

低濃度のりん除去または 高純度のリン酸回収を可能にする 多孔質構造を有するりん吸着膜

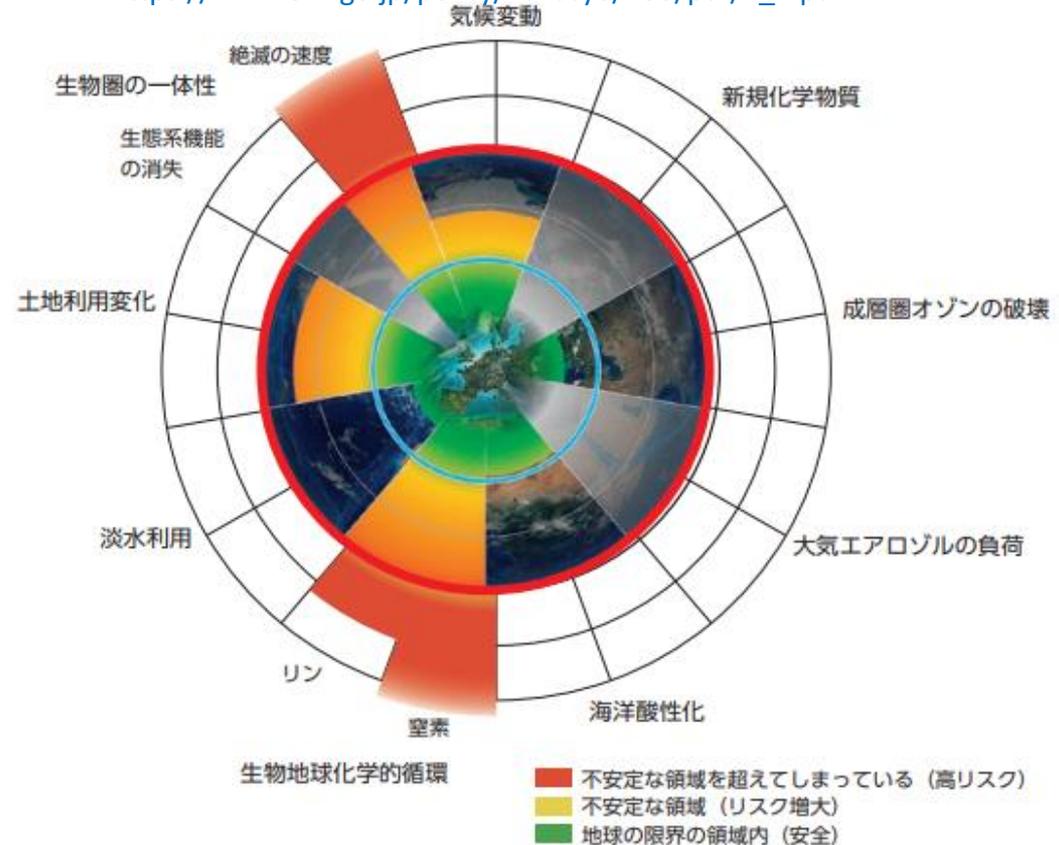
中央大学 工学部 人間総合理工学科
教授 山村寛

2021. 08. 31

- リンは人間が生きていく上で欠かせない物質で、工業的にも様々な分野で使用されている物質。
- しかし、商業的にリン鉱石を産出できる国はわずか20か国で、約90%の国はリン鉱石を輸入している。
- 右図はJ.Rockströmらが提示した地球のプラネタリー・バウンダリー（地球の収容限界）。リンは地球に不可逆な変化が起こる収容限界を超えていると警鐘を鳴らした。
- 世界では公品位のリン鉱石の枯渇が進行
- 日本は世界でも有数のリン消費国

参考：大竹久夫 著：リンのはなし,朝倉書店, 2019.

引用：環境省HP「プラネタリー・バウンダリー」
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h30/pdf/1_1.pdf



- リンの再利用は、リンの持続的な利用 + 富栄養化といった環境汚染防止
- 日本では下水処理場に流れ込むリン量 > リン鉱石として輸入するリン量



【1】 下水汚泥中の高濃度リンの**除去**

- ・ 汚泥中のリンの再溶出による配管閉塞や、脱水ろ液による水処理負荷の増加といった問題の解決
- ・ リンを含む処理水の放流による、湖沼での富栄養化の防止

【2】 吸着したリンの**回収**および**再利用**

- ・ 必要不可欠かつ非常に限られた資源であるリンの安定的で長期的な確保

晶析法：リンを結晶化して分離する方法



ストラバイト
($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)



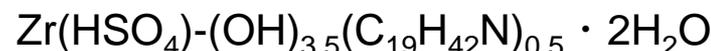
ヒドロキシアパタイト
($\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$)

- ⊖ 脱水設備等でのスケール発生
- ⊖ 薬品添加量や温度、pHの調整が煩雑

吸着法：リンを選択的に吸着する物質を用いてリンを除去する方法



Ex) 硫酸ジルコニウム-
界面活性剤
ミセルメソ構造体 (ZS)



Pitakteeratham et al, 2013, Water Research

- ⊖ 樹脂吸着カラムが閉塞するため
高濁質な水は前処理が必要
- ⊖ 樹脂の再生工程が煩雑



下水汚泥中のリン回収率 = わずか16%

参考：大竹久夫 著：リンのはなし, 朝倉書店, 2019

研究目的

多孔質の水酸化ジルコニウムを膜に包含し
簡潔かつ高度に消化汚泥や工業廃水から
リンを除去・回収できる技術の開発

水酸化ジルコニウム包含PEシート（40wt%）を用いて高濃度のリン酸水溶液をろ過し、リン吸着性能および回収性能を評価

方法

- リン吸着材 = 水酸化ジルコニウム包含PEシート
(素材：ポリエチレン (PE))
(有効面積10.9 cm², 厚さ5 mm)
- 水酸化ジルコニウム含有量 40wt%

吸着試験

供給水 = リン酸水溶液(100mg-P/L, pH 7, 25°C)

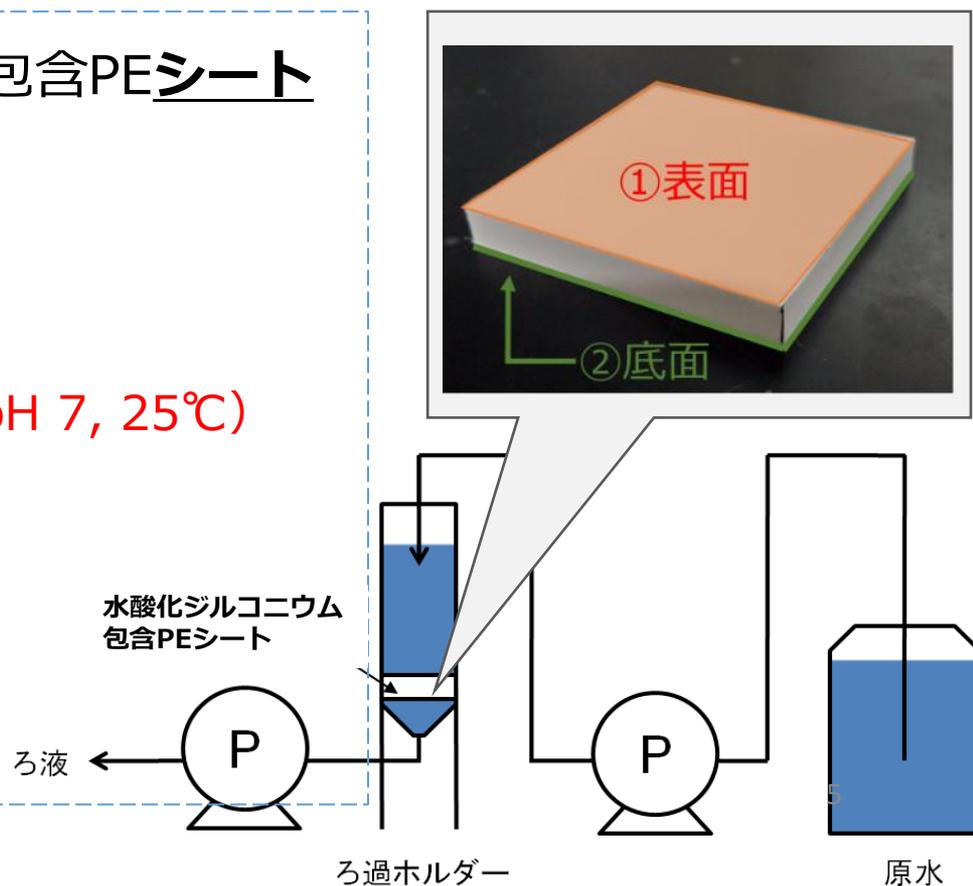
ろ過速度 = 1 m/d で全量ろ過

(0.8 mL/min/10.9cm²)

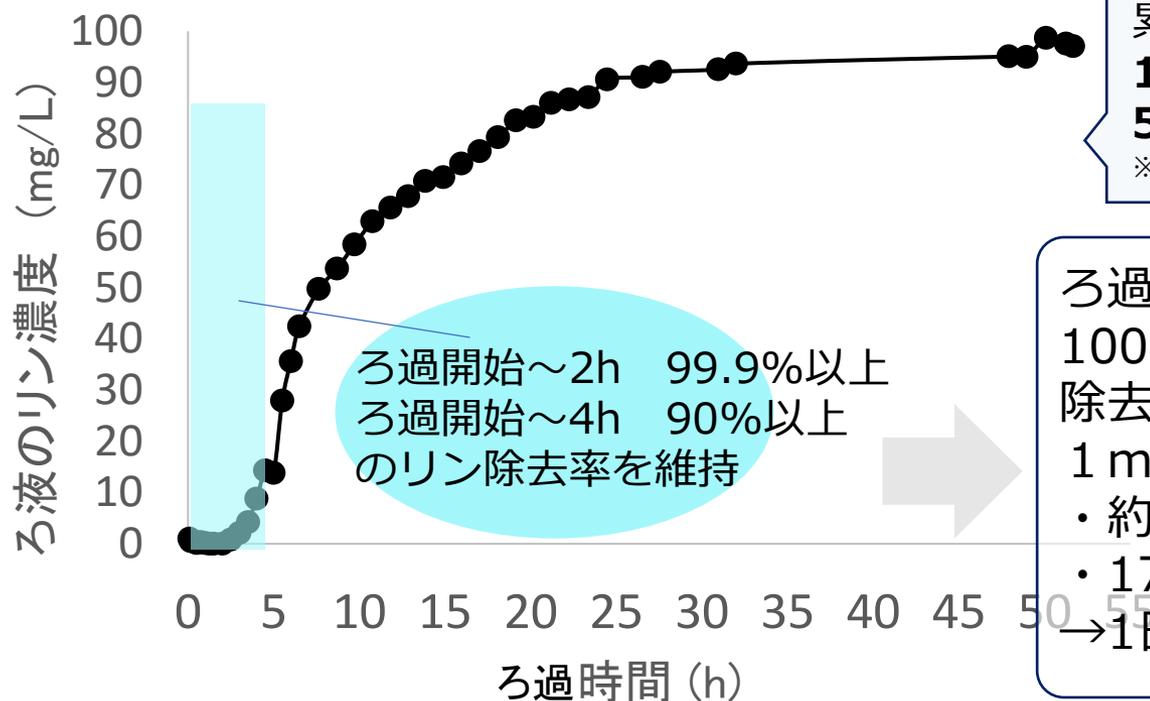
脱着試験

供給水 = NaOH水溶液(0.1 M, pH 13)

ろ過速度 = 2.5 m/d で全量ろ過



本研究グループの実績と課題 =リン除去性能の評価=



累積吸着量
10.3 kg-P/m³
51.6 g-P/m²
※膜厚5mmの場合

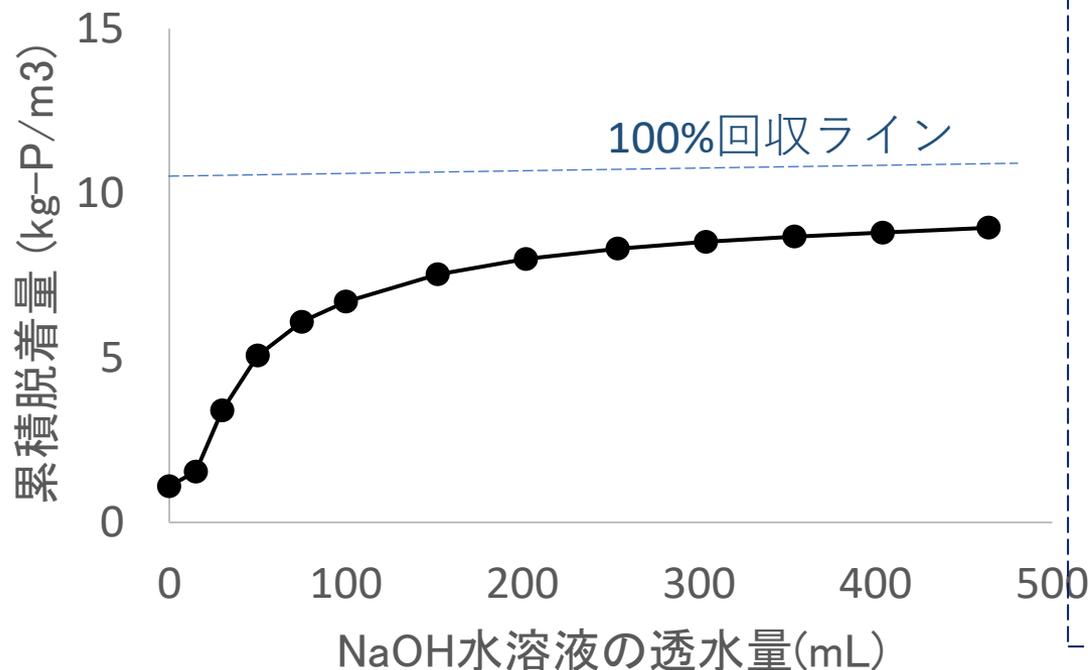
ろ過開始~2h 99.9%以上
ろ過開始~4h 90%以上
のリン除去率を維持

ろ過速度1 m/dで
100 mg-P/Lを含む供給水を
除去率>90%維持でろ過する場合
1 m²あたり
・約18 gのリン吸着
・176 Lの廃水処理が可能
→1日に1回程度の膜洗浄でOK

- ・ **初期段階のろ液のリン除去率 = 100%**
ろ過開始~2時間 リン除去率 > 99.9%
~4時間 リン回収率 > 90%
- ・ ろ過開始から50時間程度で吸着平衡
- ・ 吸着平衡時の累積リン吸着量は 10.3 (kg-P/m³)

高濃度のリン酸水溶液に対して非常に高いリン除去性能を発揮

本研究グループの実績と課題 =リン回収性能の評価=



- NaOH水溶液のろ過により、シートに吸着した
約90%のリンの回収に成功
100mL(92L/m²)≒65%
200mL(184L/m²)≒80%
360mL(330L/m²)≒85%
- 脱着後、同条件でろ過を行い同程度のリン吸着を示し、繰り返し使用できることが示された (データ未掲載)

容易な方法で高濃度のリン酸水溶液中のリンを吸着し、高い回収率を達成
繰り返し使用できる可能性

USEPAの排出規制では25 μ g-P/L、五大湖は5~10 μ g-P/L

**低濃度のリン (1 mg-P/L) を含む供給水からも
リンを完全に除去することは可能か？**



本研究グループの実績と課題 = 低濃度のリン酸水溶液ろ過の性能評価 =

水酸化ジルコニウム包含PEシート（40wt%）を用いて高濃度のリン酸水溶液をろ過し、リン吸着性能および回収性能を評価

方法

- ・リン吸着材 = 水酸化ジルコニウム包含PEシート
(基盤素材：ポリエチレン (PE)、有効面積10.9 cm², 厚さ5 mm)
- ・水酸化ジルコニウム含有量 40wt%

吸着試験

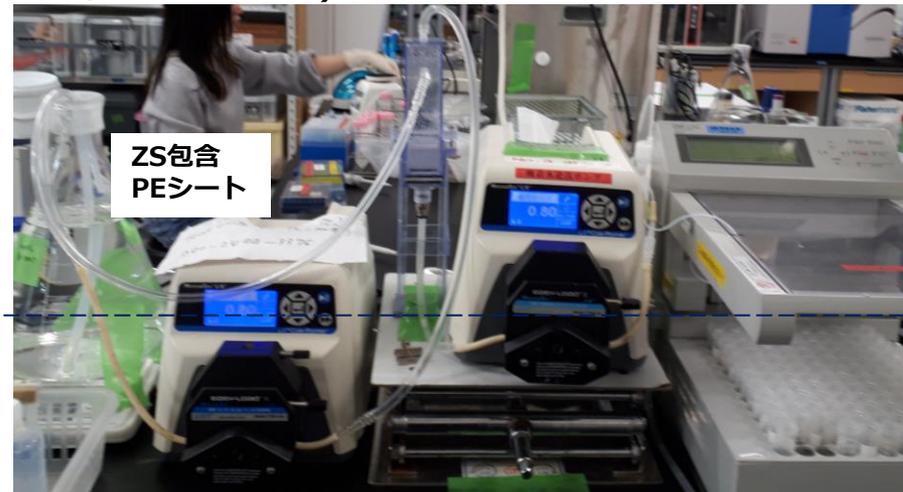
供給水 = リン酸水溶液(1mg-P/L, pH 7, 25°C)

ろ過速度 = 1 m/d で全量ろ過(0.8 mL/min/10.9cm²)

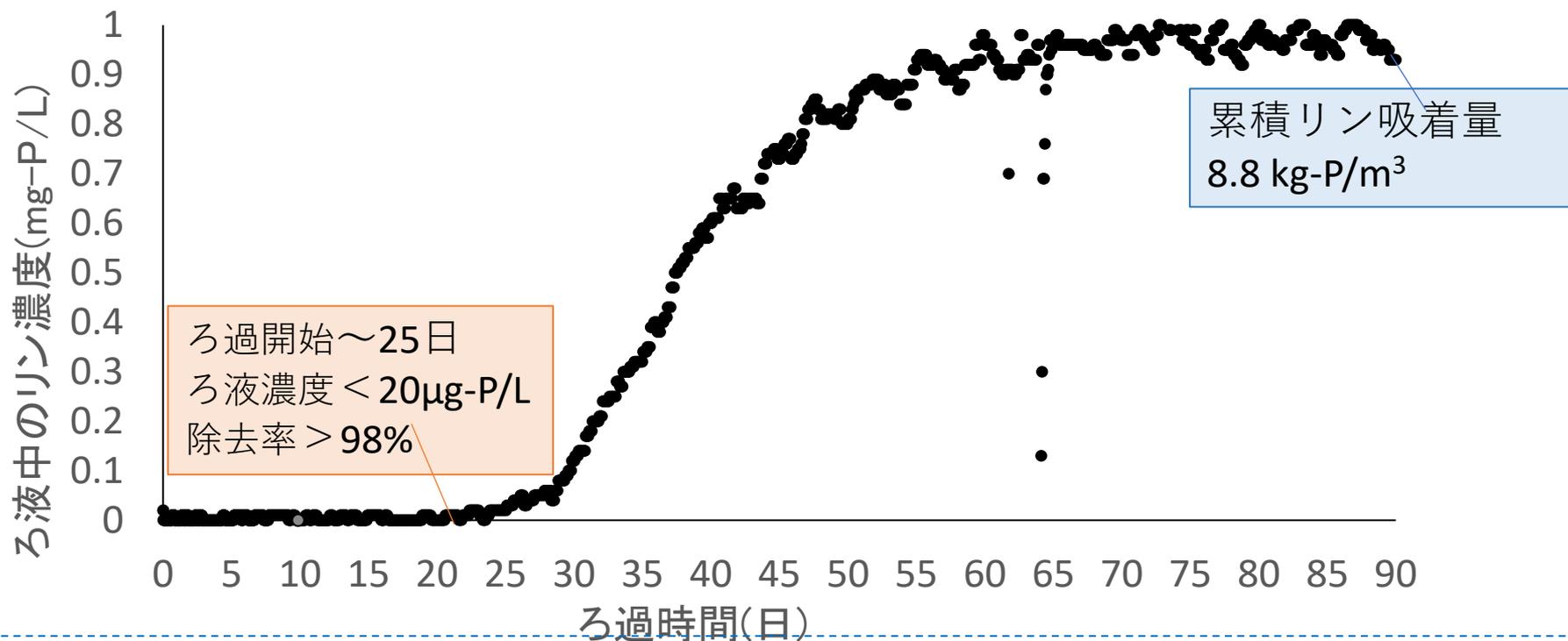
脱着試験

供給水 = NaOH水溶液(0.1 M, pH 13)

ろ過速度 = 2.5 m/d で全量ろ過

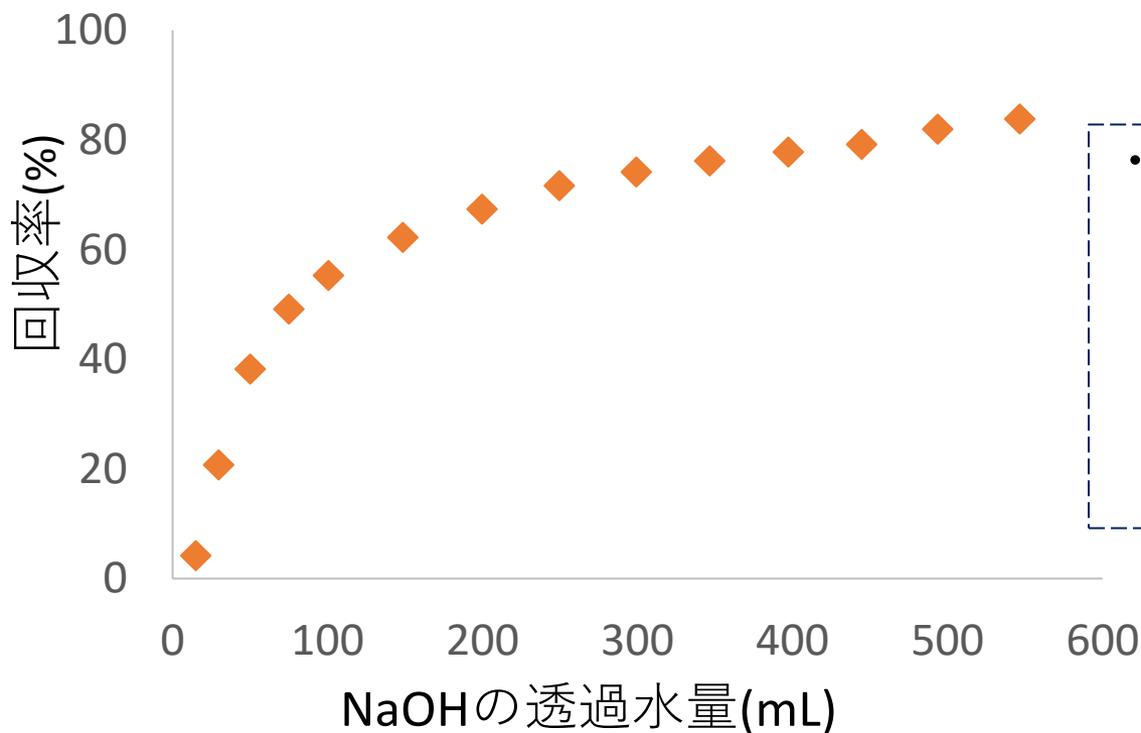


= 低濃度のリン酸水溶液ろ過によるリン除去性能 結果 =



- **長時間（3か月）連続運転でのリン吸着に成功**
ろ過開始～20日間、リン除去率は100%維持。
約1ヶ月後もろ液中のリン濃度は $60 \mu\text{g-P/L}$ （=リン除去率94%）
- 低濃度域でもろ過速度1 m/dで吸着可能
- 累積リン吸着量は、ろ過開始から35日間まで約150～210(g-P/m³/d)の割合で直線的に増加
- 吸着飽和は、ろ過日数 = 90日、累積吸着量 = 8.8 kg-P/m³
長期間運転中、ろ液中へのジルコニウム流出はなかった（ICP-OES測定）

本研究グループの実績と課題 =リン回収性能の評価=



- NaOH水溶液のろ過により、シートに吸着した80%以上のリンの回収に成功
 - 100mL(92L/m²)≒60%
 - 200mL(184L/m²)≒70%
 - 400mL(368L/m²)≒80%

本吸着材は、高濃度(100 mg/L) or 低濃度 (1mg/L) のリンを含むいずれの水溶液に対しても適用できると期待

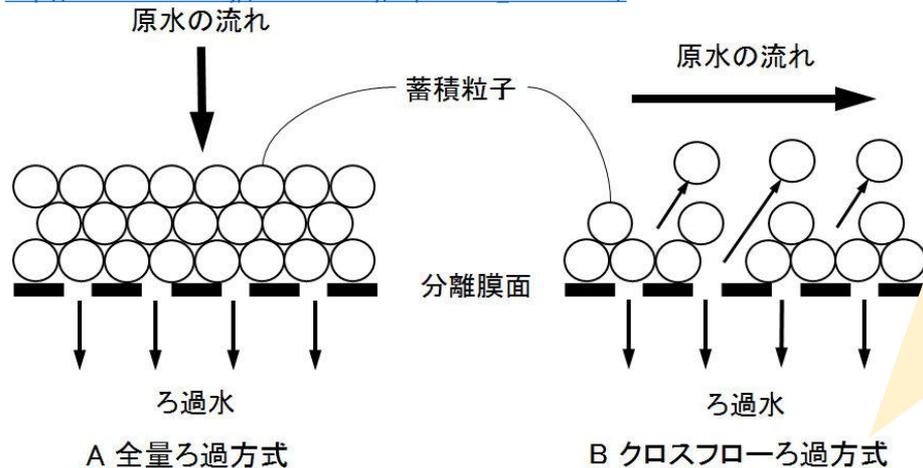
本膜は断面全体で吸着することから、
厚みのある膜を開発したい。
強度が高く、様々な薬品耐性のある膜を開発したい。



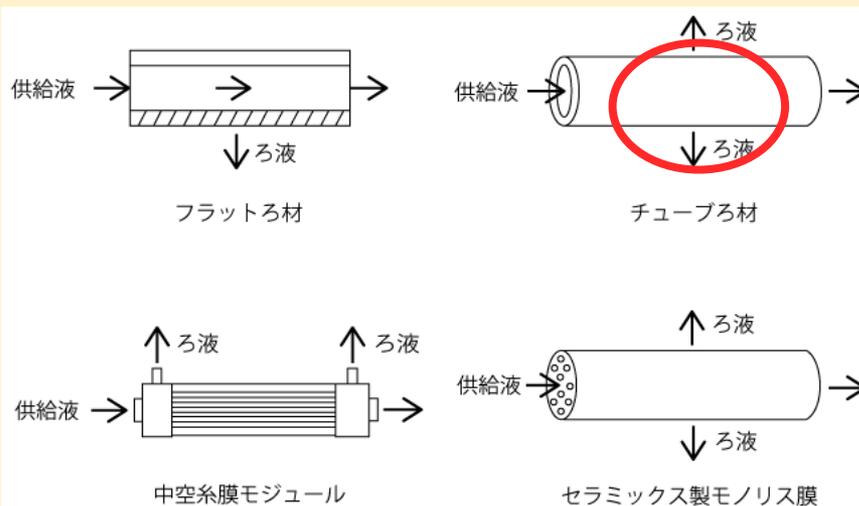
水処理におけるろ過方式

(1) ろ過方式

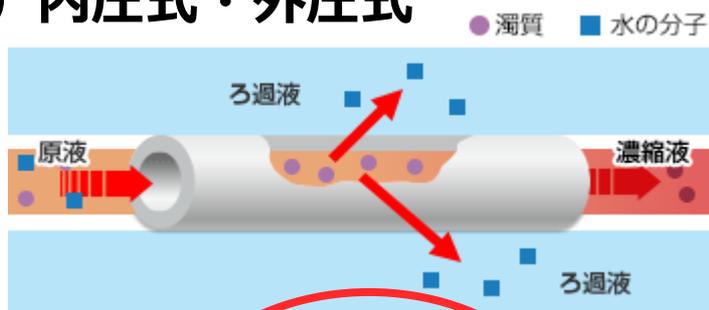
http://water-solutions.jp/commentary/separation_membrane/



<https://www.ipros.jp/technote/basic-filtration5/>

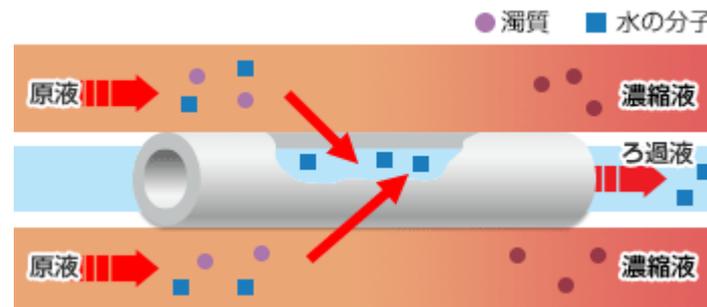


(2) 内圧式・外圧式



内圧ろ過方式

使用膜面の流速が速く、濁質が付着しにくいいため、粘性が高いorSS濃度が高いといった汚い液のろ過や濃縮精製に適している。

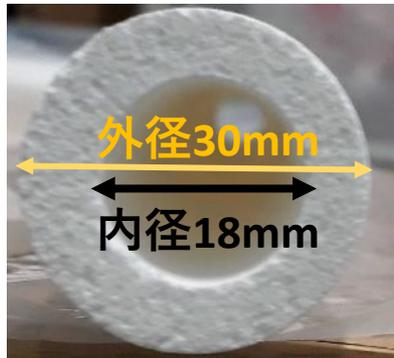


外圧ろ過方式

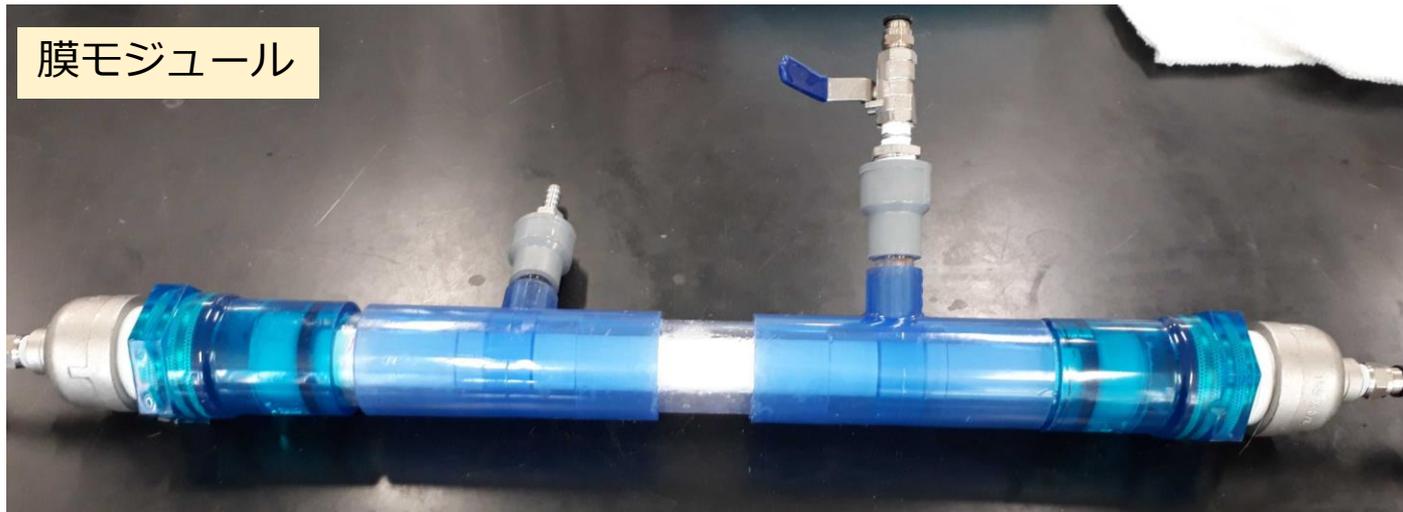
一次側膜面積が広く、単位膜面積あたりの負荷を軽減できる。エアバブリング等の物理洗浄ができるため、大量の水の除濁に適している。低線速なため、原液中のSS成分は膜面に堆積し、内部に入り込まない

= 水酸化ジルコニウム包含チューブラー膜の開発と評価 =

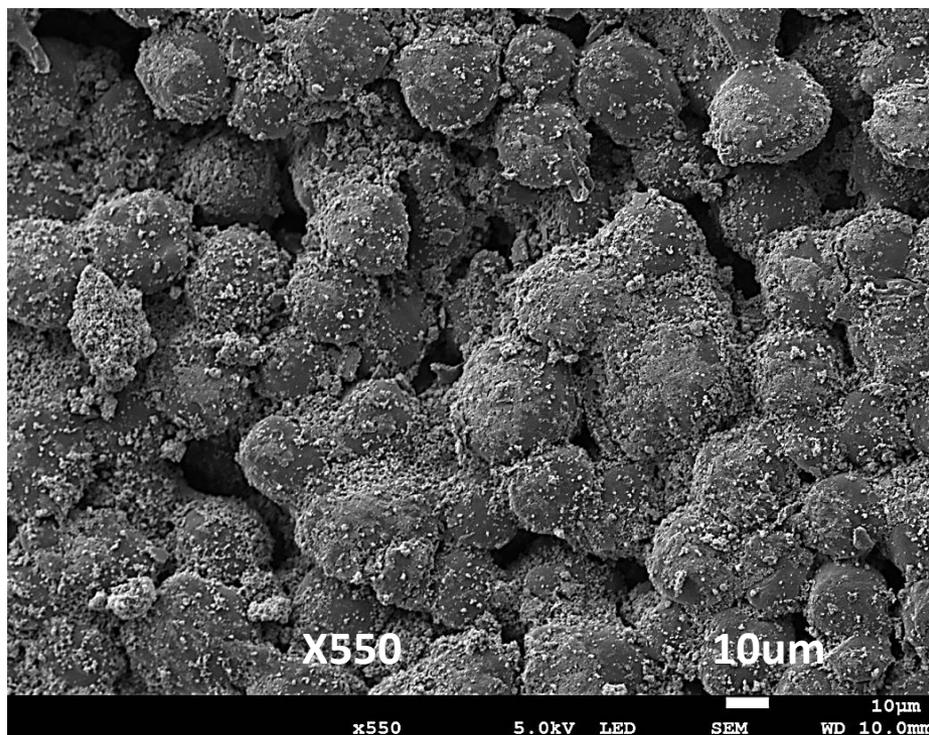
- 水酸化ジルコニウム（20wt%）を含むチューブラー膜を製作
- 塩ビ系素材を基盤としたモジュールを作成



膜モジュール

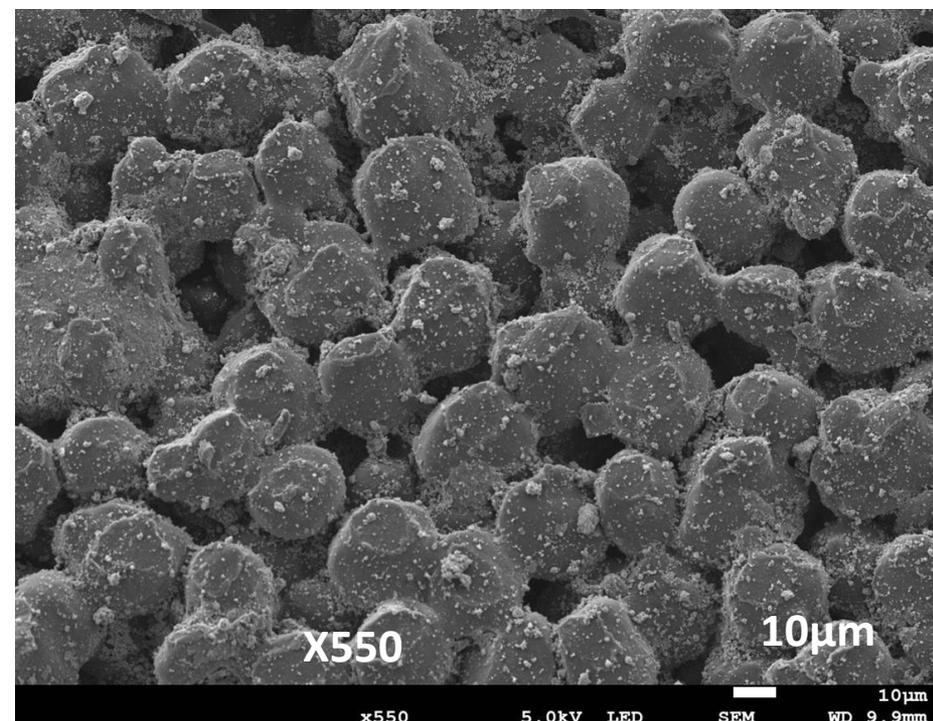


膜内面



空隙率：16.8% 平均孔径：0.47µm

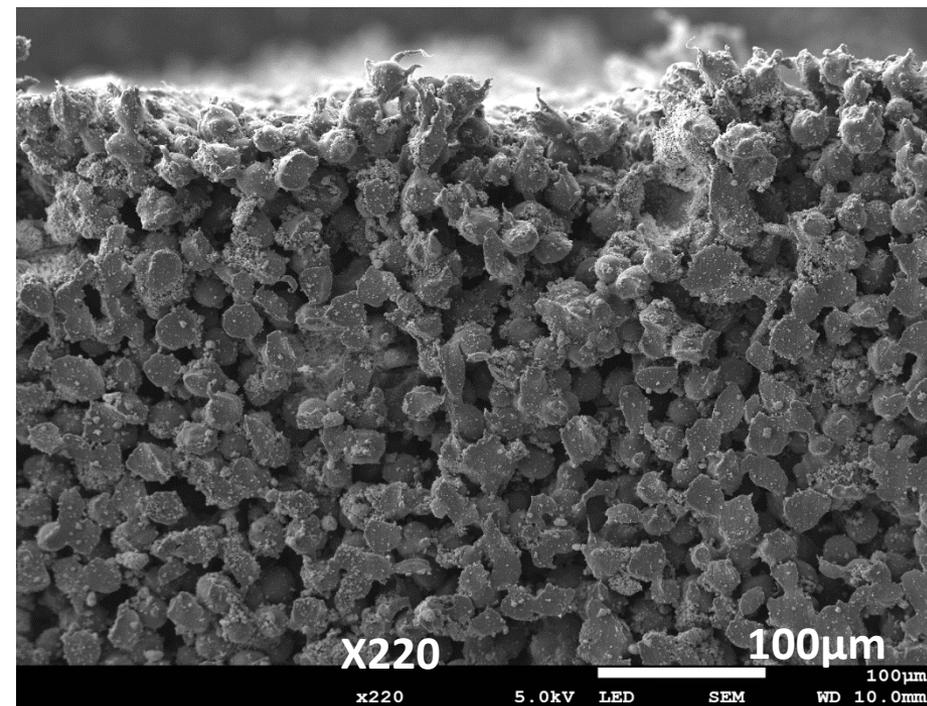
膜表面



空隙率：14.4% 平均孔径：0.53µm

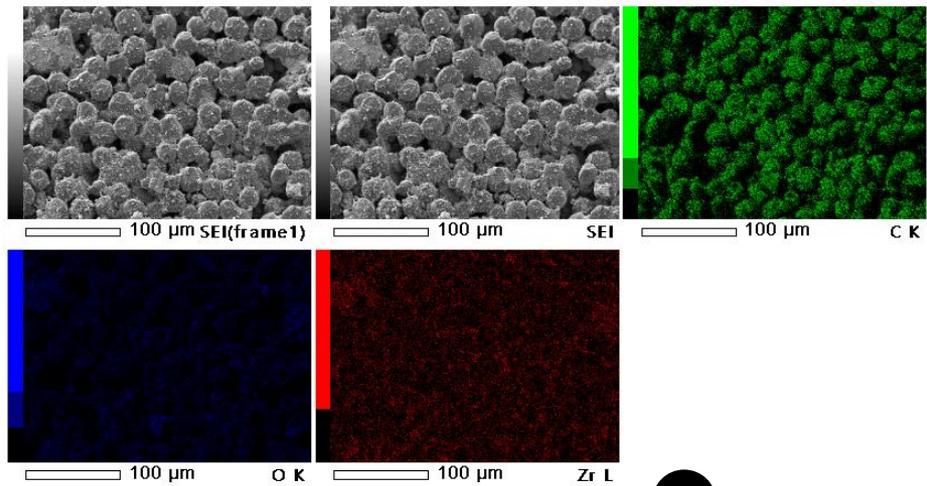
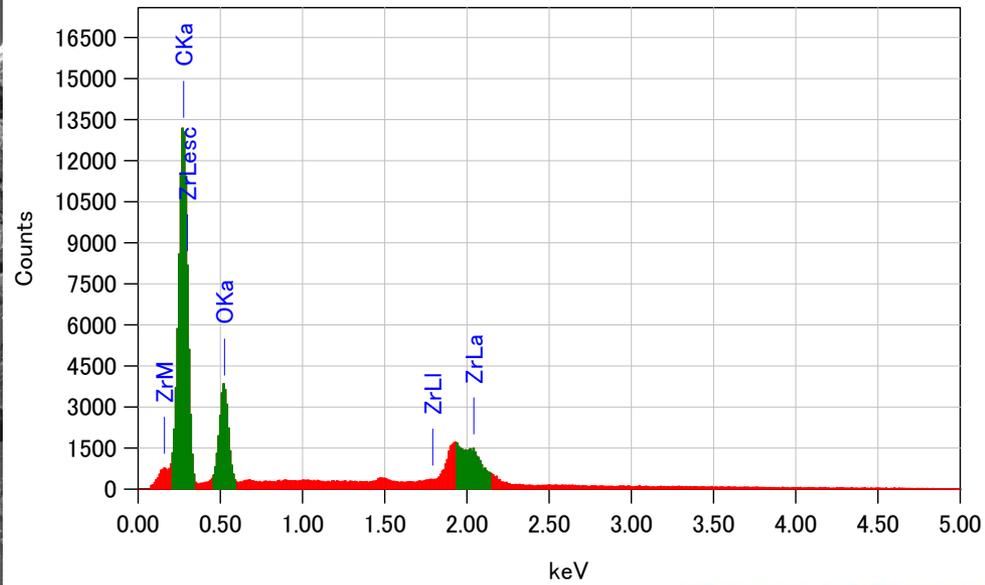
- 膜の内側（供給水側）および外側（ろ液側）の空隙率は15%程度、平均孔径は5µm程度であった
- 膜の内側から外側にかけて均一な孔径と空隙率を有していると考えられ、供給水はPEの隙間に存在するジルコニウムと接触しやすいと考えられる。（次頁、断面図）

膜断面



- 断面からも均一な形状のポリエチレンや孔の存在を確認
- 膜のEDX分析からもZrの存在を確認 (右下図はマッピング (Zr: 赤))

膜表面 EDX分析結果

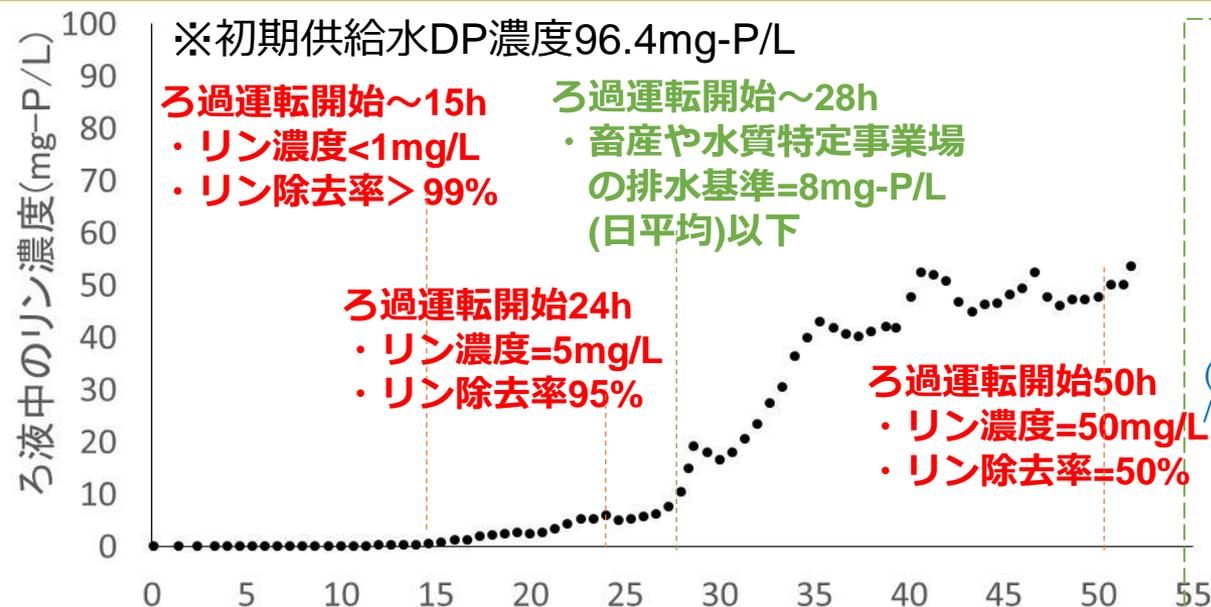


**高濃度リンを含む消化汚泥を用いても、
高い除去性能および回収性能を発揮できるか？**





供給水	消化汚泥を10倍希釈後 (TS 3.5g/L) リン酸を添加し、初期 DP≒100 mg-P/L、pH 7.0に調整
クロスフロー 線速	0.2 (m/s) (3.1 (L/min))
膜ろ過 フラックス	0.1 (m/d) フラックスが一定になるようTMPを調節
ろ液 採水頻度	リン濃度：40分に1度 DOC、TN濃度：2.5hに1度
薬洗 脱着	5000 mg/LのNaClO水溶液に24時間浸漬 0.1 mol/L(≒ph 13)のNaOH水溶液に24時間浸漬
分析項目	(1) 供給水およびろ液中の成分分析 <ul style="list-style-type: none"> • DP濃度 • アンモニア濃度 • DOC濃度 • 濁度 • 粒径分布 • 無機物分析(ICP) (2) ろ過中のTMP $TMP \text{ (kPa)} = \text{圧力1} - ((\text{圧力2} + \text{圧力3}) \div 2)$



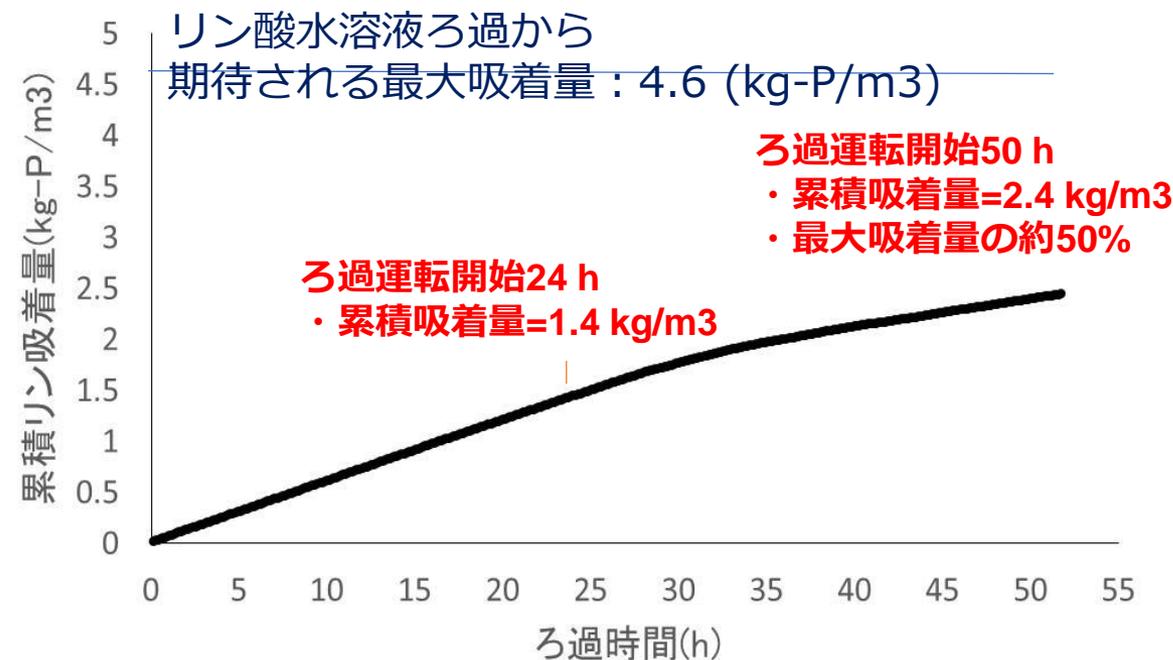
- ろ過開始から15時間、**非常に高いリン除去率(>99.9%)を安定して示した。**

- ろ過開始から28時間、畜産業や水質特定事業場の排水基準 (=8mg-P/L) 以下
(参考：農林水産省HP https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_info/02_haisui/)

- ろ過開始から30時間、リン濃度は急激に上昇し始め、除去率は80%程度になった。

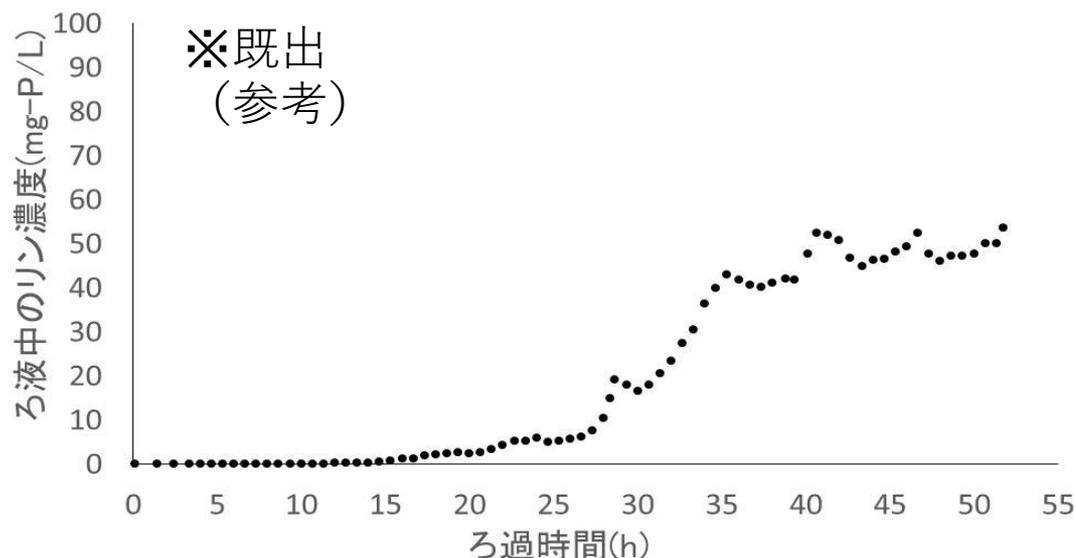
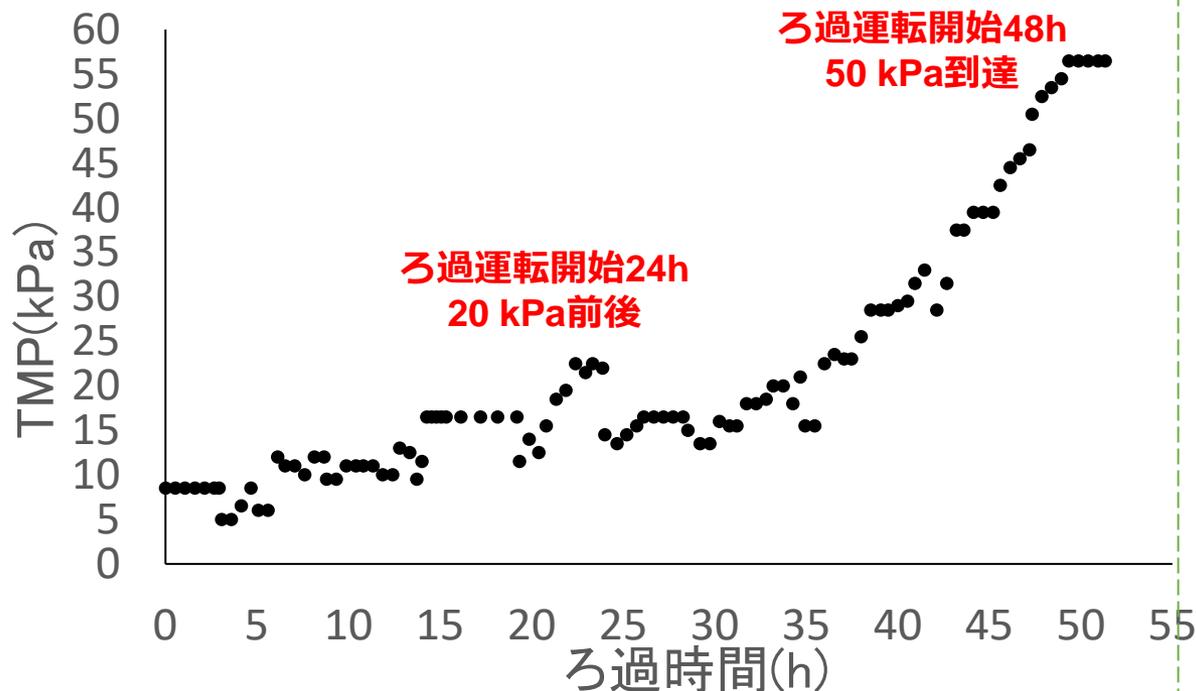
- ろ過開始から50時間、除去率は50%程度まで減少した。

- 累積吸着量は2.4 kg/m³で、リン酸水溶液ろ過結果から期待される最大吸着量の約50%



本膜は、汚泥のような

- ・有機物、無機物問わず様々な物質が含まれ
- ・高濁質&粘性の供給水からも、リンを吸着できることが示された

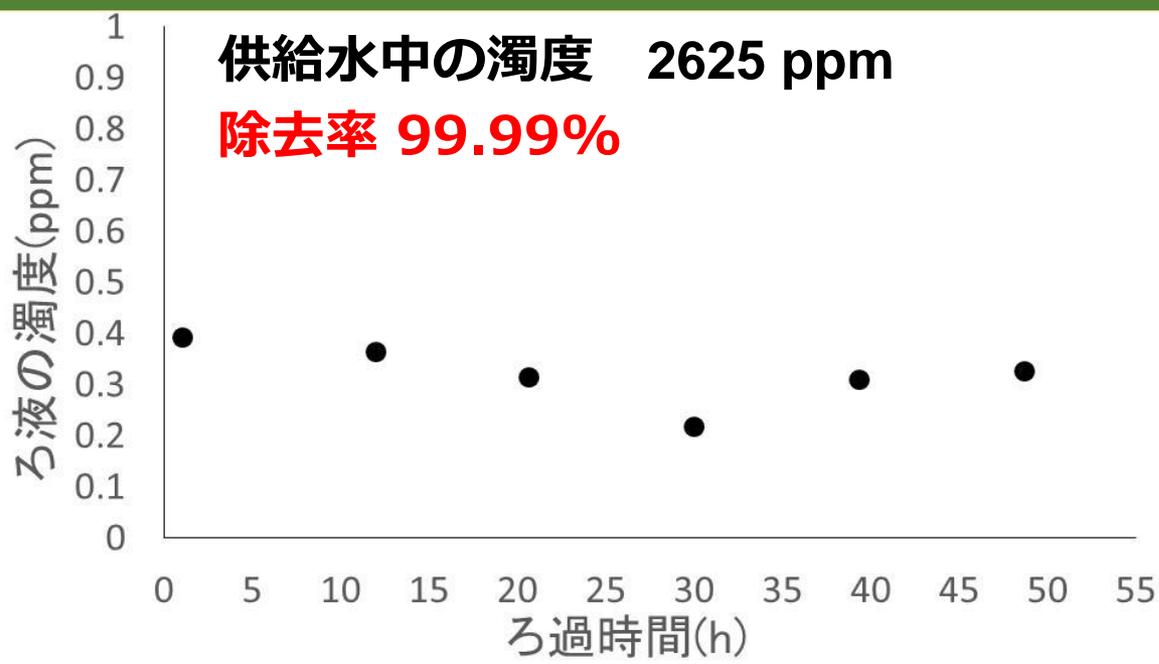


- 初期TMP=8.5kPaで安定
- ろ過開始~15h、リン除去率は99%以上で安定していたが、徐々に上昇した。
- 40wt%のろ過時と比較し、初期TMPは高いが、TMPの増加速度は同程度。
- ろ過開始20h以降、TMPは直線的に増加した。(約0.97kPa/h)
- ろ過開始24hで20 kPa、48hで50 kPaに到達した。

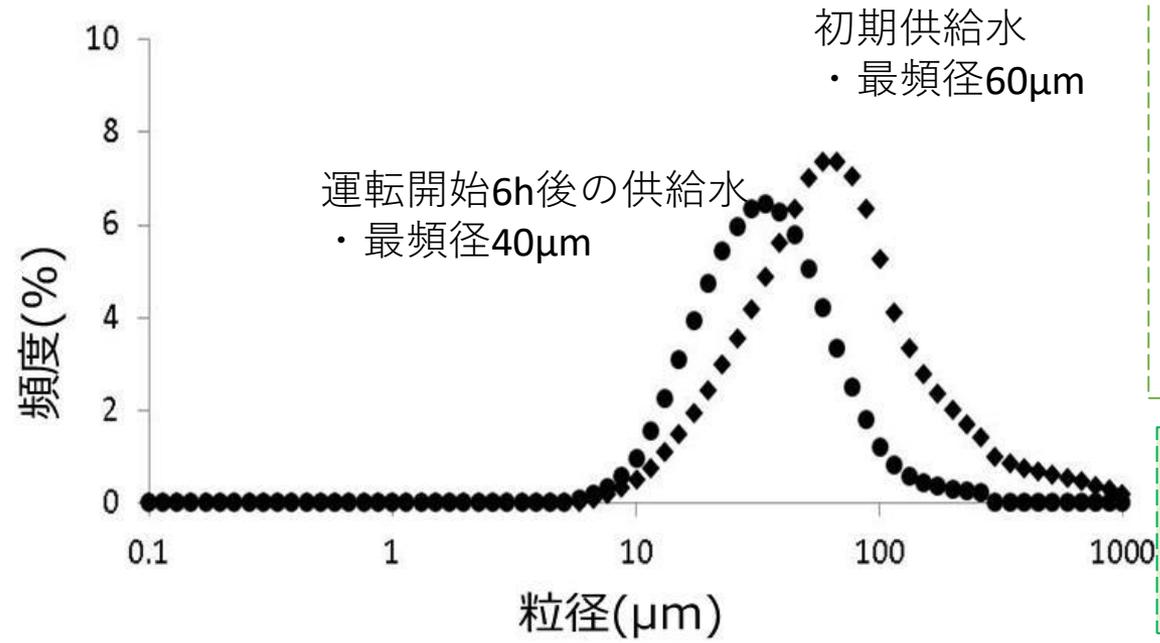
リン濃度とTMPの結果から24時間に1度程度、薬洗+脱着することで、95%以上のリン除去率維持&圧力が比較的小さな運転が期待される

供給水中の濁度 2625 ppm

除去率 99.99%

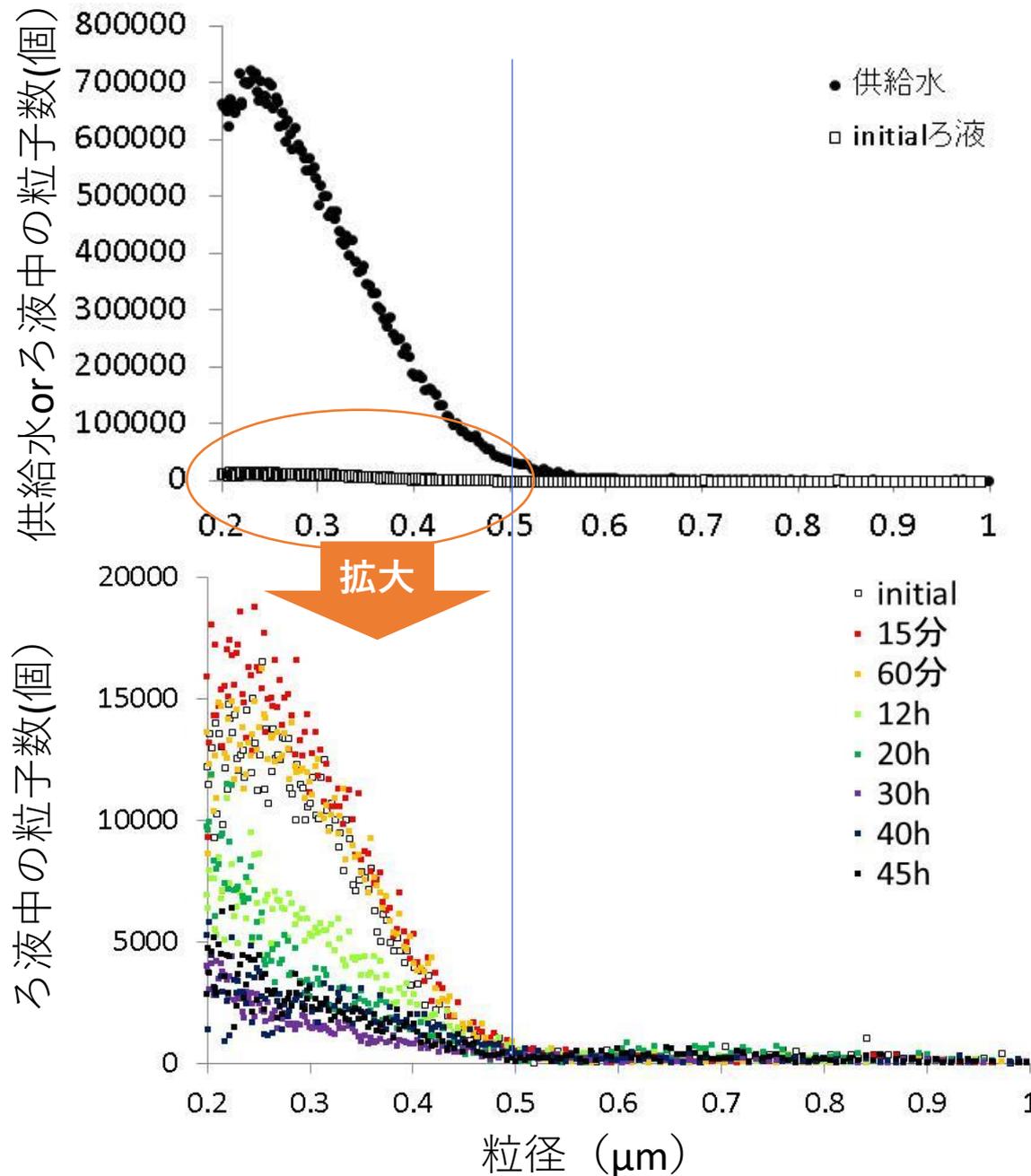


- 濁度はろ過開始から50時間、非常に小さな値 (約0.3 ppm) を安定して維持した。
- 濁度除去率は99.99%以上



- 消化汚泥中の最頻の粒径が50μm前後、SEM観察から孔径は0.5μm前後だったことから、クロスフローろ過にもかかわらず、すぐに目詰まりが生じ、TMPも早い速度で上昇したと考えられる
- 除去した粒径に関する詳細な検討は次頁

本膜は、濁質に対し、非常に高い除去性能を有す

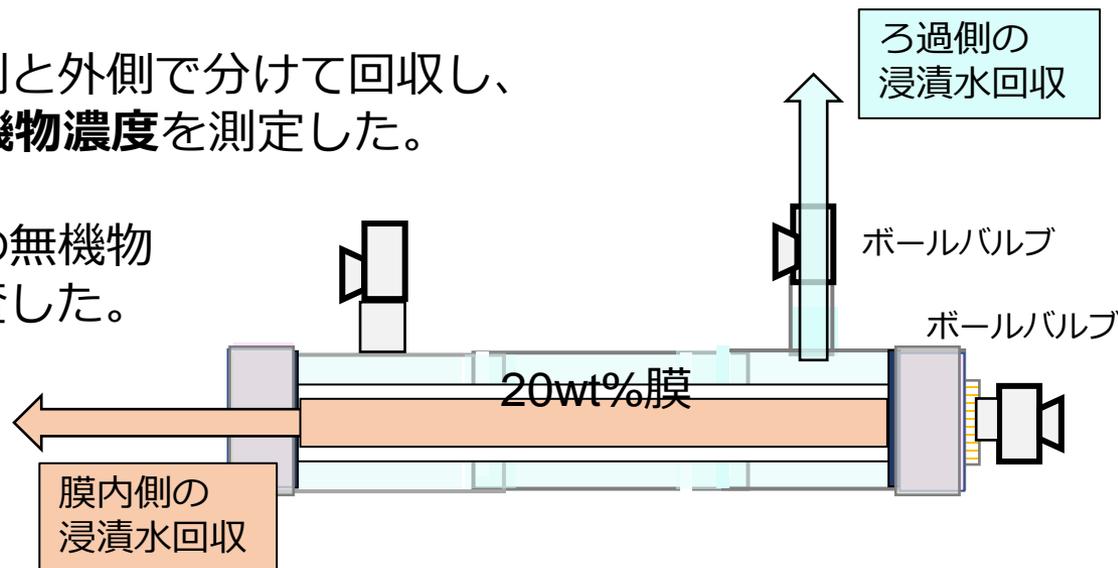


- ・ 左図 (上) は消化汚泥と初期のろ液中の粒子の径と個数、(下) は各ろ過時間におけるろ液中の粒子の径と個数を示す
- ・ 0.20μmの粒子の除去率は98%
0.51μmの粒子は除去率100%(上)
- 平均的な孔径は0.5μm前後であるが、0.2μm以下の孔も多く存在している可能性 (SEM観察と一致)

- ・ ろ液中の粒子を注視すると、0.5μm以下の粒子が多数存在。ろ過時間が経つに連れ粒子数は減少する傾向にあった

- ろ過時間が経つに連れ、大きな粒子が孔をブロックするため、ファウリングが生じていない時に比べ、より粒径の小さな粒子も除去されていくと考えられる

- 消化汚泥ろ過によりTMP =55kPaでもろ液がでなくなった時点で終了。フラッシングなどを行わず以下の薬品浸漬を行った。
- 次亜塩素酸ナトリウム水溶液 (5000 mg/L, pH 11.37)への350mL、24h浸漬によるファウラント（有機物）除去を行った。
- 続いて、水酸化ナトリウム水溶液(0.1 M, pH 13.10)の350mL、24h浸漬を2回行うことでリンの脱着を行った。
- 薬品浸漬による膜洗浄効果を確認するため、水酸化ナトリウム浸漬水を回収後、純水透過性能を測定した。
- 浸漬後の各水溶液は、膜の内側と外側で分けて回収し、それぞれのリン濃度および有機物濃度を測定した。
- 消化汚泥、ろ液、各浸漬水中の無機物の有無をICP-OESを用いて調査した。



薬品浸漬による有機物の除去 (DOC濃度測定、N=2)

- ろ過での吸着量 : 94.1 (mg-C)
- NaClO浸漬水
 - 膜内側 : 94.0 (mg-C)
 - ろ過側 : 18.9 (mg-C)

回収率 = 100%

膜の純水透過性能(50 kPa、N=3)

- 初期純水透過性能(N=3) : **130 (LMH/kPa)**
- ろ過 + 浸漬洗浄後の純水透過性能

- 1回目 : 1180 (mL/30s)
- 2回目 : 1100 (mL/30s)
- 3回目 : 1280 (mL/30s)

平均 :
7635 (LMH) = **153 (LMH/kPa)**

回復率 = 100%

- 5000mg/LのNaClO水溶液に24h浸漬するだけで有機物は除去できた
- NaClOおよびNaOH水溶液に浸漬することでファウラントは完全に除去され、純水透過性能は回復した。
- 洗浄後の純水透過性能は初期の透過性能より高くなっており、ろ過により親水化が進んだと考えられる
→未使用膜を最初に親水化すればさらに継続した運転が期待される

- ビーカーの重さを測定
- NaOH水溶液10mLを、100mLビーカーに入れ、重さ測定
- ビーカーを、110°Cオーブンに4時間静置し、乾燥終了後取り出す
- 重さを測定し、ビーカーの重さを除いた脱着液の乾燥重量を測定する
- ICP-OESによる脱着液中の金属濃度から、重量ベースの割合を算出し、汚泥由来の肥料の品質基準を満たしているか確認

NaOH水溶液（ろ過側）：4580 mg/L、300mL（有機物3.5%）

NaOH水溶液（内側）：5575 mg/L、250mL（有機物2.1%）

	As	Cd	Cr	Hg	Pb	Ni
NaOHろ過側 (mg/kg)	無	無	24	無	3.1	0.9
NaOH内側 (mg/kg)	無	無	4.5	無	792	11

汚泥肥料中の許容値 Cr: 500, Pb:100, Ni:300 (mg/kg)

- 有機物の重量割合は3%程度
- 今回の消化汚泥ろ過 + 脱着試験では、Pbが農林水産省が定める重金属濃度許容値を大幅に上回る
- 脱着液(NaOH水溶液)の有効活用を考えるならば、塩酸に浸漬して金属を取り除くorろ過側だけ再利用など検討が必要

- 従来技術の課題であったリン吸着工程の前処理（薬品添加、煩雑な調整、大規模な施設）がなくともリンを回収することに成功した。
- 吸着や脱着の方法も従来技術に比べ非常に簡易であり、運転管理がしやすいと考えられる。
- 本膜は低濃度～高濃度(1～100mg-P/L)の非常に幅広いリンを含む供給水に対応し、特に低濃度域では長期間、90%以上の除去率を維持できる可能性がある。
- また本膜はリンだけでなく、DOCやアンモニア、カルシウム、マンガンなど、多様な無機物の除去も確認され、今後様々な用途が期待される。

- 本研究はリンの脱着方法やリンの回収について実験を重ね、将来的には幅広い分野でのリン再利用に貢献することを目指す。
- 現在、本研究で開発した膜が、消化汚泥のような高い濁質・粘性を供給水としても、簡易な方法でリン除去およびリン回収が可能であることを確認した。
- 従って、様々な供給水に対しての適応が期待される。
多様な供給水でその性能を確認し、
安定した運転方法の確立および高純度のリン回収方法の模索が必要である。

- 近年、とりわけヨーロッパでリンの回収に関する議論が盛んにおこなわれているが、膜での処理は本研究のみ。リン回収および膜処理に興味がある企業にご協力いただきたいと考えております。
- リンの処理で問題を抱える企業様から供給水を提供していただくことで、実験データを取得し、本膜の適用性を調べ、問題解決を目指したいと考えております

中央大学

研究推進支援本部産学連携担当URA

工藤謙一

福井智一

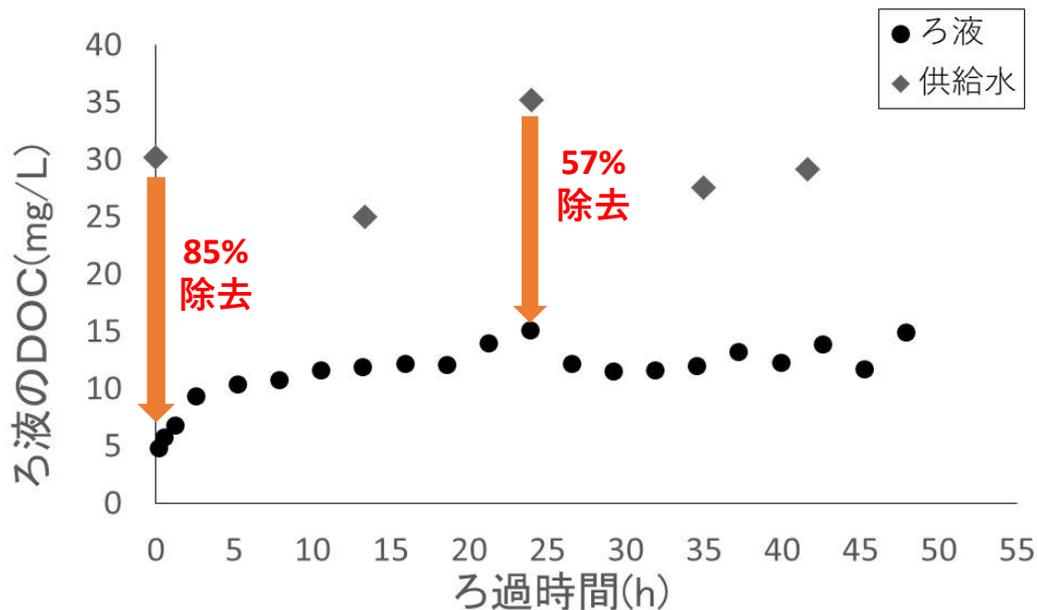
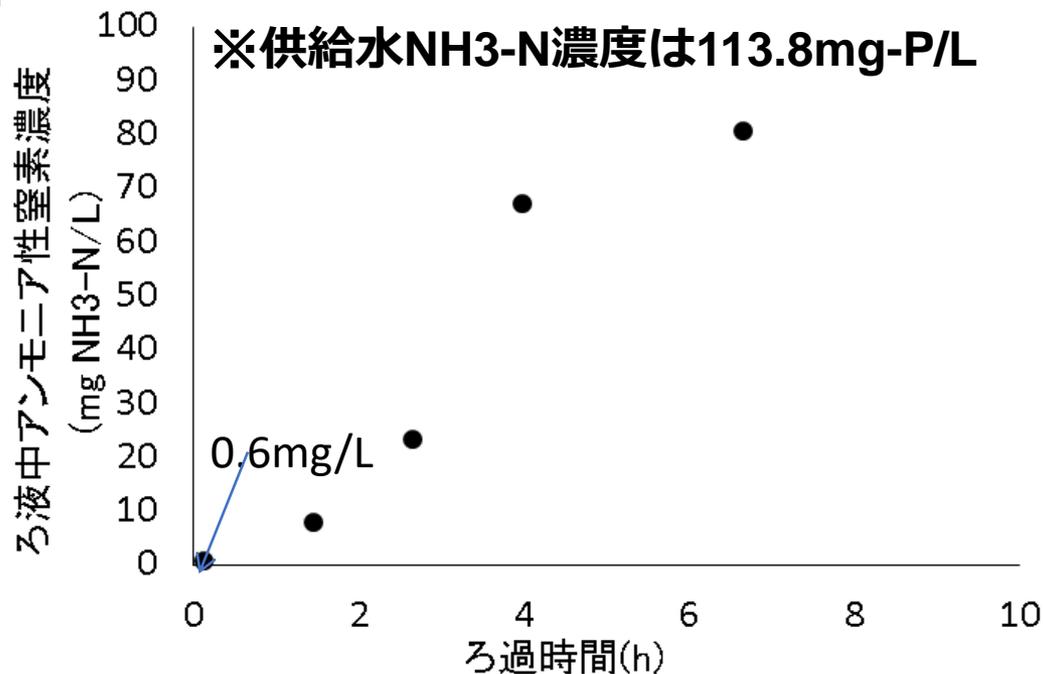
Tel: 03-3817-1674

Fax: 03-3817-1677

Email: ksanren-grp@g.chuo-u.ac.jp

補足資料

※供給水NH₃-N濃度は113.8mg-P/L



- ろ過開始直後、**アンモニア態窒素も非常に高い除去率(>99%)**を示した。

- しかし、ろ過時間が増えるに連れ除去率は低下した。

- ろ過開始直後、**DOCも高い除去率(85%)**を示した。

- しかし、ろ過時間が増えるに連れ除去率は低下した。

- 孔径は0.5 μ m付近であるが、それより小さな有機物(<0.45 μ m)も除去できた。
物理除去ではなく吸着による除去

リンに比べ単位Zrあたりの吸着量は格段に小さいが、本膜はアンモニアやDOCの吸着能も有す

供給水中のリン

無機態 2/3、有機態 1/3

※供給水は消化汚泥を10倍希釈してDP 100 mg/Lになるよう調整したもので、実際の消化汚泥中の有機態リン濃度はもっと高い

- ・ 有機態リン = 全リン(TP) - 無機態リン(PO_4^{3-})
- ・ 有機態リンは消化汚泥中の微生物由来と考える。

	全リン (mg/L)	溶存無機態リン (mg/L)	有機態リン (mg/L)
供給水(消化汚泥)	150	96	54
NaClO内側	80	16	64
NaClOろ液側	10	10	0
NaOH内側-1回目	211	203	8
NaOHろ液側-1回目	200	回収率：50%	
NaOH内側-2回目	50	51	0
NaOHろ液側-2回目	55	58	0

- ・ 膜内側へのNaClO浸漬水から、有機態リンが検出。
- ・ 続くNaOH浸漬水には有機態リンはなかった

→有機態リンはNaClOへの浸漬で主に除去できる物質と考えられる。

・ リン酸水溶液の結果から推定される必要なNaOH水溶液は1600mLであったので、今回の方法 (350mL, 24h浸漬を2回) での回収率50%は妥当

・ 事前実験で同じ条件でろ過した膜では、2800mLのNaOH水溶液に3日間浸漬するだけで100%の溶存リンを回収できた

→NaOH量と接触時間、脱着方法 (浸漬?ろ過?組合せ?) についてさらなる検討が必要

◆ 検出下限値、定量下限値

- 0.5, 50 ppbの濃度の各標準液を測定し検量線を作成し、純水(+1%硝酸)を連続でN=12で測定した。
- 得られた濃度の標準偏差(σ)を算出し、検出下限値=3 σ 、定量下限値= $\sqrt{2} \times 10\sigma$ とした。

◆ 測定試料 (供給水4点 N=1、ろ液8点 N=1、浸漬水 N=2)

- 供給水 (消化汚泥) はマイクロウェーブ粉碎装置で分解後、
- 最終的に450倍になるよう希釈して測定
- ろ液は0.45 μm フィルター後5倍希釈し、1%硝酸を添加
NaClO、NaOH浸漬水は0.45 μm フィルター後10倍希釈し、1%硝酸を添加0

◆ 測定対象元素

Ag, Al, **As(As,As)**, B, Ba, **Be**, Ca, **Cd(Cd, Cd)**, Ce, Co, **Cr (Cr, Cr)**, **Cu**, Fe, Ga, Ge, Hf, **Hg (Hg,Hg)**, In, K, La, Li, Mg, **Mn**, Mo, Na, Nb, **Ni**, **P**, **Pb(Pb, Pb)**, Rh, S, **Sb**, Sc, **Se**, Si, Sr, Te, Ti, V, Y, **Zn(Zn)**, **Zr**

汚泥肥料の品質検査対象元素

食品衛生法の対象元素※Snは未測定

有害産業廃棄物の対象元素

本実験で重要な元素

※水質汚濁に係る規制重金属 (Pb, Hg, As, Cd, Cr)

※EUのRoHS指令規制重金属 (Pb, Hg, Cd, Cr)

(1) 前述の法規制対象元素の有無と濃度(ppb)

	As	Cd	Cr	Hg	Pb	Ni	Be	Cu	Mn	Zn	Sb	Se
定量下限値(ppb)	9.12	0.19	1.69	1.87	2.78	1.18	0.04	2.21	0.18	3.11	14.0	9.33
消化汚泥	無	無	無	無	無	無	無	無	113.7	無	無	無
ろ液(直後)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(8h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(16h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(24h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(32h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(40h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(52h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
ろ液(48h)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
NaClOろ過側	無	無	279	無	無	123	無	無	無	56	無	無
NaClO内側	無	無	50	無	無	436	無	1396	2.2	762	無	無
NaOHろ過側	無	無	111	無	4420	無	無	無	無	270	無	無
NaOH内側	無	無	25	無	無	65	無	3901	2.7	1709	無	無

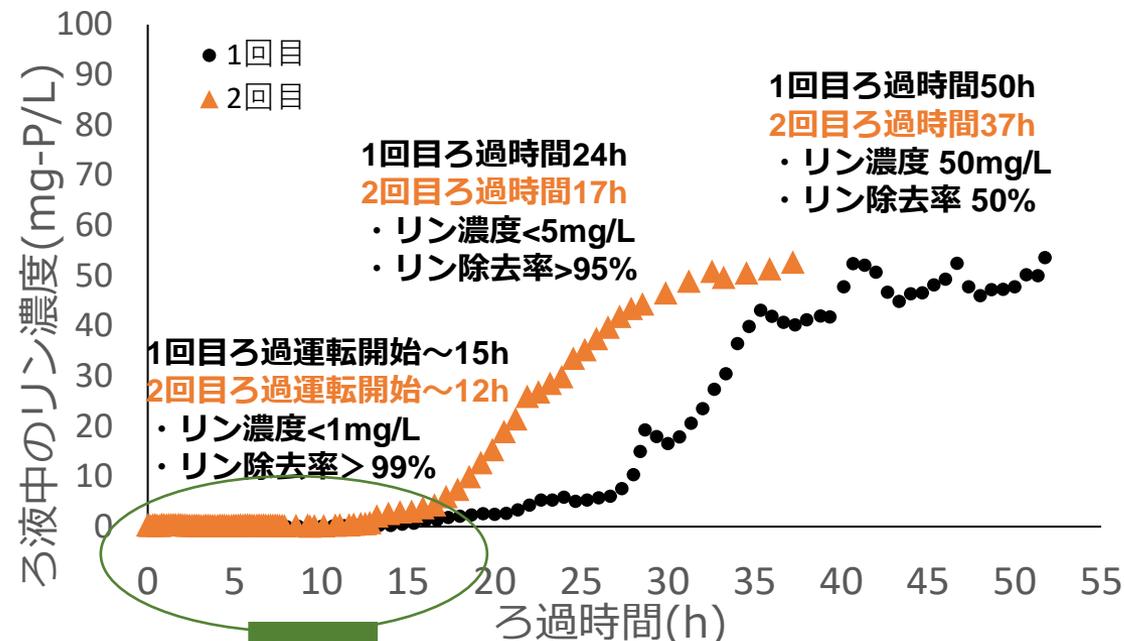
- 消化汚泥中には微量(定量下限値以下)しか含まれていない元素が、ろ過過程で濃縮され、塩基性の浸漬水と反応し流出

(2)法規制対象外であるが検出された元素の濃度(ppb)

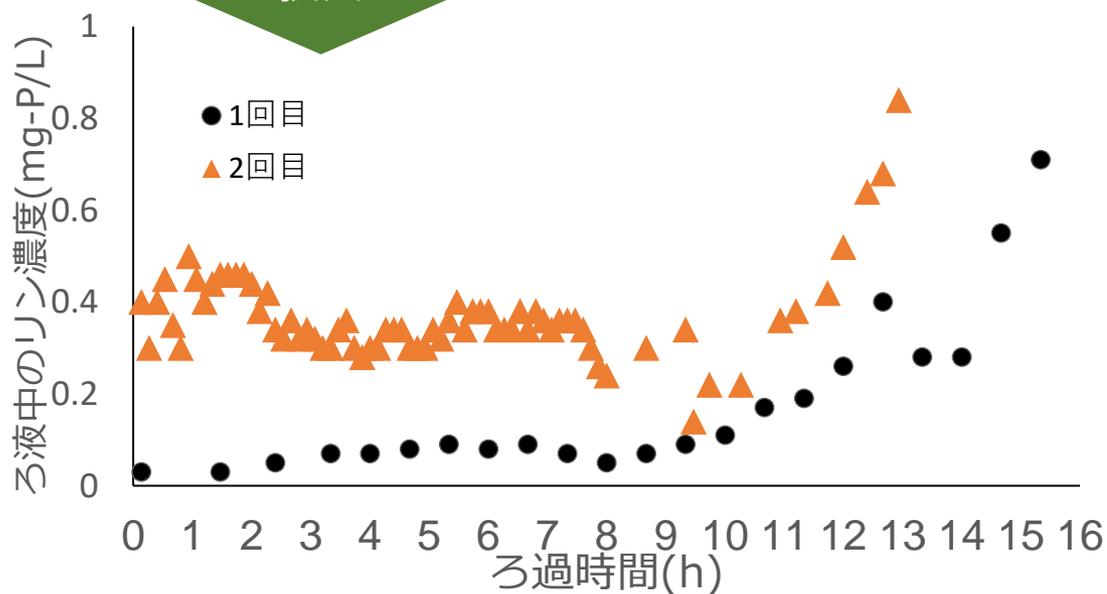
	Ba	Ca	Mg	Al	Fe	Zr	B	Ti	Si	Li
定量下限値(ppb)	0.12	0.19	0.37	3.30	1.64	6.20	3.13	0.83	3.46	0.05
消化汚泥	605	65334	無	64958	54479	無	無	2936	57551	41
ろ液(直後)	無	12.4	無	無	無	無	無	無	52	0.8
ろ液(8h)	無	5.6	無	無	無	無	無	無	103	0.4
ろ液(16h)	無	2.4	無	無	無	無	無	無	84	0.3
ろ液(24h)	無	3.3	無	無	無	無	無	無	132	2.2
ろ液(32h)	無	2.5	無	無	無	無	無	無	136	1.0
ろ液(40h)	無	1.5	無	無	無	無	無	無	267	0.5
ろ液(52h)	無	2.9	無	無	無	無	無	無	304	0.5
ろ液(48h)	無	27.9	無	無	無	無	無	無	384	0.5
NaClOろ過側	無	319	41	無	90	無	無	無	233	0.7
NaClO内側	2.5	17252	50	130	567	無	60	14	1171	1.3
NaOHろ過側	無	無	111	200	32	201	1351	無	3280	無
NaOH内側	2.6	554	25	3515	1517	無	1720	32	9780	0.7

- すべての元素において、ろ液にはCa, Si, Li, S, P, K, Naが検出されたが、いずれも供給水中に非常に高濃度に含まれており、高い除去率を維持していた。
※S, P, K, Naは非常に高濃度であるが実験条件に由来するため表では除外

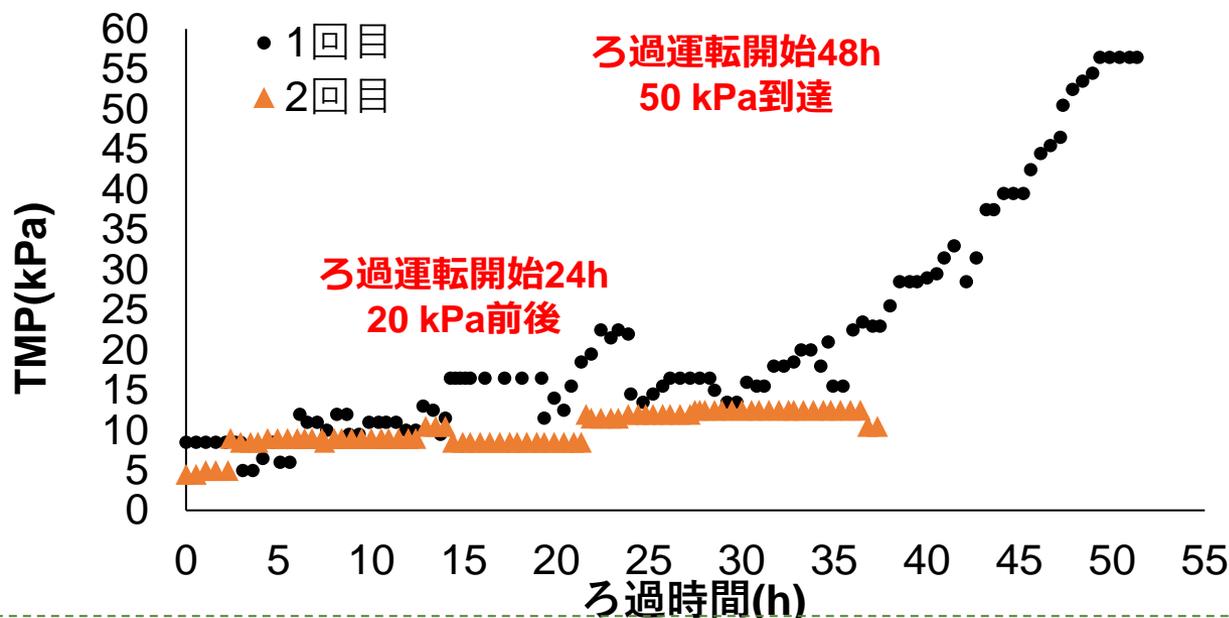
消化汚泥ろ過2回目 リン吸着性能評価



拡大



- ・ 1回目ろ過開始から15時間、2回目は12時間、**非常に高いリン除去率(>99%)**を安定して示した。
 - ・ 1回目ろ過開始から24時間、2回目は17時間、**リン除去率は95%以上を維持した**
 - ・ 1回目ろ過開始から50時間、2回目は37時間で、**リン除去率は50%に達した**
 - ・ 2回目のろ過でも、高い除去率を示したが、除去率が50%以下になる時間も早かった。
 - ・ 吸着性能が低下した原因として、前回の洗浄工程でのリン脱着が不十分だったことが考えられる
- 繰り返し使用するためにはリンの脱着をしっかりと行うことが胆



運転を停止した理由

- 1回目：圧力の上昇 (TMP>55 kPa)
- 2回目：リン除去率の低下 (除去率<50%)
- ・2回目は1回目のろ過時と比較して、TMPが非常に安定していた。除去率50%になるまでTMP<10kPaで運転できた。
- ・先述の純粹透過性能と併せて、1回目のろ過で膜の親水化が進み、水が通りやすくなったためTMPが小さくなった可能性が考えられる

本膜は、汚泥のような

- ・有機物、無機物問わず様々な物質が含まれ
- ・高濁質&粘性の供給水

からも、リンを繰り返し吸着+回収できる可能性