

浄水技術の動向

丹保憲仁*

1. 概 説

浄水操作は、取水された原水と人間の飲用に適した安全・清浄な水質をもつ浄水との間の水質上のギャップをうめる操作である。原水と浄水の水質の差はさまざまであり、山間の渓流水・地下水などのような飲用水の要求水質とほとんど差の無い原水から、海水淡水化の場合のように 34 g/l もの溶存無機塩類の除去を要するものまでである。比較的清浄な河川から取水する場合には除去の主対象は粘土質などの濁りであるが、河川の汚濁化が高度となるにつれて、浄水は懸濁・溶存する多種の有機・無機物、ガスの除去や細菌よりウィルスに至る病原生物の無害化までの多種の内容を含むものとなりつつある。

これら除去の対象となる物質を水中に存在している粒径によって、溶解質・コロイド質・懸濁質等に分類し、それに対応する処理手法を示すと表-1 のようになる。

表-1 水中に存在する不純物の粒径による分類と対応する処理の手法

I. 粒子の直径	II. 粒径による便宜上の分類	III. 物質例 便宜上の名称	処理手法		
			IV. 分離	V. 成長・分解	VI. 無害化
1A° 10 ⁻⁸ cm	溶解質	水分子, 単純分子, イオン, 塩類	イオン交換*, ガス交換*, 透析*, 蒸留*	凝析	中和
1mμ 10 ⁻⁷					
10 ⁻⁶	コロイド質	重合金属水酸化物, 色度粒子, ビールス, たん白質の有機高分子など	凝集	殺菌	
10 ⁻⁵					粗有機質, 濁度, 粘土類, 細菌類 主成分
1μ 10 ⁻⁴					
10 ⁻³	粗懸濁質	シルト粒子	遠心分離	フロック形成	
10 ⁻²					砂粒子
1mm 10 ⁻¹	粗懸濁質	巨大浮遊粒子	スクリーン		
1cm 10 ⁰					

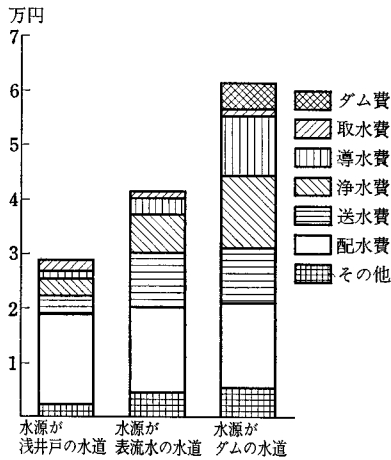
浄水処理の目的は、殺菌等の無害化処理以外は、最終的には原水から不純物を分離することにある。表-1 の第 IV 欄に見られるように、われわれの持っている分離手段は不純物粒径が 10⁻⁶~10⁻³~4 cm の間に欠いている。したがって、一般の浄水処理においては第 V 欄の成長操作によって小粒子を集塊させて分離に供し得るよう粒径調整を行なわねばならない。現在最も広く常用されている急速ろ過法は第 V 欄の成長と第 IV 欄下段の分離法を組み合わせたもので、凝集処理を適用しうるコロイド質以上の大きさの不純物についてのみに有効である。したがって、通常の浄水法は溶解性物質の除去に対しては無効であり、水道界では溶解性物質の処理を特殊処理として扱っている。特殊処理の内常 pH の酸化で凝析し不溶化する鉄・マンガンイオンを除く他の溶存成分は在来の急速ろ過法等と原理を異にする分離機構を持つ第 IV 欄*印に属する処理を必要とする。したがって、懸濁質除去システムに溶存物質分離機構を直列に使用することが必要となり、処理費用は倍増する。また、この

ような処理法によって、きわめて低い許容値 (ppm~ppb) を持つ諸溶解成分の除去を十分に達する技術の開発は、まだほとんど定形化されていない。

しかるに、水源の汚濁化の進行に伴って増加する被除去の主成分は溶解成分であり、これが飲用水の許容値を越えることは珍しくなくなってきた。溶存成分がいったん許容値を越えれば水質変換システムは上述のように多段化し、一挙に複雑化するの、浄水費用は倍加する。図-1 は現在の水道で水 1 m³ をつくる際の建設単価を示したもので原水輸送系(貯水・取水・導水)に対する浄水系の費用は 1:1 程度である。この際の浄水費用は急速ろ過を主とする懸濁質除去機構であるから、

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部衛生工学科

図-1 1日1m³の水をつくる水道施設の建設単価



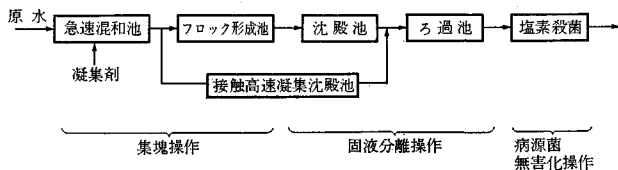
溶解質除去を要求される原水水質になると一挙に水価格は増加することとなるので、一般には懸濁系除去のみで済む淡水源を求め原水輸送費が溶存系の除去に要する費用に見合うところまで良質の原水を求める原水輸送指向型の水道計画が行なわれている。また、高汚濁水中に現われる微量有害成分・ウィルス等の除去、無害化の手法の不確実、分析・監視技術の未発達の水質上の安全を第一目とする水道において、原水輸送指向と水質変換指向の経済的な平衡点を越えた領域まで原水輸送指向型の計画をおし進めざるを得ない結果になる。

淡水源の枯渇によって下水の再生、海水の淡水化のようなきわめて大幅な水質変換を必要とする水質変換指向型の水道計画を行なう段階に至り、浄水費用が現在の6~7倍以上にも至れば、図-1に示される浄水費と浄水輸送費(送配水・給水)の割合からして、浄水輸送系を用途別に上水道・雑用水道といった二元輸送系に分離する必要が生じてくる。この場合、雑用水道系の低質量量は水洗便所用水を主とし上水使用量の1/2程度の量が考えられよう。

2. 懸濁質除去を対象とした一般的な処理

現在の水道の浄水法として最も広く用いられているのは図-2に示すような急速ろ過システムである。古くから広く用いられてきた緩速ろ過法は、原水を河川下流域に求めることが多くなった現今の水道では、悪化する原

図-2 標準的急速ろ過システム流れ図



水水質と用地取得難のために小規模水道の限られた範囲にしか建設され得なくなってきた。また現存の大規模な緩速ろ過浄水場も原水水質の悪化、能力増の要求のために次第に急速ろ過法に変換されようとしている。

急速ろ過法の最近の技術面における進歩の動向は、①各単位操作の高率化、②管理の集中・計装化、③高汚濁原水への対処、といったところにある。また研究・開発面では、①処理の高率化・安定化のための各種浄水機能の明確化・理論化・システム化が要求され、②管理面での理念、その実現のための方策、が検討されようとしている。

研究・開発の動向を上記の各操作ごとについて考えてみると次のようである。

(1) 集塊操作

a) 凝集剤・補助剤の発達

浄水処理ではアルミニウム塩・鉄塩が一般に凝集剤として用いられてきている。在来用いられてきた硫酸アルミニウムなどの凝集剤は沈殿分離可能なフロク形成をすることのできるpHと注薬量の範囲が比較的狭く、より安定性の高い、使用範囲の広い凝集剤の進歩が望まれていた。錯塩化学の進歩の結果、凝集効果を示すアルミニウム、鉄は重合した水酸化物であることが明らかとなり、重合塩化アルミニウムなどの重合水酸化物を凝集剤原液として比較的安定に保つことが可能になってきた。これらの重合塩凝集剤は、適用凝集条件の幅の広さと生成したフロクの良好な沈降性から、固液分離過程設計の基礎値となるフロク形成後の沈降速度を大幅に引き上げることが可能にするに至った。また、活性珪酸、アルギン酸ソーダ、有機高分子剤などのフロク形成補助剤の研究・開発が進み、硫酸アルミニウムなどの凝集剤(主剤)との併用によって、フロクの沈降性・ろ過性の向上が計られるようになった。一般の凝集主剤である硫酸アルミニウムも取り扱い、計量化、注入の自動化の容易な液体を用いることが普及してきて、在来の固形を溶解し注入する方式に取って変わりつつある。さらに飲用に対して無害な低価格・高性能の凝集剤・補助剤(主として高分子物質であろう)が研究されている。このような凝集剤の使用によるフロク物性(強度・密度)の改善は、ただちに後続する固液分離操作設計の基礎数値であるフロクの沈降速度(分布)を変化させるので、固液分離過程の設計にただちに応用し得る定量的な物性の表示の研究が不可欠である。凝集剤の改良は沈殿池の流量負荷率を一挙に引き上げる可能性を持つものであり、分離過程の改良・くふうとともに高率化の主眼目点である。

b) フロック形成

凝集剤の添加によって潜在的な集塊能を持つに至った微小粒子（数ミクロン）を、次段の沈殿池で重力によって適当な時間内で、沈降分離しうのような寸法の粒子塊（フロック）をつくることを目的とした弱い攪拌操作をいう。フロック形成が急速ろ過システムの重要要素として取り入れられたのは1940年代後半のことであり、1890年代の末に一応の成立を見た急速ろ過法のその後の最大の改良点である。一般に横軸パドル型の攪拌機を持つ30分程度の滯留時間をもつ池として設計されているが、その設計の理論化はCampが速度勾配説を提示したのに始まる。近年に至って乱流衝突理論をもとにしたエネルギー消費率、原水懸濁質濃度、滯留時間の積 $G \cdot CT$ 値にフロック形成が支配されることが明らかとなってきて、その理論化が進行しつつある。フロック形成装置も種々考案され、機械攪拌のほかに管路・迂流路によるものも多く実用化されている。

フロック形成の1960年代における進歩の一つは、あらかじめ形成されているフロック群（スラリー）と原水中の微フロックを接触させることによって、 $G \cdot CT$ 値の C を大きくとることによりフロック形成池の滯留時間 T を著しく短縮し得る接触フロック形成方式の普及である。この方法は、次で述べる高速沈殿池の基本機構として1960年代に建設された急速ろ過浄水場の30%にも使用されている。

(2) 分離操作

a) 水平流式沈殿池

在来単純な箱にすぎなかった水平流式沈殿池も、1950年代後半からは水流状況を理想的平行流に近づけるため、流入・流出整流壁、中間整流壁、導流壁、流出トラフなどの整流構造を設けることが一般的となってきた。また、水流が拡散流になる円形水平流沈殿池が用いられなくなったり、短型池の底を下流に向けてあげ中間流出トラフを設けるなど、水流の整一化に関する種々の努力が行われてきた。一方、用地難などから沈殿池を多階槽にする試みも多く実用化された。遂には傾斜板沈殿池が一般に用いられるようになり、極端に小さい表面負荷率の採用を可能にしたことから池の容積を著しく小さくし得、滯留時間基準の在来の経験的設計指針を全く無用化してしまった。

b) 上昇流式沈殿池

接触フロック形成の導入は、短時間に斉一な大型フロックをつくることを可能にし、フロック分離を上昇流式の小容量の池で良好に行なうようになった。

その結果、これらの装置は平常濁度が比較的高い原水に対する有力な処理法として高速沈殿池なる名称で広く

用いられるようになった。

c) ろ過

Hanzenらによって提唱された標準ろ過速度120m/日の急速ろ過池は、その安全性が過大であるとし、漸次高速化に向い、現今では150m/日ぐらゐまでが普通となり、300m/日にもおよぶものが提案されるに至っている。ろ過の高速化に従い、損失水頭を低下させる目的からろ材は順次粗大化し、現在では有効径0.6mm前後のものが標準となり、深層部までフロックを侵入させ、ろ過層を有効に働かせようとするのが一般の流れとなっている。この線上で、上層部に粗粒材、下層部に細粒材を配し、上部を抑留量を大とする目的に、下部を洩出防護の目的に用い、フロック洩出に対して十分安全な高速ろ過を進めるなどの試みが提案されてきている。また、湖沼を原水とする水に対し、沈降分離し難い軽い藻類等に対して、細い金網を用いる（マイクロストレーナー）とか、砂ろ過を用いるとかして前処理をする試みも行なわれ、二段ろ過のシステムがわが国でも採用されるに至った。

ろ床の洗浄については、水流ジェットによる表面洗浄を逆流洗浄と併用することが一般化した。さらに高速深層ろ過が進むにつれて、特殊な洗浄方法の検討がまたれる。清澄ろ過のほとんどの部分は、残念ながらまだ理論的設計を行なうにたる十分な解析が進んでおらず、実験的・経験的方法によらざるを得ない。

(3) 汚泥処理

河川の汚濁が大きな社会問題となり、大型の浄水場が出現して集中的に固液分離操作より汚泥が発生するようになって、浄水場でもその処理が大きな問題となってきた。現在では、硫酸洗浄・濃縮・中和・機械脱水のシステムが主として採用されている。

(4) 殺菌

戦後占領軍の命令で強化された塩素殺菌法が完全に定着した手法となり、アメリカ式の残留非結合形塩素を保証する方式が全国で行なわれている。原水の汚濁化に伴って前塩素処理を採用する浄水場がふえ、アンモニアなどの酸化とともに浄水の安全をさらに高めるべく工夫がされている。ウイルスに対する安全が通常の塩素注入量では保証しにくいところから、注入時の高濃度が後に影響を及ぼさないオゾン等の採用も検討され始めている。

(5) 計装化

1960年代に建設された多くの浄水場は何らかの形で中央管理方式をとり、新設の大型浄水場は水量管理を主とする電算機制御も取り入れつつある。水質管理面

では操作因子の解析がまだ十分になされていないこともあって、通常は記録の段階にとどまっており、将来自動制御に向かったの研究が望まれる。

3. 溶存成分に対する処理（特殊処理）

（1）高汚濁原水の処理

大河川下流部から取水している水道は、人為汚染の影響を大きく受けるようになってきた。含有する有機溶存成分、合成洗剤（ABS）等の除去のために、活性炭吸着処理を在来の急速ろ過系に付加する方法が実用され始めた。現在は粉末状のものを原水に添加し、吸着を完了させた後通常の凝集・沈殿・ろ過によって除去しているが、将来大規模に吸着が使用される段階では、懸濁質除去の終了後に粒状炭を用いた吸着塔を付す形に移行し、吸着剤の再生が行なわれるようになる。

細菌、臭気、アンモニア、その他の還元性物質の無害化、酸化などの目的で前塩素処理を行なう場合が多くなりつつある。

（2）マンガン除去

戦後の塩素殺菌の強化によって、以前は問題にならなかったマンガンの配水管内での沈積が進行し、“黒い水”の問題は鉄さびによる“赤い水”とともに1960年代の水質管理上の大きな問題となった。多くの研究の結果、マンガン砂と前塩素処理の併用法、過マンガン酸カリウムを着水に添加し、急速にコロイド化したマンガン粒子を凝集処理する方法の2つが実用化された。

（3）有害微量重金属成分

有機水銀による水俣病、カドミウムによるイタイイタイ

イ病などが出現し、水道原水中の微量成分に対する配慮の欠除が一挙に問題化してきた。これらの微量成分は現在の浄水技術ではほとんど除去することができず、検出すらも容易でない。したがって、汚染源に対する早急な対策と水質分析・監視の技術と機構の早急な成立が問題解決のために不可欠である。さらに、現在まで看過されてきた多種の微量成分に対する組織的な研究が飲料水の安全確保のために望まれる。

（4）下水の用水化

処理下水を急速ろ過系にかけて懸濁物を除き、工業用水源とする水道が1960年代初めに出現した。しかし、溶解成分が無処理のまま多量に残留しているため、使用者側の希望に添った水質とはなりえずその前途は暗い。都市用水源として使用する場合には、二元配水系を用い、雑用水源として用いる場合を除けば、溶解成分の除去のために高度な処理を付加しなければならない。吸着、電気透析、イオン交換、蒸発等々の超高級処理の手法の開発と、精製した水の安全に対する研究が必要である。現在わが国ではこの方面の研究成果をほとんど持っておらず、海水淡水化よりも有望な水資源開発の手段と考えられながら、その立ち遅れは著しい。

（5）海水の淡水化

アメリカ合衆国OSW（海水淡水化のための国家機構）の研究を追ってわが国でも通産省関係で研究が進められ、特殊地域で小規模な実用プラントが運転されるに至った。蒸留法と電気透析法が主として用いられているが、コストの点から都市水道に淡水化が実用されるのは、その以前に長距離導水、廃水の再利用等の淡水源確保のためのいくつかの段階を経た後になると思われる。

▶ 特集用語解説/3

嫌気性・好気性

微生物の分類の一つで、遊離酸素を必要とするものを好気性、必要としないものを嫌気性微生物という。これらのうち、遊離酸素を直接必要とする微生物を絶対好気性（Obligate aerobic）と呼び、菌類、藻類、原生動物、ある種の菌がこれに属する。遊離酸素を必要としないし、酸素がむしろ毒物となるような微生物を絶対嫌気性（Obligate anaerobic）と称する。多くの細菌と酵母は好気性・嫌気性いずれの環境において発育することができ、これらを、通性嫌気的（Facultitative anaerobic）

と称する。溶存酸素のない状態を嫌気的、そうでないときを好気的という場合もある。

逆転層

普通、気温は高さとともに下降する、断熱状態で乾燥空気の場合10°C/km、湿潤空気の場合は6°C/kmがこの傾向がある高さの層で逆転し、むしろ気温が上昇傾向を示すような層を逆転層という。このような状態は、冬の朝の地表の近くの大気によく起こる。気温が逆転していると、大気は安定で対流は起こらず、煙や自動車の排気ガスが下層大気にたまって、スモッグの原因となる。