ 回収率はトレードオフの関係であるため、流量の増加とともに減少した。したがって、膜単段で CO₂ を高濃度にするためには、高い分離係数の分離膜と大容量のコンプレッサを用いることで可能となるが、本システムで採用している分離係数 50 程度の膜では、難しく、透過側 2 段システムの方が容易に目標濃度 98%に到達できることが明らかになった。

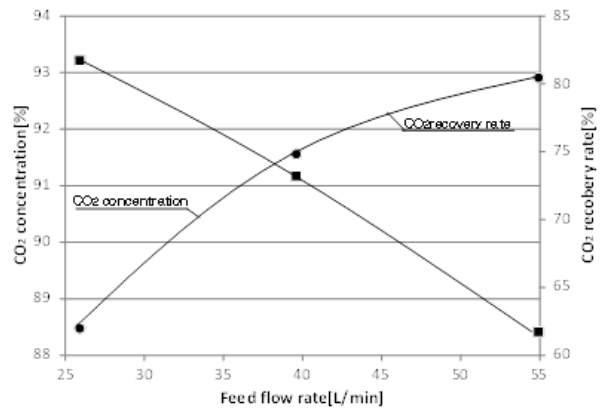


Fig.2 The influence of the Feed flow rate

膜面積当たりの流量を統一した非透過側 2 段システムとの比較を行った。結果を fig.3 に示す。透過側 2 段システムは、非透過側 2 段システムと比較し、CO₂ を高濃度化させることに適しており、本研究の目標濃度である CO₂ 濃度 98%を達成することができた。流量と回収率は濃度とのトレードオフ関係になっている。有機膜の分離性能は低いため、CO₂ 濃度 98%を達成しながら高い回収率を得ることは難しい。また、下水処理場から発生するガスから得られる CO₂ 量は、植物を栽培するためには過剰であると考えられる。よって同様の膜面積当たりの流量の場合、透過流量は少なく回収率は低いが、目標濃度を達成している透過側 2 段システムの方が植物供給、膜規模の点から優位性があると考えられる。

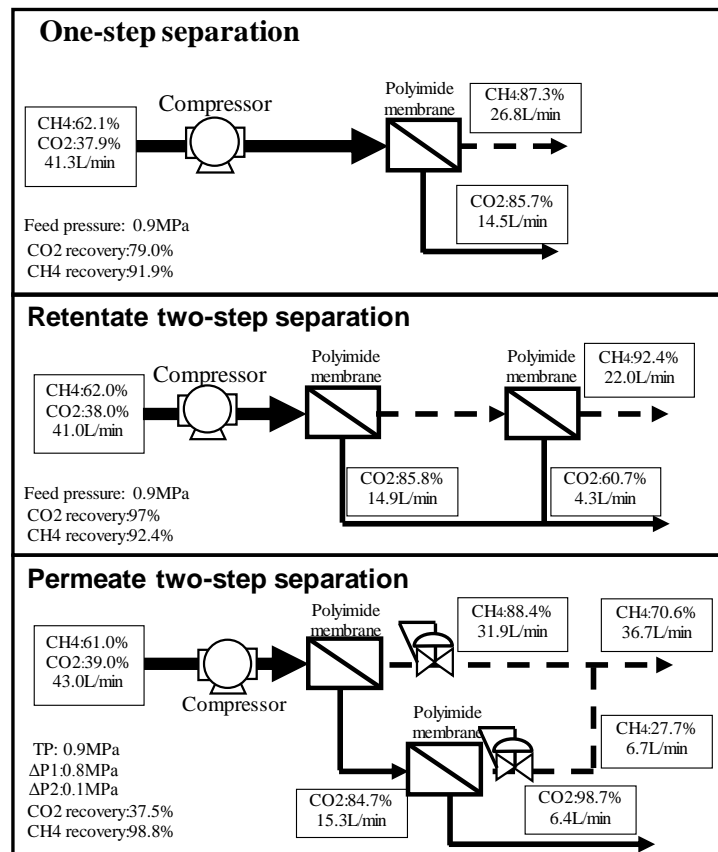


Fig3. Comparison of the separation system

3.4.透過側 2 段システムの実証

供給流量は約 40L/min、圧力は TP:0.5~0.9MPa、 $\Delta P1:0.3\sim 0.85\text{MPa}$ 、 $\Delta P2:0.05, 0.1, 0.2\text{MPa}$ の範囲で可変させ、圧力による影響を実証した。

圧力分配による CO₂ 濃度と回収率の影響を確認するため $\Delta P2$ を固定し、TP を可変させた実験を行った。TP の上昇により、CO₂ 濃度と回収率の増加を確認した。まず、図 3 より、 $\Delta P2:0.1\text{MPa}$ 及び 0.05MPa の条件では、目標濃度に到達しており、すでに限界に達している。一方で $\Delta P2$ が 0.2MPa の条件は 88% から 96.6% までしか分離せず、目標濃度に到達しなかった。さらに、図 4 より、 $\Delta P2$ 0.05MPa よりも 0.1MPa の条件の方が約 18% 高い CO₂ 回収率だった。したがって、本条件下では、 0.1MPa の条件が圧力分配の最適範囲であると言える。また、 0.2MPa においては、供給流量を増加させることで、 0.05MPa においては、供給流量を減少させることで、圧力分配における効率的な分離が行えることが示唆された。

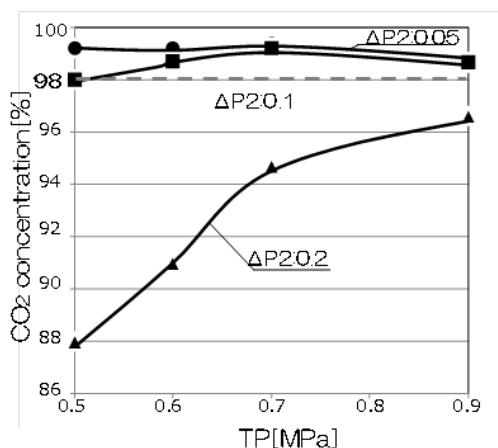


Fig.4 Relationship of the total pressure and CO₂ concentration (The Feed flow rate 40[L/min])

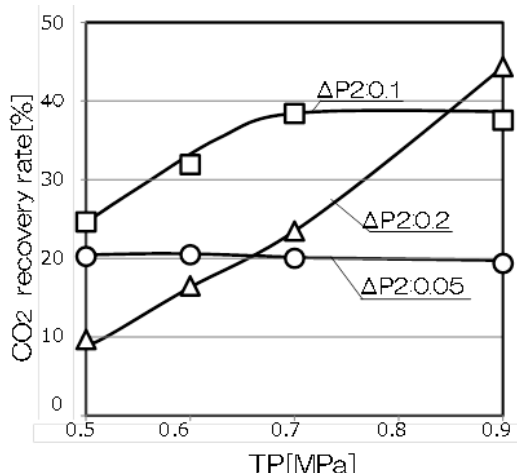


Fig.5 Relationship of the total pressure and CO₂ recovery rate (The Feed flow rate 40[L/min])

3.5.CO₂ 分離システムの立ち上がり特性

CO₂ 供給システムを構築するための CO₂ 分離システムは植物の要求する CO₂ 量の変動に対応が可能であることが望ましい。そこで、膜単体と実設備について、立ち上がりの分離特性の確認を行った。膜単体は 2 秒から分離が始まり 10 秒の時点で限界に達し、即時応答性を確認した。一方で、実設備は 3 分で 98% に到達した。原因は起動時のコンプレッサや配管により、圧力上昇に時間を要したため配管長の変更や小規模のバッファタンクを設置することで改善でき膜分離の即時応答性は可能と考えられた。

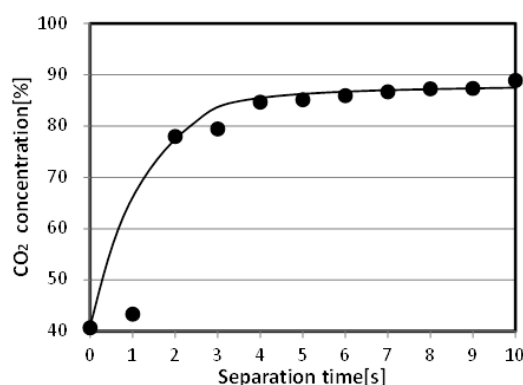


Fig.6 Separation time of the membrane

4.2. CO₂ 供給システムの検討

植物及び藻類への CO₂ 供給システムを検討する。処理人口 10 万人よりバイオガス量は $5000 \text{ m}^3/\text{day}$ ^[2]、供給時間は 12 時間とする。Case1 は貯留設備を持たず、植物が要求する CO₂ 量を追従し供給する。Case2 は、24 時間分離し、貯留タンクから 12 時間一定供給する。Case1 の回収可能 CO₂ 量は約 $350 \text{ m}^3/\text{day}$ となり、栽培面積は約 6800 m^2 をまかなうことが可能である。即時応答性があるため、CO₂ 濃度制御に優れており季節・日変動や植物の種類に応じた供給ができる。一方で、Case2 は、24 時間分離し続けるため、回収 CO₂ 量が Case2 と比較し 2 倍である約 $700 \text{ m}^3/\text{day}$ となり、栽培面積は約 13600 m^2 をまかなうことが可能である。CO₂ 量の増加により CO₂ 1kg あたりのコストが安くなり、さらに供給量は 2 倍であるため事業性が高くなると考えられる。しかし、設備コストが高いため農業事業規模大きくなり CO₂ 供給装置としては Case1 が安価・小型となる。

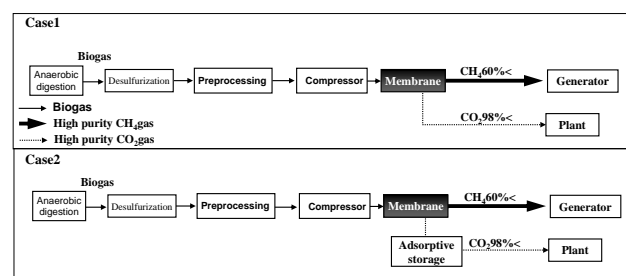


Fig.7 The configuration of the CO₂ supply device

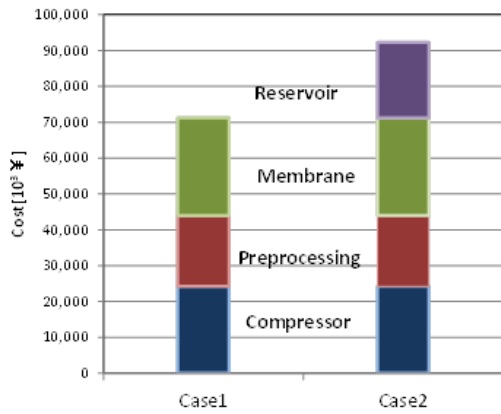


Fig.8 Cost comparison of Case1 and Case2

4.3 他の CO₂ 供給システムとの比較

バイオガスから回収した CO₂ を供給するシステムと市販 CO₂ 供給装置、CO₂ポンベとの比較を行った。分離システムの設備費は、前処理設備、コンプレッサ、分離膜、貯留設備の4つ、維持費については、消費電力と前処理材の2つを検討した^{[3][4]}。バイオガス中の CO₂ は未利用であるため 0 円とした。市販 CO₂ 供給装置は農業用に製造されており、燃料のプロパンガスを燃焼させることによって CO₂ を発生させている。市販 CO₂ 供給装置は単価と性能から算出し、燃料のプロパンは 13,500 円/50kg、CO₂ポンベは 5,100 円/30kg と設定した。上記から算出した値を CO₂1kg あたりのコストに換算し、式1から得た値を図 7 に示す。

$$\text{各年数の CO}_2 \text{ 製造コスト} = \frac{\text{維持費} \times \text{年数} + \text{設備費}}{\text{年数}} \quad \text{式(1)}$$

バイオガスから回収した CO₂ 供給システム Case1、Case2 はそれぞれ 5 年目と 3 年目から市販 CO₂ 供給システムのコストより安価になることが明らかになった。市販 CO₂ 発生装置は、化石燃料から CO₂ を製造している。一方バイオガスはカーボンニュートラルであるため、経済性だけでなく、環境性からも優位性があると考えられる。

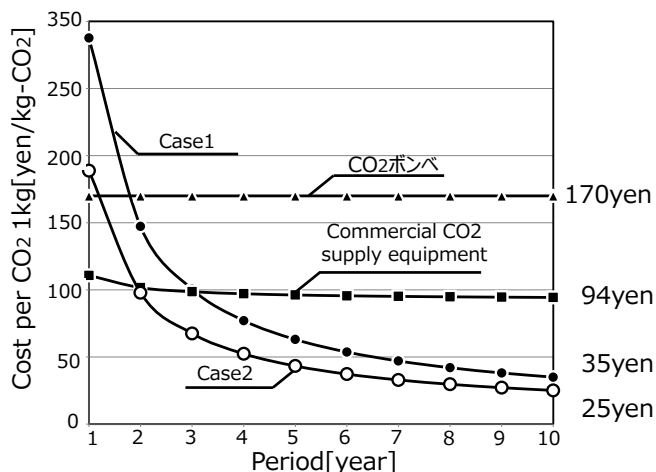


Fig.9 Cost comparison of per CO₂ 1kg

5.藻類への供給

藻類の屋内培養実験を 1 月中旬から開始しており、土木研究所内にて行っている。培養はバイオガスから回収した CO₂ と CO₂ ポンベで行っている。SS の経時変化を Fig.10 に、クロロフィル a を Fig.11 に示す。

立ち上がりからSS、クロロフィル a とともに同様の傾向で上昇し、1 月下旬あたりに藻類が安定し始めた。CO₂ による差は今のところ見られず、良好に培養実験が行われている。したがって、バイオガスから回収した CO₂ を供給し藻類を培養することは可能であると考えられる。微量なアンモニア成分が培養に悪影響を及ぼす可能性が考えられたが、影響は現れなかった。

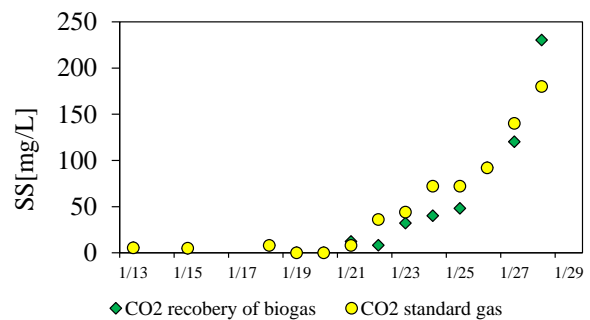


Fig.10 Changes in suspended solids by indoor experiment

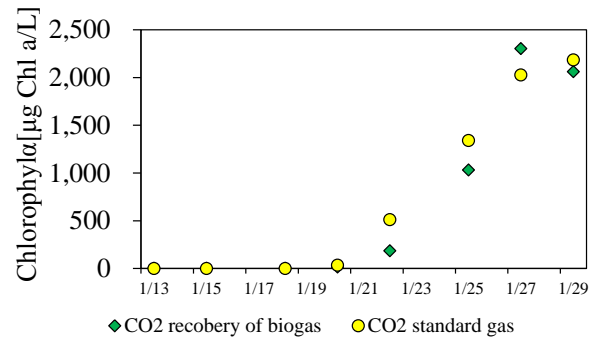


Fig.11 Changes in Chlorophyll a by indoor experiment

5.まとめ

バイオガスから高濃度 CO₂ を回収する低コスト分離システムを構築した。透過側 2 段システムは、CO₂ 濃度 98% 以上に高濃度化でき、CO₂ 回収率は低いが、同様の膜設備と比較し、CO₂ 利用に優位性があることを確認した。また、膜の応答性を確認し、植物に必要な間欠運転が可能であることが確認できた。バイオガスから CO₂ 分離回収を導入した供給システムを検討した。他の供給システムと CO₂ あたりのコストで比較すると安価に CO₂ 供給することが可能であると明らかとなった。

6.参考文献

- [1] 酒井清孝、膜分離プロセスの理論と設計(1993)
- [2] 日本下水道協会、下水道統計(2015)
- [3] 国土交通省、下水道汚泥エネルギー化技術ガイドライン(2015)
- [4] 日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説(2004)