

2.2.4 水利用・水処理

（1）研究開発領域の定義

変動する水資源を安全に供給、利用するための水処理を対象とした領域である。水処理システムについて、用水処理や排水処理に用いる材料、薬剤、機器、膜、光、システム等の研究開発を対象とする。計測・制御システムについて、下水疫学によりウイルスや新興汚染物質等の検出、評価に向けた技術開発や、効率的、安定的に利用するためのICT応用等による水管路システム維持、水処理のエネルギー高効率化、水管理支援システム等の研究開発を対象とする。再生水や無塩素給水等に関する定量的リスク管理技術等の研究開発も含める。

国内の過疎地や途上国での水利用や、自然災害などの非定常時のための分散処理システムも含める。公衆衛生に関わる下水道の再生や浄化槽等の取り組みに加えて、ステークホルダー意思決定等の取り組みも対象とする。

（2）キーワード

飲料水、公衆衛生、下水疫学、水道システム維持管理、海水淡水化、再生水、リスク管理、栄養塩（窒素、リン）、病原微生物、逆浸透膜・正浸透膜、紫外線消毒、アナモックス

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

水処理技術は多量の水を必要とする現代の暮らしや生産活動に必須の人間社会の存立に欠かせない。水処理技術により、飲料に適さない様々な水を飲料に適する水質に変換したり、一度使用した水を再生利用したり、従来使用できなかった水資源を利用したりできる。また、公害を防止し、環境を維持するために、廃水をしっかり浄化してから環境に排出することも必要である。歴史的に、都市における人口集中、より利便性を追求した様々な製品の製造工程などに起因する新たな化学物質等の出現などから、河川、湖沼、地下水などの水道水源として利用してきた水道原水の汚濁が進み、これに対応した水処理技術（浄水技術）の革新が行われてきた。近年、世界的な人口増、工業・農業などの産業活動の増大にともなって、水資源がひっ迫する地域がますます増加し、海水、下水処理水などを原水として飲料水を製造する技術の開発が求められている。浄水技術の基本形は既に確立されているものの、上述のような地域的あるいは地球的規模での状況の変化に伴い、水処理技術の革新はさらに必要とされており、社会的ニーズの極めて高い領域である。また、技術の適用にあたり、適用する地域の自然的、社会的条件が多様であるため、最適技術を適用するための手法開発も重要なテーマとなる特徴がある。浄水技術は、原水とする水の性状、処理の結果、供給する水道水の水質レベル、必要とする土地の面積、必要となる建設および維持管理・運転コスト、必要な技術者の数とレベルなどの様々な要因の制限をうけるため、これらの状況に応じて適した浄水技術は異なることに留意が必要である。

とくに、世界では、まだ衛生的なトイレを利用できない人や安全な飲料水を手に入れない人、きれいな水で手洗い、うがいができない人が多くいる。その解消が国連でもSDGsで取り上げられている。我が国の水処理技術を世界展開することによって、我が国の産業の振興はもとよりSDGsにも貢献できる。水利用のための科学技術は土木技術と密接にかかわり、防災、リスク管理、維持管理、資産管理などの分野と関連する。水処理に関する知見は、公衆衛生、微生物学、化学工学などの分野と関連する。

【研究開発の動向】

水利用全体に関連して、未規制物質や未規制微生物に対してのリスク管理、災害対応、長寿命化、維持管理技術などが求められている。2020年の新型コロナウイルス感染症問題から、下水疫学の分野が期待を集めている。従来の感染者のモニタリングが検査対象、年齢構成などさまざまなことに陽性者数が影響を受けるのに対して、下水中の新型コロナウイルス濃度を測定できれば、検査対象者に依存しない感染状況の都市間比較やピーク推定、再流行の予見ができる可能性が示され、今後も懸念される新しい感染症に対して下水疫学の確立への重要性の認識が広がっている。下水疫学研究の関連として、日本をはじめ世界各国の排水基準や水道水質基準は年々、厳しくなってきた背景がある。対応が必要な物質が増加し、その都度、新たな除去技術の開発や既存の水処理装置の運転改良による除去率の向上が目指されてきた。日本国内では、ノロウイルスのように下水・沿岸域・魚介類・ヒト・下水という循環経路が疑われる病原体を対象に、感染症対策として下水疫学の研究が行われていた。

また、豪雨後の沿岸部悪臭問題などから雨水下水合流式下水道の改善も再び関心が高まっている。一方で、栄養塩を含んだ水を排水した方が、漁業の振興にはなるとの見方も存在し、季節により栄養塩の除去率を調整した運転を行う技術も開発されている。一部の物質を完全に除去しながら、一部の物質を除去しすぎないことは水処理技術にとっては難しい挑戦的な研究課題となっている。さらに、エネルギー使用の効率化、ICT技術やAI技術を用いた維持管理の効率化、整備から時間が経った水処理施設の長寿命化、津波や地震時でも最低限の機能を維持するための強靱化なども水処理技術に求められている課題である。

水処理には、大きく分けて用水処理と廃水処理（排水処理）がある。用水処理は原水から生活用水、工業用水などを製造する技術である。上水道で用いられる浄水技術も用水処理技術の一つである。一方、廃水処理は、生活廃水や工場廃水を環境に排出して問題のないレベルまで処理する技術で、下水処理も廃水処理技術の一つである。広義の水処理技術には、吸着剤や膜、凝集剤などの材料・化学製品に関する技術、汚泥のかき寄せや散気装置、オゾン発生装置、水質測定機器などの機械技術、リアルタイムに送気量などをコントロールする制御技術、水資源管理や水処理設備の施工に関する土木技術などが含まれる。現在最も広く使われている技術として、用水処理技術では急速ろ過法、廃水処理技術では活性汚泥法がある。これらの技術は開発されて約120年が経過しているが、そのエネルギー効率化や除去対象物質の変化への対応、新たな薬剤や素材の開発など地道な改良が現在でも重要である。

上水道における用水処理技術は、様々な汚濁物質あるいは飲用に適さない成分を含む原水から、これらの物質を除去し、安全でおいしい飲料水を製造するための技術が求められる。技術開発内容は大きく、①濁質等、金属類、塩類、化学物質、微生物類などを効率的に水中より除去する技術、②個々の水処理技術を他の要素技術と組み合わせるシステムを構築し、場合によりIoTやAIなどの技術を活用しながら、より効率的に処理を行うシステムの開発、③最先端の技術開発だけではなく、途上国対応、災害時対応などの多様な条件における適用を考慮した最適なシステムの開発、などに分類される。下水の処理プロセスで発生する汚泥の減量やその農業などでの利活用、栄養塩や炭素資源の地域での循環などに関しても、様々な技術開発がなされている。汚泥を嫌気性消化して得られるメタンによる発電技術などエネルギー回収技術も長く注目されている。

紫外線（Ultra Violet: UV）照射による消毒について、現在、新しい光源としてUV-LEDが注目されている。活性汚泥処理の運転の工夫により窒素やリンを除去できるプロセスの開発が1970年代から始まり、現在も徐々に普及が進んでいる。2000年頃から、生物処理技術の新しい展開として、アナモックス反応（嫌氣的

アンモニア酸化）を用いた窒素除去技術が汚泥返流水処理などを対象に実用化が加速してきている。凝集剤、消毒剤などの水処理用薬品の製造量は、都市や産業の成長とともに大幅に増加してきた。凝集剤は高性能な製品が次々と開発され、消毒用塩素については消毒副生成物の問題の指摘に対して、注入方法や貯蔵方法などの技術的工夫がされてきた。水処理に用いる化学製品は、各種水処理薬剤に加えてイオン交換樹脂、キレート吸着樹脂、活性炭、膜などがある。イオン交換樹脂は、半導体製造用水など純水製造には必要不可欠で、キレート吸着樹脂は、工場排水中の重金属の回収のための主要技術である。活性炭も各種水処理に広く用いられ、使用量も多い。膜については素材改良に加え、エンジニアリング面を含めて、1990年代から急速に使い勝手がよくなり、普及が進んだ。精密ろ過膜と微生物処理を組み合わせた膜バイオリアクター（Membrane Bioreactor：MBR）による廃水処理技術とRO膜による海水淡水化技術が、最も進展が大きかったといえる。

水資源がひっ迫している国、地域（中東、米国、豪州、地中海沿岸、中国等）では、海水淡水化技術の効率化が求められてきている。従来の主要な技術であった蒸留法から逆浸透（Reverse Osmosis：RO）法への技術転換が進んでいる。RO法について実用上の要請に対応するための研究開発が進められている。具体的には、エネルギー効率の向上、耐薬品性、耐久性に優れた膜、加えたエネルギーを回収する技術の開発、特にほう素など海水中に含まれて、飲料水中における濃度が制限される物質のより効率的な除去方法の開発などである。RO膜を利用した技術では日本が世界をリードしているが、海水淡水化システムの開発は中国などでも研究開発が進んでおり、絶対的な優位性はない。中国では、水道水源の悪化から、化学物質対応の浄水処理技術の開発が中心となっている。米国、欧州でも、膜メーカーが存在し、膜処理関連の技術において高いレベルを維持している。

下水処理水を水道水源として位置づける議論は、水資源のひっ迫とともに進んでいる。下水処理水の飲用利用は、間接的再利用と直接的再利用に分類される。間接的再利用は、下水処理水を一度、自然水系あるいは地下水系に開放させた後、適切な浄水処理によって飲料水を製造し、供給するシステムである。一方、直接的再利用は、下水処理水をRO膜、UV照射などの技術を駆使して一挙に飲料水として適合するレベルの水質まで変換し、そのまま自然水系に開放することなく供給するシステムである。都市域における河川水に下水処理水が含まれる割合は、場合によっては50%以上となることもあり、直接再利用システムと間接的再利用システムにおいて、浄水処理工程における原水水質は極端に異なるわけではない。しかしながら、システム異常への対応方法、住民感情への対応など、水処理技術以外の要因により、その適用に当たっては多くの考慮すべき要因が存在する。

図表2.2.4-1に水処理分野の最有力誌Water Research誌（IF=9.13）と、IWAが発行しているWater Science and Technology誌（IF=1.64）の筆頭著者の所属国を示す。日本からの掲載論文数は極めて少なく、中国の勢いに大きく離されている。後者のWater Science and Technology誌は、途上国におけるケーススタディーなども掲載され、米国からの投稿が少ないことなどトップジャーナルではなく、研究の活発さを正確には必ずしも表さないが、あまりに低調な英文情報発信能力は、今後の水処理技術の海外展開に不利に働くと懸念される。

Water Research誌への掲載件数について経年変化でみると、図表2.2.4-2のようになる。

図表2.2.4-3にWater Research誌（Vol. 184,2020）掲載論文のテーマを抜粋した。水処理分野の研究課題は極めて多岐にわたり、特定の技術開発に結び付かない潜在的な水質リスクを与える物質などの研究も多い。中国の論文に特にその傾向が多くみられ、さまざまな環境リスク対象物質や微生物に対し、幅広く研

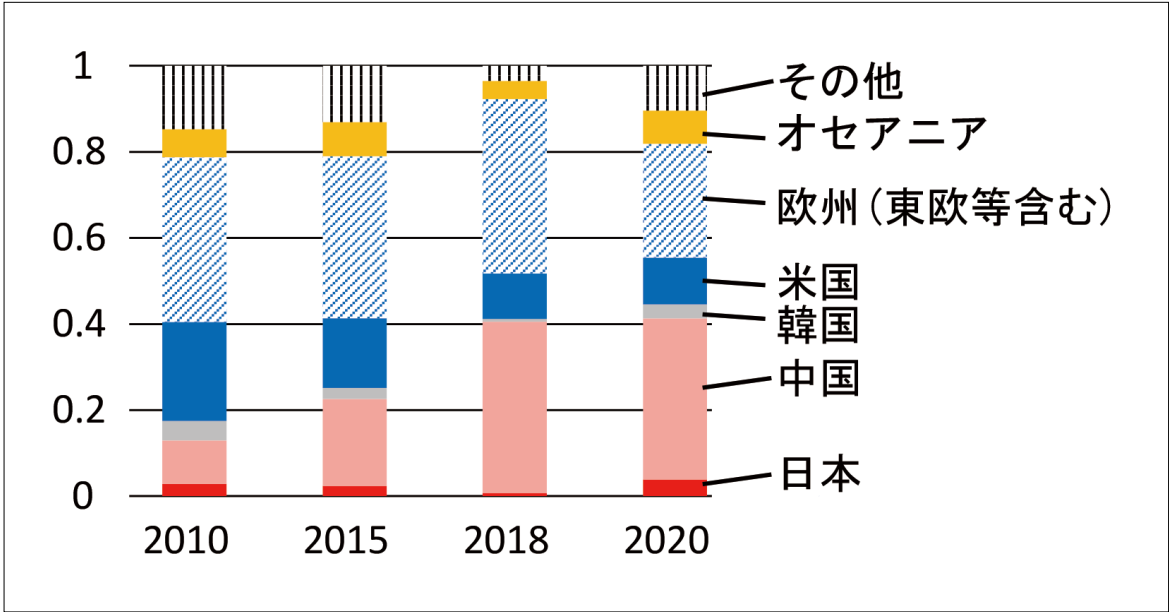
2.2

環境区分と研究開発領域

究が進展している。また、マイクロプラスチックや薬剤耐性菌などの近年の流行を研究にいち早く採り入れている。一方で、水処理技術の開発にそうした中国での基礎的研究が結びついているのか明らかではない。欧米の論文でもリスク発掘型の研究は見られる。新規性が高く、実用化や技術との関連で目的がはっきりした研究が多く、モデル化や水処理技術の開発に結び付く課題が多い。

図表 2.2.4-1 水環境分野の主要ジャーナル2誌の筆頭著者の所属国（2020 上半期）

国	Water Research 誌	Water Science and Technology 誌
	vol.181-184, 2020	vol.81, num.1-8, 2020
日本	7	2
中国	68	63
韓国	6	1
米国	20	3
米国以外の北米	10	8
欧州（東欧、トルコ含む）	48	58
オセアニア	14	1
東南アジア、南アジア	4	10
南米、アフリカ、中東	5	36



図表 2.2.4-2 Water Research 誌への掲載件数比率の経年変化
(※2010年と2015年は責任著者、2018年と2020年は筆頭著者をそれぞれ集計)

図表 2.2.4-3 Water Research 誌 (Vol. 184,2020) 掲載論文のテーマの抜粋

国	掲載論文のテーマ
日本	浄水配水管中で再増殖する細菌の基質 消火剤に含まれるフッ素系界面活性剤 塩素消毒配水管中のマンガン蓄積
中国	消毒副生成物の総説 廃水処理での N_2O 生成の総説 ビスフェノール A の塩素化物の廃水処理での生成と分解 溶存性有機物濃度と河川の細菌群集の関連 UV- 塩素処理での消毒副生成物 海洋での難燃剤汚染の地理的分布 マイクロプラスチック付着疎水性化合物 ノニルフェノール分解産物の女性ホルモン活性 新規吸着光触媒による薬剤耐性遺伝子や薬剤耐性菌の除去 合成女性ホルモンの底質での分解への天然有機物の影響 湖沼の水温形成メカニズム電気化学反応器の性能へのフルボ酸の影響 お茶を入れる際の消毒副生成物の生成抑制 酸化池処理システムの水理学的考察 嫌気性処理システムでの VFA 生成の AI 予測 藻類の影響を受けた塩素処理での消毒副生成物 低濃度医薬品の魚類への影響 新規の脱窒反応経路に関する検討 養殖池からのメタンガス排出 北西太平洋でのヒ素の形態別動態 閉鎖性海域での抗生物質のリスク コロイド粒子の土壌からの流出 揚子江の粒子状有機炭素の動態 アナモックスでの汚泥性状の変化 染色排水の処理生物膜形成の第一段階 マイクロプラスチックによる重金属の輸送 マイクロプラスチックによるカドミウムの輸送
米国	森林火災により生成した汚濁成分の処理困難性 活性炭への消毒副生成物の吸着への前塩素処理の影響 下水道によるウイルス疾患の調査 藻類由来有機物によるシアノトキシン除去阻害 イオン交換樹脂の電気再生 代謝活性を有する細菌のショットガンシーケンスによる測定 GIS との結合による糞便汚染の起源分析
韓国	嫌気性電気培養法の総説 排水処理施設からの N_2O 生成 新規の窒素系塩素処理副生成物 ミクロキスティンの促進酸化処理 抗生物質の病院排水からの処理
北米	人工甘味料の廃水トレーサーとしての活用 フッ素系界面活性剤の粘土表面での挙動 ミジンコの代謝による発生毒性の検出 水温とカビ臭物質の活性炭除去との関連

2.2

 俯瞰区分と研究開発領域
 環境区分

欧州	廃水処理に関するLCAの総説 浄水処理でのアルデヒド類の除去のための生物処理の馴致 バイオ生成ガスからの有用物質生産における含硫黄物質による阻害 粒子の沈でん理論 生物活性炭層によるマイクロプラスチックのろ過 UV処理下水処理水中の薬剤耐性大腸菌 移動研究室でのメタゲノム水質モニタリング 糞便汚染指標とソーストラッキング 雨水利用のコスト解析 配水管の破断に対するネットワーク強靱性 プラスチックから溶出する成分の生態毒性 硫黄を多く含む廃水の嫌気性MBR処理 下水処理水中の消毒副生成物の長期モニタリング フェントン処理でのジアゼピン系医薬品の分析法 有機塩素化合物のモニタリング方法 飲料水原水中の新規消毒副生成物前駆体 塩素処理、前オゾン処理における消毒副生成物 フローサイトメトリーによる消毒効果のモニタリング ヒドロキシルアミンの水生生物による代謝 F特異大腸菌ファージの検出法
オセアニア	水処理施設での金属腐食防止剤の有用性 中国のウォーターフットプリント解析 トリハロメタンの生成モデル 人工DNAによる表流水のトラッキング
アジア	下水汚泥の脱水のための新規添加剤 香港での食品廃棄物と下水の混合処理 SARS-CoV-2に関する下水疫学
南米	海岸域での侵入種である貝類による水質浄化

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・新型コロナウイルス感染症の世界的流行に伴い、感染状況モニタリング方法として、下水中の新型コロナウイルス濃度を把握する下水疫学の有効性が注目されている¹⁾。従来の感染者数の把握は、検査対象が重症者から無症状者に広がることにより影響される指標であり、昼間人口や住民登録していない人口などに分母となるべき人口も左右され、政策判断の指標として不完全である。一方、下水中のウイルス濃度は、症状が生じるよりも前に濃度が立ち上がるとされ、早期の感染予測が可能になること、また、検査対象などの施策の差によらない地域間比較が可能になるなど、いくつかの点で、従来指標に対して有利な点がある。また、新型コロナウイルスの問題が収束したとしても、新たな感染症に人類が直面する可能性や、災害時の衛生状態の把握など、さまざまな目的で下水疫学の有用性が予想される。必要となる技術について、下水中からの病原微生物のDNAあるいはRNAの抽出技術やReal-time PCR法による特定遺伝子の特異的検出法であり、基本的にはそれぞれ確立している要素技術の組み合わせとなる。しかし、実際には調査対象によって、使い分けが必要で、感染症の流行に機動的に対応する研究や人材が国際的に見ても不足している。また、全国や海外での調査が迅速にできるよう、平時からこの分野に特化した人材や技術、協力体制を保有しておく必要がある。
- ・浄水処理技術を急速ろ過法から、より水処理性能が高度で確実な膜ろ過方式に変更する検討がなされ、

維持管理コスト削減のために大型化、効率化が注目されている。特に、原水水質が良好ではない地表水への適用に向けて、各国のメーカーがしのぎを削っている。例えば、従来のポリマー膜ではなく、セラミック膜を利用した技術の適用が進んでおり、モノリス型の円筒形膜ユニットを集積した大型ユニットの開発が注目を集めている。セラミック膜は日本のメーカーの技術に強みがあり、海外展開がいくつか成功している。

- ・海水淡水化技術のエネルギー消費量、および維持管理コスト削減は引き続き課題である。より耐久性の高い膜（ロバスト膜）やより透過性の高い膜の開発が注目を集めており、ポリマーに炭素粒子を混合させるなどの技術が開発されている。
- ・分散型水処理技術の事例として、P&Gの粉末型簡易浄水剤PURの取り組みが世界的に有名である。浄水剤PUR 1包で10リットルの水を浄化でき、水不足地域の子どもの安全な飲料水を提供している。現在では日本を含む先進諸国で1 for 1またはbuy 1 give 1と呼ばれる寄附購入キャンペーン（同社製品1点購入につき1包が寄附される）などを行い、SDGsに貢献する社会貢献型ビジネスモデルとして高い評価を得ている²⁾。イオン吸着剤を応用した分散型水処理技術では、国内では信州大学が独自の結晶成長技術により原子間間隙を調整したイオン吸着剤を開発している。その高い重金属イオン除去性能を生かして携帯型浄水ボトルNaTiOの事業化に到っており、産学連携の成果として注目を集めている³⁾。その他の凝集剤なども水処理薬剤メーカーが継続して開発を進めている。
- ・UV照射技術は、塩素耐性のあるクリプトスポリジウム対策として極めて有効だが、従来のUVランプは水銀を用いていることが問題となっている。それに対して、UV-LEDは製品レベルまで開発が進んでおり、社会実装の進展が期待されている。
- ・原水の持つ浸透圧をそのまま活用し、加圧なしで水を透過させる正浸透（Forward Osmosis：FO）技術の開発が進んでいる。FO膜そのものはRO用の膜とほとんど同じだが、ユニット化の工夫や正浸透に用いるドロー溶液の選定が課題である。
- ・海水と淡水との濃度差を利用し、RO膜や電気透析膜を用いて発電するシステムの開発が進んでいる。これらは、従来のエネルギーを利用して、海水から高濃度海水と淡水を製造するシステムの逆のシステムであり、低炭素化社会への対応として注目される。
- ・窒素除去の理論はかなり完成されており、実証試験段階に入っている技術が多い。環境省「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の「革新的な省エネ・創エネ生活排水処理システムの開発」（2017～2019年）で、三菱化工機の下水中の有機物のメタンガス化とアナモックス反応（嫌気性アンモニア酸化）による窒素除去を組み合わせた嫌気性MBR方式の開発が進められた。アナモックス反応を利用した窒素除去の水処理技術分野は、諸外国でも公的な研究資金の支援が見られる。一方、従来の硝化脱窒素型の窒素除去技術でも、AI技術を活用した生物反応槽への供給空気量を制御する技術が進展してきている。
- ・微生物燃料電池についても引き続き、廃水処理と発電を同時に行う研究が行われている。

2.2

環境区分と研究開発領域

- ・国内では高度成長期に整備が進んだ上下水道管路の老朽化が進んでいる。老朽化に加え、自然災害による漏水・破損事故は日本各地で発生しており、水道インフラの耐久状況の簡易な把握に対するニーズが高まっている。また、他国でも水道インフラの老朽化は同様に進んでいる。Fracta, IncはAI/機械学習を活用した水道管の劣化予測ソフトを開発し、米国や日本で各水道配管の破損確率を解析し、優先的に更新を行う診断サービスを行っており、水道分野におけるデジタルトランスフォーメーションの事例として注目される。
- ・排水に含まれる栄養塩、エネルギーなどの回収、有効利用技術について様々な検討や試験的研究が国内外で行なわれている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点

文部科学省とJSTのCOIプログラム(The Center of Innovation Program)で、信州大学、日立製作所、東レ、長野県などが共同で拠点研究を推進している(2021年までの予定)。カーボンナノチューブを配合させたRO膜の開発と応用技術などを開発している。

・省エネルギー型海水淡水化システムの実規模での性能実証事業

日立製作所と東レがNEDOの支援で実施している(2018年4月～2023年3月)。この事業は内閣府の最先端研究開発支援(FIRST)プログラムの「Mega-ton Water System」(2009～2013年度)のRO膜関連成果を発展させたもので、注目されている。

・国土交通省「下水道革新的技術実証事業(B-DASH)」

国土交通省下水道部が支援する実証プログラムである。近年の補助対象として、(1)災害時の水処理技術、(2)水処理汚泥の減量化、燃料化、農業利用、(3)ICT技術とAI技術、センサー技術を統合した水処理施設や管渠施設の制御(エネルギー高効率運転化)、診断、維持管理(4)膜利用水処理(MBR、雨天時合流改善、酸素供給、FO膜による水処理)などがある。JST-CRESTの研究開発課題「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」の基礎研究成果をもとに、沖縄県糸満市でかんがい用水の慢性不足問題を解決する手段として「下水処理水の再生処理システムに関する実証事業」が行われ、1日1000トンの再生水を提供する実証試験が実施されるなど社会実装を強力に支援している。

・水道技術研究センターの研究助成

A-Dreams共同研究(Aqua-Desirable, Reliable, Enhanced and Advanced Management System)(2018年～2022年)で「将来を見据えたスマートな浄水システムに関する研究」と「将来を見据えた官民協業による技術レベルの維持・向上に関する研究」が行われている。

・フューチャーデザインによる水道システムの住民意思決定

水道インフラの敷設更新は100年単位で考えるべき事業で、現在の最適化だけでなく、将来水道を使用する人々の利益も考慮する必要がある。人口減少により縮小する社会環境の中で、仮想将来世代を設定し、世代間利害対立の解消を図るフューチャーデザイン手法による住民参加型意思決定の実践的取り組みが行

われている⁴⁾。

・米国環境保護庁（EPA）の水研究助成⁵⁾

EPAは水環境に関連したテーマを設定し、競争資金を持続的に提供している。2019年に公募を開始した研究助成として「農業地帯でのパーフルオロアルキル化合物」「毒性のある藻類の異常増殖抑制のための栄養塩負荷削減方法」がある。これらは対象となる地域を変えて、これまでもEPAが支援してきた研究テーマである。

・欧州の水研究助成

EUのFP7（2007～2013年）、Horizon2020（2014～2020年）の重点分野の1つが水で、大型の研究支援が行われてきている。Horizon Europe（2021～2027年）でも5つのミッションエリアの1つに水が位置づけられ、引き続き大型支援が行われると予測される。

（5）科学技術的課題

- ・新型コロナウイルス感染症蔓延を契機として、下水中の病原微生物濃度を測定する下水疫学について、急速に期待が高まっている。従来の検査対象や病院からの報告だけに頼らずに感染症流行把握が可能になる技術の確立が国内外で関心を集めている。
- ・浄水処理技術を適用する浄水場は、大都市圏以外では小規模で遠隔地にあり、維持管理のための人件費をかけられない条件のものが多い。特に日本をはじめとする人口減少社会への対応において、これらの小規模浄水場への対応は大きな課題となる。また、都市圏の浄水処理や下水処理の感染症蔓延下での事業継続に当たっても、遠隔監視や遠隔操作のニーズが高まっている。一方、農業用水の調整のため、内閣府SIPの支援などによりIoT技術を活用したスマートメーターなどの開発が進んでいる。IoT技術やAI技術を活用して、水処理装置の維持管理を遠隔操作で、自動的に行うシステムの開発と海外展開が期待される。
- ・世界的な水資源のひっ迫の状況を受け、海水や下水処理水を原水とする水処理技術へのニーズは引き続き高まっていく。これらの原水から飲料水を製造する技術はすでに確立されているものの、維持管理コストの削減、膜などの耐久性の改善、加圧などに必要となる電力の削減は引き続き大きな課題である。RO膜では透過性、耐薬品性、耐久性などの性能が求められる。従来のポリアミドや酢酸セルロースなどのポリマー以外の素材を用いた膜の開発などが進んでいくと予想される。
- ・産業的な実用化が期待される水処理に関する課題は機械工学（オゾン生成器、分析機器）や化学素材（RO膜、MBR用精密ろ過膜、各種吸着剤、凝集剤）の分野に多い。水処理膜、光触媒、特殊生物処理、UV、凝集剤、吸着剤などの日本が得意とする技術の開発を促進することで国際的な産業競争力の向上が期待される。一方、学術的に注目される課題には分子生物学に係わる課題が多い。次世代シーケンサーを用いたゲノム解析、微生物群集解析により水処理プロセスに係わる微生物学（水処理に関する微生物、病原微生物と薬剤耐性菌の拡散、挙動）の深化は水処理分野にとどまらず環境、医療、生物学分野への波及効果が期待できる。2020年の新型コロナウイルスの世界的大流行により、下水疫学が

社会的に大きな期待を集めることとなったが、学術的な蓄積があって、はじめて検討が可能となったものであり、基礎基盤的研究開発の平常時からの蓄積が重要である。

- ・近年、世界各地で地震、津波、ハリケーン、台風、豪雨、山火事などの自然災害が激甚化、頻発化し、浄水システムもこれらへの対応が迫られている。浄水場その他の浄水システムを自然災害に対して強靱化する技術開発へのニーズが高まっている。自然災害により浄水システムが壊滅的な打撃を受けた後、迅速に簡易な浄水システムを構築する対策がいくつか既に検討されている。従来の精密ろ過を用いた家庭用浄水器技術をベースにして、河川水やプール水などから飲料水を得る装置や、トラックなどに水処理装置を積載したモバイル水処理システムが開発されている。後者については、省スペースで高度な処理性能を担保できる膜処理装置をユニットとして積載する機能向上などが課題として残されている。
- ・広範囲の浄水場でのデータを集中的に管理し、データを分析しつつ、適切な維持管理を行う集中型管理システムについて、今後の適用研究が期待される。
- ・活性汚泥や急速ろ過といった伝統的な水処理プロセスにおいても、市場規模が大きいこと、新たな除去対象化合物や新たな資源としての回収対象物質が生じること、人手不足による維持管理の軽減化が求められることなどから、さらに技術改良する研究が必要である。
- ・水処理、下水処理に係るエネルギー使用量はたいへん多く、地球温暖化の緩和策として、エネルギー高効率化が大きな課題である。下水熱の有効利用や廃水からのエネルギー生産などもシステムとして含めて検討する課題となる。また、下水からのリン資源などの有効資源の高効率回収システムは循環型社会の構築への貢献だけでなく、資源ナショナリズムの高まりの影響を受けずに資源自給率を高める技術として注目される。
- ・SDGsに関連し、管路システムが十分でない国・地域などでの浄水システムの分散化のニーズを満たすためには、原水水質により選定された各種の膜ユニットを用いた装置が主力となるとみられる。中国ではRO膜を利用した浄水器が既に普及しているが、この装置の信頼性の向上、コスト削減が引き続き関心を集めるとみられる。

(6) その他の課題

国内の水道事業は地方公共団体あるいは一部事務組合（県や市町村が事務を共同処理する組織の呼称）がほぼ実施しており、地方議会などへの対応が必要である。また、水道システムはユーザーの多くは住民であって、常に正常に稼働していなければならない、システム異常などの事態は絶対に避けなければならない状況にある。従って、従来と異なる新たなシステムの導入に対して、水道事業体は常に慎重で、実績が多い、あるいは長期にわたる実証実験のデータがあるなどの条件が新技術導入の条件になる。また、水道事業体は、一部を除いて基本的には市町村であり、新技術導入のための余裕がないケースがほとんどである。これらの背景は時には浄水技術の革新をためらわせる方向に働く。技術の革新のためには、水道事業の広域化が有効である。

社会普及や地方創成の観点では、魚類の養殖水、水族館、温浴施設などニッチな水処理市場の高度化と

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 環境区分

いった観光産業と水処理技術の連携も一考に値する。人口減少による地方の衰退に対して、下水道遊休施設を活用した魚と植物を同時に育てる循環型農業「アクアポニックス」や、下水処理水中栄養塩の有効利用を兼ねて、日照の確保できる場所で藻類を用いた有用物質生産などの技術開発の進展が期待される。

下水処理分野では国土交通省 B-DASH の支援で、実際に適用するレベルに近い技術を実装置に取り入れる実証実験など、非常にインパクトの高い応用研究・開発が行われている。一方、浄水処理分野では、国などが主体となった大型プロジェクトが十分ではなく、先進的な技術開発の実証試験などを進めていく環境としては厳しい状況である。水再利用や下水処理分野での状況を比較すると特に顕著で、浄水処理分野でも B-DASH のようなインパクトのある支援が望まれる。

海水淡水化分野では日本の膜メーカー主導による技術開発が進んでいるが、海水淡水化が適用される中東地域などの外国の事情に左右され、さらにプラント建設レベルにおいて日本の国際競争力が低下しており、システム開発面では日本は停滞している。浄水処理分野でも一部の膜メーカーは国際競争力をつけて世界的に展開しているが、浄水システムとしての展開はまだ不十分である。膜ユニットのレベルにとどまらずシステムのレベルでの国際競争力を日本の産業界がつけることで、日本の産業界の技術開発力も上がっていくと期待される。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●水分野の国際専門誌の掲載件数が中国と比べて少なく、英語発信力に課題がある。 ●膜処理、紫外線処理、高度浄水処理（オゾン・活性炭処理）、新規凝集剤（高塩基度ポリ塩化アルミニウム（PAC））、膜分離活性汚泥法（MBR）、光触媒などの技術、並びに病原性微生物の処理リスク評価などで、個々に優れた研究がみられ、国際的な貢献がみられる。
	応用研究・開発	○	→	●企業による技術開発は逆浸透膜、淡水化前処理用の限外ろ過膜、オゾン発生装置、MBR装置などの膜製造および機械設備産業分野では、海外からの大型受注をうけるなどの世界的な地位を維持している。 ●下水道分野では国土交通省 B-DASH 支援により、下水道の有効利用の実証技術開発が進められている。 ●水道分野では国立保健医療科学院において飲料水の安全、公衆衛生研究が精力的に実施されているが、欧米と比較して規模が小さい。水道技術研究センターでは、従来から産官学共同研究が推進されてきているが研究費は参加企業が支出する形態で、十分に大きい規模とは言えない。
米国	基礎研究	○	→	●下水中のウイルス濃度測定など、公衆衛生学と連携した研究や、その診断検査技術の事業化などの動きがみられる。 ●水不足地域を多くもつ背景から、海水淡水化や下水処理水再利用に関する基礎研究、とくに下水処理水利用のリスク評価研究が盛んである。 ●水処理分野のトップジャーナルである Water Research 誌への掲載件数が多く、水処理において重要な原理や新規の汚染物質に関する知見を発信している。 ●NSF（全米科学財団）による継続的な基礎研究支援と EPA（環境保護庁）によるテーマを絞った新規汚染物質についての知見の集積支援により、国際的に注目される研究が発信されている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	応用研究・開発	○	→	●麻薬成分物質を下水から検出する技術をもっていた研究者らがベンチャー企業を設立し、下水中の新型コロナウイルスを受託計測する事業を展開している。 ●膜分離技術、イオン交換樹脂の水処理素材、地下水利用技術、下水廃水の再生利用などの分野で、経験が多く、産業化も進んでいる。 ●慢性的水不足問題を抱えるカリフォルニア州、テキサス州、フロリダ州、アリゾナ州、ネバダ州等をはじめ関心が高く、住民との合意形成などのアプローチをととして、社会実装が進んでいる。下水処理水の再利用について、間接および直接の飲用再利用の実用化に向けた検討が進展し、テキサス州で米国初となる下水処理水の直接飲用再利用が導入された。海水淡水化事業も盛んである。
欧州	基礎研究	◎	→	●オランダKWR（水研究所）やスイスEAWAG（水科学技術研究所）などが高い研究レベルを保っている。両国とも塩素消毒によらない給水方式を採用していることから基礎研究のニーズが大きい事情も一因に考えられる。とくにオランダKWRは各水道事業体と強力なネットワークを構築していた強みから、下水中の新型コロナウイルス検出と相関性を見出す研究に早期かつ組織的に着手し、国際誌に掲載するなど世界をリードする研究を展開している。 ●個別の有害物質への関心が高く、マイクロプラスチックなど新規の汚染物質に関する知見を多く発信している。アナモックス反応による窒素除去など原理的に新しい水処理方法の提案能力や、薬剤耐性菌などの新しい汚染物質を見つけて発信する能力が高い。 ●モデル化やコスト推算などに関連した研究が進展している。 ●共通の大陸河川を要し利害関係を伴う国家が多い背景から、EU水枠組み指令（2000年12月発効）やEU飲料水指令（2018年2月改正）などの政策の関心が高く、環境保全、流域管理、健康リスク等の多様な側面から基礎研究が高い水準で行われ、国際的にリードしている。 ●ドイツは世界初のセラミック膜などの開発実績があり、水道分野における独自の膜ユニットの開発意欲が日本よりも旺盛で、基礎研究のポテンシャルも高い。
	応用研究・開発	◎	→	●オランダの定量的微生物リスク評価手法の整備と実務への導入が特筆される。オランダ北部の水道事業体PWNは2015年から膜ろ過法を浄水場に導入しており、膜ろ過に対する技術開発も盛んである。 ●水メジャー（英国テムズウォーター、仏ベオリア、スエズ）の技術開発力は高く、世界水協会（IWA）などの国際会議における発表件数も多い。水メジャーは国際展開に多くの実績があり、多様な排水や地域の状況に合わせた適切な処理プロセスの設計に強みがある。水処理プロセスの設計、更新のために有用なシミュレーションモデルが優れている。中東やアジアの発展途上国に対する水道ビジネスを広く展開しており、適用技術に関する応用研究のレベルが高い。 ●スイスは風光明媚な観光立国という背景もあり、下水に継続的に注力している。2040年までに医薬品や新興化学物質など各種の微量物質を下水から除去する処理施設を導入する更新が進められている。 ●英国の水道事業は完全に民営化されているが、独立機関のOfwatの監視下におく独自の体制をとっている。民営化による浄水技術の基礎研究や応用研究に対する影響は確認できない。
中国	基礎研究	○	↗	●水資源逼迫や深刻な水質汚染への関心から、上水分野だけでなく環境工学分野における教員・学生の陣容が急速に拡大し、研究レベルも上がっている。IWA（世界水会議）などの国際会議での発表件数や、Water Research誌やWater Science and Technology誌での論文掲載件数が飛躍的に増加している。日本の発表件数を桁で上回っている。とくに精華大学などの有力校は潤沢な予算を活用して、研究レベルが非常に上がっている。

				●様々な水処理用吸着材料、既知の汚染物質の水処理プロセスでの挙動、最新の処理プロセスの運転経験蓄積など多数の論文報告が発信されている。多くの研究が中央政府のNational Natural Science Foundation of China (NNSFC) による支援を受けている。さらに、中央政府の支援と重複して、州政府からの支援も得ている研究も多い。戦略的に外国人研究者を招聘または外国人研究者と連携して英語文献を発信している。研究論文を国際誌に投稿するための体制が、国家的に形成されている。
	応用研究・開発	○	↗	●膜処理分野では、低コスト性の武器を維持しながら、開発・製造能力を向上させて、精密ろ過膜などの品質も上げてきている。日本のメーカーの製品はコスト的に対抗が極めて難しくなっている。RO膜の開発では、まだ日本メーカーが優位性を保持しているが、今後については技術力の差は縮まっていくと予想される。 ●水需要が大きく、MBRなどの新技術導入が進み、下水再生利用の経験が急速に蓄積されている。 ●水十条などの環境政策が強烈に進められ、工場や鉱山に由来する重金属汚染、石炭採掘に伴う廃水などの産業公害対策が一気に進展している。 ●急速に実力を付けている基礎研究を水処理産業に結び付けられている事例や先見的な報告があまり確認できない。
韓国	基礎研究	○	↘	●韓国水資源公社 (K-water) が基礎研究に継続的に取り組んでいる。 ●ナノテクノロジーを用いた水処理など新規性の高い研究は実施されているが、水処理全般の論文発表数が減少している。既存技術の改良発展のための地味だが研究の裾野を広げる着実な研究は低調で、懸念される。
	応用研究・開発	△	↘	●過去には韓国政府主導で水処理技術や膜処理技術の国際競争力を高める国家プロジェクトの施策が打ち出されていたが、近年は勢いがみられない。海水淡水化分野で過去に世界的な競争力を有していた斗山重工業が逆浸透膜開発で出遅れ、主力事業の石炭火力発電所と原子力発電所の低迷から経営危機に陥り、海水淡水化の新規開発にも動きがみられない。 ●下水処理水の再生利用、畜産糞尿の処理などの研究は行われている。
豪州	基礎研究	○	→	●水資源が偏在し、絶対量としても水不足である国土条件を背景として、下水の再生利用や逆浸透膜、雨水利用に関する研究が盛んである。
	応用研究・開発	△	→	●膜分離の技術開発研究は継続的に行われており、実装が進められている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2.2

環境区分と研究開発領域

関連する他の研究開発領域

- ・ 水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水) (環境・エネ分野 2.2.5)
- ・ 社会システムアーキテクチャー (システム・情報分野 2.3.3)
- ・ 分離技術 (ナノテク・材料分野 2.1.5)

参考・引用文献

1) M. Kitajima et al., "SARS-CoV-2 in wastewater : State of the knowledge and research needs", *Science of the Total Environment* 739 (2020) : 139076, doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.139076

2) P&G, 「「安全な飲み水を 世界中の子どもへ」活動」『P&G』, <https://jp.pg.com/community-impact/#supporting-communities> (2021 年 1 月アクセス)

3) 信州大学独創図鑑, 「水を安全に変える、信大クリスタルが変える。」『信州大学』, <https://www.shinshu-u.ac.jp/zukan/cooperation/post-22.html> (2021 年 1 月アクセス)

4) 吉岡律司「矢巾町におけるフューチャーデザイン」『学術の動向』 23 巻 6 号 (2018) : 10-12, doi : 10.5363/tits.23.6_10

5) United States Environmental Protection Agency (EPA) , “Water Research Grant”, EPA, <https://www.epa.gov/research-grants/water-research-grants> (2021 年 1 月アクセス)