

# 有機産業廃水処理の 省エネ・資源回収技術

中央大学理工学部 山村寛

東京大学 飛野智宏  
(共同研究者)

## 基礎素材型産業

鉄、石油、木材、紙などの製品で、産業の基礎素材となる製品を製造する産業。

- ▶ 木造・木製品製造業
- ▶ パルプ・紙・紙加工品製造業
- ▶ 化学工業
- ▶ 石油製品・石炭製品製造業
- ▶ プラスチック製品製造業
- ▶ ゴム製品製造業
- ▶ 窯業・土石製品製造業
- ▶ 鉄鋼業
- ▶ 非鉄金属製造業
- ▶ 金属製品製造業

## 加工組立型産業

自動車、テレビ、時計などの加工製品を製造する産業。

- ▶ 一般機械器具製造業
- ▶ 電気機械器具製造業
- ▶ 輸送用機械器具製造業
- ▶ 精密機械器具製造業

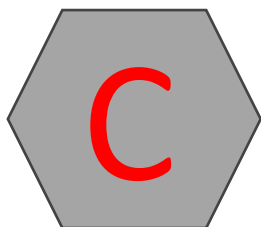
## 生活関連型産業

飲食料品、衣服、家具等の衣食住に関連する製品等を製造する産業。

- ▶ 食料品製造業
- ▶ 飲料・たばこ・飼料製造業
- ▶ 繊維工業
- ▶ 衣服・その他の繊維製品製造業
- ▶ 家具・装備品製造業
- ▶ 出版・印刷同関連産業
- ▶ なめし革・同製品・毛皮製造業

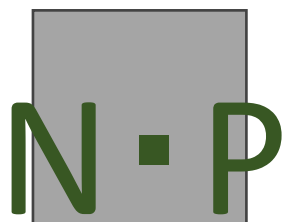
産業3類型による分類(経産省)

多様な産業により、多様な排水が排出されている



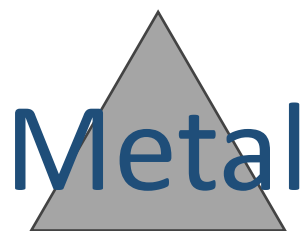
炭素

濃度	産業
HH	<ul style="list-style-type: none"><li>繊維工業</li><li>石油製品</li><li>パルプ、紙</li><li>プラスチック製品</li><li>有機化学</li><li>ゴム製品</li><li>油脂</li></ul>
H	<ul style="list-style-type: none"><li>肥料</li><li>鉄鋼業</li><li>医薬品</li><li>金属製品</li><li>化粧品</li><li>汎用機械</li><li>革製品</li><li>生産用機械</li><li>業務用機械</li><li>電子部品、デバイス、回路</li><li>飲料・たばこ・飼料製造</li></ul>
L	
LL	<ul style="list-style-type: none"><li>無機化学</li><li>窯業</li><li>非鉄金属製造業</li></ul>



窒素・リン

濃度	産業
HH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 肥料</li> <li>• 電子部品、デバイス、回路</li> </ul>
H	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 飲料、たばこ、飼料製造</li> <li>• 繊維</li> <li>• パルプ、紙</li> <li>• 有機化学</li> <li>• 油脂</li> <li>• 医薬品</li> <li>• 石油製品</li> </ul>
L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 化粧品</li> <li>• プラスチック製品</li> <li>• ゴム製品</li> <li>• 金属製品</li> <li>• 汎用機械</li> <li>• 生産用機械</li> <li>• 業務用機械</li> </ul>
LL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 無機化学</li> <li>• 窯業</li> <li>• 非鉄金属製造業</li> </ul>

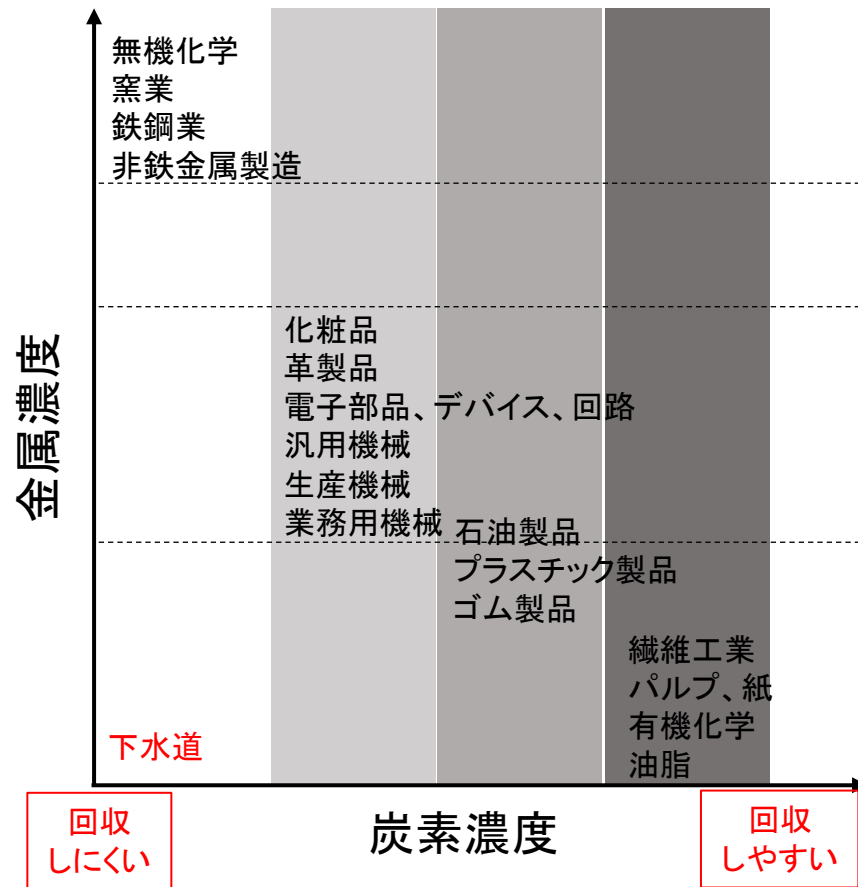
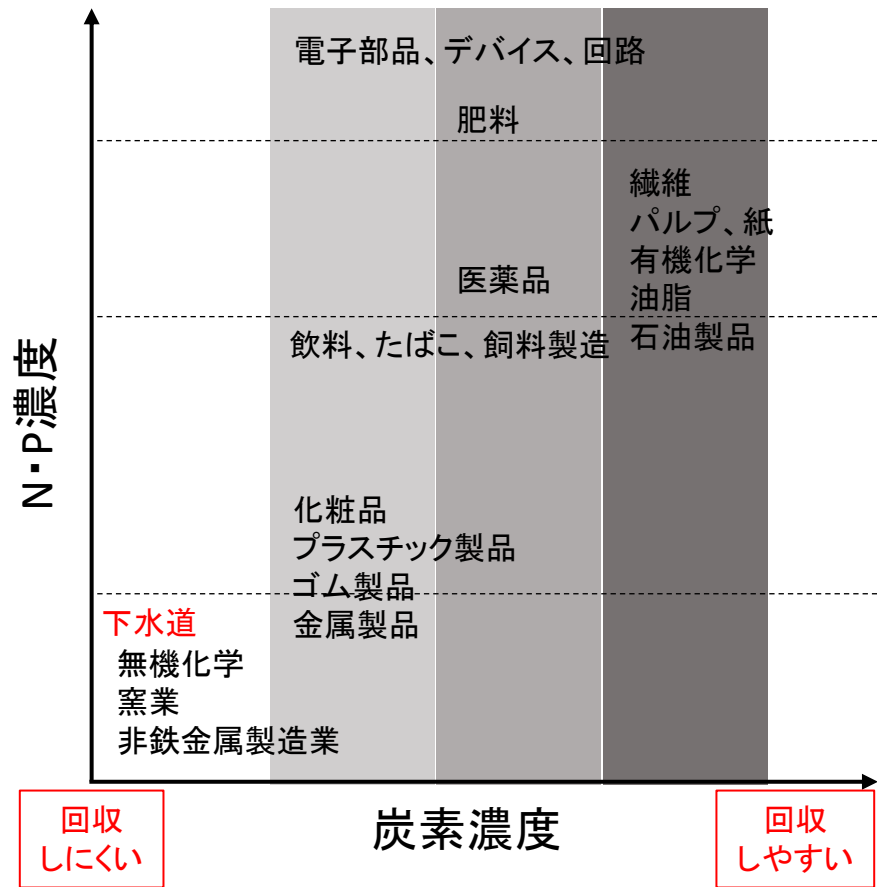


Metal

無機金属

濃度	産業
HH	<ul style="list-style-type: none"> <li>無機化学</li> <li>窯業</li> <li>鉄鋼業</li> <li>非鉄金属製造</li> </ul>
H	<ul style="list-style-type: none"> <li>化粧品</li> <li>革製品</li> <li>電子部品、デバイス、回路</li> <li>汎用機械</li> <li>生産機械</li> <li>業務用機械</li> </ul>
L	<ul style="list-style-type: none"> <li>プラスチック製品</li> <li>ゴム製品</li> </ul>
LL	<ul style="list-style-type: none"> <li>飲料、たばこ、飼料製造</li> <li>繊維工業</li> <li>パルプ、紙</li> <li>肥料</li> <li>有機化学</li> <li>油脂</li> <li>医薬品</li> <li>石油製品</li> </ul>

# 産業排水の構成



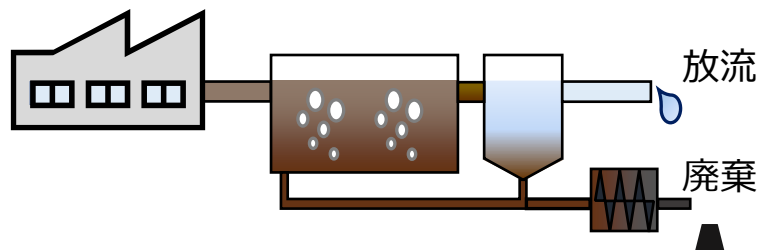
## 産業排水処理の考え方

カーボンニュートラル

産業排水のほとんどが有機炭素を含むことから、有機物への対応がベース  
+  
N・Pおよび無機金属への対応

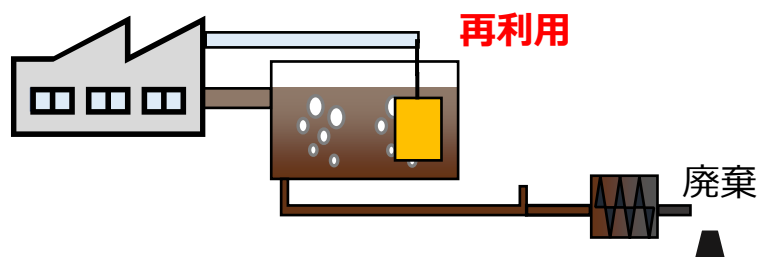
サーキュラーエコノミー

## ◎標準活性汚泥法



## + 膜技術

## ◎膜分離活性汚泥法



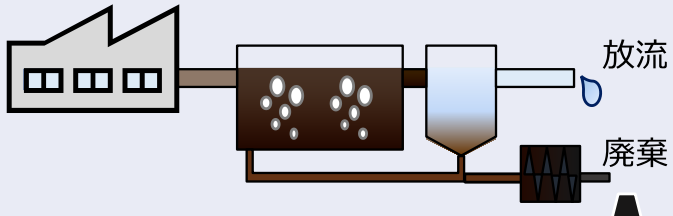
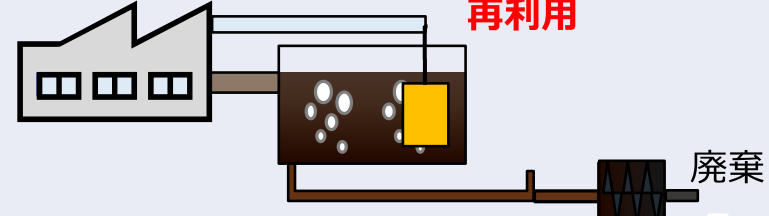
微生物に酸素(曝気)を供給し、  
有機物を「消費」することで、浄化する技術

- ▲曝気に大量のエネルギーが必要
- ▲微生物の制御が難しい
- ▲広大な土地が必要
- ▲低濃度の排水がさらに低濃度に
- ▲汚泥から生産されたメタンは低品質のため  
場内利用が多い
- ★大規模の「処理」を目的とした手法

膜分離を活性汚泥法に追加することで、  
微生物濃度を高めると同時に、処理水質向上

- ×曝気に「さらに」エネルギーが必要
- ▲微生物の制御が難しい
- ▲広大な土地が必要
- ▲低濃度の排水がさらに低濃度に
- ▲汚泥から生産されたメタンは低品質のため  
場内利用が多い
- ★狭小地での「処理」を目的とした手法
- ◎再利用に資する高い処理水質を実現

# 排水中の炭素処理の課題(エネルギー)

	標準活性汚泥法	膜分離活性汚泥法
		
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎管理処理</li> <li>★大規模の「処理」を目的とした手法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎再利用に資する<b>高い処理水質</b>を実現</li> <li>★狭小地での「処理」を目的とした手法</li> </ul>
欠点	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲曝気に<b>大量のエネルギー</b>が必要</li> <li>▲微生物の制御が難しい</li> <li>▲広大な土地が必要</li> <li>▲低濃度の排水がさらに低濃度に</li> <li>▲汚泥から生産されたメタンは低品質のため場内利用が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>×曝気に「<b>さらに</b>」<b>大量のエネルギー</b>が必要</li> <li>▲微生物の制御が難しい</li> <li>▲低濃度の排水がさらに低濃度に</li> <li>▲汚泥から生産されたメタンは低品質のため場内利用が多い</li> </ul>
エネルギー消費	0.56 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	1.12 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

## 課題

1. **エネルギー投入型** + **炭素をCO<sub>2</sub>へ変換**する形式の排水処理が主流
2. 炭素を含む汚泥は、量が少なく、質が低い(不純物多い)ため、有効利用に難

2019年

結果として、下水処理 + 排水処理 + 汚泥処理において、年間950万t-CO<sub>2</sub>を排出  
国内全体の0.8%に相当



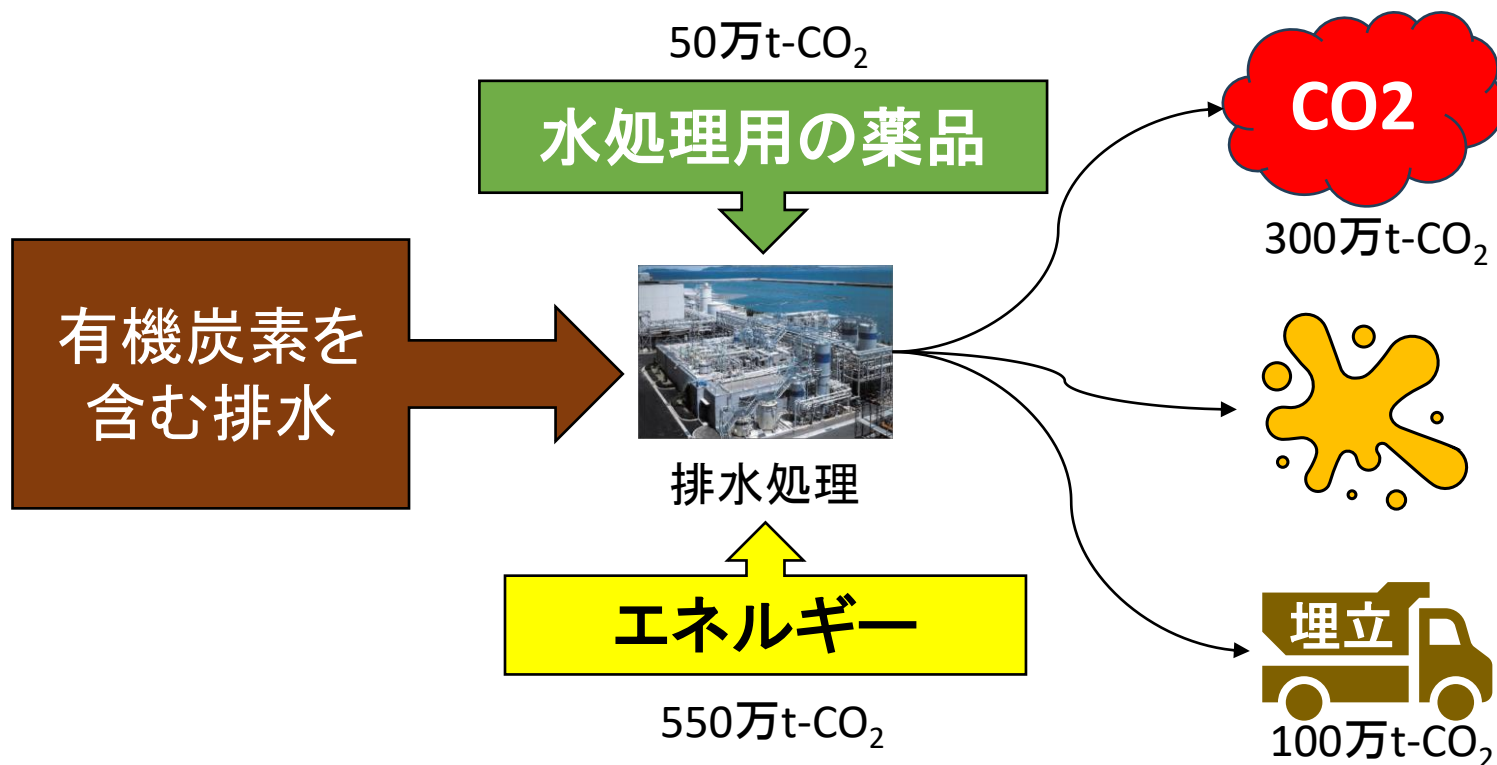
# 排水中の炭素処理の課題(材料・薬品)

◎さらに、水処理として使用する薬品にかかるCO<sub>2</sub>も無視出来ない

国内で製造される活性炭

	国内活性炭 製造量	製造時の CO <sub>2</sub> 排出量
石炭由来	約1万ton/年	約26 t-CO <sub>2</sub> /活性炭-t
ヤシガラ由来	約5万ton/年	約4 t-CO <sub>2</sub> /活性炭-t

国内で生産される  
活性炭量から排出される  
GHG量は  
**約50万t-CO<sub>2</sub>/年**



# 第3世代の炭素回収型排水処理の提案

活性汚泥法 ⇒

**膜技術 + 高機能薬品 + 汚泥固定**

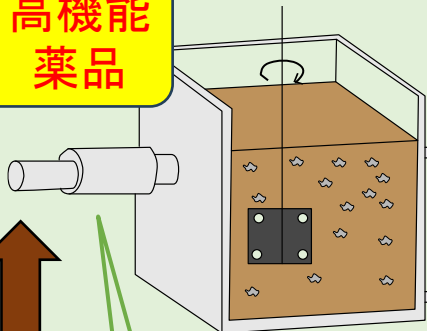
## 第3世代 → 凝集膜分離炭素回収法

※濁りの除去

### 凝集-膜ろ過

曝気レス省エネルギー

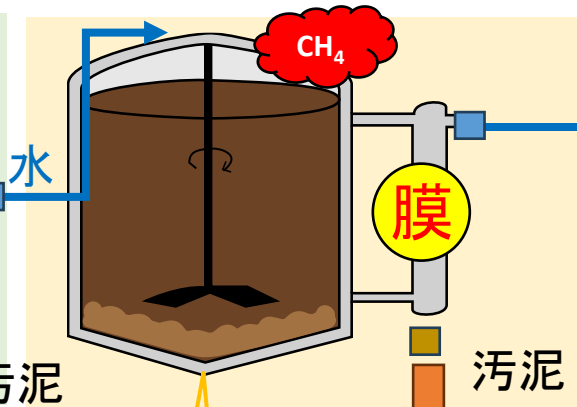
高機能  
薬品



※溶解物の除去

### 嫌気性消化MBR

高品質バイオガス回収



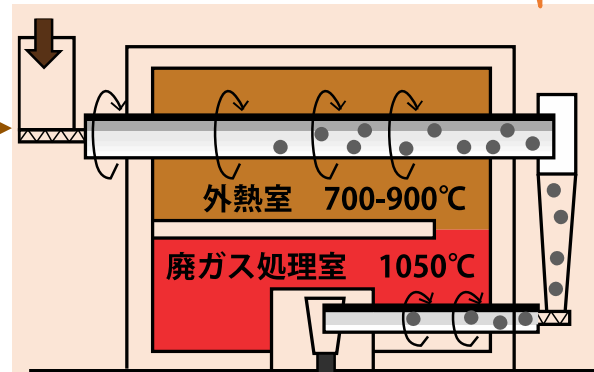
水  
必要に応じて  
無機金属やN・Pの回収  
(ムーンショット技術など)

燃料追加を必要としない  
自燃炭化

※炭素の固定

### 超高温汚泥炭化

有機炭素の回収



都市ガスレベルの  
メタンガス品質制御

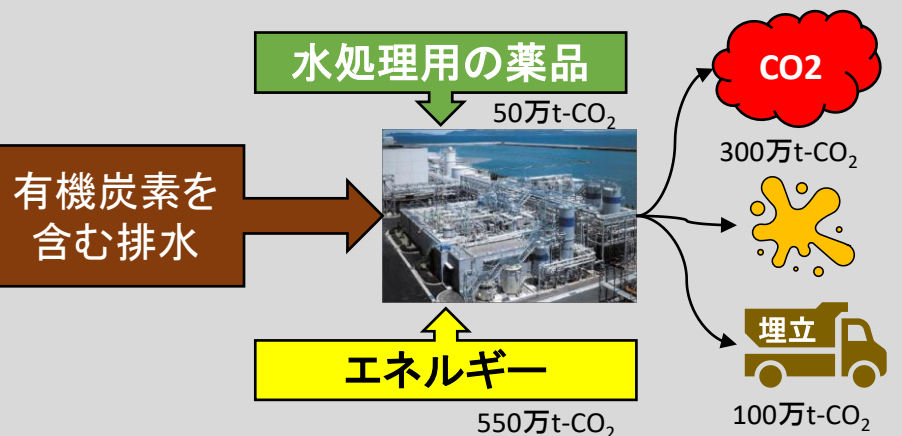
膜を詰まらせない  
凝集剤

汚泥がつかまらない  
膜・モジュール

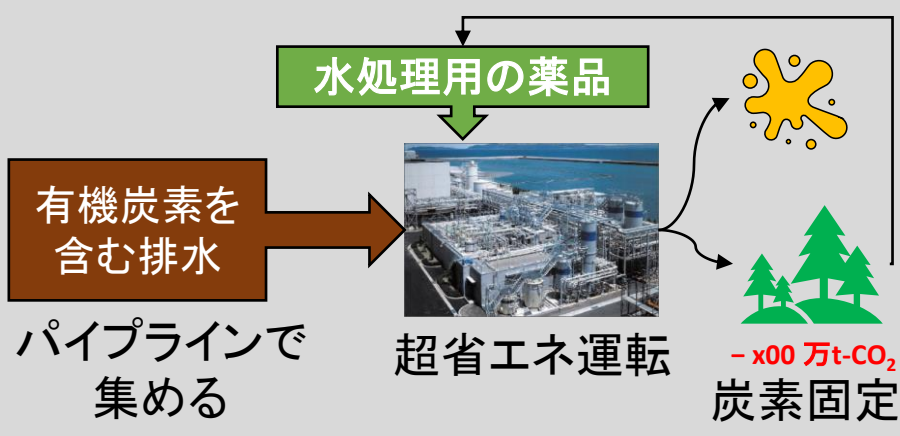
汚泥  
固定

超高温炭化製品

## 「排水処理型」システム



## 「炭素回収型」システム



パイプラインによる排水回収システムを利用し、有機炭素回収システムを構築提案するシステムは、曝気量削減と炭素回収率の大幅な向上に加え、従来技術にはない高品質消化ガスの生産を可能とする。これにより、**カーボンネガティブ化を実現!**

項目	従来技術 活性汚泥法+嫌気性消化	本提案技術 炭素回収型システム
エネルギー消費	× 曝気エネルギー大	◎ 曝気不要
炭素回収	○ 約40%をメタン転換・回収 × 炭素回収率 40%	○ メタン転換・回収率 60% ◎ 炭素回収率 95%以上
消化ガス質	○ メタン濃度60%	◎ メタン濃度 > 95%
処理時間	△ 水処理: 5-8 h × 汚泥処理: 30日	◎ 水処理: < 2 h ◎ 汚泥処理: 1日

# 研究開発成功時の波及効果・インパクト

- 2050年までの下水道事業での普及により、CO<sub>2</sub>排出量を700万トン-CO<sub>2</sub>削減。
- 最終的に、2,100億円の市場規模を獲得、400万トン-CO<sub>2</sub>を固定。
- 合計で、1,100万トン-CO<sub>2</sub>を削減。

項目	2038年		2050年	
	従来技術 (活性汚泥法)	本提案技術	従来技術(MBR)	本提案技術
普及 見通し	—	6,200万m <sup>3</sup> /年 食品・飲料水産業廃水 <sup>1)</sup> の10%	—	250億m <sup>3</sup> /年 H、HHの排水40%+下水道 <sup>2)</sup> 60% (うち10%は海外分)
処理動力 単価 <sup>3)</sup>	20円/m <sup>3</sup>	10円/m <sup>3</sup>	産水20円/m <sup>3</sup> 下水12円/m <sup>3</sup>	産廃10円/m <sup>3</sup> 下水2円/m <sup>3</sup>
市場規模	—	→ 12億円/年 <sup>4)</sup>	—	→ 2,100億円/年 <sup>5)</sup>
CO <sub>2</sub> 排出 原単位	0.56 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	半減 0.28 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	産水0.56 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 下水0.34 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	産水0.28 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 下水0.06 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 1/6
CO <sub>2</sub> 排出量	3.4万トン-CO <sub>2</sub> /年	→ 1.7万トン-CO <sub>2</sub> /年 (▲50%)	1070万トン-CO <sub>2</sub> /年	→ 370万トン-CO <sub>2</sub> /年 (▲700万トン-CO <sub>2</sub> )
CO <sub>2</sub> 固定量	—	—	0万トン-CO <sub>2</sub> /年	-400トン-CO <sub>2</sub> /年 (▲400万トン-CO <sub>2</sub> )

1) 2019年工業統計表に基づき食料品製造業、飲料・たばこ・飼料製造業における用水量を約300万m<sup>3</sup>/dとし、廃水になる割合を0.8、年間260日稼働で算出計算。2) 年間150億m<sup>3</sup>。3) 電力料金20円/kWhを仮定。従来技術として産業廃水は標準活性汚泥法(1 kWh/m<sup>3</sup>)、下水は高度処理MBR(0.6 kWh/m<sup>3</sup>)を仮定。4) 6,200万m<sup>3</sup>/年×10円/m<sup>3</sup>を維持費とし、市場に占める維持費の割合を50%と仮定。5) 下水の市場規模を2,500億円/年とした。

# 第3世代の炭素回収型排水処理の提案(再掲)

活性汚泥法 ⇒

膜技術

高機能薬品

汚泥固定

世界NO1

独自の進化

最高峰の耐久キルン

## 凝集膜分離炭素回収法

※濁りの除去

※溶解物の除去

### 凝集-膜ろ過

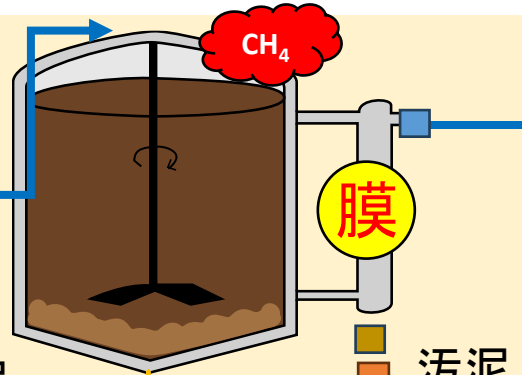
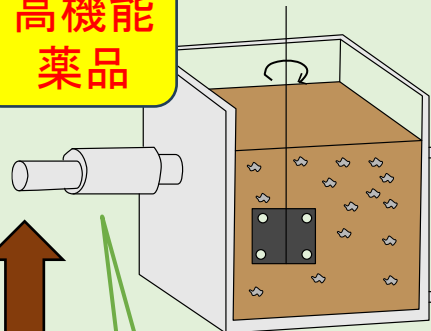
### 嫌気性消化MBR

燃料追加を必要としない  
自燃炭化

曝気レス省エネルギー

高品質バイオガス回収

高機能  
薬品

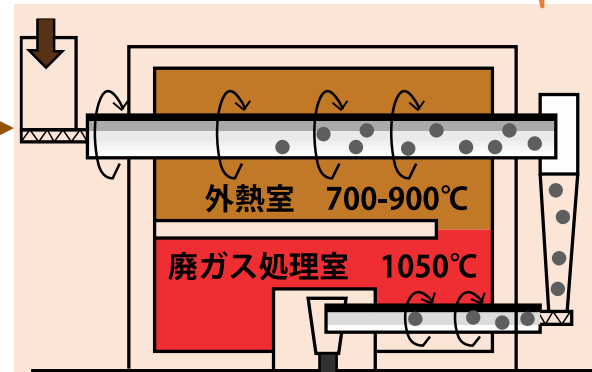


水  
必要に応じて  
無機金属やN・Pの回収  
(ムーンショット技術など)

※炭素の固定

### 超高温汚泥炭化

有機炭素の回収



汚泥  
固定

超高温炭化製品

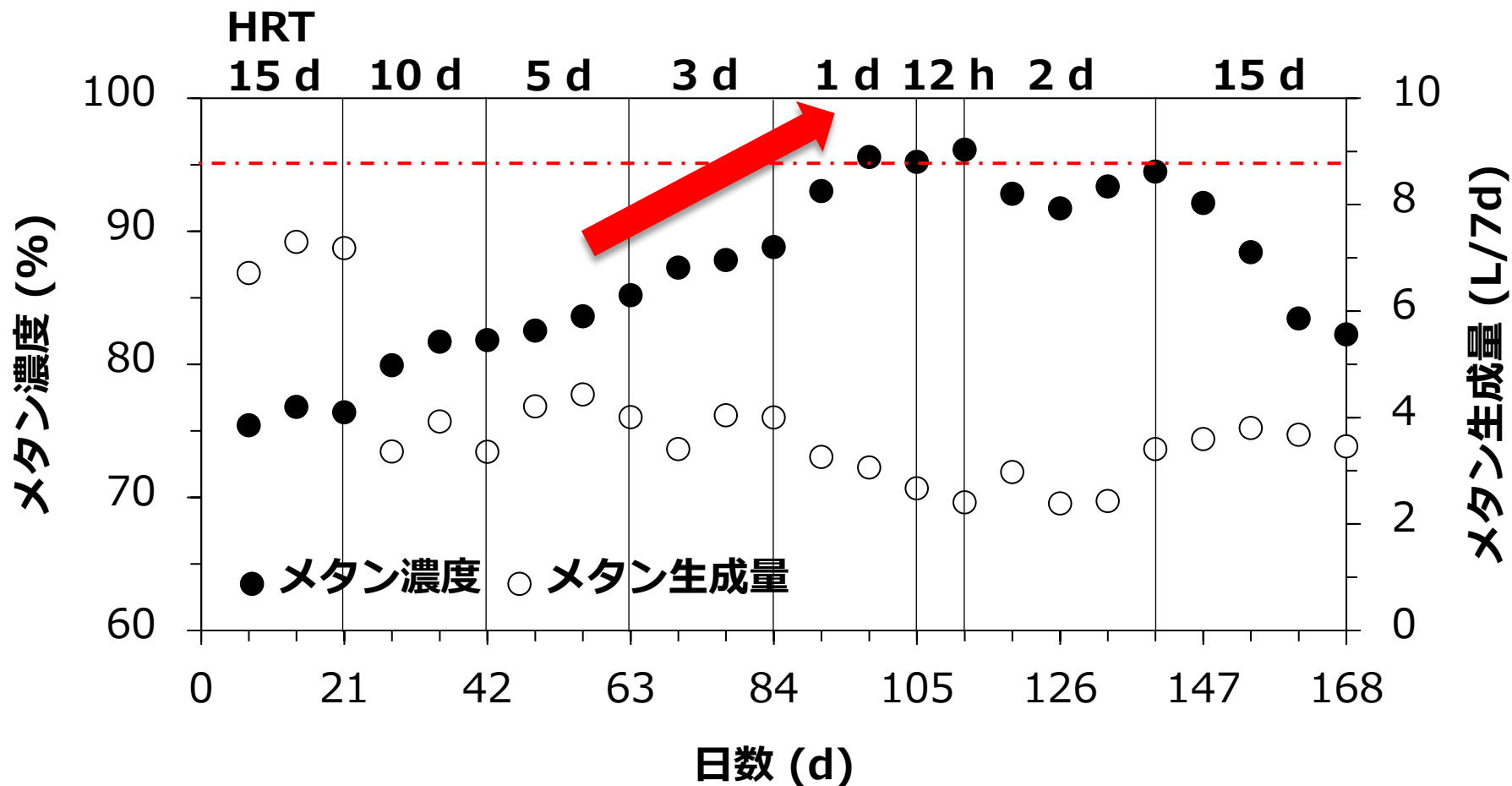
有機炭素を  
含む排水

膜を詰まらせない  
凝集剤

汚泥がつかまらない  
膜・モジュール

都市ガスレベルの  
メタンガス品質制御

## バイオガス中のメタン濃度及びメタンガス生成量



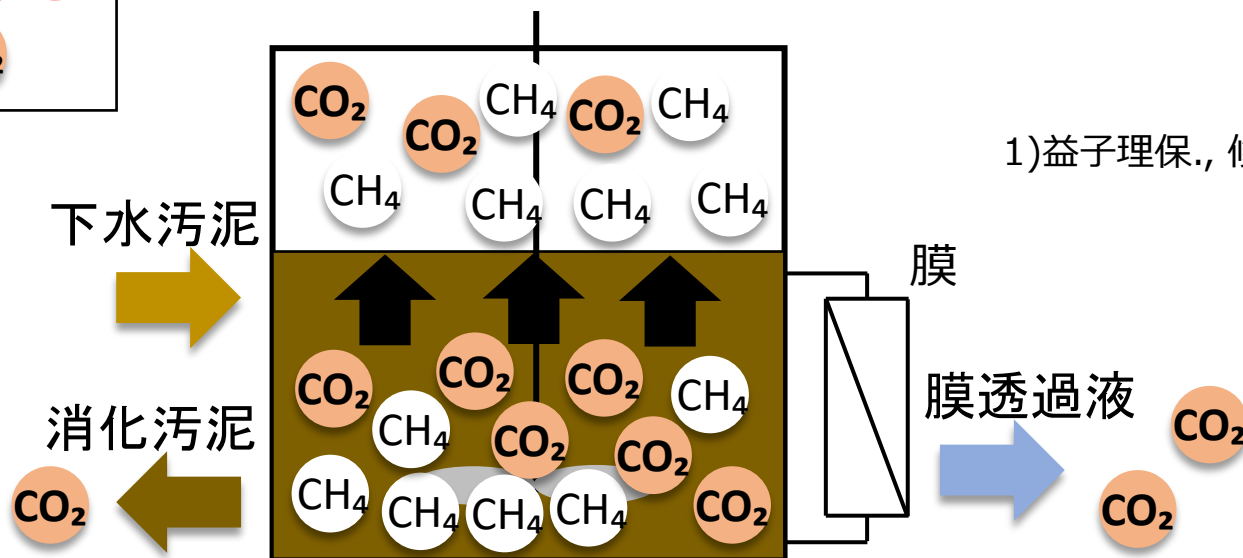
HRTを短縮すると...

- ・メタン濃度が上昇し、特にHRTが1日より短いと95%を超えた
- ・メタン生成量が減少した

## AnMBRのバイオガス中のメタン濃度が上昇した理由<sup>1)</sup>

HRTの短縮によりCO<sub>2</sub>が溶解した膜透過液が消化槽外へと流出したため

水への溶けやすさ



1) 益子理保., 修士論文(2019)

溶解度の違いから、メタンガス濃度が向上したことを、理論的にも証明！

# 技術の優位性 「膜技術」

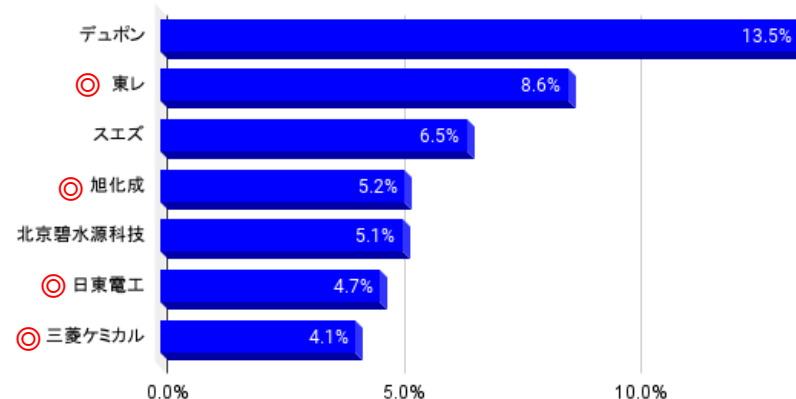
## ○日本の膜メーカー

有機膜: 東レ、旭化成、三菱ケミカル、クボタ、クラレ、ダイセン、日東電工、東洋紡...

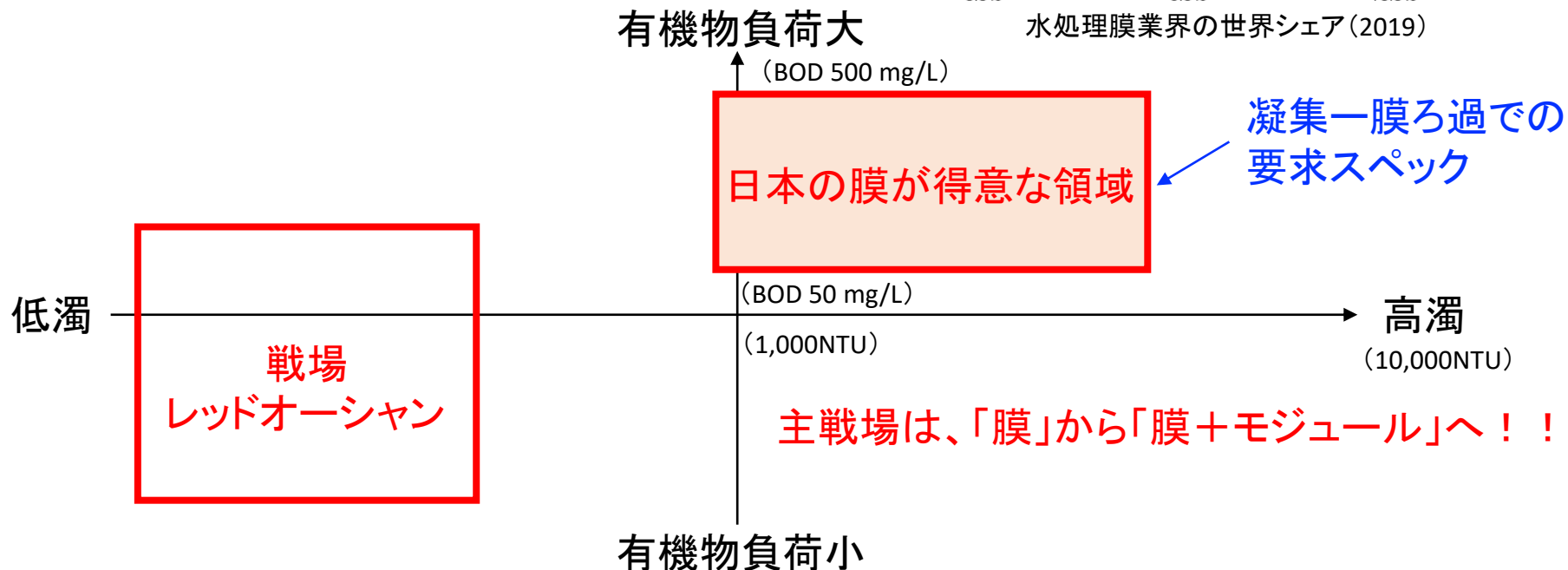
無機膜: NGK(日本ガイシ)、明電舎

日本の膜は、独自技術の積み上げにより、  
世界市場で存在感あり

水処理膜業界の世界シェア(2019年)



水処理膜業界の世界シェア(2019)





## ○国内の凝集剤のメーカー

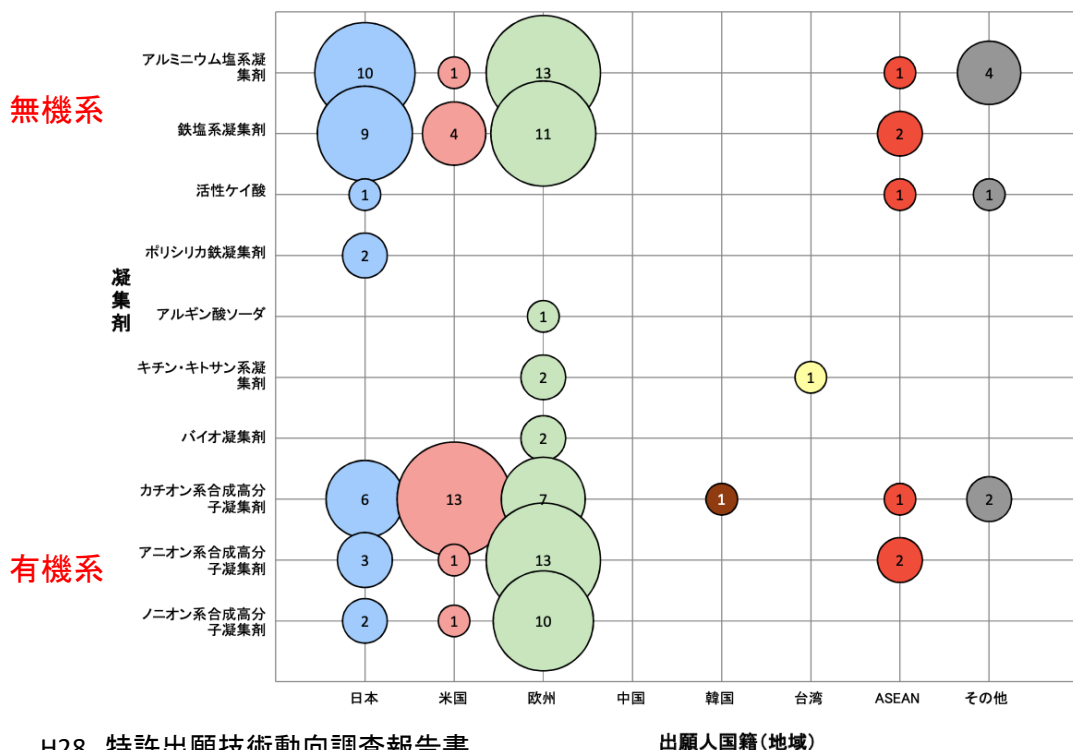
**無機系凝集剤:** 大明化学工業、多木化学、北陸化成、日吉、日本軽金属、アサヒ化学...

**有機系凝集剤:** ヘリオス、東亜合成、多木化学、三洋化成

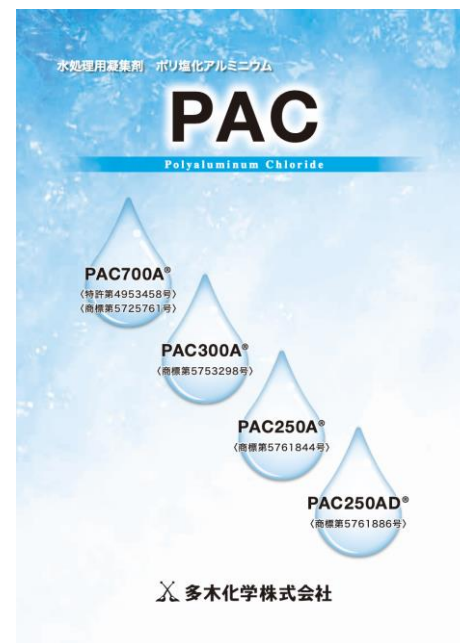
## ○世界の主要企業

Kemira Oyj、BASF SE、ソレニスLLC、Dow、Nouryon、栗田工業、ヴェオリア  
SNFフロアージャー、ベーカーヒューズ社、アークサダ

図 4-18 出願人国籍別技術区分別（凝集剤）出願件数（出願先国：ASEAN、出願年（優先権主張年）：2005年-2014年）

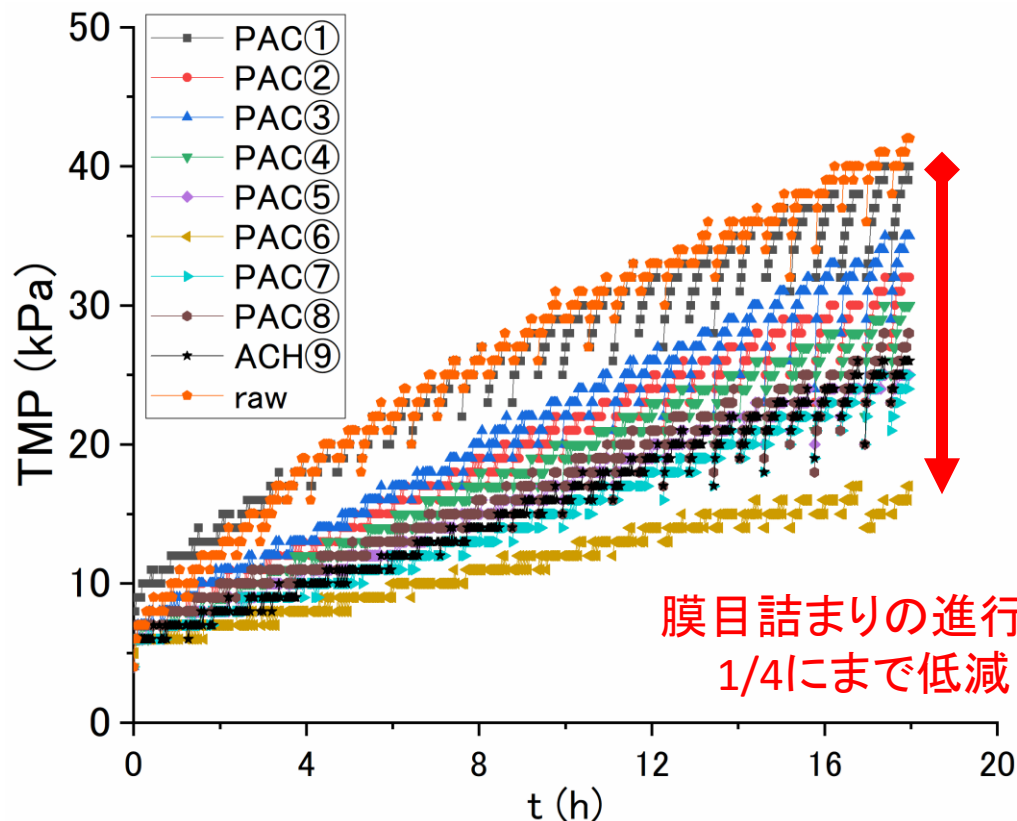


日本は、無機系凝集剤に強み  
高塩基度PAC



工程	100倍希釈	100倍希釈 0.5 $\mu$ mろ過	100倍希釈 電気透析	100倍希釈 電気透析 0.5 $\mu$ mろ過	100倍希釈 電気透析 BaCl <sub>2</sub> (蒸発) 0.5 $\mu$ mろ過	100倍希釈 BaCl <sub>2</sub> 0.5 $\mu$ mろ過	100倍希釈 BaCl <sub>2</sub> 0.5 $\mu$ mろ過 電気透析	100倍希釈 BaCl <sub>2</sub> 0.5 $\mu$ mろ過 電気透析 0.5 $\mu$ mろ過	100倍希釈
	PAC①	PAC②	PAC③	PAC④	PAC⑥	PAC⑤	PAC⑦	PAC⑧	ACH⑨
Al濃度 (mg-Al/L)	641	636	573	584	960	638	533	528	1550
n(Cl/Al)	2.31	2.09	0.42	0.52	1.43	1.31	0.91	0.66	0.56
n(SO <sub>4</sub> /Al)	0.18	0.21	0.16	0.19	0.04	0.03	0.07	0.08	0.00
Ala (%)	52	57	19	18	18	61	11	13	5
Alb (%)	12	13	21	19	52	30	36	37	18
Alc (%)	36	30	60	63	30	9	53	50	77

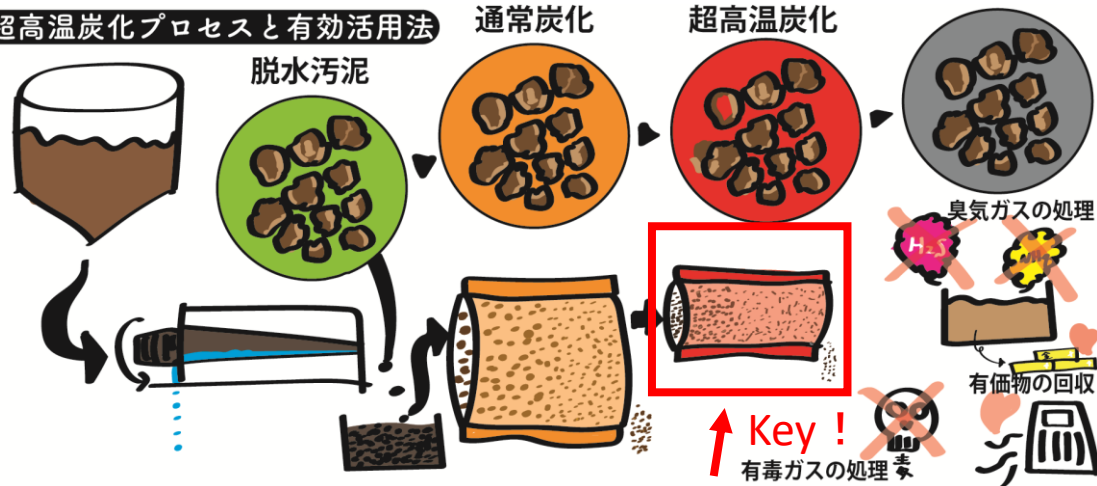
2023 水道研究発表会要旨



水質に加えて、  
膜目詰まりを抑制するような  
「機能性を持った凝集剤」  
の開発

膜目詰まりの進行を  
1/4にまで低減

## 超高温炭化プロセスと有効活用法



1100°C以上でも耐えうる  
特殊なセラミックロータリーキルン  
(大同特殊鋼)

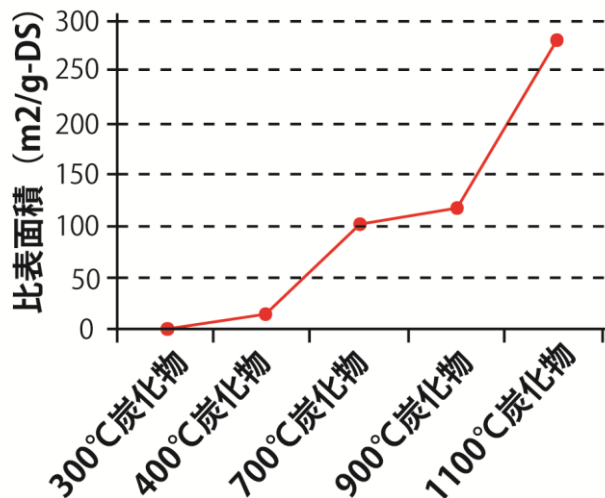
超高温炭化の利点

埋立量の削減

CO2の固定

処分費の削減

超高温化することで、比表面積が大幅に向上することが判明



性能の向上によって、これまで適用が難しかった、新しい用途先にも展開・利用できる可能性が出てくる

液相では・・・ 産業排水処理や金属の回収

気相では・・・ 空調フィルター, オゾン分解  
悪臭処理, アンモニア処理  
溶剤回収, 硫化水素処理

## 凝集剤添加量の最適化

提案：沈降速度を直接求める



フロックを目視で判断  
(大きさ、色、数など)

凝集剤注入量の調整



フロックの3D画像

除去性(=沈降速度)

フロック画像より沈降速度を計算

(Stokes' 式とフロック密度関数)

$$v_s = \frac{d^{D-1} a g}{18 \mu}$$

統計・AIモデル

3D画像から「a」を算出

物理モデル

3D画像から「フラクタル次元D」と「粒径d」を算出

AI・物理統合モデルによる水処理のデジタルツイン制御の実現

## 標準活性汚泥法

ツヨミ1

凝集+制御

ツヨミ2

膜技術

ツヨミ3

超高温炭化炉

炭素回収型排水処理システムへの大変革  
(ベース技術)

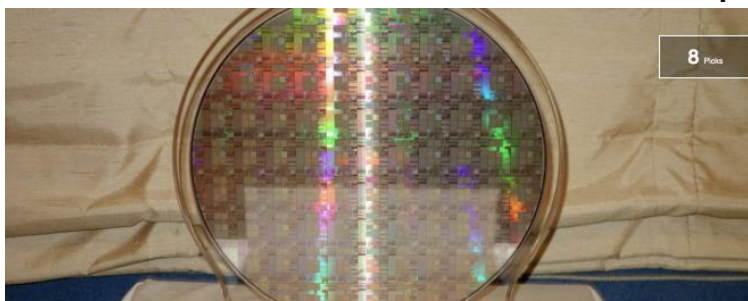
+

無機資源回収システム

1100万トン-CO2/年

資源・水

半導体産業への貢献



台湾で深刻な水不足、TSMCなどの半導体工場の稼働にも影響がでる可能性

TECH+ 2021年03月01日

ニュースpicks

熊本 NEWS WEB

熊本

半導体生産に欠かせない水の確保を 県が地下水の保全強化へ

02月10日 19時02分



台湾のTSMCの進出をきっかけに、半導体産業の集積強化に向けた県の推進本部の会議が開かれ、半導体の生産には大量の水が必要となることから、地下水を保全する取り組みを強化する方針が示されました。

県庁で開かれた推進本部の会議には、県の幹部職員などが出席しました。

この中で蒲島知事は、TSMCが日本で2か所目の工場の建設を検討していることについて「第2工場の建設地に熊本を選んでもらうには、万全の受け入れ体制を構築することが最大のアピールになる」と述べました。

そのうえで、半導体の生産には大量の水が必要になることから「多くの人の懸念は地下水が足りるかどうかだ。地下水のかんようや、ダムの未利用水の活用をぜひ成功させてほしい」と述べ、地下水を保全する取り組みを強化する考えを示しました。

担当者からは、県の来年度予算案の事業として、菊池市の竜門ダムで利用されていない水、既存の農業用パイプラインを活用して菊陽町周辺に供給する事業の可能性について調査することが報告されました。

また、会議では、ことし夏にTSMCの駐在員と家族600人余りが熊本を訪れることから、台湾の人たちの生活をサポートする部会を、周辺の市町村とともに推進本部に設置したことや、台湾の子どもたちが通う学校に翻訳機を配備したり、支援員を配置したりして受け入れ体制を整えていくことが報告されました。

NHKニュースweb