

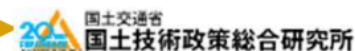
2025年11月21日

<一般財団法人 日本国土開発未来研究財団様 第5回 学術研究助成 研究成果発表会>

嫌気性膜分離法による下水の高速処理と超高濃度メタンガス回収: 多層カーボンナノチューブ添加によるメタン発酵促進メカニズム の探索

- 新潟県南魚沼市出身（1993年生）
- 北海道大学工学部環境社会工学科衛生環境工学コース（2014年4月～2017年3月）
- 北海道大学大学院環境創生工学専攻（2017年4月～2022年3月）
- 中央大学理工学部（2022年4月～現在）
- 主な研究内容
 - ・ 膜分離活性汚泥法（MBR）を用いた下水処理における膜目詰まり抑制手法
 - ・ 嫌気性膜分離法（AnMBR）を用いたメタン発酵の高度化
 - ・ リン吸着膜を用いた下水からの高純度リン酸回収 など

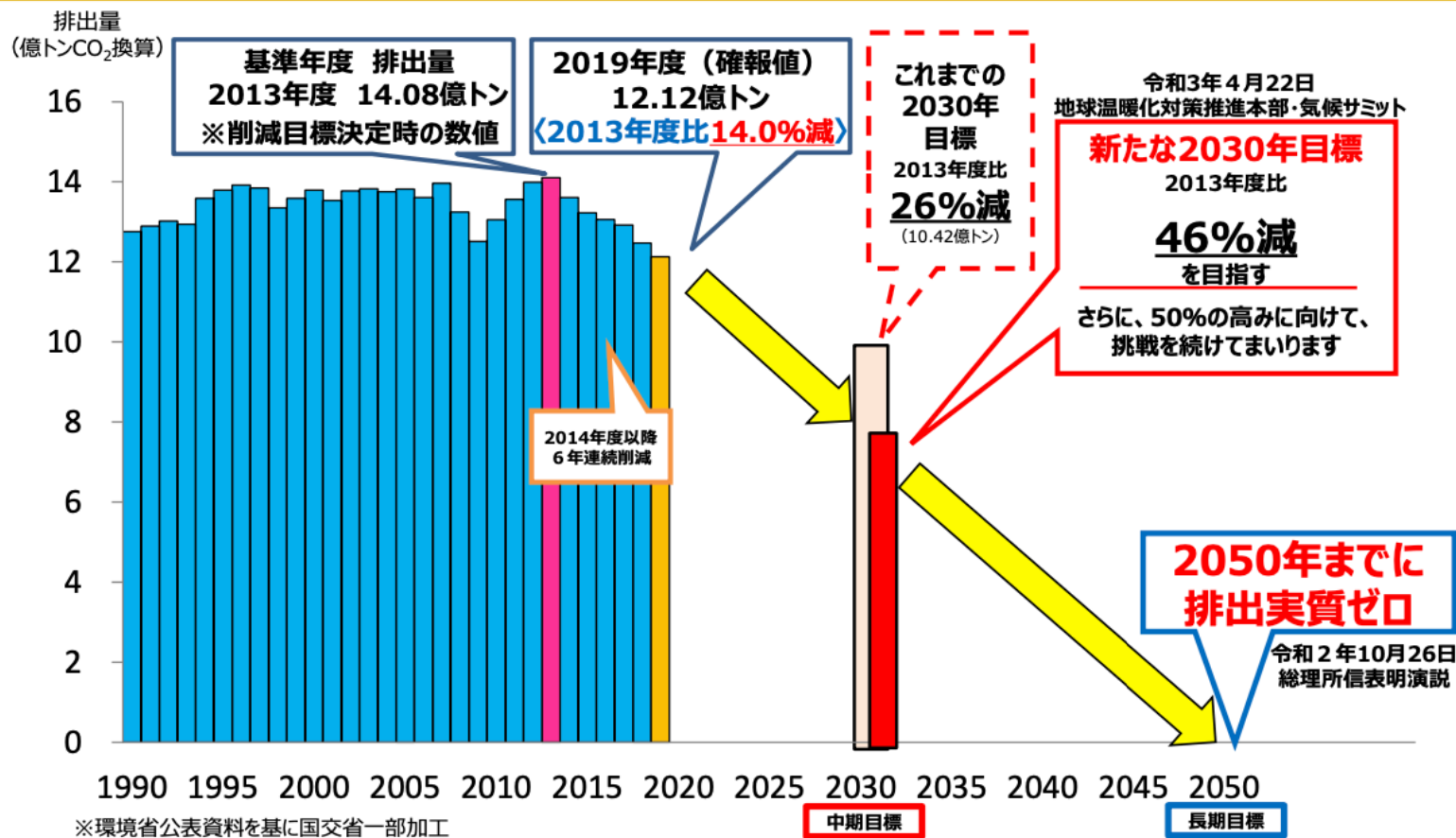
下水道技術開発会議エネルギー分科会 (令和3年度第1回 2021.10.8)



1. 地球温暖化の現状とカーボンニュートラルに関する動向

・我が国の温室効果ガス削減の中長期目標

◆ 「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」べく、中長期目標を設定。



1-2. ガス業界が目指す姿

- 資源エネルギー庁電力・ガス事業部の研究会として開催された「2050年に向けたガス事業の在り方研究会」を通して議論を深め、2050年やマイルストーンとしての2030年目標を設定。

2030年

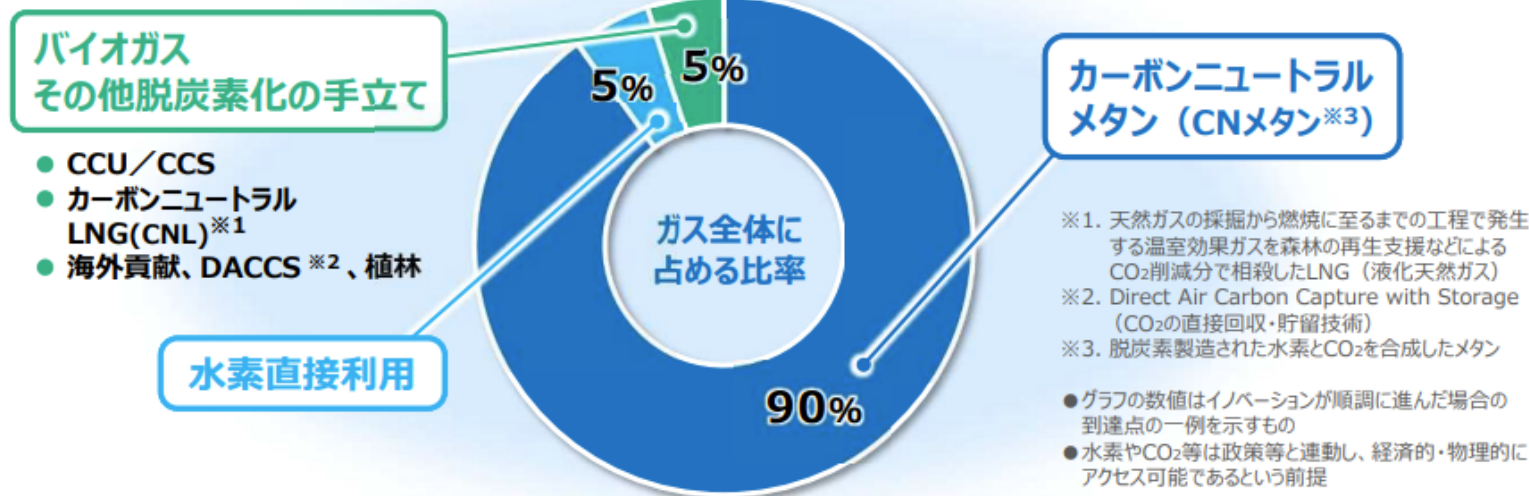
ガスのカーボンニュートラル化率5%以上を実現
メタネーションの実用化を図る（カーボンニュートラルメタンの都市ガス導管への注入1%以上）

2050年

複数の手段を活用し、ガスのカーボンニュートラル化の実現を目指す

※メタネーション設備の大容量化の課題、安定的かつ低廉な水素調達等、大きな課題への解決にチャレンジ
 ※不確実性は多いが、脱炭素化に資する様々な手立てを駆使し、実現に向けてチャレンジ

2050年ガスのカーボンニュートラル化の実現に向けた姿

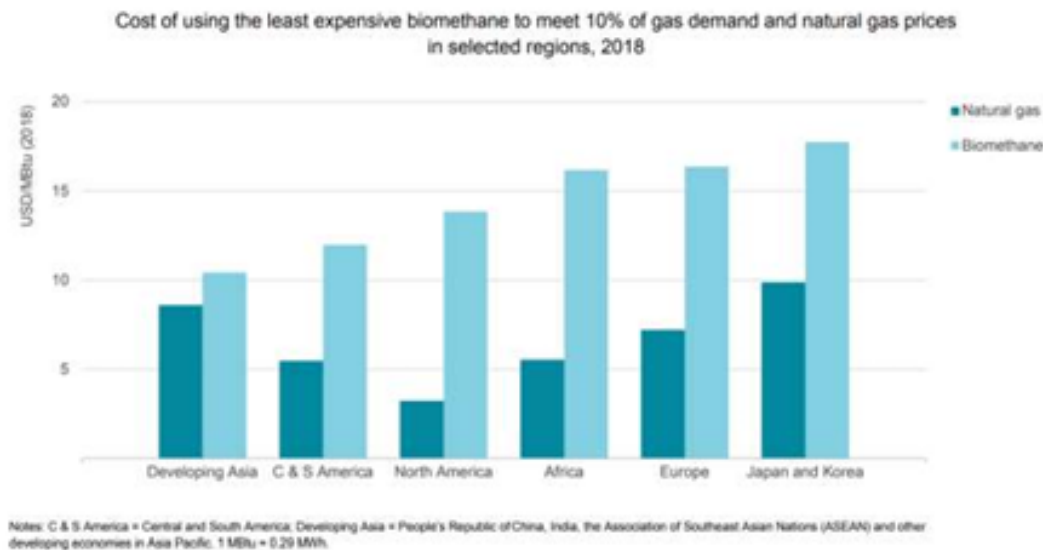
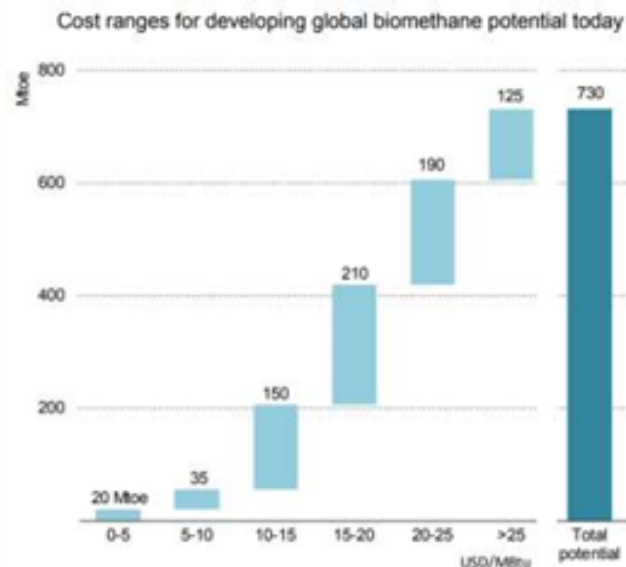


3. Outlook for biogas and biomethane (IEA, 2020) ①

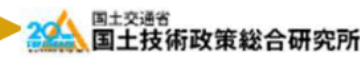
世界的なバイオメタンの生産コスト 1/2

- 一部のランドフィル・ガス（ごみ埋立処分場において廃棄物の分解に伴い発生するメタンを含有するガス）によるものを除き、大半のバイオメタンは天然ガス価格よりも高価であることが一般的。
- バイオガスのアップグレードによる**バイオメタン生産価格**の世界平均は、**約19ドル/MBtu**と試算。この内、バイオメタンへのアップグレードコストは約2～4ドル/MBtuで、施設の規模や地域によって様々。加えて、典型的なガス・グリッド接続コストは約3ドル/MBtu。**グリッドとの近接性は重要なコスト要因**であり、コスト効率的なプラントはグリッドに近接。
- ガス需要の10%を満たすバイオメタン利用コストについて、日本は18ドル程度と推計（2018年）。

※なお、2023年1月の日本の平均LNG輸入価格は、約18ドル/MBtu。



下水道技術開発会議エネルギー分科会 (令和3年度第1回 2021.10.8)

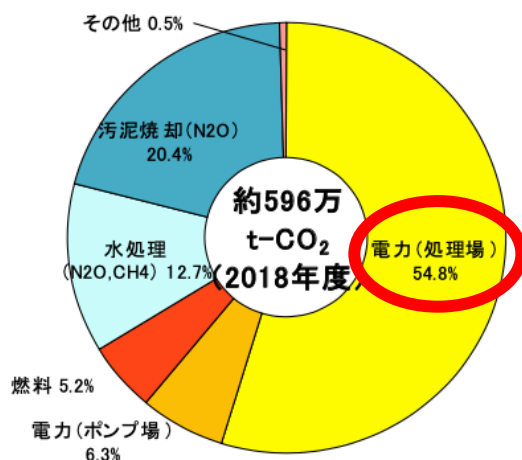


2. 下水道分野における地球温暖化対策の現状と取組

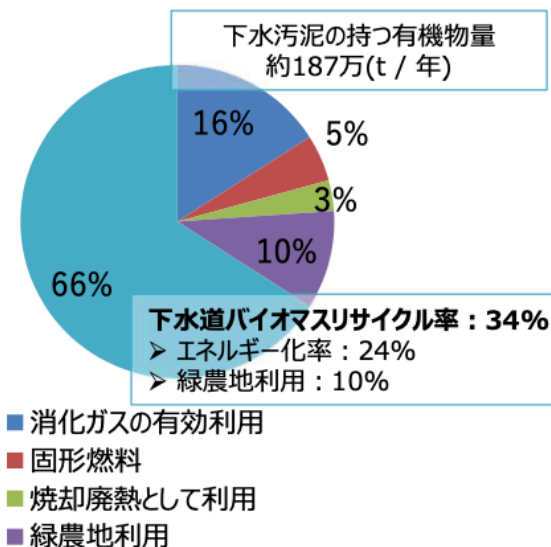
・下水道分野における温室効果ガス排出削減とポテンシャルの活用

- ◆ 2018年度における下水道分野での温室効果ガス排出量は約600万t-CO₂であり、日本全体の排出量約12.4億t-CO₂の0.7%に相当。
- ◆ また、自治体の事務事業から排出される温室効果ガスの大きな割合を占める。
 - 水処理、汚泥処理における電力、燃料消費に伴うCO₂の排出
 - 汚泥の焼却過程でのN₂O排出
 - 水処理過程でのCH₄、N₂Oの発生
- ◆ 一方で、バイオガス等、下水道資源を活用した創エネポテンシャルも有している。
- ◆ 更に、敷地や施設上空を活用した太陽光パネル、下水熱の利用など再エネポテンシャルの余地もある。

下水道からの温室効果ガス発生量

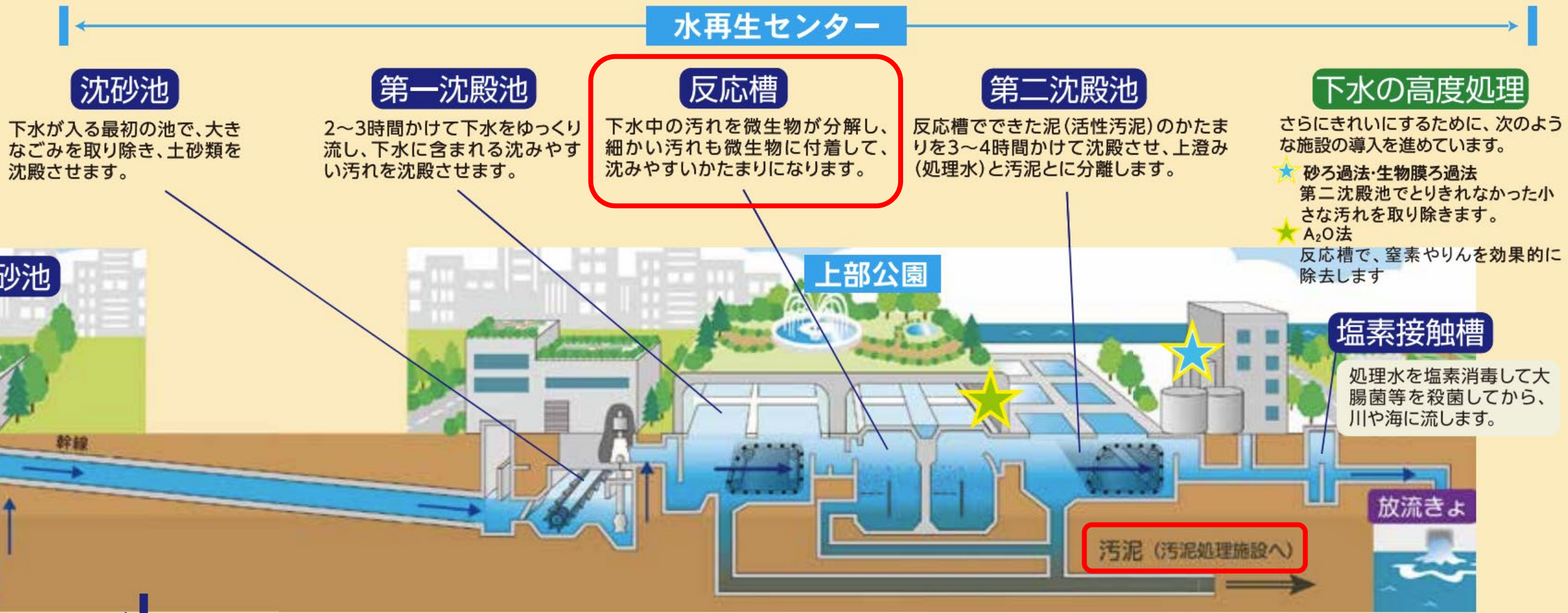


下水道分野で創エネ/再エネの取組



	発電量 (kwh)	導入力所数
太陽光:	約0.7億	110
小水力:	約0.02億	27
風力:	約0.07億	6

	発熱量 (千GJ)	導入力所数
下水熱:	約90	32



参考：東京都の森ヶ崎水再生センターでは約120万m³/日の下水を処理

https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/pdf/14_morigasaki_R6_jp.pdf

下水道技術開発会議エネルギー分科会（令和3年度第2回 2021.11.22,26）



2030年目標達成のための導入すべき技術及び技術開発項目

1. 地球温暖化対策計画の目標

・地球温暖化対策計画改定（令和3年10月22日閣議決定）における下水道分野の削減目標（2030年目標）

- 2030年度における温室効果ガス排出量を2013年度比（二酸化炭素換算で）**208万t-CO₂**削減。
- 2050年カーボンニュートラルに向けて更なる高みを目指す。

省エネの促進	
現状:	電力消費量が増加傾向
目標:	年率約2%の削減を確保し、約60万t-CO ₂ を削減
進捗見通:	省エネ法に基づく取組(年率1%削減)よりも一層の取組加速が必要。

下水汚泥のエネルギー化（創エネ）	
現状:	下水汚泥エネルギー化率：24% (R元年度)
目標:	エネルギー化率を37%まで向上させることで、 約70万t-CO₂ を削減
進捗見通:	自治体の導入計画の確実な実施、更なる取組の拡大が必要。

焼却の高度化	
現状:	高温焼却率：約73%（R元年度）
目標:	高温焼却率100%、新型炉への更新により、約78万t-CO ₂ を削減
進捗見通:	改築更新時に高温焼却への確実な更新、更なる排出削減に向けた取組が必要。

再エネ利用の拡大	
現状:	太陽光：約0.7 億kWh 小水力：約0.02 億kWh 風力：約0.07 億kWh 下水熱：約90 千GJ
目標:	導入推進により、約1万t-CO ₂ を削減
進捗見通:	達成見込み

地球温暖化対策計画改定における2013年度の下水道分野の温室効果ガス排出量は約406万t-CO₂

・2030年度の全電源平均の電力排出係数：0.25kg-CO₂/kWh（出典：長期エネルギー需給見通し（H27.7 資源エネルギー庁））使用。

下水道技術開発会議エネルギー分科会 (令和3年度第1回 2021.10.8)

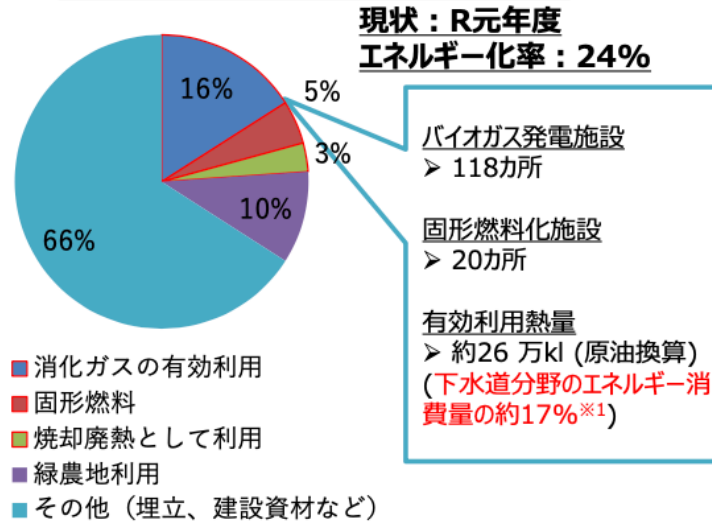
国土交通省 国土技術政策総合研究所

2. 2030年目標と実現するための技術的課題と取組の方向性

②創エネ・再エネの取組状況

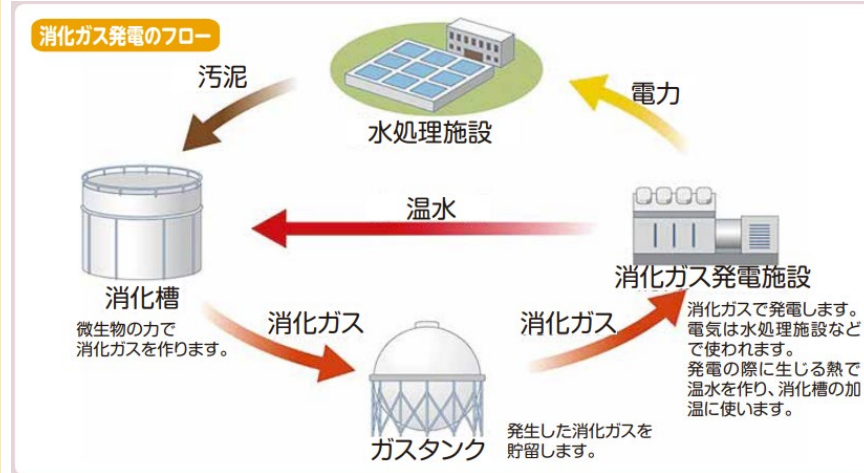
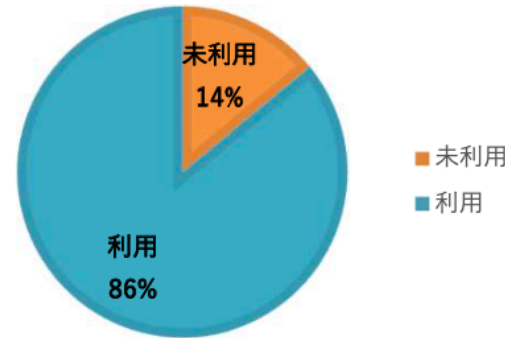
- 下水汚泥エネルギー化率は24%にとどまっている。
- 消化を実施している処理場において、消化ガス発電や消化槽加温、その他処理場内利用などで使用されていない未利用のバイオガスが約5,300万m³/年が存在。

創エネの実績



未利用バイオガス

○ 汚泥資源等有効利用調査(H30)未利用バイオガスは334処理場で存在し、約5,300万m³/年(全体発生量3.77億m³/年のうち約14%)存在

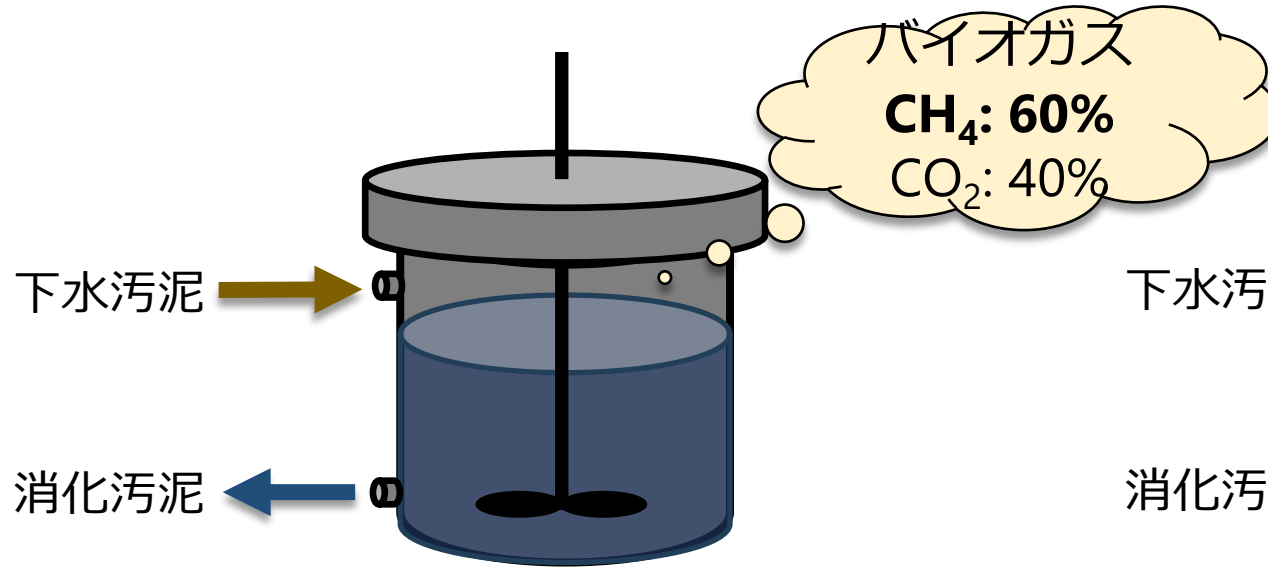


https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/pdf/14_morigasaki_R6_jp.pdf

メタン発酵プロセス

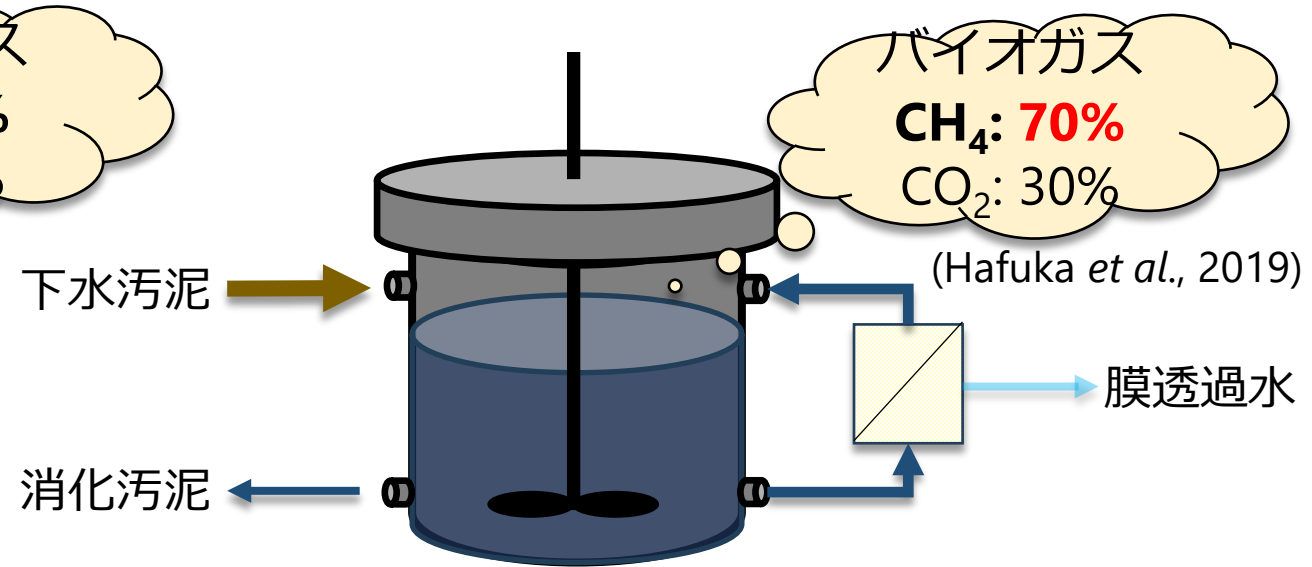


従来法 (CSTR)



- 処理水質が低い
- HRT=SRT (>25~30 d)
- 消化槽の体積が大きい

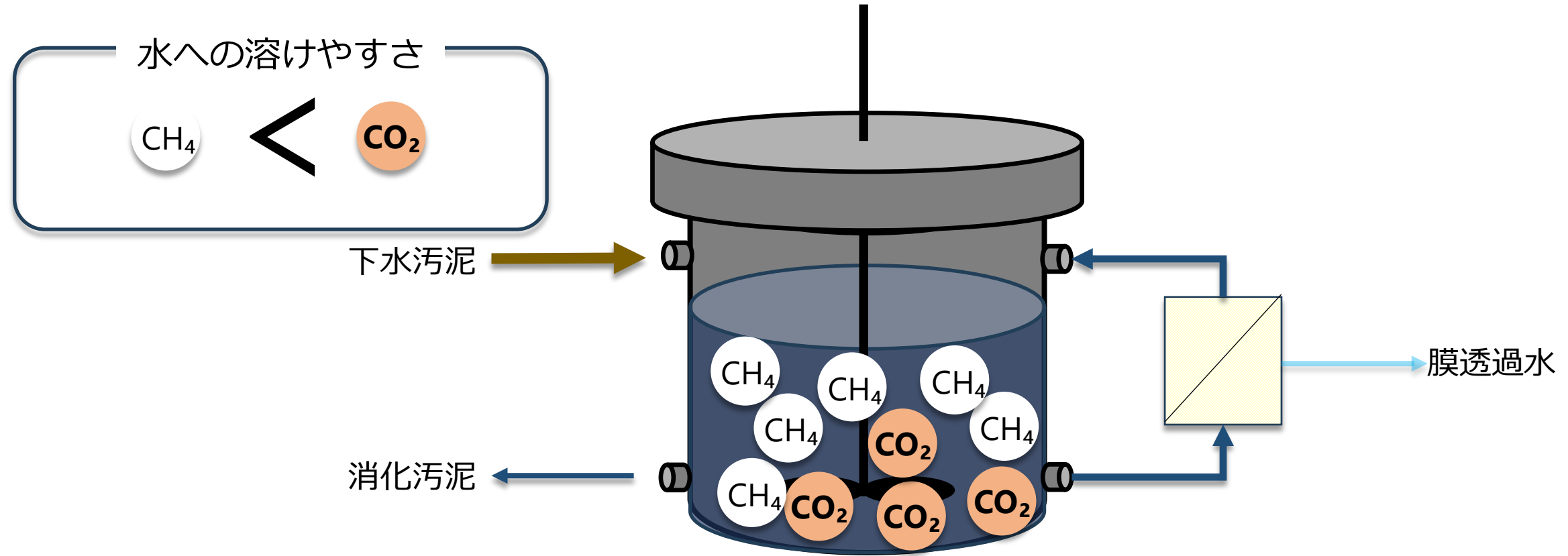
嫌気性膜分離法 (AnMBR)



- 処理水質が高い
- HRT ≠ SRT (HRTの短縮と長いSRTの維持が可能)
- 消化槽の体積を小さくできる

AnMBRを用いた下水汚泥の処理によりバイオガス中メタンを高濃度化できる可能性

これまでの研究

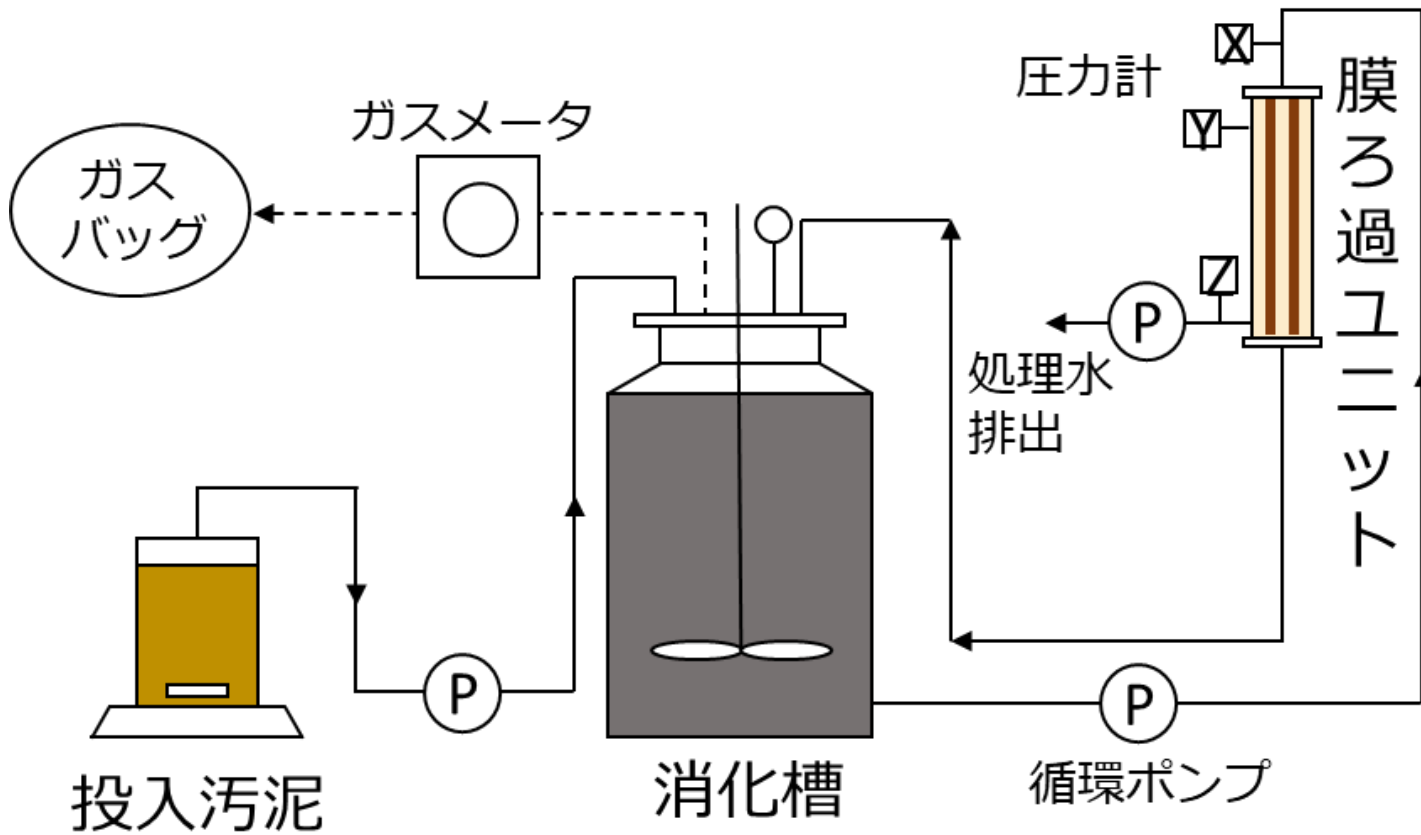


仮説：HRTの短縮により CO_2 が溶解したまま膜透過液とともに消化槽外へと流出したため CH_4 濃度が上昇

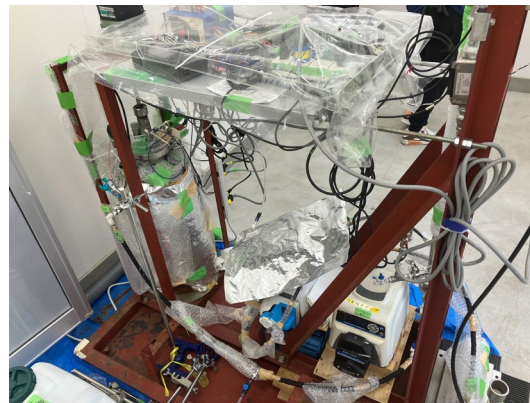
➤ HRT1日以下でバイオガス中の CH_4 濃度が95%以上となる可能性が示唆されている（益子ら, 2020）

研究の目的1

AnMBRを用いた**汚泥処理**においてHRTの短縮によりバイオガス中メタンの高濃度化が可能かを明らかにする

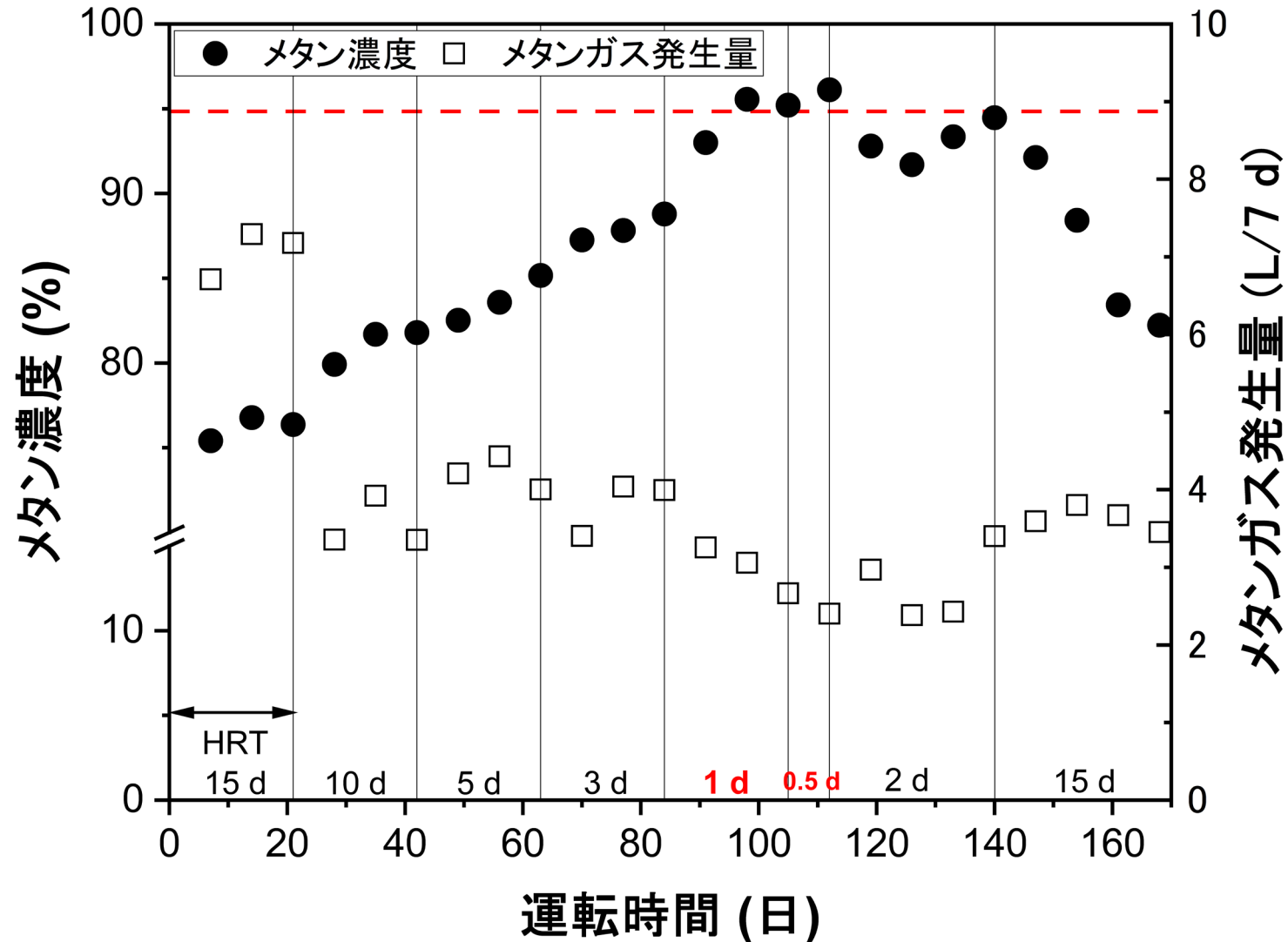


有効体積	15 L
消化温度	35°C
膜の形状	チューブラー型
膜孔径	2.0 μm
膜材質	セラミック
有効膜面積	0.24 m ²
クロスフロー流速	0.14 m/s



条件	期間 (d)	HRT (d)	SRT (d)	OLR (g-VS/L/d)	膜ろ過フラックス (LMH)
1	21	15	162	0.175	0.16
2	21	10	162	0.175	0.24
3	21	5	162	0.175	0.48
4	21	3	162	0.175	0.80
5	21	1	162	0.175	2.4
6	7	0.5	162	0.175	4.8
7	28	2	162	0.175	1.2
8	28	15	162	0.175	0.16

SRTと有機物負荷率（OLR）を一定としたままHRTを段階的に15 dから0.5 dまで短縮



- HRTを短縮するとメタン濃度が上昇し、**HRT 1日以下で95%**を超えた
- HRT 1日以下でメタンガス発生量が減少



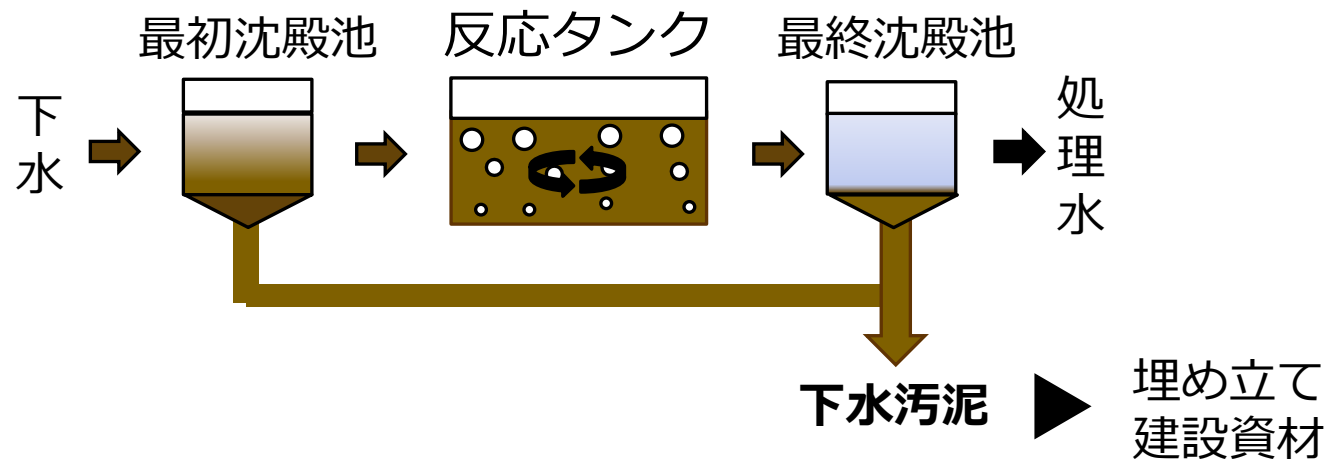
多層カーボンナノチューブ添加による メタン発酵促進メカニズムの探索

中央大学工学部
創価大学工学部

○ 大山 尚也・角田 貴之・山村 寛
Stella Chan On San・西 健斗・井田 旬一

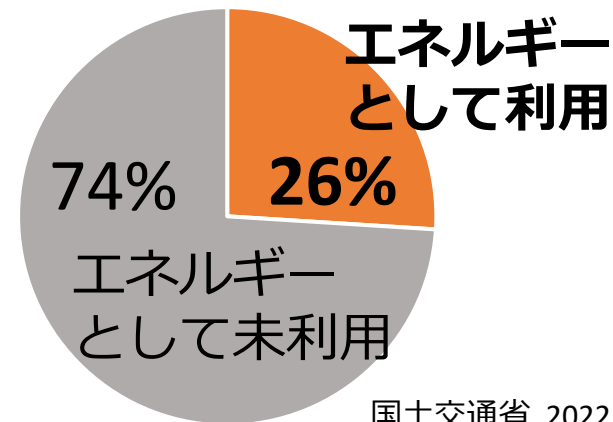


● 標準活性汚泥法の下水処理工程



● 下水汚泥のエネルギー化率

未分解の有機物を多く含む



● 嫌気性消化（メタン発酵）

有機物をバイオガス（メタン・二酸化炭素）に分解

- 👍 ・メタンをエネルギーとして利用可能
- 👍 ・汚泥の発生量が少ない

- 👎 ・多くの微生物がプロセスに関わるため不安定
- 👎 ・過負荷による酸敗

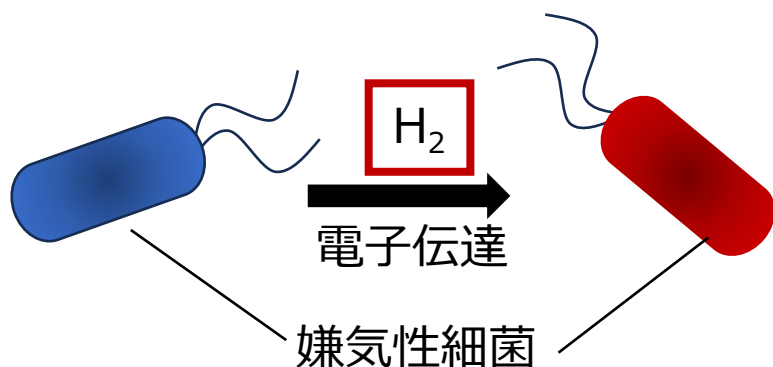
➤ メタン生成経路



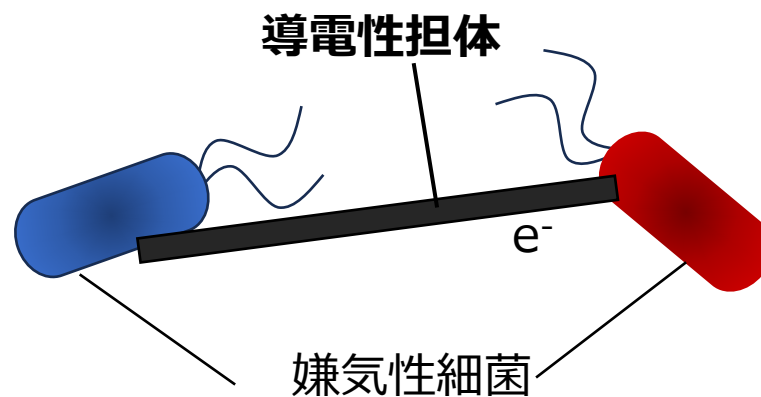
● 直接的種間電子伝達 (Fanghua et al, 2012)

(Direct Interspecies Electron Transfer : **DIET**)

➤ 種間電子伝達



➤ 直接的種間電子伝達 (**DIET**)



👍 **メリット**

・ 効率的な電子伝達



律速段階の解消などが期待

● 多層カーボンナノチューブ (Multi-Walled Carbon Nanotube : **MWCNT**)

➤ MWCNTの特徴

- ・ 高い**導電性** ↑
- ・ 高い**表面積** ↑



➤ MWCNTに関する既往の研究例

- ・ エタノールを基質としたメタン発酵でメタン生成促進 (Chan et al., 2023)
- ・ 有機家庭廃棄物を基質としたメタン発酵で、VFAの消費が促進

(Fazzino et al., 2024)



下水汚泥のメタン発酵におけるMWCNTの影響に関する研究報告は限られている (Fazzino et al., 2024)

● MWCNT添加によるのDIET促進メカニズム

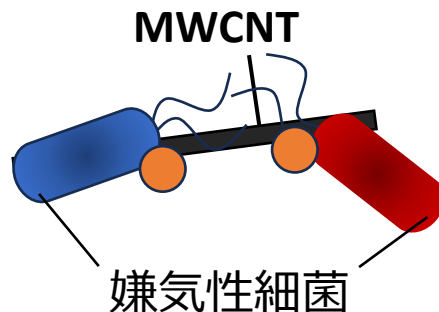
DIETによる電子伝達：嫌気性細菌と導電性担体の接触が必要

- ・ MWCNTが嫌気性細菌を吸着することで電子伝達が促進する可能性
- ・ 活性炭と同様にMWCNTに酢酸が吸着することで、(荻野ら 1979)
嫌気性細菌による酢酸分解向上↑、メタン生成がより促進する可能性

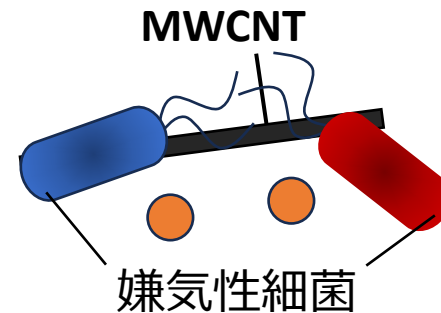
MWCNTと嫌気性細菌/揮発性脂肪酸（VFA）との親和性が重要

➤ DIET促進メカニズムの仮説

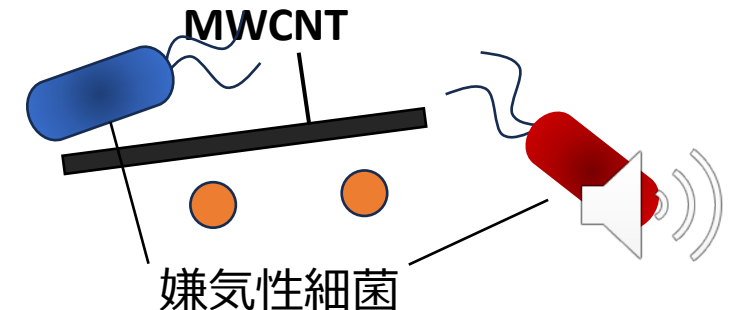
仮説①：嫌気性細菌とVFAの
両方に親和性あり



仮説②：嫌気性細菌のみに親和性あり



仮説③：嫌気性細菌と親和性なし



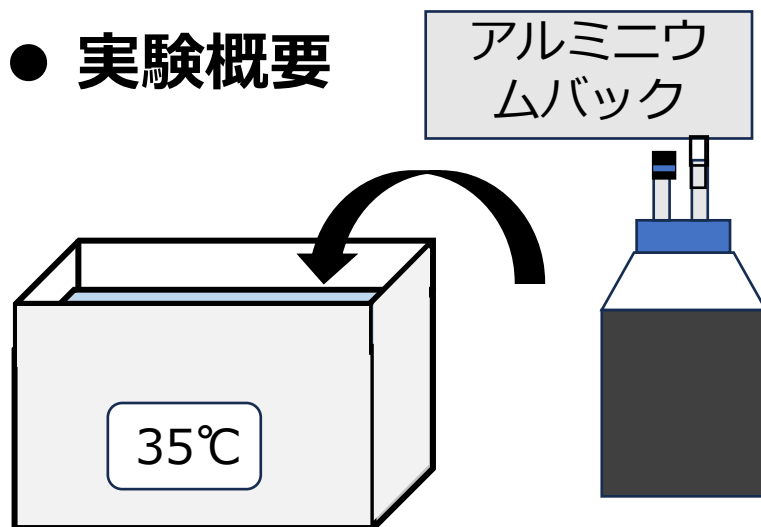
本研究の目的： **多層カーボンナノチューブ（MWCNT）の
吸着特性に着目したDIET促進メカニズムの探索**

検討項目： ①MWCNTの添加率が下水汚泥のメタン発酵に及ぼす影響
②MWCNTと嫌気性細菌・揮発性脂肪酸（VFA）の親和性

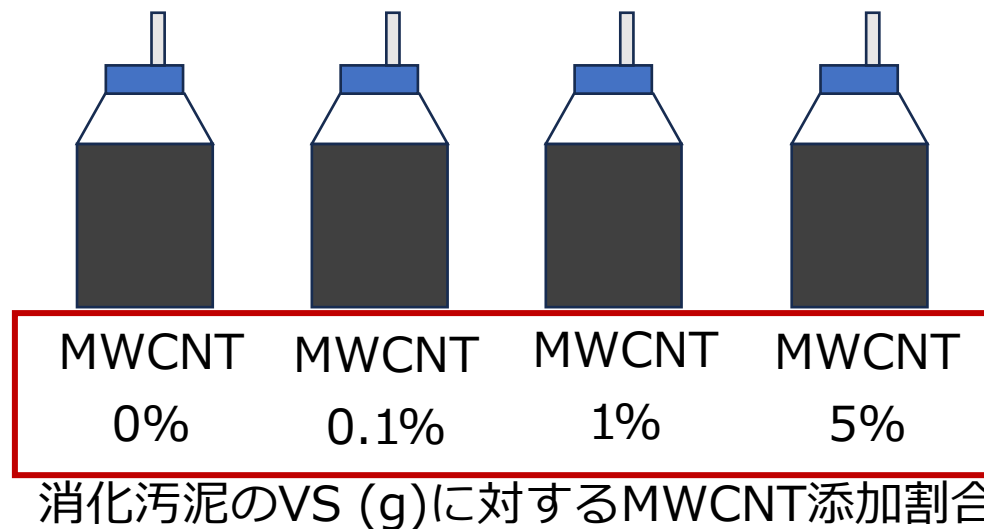


方法 回分式メタン発酵試験

● 実験概要



➤ 条件



・ 運転条件

種汚泥	消化汚泥
基質	余剰汚泥
温度	35°C
運転方式	回分式
運転期間	31日
容積	1 L

・ 使用汚泥特性

	消化汚泥	余剰汚泥
TS(g/L)	27	13
VS(g/L)	18	9.5
VS/TS(%)	67	73
CODcr(g/L)	26	15
NH ₃ (N-mg/L)	650	-

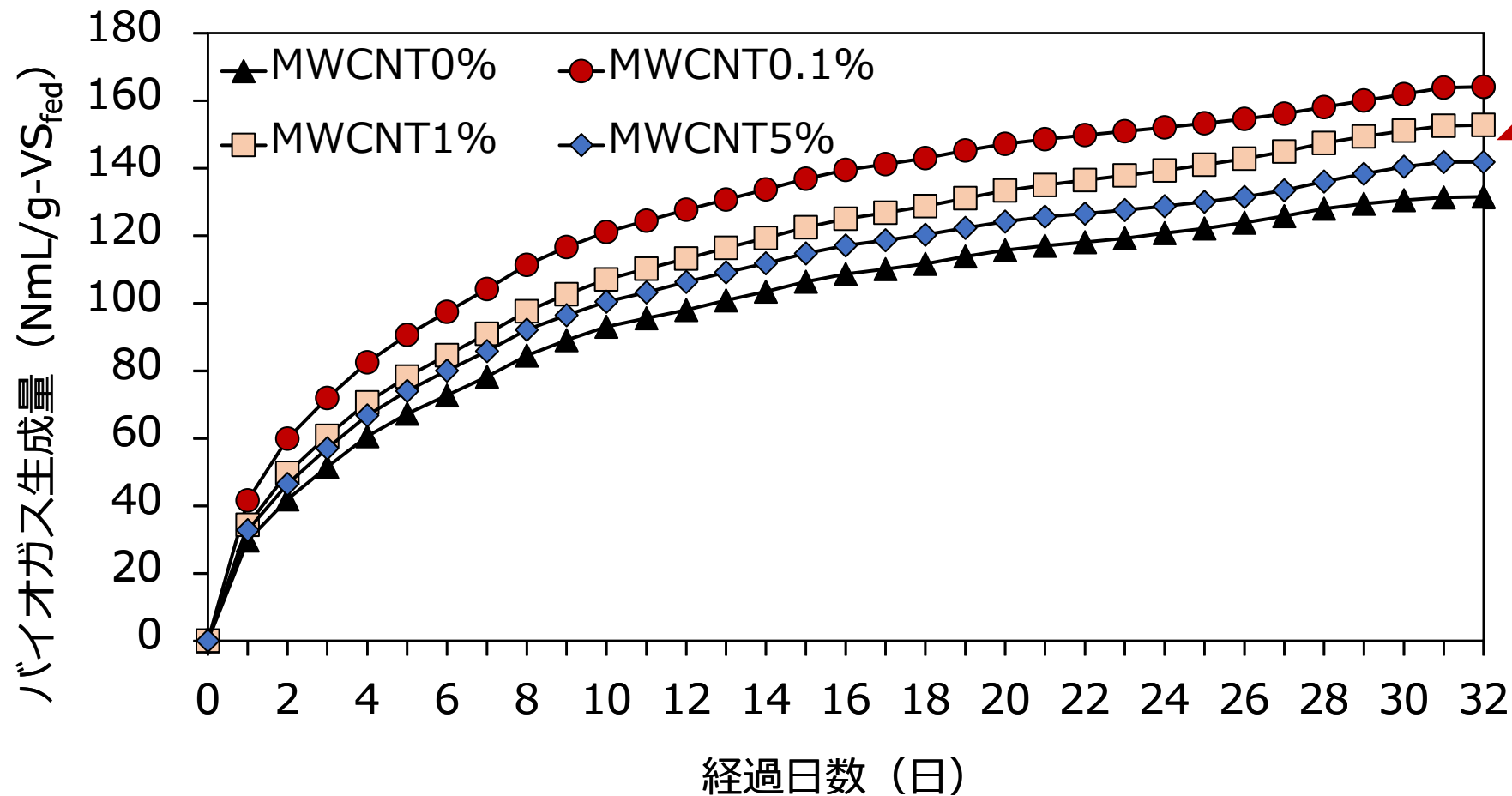
・ MWCNTの特性

平均直径	9.5 nm
平均長さ	1.5 μm
純度	90%
金属酸化物	10%
比表面積	250-300 m ² /g

(Chan et al., 2023)



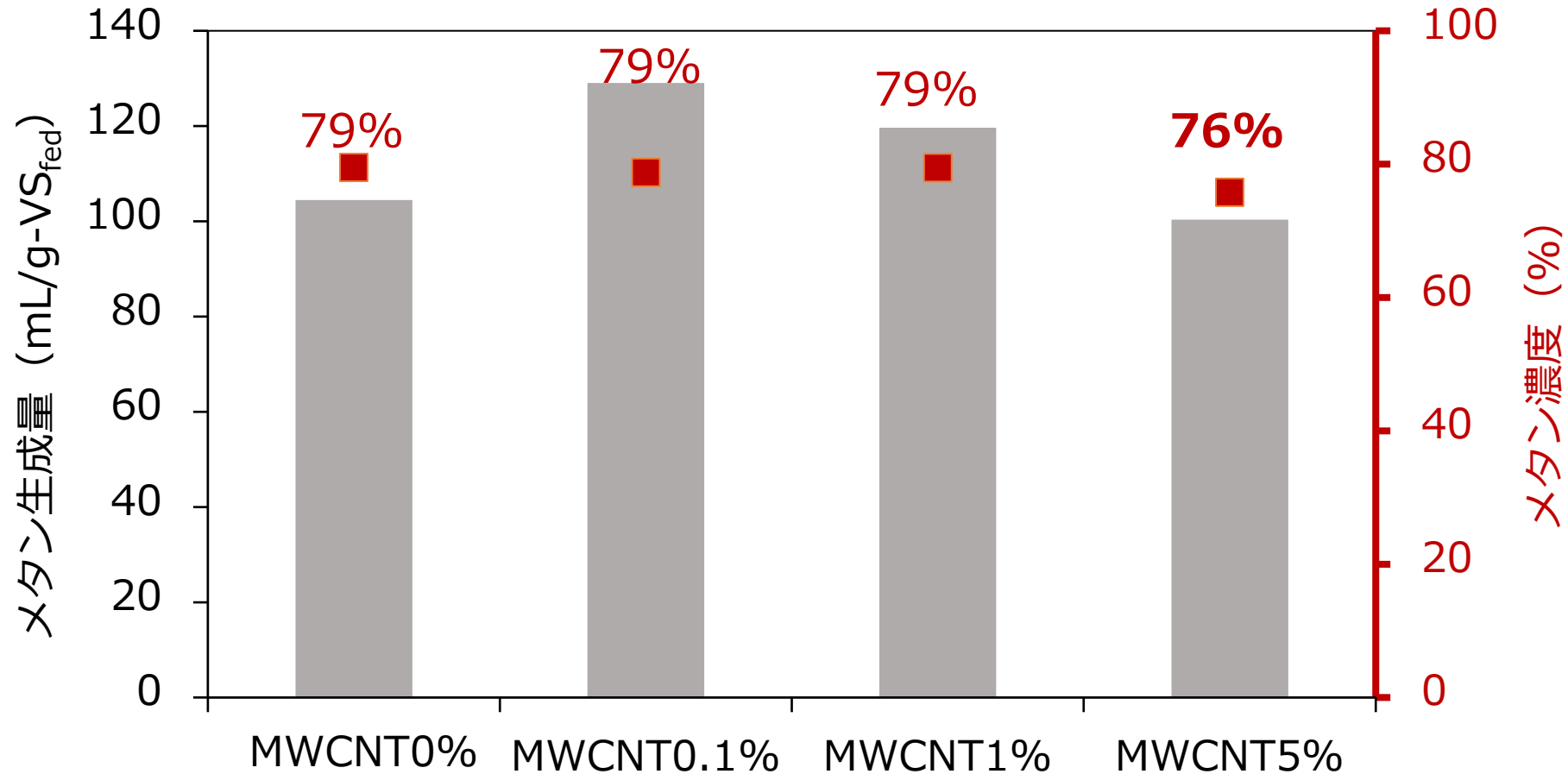
● バイオガス生成量の経日変化



- MWCNT添加により、バイオガス生成が促進した
- MWCNT添加量増加により、バイオガス生成促進効果が低減した



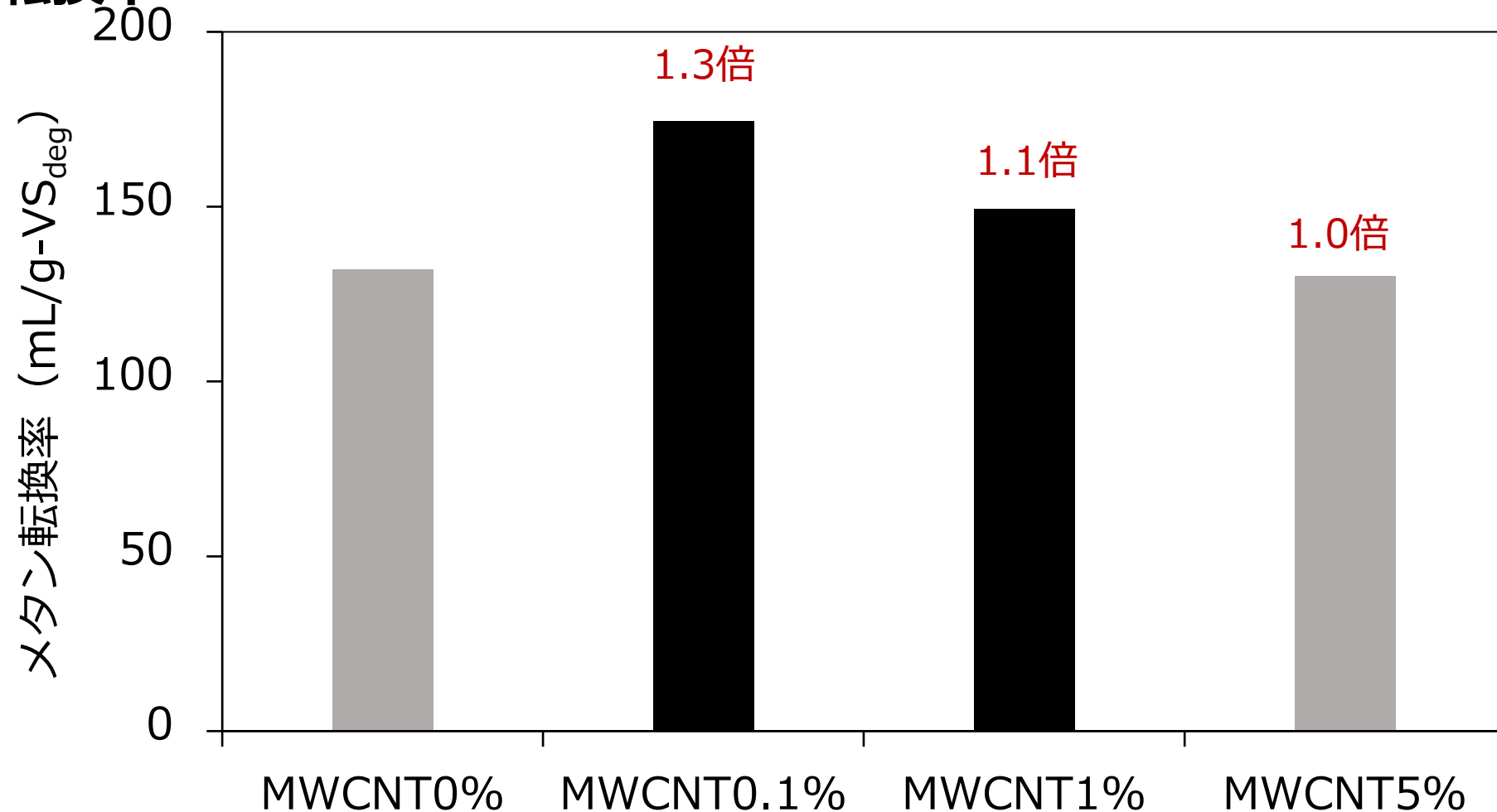
● メタン生成



- MWCNT0.1%、1%ではメタン生成量が増加した
- MWCNT5%ではメタン濃度が低下し、メタン生成量がMWCNT0%と同等となった



● メタン転換率



- ・ MWCNT0.1%、1%の添加により、メタンガス生成能が向上した
- ・ 適正濃度を超えるとメタン生成促進効果が低減する可能性



● MWCNTの生物毒性

- MWCNT添加がメタン発酵に与える研究 (既往研究)

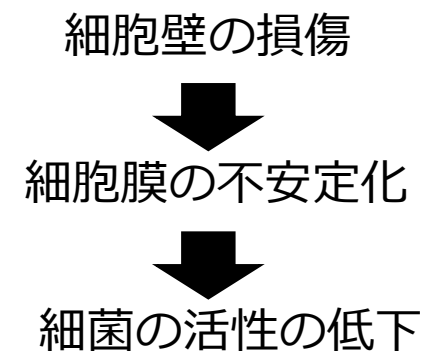
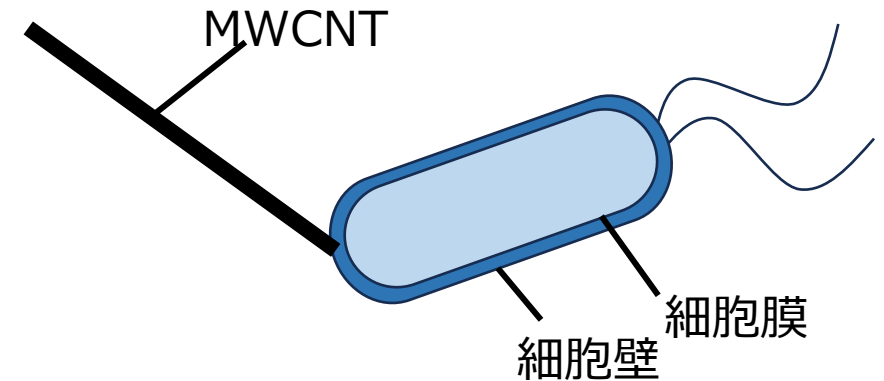
食品廃棄物の乾式メタン発酵において、

MWCNT添加率	バイオガス生成量 (0%と比較)
0%	1
0.6%	1.34
1.4%	1.09
2.8%	1.01

Yadav et al., 2024

- 細胞壁の損傷による細菌の活性の低下

Zhu et al., 2014



MWCNTの過剰量添加は、生物毒性によりメタン生成の阻害となった可能性

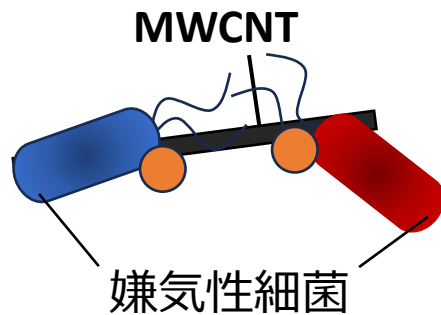


本研究の目的： **多層カーボンナノチューブ（MWCNT）の吸着特性に着目したDIET促進メカニズムの探索**

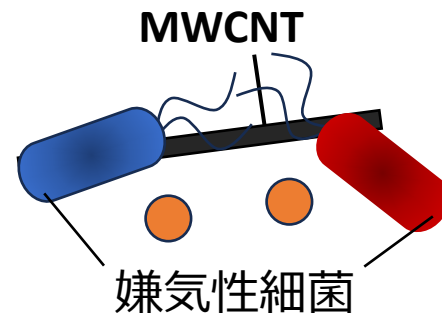
検討項目： ①MWCNTの添加率が下水汚泥のメタン発酵に及ぼす影響
②MWCNTと嫌気性細菌/揮発性脂肪酸（VFA）の親和性

➤ DIET促進メカニズムの仮説

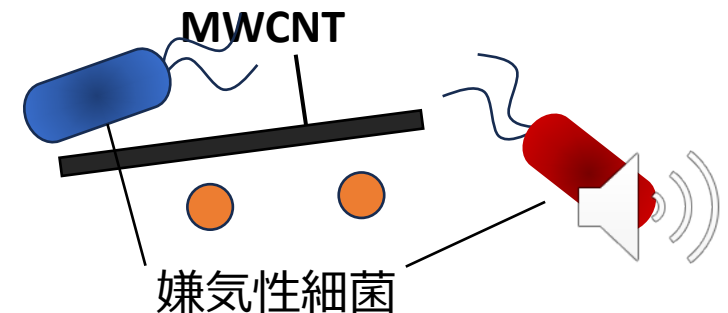
仮説①：嫌気性細菌とVFAの両方に親和性あり



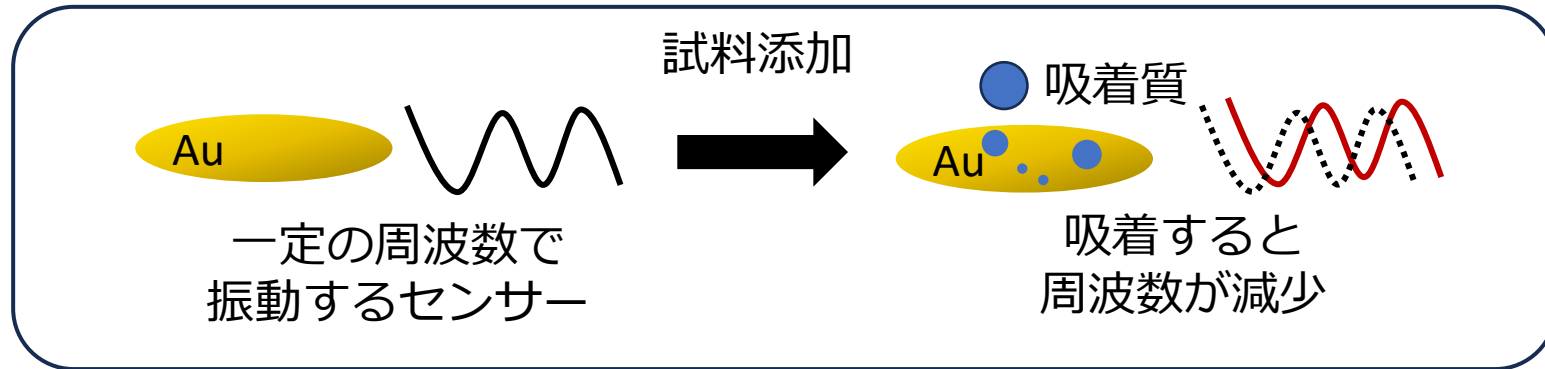
仮説②：嫌気性細菌のみに親和性あり



仮説③：嫌気性細菌と親和性なし



● QCM (水晶振動子マイクロバランス法 Quartz Crystal Microbalance)



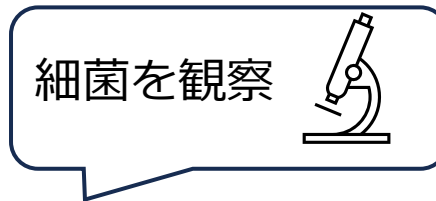
➤ Sauerbreyの式

$$\Delta f = -\frac{2Nf_0^2}{\sqrt{\rho_Q\mu_Q}} \frac{\Delta m}{A}$$

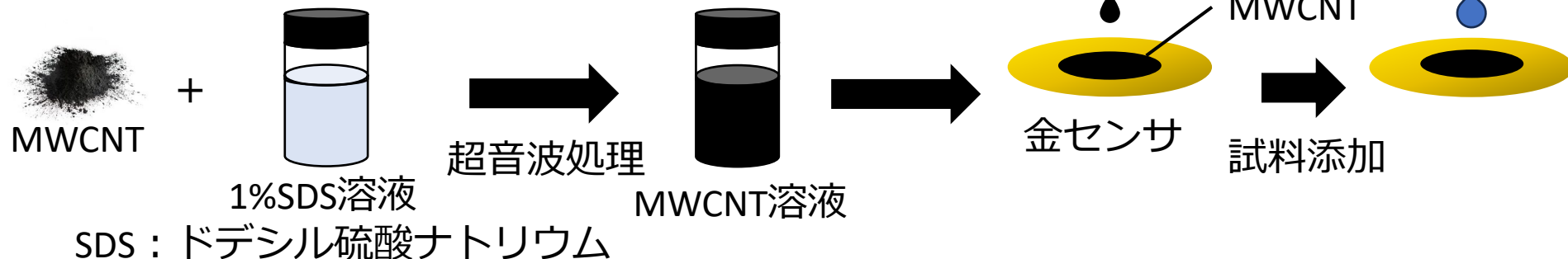
- Δf : 周波数変化
- f_0 : 共振周波数
- N : オーバートーン次数
- ρ_Q : 水晶振動子の密度
- μ_Q : 水晶振動子の剪断弾性係数
- Δm : 質量変化
- A : 電極面積

➤ 吸着試料

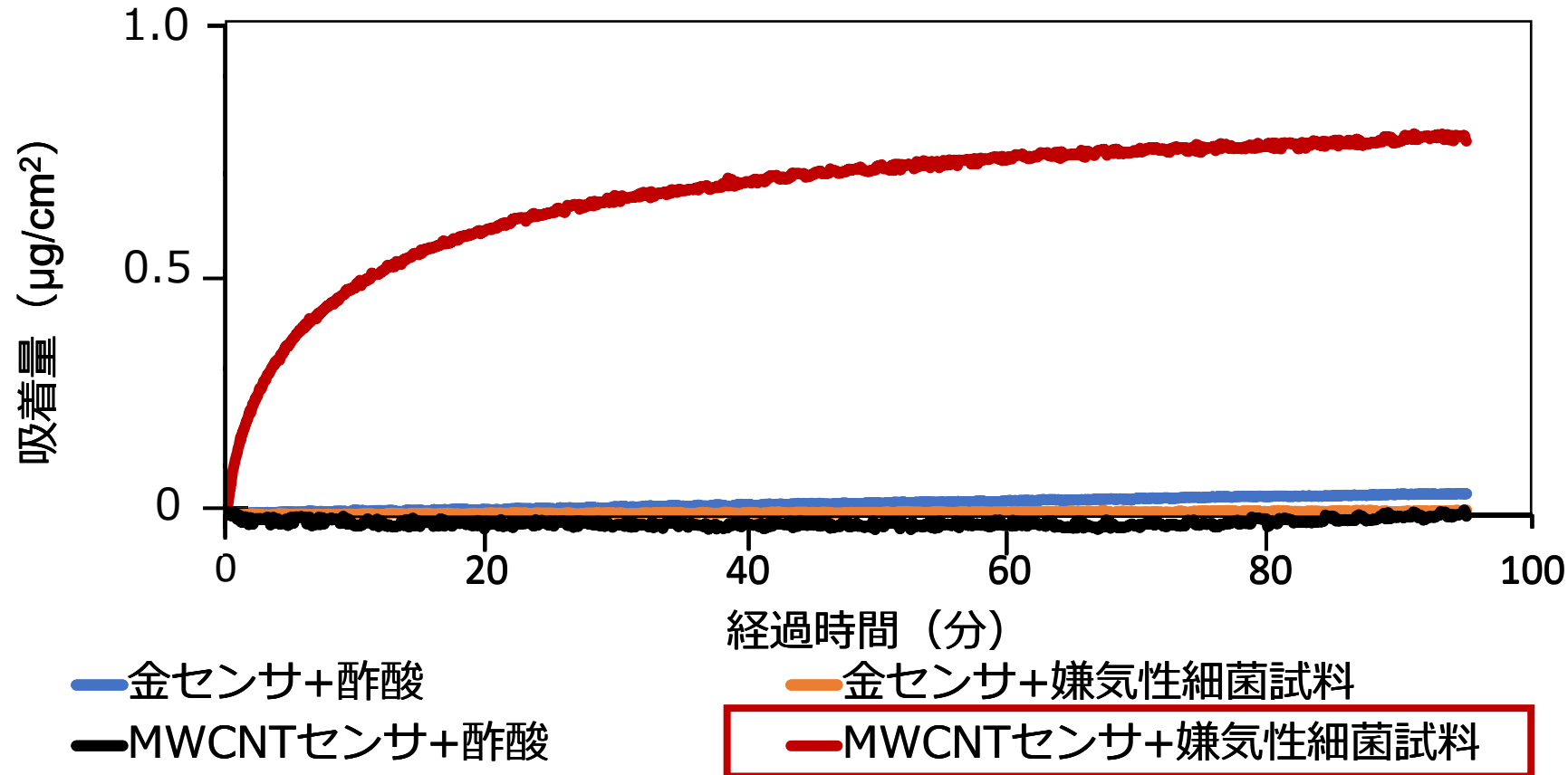
- ・ 酢酸 (100 mg/L)
- ・ 嫌気性細菌試料
(遠心分離後消化汚泥上澄み液 : 4°C, 10,000×g 20 min)



➤ MWCNTの金センサへの固定



● MWCNTへの吸着

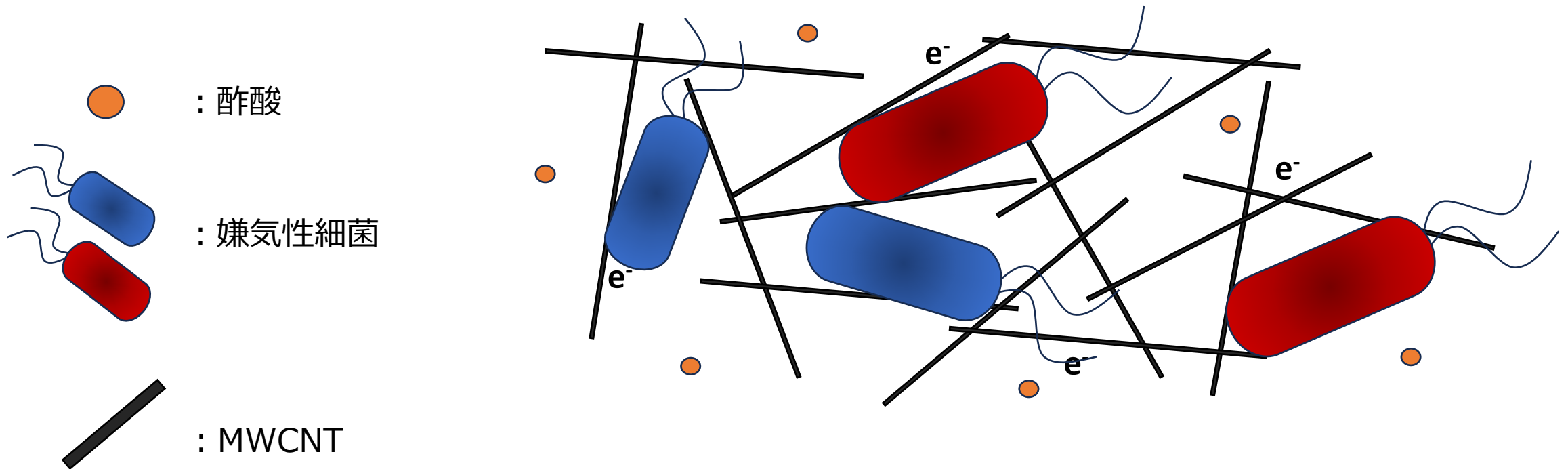


MWCNTと嫌気性細菌の高い親和性が示唆された



● MWCNT添加によるDIETの促進

仮説②嫌気性細菌のみが吸着



MWCNTに嫌気性細菌が吸着することで電子伝達が促進



- **MWCNTの適正添加率でメタン生成能が向上**
- MWCNT0.1%、1%でメタン生成能が向上
- MWCNTの過剰量添加ではメタン生成促進効果を低減する可能性

- **MWCNTと嫌気性細菌の親和性が高いことが示唆された**
- MWCNTに嫌気性細菌が吸着することでDIETによるメタン生成が促進

