月例卓話

膜処理技術を活用した水循環型社会の構築を目指して

竹　内　　悠*

1. はじめに

水は生活や産業を支える不可欠な資源である．水資源が不足する地域では，使用した水を処理して再び利用することが，安定した水供給を確保するうえで重要な役割を果たしてきた．一方，水の再利用は，水不足への対応だけでなく，河川や湖沼などからの取水量や水環境への汚濁負荷を低減する方策でもある．また，排水に含まれる栄養塩類や熱を活用できる可能性があり，水・資源・エネルギーの循環という観点からも意義を持つ．

従来の都市の水利用は，遠隔地の水源から水を集め，使用後は下水として処理・放流する一過型のシステムを中心としてきた．しかし，気候変動に伴う水供給の不安定化や，災害による断水，水インフラの老朽化などを背景に，既存の上下水道に加え，建物や地域内で水を循環利用する分散型の水システムを組み合わせることも重要となっている（図 1）．

本稿では，沖縄における下水再生水の農業・工業利用に向けた研究事例を中心に，膜処理技術を活用した水循環型社会の構築に向けた課題と展望を述べる．

2. 水再利用を支える膜処理技術

水再利用に用いられる膜処理技術には，精密ろ過（MF）膜，限外ろ過（UF）膜，ナノろ過（NF）膜，逆浸透（RO）膜などがある．MF 膜や UF 膜は主に懸濁物質や微生物の分離に用いられ，NF 膜や RO 膜は溶存有機物やイオン類の除去にも利用される．水再利用では，すべての用途に対して同じ水質を目指すのではなく，利用目的に適した水質を確保する「Fit for purpose」の考え方が重要となる．例えば，農業利用では病原微生物による健康リスクを管理しつつ，再生水に含まれる窒素やリンを肥料成分として活用できる場合がある．一方，工業利用では，製品や設備への影響

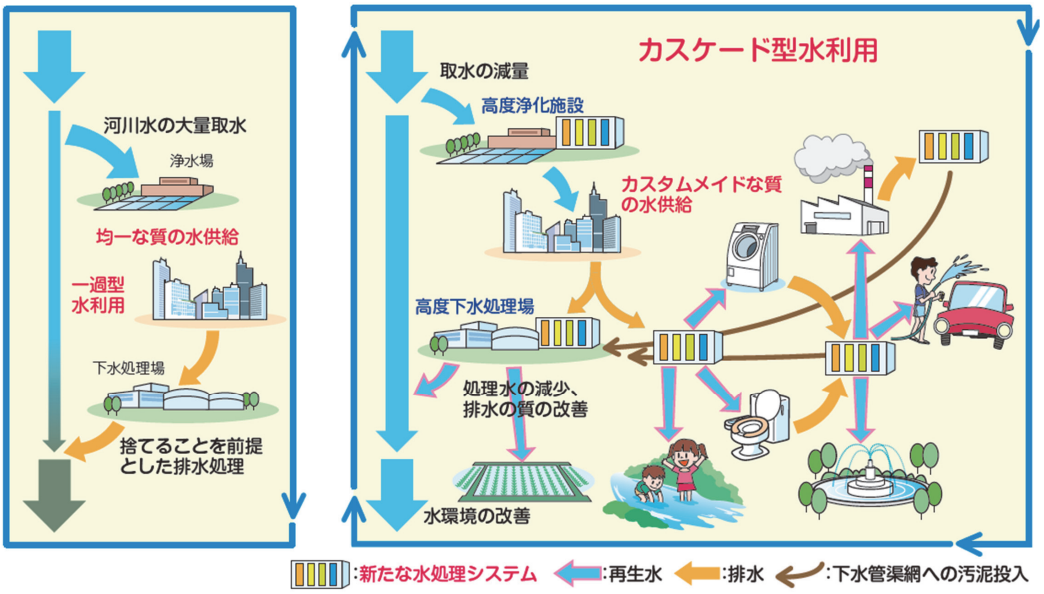


図 1. 一過型から循環型の水利用への転換[1)]

*京都大学白眉センター／大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター 特定講師

第 423 回京都化学者クラブ例会（令和 7 年 9 月 6 日）講演

を抑えるため，有機物や塩類，硬度成分などの低減が求められる．このような要求の違いに応じて，膜の種類や前後の処理を選択する必要がある．

3. 膜処理による安全で実用的な水再利用に向けて

水再利用の実現には，処理水が目標水質を満たすことに加え，その性能が安定して維持されることを確認する必要がある．特に病原微生物については，処理後の水質測定だけで安全性を判断するのではなく，原水に含まれる微生物を各処理工程でどの程度除去・不活化できるかを評価し，運転中の異常を検知する仕組みを備えることが重要である．

沖縄本島中南部では，年間降水量が多い一方で，人口が集中し，河川が短いことなどから，水資源の確保が課題となってきた．特に農業用水が十分に整備されていない地域では，安定した水源の確保が農業振興に重要となる．そこで，JST CREST プロジェクト[2]では，下水処理水を UF 膜でろ過した後，紫外線（UV）消毒を行う再生処理システムが開発された．UF 膜で懸濁物質や細菌を分離し，後段の UV 消毒でウイルスなどを不活化することで，複数の処理によって病原微生物を制御する構成である．また，溶存する栄養塩類を残しながら処理できるため，農業利用との親和性が高い．

沖縄県糸満市における農業利用に向けた実証では，UF 膜ろ過と UV 消毒を組み合わせた処理について，ウイルス指標である F-RNA ファージを用いて性能を評価した．培養法と PCR 法を組み合わせた評価により，処理システム全体で 5 log 以上の除去・不活化性能を確認した．これは，指標としたファージを 99.999% 以上削減することに相当する．また，比較対象としたカリフォルニア州の再利用基準（Title22）に対応する従来型の処理方式に比べ，維持管理費の低減が確認された（図 2）．

また，膜の健全性が損なわれた場合の影響を把握するため，パイロット設備で中空糸膜の一部を意図的に破断させ，異常の検知と処理水質への影響を検討した．膜破断の検知には圧力減衰試験が利用でき，連続的な監視には高感度濁度計が有効であった．膜破断時には膜ろ過水から大腸菌が検出されたものの，後段の UV 消毒後には検出されなかった．一方，漏出する粒子成分によって UV 消毒のウイルス不活化性能が低下する傾向もみられた．この結果は，複数の処理による安全性の確保とともに，異常の早期検知と適切な運転対応が必要であることを示している．

さらに，再生水の工業利用に向けた検討では，下水処理場に設置した UF 膜・RO 膜のパイロット設備で得た再生水と，糸満市内の企業が使用する工業用水の水質を比較した．その結果，RO 膜

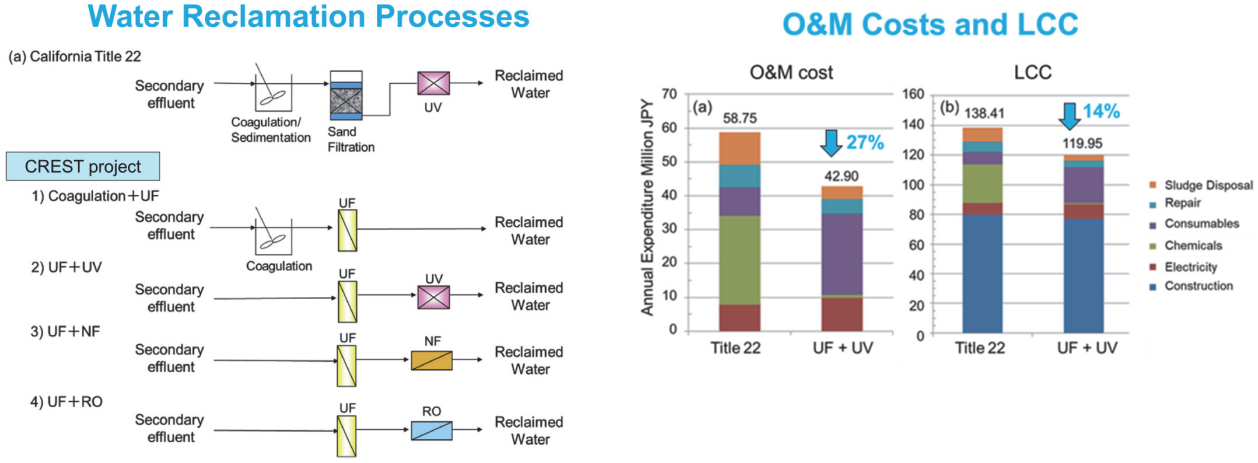


図 2. 沖縄における水再生処理技術の検討（左）と従来方式（Title22）および UF 膜＋UV 処理の費用比較（右）：(a) 維持管理費，(b) ライフサイクルコスト

透過水の全有機炭素（TOC），ナトリウム，カルシウム，マグネシウムなどの濃度は，比較した工業用水を下回った．また，硬度成分は企業内で軟水化処理した工業用水と同様に検出下限値未満となった．一方，窒素成分は再生水の方が高い傾向があり，すべての水質項目で既存の工業用水より低濃度となるわけではなかった．したがって，再生水の適用可能性は，用途ごとに重視される水質項目に基づいて判断する必要がある．

糸満市の工業地域内の企業へのアンケート調査では，水中の濁度，細菌・ウイルス，硬度成分が重視されていた．また，再生水の利用を検討する価格水準は，既存の工業用水を使用する企業と，水道水を使用する企業で異なっていた．このことから，再生水の導入には水質だけでなく，現在の水源や企業内での追加処理費用を含めた比較が重要と考えられた．既存の工業用水配管を利用して再生水を供給する条件で費用を試算したところ，生産規模が 2,000，5,000，10,000 m^3/日の場合，供給原価はそれぞれ 125.6，87.4，68.5 円/m^3 となった．当時の試算条件では，5,000 m^3/日以上で比較対象とした水道水の供給原価を下回った．これらの結果は，膜処理による水再利用を実用化するには，安全性と要求水質を確保するとともに，需要量や既存インフラを踏まえた事業設計が不可欠であることを示している．

4. 分散型水循環への展開

沖縄の事例では，下水処理場で生産した再生水を周辺地域で利用する方法を検討した．一方，水の再利用は，建物や街区など，より小さな単位でも実施できる．建物内で発生する排水をその場で処理し，トイレ洗浄水や散水用水などに利用するオンサイト型の水再利用は，必要な場所で，用途に適した水質の水を必要量だけ生産する方法である．水の発生場所と利用場所が近いため，長距離の送水や新たな配水管の整備を抑えられる可能性がある（図 3 左）．

国内では，福岡市や東京都区部などにおいて，建物内の雑排水を処理し，トイレ洗浄水などに再利用する個別循環が行われてきた．また，あべのハルカスやイオンモール堺鉄砲町など，水再利用に加えてバイオガスや熱の回収を組み合わせた事例もある．このように，水だけでなく，排水に含まれる資源やエネルギーも活用することで，建物や地域全体での資源利用を効率化できる可能性がある．

海外の事例として，オーストラリア・シドニーの Central Park では，商業・居住施設から発生する下水を膜分離活性汚泥法（MBR），UV，RO 膜などで処理し，トイレ洗浄水，洗濯用水，植物の灌漑用水に利用している（図 3 右）．また，スウェーデン・ヘルシンボリの実証施設 RecoLab では，雑排水，し尿を含む排水，食品廃棄物を分けて収集し，それぞれの性状に応じた処理と資源回収が検討されている．雑排水には生物処理と NF 膜処理を適用するなど，発生源の分離と処理技術の選択を組み合わせている．

ただし，小規模化すれば必ず経済性や省エネルギー性が向上するわけではない．水需要の変動や



図 3. 建物単位のオンサイト水再利用の概念（左）とシドニー・Central Park の事例（右）．それぞれ文献 3，4）をもとに作成．

設備の稼働率によっては，単位水量当たりの費用が増加するほか，施設ごとに点検や水質管理を行う負担も生じる．膜の汚れや破損，消毒性能の低下を把握し，異常時には再生水の供給停止や代替水への切替えを行える運転管理体制が必要となる．また，再生水と水道水の配管の誤接続を防ぐことや，貯留・配水中の水質変化への対応も欠かせない．

分散型水循環を地域に導入する際には，既存の上下水道との役割分担を考えることが重要である．用途や地域条件に応じて集中型と分散型を組み合わせ，平常時の効率性と災害時の対応力を高めることが期待される．そのためには，膜処理による水質の確保に加え，設備の運転，水質監視，保守点検を誰が担うかを明確にし，継続して利用できる仕組みを構築する必要がある．

5. おわりに

膜処理技術を活用した水再利用は，水資源の確保と水環境への負荷低減を支える方策である．沖縄の研究事例が示すように，その実現には，用途に適した処理の選択と安全性の評価に加え，利用者の要求や需要量，費用を踏まえたシステム設計が必要となる．

今後は，地域条件に応じて集中型の上下水道と分散型の水再利用を組み合わせ，継続的に運転・管理できる仕組みを整えることが重要である．また，利用者や地域住民との対話を通じて，水を循環利用する意義と課題を共有することも欠かせない．処理技術の開発・評価と，その技術を活用する仕組みづくりの両面から，安全で持続可能な水循環型社会の構築に貢献していきたい．

引用文献

1）独立行政法人科学技術振興機構：持続可能な水利用を実現する！「水システム」最適化へ，JSTnews，2012 巻，12 号，pp. 3–7（2012）．https://doi.org/10.1241/jstnews.2012.12_3

2）田中宏明：戦略的創造研究推進事業 CREST「21 世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」研究終了報告書（2015）．https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research/s-houkoku/JST_1111074_09154473_EE.pdf

3）San Francisco Public Utilities Commission: Onsite Water Reuse Program Guidebook (2022). https://www.sfpuc.gov/sites/default/files/documents/OnsiteWaterReuseGuideAugust2022.pdf（2026 年 10 月 16 日閲覧）．

4）McLean, L. and Roggema, R.: Planning for a Prosumer Future: The Case of Central Park, Sydney，Urban Planning，4 (1), pp. 172–186 (2019). https://doi.org/10.17645/up.v4i1.1746