

浄水処理装置・施設のニーズ

— 人口減少下における上水道システムを支える技術 —

京都大学大学院工学研究科教授 伊藤 禎彦

1. はじめに

わが国の上水道は成熟した社会インフラであるが、現在、以下に示すような重要かつ喫緊な課題をいくつも抱えている^{1, 2)}。

- ①人口減少と水需要の減少
- ②施設の更新需要の急増と投資額の減少
- ③管路の老朽化の進行
- ④耐震化の遅れ
- ⑤事業経営と水道料金の設定水準上の問題
- ⑥職員数減少と技術継承の困難さ

こうした中、2018年12月、改正水道法³⁾が成立し、2019年10月に施行されることになっている。この法改正のもっとも重要な点は、法律の目的を水道の「計画的な整備」から「基盤強化」に変更したことである。すなわち、上述した深刻な課題を抱え、特に中小規模の水道事業体にとっては、上記課題を克服するのが困難であるばかりか、将来にわたる事業継続自体が困難なケースも出つつあるのである。「基盤強化」に資するために改正法に盛り込まれた主な項目を以下に示す。

- ①関係者の責務の明確化
 - ②広域連携の推進
 - ③適切な資産管理の推進
 - ④官民連携の推進
 - ⑤指定給水装置工事事業者制度の改善
- さて、法律の目的が「基盤強化」になったわけだが、実質的な「強化」を実現するためには、法律に記載された観点以外にも、さまざまな側面から取り組んでいかなければならない。その一つに技術的な側面があげられる。これから真に必要な技術は何だろうか、と常に自問することが大切と考える。本稿では、浄水処理装置・施設に焦点を当て、いくつかの視点から、将来へ向けた課題やニーズについて論じてみたい。

2. 極小規模浄水処理装置

写真-1は、近畿地方S町のある地区における取水施設と浄水処理施設の様子である。左に見えるのが浄水処理施設であり、建物の左半分は配水池になっている。この地区の給水人口は次第に減少し、現在10人程度という。浄水場内に設置されていた急速ろ過施設が老朽化したことから、精密ろ過膜(MF)が新規に導入

された(写真-2)。設置された膜モジュールは1本だけであるが、その浄水能力は50m³/日となっている。生活用水の原単位を250ℓ/人/日とすると、それは200人分をまかなえることになる。もちろんこの地区も、お盆や正月には人口が何倍かになるだろう。ただそれでも、導入された装置が過大設備であることは明らかである。

現在、膜モジュールで50m³/日より小さいものとしては20~25m³/日程度のもは存在するが、それ以下のものを見出すことはむづかしい。以上より、今後求められる浄水処理施設とは、

- ・極小規模膜ろ過装置、極小規模急速ろ過装置、極小規模緩速ろ過装置
- ・規模の例：10m³/日以下。数~1m³/日程度。

現在および将来にわたって、少人数集落向けの小規模な浄水処理装置が多数必要なのである。また、ここに記したように、それらの極小規模の浄水処理装置は膜ろ過に限ることなく、急速ろ過装置であっても緩速ろ過装置であってもよい。



写真-1 小規模水道施設の例 (近畿地方S町)



写真-2 新設された膜ろ過装置

3. 長寿命化と短命化

上水道施設に限らず、人口減少社会における社会インフラ整備の考え方が提示されてきている。これまで各種インフラは、長寿命化、恒久化といった固い（長期利用可能な）整備が推進されてきたといえる。水道施設・設備も、これまでは頑健で長持ちするものをつくることに尽力してきたと考えることができる。これに対して、縮小局面では、インフラをモジュール化することによって、寿命そのものを短命化（もしくは長寿命化と短命化の組み合わせ）するというコンセプトが必要となるだろう⁴⁾。そうすることで、当該地域における将来の需要変化や、場合によっては撤退にも対応可能とするのである。

以上より、例えば膜ろ過装置に関するニーズとして以下を提示できる。

・例：10年間だけ使用可能な膜ろ過装置（薬品洗浄なし）

山あいの小規模な水道施設では、水道原水が清澄である場合も多い。そのようなケースでは、ろ過を何年も継続し、使用期間中薬品洗浄を行わないことも考えられる。一方、制度・しくみという観点からは、今後は、とりあえず10年程度もてば良い施設・設備を設計したり導入しても良いというコンセプトも必要になるのではないかと。

4. 水質基準の緩和措置または柔軟な運用と浄水処理装置

現在のわが国の水道水質基準の体系は以下に示す通りである。

①水質基準：51項目

②水質管理目標設定項目：26項目

（農薬類については、総農薬方式として目標値が定められている118項目を含む）

③要検討項目：47項目

このうち法律によって遵守が義務付けられているのは水質基準51項目である。なお、水質基準は逐次改正方式が採られているので、最新の情報は厚生労働省のホームページを参照されたい。

水質基準はもちろん水質項目と濃度が第一要件である。ただ、それだけではなく、以下に示すいくつかの要件がある⁵⁾。

①まず、検査頻度が規定されている。

すなわち、項目によって、毎日、毎月、年4回、年1回、3年に1回と

いった頻度で検査することが求められる。

②採水地点および地点数を確保することが求められている。原則として、配水系統ごとに1地点以上を選定することとなっている。

③さらに、検査方法も任意のものではなく、公定検査法によらなければならないこととされている。

水質基準とはこれらがセットになったものなのである。

しかしながら、実際には、これらの要件を満たしつつ水質基準を遵守することが困難な地域や水道施設が見受けられる。水質基準に限らないが、社会的に実施困難なことを押し付けると、結局どこかにひずみが生じてしまうものである。水質管理の実情を踏まえて、水道事業者の方からは、項目の絞込みや基準値の数値そのものを緩和してもよいのではないかと声も聞かれる。実際、諸外国では、給水人口の規模によって異なる水質基準を定めているケースがみられる。しかし、そこへ行き着く前段階でも、以下に示すような案をいくつか考えることができる。

ひとつは、上記のように求められている検査頻度を緩和することである。また、検査検体数を低減することも考えられる。例えば、検体を集約した混合検体の検査も可とすることなどである。これは、試料水を混ぜて、その混合試料水の水質を確認できれば可とするという意味である。実際、米国では、5事業体までの集約を認めているケースがある⁶⁾。ところで、基準値とは、瞬間的にもそれを超えてはならないものとされる。これに対して、例えば、測定数の90%が基準値を超えなければよいなど、水質判定を緩和する措置も考えられる。この考え方は、海外で、特に微生物に対する水質判定でしばしば採用されている。

水質基準の緩和措置または柔軟な運用について述べたが、これらは水道事業者や国としての制度上、簡単には実施できないことも予想される。ここで水質基準とは、あくまで安全かつ必要な性状を備えた水を供給するための手段なのであって、それを遵守すること自体が目的ではない。この観点からすると、水質の管理実態が少々甘くなっていたとしても、実際上安全な水が届けられていれば良いと考えることができる。つまり、代替案としては、性能が保証された浄水処理プロセスを導入することが考えられる。

この場合、水の衛生状態（微生物的安全性）を優先させるのが基本となる⁷⁾。このため、水源については、沢水など汚染を受ける可能性がある表流水から、汚染を受けにくい地下水に変更するなど、再選定が必要な場合もあるだろう。導入する浄水処理プロセスは、もちろん原水の種類や特性に対応させたものである必要がある。

現状の例をひとつ示そう。著者らが中部地方H市内にある3箇所の飲料水供給施設（給水人口100人以下の施設。水道法の適用を受けず、したがって水質測定義務もない）を調査したところ、浄水処理設備の濁度除去率は98%、71%、0%と大きな違いが認められたのである。除去率0%であった施設は、簡易型緩速ろ過装置であるが、砂面上の水層に塩素を注入してしまっているため、砂ろ過層としての除去機構が働いていないものであった。このような実情を鑑みると、公的な機関が指定または承認し性能保証した浄水処理プロセスの整備と導入が求められるといえるだろう。

5. 水道料金の上昇と浄水処理装置

すでに出来上がった水道施設を、今後は少ない人口で支えていく必要があること、老朽化施設の更新や耐震化にも経費がかかることなどから、今後水道料金は上昇していかざるをえない。(株)日本政策投資銀行が2017年に発表した資料⁸⁾によれば、今後30年間に全国平均で63.4%もの値上げが必要になるとしている。すでに、水道料金が近い将来2~3倍に上昇すると予測している水道事業者もある。別のレポート⁹⁾によれば、2040年までに全国の約90%の事業者で料金値上げの可能性があり、その値上げ率は平均で36%であるという。また、小規模事業者ほど値上げ率は高い傾向にある。一方、料金上昇に対する利用者の許容範囲は7~13%であり、むしろ値下げすべきとの声も多く、水道事業の実態とは乖離していると指摘されている。

値上げにあたっての水道事業者の一般的な立場とは、「水道料金の値上げは、アセットマネジメントに基づいた将来必要なものなので、どうかわかってください」というものであろう。ただ、このような説得的コミュニケーションでは、人々の態度や行動を変容させるのは困難であることはすでに明らかにされている。

情報公開やコミュニケーションにも、一定の「手法」や「技術」があるのである¹⁰⁾。

以上を背景として著者らは、「水道料金に対する支払意思額を増大させるためのコミュニケーション手法に関する研究」に着手した。これは社会心理学的なアプローチであって、「支払意思額」に関する因果モデルを構築することを試みる。「現在の料金レベルに対する評価」、「水道事業の将来経営に関する認識」、「水道事業に対する信頼度」、「水道水質に関する満足度」、「情報公開などコミュニケーションに対する評価」などの因子がどのように関連し、「支払意思額」にいかに関与するかを探る。

これによって期待できる成果とは、「支払意思額」を増大させるために必要な事項について、半定量的な議論が可能となることにある。例えば、支払意思額を増大させるためにはどのボタンを押す（どの因子に働きかける）のが効果的かという有効因子の特定、あるいは因子Aの方が因子Bよりも2倍程度重要といった因子間の重要度の比較が可能になるだろう。水道事業者が、お客様に対して、説得的ではなく効果的にコミュニケーションを実施する手法を提供できるものと考えている。

ところで、わが国は、人口が急速に減少していく世界最初の先進国と言われる¹¹⁾。しかし歴史上、人口減少を経験した都市や地域は世界各地に見られ、その代表例

として、1990年の東西ドイツ統一後の旧東ドイツがある。主要な原因は旧西ドイツへの人口流出、出生率の低下、産業構造の変化であった。人口減少等によって水需要が少なくなった地域は「コールドスポット」と呼ばれ、そこでは上下水道システムが過大設備となった。旧東ドイツではこの経験を通じて、各種の問題点が浮き彫りにされ、解決のための多方面にわたる議論や数々の提案がなされてきている¹²⁾。

人口減少と水消費量の減少がおきると、水道事業における収入は減少する。一方、人口減少により、水道の固定費を少人数の消費者で負担しなければならなくなり、一人当たりのコストは上昇する。このため1990年代中頃より、ドイツ東部のほとんどの自治体で上下水道料金の値上げが行われた。この値上げは消費者にとって大きな負担になり、その後、消費者は節水や料金が安い地域への引っ越しを行うことで支払額を減らそうと行動した。この消費者の行動は更なる水消費量の減少と人口減少につながり、それにより収入が減少した水道事業者はさらなる値上げを行うという悪循環が生じたのである。度重なる値上げは水道事業に対する不信感を喚起することとなり、デモや陳情、料金の不払い運動などもみられ、政治問題化することもあったようである。

図-1は、わが国で行われた、社会資本管理水準の低下状況と引越意向の関係性

性に関するアンケート結果を示したものである⁴⁾。注目されるのは、バス、鉄道などの公共交通機関が廃止された場合に引越すと回答した割合よりも、水道料金が著しく上昇した場合に引越すと回答した割合の方がやや上回っていることである。水道施設を含めた社会インフラのサービス水準と市民負担の許容範囲に関する議論が必要であるといえる。

実際、料金上昇はどこまで許容されると考えればよいのだろうか？一例として、米国ワシントン州では、地域における家計所得中央値の1.5%のレベルを水道料金が適切かどうかの基準にした⁶⁾。そして、この水準を超えた場合には、水道事業者はさらなる対策を立てなければならないとされた。他に、料金水準の許容レベルの設定例は、米国カリフォルニア州にみられる¹³⁾。そこでは、集中型の浄水処理に代わって、使用場所設置型浄水装置や建物入口設置型浄水装置の導入を検討する際の判断基準の一つ（家計所得中央値の1.5%もしくは2%）として実際に用いられている。もちろんこのような許容水準は、水不足の程度、市民の料金負担の意思の程度などの要因に応じて地域ごとに異なるだろう。

日本の料金水準は、現在、平均で0.8%（ただし、諸外国とわが国を比較する際には、下水道使用料を含んだ額であるかどうかには注意が必要）である。先に水道料金に対する支払意思額を増大させるためのコミュニケーション手法について述べたが、その許容額について扱ったものではない。わが国でも、このような観点からの議論が進むことが期待される。

以上をふまえると、浄水処理装置については、今後以下に示す装置の社会的ニーズが高まることが考えられる。

- ・使用場所設置型浄水装置 (POU; Point of Use)
- ・建物入口設置型浄水装置 (POE; Point of Entry)

6. 配水管内環境に対しても責任をもった浄水処理プロセス

人口減少と水需要の減少によって、配水管内での滞留時間が次第に増大していき、水道水質が劣化することが懸念されている。実際、配水する水道水の数十%を放水している配水区域もある。そうしないと家庭にフレッシュな飲み水を届けられないのである。かつ、(今後更新率

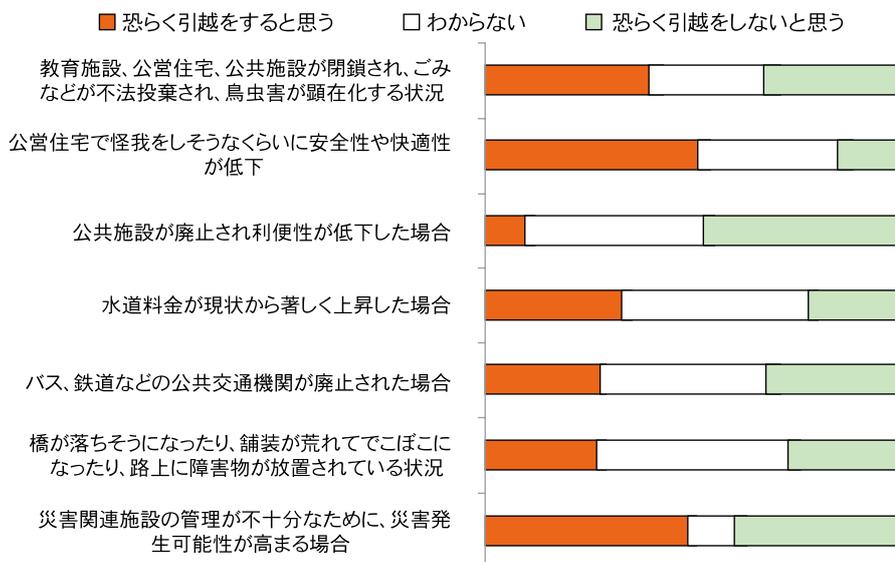


図-1 社会資本管理水準の低下状況と引越意向の関係性（抜粋）⁴⁾

をアップさせる施策が展開されたとしても）配水管の老朽化が進行していかざるをえない現状にある。

このような状況下にあっても、市民が望む水道水とは安全でおいしい水である。老朽化が進んでいく配水系統でこれを実現するための各種技術の必要性が高まっているといえる。それらには、水質を劣化させない配水管網の再構築、更新スピードの改善、老朽配水管内の環境管理の高度化、さらには管内環境の向上に寄与する浄水処理プロセスの開発などが含まれよう。上記のうち実際上核になるのは配水管内環境の管理・制御である。その対処方法を検討するにあたっては次に示す3つの段階に分けると考えやすい。第1段階：浄水処理における制御、第2段階：配水管網における水理条件の管理・制御、第3段階：配水管内環境が劣化した場合、計画的な洗管。

以上の内容の詳細と、それに基づいた研究展開例は別に本誌で論じた¹⁴⁾。その究極の目的は、浄水処理プロセスと配水管内環境の管理・制御に関するトータルソリューションを導き出すことにあるといってもよい。

表-1は、近畿地方の大規模浄水場をとりあげ、送配水系統へ流入する微粒子等重量を推定した結果である。2つの浄水場ともに、オゾン-粒状活性炭を含む高度浄水処理プロセスを備えている。浄水濁度を見るといずれも低く、浄水場としては十分な処理が行われている。しかし、浄水中浮遊物質の重量を実測し、浄水量をかけ算すると、kg/日のオーダーとなる。毎日これだけの量の固体が送配水系統に流入し、それが何十年も続くのであるから、無視できるかどうか即断できない。特に今後、配水管における滞留時間が増大し、配水管内環境が劣化する可能性があるのである。この観点から、今後は、浄水場から流出するkg/日という指標で水質を表示することを提案したい。

表-1のB浄水場では、粒状活性炭層から漏出する不快生物や微粉炭の捕捉を目的として、急速砂ろ過池を粒状活性炭の後に置くことを決定している。なお、これは現行プロセスの「凝集沈殿-急速砂ろ過-オゾン-粒状活性炭」を「凝集沈殿-オゾン-粒状活性炭-急速砂ろ過」に変更するもので、新たにプロセスを追加するのではない。著者らが調査したところ、これによって送配水系統に流入する重量は20kg/日から14kg/日に約

30%低減できると推定した（ただし実験プラントでの評価）。

図-2は、近畿地方K市におけるある配水区域における現行条件（ベースケース）での20年間の懸濁物質の蓄積量分布を示したものである¹⁵⁾。単位はg/m²であり、配水管内面の単位面積当りに蓄積した懸濁物質等の重量を意味する。区域全体での合計蓄積量は9.90kg、単位内面積当たりの平均蓄積量は0.55g/m²であった。

これに対して、上記3段階の制御法を参考にして、表-2に示す3種類、計6つのシナリオを設定した。図-3は、各シナリオ間で単位内面積当たりの平均蓄積量を比較したものである。浄水処理プロセスを改善し浄水中懸濁物質濃度を50%低減できたとすると（浄水シナリオ：ケース1）、全ての配水管の口径を1段階縮小した場合（縮径シナリオ：ケース1）に匹敵する効果が見込めることがわかる。また、洗管を計画的に実施することにより、懸濁物質濃度を20%低減し

た場合（浄水シナリオ：ケース2）や特定の管路のみ1段階縮径した場合（縮径シナリオ：ケース2,3）と同等の効果を得られると指摘できる。

このような知見により、上記3段階の中から、配水管内の環境管理からみて重点的に管理・制御すべき事項・段階を抽出できるとともに、各段階の位置づけや役割について整理することができる。なお、ここで対象としたのは都市域であるが、同様の検討は、人口密度が低く給水人口が少ない飲料水供給施設でも行っている¹⁶⁾。

以上をふまえた上で浄水処理プロセスに焦点をあてると、今後は、配水管内環境に対しても責任をもった浄水処理プロセスという観点も重要になるといえるだろう。それは具体的には、送配水系統に流入する固相量（kg/日）を低減できる浄水処理プロセスということになる。

先に、急速砂ろ過を後置することで懸濁物質量を減らせる例を示したが、この他に急速砂ろ過プロセスの範囲内で低減

表-1 送配水系統へ流入する微粒子等重量の推定例

	浄水濁度	浄水中微粒子濃度 (mg/m ³)	平均浄水量 (万 m ³ /day)	配水系統流入重量 (kg/day)
A浄水場	0.004	5.1	47	2.4
B浄水場	0.032	18	113	20

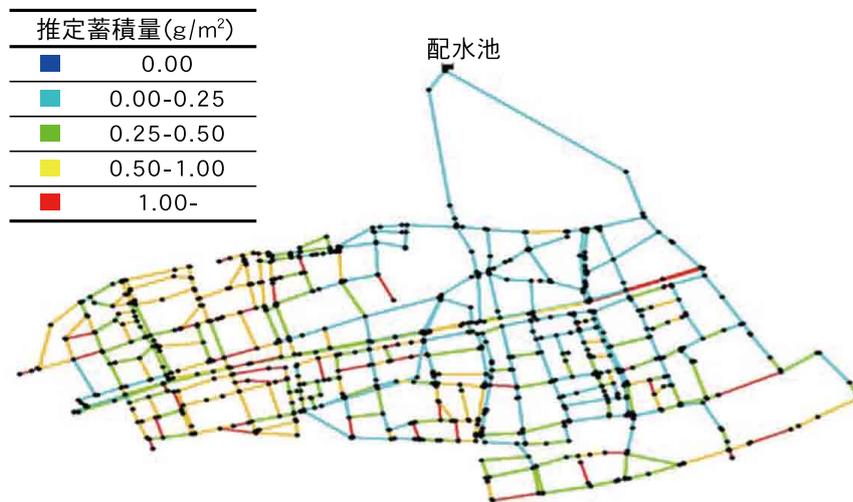


図-2 配水区域における蓄積量分布の推定結果例

表-2 制御性を検討するために設定したシナリオ

設定シナリオ	内容
浄水シナリオ	ケース1 浄水中懸濁物質濃度を50%低減
	ケース2 浄水中懸濁物質濃度を20%低減
縮径シナリオ	ケース1 全管路の口径を1段階縮小
	ケース2 100 mmの管路を75 mm, 120, 150 mmの管路を100 mmに縮小
	ケース3 口径120, 150 mmの管路を100 mmに縮小
洗管シナリオ	区域を10区画に分割、配水開始10年後から1年ごとに最も蓄積量の多い区画に対し管路の洗浄を行う

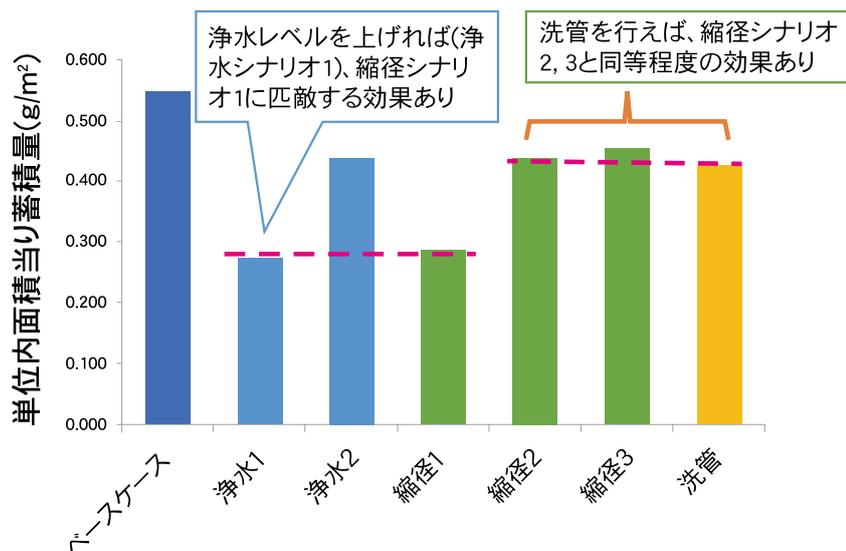


図-3 平均蓄積量のシナリオ間比較

【参考文献】

- 厚生労働省医業・生活衛生局水道課長 宮崎正信：水道行政の現状と課題、平成27年度(公社)日本水道協会全国会議説明資料平成27年10月21日、2015。
- 水道事業基盤強化方策検討会：水道事業の基盤強化方策に盛り込むべき事項、2016。
- 厚生労働省医業・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課：「資料」水道法の改正に向けて、水道協会雑誌、第86巻、第5号(第992号)、pp.17-24、2017。
- 宇都正哲, 植村哲士, 北詰恵一, 浅見泰司：人口減少下のインフラ整備, 東京大学出版社, 2013。
- 厚生科学審議会：水質基準の見直し等について(答申)、2003。
- National Research Council著、浅野孝、眞柄泰基監訳、(財)水道技術研究センター訳：安全な水道水の供給—小規模水道の改善—、技報堂出版、222p、1999。
- 国立保健医療科学院：WHO飲料水水質ガイドライン第4版(日本語版)、国立保健医療科学院、埼玉、2012。
- ㈱日本政策投資銀行 地域企画部：わが国水道事業者の現状と課題vol.2 水道事業者の将来予測と経営改革、81p、2017。
- 新日本有限責任監査法人、水の安全保障戦略機構事務局：「人口減少時代の水道料金はどうか?」(改訂版)、2018。
- (財)水道技術研究センター：持続可能な水道サービスのための浄水技術に関する研究(Aqua10共同研究)成果報告書(2/4)、第1研究委員会「水道施設における診断評価・整備手法等に関する研究」成果集 II 水道事業におけるコミュニケーション手法、2012。
- 丹保憲仁編著：人口減少下の社会資本整備 拡大から縮小への処方箋、(公社)土木学会、2002。
- 三輪雅幸, 伊藤禎彦：急激な人口減少と水需要の減少に直面したドイツ東部の水道事業に関する事例研究、水道、Vol.63, No.2, pp.8-17, 2018。
- California Department of Public Health Division of Drinking Water and Environmental Management：California Point of Use Compliance March 2013, 2013。
- 伊藤禎彦：上水道システムの技術ニーズ —人口減少社会における持続的再構築に向けて—、ベース設計資料、No.171 建築編2016年後版、pp.36-40, 2016。
- 岸本如水, 樽井滉生, 北田純悟, 中西智宏, 浅田安廣, 小坂浩司, 伊藤禎彦：配水管網における管内環境の形成過程とその制御性、平成30年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.410-411, 2018。
- 福岡早紀, 伊藤禎彦, 岸本如水：飲料水供給施設における配水管内環境の評価と制御、平成30年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.412-413, 2018。

に寄与する方法としては、高塩基度 PAC の使用、二段凝集、高分子凝集剤の使用などが考えられる。これらはkg/日を何割か削減することに寄与するだろう。これに対して、精密ろ過膜(MF)や限外ろ過膜(UF)を使用すれば一気に2オーダーあるいはそれ以上の低減効果を見込むことができる。ただ、これらの中間的な技術が見当たらないのが現状である。すなわち、配水管内環境の制御からみると、今後ニーズがあると考えられる浄水処理装置とは、

・急速砂ろ過よりも1オーダー程度だけ濁度/微粒子除去能が優れた膜ろ過装置

ということになる。

これまで膜ろ過に求められてきた技術的要件とは、高フラックスを実現して効率良く水を生産し、ファウリングを起こしにくく、さらに薬品洗浄によってろ過能が速やかに回復することであったと考えられる。しかし今後を見通したとき、水はそんなに大量に生産する必要がなく、

またMFやUFほど除濁性能が優れている必要もない場合も数多いとみられる。本稿で述べてきたことを総合すると、現在のMF、UFを低機能化(膜ろ過法の多様化と言い換えても良い)させた上で、10年間程度使用可能な膜ろ過装置、しかも極小規模の装置に社会的ニーズがあるといえるのである。

7. おわりに

本稿は、水道事業の基盤強化の実質化を念頭におきつつ、今後求められる浄水処理装置・施設について論じた。もちろんこれらのみで、冒頭に記した困難な課題を解決できるわけではないが、技術は、抱えている課題を軽減・緩和するために一定の役割を果たすことができるし、またそうあらねばならない。人口減少社会に対応した上水道システム構築に貢献できる技術開発を進めたいところである。