

特集

排水処理・造水技術の深化

2050年には世界人口の7割が都市部に集約することを鑑みると、インフラの強化、特に水源の確保および水処理技術の高度化が今後の大きな課題である。そこで本企画では、「排水をいかに効率的に処理するか」、「いかにして水を確保するか」に焦点を当て、排水・造水に関する技術動向について紹介する。排水処理施設においては、近年処理水の水質を遵守するのみならず、廃棄物・温室効果ガス削減・省エネルギー化と多岐にわたる問題を同時に解決可能な技術開発が求められている。これらの課題に関するレビューと新規技術について紹介する。

造水技術に関しては、水不足が顕在化している海外において、水を造り出す技術に焦点をあて、海水淡水化・随伴水処理などといった最先端技術を紹介する。

(編集担当：城戸操介・寺田昭彦)†

水処理技術の動向と将来展望

滝沢 智

1. はじめに

人類は長い間、水を処理することなく、必要とする水の水源の近くに住むか、ローマや江戸の水道にみられるように、清浄な水質の水を水路によって居住地まで運んでくることで水の需要を満たしてきた。しかし、都市人口の増加とともに、水の不足と水質の悪化は深刻な問題となり、特に19世紀に大規模な水系伝染病が発生し、その対策としての水処理の有効性が認識されるに及んで、沈殿、ろ過などの技術が安全な水を利用するために不可欠な水処理技術として認識されるようになった。19世紀から20世紀にかけての水処理技術の普及は、都市の拡大と産業の発展を支え、それがまた新たな水処理術のニーズを生み出す形で、水処理の技術が開発されてきた。

20世紀後半は、先進国の急速な経済成長とともに環境

汚染が深刻化した。このため、自然生態系と人の健康をまもるために、排水水質、環境水質、水道水質に対して新たな規制が導入された。これに対応するために、廃水処理、浄水処理の両方において新しい水処理技術の開発が進んだ。また、中東・北アフリカなどの乾燥地域における水需要の増大は、海水淡水化技術の開発を促し、新たな技術の導入が進んだ。21世紀に入ると、日本の人口と水需要が減少する一方で、世界人口は増え続け、水需要の増大と水不足は拡大しつつある。

本稿では、21世紀前半において、日本国内と世界の水需要の変化と水処理技術の現状を概観し、将来の水需要と社会経済に対応した水処理技術の展望について述べる。

2. 国内の水需要の変化と水処理技術

図1に日本の水道水の消費量を示す。一人一日水使用量は1997年に最大水量に達した後、穏やかに減少しつつあり、2011年時点では1997年の最大水量よりも約11%減少している。一人一日水使用量の減少を受けて、全国の日当たりの水消費量(一日消費水量)も、2000年に最大水量に達した



The Progress and Future of Water Treatment Technologies

Satoshi TAKIZAWA

1988年 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻博士課程修了

現在 東京大学工学系研究科都市工学専攻教授

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
E-mail takizawa@env.t.u-tokyo.ac.jp

2014年9月4日受理

† Kido, S. 平成25, 26年度化工誌編集委員(12号特集主査)
千代田化工建設(株)

Terada, A. 同上 東京農工大学工学研究院応用化学部門

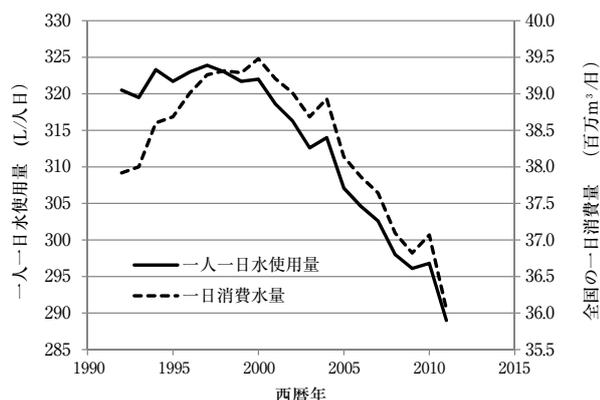


図1 日本の水道水使用量の変化¹⁾
(国土交通省, 日本の水資源をもとに筆者が作成)

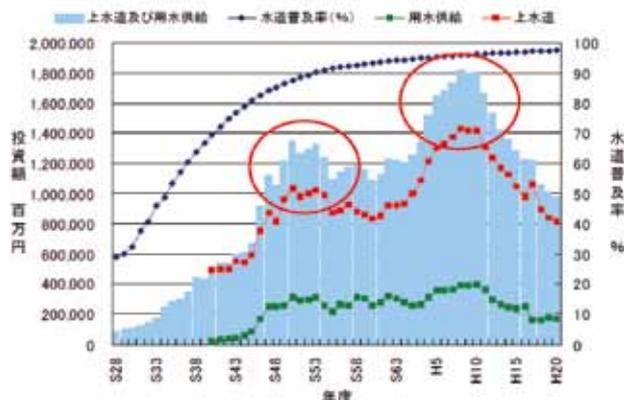


図2 水道施設投資額と水道普及率の推移²⁾

後に、減少しつつある。このように、生活用水や業務用水を含んだ都市用水の需要は減少しつつあり、水道水の浄水量も減少しつつある。このため、下水道の汚水量も減少している。その一方で、上下水道の施設は老朽化が進んでおり、施設の改築・更新の需要は高まっている。図2は、水道施設への投資額と水道普及率の推移を示している。投資額は、上水道事業と用水供給事業（地方自治体がおこなう上水道事業に対して水道水を供給する事業）ごとに表示し、更それらの総額が示されている。過去の投資額の推移をみると、昭和40年代の後半から昭和50年代にかけて(1970年前後)と、平成5年から10年にかけて(1995年前後)の二つのピークがある。このうち1970年頃に建設された水道施設は、間もなく建設から50年を迎え、更新が必要となる。既存施設の更新において求められるのは、

- ① 現有施設を稼働させながら新規施設を建設すること。このため、施設能力に余裕をもつことは不可欠であり、新規の施設も少ない面積で既存の能力を上回る施設効率が求められる。一例として、横浜市水道局の川井浄水場では、既存の砂ろ過施設をセラミック膜ろ過施設へ更新(平成26年供用開始)するとともに、浄水能力を約10万 m^3 /日から約17万 m^3 /日へと増強したことが挙げられる。
- ② 新しい時代の要請に合致した水処理施設であること。全国の水道水源となっているダム湖、湖沼などの水質は改善の兆しが見られず、異臭味に対する対策として高度処理の導入が求められている。また、豪雨により原水濁度が急激に上昇する事例が増加しており、濁度変動に対する対策も求められる。その一方で、高度浄水処理施設は、多くのエネルギーを消費し、使用済み活性炭などの廃棄物を増大させる。このため、エネルギー効率が高く、廃棄物の少ない水処理システムを建設する必要がある³⁾。

これらのことから、日本国内の水需要の低下にも拘わらず、新しい水処理技術のニーズは高まっている。

3. 世界の水需要の変化と市場の見通し

国連統計によると、現在約72億人の世界人口は、2060年には100億人を超えると予測されている。人口増加の多くは、アジア・アフリカに集中し、さらに都市部への人口集中が加速している。このため、アジア・アフリカの多くの国々で、都市部のインフラ整備の不足は深刻であり、上下水道の普及が人口の増加に追いついていない。また、都市部において、ミレニアム開発目標(MDGs)の「安全な飲料水へのアクセス」人口の割合が低下している国がある。これらの都市では、上下水道施設に対する高いニーズがあるが、投資資金の確保と、投資資金を回収するための料金水準の設定に問題があるため、上下水道の普及が遅れている。これらの国では、水需要が水事業や水関連施設の水ビジネスの市場になるためには、料金制度も含めた市場(マーケット)の形成が必要である。

図3は、2010年に経済産業省の研究会が公表した世界の水ビジネス市場の予測を示している。ここでは、水分野の市場を、上水、海水淡水化、工業用水・工業下水、再利用水、下水の4つに分類し、2025年におけるそれぞれの市場を予測している。このうち、上水と下水は、世界のあらゆる都市で必要とされ、市場規模も大きい。それに対して、海水淡水化は、水資源が不足している中東・北アフリカなどの乾燥地での需要が高い。下水の再利用も乾燥した地域において潜在的な需要が高いが、現在の普及率は低いままに留まっている。これらの海水淡水化や下水の再利用は、今後更に普及が進み、高い市場の成長率を維持するものと考えられる。

(上段：2025年…合計87兆円，下段：2007年…合計36兆円)

業務分野 事業分野	素材・部材供給 コンサル・建設・設計	管理・運営サービス	合計
上水	19.0兆円 (6.6兆円)	19.8兆円 (10.6兆円)	38.8兆円 (17.2兆円)
海水淡水化	1.0兆円 (0.5兆円)	3.4兆円 (0.7兆円)	4.4兆円 (1.2兆円)
工業用水・ 工業下水	5.3兆円 (2.2兆円)	0.4兆円 (0.2兆円)	5.7兆円 (2.4兆円)
再利用水	2.1兆円 (0.1兆円)	-	2.1兆円 (0.1兆円)
下水	21.1兆円 (7.5兆円)	14.4兆円 (7.8兆円)	35.5兆円 (15.3兆円)
合計	48.5兆円 (16.9兆円)	38.0兆円 (19.3兆円)	86.5兆円 (36.2兆円)

■：ボリュームゾーン(市場の伸び2倍以上，市場規模10兆円以上)
■：成長ゾーン (市場の伸び3倍以上)

(出典)Global Water Market2008 及び 経済産業省試算，(注)1ドル＝100円換算

図3 世界水ビジネス市場の事業分野別・業務分野別見通し⁴⁾

4. 水処理技術の動向と将来展望

4.1 浄水処理技術

水道の浄水処理は，もともと，原水中に含まれる濁質(濁度)の除去と，感染性の微生物に対する消毒が主な目的であった。このため，自然沈殿と砂ろ過を組み合わせた緩速ろ過法や，凝集剤を添加してフロックを形成した後に沈殿させる薬品沈殿と砂ろ過を組み合わせた急速ろ過法などが採用されてきた。水質汚濁が深刻化した，1970年代以降は，これらに加えて，異臭味や新規汚染物質対策として，各種の高度浄水処理が採用されている。

1) 異臭味対策

異臭味による被害は全国の水道に広がっており，ピーク時には2千万人を超える人が水道水の異臭味被害を受けていた。この対策として，粉末活性炭の添加がおこなわれていたが，異臭味被害が常態化するにつれて，淀川や利根川を水源とする大規模浄水場においてオゾン処理と活性炭処理を組み合わせ，オゾン・活性炭による高度浄水処理が適用された。オゾン・活性炭処理は，わが国においても長年の運転実績があり，異臭味物質の高い除去性能を有しているが，施設建設の初期投資費用が大きいことから，小規模浄水場の多くは今でも粉末活性炭により対応している。また，課題としては，エネルギー消費量が多く使用済みの活性炭が大量に廃棄物となることや，オゾン処理の副生成物として臭素酸が発生することなどが挙げられる。これらのことから，今後は，小規模な浄水場でも採用可能な，エネルギー消費量や廃棄物の少ない高度浄水処理技術の開発が望まれる。

2) 耐塩素性原虫類対策

クリプトスポリジウムなどの原虫類は，塩素消毒に対して高い耐性を持つことが知られており，米国や日本でクリプトスポリジウムによる被害が発生したことをきっかけとして，これらの原虫類対策が求められるようになった。原虫類は塩素耐性が高いオーシストという殻につつまれた形態において数ミクロンの大きさであり，オーシスト除去のための膜ろ過処理が小規模な浄水施設を中心として広く採用された。また，オゾン処理や紫外線処理もクリプトスポリジウム対策として有効であることが知られており，特に紫外線処理は，清澄な地下水を原水とした浄水場において，原虫類対策としての採用が増加している。

4.2 下水処理技術

下水処理分野での新技術の開発は，国土交通省が実施している「下水道革新的技術実証研究(通称：B-DASHプロジェクト)」によって，推進されている⁵⁾。B-DASHプロジェクトは，下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現し，併せて，本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援することを目的としており，省エネルギー・創エネルギー技術などが採択されている(表1)。これを実現するための個別のテーマとしては，固液分離，窒素除去などの処理技術の向上を目指すテーマがある一方で，ガス回収・ガス発電，固形燃料化，下水熱利用，バイオマス発電，水素創出，省エネ型水処理，ICTを活用した運転制御など，より高い処理水水質をめざした技術の開発から，省エネルギー，創エネルギー技術の開発へと転換がはかられている。このように既存の下水処理技術によって，目標とする処理水水質が達成できることが明らかとなった一方で，エネルギー価格の高騰，環境負荷の低減などの社会的要請から，水処理技術の開発は新たな方向性を模索するようになった。

東日本大震災は，下水道施設に対しても大きな被害をもたらした。特に，仙台市の南蒲生下水処理場においては，津波により壊滅的な被害を受け，その復旧に長い時間を要している。日本の下水処理施設の多くが，沿岸部や河川に隣接して建設されていることから，津波や液状化などの影響を受けやすい環境にある。これらの自然災害による被害を防止，軽減するとともに，被災時においても最低限の下水処理機能を維持できるような下水処理技術の開発が求められている。

また，古い年代に建設された下水道の多くは合流式下水道であり，降雨量が増して，雨水の流量が一定の割合を超過すると，未処理のまま河川や沿岸に放流されている(CSO問題)。これを改善するため，初期雨水を貯留したり，簡易な処理によって大量の雨水を処理してから環境に放流する技術の開発が進んでいる。さらに，近年多発している豪

表1 B-DASHプロジェクト採択リスト⁵⁾

採択年度	実施対象テーマ	事業名称	実施事業者
平成23年度	固液分離・ガス回収・ガス発電	超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム技術実証事業	メタウォーター・日本下水道事業団 共同研究体
	ガス回収・ガス精製	神戸市東灘処理場 再生可能エネルギー生産・革新的技術実証事業	神鋼環境ソリューション・神戸市 共同研究体
平成24年度	固形燃料化	温室効果ガスを排出しない次世代型下水汚泥固形燃料化技術実証事業	長崎市・長崎総合科学大学・三菱長崎機工 共同研究体
	固形燃料化	廃熱利用型 低コスト下水汚泥固形燃料化技術実証事業	JFEエンジニアリング
	下水熱利用	管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用技術実証事業	大阪市・積水化学・東亜グラウト 共同研究体
	窒素除去	固定床型アナモックプロセスによる高効率窒素除去技術実証事業	熊本市・日本下水道事業団・(株)タクマ 共同研究体
平成25年度	バイオマス発電	脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システムの実証事業	メタウォーター・池田市 共同研究体
	バイオマス発電	下水道バイオマスからの電力創造システム実証事業	和歌山市・日本下水道事業団・京都大学・(株)西原環境・(株)タクマ 共同研究体
平成26年度	水素創出	水素リーダー都市プロジェクト～下水バイオガス原料による水素創エネ技術の実証～	三菱化工機(株)・福岡市・九州大学・豊田通商(株) 共同研究体
	省エネ型水処理	無曝気循環式水処理技術実証事業	メタウォーター(株)・高知市・高知大学・日本下水道事業団 共同研究体
	省エネ型水処理	高効率固液分離技術と二点DO制御技術を用いた省エネ型水処理技術の技術実証事業	前澤工業(株)・(株)石垣・日本下水道事業団・埼玉県 共同研究体
	ICTを活用した運転制御	ICTを活用した効率的な硝化運転制御の実用化に関する技術実証事業	(株)日立製作所・茨城県 共同研究体
	ICTを活用した運転制御	ICTを活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術実証事業	(株)東芝・日本下水道事業団・福岡県・(公財)福岡県下水道管理センター 共同研究体

雨災害においては、下水処理施設が被災する可能性も高まっている。これらのことから、非常時においても、災害に強い下水処理システム、最低限の機能を発揮できる下水処理システムの開発が求められている。

4.3 海水淡水化技術と下水の再利用(造水技術)

1) 海水淡水化技術

海水淡水化は中東、北アフリカ、ヨーロッパの地中海沿岸諸国、オーストラリアなどで普及しており、このうち大規模な施設では、発電所と組み合わせたIndependent Water and Power Plant (IWPP) が主流となっている。我が国にも、沖縄に4万m³/日、福岡に5万m³/日規模の海水淡水化施設がある。海水淡水化は、利用不可能と考えられてきた海水を利用可能な水に変えるという意味で、水処理技術であると同時に、造水技術と位置づけられている。海水淡水化は多くのエネルギーを必要としており、海水淡水化施設の多くが、蒸発法よりもエネルギー効率の高い逆浸透膜ろ過法(RO法)を採用するようになってきている。近年の膜ろ過技術開発の傾向は、よりエネルギー効率が高い技術を目指している。研究開発事例としては、造水促進センターがサウジアラビアの海水淡水化公社などと共同して開発したNF/RO/MEDを組み合わせたTri-Hybridシステムが挙げられる。また、逆浸透膜自体の透過性能も膜表面の凹凸を高めて表面

積を大きくするなどして改善してきており、塩素耐性のあるRO膜も使われている。また、研究開発においては、膜表面にナノ粒子を埋め込んで透過性能を高めるなどの工夫がなされている⁶⁾。

2) 下水の再利用技術

下水の再利用は、米国ではカリフォルニア州やアリゾナ州などを中心として普及しており、これからも人口が急増している乾燥地域、即ち、オーストラリア、中東、北アフリカ、ヨーロッパの地中海沿岸などでさらに普及する可能性が高い。日本でも、東京など大都市において下水の再利用がおこなわれているが、全国で発生する下水の総量に比べて再利用率は平成23年度において1.3%と低い割合に留まっている⁷⁾。下水の再利用は、水処理技術であると同時に、これまでは利用不可能であった水を利用可能な水に転換するという点において造水技術の一つである。下水再利用の用途としては、日本では、トイレ用水、車両の洗浄用水、道路散水用水、修景用水、などが主たる用途であるが、カリフォルニアでは、これらに加えて、近年では直接飲用水にも使用できるように転換を図る方向に動きつつある。

下水再生処理は、下水処理技術と再利用技術の組み合わせで始まったが、再利用水の用途や、国によっても処理システムが異なり、簡易な処理で農業用水として利用してい

る開発途上国の事例や、高度な処理で飲料水としての利用を目指すカリフォルニアなどの事例など幅広い。日本では、活性汚泥法などの下水処理プロセスに三次処理あるいは高度処理と呼ばれる処理を追加した処理プロセスが採用されてきた。ここで用いられている高度処理には、砂ろ過、オゾン処理、膜ろ過などの組み合わせがある。一方、海外では、標準活性汚泥処理法に代えて、膜分離活性汚泥法(MBR)が採用される事例が増加している。特に下水の再利用が進んでいるカリフォルニアでは、先進の水処理技術が採用されつつあり、カリフォルニア州オレンジ郡にある、Groundwater Replenishment System (GWRS) では、MBR 法による処理ののち、RO 膜法、促進酸化法により処理した水を、地下に注入して地層でろ過した後にくみ上げる、というシステムが採用されている。これは、現時点では意図的に飲用水として再利用していないが、飲用水として利用されても問題のない処理レベルの技術を採用しているといえる。近年、カリフォルニアの水不足は更に深刻となり、下水再生水を飲料水として直接利用する Direct Potable Reuse についての議論が盛んになっている。このための調査研究も進んでおり、再生水を飲用する場合の水質事故を防止するために、高度な水処理技術に加えて、水処理プロセスのモニタリング・制御技術、管路内での水質モニタリング技術の開発をおこなっている。

5. おわりに

これまで、飲料水の安全性の確保や、環境浄化を目的として新たな水処理プロセスが開発されてきた。しかし近年は、水処理の効用と環境負荷とをバランスすることの重要性が認識され、高い処理性能と低い環境負荷を達成する技術が求められている。同様に、海水淡水化や下水の再利用技術においても、エネルギー消費量が少なく、経済性の高い技術が必要とされている。エネルギーや資材価格の高騰は、低コストで環境にやさしい技術を開発する契機となり、また、水不足が深刻化する海外諸国においては、海水や汚染された水から、利用可能な水を生み出す水処理技術に大きな期待がかかっている。これらのことから、今後は、より高度な処理性とライフサイクルコストや環境負荷とがバランスした技術の開発が加速してゆくだろう。

参考文献

- 1) 国土交通省水資源部：日本の水資源,平成26年版(2014)
- 2) 厚生労働省：新水道ビジョン策定検討会資料,(2012)
- 3) Shannon, M. *et al.* : *Nature*, **452**(20), 301-310(2008)
- 4) 水ビジネス国際展開研究会：水ビジネスの国際展開に向けた課題と具体的方策,経済産業省(2010)
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水道革新的技術実証研究 (B-DASH プロジェクト)
<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>
- 6) Elimelech, M. *et al.* : *Science*, **333**, 712-717(2011)
- 7) 国土交通省下水道部：新下水道ビジョン, pp.4-108(2014)
- 8) Orange County, California, Groundwater Replenishment System (GWRS), 2014年8月30日閲覧
<http://www.water-technology.net/projects/groundwaterreplenish/>