

2.9 持続可能な資源利用

2.9.1 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、細菌やウイルスなどの微生物および新興汚染物質等の検出と評価や、水管理システムを効率的、安定的に利用するためのICT応用等、水処理のエネルギー高効率化等の研究開発を扱う。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、自然災害などの非常時のための分散処理システムも含める。公衆衛生に関わる上水道や下水道および浄化槽等の施設・設備に関する技術的検討に加えて、それらに関わる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

飲用水、公衆衛生、下水疫学、QMRA（定量的微生物リスク評価）、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であり、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。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されなければならない。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や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い、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が、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、社会的ニーズが極めて高い領域である。適用する地域ごとに自然的、社会的条件が多様であるため、最適技術を判別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。

世界では、衛生的なトイレを利用できない人や安全な飲料水を入手できない人、きれいな水で手洗い、うがいできない人がまだ多くいる¹⁾。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するリスク管理、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（COVID-19）問題から、下水疫学が期待をもたれている。日本国内では以前から、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、下水疫学が研究されていた²⁾。ポリオウイルスについては、下水や環境水による再流行の監視が我が国を含む世界各国ですでに社会実装されている。下水中の新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）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た。

排水基準や水道水質基準については、日本をはじめ世界各国で年々、厳しくなっている。対応が必要な物質の種類が増加し、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いる。

廃水処理分野では、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た。一方、栄養塩を含んだ水を排水した方が、漁業の振興に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という要求であり、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。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、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、原水に含まれる様々な汚濁物質あるいは飲用に適さない成分を除去し、安全でおいしい飲料水を製造することが求められる。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。

下水処理の分野では、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。従来より、嫌気性処理が濃厚排水の処理や汚泥の処理に用いられ、メタンに転換してエネルギー回収が行われてきた。廃水処理技術における近年のトレンドとして、単なる汚濁物質の除去ではなく、エネルギーや元素（窒素、リン、その他の有用金属など）の回収を通して循環型社会への対応を目指すものが多い。

水処理プロセスでは様々な薬品や装置が用いられる。凝集剤は硫酸バンドなどの歴史のある薬剤に加えて、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。イオン交換樹脂、キレート吸着樹脂、活性炭、膜、紫外線（Ultra Violet：UV）照射装置、汚泥脱水機などが水処理に用いられている。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。UV照射装置について、従来の水銀ランプに比べ、小型で水銀を含まないなどの利点がある紫外線発光ダイオード（UV-LED）の研究開発が行われている。

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特に求められる。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、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が進んでいる。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。

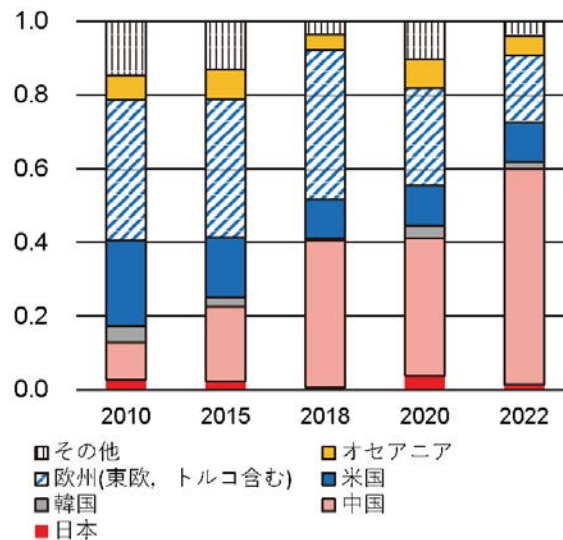
下水処理水の飲用利用は、間接的再利用と直接的再利用に分類される。間接的再利用は、下水処理水を一度、自然水系あるいは地下水系に開放させた後、適切な浄水処理によって飲料水を製造し、供給するシステムである。一方、直接的再利用は、下水処理水をRO膜、UV照射などの技術を駆使して一挙に飲料水として適合するレベルの水質まで変換し、そのまま自然水系に開放することなく供給するシステムである。都市域における河川水に下水処理水が含まれる割合は、場合によっては50%以上となることもあり、直接再利用システムと間接的再利用システムにおいて、浄水処理工程における原水水質は極端に異なるわけではない。しかしながら、システム異常への対応方法、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。水資源のひっ迫する国だけでなく、国際宇宙ステーションなどで既に採用、稼働しており、実際に役立っている点は強調してよい。

図表2.9.1-1に水処理分野の最有力誌Water Research誌（インパクトファクター=13.4）の筆頭著者の所属国を示す。2020年の4号分と2022年の16号分での調査とを比較している。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。わが国のあまりに低調な英文論文誌への発信状況は、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2.9.1-2のようになり、中国の増加とそれにとまなう欧州、米国の減少が顕著である。

図表 2.9.1-1 水環境分野の主要ジャーナルWater Research 誌の筆頭著者の所属国

	vol.181-184, 2020	vol. 208-223, 2022
日本	7	14
中国	68	558
韓国	6	18
米国	20	104
米国以外の北米	10	13
欧州（東欧、トルコ含む）	48	173
オセアニア	14	50
東南アジア、南アジア	4	9
南米、アフリカ、中東	5	16



図表 2.9.1-2 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～2022年は筆頭著者をそれぞれ集計)

図表 2.9.1-3 に Water Research 誌に 2022 年に掲載された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、幅広く研究が進展し、マイクロプラスチック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が、処理技術として新しい処理方法を追うというよりも、50年以上の歴史のある伝統的な処理技術（たとえば、活性汚泥法、嫌気性消化法、光合成細菌を利用した水処理、生物膜法など）を学術的に深めたり応用面で広げたりするタイプの持続的な研究が多くみられた。電気化学的処理方法、MBR、オゾン処理、光触媒など比較的新しい水処理技術については、中国やアジア諸国などで知見の蓄積が続いており、新しい処理対象物質、高効率化などの研究が多くみられた。消毒副生成物や栄養塩の流域管理といった重要なテーマは、世界の各地で継続して取り組まれている。COVID-19に関する下水疫学についての研究は、

2022年前半という調査期間のWater Research誌に、中国、シンガポール、欧州（ドイツ、スペイン、チェコ、フィンランド）、ニュージーランド、オーストラリア、米国、カナダ、ブラジル、アルゼンチンからの合計17報の論文が掲載されており、先進国だけではなく南米からの論文報告も掲載された。わが国からの積極的な情報発信が望まれる。

図表2.9.1-3 Water Research誌（2022上期）掲載論文のテーマの抜粋

国	掲載論文のテーマ
日本	微細活性炭に付着した微量化学物質 太陽光下での光触媒による廃水処理 銅制限下における <i>Nitrospira</i> による硝化反応 凝集過程や精密ろ過におけるモデルウイルスの除去 水鳥のいる湖沼でのカンピロバクター密度の季節変動 都市下水の直接ろ過による炭素回収 植物性プランクトンの増殖のための窒素とリンの比の与える影響
中国	UV/過酢酸処理によるシアノバクテリアの不活化 湿地での臭素系微量化学物質の分解過程の放射性同位元素による調査 人的影響と地球レベルの気候変動による植物プランクトンへの影響 下水汚泥のガス化へおよび電気化学的前処理の効果 ジルコニア製ナノろ過膜による油分含有ナノ粒子排水の処理 細菌-藻類共存グラニュールによる炭素吸収型水処理 膜ナノ反応器による硝酸の電気化学的還元 下水処理水の毒性のオミクス解析 アナモックス反応の医薬品工業排水処理への適用 ポリスチレンナノプラスチックの集塊化 エレクトロフェントン系ラジカル反応によるシアン化合物の処理 重金属存在下での名のプラスチックの集塊と堆積速度
米国	硝化細菌の固定化処理のモデル化 水圧破碎油井排水に用いられる薬品 大気からの窒素降下が湖水の水質に与える影響 生物膜の真核生物による捕食 農業地帯での排水形態が栄養塩の収支に与える影響 オゾン処理における臭素酸生成量のモノクロラミンによる抑制 定量PCRによるレクリエーション水環境のモニタリング
韓国	下水処理場での薬剤耐性遺伝子 大腸菌の植生や藻類との相互作用 窒素系消毒副生成物の鉄(VI)処理による生成 微量物質の定量における最適化のための深層学習の利用 地下水涵養におけるマイクロプラスチックに由来する有機物による汚染 放射性ヨウ素の吸着剤による除去
北米	生物活性炭処理における吸着と分解 底質-水相間の微量汚染物質の動態を測定するための新型パッシブサンプラーの開発
欧州	雨天時流出下水による抗生物質耐性汚染 農薬による水環境汚染が見過ごされる理由 太陽光によるウイルスの不活化のモデル化 生態リスクを支配する因子 活性汚泥の超音波処理 下水汚泥の水熱処理 窒素系消毒副生成物の生成メカニズム 下水処理水のオゾンによる高度処理での吸光度などによる制御方法 ネオニコチノイド系農薬の生態毒性の中国での調査 デジタルPCRによる新型コロナウイルスの下水モニタリング バイオリアクターの生物膜を制御することによるファウリング防止 貝中のピブリオ属細菌の優占種 膜生物分解性プラスチックの分解過程で生成するマイクロプラスチック 活性汚泥微生物のバルキングのモデル化 富栄養海水からのリンの回収によるブルーエコノミーの実現

オセアニア	デジタルツインによる生態系劣化の観測 都市からの雨水流出時の金属の化学種 都市の水管理の将来 下水疫学的手法による新型コロナウイルスのモニタリングの際の低濃度域の扱い 持続可能な農業のための太陽光を用いた海水淡水化と土壌からの脱塩 活性炭や精密ろ過による腸管系ウイルスの除去 光合成細菌による廃水処理の屋外での実証実験
アジア	難分解性廃水の電気化学的膜バイオリクターによる処理 特殊な質量分析計による消毒副生成物の解析 MBR 活性炭-逆浸透プロセスでのエネルギーとアンモニア回収の必要性 ナノ光触媒による養殖用水の処理 クオラムクエンチングによる嫌気性 MBR のファウリング制御 嫌気性消化における消化温度のスタートアップ時のコントロール 磁気イオン交換による消毒副生成物の除去の質量分析による評価
中東	海水淡水化の際の残留塩素の有無が微生物学的水質に及ぼす影響 活性炭表面への吸着のリアルタイムモニタリング 持続的な雨水生物ろ過による微量化学物質の分解 下水管中の固形物堆積に関する機械学習の応用 MBRと促進酸化処理の組み合わせによる微量物質除去率向上と膜ファウリングの防止 人工衛星からの紫外領域による沿岸環境のモニタリング 膜蒸留プロセスでの熱勾配とバイオフィアウリングの関係
南米	水質測定計画のデータマイニングによる最適化 アルゼンチンでの下水疫学による新型コロナウイルスのモニタリング
アフリカ	尿からの尿素の回収のための逆浸透-ナノろ過プロセス

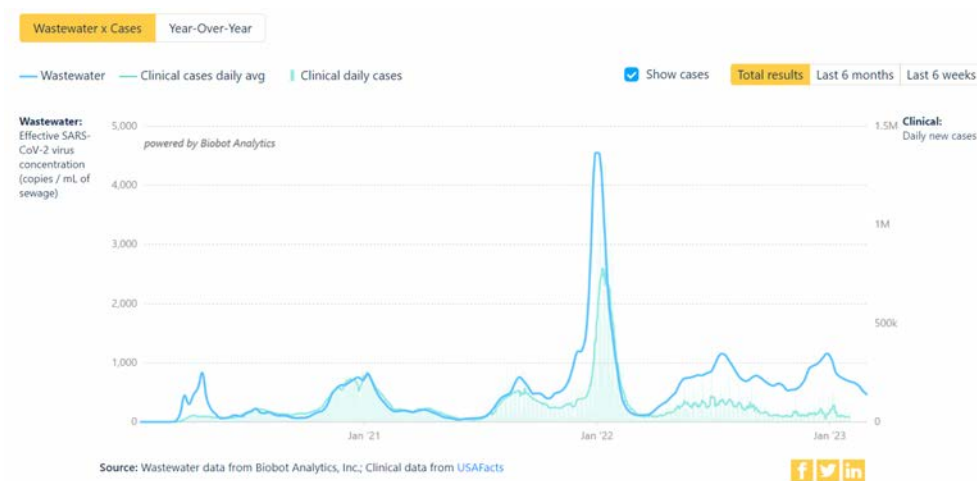
(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 下水疫学

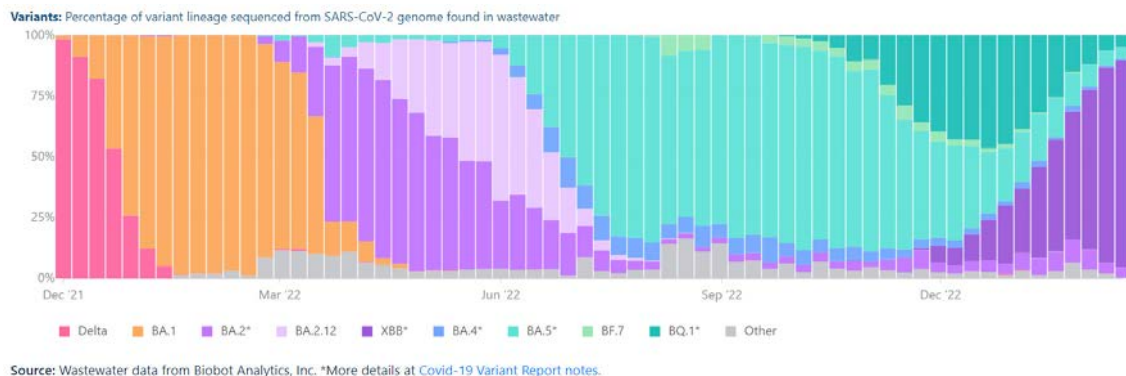
- ・ COVID-19の世界的流行に伴い、感染状況モニタリング方法として、下水中の SARS-CoV-2 濃度を把握する下水疫学の有効性が注目されている²⁾⁻⁶⁾。下水中病原体の種類と量から下水集水域における感染症の広がりを把握する取り組みは以前からポリオウイルス⁷⁾ やノロウイルス⁸⁾ が対象とされてきていた。我が国を含む各国で下水からの COVID-19 感染性の有無が試験されているが、現在まで下水から COVID-19 感染性試料は検出されていない⁹⁾。SARS-CoV-2 に加え、インフルエンザウイルス、RSウイルス、サル痘ウイルス等に研究対象が拡大している。インフルエンザウイルスについては、札幌市が 2022 年 10 月から調査結果を発信している¹⁰⁾。下水中からのウイルス回収技術は乱立の様相を呈している。必要となる技術は、下水中からの病原微生物の DNA あるいは RNA の抽出技術やリアルタイム 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。2021 年末から国際標準化機構 (ISO) の委員会が立ち上っている。日本国内では ISO により定められた手法を使用する必要は必ずしもないが、日本国外で下水調査の受託を行う場合には、ISO 委員会の動向追跡は必須である。
- ・ 2022 年 9 月から、日本国内での COVID-19 の全数把握を止めて、簡略化されている。全感染者を追跡しなくなった後、下水モニタリングの重要性は増しているものと考えられる。我が国では国土交通省によるモデル都市での下水中 SARS-CoV-2 濃度情報の発信¹¹⁾ などの取り組みが実施されている (2023 年 3 月時点)。各国でも同様の情報発信が行われている¹²⁾。産学官連携が進んでいる米国では米国疾病予防管理センター (CDC) と米国保健社会福祉省 (HHS) が、2020 年 9 月に国家下水調査システム (National Wastewater Surveillance System: NWSS) を立ち上げ、1,000 を超える下水処理場のデータを集めて、SARS-CoV-2 濃度の増減情報を発信している¹³⁾。米国はワクチン接種率向上などを背景

に2022年1月からCOVID-19の臨床による全数把握を止めている。同月から無料配布を始めた家庭向け感染検査キットは結果が陽性でも報告義務がなかった上に、同年8月にその無料配布を終えるなど、2022年以降に公表されている臨床での感染報告者数に正確性はなくなっている。臨床での感染報告者数が大幅に過小評価されていること¹⁴⁾ や、SARS-CoV-2 オミクロン株の感染者の過半数が感染の認識がなかった調査結果¹⁵⁾ なども複数出されている。そのような背景から、我が国よりも先に、下水疫学調査データへの期待がもたれている。2017年創業のMIT発ベンチャーのBiobot Analytics社はいち早く全米の下水調査を事業化し、2020年1月以降の下水試料でのSARS-CoV-2濃度変化(図表2.9.1-4)だけでなく、変異の解析を行い変異の検出比率(図表2.9.1-5)も発信している¹⁶⁾。



図表 2.9.1-4 全米の下水中 SARS-CoV-2 濃度の推移 ©BIOBOT ANALYTICS, INC

(水色の線が下水中 SARS-CoV-2 濃度、薄緑の線が臨床 COVID-19 感染者報告数。米国が COVID-19 の臨床検査による全数把握を中止した 2022 年 1 月以降も下水中 SARS-CoV-2 濃度の増減で COVID-19 流行状況が読み取れる。)



図表 2.9.1-5 全米の下水から検出した SARS-CoV-2 ゲノムの配列検査による変異の比率の推移 ©BIOBOT ANALYTICS, INC

(2021年12月以降、デルタ(桃色)、BA.1(橙色)、BA.2(紫色)、BA.2.12(薄紫色)、BA.5(薄青緑色)、BQ.1(薄緑色)、XBB(濃い紫色)と主流の変異が変化している推移が下水疫学調査でも捉えられている。)

② 膜ろ過技術

- ・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¹⁷⁾。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、シリカやホウ素などの除去性能を向上させた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。電気透析と微生物燃料電池を同じ反応器内で実現する微生物脱塩についても研究が進められている。
- ・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。

③ UV照射技術

- ・UV照射技術は、塩素耐性のある病原原虫クリプトスポリジウムの不活化に極めて有効であることを一つの動機として、国内外の水処理で消毒技術としてすでに実装されている¹⁸⁾。また、UVと酸化剤（過酸化水素、塩素、オゾンなど）を併用してラジカルを生成し汚染物質を酸化分解する紫外線促進酸化処理（UV-based Advanced Oxidation Process : UV-AOP）の研究開発も盛んで、中国ではすでにカビ臭対策として浄水場で実装されているほか、シンガポールや米国では下水再生処理に用いられている。紫外線で光触媒を励起してラジカルを生成する処理も、紫外線を利用した酸化処理の一つである。従来のUVランプは水銀を含んでおり、水俣条約の発効など無水銀を志向する国際的潮流の中で将来展望を描きがたい状況にある。一方、UV-LEDは半導体開発を担う応用物理学の分野において高出力化・高効率化の研究が盛んなほか、国内外の企業による素子開発や水処理モジュール開発が加速している。今後のUV-LED開発と産業としての成長、社会実装のさらなる進展が期待されている。

④ 窒素除去

- ・窒素除去では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、諸外国でも公的資金の研究支援が見られる。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。

⑤ 微生物燃料電池

- ・微生物燃料電池について、廃水処理と発電を同時に行う研究が継続的になされている。実用化に向けた特許取得やスケールアップが栗田工業など民間企業の手で進められている。

⑥ 管路の劣化診断

- 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。

⑦ 排水中資源回収

- 排水や海水淡水化濃縮水、水処理汚泥に含まれる栄養塩、有用元素（リチウム、マグネシウム、レアメタルなど）、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。単なる処理が目的でなく、処理と資源回収を同時に行う方法に関する技術開発が多く行われている。

⑧ 新興汚染物質のモニタリング、対策

- 2020年に水質管理目標設定項目¹⁹⁾にPFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）・PFOA（ペルフルオロオクタン酸）等の難分解性有機フッ素化合物（PFAS：ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物）が加わった。水質管理目標設定項目は、水道水で守られる水質基準の51項目と別で、水質管理上留意すべきものとして定められている。環境省の2021年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査²⁰⁾では、泡消火剤などPFOS・PFOA利用製品の製造、使用、保管、廃棄等に関する施設や既判明箇所など重点的な調査地点を合計143地点選び、調査された（内訳：海域7地点、河川78地点、地下水53地点、湧水5地点）。その結果、合計21地点から指針値（PFOSとPFOAの合算値で50 ng/L）を超える濃度が各地で検出された（内訳：海域0地点、河川7地点、地下水11地点、湧水3地点）。そのうち地下水4地点と湧水1地点では500 ng/Lを超えていた。これは地下水の滞留時間の長さに関与するものとみられる。報道等でも取り上げられ、社会の関心も高まっている。

⑨ 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²¹⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

- 内閣官房「ウィズコロナ時代の実現に向けた主要技術の実証・導入に向けた調査研究業務」「ウィズコロナ時代の実現に向けた主要技術の実証・導入に係る事業企画 下水サーベイランスの活用に関する実証事業」（2022年度、1件最大3000万円）

全国26自治体において、下水サーベイランスの社会実装を試みる実証事業が行われている。各自治体で採取した下水中のウイルス濃度が分析され、下水道施設の処理区における感染状況データ（感染者数等）との比較分析が行われる。

- 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た。

• 国土交通省「下水道応用研究」(2022年度、1件最大3000万円)

国土交通省下水道部が支援するプログラムで、大学等による研究室レベルの研究を終え、企業等による応用化に向けた開発段階にある研究、または下水道以外の分野で確立した技術について、下水道分野へ適用するための研究への支援を目的としたものである。近年の補助対象として、(1) 小規模処理場における省エネ型水処理技術、(2) 地域資源循環に資する下水道資源を活用した創エネルギー技術、(3) 施設の老朽化状態を把握するためのIoT活用モニタリング技術、(4) 下水道の水質管理による健康リスクの把握技術、(5) 下水道施設における創エネルギー化技術、(6) 水処理施設における温室効果ガス削減技術、(7) 地域資源循環に資する下水道資源を活用した技術、(8) 施設の老朽化状態を把握するためのIoT活用技術、などである。

• 文部科学省・JST COIプログラム (The Center of Innovation Program)「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」(2013～2021年)

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、カーボンナノチューブを配合させたRO膜の開発と実海水による実証運転、タンザニアと連携したフッ素吸着剤の開発などが実施された。

• JST 国際共同研究支援 (SICORP、SATREPS等)

水利用・水処理に関する多様な研究支援、国際交流支援が相手国や目的に応じて継続的に行われている。具体的には、2022年からはベトナムと共同でSATREPS「水汚染耐性のある水供給システムの構築」研究課題、アフリカ各国とAJ-CORE「環境科学」分野、2020年からはアジア各国とe-asia「イノベーションのための先端融合分野（水資源管理）」分野、2019年からは欧州各国とEIG CONCERT-Japan「持続可能な社会のためのスマートな水管理」研究領域などが採択、推進されている。

• JST CREST「コロナ基盤」

下水疫学に関連した研究課題が採択され、異分野連携で基盤的研究課題が推進されている。

• NEDO「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」(2018年4月～2023年3月)

日立製作所と東レがNEDOの支援で実施している。内閣府の最先端研究開発支援プログラム (FIRST) の「Mega-ton Water System」(2009～2013年度) のRO膜関連成果を発展させている。

• 水道技術研究センターの研究助成

A-Dreams共同研究 (2018～2022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」、A-MODELS共同研究 (2021～2025年) で「水道の基盤強化に資する浄水システムの更新・再構築に関する研究」が支援されている。

■ 国外

• 米国環境保護庁 (EPA) の水研究助成²²⁾

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。2020年以降の助成課題としては、難分解性有機フッ素化合物 (PFAS) の処理 (吸着、膜処理、農業地域、小規模処理など)、飲料水源の化学汚染のリスク管理、下水汚泥中の有害物質の管理、有害藻類の抑制のための栄養塩管理、栄養塩を含む廃水の処理技術がある。難分解性有機フッ素化合物 (PFAS) 対策や栄養塩対策は、これまでもEPAが重点的に支援してきた研究テーマである。米国のインフラ・投資雇用法で水に関して500億ドルの助成が決まっている。

• 米国科学財団 (NSF) の基礎研究への助成

NSFは幅広い課題への助成を行っており、非常に多岐の課題を助成している。2021年以降の100万ドル程度の助成金額の大きい課題だけを取り出しても、マイクロプラスチックの水処理での除去、水処理関連のオミクス解析やゲノム解析、耐汚染性能の高い浄水用膜の開発、都市域での溶存性有機物の多様性、次世代の下水疫学、環境分野における抗生物質耐性対策、環境教育や環境分野での公平性、気候変動と下水の農業再利用、分散型水処理技術、汽水域の生態系、底泥-水間の炭素収支、ナノ技術の環境応用、廃水からのリンの回収、真菌群集による物質変換、有害藻類の分子生物学的解析などが挙げられ、基礎研究から応用研究まで幅広く助成されている。

• 全米下水調査システム (CDC、HHS)

CDCとHHSが、2020年9月に国家下水調査システム (National Wastewater Surveillance System : NWSS) を立ち上げている。州や地方行政のパートナーがCOVID-19への対応を決定できるように、下水に基づくCOVID-19データを収集、分析し、症例に基づくCOVID-19データ等と統合し、それらを公開している。

• 欧州 Horizon Europe (2021～2027年)

EUのHorizon Europe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。これまで、次のような領域への助成が見られる。

[廃水処理、有用物質回収] 地域の栄養塩の回収や農業利用、廃水中や淡水化プラント濃縮水に含まれる様々な元素の回収と循環経済、廃水と藻類を用いたバイオマス生産、下水汚泥の有効利用や水素生産

[用水処理・水利用] 気候変動による少雨傾向に対応した都市水資源マネジメント、ドナウ川流域/北極海/大西洋/アフリカ/地中海を対象とした地域研究、水分野でのデジタル化技術、飲料水源や地下水の保全、養殖技術

[水環境保全] 湿地など水系生態系の保全や生物多様性、マイクロプラスチックの調査や生態系への影響および海洋ごみの回収、海洋や淡水生態系に関連した環境教育、環境DNAのデータベース化、都市起源の環境負荷、海での炭素循環

(5) 科学技術的課題

① 下水疫学

下水中ウイルス濃度測定の精度保証に関連して、内部標準物質の選定に関する論文が多数出版されている。雨水等で薄まれば排泄者の人数が多くても下水中ウイルス濃度が低下するため、下水中の糞便濃度と連動する糞便汚染マーカーを内部標準物質として用いる検討がなされている。糞便汚染マーカー候補の1つであるトウガラシマイルドモットルウイルス (pepper mild mottle virus : PMMoV) では、PMMoV濃度でSARS-CoV-2濃度を補正しても流域の感染陽性者数との相関関係が改善しなかった報告が少な

らずある。内部標準物質は間違いなく必要だが、糞便汚染マーカーの使い方もまだ定まっていない。

② エネルギー高効率化、資源回収

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、下水や海水淡水化濃縮水、下水汚泥からのリン資源、有用元素（リチウム、マグネシウム、レアメタル）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。

③ 維持管理システム

- ・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では、これらの小規模浄水場への対応は大きな課題となる。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い。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。
- ・近年、世界各地で地震、津波、台風（ハリケーン）、豪雨、山火事、熱波、噴火などの自然災害が激甚化、頻発化し、浄水場その他の浄水システムを強靱化する技術開発へのニーズが高まっている。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は既にいくつか検討されている。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課題などが残されている。
- ・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。

④ 新興汚染物質・懸念物質の包括的研究と対策

2023年2月現在、我が国の一部の河川、地下水でもPFOS・PFOA等のPFASが水質管理目標設定項目の指針値を超えて検出され、社会の関心を集めている。我が国でも水環境や環境化学分野などで以前より地域における環境中の検出報告や環境動態に関する研究が行われており、多くの専門的知見が蓄積されている。工学的には既存の活性炭や逆浸透膜、イオン交換樹脂などの水処理技術が適用可能だが、運用コスト評価、リスク評価、法規制の在り方、発がん性と人間の血中濃度との相関などの医学研究、リスクコミュニケーションなどの分野横断的な研究課題をさらに進めていく必要がある。

⑤ 膜などを用いた水システム全体の基盤的研究開発

- ・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。
- ・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¹⁷⁾。

- ・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、汚泥脱水機）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、UV光源、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COVID-19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も、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。

(6) その他の課題

① 水道事業体の余裕不足や新技術への過度な慎重運用など

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。水道システムのユーザーは多くが住民であり、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。

PFASは水環境、環境化学においては長期環境残留性などの特徴から以前から注目²³⁾され、長く研究されてきたテーマで、専門的な理解や国際的環境規制の議論が進んできている。2023年2月現在、我が国の河川、地下水、湧水ならびに米軍基地周辺などで調査した地点の一部からPFOS・PFOA等のPFASが水質管理目標設定項目の指針値を超えて検出され、住民が水道水に不安をもつ可能性が懸念されている。我が国の多くの上水道は河川を取水源としており、水道水から検査されていないことを多くの水道事業体が発信し、検査も実施されている²⁴⁾⁻²⁶⁾。ただし、水道水ではなく水道法が適用されていない家庭の井戸水や、水道事業体の管理ではない小規模コミュニティの住民管理での水利用などの場面でより注意を要するとみられる。適用可能な水処理技術についても既に開発されているが、リスクコミュニケーション等を含めた対策が重要である。その際、既知の客観的な知見と未知のリスクの整理なども重要となるが、すでに厚生労働省、環境省で専門家会議が設置され、とりまとめと議論が進んでいる^{27)、28)}。今後もさらに包括的な研究の推進や水道事業体などを支援する仕組みづくりが重要である。

② プラントやシステム規模の水ビジネス海外展開

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。2021年3月に経済産業省が「質の高いインフラの海外展開に向けた事業実施可能性調査事業」として、「水ビジネス海外展開施策の10年の振り返りと今後の展開の方向性に関する調査」²⁹⁾をまとめている。そのなかで、水ビジネスの市場規模は今後も拡大が見込まれ、成功事例を共有し、さまざまな官民連携、グローバルパートナーシップを模索する必要があるとしている。

③ 下水疫学で得られた情報を活用する枠組みの構築

下水疫学について、下水中ウイルス濃度に関する情報を社会の中で具体的に活用していくための枠組みを構築する必要がある。下水中ウイルス濃度のモニタリング結果が、イベントの開催可否判断や保健所シフト編成など、自治体内における何らかの意思決定に使われるようになることが理想的であるが、そのためには下水ウイルス濃度情報の活用に関する費用便益分析・費用効用分析や、自治体近傍で柔軟かつ安価に下水ウイルス分析を請け負うことができる企業の存在などが必要と考えられる。

④ 雨水下水合流式下水道の雨天時越流水 (CSO)

我が国で昭和前期までに整備された下水道では、雨水浸水防除のための排水機能と急激な環境悪化改善のため下水道の迅速な普及を重点化していたため、首都圏などの大都市で雨水下水合流式が占める割合が高い。1970年の下水道法改正以後、公共用水域の水質保全の下水道の目的がより重視され、分流式下水道が重点的に整備されている。いちど整備された合流式を分流式に全面的な切り替えは容易ではない。雨天時に下水処理能力を超えて未処理放流される雨天時越流水の問題は、断続的に報道されてきている。直近では2021年の東京オリンピック開催前に東京湾のにおいが社会的に注目された。

⑤ 浄水処理分野でのインパクトある国の支援が不在

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。

⑥ 再生水の導入など各国の水資源に応じた動向

我が国の主な取水源は河川水であり、下流に位置する多くの都市域の原水で下水処理水が過半となることもある。しかし、再生水に対しては間接的飲料水再利用においても一般住民の心理的抵抗感が高い。一方、シンガポールやイスラエル、ナミビア、アメリカのテキサス州などではすでに高度な処理プラントが稼働し、住民コミュニケーションなども丁寧に行われ、事業化されている。イスラエルは再生水の国際標準にも参画し、水需要が増加する台湾などと再生水の技術協力も進めている。アメリカではカリフォルニア州でも2023年に再生水の直接飲用利用のための規制の改正が行われる見通しである。我が国も再生水の農業用水利用など実証研究がなされ、国際標準にも貢献した³⁰⁾が、組織的かつ戦略的に進める各国と比べ少数精鋭に頼る体制となっている。拡大が続く世界の水需要に対して、国際ネットワークの核となる専門人材と、基礎と応用両面の多角的な視座を持つ人材層を厚くする育成が望まれる。

(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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 水分野の国際専門誌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。 ● 下水中 SARS-CoV-2 定量技術の感度は世界最高レベルに達している。 ● 青色LEDの発明・開発の流れを受けた日本の応用物理学分野で、UV-LED素子の高出力化や高効率化を目指す研究開発が盛んにおこなわれている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 下水中 SARS-CoV-2 の遺伝子配列解析技術や変異株・派生株の定量技術の開発が民間との共同研究により進んでいる。下水調査結果を用いた COVID-19 新規陽性者数予測の公開検証が行われている。2021年から塩野義製薬が、北海道大学との共同研究をベースに、SARS-CoV-2の下水疫学調査サービスを事業化している。 ● 世界トップクラスの性能をもつUV-LED素子を製造販売するメーカー数は日本企業である。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 下水中 SARS-CoV-2 モニタリングが広域に渡って継続して行われている。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 誌への掲載件数が中国などに押されているものの依然多く、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による継続的な基礎研究支援とEPA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。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 麻薬成分物質を下水から検出する技術をもっていたMITの研究者らがベンチャー企業を設立し、下水中のSARS-CoV-2を受託計測する事業を展開した。大学キャンパスを含む比較的狭い地域での下水モニタリングが行われ、感染者の発生報告よりも早く変異株に由来する配列の下水からの検出に成功した。下水中SARS-CoV-2のモニタリング結果をもとに排泄物中へのSARS-CoV-2排出プロファイルの推定を行うモデルが提案された。感染症患者から得られていないウイルス遺伝子を下水から取得し、その配列を有するように合成された擬ウイルス粒子の細胞への感染能力が上昇したことを実験的に確認している。CDC等が中心の産学官連携によりNWSSを立ち上げている。 ● 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。 ● NSFがUV-LEDの水処理実証に特化した研究提案の公募を2022年に開始。 ● 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水への関心が高く、住民との合意形成などのアプローチをとおして、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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●下水中SARS-CoV-2モニタリングが各国で広域に渡り継続している。 ●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は各水道事業者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SARS-CoV-2検出と新規患者数の間の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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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者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オゾン処理施設を導入する計画が進められている。下水中SARS-CoV-2のモニタリング結果をもとに実効再生産数を推定するモデルが提案された。下水中SARS-CoV-2のうち低濃度で含まれる株に由来する配列を効率的に検出する方法を開発し、アルファ株を感染者報告の13日前に下水から検出できた。 ●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。 ●ドイツDVGWが紫外線水処理装置の性能評価（バリデーション）方法として、水銀ランプ装置を前提とする従来の方法に加えて新たにUV-LED装置用の方法を提案しており、いずれ正式に発効する見込みである。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●水資源ひっ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。 ●香港等で都市下水や施設下水を対象としたSARS-CoV-2モニタリングが行われている。 ●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。

2.9

持続可能な資源利用

	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●膜処理分野では、低コストを維持しながら、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おり、日本メーカー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、技術力の差が縮まっていく流れが続いている。 ●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。 ●紫外線水処理装置における世界トップクラスの北米企業と中国人研究者の人的交流に力を入れ、若手研究者の北米企業への派遣など、先進的な知見の中国への還元を行政（省）レベルで支援している。北米の専門家を交えて紫外線水処理の国家基準を2021年に策定。浄水場と下水処理場でUV消毒装置の実装が急速に進んでいる。水道水のカビ臭対策として、UVと過酸化水素を併用する紫外線促進酸化処理を公共の浄水場の実装し稼働開始している。 ●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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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などから2019年に経営危機に陥って以降、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。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●豪州は水資源が偏在し、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、太陽光利用水処理に関する研究が盛んである。下水中SARS-CoV-2モニタリングが継続して行われている。下水中SARS-CoV-2遺伝子定量における精度管理に関する研究報告が多い。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●豪州で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。1名の感染者が搭乗していた航空機の下水からオミクロン派生株に由来する遺伝子を検出することに成功した。 ●イスラエル、シンガポールなど水資源に限りがある国では再生水の飲用導入のための実際的調査や国際標準策定などで、主導的な動きを果たしている。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・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)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

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 2.7.3)
- ・環境リスク学的感染症防御 (環境・エネ分野 2.8.4)
- ・環境分析・化学物質リスク評価 (環境・エネ分野 2.10.2)
- ・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 2.1.2)
- ・感染症 (ライフ・臨床医学分野 2.1.9)

参考・引用文献

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター「CRDS-FY2019-SP-06 戦略プロポーザル：環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理（令和2年3月）」<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-06.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 2) 大村達夫「水は社会を写す鏡」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2021), 122-134., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 3) Masaaki Kitajima, et al., “SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs,” *Science of The Total Environment* 739 (2020) : 139076., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139076>.
- 4) 古米弘明「「生」を「衛（まもる）」工学における下水疫学調査」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2021), 135-150., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 5) 片山浩之「下水疫学研究の最新の動向」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2021), 109-121., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 6) 北島正章「新型コロナウイルスの下水疫学」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2021), 151-168., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 7) 吉田弘「資料4 ポリオ環境水サーベイランスを活用した新型コロナウイルス調査」『国土交通省 第1回 下水道における新型コロナウイルスに関する調査検討委員会（令和3年3月5日）』, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001390210.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 8) 大村達夫「資料5 ノロウイルス感染症の流行防止のための水監視システムの紹介」『国土交通省 第1回 下水道における新型コロナウイルスに関する調査検討委員会（令和3年3月5日）』, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001390210.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 9) 東京都下水道局「資料9 下水試料中に存在する新型コロナウイルスの感染症に関する調査」『国土交通省 第2回 下水道における新型コロナウイルスに関する調査検討委員会（令和3年4月28日）』, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001390210.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 10) 札幌市「下水サーベイランス」, <https://www.city.sapporo.jp/gesui/surveillance.html>, (2023年2月1日アクセス)。

- 11) 国土交通省「下水処理場で採水した下水の新型コロナウイルスRNA濃度について」, https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000721.html, (2023年2月1日アクセス) .
- 12) 「資料9 諸外国における下水中の新型コロナウイルス検出情報の活用事例について」『国土交通省 第3回下水道における新型コロナウイルスに関する調査検討委員会 (令和3年8月24日)』, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001390210.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 13) 米国疾病予防管理センター (CDC), “National Wastewater Surveillance System (NWSS),” <https://covid.cdc.gov/covid-data-tracker/#wastewater-surveillance>, (2023年3月1日アクセス)
- 14) Sandy Y Joung, et al., “Awareness of SARS-CoV-2 Omicron Variant Infection Among Adults With Recent COVID-19 Seropositivity,” JAMA Netw Open., (2022) 1 ; 5 (8) : e2227241., <https://doi: 10.1001/jamanetworkopen.2022.27241>.
- 15) Soo Park et al., “Unreported SARS-CoV-2 Home Testing and Test Positivity,” JAMA Netw Open. (2023) ; 6 (1) : e2252684., <https://doi : 10.1001/jamanetworkopen.2022.52684>
- 16) Biobot Analytics Inc., “The Biobot Network of Wastewater Treatment Plants Advancing Wastewater as a Public Health Platform,” <https://biobot.io/data/> (2023年3月8日アクセス)
- 17) 山村寛「浄水膜の現状・課題と今後の技術的展望」『科学技術未来戦略ワークショップ報告書 環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2020), 33-42., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 18) 小熊久美子「紫外線水処理の新展開 -多様な環境と社会への適応を目指して-」『科学技術未来戦略ワークショップ報告書 環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2020), 63-72., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 19) 厚生労働省「水質基準項目と基準値 (51項目)」, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 20) 環境省「令和2年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査の結果について (2021年06月22日)」, <https://www.env.go.jp/press/109708.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 21) 原圭史郎「水資源管理とフューチャー・デザイン」『水文・水資源学会誌』33 巻 1 号 (2020) : 1-2., <https://doi.org/10.3178/jjshwr.33.1>.
- 22) 米国環境保護庁 (EPA), “Water Research Grant,” <https://www.epa.gov/research-grants/water-research-grants>, (2023年2月1日アクセス) .
- 23) 国立保健医療院 健康危機管理支援ライブラリー「No.1356 京阪神地域における有機フッ素化合物による水質汚染」, <https://www.niph.go.jp/h-crisis/archives/84079/>, (2023年3月10日アクセス) .
- 24) 東京都水道局「水道水における有機フッ素化合物について」, <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/suigen/pfcs.html>, (2023年3月10日アクセス) .
- 25) 大阪市「水道水への影響について」, <https://www.city.osaka.lg.jp/seisakukikakushitsu/page/0000564338.html>, (2023年3月10日アクセス) .
- 26) 那覇市上下水道局「PFOSおよびPFOAの水質検査結果」, <https://www.city.naha.okinawa.jp/water/pax/suishitsukanri/SUIDOU07120200514.html>, (2023年3月10日アクセス) .
- 27) 厚生労働省 令和4年度第2回水質基準逐次改正検討会, https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi2/0000183130_00013.html, (2023年3月10日アクセス) .
- 28) 環境省 PFASに対する総合戦略検討専門家会議, <https://www.env.go.jp/water/pfas/pfas.html>, (2023年3月10日アクセス) .

- 29) 経済産業省「「水ビジネスの現状と展望、海外展開に向けた今後の方向性」を取りまとめました」
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/waterbiz/kenkyukai/kaigai_infra/003_business.html, (2023年2月1日アクセス) .
- 30) 田中宏明「水の再利用 CREST その後」『科学技術未来戦略ワークショップ報告書 環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2020), 43-52., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .