

宇宙閉鎖 CNP 究極循環プラットフォーム ～膜設計・製造の4次元化～

中央大学 社会理工学部 山村 寛

オフグリッド型の水インフラシステム (POU)

POU: Point Of Use の頭文字ですが、意味としては、使用するPOINTで何かをするということ

水の場合 処理や資源回収!



POU/POEは、利用者が専門知識を有しない住民であり、浄水を専門とする職員ではないことに注意!!

POUに求められる性能



1. 浄水効果の見える化
2. 要望・水源に合わせた豊富なラインナップ
3. 単純明快な使い方
4. いつでも、どこでも(宇宙でも!)手に入る流通網
5. 最新の情報・技術がバージョンアップとして継続的に提供

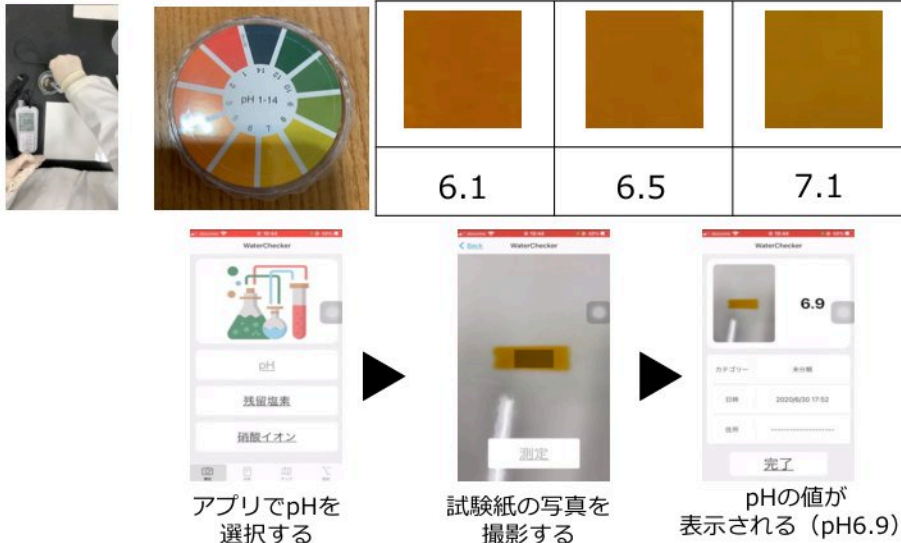
(コア技術 1) 浄水効果の可視化技術

1. 浄水効果の見える化
2. 要望・水源に合わせた豊富なラインナップ
3. 単純明快な使い方
4. いつでも、どこでも同一値段で手に入る流通網
5. 最新の情報・技術がバージョンアップサービスとして継続的に提供されること

POUに求められる性能～水質の見える化～

5

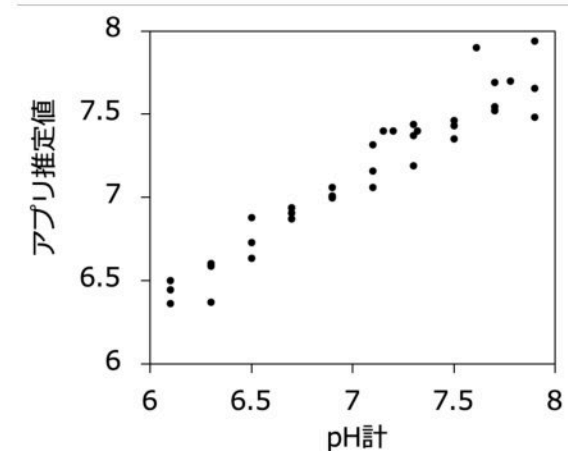
最大の困り事は、
高価かつ煩雑な分析装置がないと、水質が見えないこと



精度

6

※異なる4箇所の明るさで計測



平均0.2の誤差で予測することが可能



WATER_IN

試験紙をかざすだけの水質チェックアプリ

無料

登録不要

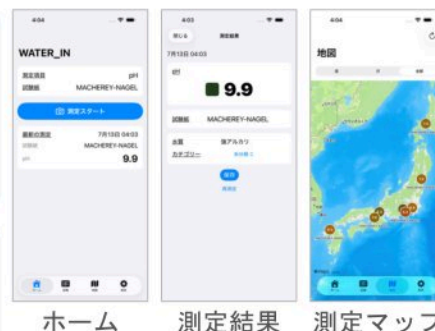
広告なし

使い方はかんたん3ステップ

- ① 試験紙とチャートを用意
- ② ガイドに合わせて撮影
- ③ その場でpH値を自動判定

主な機能

- ・照明の違いを自動補正
- ・測定履歴をグラフで確認
- ・全国の測定値を地図で共有
- ・井戸水・水槽・自由研究に



App Storeで公開中

無料・iOS対応

QRからダウンロード→



pH以外にも、残留塩素濃度、前塩素濃度、硝酸濃度、塩濃度などを追加予定
水質の見える化によって、誰でもいつでも、水を管理できる時代に！

(コア技術2) 膜ろ過の自動運転制御

1. 浄水効果の見える化
2. 要望・水源に合わせた豊富なラインナップ
3. 単純明快な使い方
4. いつでも、どこでも同一値段で手に入る流通網
5. 最新の情報・技術がバージョンアップサービスとして継続的に提供されること

膜ろ過のメリットとデメリット

9

膜ろ過の売り文句

「微細孔による篩い分け」を主要なメカニズムとする膜ろ過法は、「ろ材への吸着」を主要なメカニズムとする砂ろ過法と比較して、遙かに**精密**に、かつ**簡単**に固液分離を達成することができる。

近年、膜ろ過の普及に伴って、導入にかかるコストも大幅に低下
物理的な分離プロセスなので、簡単に自動化でき、人件費削減

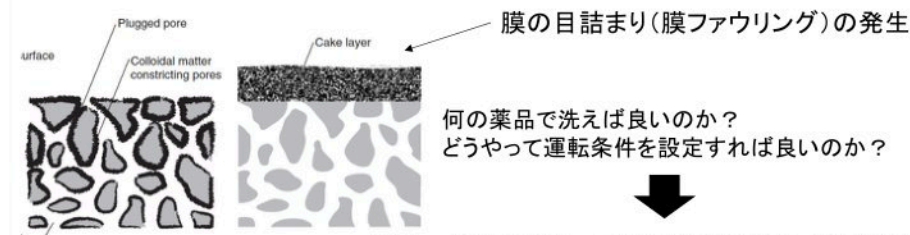
実際の現状は・・・



- ◎ 簡単に精密な固液分離はできる
- △ 導入にかかるコストは、砂ろ過よりもやや高い
- × 表流水系での自動化運転は、パイロット試験による最適化が必要

本来の膜ろ過のメリットを取り戻すために

10



何の薬品で洗えば良いのか？
どうやって運転条件を設定すれば良いのか？

誰も、自身を持って運転出来ないのが現状

膜ろ過の“強み”が全く生かされていない！！！！

STRATEGY 膜ろ過の強みを最大化することで、従来法(砂ろ過)と“明確な”差別化を図る必要があると考える

- ① 除去性能 砂ろ過では除去出来ない(しにくい)成分を膜では除去できる
- ② 操作性 自信を持って膜ろ過を操作でき、さらには人の判断が不要となる

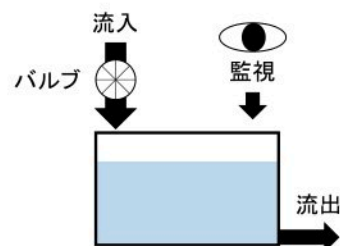
これが、膜ろ過の“価値”であり、高いB/Cを達成に貢献する技術として認識される

自律制御

11

制御に必要となるシステム

こぼれないように水を入れ続けるシステムを制御



水位が一定の値に達した時 ⇒ バルブを閉じる
水位が減ってきた時 ⇒ バルブを開ける

制御に必要な要素は・・・ 監視(センサー)とバルブ

膜の制御の場合・・・

薬品洗浄

- ・ 経済的に最適なFluxと物理洗浄条件を設定し、
- ・ 膜が閉塞したら適切な化学薬品で洗浄し、
- ・ 膜が損傷したら運転を停止する

圧力がある値に達した時 ⇒ 洗浄する

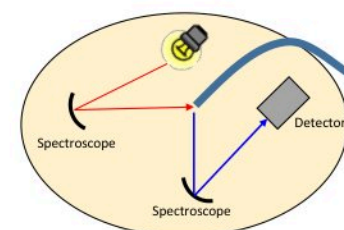
「膜目詰まり」を圧力でしか判断できないため、目詰まりのおおよその「量」は分かっても、「質」が分からないため、適切な命令が出せない！
(制御に必要な情報量の不足)

固体-3D Excitation Emission Matrix

12

液体セルから光ファイバーに変更することで、固体表面のEEMも測定可能になる

光ファイバーによる分析
Light source

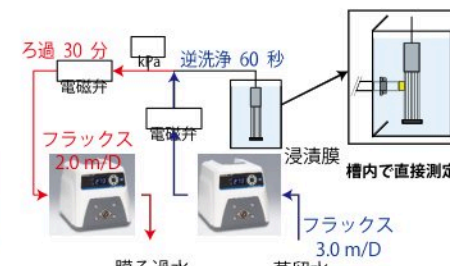
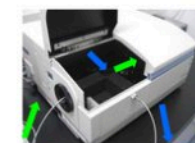


膜表面に蓄積した膜ファウリング物質のEEMを抽出することなく分析できないか？

Excitation
Emission
Solid samples

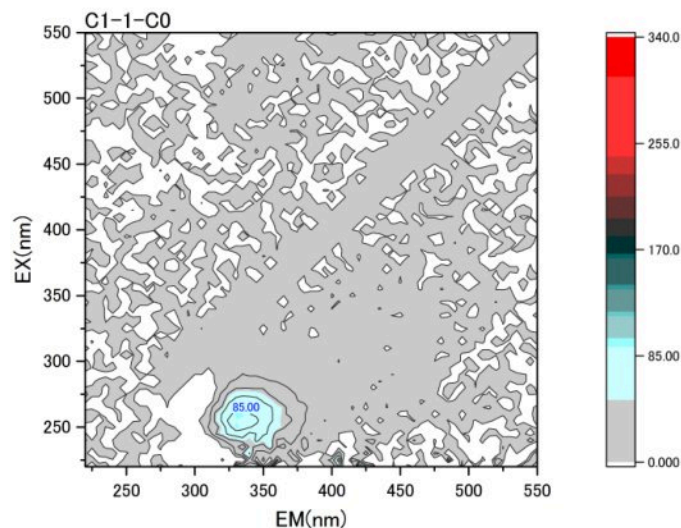
Advantages

- ・ 化学薬品による抽出プロセスが不要となる
- ・ 薬品では抽出できない成分も分析可能となる
- ・ 薬品浸漬に伴う膜へのダメージもなくなる



膜閉塞物質の変化

13

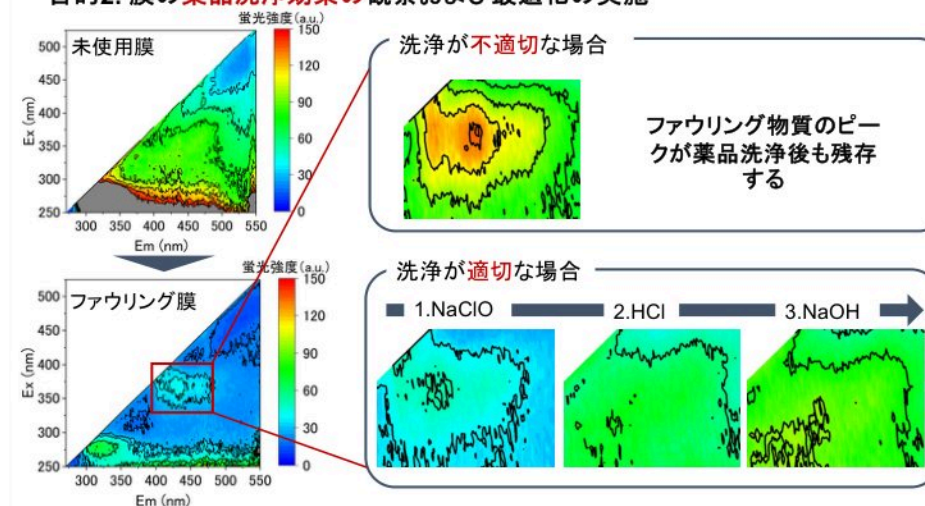


Water Research, 164, 2019

薬品洗浄効果の評価

14

目的2. 膜の薬品洗浄効果の観察および最適化の実施



適切な薬品洗浄により
ファウリング物質のピークが検出されなくなる事を確認

Qing Ding, Kosuke Ochiai, Hiroshi Yamamura, Journal of membrane science and technology (2020).

Real-time制御の今後の展望

15



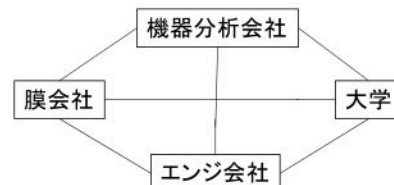
将来的なセンシング制御に向けて

ケーシングモジュールでは、
膜面のモニタリングが出来るような観察孔が必要

ケーシングモジュール(メス)とモニタリングツール(オス)の規格
+
自動運転支援システム(AI)
+
高性能な膜と分析装置

↓ 小型化(POU向け?)

個別技術ではなく、パッケージとして提供することが重要
(iphoneみたいなもの)



(携帯電話の中身を知らなくても、電話は出来る、という考え)

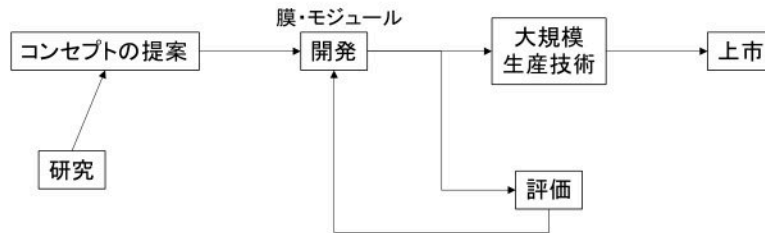
(コア技術3) 膜設計・生産の4次元化

1. 浄水効果の見える化
2. 要望・水源に合わせた豊富なラインナップ
3. 単純明快な使い方
4. いつでも、どこでも同一値段で手に入る流通網
5. 最新の情報・技術がバージョンアップサービスとして継続的に提供されること

膜会社の現状

17

材質、膜の種類、グレードを**限定**する方向へ



- 大規模生産での多品種の生産によって、コストup
- 開発 — 評価 で上市までが長期化し、開発までに人・モノ・カネがかかる

膜会社は、**社会の要求**に応えられるか？

新スキームの利点

19

- ① 輸送の削減
- ② 在庫量の削減
- ③ アップデートをすぐに提供できる
- ④ モジュール・膜の一体構造化
- ⑤ 設計の試行錯誤が早い
- ⑥ ユーザーの試行錯誤も早い
- ⑦ ユーザー中心の用途開発ができる
- ⑧ 市場との距離感がなくなる(アフリカでも宇宙でも！)

<<ユーザー中心社会を見据えた膜設計・生産技術の4次元化>>

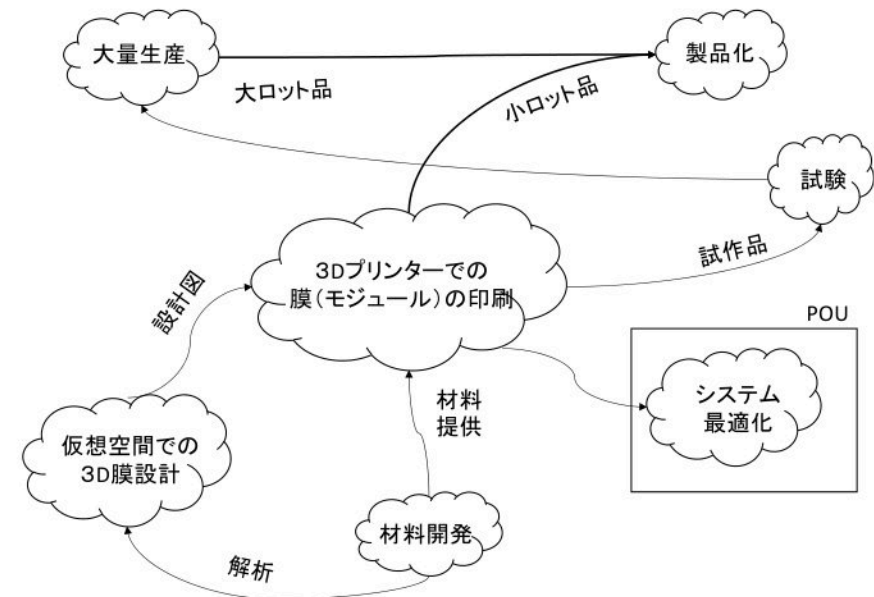
- 仮想空間での物理的耐久性評価技術の確立
- 3Dプリンターによる製膜技術と材料開発
- 3次元設計を取り入れた膜の高機能化
- 自律型 膜ろ過運転システムの開発

だれでも、どこでも手に入る 自分だけの膜

Membrane Based Revolution 3.0 !

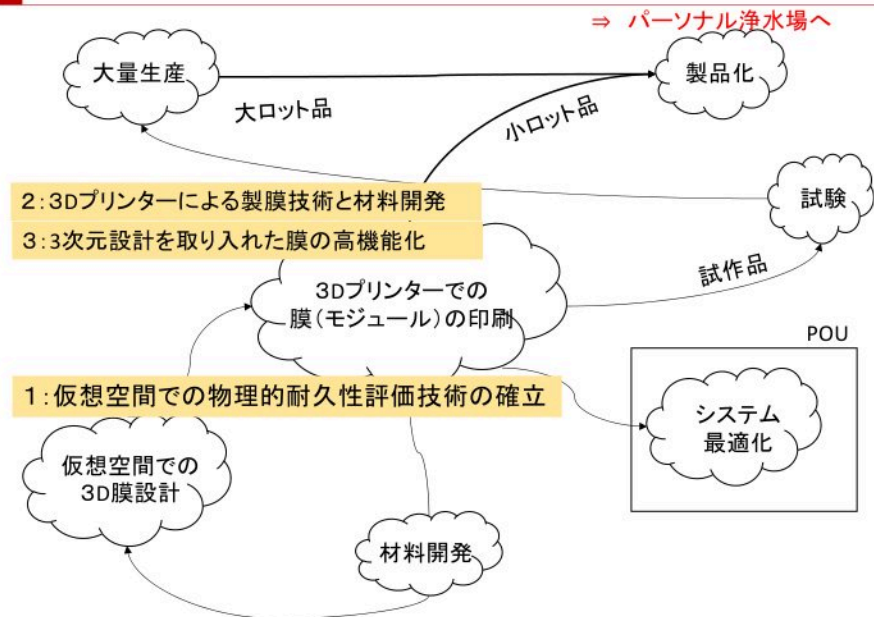
新しい膜生産のスキーム 1

18



新しい膜生産のスキーム 1

20



1. 仮想引張試験の実施

21

多孔質膜の機械特性の予測

骨格の母材が高分子材料であり、また多孔質なため変形しやすい

→ 材料の微視的および巨視的な変形や強度特性を解明することで、機械特性を予測



変形特性評価には有限要素法 (FEM) による数値解析が有効だが！

・ポーラス材料は創製過程において構造が不均質で解析モデルの作成が困難

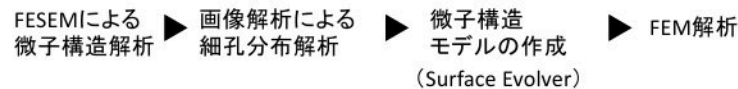
+

・計算コストが非常に高くなる

不均質な細孔構造を持つ高分子材料の変形挙動を数値解析できる

「有限要素モデルの作成および解析方法を提案」

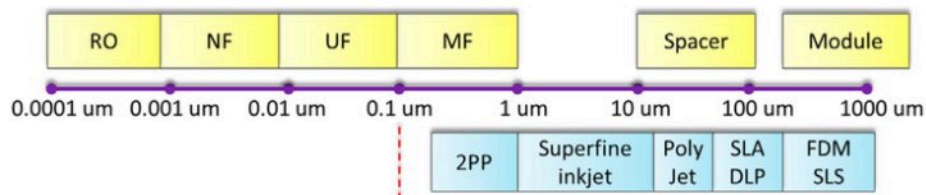
材料内部の微視的変化と巨視的な変形挙動の関係を明らかにする変形モデリングを構築した。



2. 造形方法

23

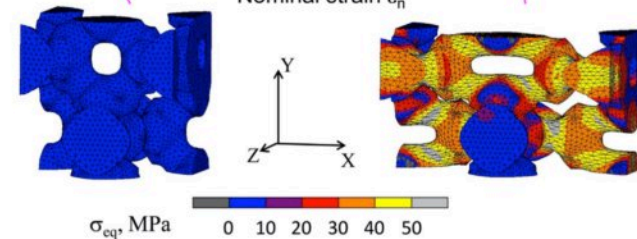
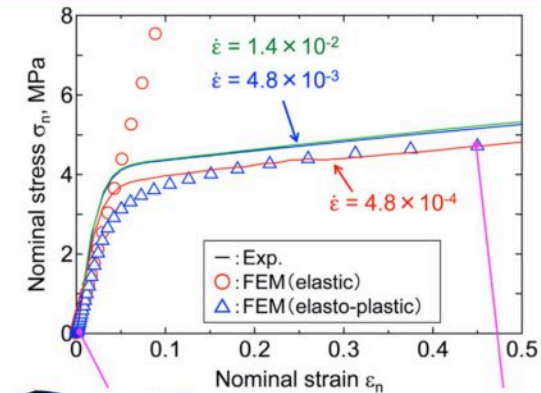
	メリット	デメリット
SLA	一般的で種類が豊富	解像度が低い
DLP	SLAより印刷速度が速い	解像度が低い
CLIP	印刷時間が短い	解像度が低い
TPP	解像度が高い	印刷に時間かかる 小さなサイズのみ
インクジェット		解像度が低い



膜の印刷に適した印刷方式がない → 光相分離技術の確立

1. 仮想引張試験の実施

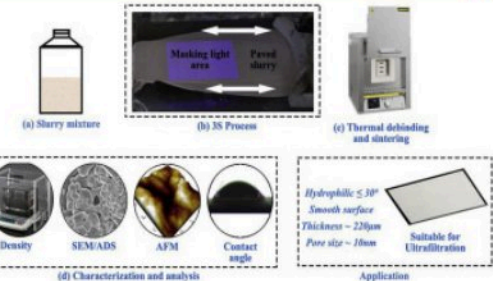
22



既往研究例 3Dプリンティング セラミック膜

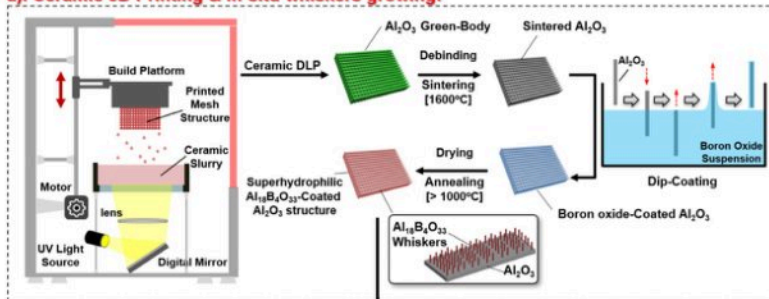
24

Solvent based Slurry Stereolithography 3D printed hydrophilic ceramic membrane for ultrafiltration application



3D-printed ceramic structures with in situ grown whiskers for effective oil/water separation

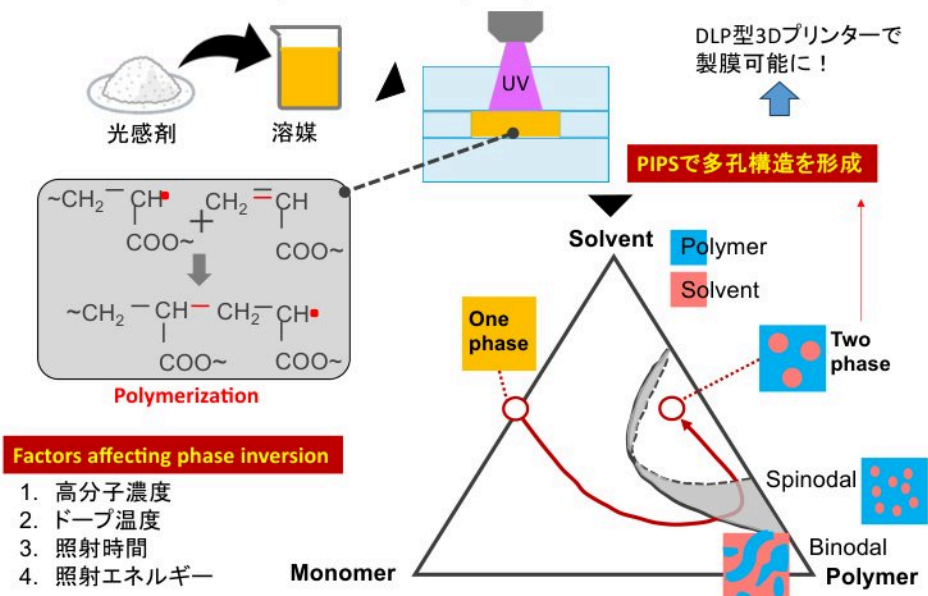
a). Ceramic 3D Printing & In-situ whiskers growing:



光誘起相分離法 (PIPS)

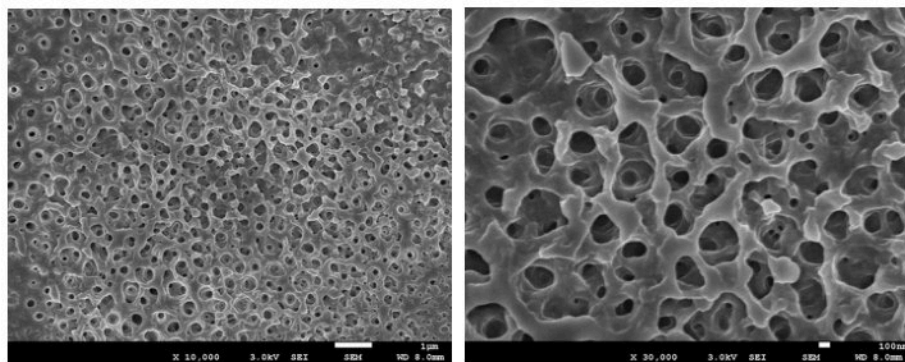
25

Photoreaction-induced phase inversion (PIPS)



MF膜の例

27

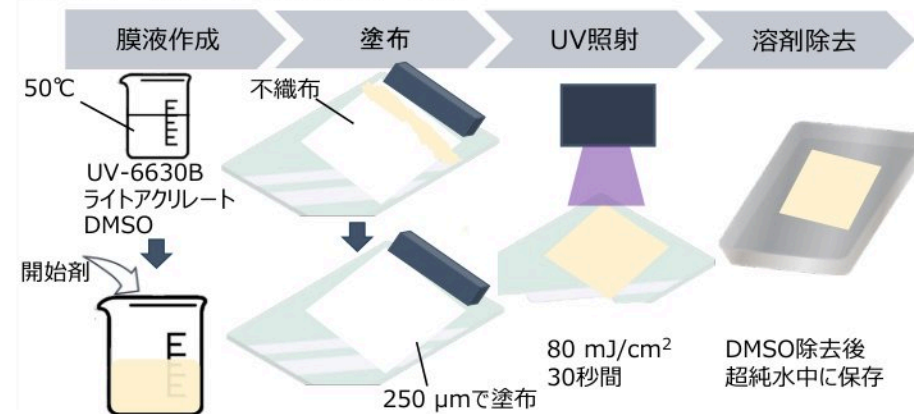


製膜手順 ウレタン材料の例

26

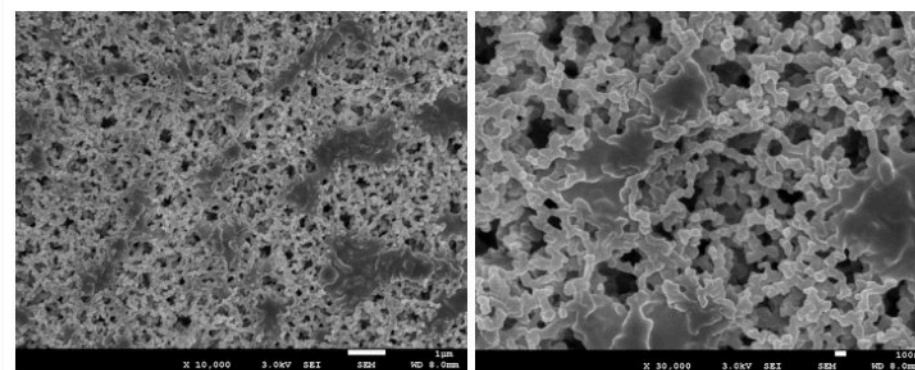
オリゴマー:モノマー (wt%)		(オリゴマー+モノマー):溶媒 (wt%)	
UV-6630B	ライトアクリレート 1,6HX-A	オリゴマー+モノマー	DMSO
80	20	30	70

※(オリゴマー+モノマー):重合開始剤 = 95:5



UF膜の例

28



UF膜の例

29

膜の断面構造と孔径

- ・均一な粒子が断面方向に均一構造を形成
→機械的強度、阻止率ともに高い膜が形成

20 nm銀粒子の排除率：99.9%

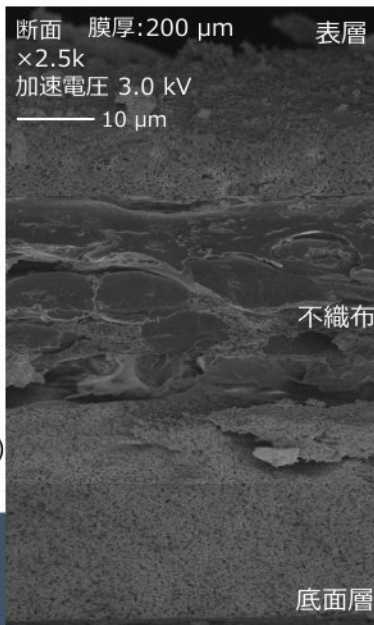
UF膜に相当

純水透水性 (LMH)

200 L/m²/h

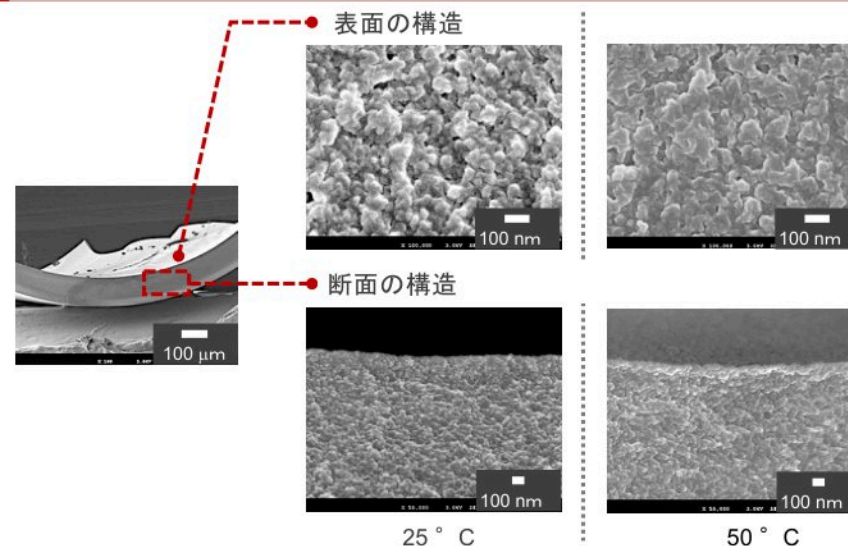
(市販品約1000 L/m²/h、膜厚：作製した膜の1/10)

- ・膜の排除径は8 nm程度
- ・市販のUF膜よりも高透水
- ・高い開孔率と断面均一性



NF膜の例

30



- ・ SEMで評価した膜細孔は、2 nm程度のNF膜

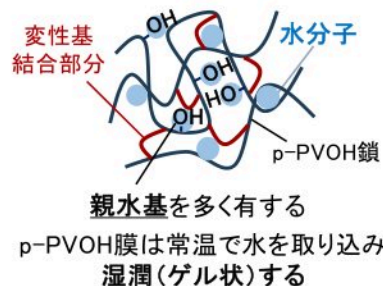
ガス分離膜の例

31

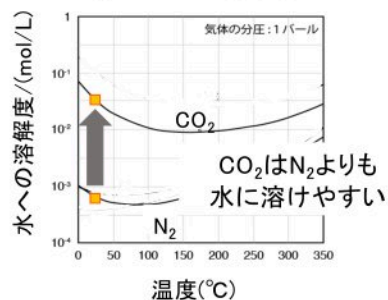
研究目的

膜形成能力が高いp-PVOHを用いた
CO₂/N₂分離膜の開発

p-PVOH膜構造



CO₂の水への溶解性



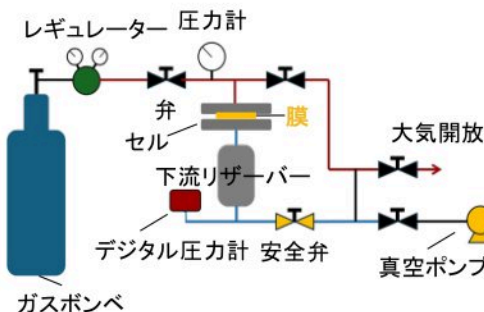
仮説

得られたp-PVOH膜を湿潤させ、取り込んだ水分における
CO₂とN₂の溶解度の違いからCO₂を選択的に透過させられるのではないか？

方法 - 気体透過性・CO₂選択性評価 -

32

CO₂透過性・選択性評価方法 → 定容積 / 可変圧力法



気体透過係数

$$P = \frac{V \times L \times T_0}{A \times P_f \times P_0 \times T_1} \frac{dp}{dt}$$

(10⁻¹⁰cm³ (STP)cm cm⁻² s⁻¹ cmHg⁻¹)

P_f : 上流圧力 (cmHg) P_0 : 76 (cmHg)
 T_1 : 動作温度(K) T_0 : 273.15(K)
 L : 膜厚(cm) A : 有効膜面積 (cm²)
 V : 下流リザーバー容積 (cm³)
 dp/dt : 下流圧力対時間の傾き (cmHg/s)

項目	
気体透過体積: V (cm ³)	69.1
有効膜面積: A (cm ²)	12
膜厚: L (cm)	0.025
定常圧力: P ₀ (cmHg)	76
一般圧力: P _f (cmHg)	300
定常温度: T ₀ (K)	273.15
温度: T (K)	298.15

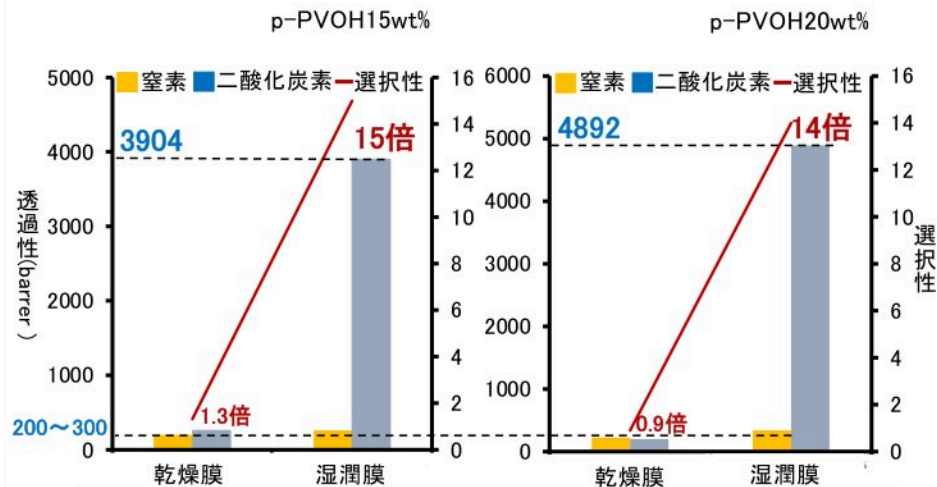
CO₂選択性

$$\alpha_{ij} = \frac{P_i}{P_j} \begin{cases} P_i: \text{CO}_2 \text{透過係数} \\ P_j: \text{N}_2 \text{透過係数} \end{cases}$$

※ 単体ガスを使用した

結果 - 湿潤膜と乾燥膜比較 -

33



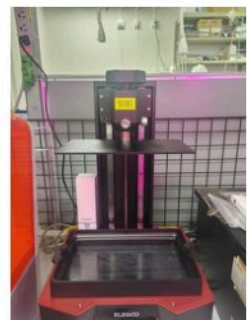
仮説

p-PVOH膜を湿潤させ、取り込んだ水分におけるCO₂とN₂の溶解度の違いからCO₂を選択的に透過させられるのではないかと

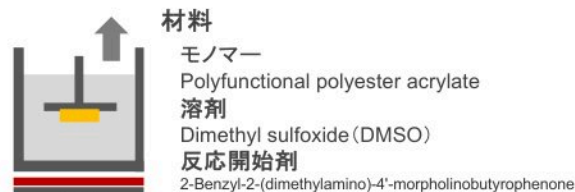
立証 → 二酸化炭素が優先的に透過し、選択性が向上した³³

3Dプリンターによる積層膜の製造

35



ELEGOO SATURN2

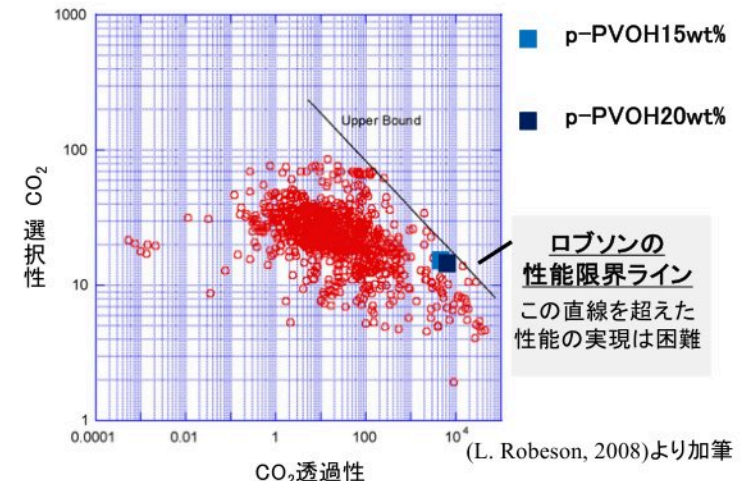


照射条件

モノマー濃度 (wt%)	15
照射エネルギー (mJ/cm ²)	2000
照射時間 (s)	10
温度 (°C)	Room temperature
層厚 (μm)	100
層数	4
波長 (nm)	405

結果 - 他膜と比較 -

34

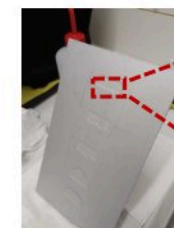


湿潤膜はロブソンラインに近づき、他膜と比較しても性能は認められる

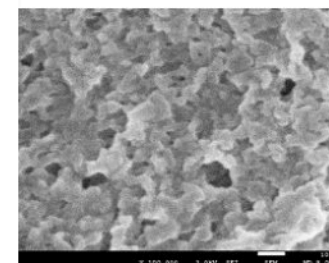
34

3Dプリンターで印刷した膜の構造

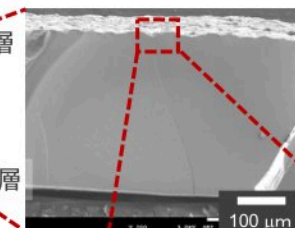
36



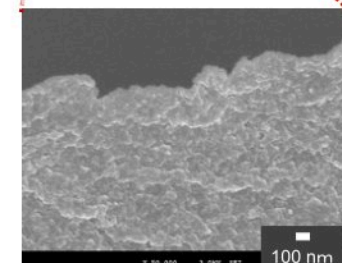
表面の形状



100 nm



断面の形状



300 μm

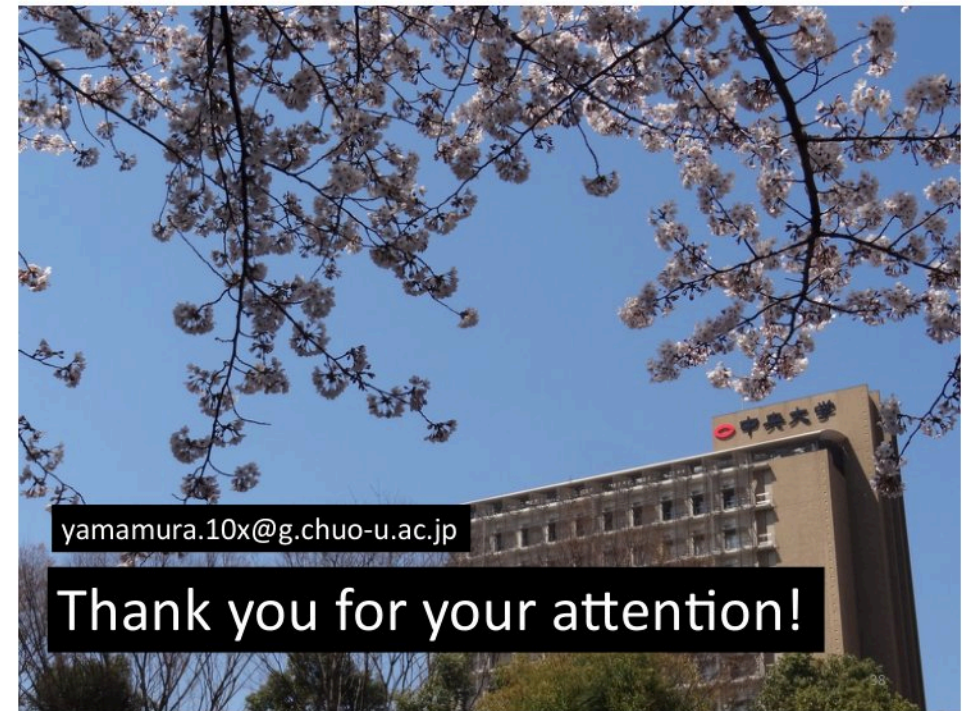
100 nm

3DプリンターとPIPSIによる多孔形成技術を組み合わせることで、様々な膜を製造できる可能性が示された

見える化 × 自律化 × オンデマンド製膜による次世代分散型水・資源循環:



分散技術の中心を担う膜について、「製膜の分散化」を進めて、新しい社会の実現に向けてチャレンジしたい



yamamura.10x@g.chuo-u.ac.jp

Thank you for your attention!