

特集

水のリサイクルに
貢献する化学工学

改めて考える水の再利用の現状と展望

田中 宏明・竹内 悠

Reconsideration on The Current Situation, and Prospects of Water Recycling and Reuse

1. 水の再利用の意義

水は限られた資源で、水を一度だけ使用する贅沢はもはや許されなくなっている。水の意図した繰り返し利用は、水を効果的かつ効率的に利用でき、水資源が不足している地域では、大きな役割を果たしてきた。一方、環境容量が小さく、水環境への排出規制が厳しい地域でも、水の再利用が重要な解決策となっている。しかし、使われた水には様々な汚染物質が含まれているため、利用用途ごとに適切な水質と安全性の確保が必要である。一方で、再生水には有用な栄養塩類や熱など資源価値があり、持続可能性や循環型社会として魅力的でもある。都市のように遠隔地から水輸送が必要な場合は、水の再利用がエネルギーの削減につながる場合もある。地震や水害などの災害や水インフラの老朽化への備え（レジリエンス）や縮減社会での人口減少に備えた上下水道施設とし、これまでの集中型から分散型の水システムも併用する社会に遷移させていくため、「ワンウォーター」として水を再利用することも期待されはじめている。

地球温暖化対策とともに、生物多様性の損失を食い止め、回復傾向へ向かわせる、ネイチャー・ポジティブが、重要となっている。このため、水資源の有効な利用と排水の削減に努めることが必要となっている。経済活動が気候変動に与えるリスクおよび機会を開示する、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）だけでなく、自然関連財務情報開示タスクフォース（TNFD）は、水資源を含む自然関連のリスクと機会が企業の財務に与える影響を開示することが必要となり始めている。これらの視点から、積極的

に水の再利用を行う動機となりつつあり、持続可能な水資源の確保が世界的に益々重要となってきた。

2. 国内外での水の再利用の実施状況

国連持続可能な開発目標（SDGs）でも、水質汚濁を防止するため、未処理の排水量を2030年までに半減することを目指して、廃水処理と安全な再利用を大幅に増加させることがコミットメントされている。2015年、世界で発生する3594億 m^3 の廃水のうち、1881億 m^3 が処理され、その21.7%にあたる407億 m^3 が再利用されている¹⁾。今後、廃水処理の拡大とともに水の再利用も拡大していくと見込まれる。

世界の水の再利用の用途は、歴史的に古くから行われてきた灌漑から、次第に多岐にわたる用途へと広がり、飲用水利用に到った²⁾。世界の水の再利用は、農業利用（32%）、修景利用（20%）、工業用水（19.3%）、リクレーション利用（6.4%）、非飲用都市利用（8.3%）、環境用水（8%）、地下水涵養（2%）、飲用利用（2.3%）、その他（1.7%）となっている³⁾。一方、我が国では、2020年度に下水処理場外で利用されている下水再生水量は、下水処理水の1.5%にとどまる約2.3億 m^3 である⁴⁾。河川維持用水（39.9%）、修景用水（21.4%）、融雪用水（18.5%）、工業用水（9.3%）、農業用水（6.3%）、水洗トイレ用水（2.3%）、親水用水（1.8%）、都市内散水（0.2%）となっており⁴⁾、世界と比べて環境用水や融雪用水の利用が多いが、農業用水や工業用水の利用は少なく、意図的な飲用利用や地下水涵養は行われていない。下水処理水以外にも、多くの農業集落排水施設の処理水は、農業用排水路等に放流後、農業用水として再利用さ



Hiroaki TANAKA
1980年 京都大学大学院工学研究科修士課程
修了(2002年 京都大学博士(工学))
現在 信州大学 工学部 特任教授
京都大学 名誉教授
連絡先；〒380-8553 長野市若里4-17-1
E-mail hiroakitanaka@shinshu-u.ac.jp/
htanaka@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp

2024年5月20日受理



Haruka TAKEUCHI
2018年 京都大学大学院工学研究科博士課程
修了 博士(工学)
現在 京都大学 工学研究科 助教
連絡先；〒520-0811 滋賀県大津市由美浜
1-2
E-mail takeuchi.haruka.6m@kyoto-u.ac.jp

れている⁴⁾。また、建物内での雑排水を水洗用水や散水等に再生利用する個別循環型や地域循環型の水の再利用もある⁴⁾。一方、工業分野では、2020年に約130億m³の淡水補給が行われているが、水使用量の節約や環境保全等の観点から水の再利用が進められており、回収率は全業種平均で77.9% (2015年) に達している⁴⁾。

このように我が国では工業分野に比べ、下水処理水の再利用が進んでいない。都市での水資源開発により、深刻な渇水が近年生じていないことから、水の再利用促進のインセンティブは限られている。しかし、東京都区部など一部の地域では、下水処理場から供給されている地域では下水再生水、あるいは大型建物内の雑排水の循環利用水（もしくは雨水）を水洗用水や散水などの利用を義務付けている。このため、再生水の循環利用の実施個所数は増加してきている。また自治体の中には、流量が枯渇する河川や水路、池などへ下水処理場から再生水を意図的に供給し、都市の水環境の創造に貢献する場合も多く、水量的にも大きい。これに加えて、人口10万人以上で渇水確率1/10以上の都市で、渇水時等に下水処理水を緊急的に利用できる約100施設（2014年）を倍増させる計画も立てられている⁵⁾。

3. 再生水のリスク評価と管理の技術

世界の中には水再利用の経済性の観点から、再生水の飲用利用への関心が高まっている地域がある。直接的飲用再利用 (Direct Potable Reuse : DPR) は、再生水を浄水処理前後の管路に直接注入し、水道水とブレンドして給水する方式である (図1)。再生水用の二重配管が不要であるため、その建設費が抑えられ経済性に優れる。世界初のDPRプロジェクトがナミビアのウインドホックでスタートして半世紀経った2013年、米国テキサス州 Big Springでの実証試験の成功を契機に、現在ではカリフォルニア州、ニュー

メキシコ州でDPRが計画または実施されている。DPRでは河川や地下水層などの環境バッファがないため、リスク管理がますます重要となる。2023年カリフォルニア州で策定されたDPR規制⁶⁾では、病原微生物のリスク管理のため、下水中のウイルス・細菌・原虫をそれぞれ20 Log, 14 Log, 15 Log 除去 (4 Logのバッファ機能を含む) できる水再生プロセスを義務づけている他、化学物質のリスク管理のため、水質指標を常時モニタリングし、水再生プロセスの機能が担保している保証を求めている。水質指標とされるのは、オゾン処理では残留医薬品 Carbamazepine および Sulfamethoxazole, 生物活性炭 (BAC) 処理では工業薬品 Aceton および Formaldehyde, RO膜処理では TOC, 促進酸化処理では工業薬品 1,4-ジオキサンである。同様の規制は米国コロラド州でも導入される予定であり⁷⁾, 他の地域においてもDPRの導入が加速すると予想される。

一方、米国に加え、欧州や豪州、南アフリカ、インド、シンガポール等では、間接的飲用再利用 (Indirect Potable Reuse : IPR) が注目されている。IPRは再生水を地下帯水層や河川・湖などの環境バッファに涵養し、浄水処理して給水する方式である (図1)。環境バッファは、再生水の水質変動や飲用再利用に対する市民の嫌悪感を緩和する役割を果たす。スペイン バルセロナでのIPR実証試験⁸⁾では、官民出資 (Public : 15%, Private : 85%) の水道事業会社である Aigües de Barcelona (AGBAR) が事業を担当し、上水、下水、再生水を包括的に管理している。AGBARは、ISOやEUガイドラインを参考に策定した Water safety plan, Sanitation safety plan に基づいてIPRをリスク評価し、実証試験した。その結果、再生水で健康影響が懸念されるのは1,4-ジオキサン、DEET、トリハロメタン等の僅か数物質であり、健康影響が最も懸念される1,4-ジオキサンの対策として、まずは下水処理場への流入量の削減の可能性、次いで促進酸化処理などの高度処理の導入の必要性が検討されている。

一方、飲用再利用の実現には市民との合意形成が重要である。EUの研究開発プロジェクト Horizon Europe 2020 の“NextGen”プロジェクトでは、リスクコミュニケーションのあり方を検討しており、IPRを支持すると回答した市民の割合はオランダで75%、スペインで73%、イギリスで67%に及ぶなど、市民への働きかけ方によっては飲用再利用を肯定的に取らえる傾向にあったと報告されている⁹⁾。

水の再利用のみならず、エネルギー回収、資源回収をも統合した水再生システムの開発も進められている。Horizon Europe 2020の“ULTIMATE”プロジェクトでは、工業排水からの水再利用・資源回収に関する9つの実証試験が展開されている。例えばイギリスでは、Cranfield University と Glenmorangie ウイスキー蒸留所が連携し、

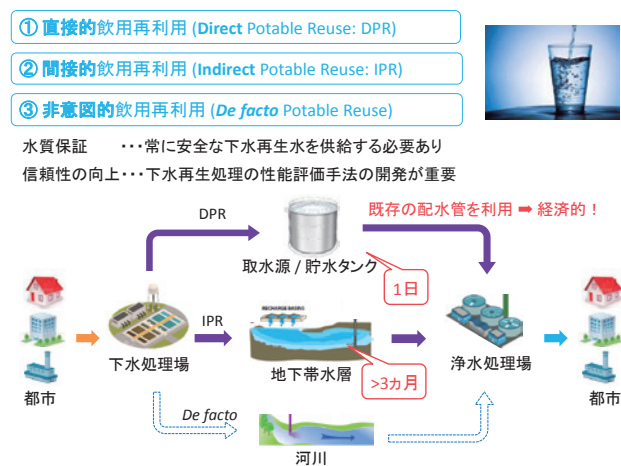




図2 RecoLabの膜処理・消化・資源回収の設備

蒸留所からの排水を嫌気性MBR処理後、リン・窒素・熱・バイオガスを回収したのち、処理水をRO膜処理して蒸留所内で再利用する実証試験を行っている。スペインやチェコでは、ビール醸造所からの排水を電気刺激式嫌気消化(ELSAR)、NF/RO膜、光触媒UV処理により高度処理し、再生水を冷却水として工業利用する試験が行われている。このようなEU域での水処理・資源回収に関する開発技術、製品、実証プロジェクトは、データベース“Water Europe Marketplace”で公開されている。

ドイツのハンブルク市やスウェーデンのヘルシンボリ市では、Greywater（雑排水）とBlackwater（し尿を含む下水）を個別に水処理、資源回収、エネルギー回収するシステムが実証試験されている。スマートシティ推進地域であるヘルシンボリ市にある実証研究施設（RecoLab）（図2）は、再開発で建設された400世帯で発生するGreywater、Blackwater、食品廃棄物をそれぞれ別の配管で収集し、水再生処理と熱、バイオガス、窒素とリンの回収を行っている。Greywaterは嫌気好気処理と中空糸NF膜処理で水再生され、NF濃縮水はオゾン処理により残存有機物を易分解にしてから生物反応槽に返送される。Greywaterの熱は回収し、消化タンクの熱源として利用される。Blackwaterと食品廃棄物はそれぞれ別の消化タンクに送られるため、食品廃棄物由来の汚泥は、トイレ排水が混合されていない付加価値が高い汚泥（肥料）として認証（SPCR178）を得ることができる。RecoLabの主な資金源はEUファンドとヘルシンボリ市の補助金であり、処理規模は現在の900人相当から2030年には2500人相当に拡大される計画である。

4. 分散型水再利用の事例

日本の他、海外でもオンサイト型の水再利用の関心も高まっている^{10,11)}。中でも、ビルスケールでの非飲用再利用

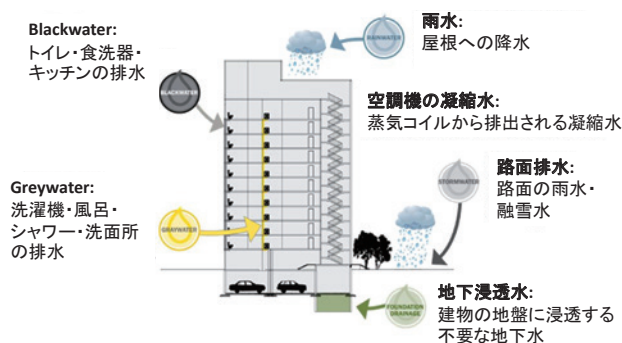


図3 ビルスケールのオンサイト再利用。引用文献12) をもとに作成。

（図3）への関心は高く、米国シリコンバレーでFacebook、Microsoft、Googleなどが実装しているほか、ニューヨーク市のThe Solaireビル、サンフランシスコ市の181Fremontビルに導入されている¹²⁾。微生物学的リスクを制御するため、サンフランシスコ市のガイドラインでは、排水の種類と利用用途に応じた病原微生物削減目標（pathogen reduction credits）や処理性能の指標となるモニタリング項目が提示されている¹³⁾。オーストラリアでは、シドニー市のCentral Parkビルが有名であり、商業と居住を兼ねたビル内で発生する下水すべてをMBR、UV、RO膜で処理し、塩素消毒後にトイレ用水、洗濯用水、植物灌漑用水に使用している。また“Sewer Mining”はシドニー市のユニークなオンサイト型の再利用方式で、下水道管理者の許可を受けて、ユーザーが市中に張り巡らされた下水管網から下水を採取し、水再生処理し、用途に応じた量と質の再生水を生産し、利用している。また、水再生処理で発生した汚泥は下水管に再び排出する。シドニーオリンピック公園、Pennant Hillsゴルフ場、WorkPlace 6ビルではMBRとUV消毒あるいはRO膜の併用により再生水を生産し、生活用水や散水用水として使用している。前述したように日本では、1980年頃から福岡市や東京都区部では、下水処理水の再利用による広域循環の他、オンサイト再利用として、し尿を含まない雑用水を対象にビル内で処理し、水洗用水などへ利用する個別循環が行われている。また、水再利用・バイオガス発電・熱回収を行う施設として、大阪のあべのハルカスやイオンモール堺鉄砲町が有名である¹⁴⁾。ヨーロッパでもビルスケールでのオンサイト再利用への関心は高まっており、日本のオンサイト再利用のノウハウ（配管の誤接続の防止など）の海外展開が期待される。

5. 課題と将来展望

我が国の下水処理水の再利用基準¹⁵⁾は限られた水質項目（大腸菌、外観、濁度、色度、臭気、pH、残留塩素）のみである。しかし、下水には様々な汚染物質、化学物質、病原微生物

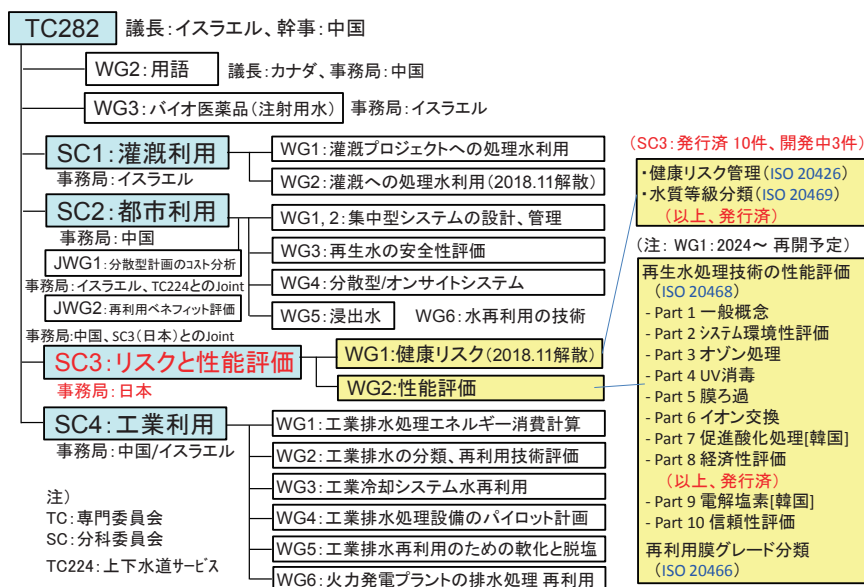


図4 ISO TC282 (水の再利用)の開発状況。2024年2月時点で発行済36件、開発中10件で、この他改訂中のものが2件ある。引用文献18)をもとに作成。

が含まれているため、さらに利用者に積極的に使ってもらうには用途ごとに再生水に必要な安全性を担保するためにどの程度の水質を担保するのか、どのように再生処理することが適切なのかを示すことが重要である。再生水を作る際に、消費エネルギーと処理レベルはトレードオフがあり、よい水質の再生水を作るほど、用途は広がるが、コストやエネルギーもかかるため、用途に適した水再生レベルと技術の最適化を図る必要がある。その際には、用途としての水質とともに病原微生物や化学物質のリスク管理に基づいた水再生技術の設定が重要であり、それを満たす条件でエネルギー、コスト、信頼性から優れた水再生技術を選択する必要がある。

これらの課題解決に取り組むため、筆者らはJST CRESTで、新しい水再生技術の開発、エネルギー・環境負荷の評価と、再生水の水質リスク評価を通じて、21世紀型都市水循環利用システム構築が可能かを明らかにすることを目指した¹⁶⁾。膜技術、UV技術、凝集技術、オゾン処理などを組み合わせて省エネルギーで安全性の高い水再生技術を提示し、国内外での実証試験を実施し、実用化の見通しを得た¹⁶⁾。また、再生水利用時における安全性や省エネルギー性などから各処理方式の評価を行い、その評価法も確立した¹⁷⁾。

国内では、都市レベルでの水の再利用需要は限定的である我が国だが、国際的な再生水ニーズに応える必要がある。このため、この研究プロジェクトで得られた知見は、国際的な水の再利用を支援する、国際標準化機構 (ISO) TC282(水の再利用)に生かされている。図4に示すように、日本は事務局として水の再利用の共通規格として重要な健康リスクと性能評価 (SC3) を担当しており、技術評価の

国際規格に貢献している。また、再生水の利用を広げるため、処理システムだけでなく、熱などの資源利用や配水を含めた再生水システム全体の評価も必要となっている。これらを反映した廃水の再利用は、集中型のみならず分散型/オンサイト型を含めた規格へと進化を続けている。

水再生技術の開発と評価とともに、人の健康や生態系保全等の新たな科学的知見は、新しい水の再利用基準の開発と、それに伴う新技術の開発を進めることになる。将来の水資源管理や環境管理の課題に効果的に対応するためには、上下水道を含めた「ワンウォーター」の概念を水の再利用として受け入れることが重要である。

参考文献

- 1) Jones, E. R. et al. : *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 237-254(2021)
- 2) Angelakis, A. N. et al. : *Frontiers in Environmental Science*, **6**, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026> (2018)
- 3) Yang J. et al. : *Membranes*, **10**(6), 131(2020)
- 4) 国土交通省: 日本の水資源の現状と課題(2024)
- 5) 国土交通省: 下水道政策研究委員会報告書, 新下水道ビジョン(2014)
- 6) California State Water Resources Control Board, https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/dpr-regs.html
- 7) POTABLE WATER REUSE REPORT, <https://rewater.usc.edu/wp-content/uploads/2024/03/PWRR-Issue-1.1.pdf>
- 8) Antoni Munné et al., *Sci. Total Environ.*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161339>
- 9) Social acceptance of water reuse isn't the biggest challenge, finds surveys, <https://www.cranfield.ac.uk>
- 10) 田中宏明: 下水道協会誌, **45**(167), 63-70(2021)
- 11) Onsite Non-Potable Water Reuse Research | US EPA, <https://www.epa.gov/water-research/onsite-non-potable-water-reuse-research>
- 12) San Francisco's Onsite Water Reuse System Projects, https://wateruse.org/wp-content/uploads/2021/11/1.-OWR_SF_Non-potable_Case-Studies_2021.pdf
- 13) Onsite Water Reuse Program Guidebook, [OnsiteWaterReuseGuideAugust2022.pdf\(sfpuc.org\)](https://www.sfpuc.org)
- 14) Haruka Takeuchi, Hiroaki Tanaka : *Resilient Water Management Strategies in Urban Settings in Advances in Wastewater Reclamation and Reuse Technologies*, Springer Water(2022)
- 15) 国土交通省: 下水処理水の再利用水質基準等マニュアル(2005)
- 16) 田中宏明: 水環境学会誌, **36**(1), 27-30(2013)
- 17) JST : 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム研究領域事後評価資料, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/evaluation/research_area/h28/CREST_h28_06_SY.pdf(2017)
- 18) 国土交通省, (一財)造水促進センター: 下水道協会, **59**(722), 38-53(2022)