

課題番号: 3K153006

使用済み海水淡水化膜を利用した 途上国工業団地での工場排水再利用 システムの開発

中央大学理工学部 人間総合理工学科
山村 寛

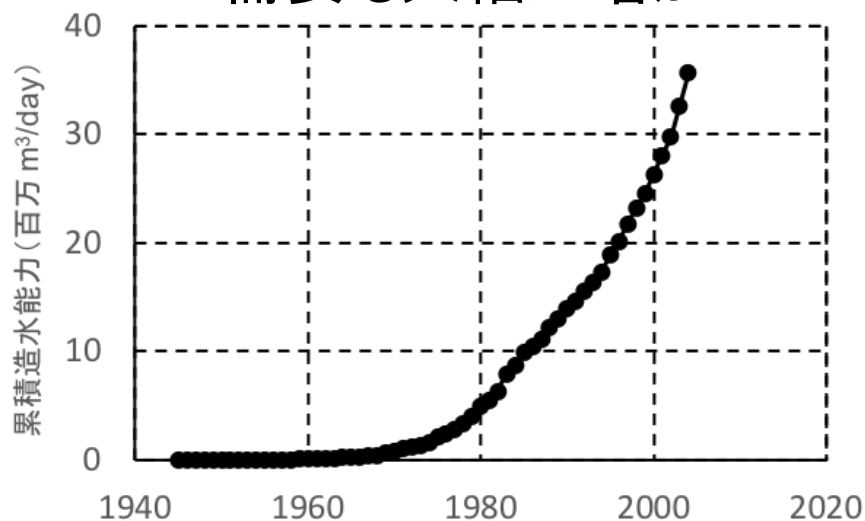
羽深 昭（人間総合理工学科）、米津 明生（精密機械工学科）

2015年度-2018年度(3年間)

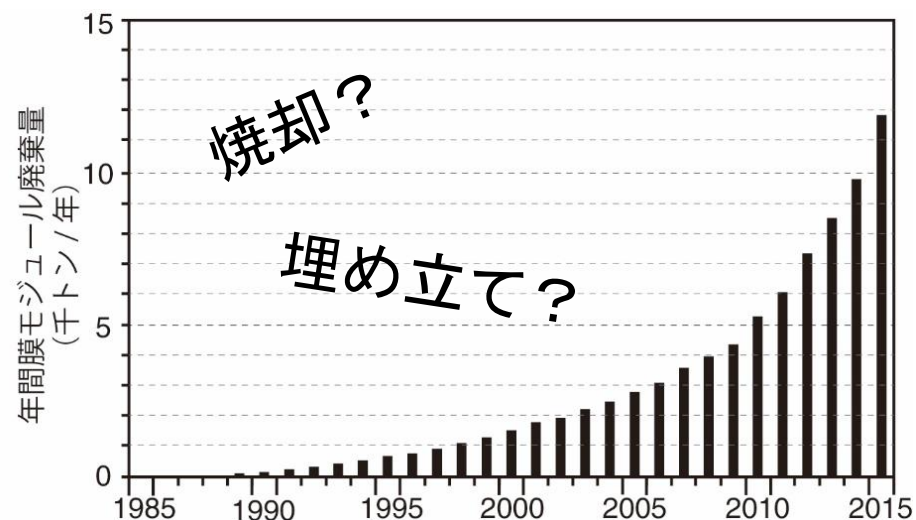
問題提起 廃棄されたRO膜はどこに行く？

水源水質の悪化と**人口増**に伴って、**淡水資源の枯渇**が世界的に課題に

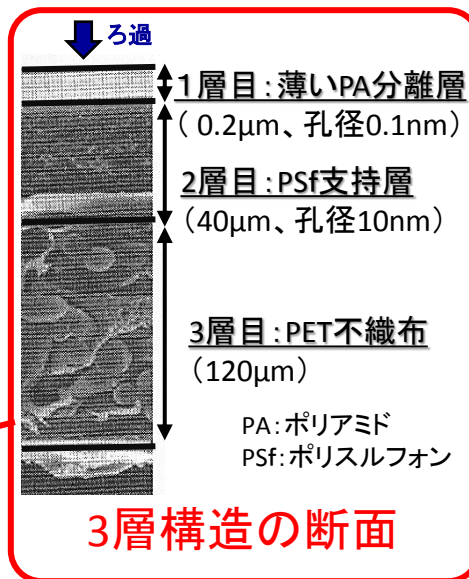
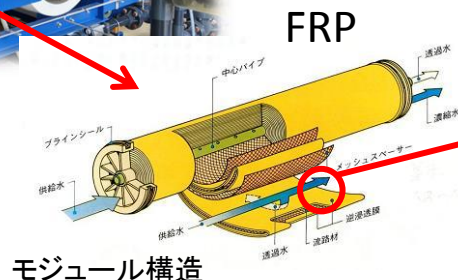
海水淡水化膜(RO膜)の
需要も大幅に増加



使用済みRO膜の廃棄量も
急激に増加

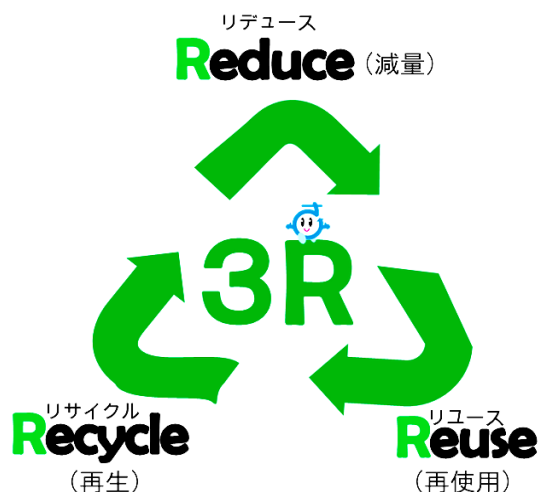
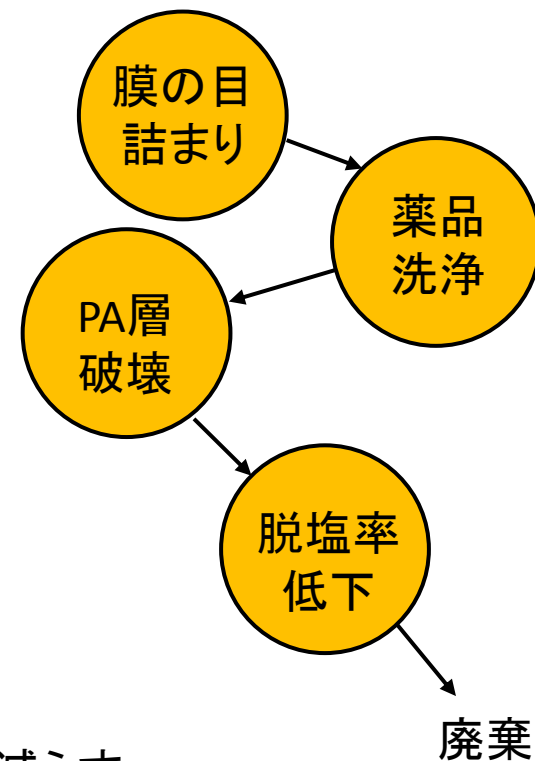


既存のRO膜のライフサイクル



分別・回収が出来ない！

一過性のフロー



1: Reduce

長寿命化により、廃棄される量を減らす

2: Reuse

使用済みのRO膜を別の用途に再利用する

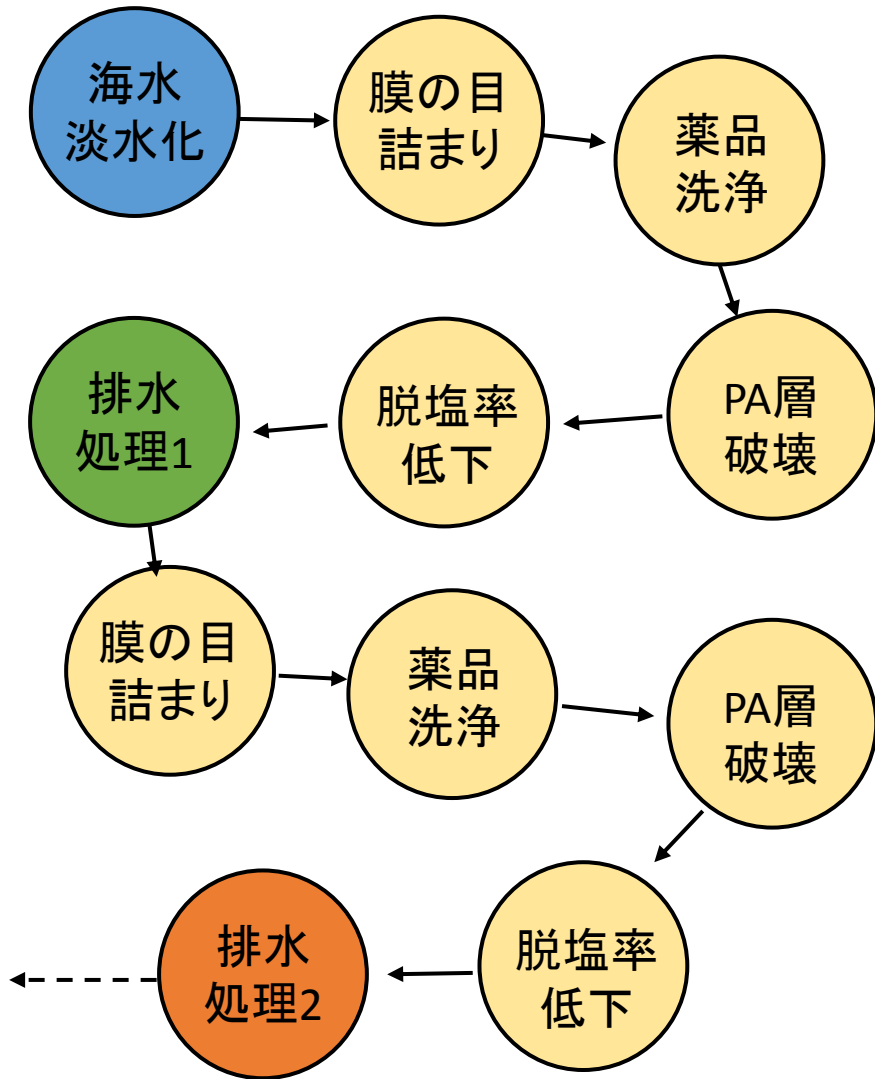
3: Recycle

使用済みRO膜を復元・改質して再利用する

提案！ 新しいROのライフサイクル

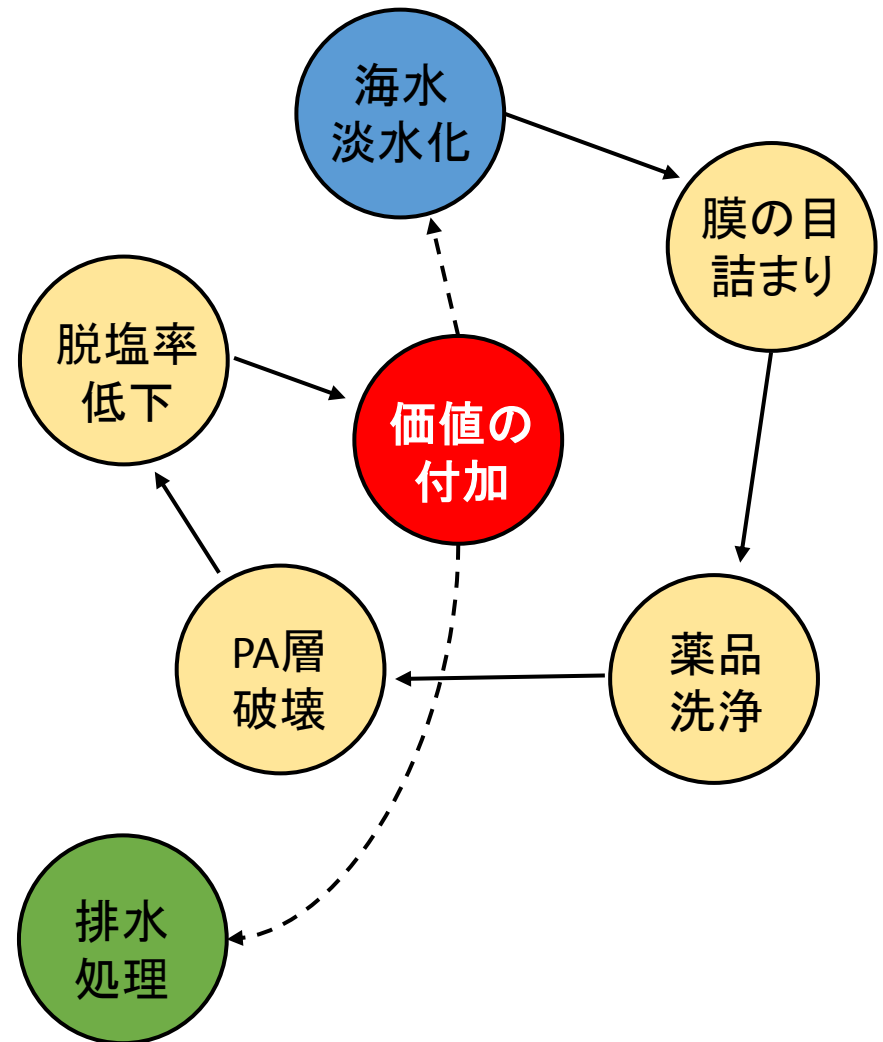
4

① Reuseを中心としたフロー



★単純なカスケード利用の推進

② Recycleを中心としたサイクル



★アップグレード再利用の推進

東南アジアは工業化に伴い水需要が大幅に増加する一方で、水資源に乏しい国が多い
例) インド国 ムンバイ近郊 パタルガンガ工業団地

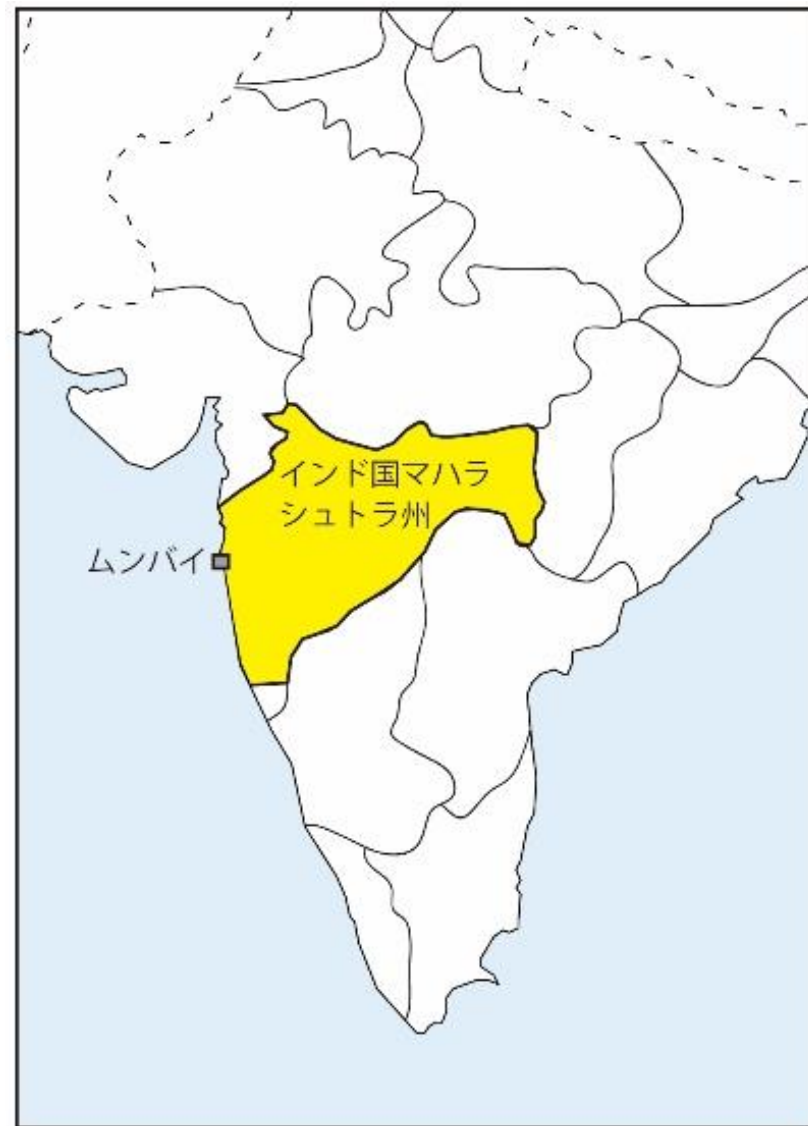
F社と共同研究を実施中

問題点1: 処理場の非効率な運用

インドの工業団地では、共同排水処理場が設置されている。しかし、既存の処理場においても水質汚染は深刻で、非効率な運用・保全のために対象地域の汚染が進んでいる

問題点2: 水資源不足

今後も産業発展で水需要が増えたと見られ、浄水場など水関連インフラ整備が進まない場合、2030年には需要に対する供給能力が50%にまで低下する見込みで、深刻な用水不足の状況

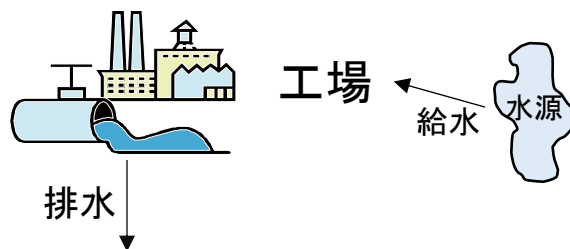


排水処理場 曝気槽の様子

2014.8.27

パタルガンガ排水処理場の現状

パタルガンガ排水処理場の「現」処理フロー



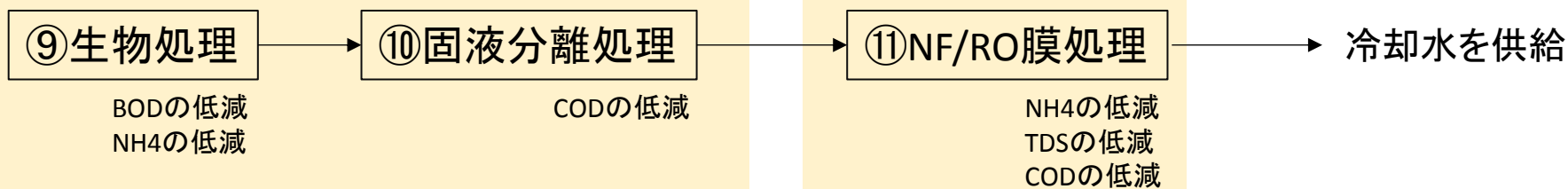
	pH (-)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	NH4 (mg-N/L)	TDS (mg/L)
放流水	8.3	60	400	40	4000
放流基準	5.5-9.0	30	250	50	2100
冷却水	7-8	1以下	1以下	0.1	30

放流基準を見たし、冷却水を生産するには、さらに高度な処理が必要

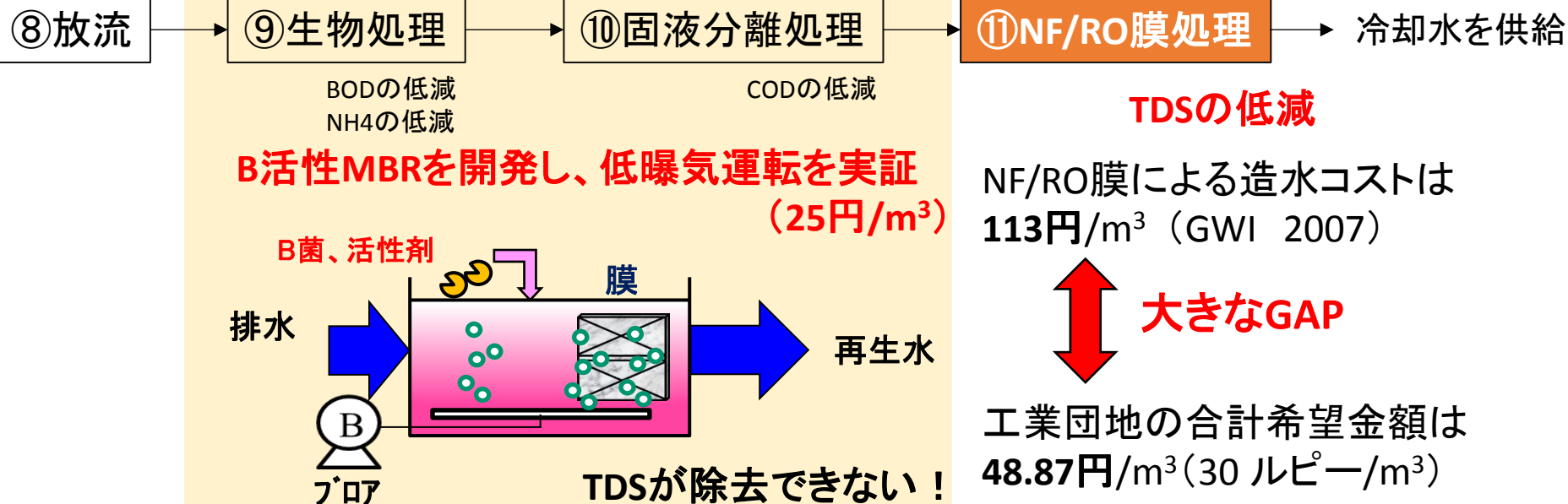
前処理プロセス

+

脱塩プロセス



パタルガンガ排水処理場の改善案



	pH (-)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	NH ₄ (mg-N/L)	TDS (mg/L)
放流水	8.3	60	400	40	4000
MBR処理水	8.1	1以下	1以下	0.1以下	3800
冷却水	7-8	1以下	1以下	0.1	30

実用化のためには、NF/ROに係るコストを1/5程度に低減しなければならない！



使用済みのRO膜を工業排水再生処理に有効利用！

* 本研究開発の目的と開発項目

使用済みの海水淡水化RO膜を有効利用する技術の確立

STEP1 使用済みRO膜についてよく知り、使いこなせるようになること

使用済みRO膜を
任意の除去性能を持った膜まで改変する技術の開発

STEP2 使用済みRO膜を有効利用するための手法を確立すること

改変膜の**リユース技術**の確立

工場排水処理に必要となる
膜性能を明確化

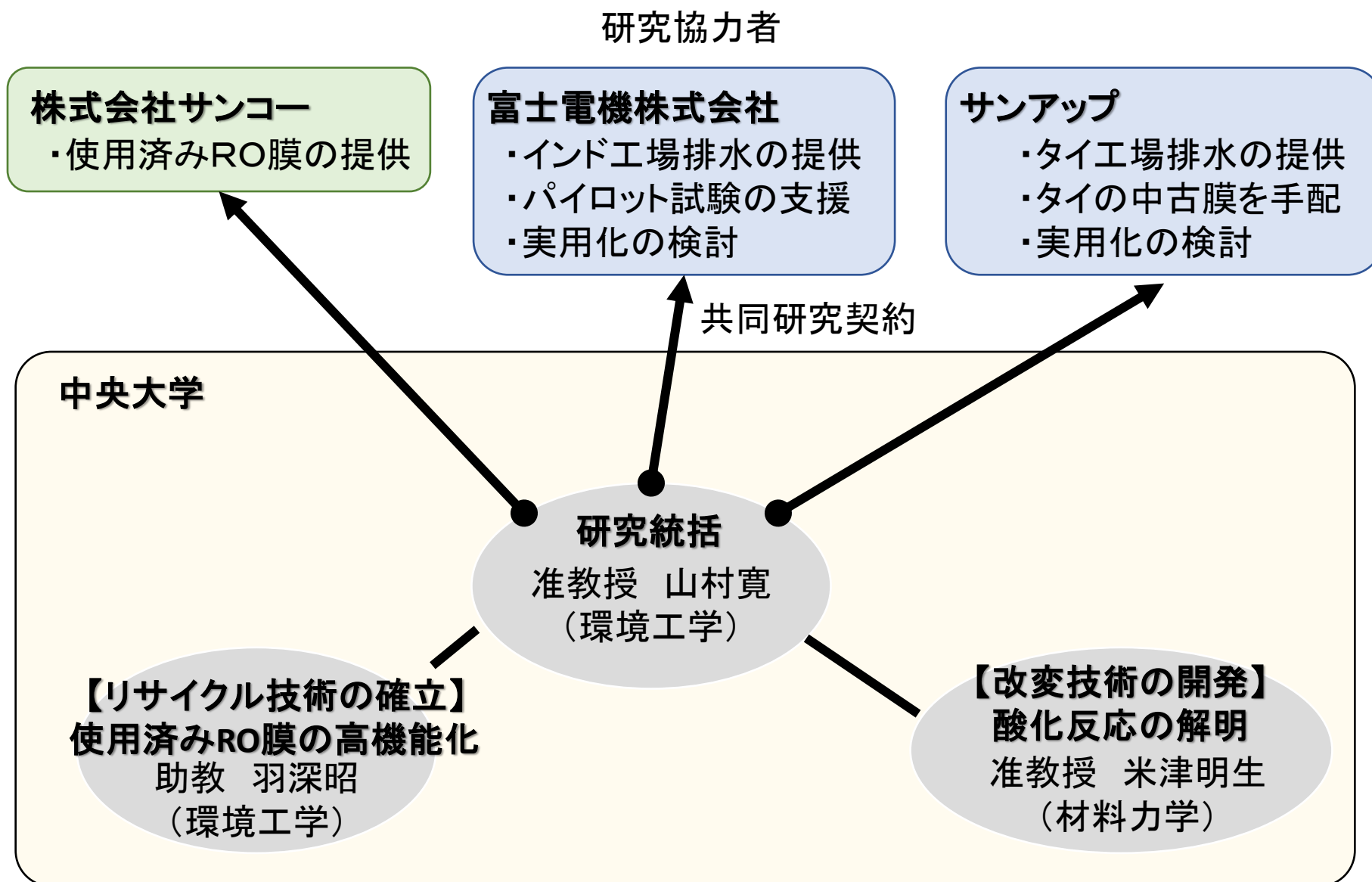
改変膜の**リサイクル技術**の確立

改質膜に付加価値を付与する
技術を開発

STEP3 提案したプロセスの有効性を示すこと

経済性の評価

* 研究開発体制



STEP1

**使用済みRO膜を
よく知り、制御する！**

Step1: 任意の除去性能を持った膜にまで改変する技術

Confidential

11

目的1: 使用済みRO膜を任意の除去性能を持った分離膜にまで改変する技術を開発

① 次亜塩素酸による改質試験



② 改質に影響する因子の抽出

pH、濃度、時間を変化させての改質試験



③ 脱塩率と改質時間の関係式を作成

$F = (\text{pH、濃度、時間})$ の式を作成

改質機構の解明



④ 2インチスパイラル膜と平膜との差を評価

差が無い場合



⑤ 改質の繰り返し精度を評価

5%以内



⑥ 8インチモジュールでの適合性を判断



⑦ 目標1 達成

改質度と改質時間の関係式を作成



作成した改質式を評価



スケールアップ性能を評価



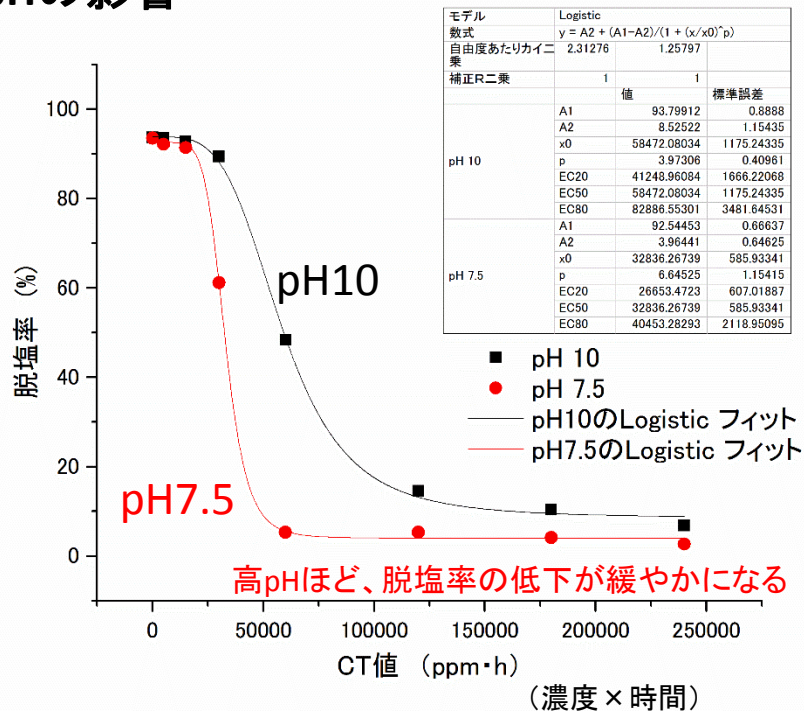
STEP1: pHおよび次亜塩素酸濃度の影響

Confidential

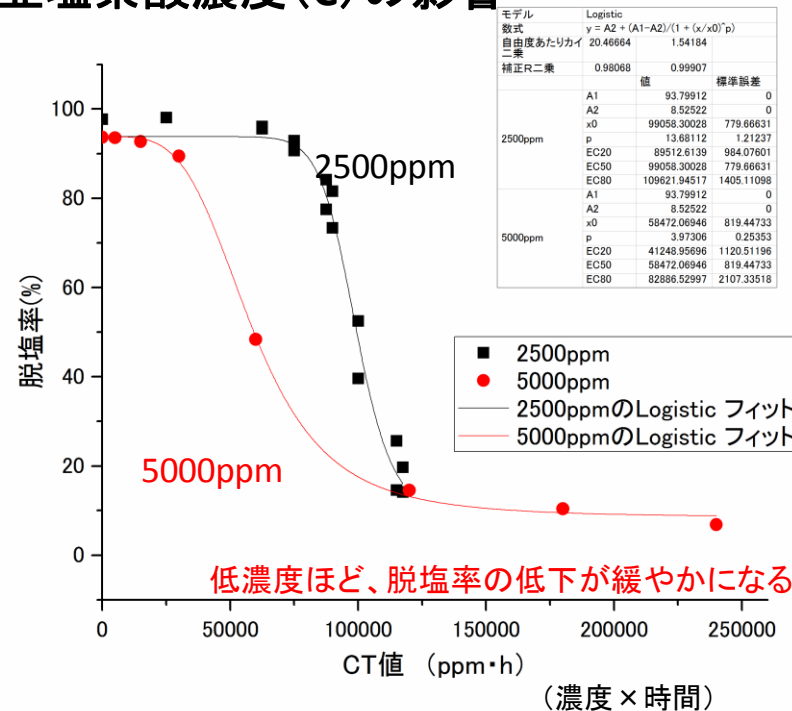
12

新膜の改質を様々なpH及び濃度条件で実施し、脱塩率とCT値の関係を数式化

pHの影響



次亜塩素酸濃度(c)の影響



脱塩率の低下は、**pH**と**次亜塩素酸濃度**に大きく影響を受ける(全20条件)

脱塩率と改質時間の関係を、pH、濃度を変数として、数式化(一般化)

改質曲線をジグモイド曲線として近似

$$y = 8.7 + \frac{84.9}{1 + (x/a)^b}$$

脱塩率 CT値

aとbを求める

$a = 1040(pH) - 0.014 \times (\text{濃度})^{1.65}$ $b = 21.1 - 0.0034 \times (\text{濃度})$

STEP1: シミュレーターの適合性を評価

Confidential

13

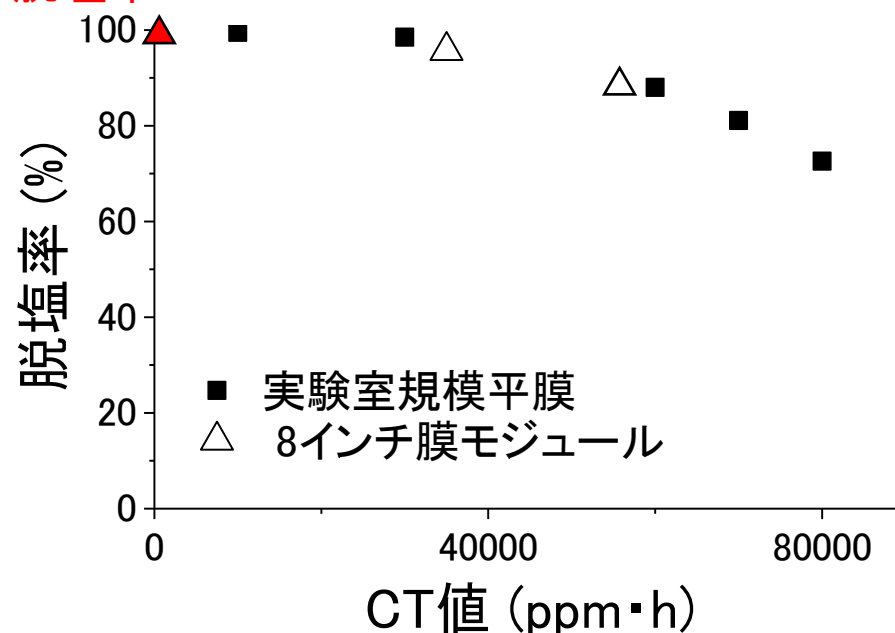
使用済み8インチ
スパイラル膜モジュール



膜面積(m ²)	
平膜	0.015
8インチ膜 モジュール	40
濃度(ppm)	
5000	
pH	
11	
CT値(ppm・h)	
35000	

実験室規模平膜と使用済み8インチ膜 モジュールの改変曲線の比較

使用済みRO膜
脱塩率 98%



シミュレータは
使用済み8インチスパイラル膜モジュールでも適用可能

改変シミュレータを利用し、任意の脱塩率の膜から
必要脱塩率まで自由に改変できるようになった

STEP1: 次亜塩素酸による改質メカニズムの解明

Confidential

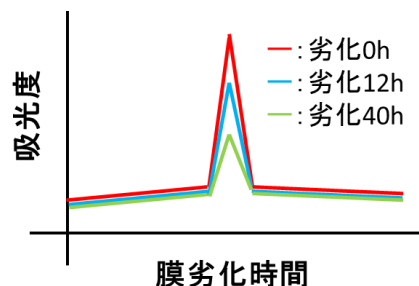
14

FT-IR & XPS

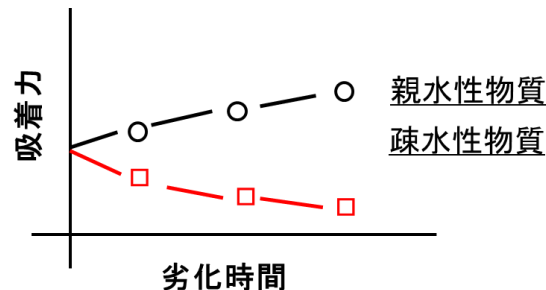
ナノコンタクト(AFM)

ろ過試験

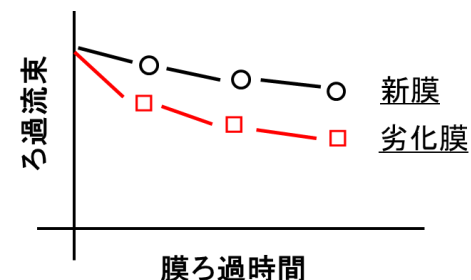
分子構造の特定



吸着特性の評価



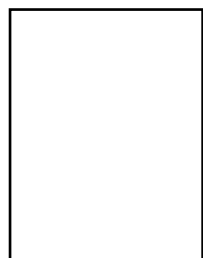
ファウリング性の評価



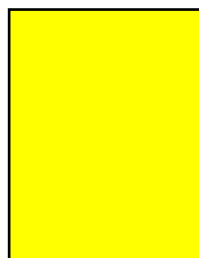
塩素改質RO膜の作成

AFMコロイダルプローブの作成

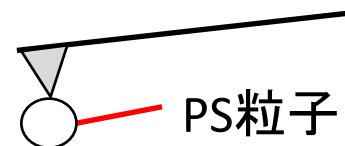
未改質膜



改質膜



次亜塩素酸
による改質

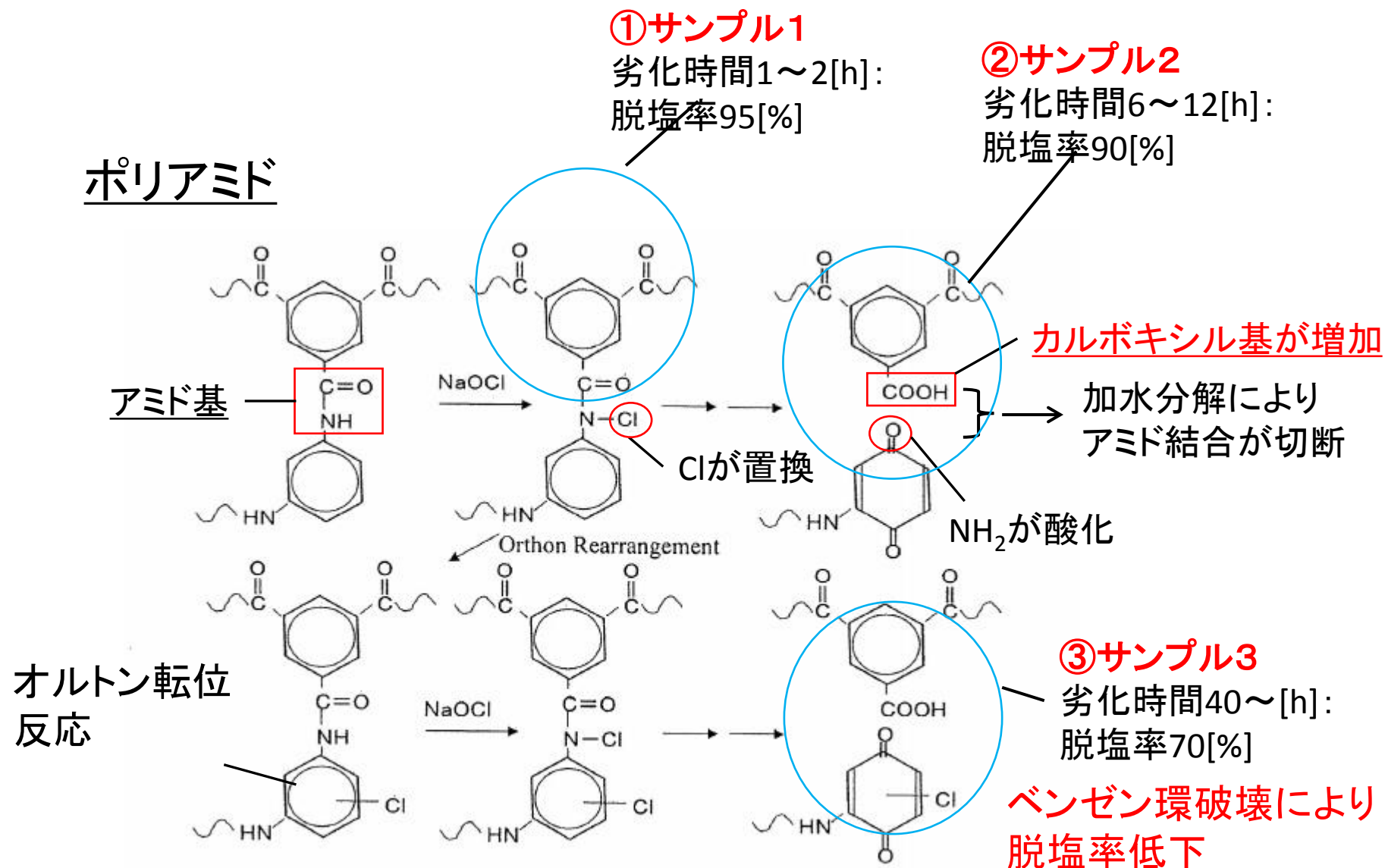


PS粒子: 官能基を修飾

有機物: 多糖(OH) 疎水性物質(C18)
を模擬

RO膜の塩素改質とファウリング機構の変化を評価

STEP1: RO膜の酸化メカニズムを解明



RO膜の酸化メカニズムを解明

STEP2

改変RO膜を 使いこなす！

1. カスケード利用
2. 付加価値付与 アップグレードリサイクル

STEP2: 最低脱塩率の算出(リユース技術)

基準値を満たすために必要な脱塩率

参考資料: 日本冷凍空調工業会で定めた冷却温調補給水水質基準

基準値項目 単位	pH	電気伝導度 (mS/m)	塩化物イオン (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	アルカリ度 (mg/L)	カルシウム硬度 (mg/L)	全硬度 (mg/L)	イオン状シリカ (mg/L)
水質基準	7 ~ 8	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 50	≤ 50	≤ 70	≤ 30
必要脱塩率	20%~90%	48%	20%	20%	—*	—*	—*	—*

各脱塩率に対応する膜透過性能

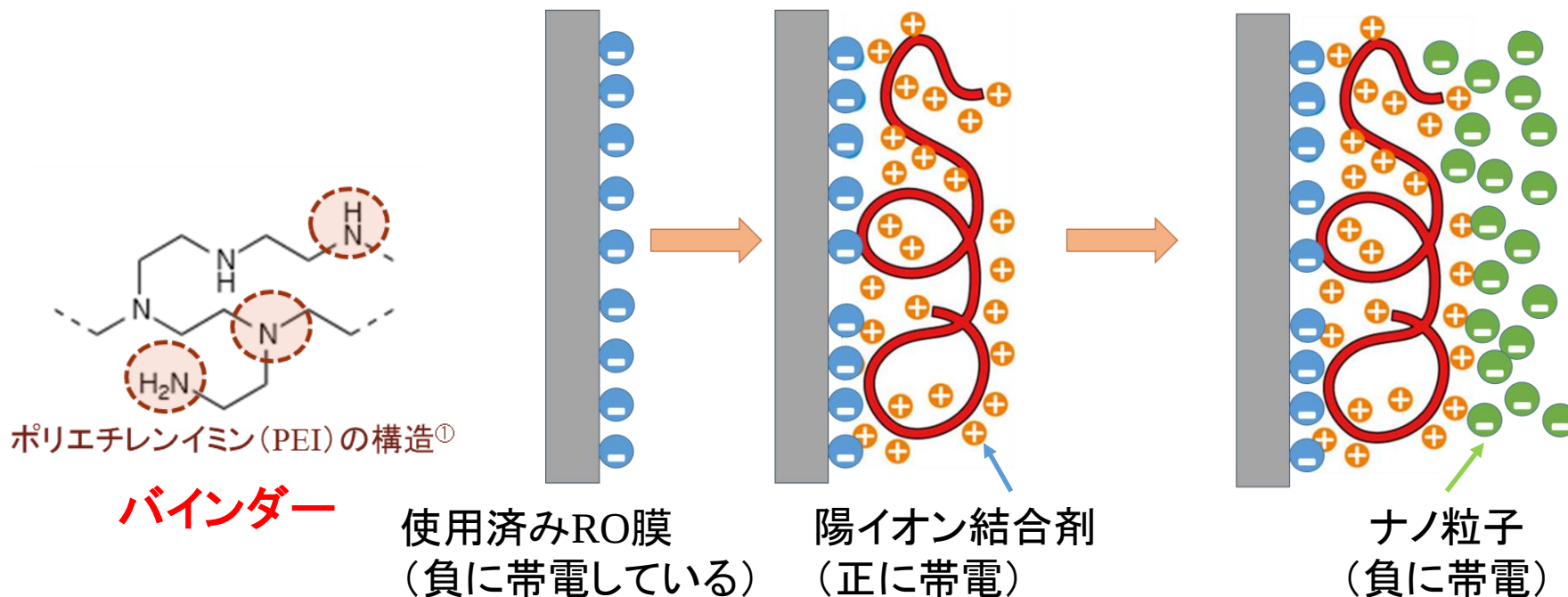
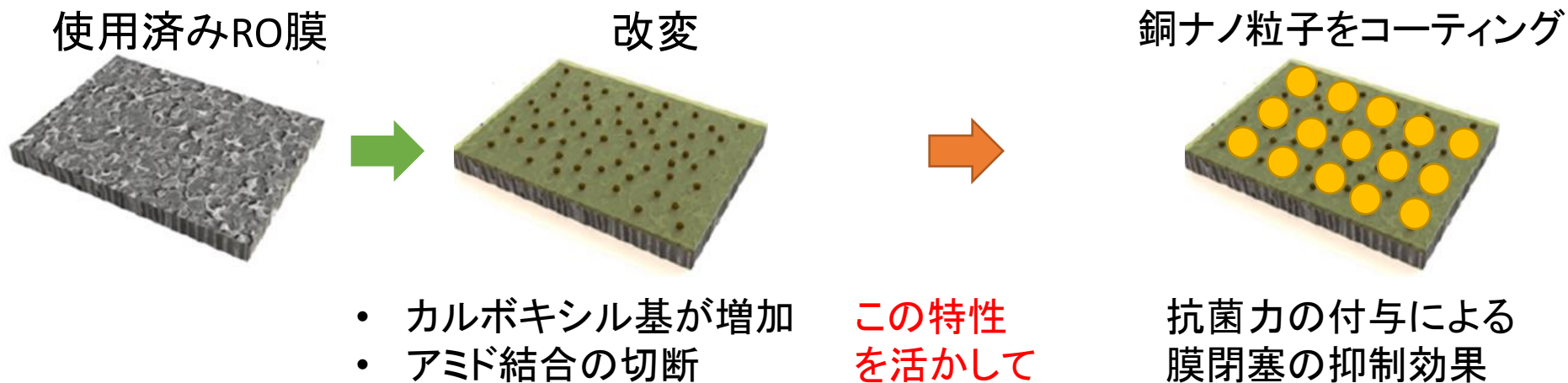
*原水が基準を満たす

脱塩率(%)	透過流量(mL/min)@1.5MPa	フラックス(m/day) @1.5MPa
22	126.3	13.0
48	45.2	4.7
80	21.5	2.2
85	17.5	1.7
90	10.2	1.0
低圧RO膜	—*	1.2*

*低圧RO膜は商品データシートを参照した

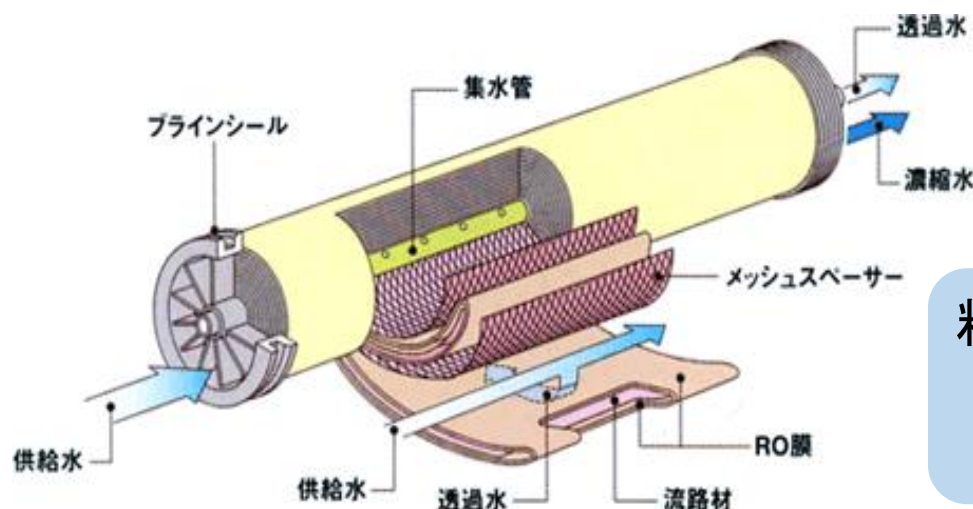
必要脱塩率48%, 運転エネルギー1/4を確認

STEP2: 付加価値を付与(リサイクル技術)



使用済み膜をアップグレードする際の課題

□ スパイラル型RO膜モジュールの解体が困難



スパイラル型RO膜モジュールの構造

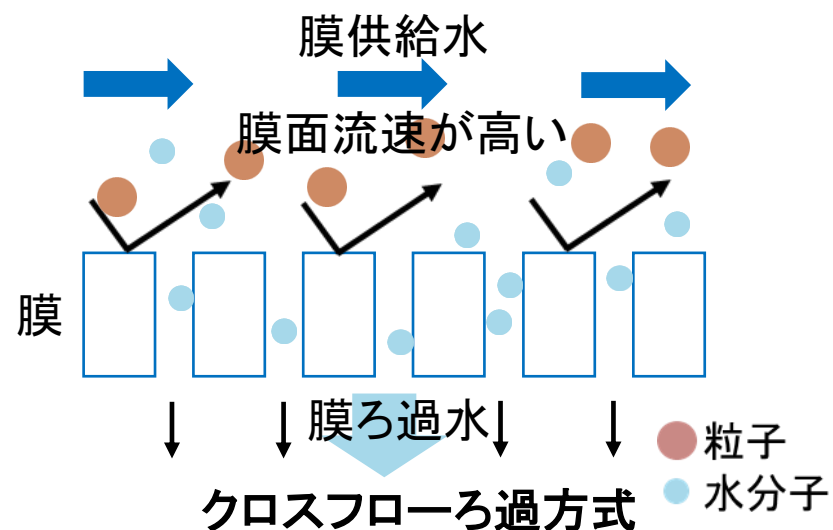
- 膜モジュール本体にアップグレードできるか？

対策

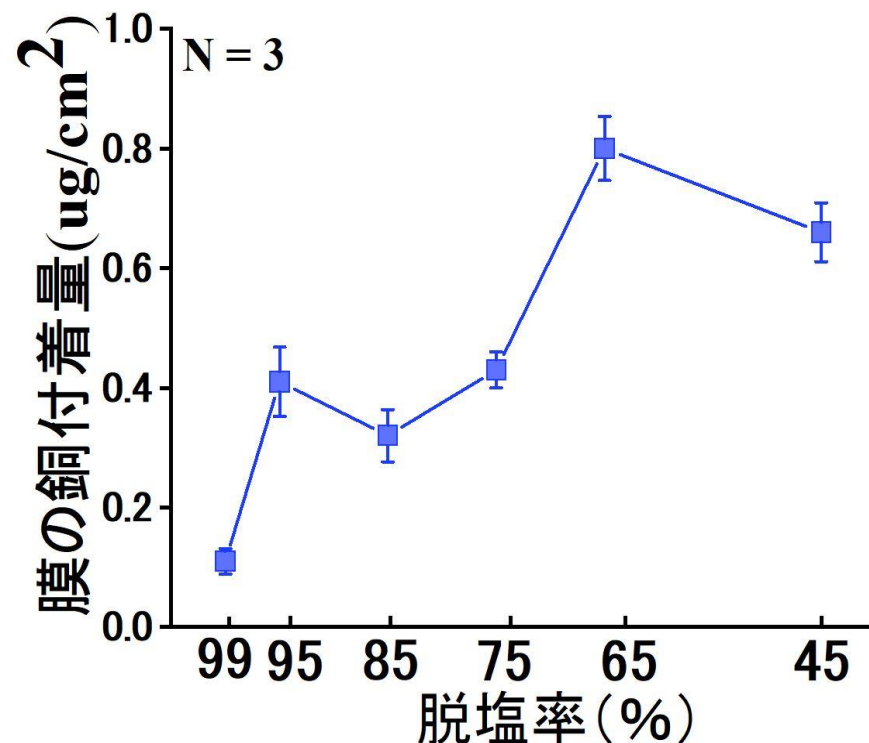
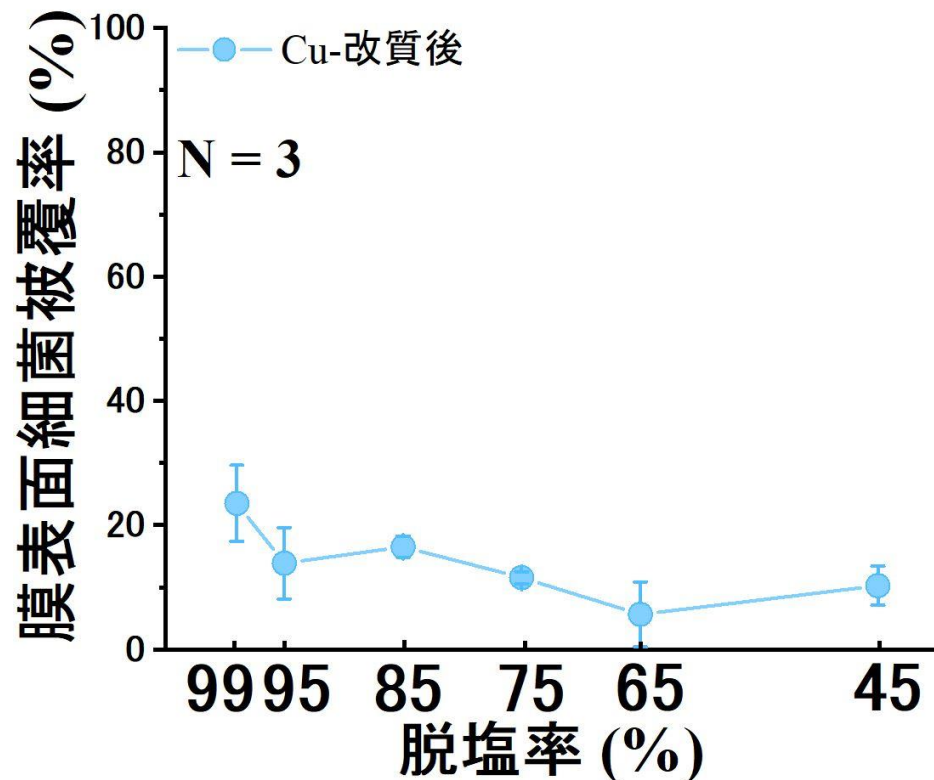
粒子を使用済みRO膜にコーティングし、膜の性能をアップグレードする
⇒使用済みRO膜の価値を向上できる

問題点

RO膜表面の高い流速のため、粒子をRO膜に**安定的に**コーティングできなかった

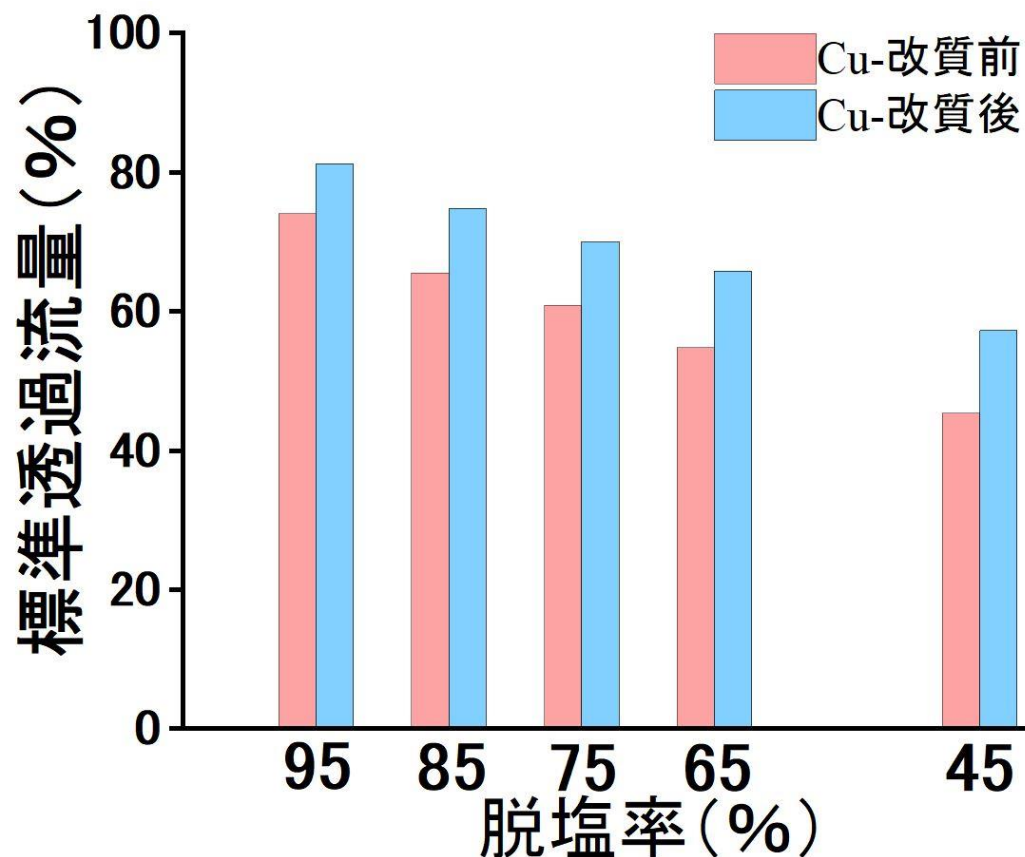


□ 人工下水での抗菌性実験



- 改質前の膜に比べ、Cu-改質膜表面の細菌被覆率は低減
⇒ Cu-改質膜が抗菌性を有していると考えられる
- より多くの銅ナノ粒子を使用済みRO膜に付着させ、
改質膜はより強い抗菌性を示した

□ 下水処理水でのファウリング実験(回収率80%になるまで)



全ての脱塩率において、改質後の膜は、改質前の膜より標準透過流量の低下を抑制することができた

STEP 3

有効性の評価

STEP3:カスケード利用のコスト削減効果

中東



海水淡水化プラント

使用済みRO膜

・脱塩率 95%~98%

改変シミュレータを利用、
任意の脱塩率を持つ膜に
改変



1/2

膜価格

東南アジア



改質・保管

輸送

改変RO膜

食品工場排水→冷
却温調水の処理に
必要な脱塩率

48%

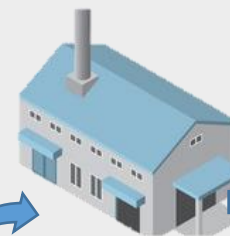


1/4

インストールコスト*

冷却温調
補給水

再生水生産



工場
排水

使用



排水高度処理

銅ナノ粒子コーティング
ファウリングが新膜の20%減



4/5

膜交換コスト*

改質RO膜
コスト = 使用済み膜価格 + 改質費5,000 円/本 + 輸送費5,000 円/本
(15-18万円/本の半値) (実績値)



RO膜コスト: **1/10程度 (12円/m³)**

経済的な有効性を確認

*前処理でMBRを導入した場合

* 得られた主な成果(環境政策への貢献)

□使用済みRO膜の改変技術を確立

任意の脱塩率を持った膜まで改変する技術を確立

□リユース技術の確立

工場排水(インドおよびタイ)を冷却水相当にまで浄化できた

□リサイクル技術の確立

使用済みRO膜表面への銅ナノ粒子コーティング技術を確立し
耐バイオフィルム形成機能の付与に成功

□経済性の評価

従来の技術と比較して、1/10にコストを抑制できることを実証した

□実用化

本技術の特許を出願し、企業と実用化を検討中

□その他

使用済みRO膜を使った埋立浸出水中のホウ素除去技術の開発に成功

* 得られた成果(科学的意義)

□ RO膜の酸化機構を解明

アミド結合とベンゼン環の塩素化が発生するタイミングを解明

□ 酸化されたRO膜の表面官能基と吸着力の定量化に成功

RO膜は酸化されるに伴って、タンパク質の吸着性が低下するが多糖類の吸着性は増加することを解明

□ 非破壊で銅ナノ粒子の膜面への固定化に世界で初めて成功

銅ナノ粒子の固定化に成功

* 国民との科学・技術対話

2018/2/22 雨水市民の会主催 「雨たす膜」にて、得られた成果を公表