

<特集>

上水高度処理における水質管理と新しい固液分離技術

佐々木 隆

阪神水道企業団 水道技術管理者 管理部長

兵庫県神戸市東灘区西岡本3丁目20番1号 Tel.078-431-2079 E-mail:sasaki-t@hansui.or.jp

概要

わが国の水道では、給水開始以来増加を続けた給水量も 1997 年をピークに減少に転じている。また、2002 年度には水道の管理体制の強化や責任の明確化が定められた水道法の改正が実施され、水道に求められるものが量から質へと変化してきた。企業団ではこれらを踏まえ、クリプトスポリジウム等をはじめとする各水質項目において水質管理技術を確立する総合質管理に取り組んでいる。また、浄水場ろ過池の更新を見据え、膜による固液分離技術に焦点をあて、従来の膜処理のマイナス面を解消したより効率的な膜処理技術の開発にも着手した。

キーワード:クリプトスポリジウム、臭素酸、AOC、固液分離、大容量膜、相互補完型濾過

1. 水道の水質問題を取り巻く状況

今から 119 年前、公衆衛生の向上と生活環境の改善を目的とした日本で初めての近代水道が横浜で給水を開始した。現在の普及率は 97%を越え、水道は衛生的かつ快適な生活を送る上で欠くことができない基盤施設となっている。最新の統計によると、給水人口 1 億 2,375 万人に対して年間 164 億 m³の水道水が供給されている(水道統計・平成 15 年度、日本水道協会)。この給水量は 1997 年の 170 億 m³余をピークに、少しずつではあるが毎年下がってきている。ピークを迎えた日本の人口や、水道を取り巻く社会情勢の変化から、水道水の需給関係も既に大きな転換期に入ってきている。

わが国の水道が果たしてきた役割を象徴的に表したのが Fig.1 である。1960 年代に水道普及率が急速な伸びを示したが、それに呼応するように水系感染症の罹患率が急激に減少した。しかしながら、昨今の水道水質を巡っては、クリプトスポリジウム等の感染性微生物や、ハロ酢酸や臭素酸等の

学物質の問題がクローズアップされるようになってきた。このような中で、2003 年 4 月に厚生科学審議会から水質基準の見直しに関する答申があり、これを踏まえて厚生労働省は新しい水質基準等の制度の制定・改正を行い、2003 年 5 月に水質基準に関する省令を公布した。

新基準では、新たに追加された臭素酸等を含め 50 項目が定められており、2004 年度から施行されている。今回の改正において水質検査の精度管理と精度保証のあり方についても見直しが進められ、正確な検査結果を得るための体制を構築することが求められている。

一方で、2002 年度施行の改正水道法では、水道事業の広域化や未規制水道の管理適正化、貯水槽水道の管理の徹底など、水道の管理体制の強化や責任の明確化を図ることが焦点とされている。これらは需要者の視点に立つ対応が求められており、水道の安全性やコストに関する情報提供の推進など、利用者とのパートナーシップを前提とするものである。さらに、2004 年 6 月には水道のあるべき将来像への具体的な施策や工程を包括的に示した「水道ビジョン」も策定され、すべての水道関係者が連携して取り組んでいくこととなった。

以上のような状況を踏まえ、水道事業者としては新基準への遵守はもとより、より高い水質管理レベルへの目標設定、事業者側と需要者側のパートナーシップ構築、等に対して努力を重ねているところである。本稿では、阪神水道企業団(以下、阪神水道)の水質管理技術について、クリプトスポリジウム、臭素酸、および同化性有機炭素(AOC)を対象項目として取り上げ、需要者への説明責任という観点から述べる。また、現在検討中の膜とメディアとを共存させた新しい固液分離、M-MAC と HHF に関する技術紹介も行う。

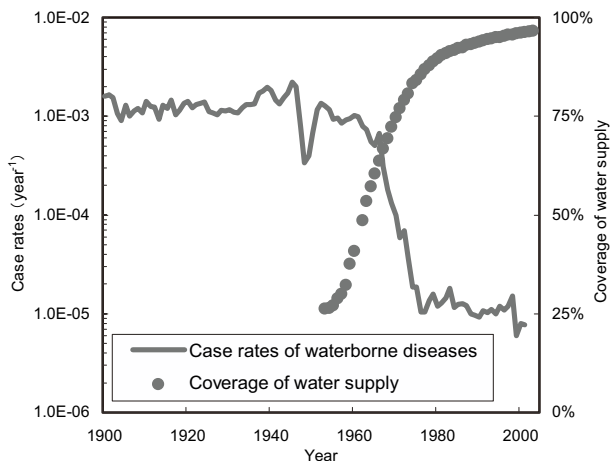


Fig.1 Changes in waterborne diseases and domestic waterworks
酸化消毒副生成物、極微量に存在するダイオキシン等の化

2. 需要者への説明責任からみた水質管理技術

2.1 クリプトスポリジウムへの防御

阪神水道の浄水システムを Fig.2 に示す。この処理フローはマルチプル・バリアのコンセプトに基づいており、対象水質項目のマスバランスに重点を置いている。現在、最も需要者への説明責任を果たさなければならない水質項目の一つとして、感染性微生物のクリプトスポリジウムがあげられ、原水中の検出状況や浄水処理による除去手順を明らかにしてお

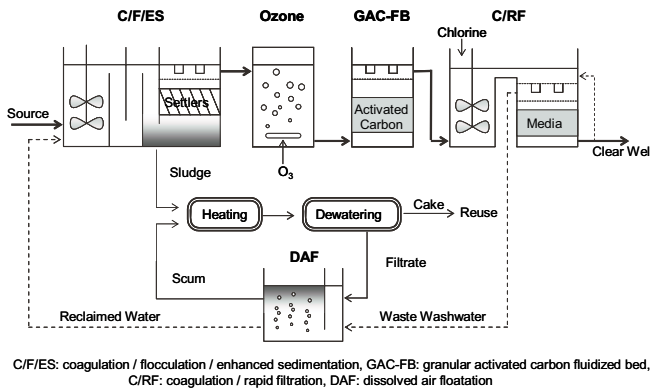


Fig.2 Water treatment flow of Hanshin Water

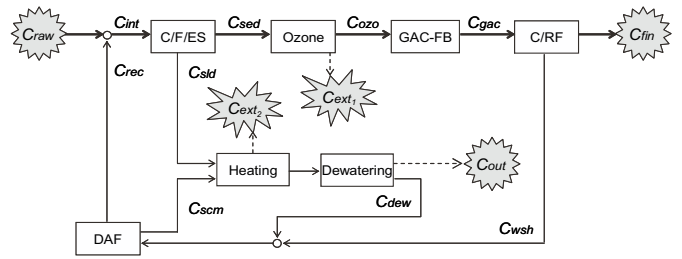
くことが必要である。まず、水源の監視においては、これまで取水原水中に検出されたことはなく、また淀川下流の水道事業者で組織する水質協議会の共有情報でも、ごく希に検出されるという状況にある。次に、浄水処理における対策に関しては、粒子としてのオーシストの物理的分離と、酸化消毒剤による化学的不活化、並びに加熱処理で構成されており、これらのプロセスでどのように除去されるかを明確にしておかなければならない。

Fig.3 は各単位プロセスの除去率から浄水システム全体を評価したものである。原水中のクリプトスポリジウム・オーシスト (C_{raw}) は次の3つのいずれかに帰着する。

- ・ 最終的にケーキに含まれて系外に排出される: C_{out}
- ・ オゾンまたは加熱によって系内で消滅する: C_{ext}
- ・ 最終処理水に漏出する: C_{fin}

水環境中のオーシストは極めて保存性の高い生物トレーサーであるため、 C_{out} 、 C_{ext} および C_{fin} の総和は C_{raw} に等しくなる。図中の n は収支計算上のバッチ数で、 n の増加が定常を意味する。 C_{raw} から C_{out} 、 C_{ext} および C_{fin} への最終的な収率は、それぞれ zero、 1.00×10^0 (すなわち 1- C_{fin}) および 3.16×10^{-8} と推定される。以上のように、Fig.2 のフローでは 7-log の除去を保証する。なお参考までに、加熱プロセスがない場合には、 C_{out} 、 C_{ext} および C_{fin} への収率は、それぞれ 9.40×10^{-1} 、 5.06×10^{-2} および 3.20×10^{-8} となる。

浄水の技術は単一のプロセスとしてではなく、システム全体で評価される。クリプトスポリジウム対策についても、各単位処理プロセスの合理的な組み合わせと適切な施設管理に



$$\begin{aligned}
 C_{int}(n) &= C_{raw}(n) + C_{rec}(n) & C_{out}(n) &= (1 - 10^{-1.0}) \cdot (1 - 10^0) \cdot (C_{scd}(n-1) + C_{scm}(n-1)) \\
 C_{sed}(n) &= 10^{-1.3} \cdot C_{int}(n) & C_{ext_1}(n) &= (1 - 10^{-4.0}) \cdot C_{sed}(n) \\
 C_{zo}(n) &= 10^{-4.0} \cdot C_{sed}(n) & C_{ext_2}(n) &= 10^0 \cdot (C_{scd}(n-1) + C_{scm}(n-1)) \\
 C_{gac}(n) &= 10^0 \cdot C_{zo}(n) & C_{ext}(n) &= C_{ext_1}(n) + C_{ext_2}(n) \\
 C_{wsh}(n) &= (1 - 10^{-2.3}) \cdot C_{gac}(n-1) \\
 C_{scd}(n) &= (1 - 10^{-1.3}) \cdot C_{int}(n-1) \\
 C_{scm}(n) &= (1 - 10^{-1.0}) \cdot (C_{wsh}(n-1) + C_{dew}(n-1)) \\
 C_{dew}(n) &= 1.0 \cdot 10^{-1.0} \cdot (C_{scd}(n-1) + C_{scm}(n-1)) \\
 C_{rec}(n) &= 10^{-1.0} \cdot (C_{wsh}(n) + C_{dew}(n)) \\
 C_{fin}(n) &= 10^{-2.2} \cdot C_{gac}(n)
 \end{aligned}$$

Results:
 $C_{out} \rightarrow$ Zero
 $C_{ext} \rightarrow 1.00 \times 10^0 \cdot C_{raw}$
 $C_{fin} \rightarrow 3.16 \times 10^{-8} \cdot C_{raw}$

Fig. 3 Balance and behavior of *Cryptosporidium* oocyst

よって、比較的高レベルな除去率を安定的に保持していくことが重要である。

2.2 臭素酸の抑制

臭素酸は原水中の存在量よりも、オゾン処理や次亜塩素酸ナトリウム注入に由来する部分が大いいため、同物質の生成抑制に関する説明責任が必要とされる。阪神水道猪名川浄水場における2004年4月から2005年3月までの主な水質項目の挙動を Table 1 に示した。オゾン処理での臭素酸濃度は平均 0.0013mg/L で、高水温期に高くなる傾向が表れている。不連続点中間塩素処理後の砂濾過水で微量ながら増加しており、次亜塩素酸ナトリウム溶液中に含まれる臭素酸に起因しているものと考えられる。

浄水プロセス(特にオゾン処理)で生成した臭素酸は、活性炭処理での除去が期待できないため、臭素酸抑制にはオゾン処理条件の最適化による生成抑制技術を確認していくことが重要である。阪神水道ではオゾン処理時の pH 値の適正化に加えて、抑制因子が残留している状態でのオゾン適用により、比較的低い濃度に抑えることができていた。しかし、高水温期における濃度上昇への対策として、オゾン処理での臭素酸生成の低減化を目的とし、pH 制御の強化(オゾン処理時の pH 値をさらに低くする)、フィードバック制御残留オゾン濃度設定値の再調整、オゾンガス通気配分の変更などを試行しているところである。

Fig.4 と Fig.5 に示しているのは、Table 1 と同じ 2004 年度の臭素酸の挙動である。測定は毎月 1 回行い、標本数 12 のデータから平均値、95%信頼区間、各測定値を示した。

Table 1 Selected water quality parameters (fiscal 2004)

Parameter	Raw	C/F/ES	Ozone	GAC-FB	C/RF
HPC bacteria (/mL)	58,000	1,100	1	12,000	none
THMFP (mg/L)	0.032	0.020	0.017	0.013	-
Manganese (mg/L)	0.024	0.028	0.021	0.011	<0.005
Bromate (mg/L)	<0.0005	<0.0005	0.0013	0.0010	0.0012
AOC (mg/L)	0.058	0.034	0.119	0.060	0.052
Dioxins (pg-TEQ/L)	0.039	-	-	-	0.00055
pH (-)	7.4	7.1	7.1	7.0	7.5

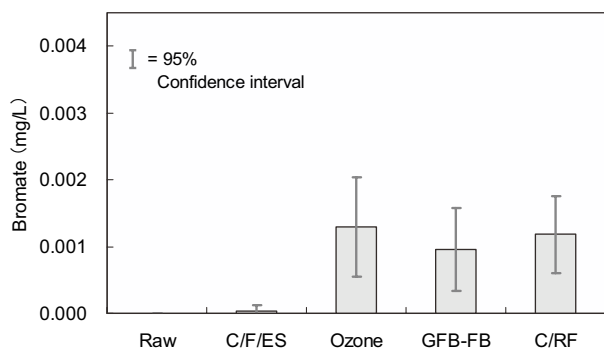


Fig. 4 Bromate in water treatment train

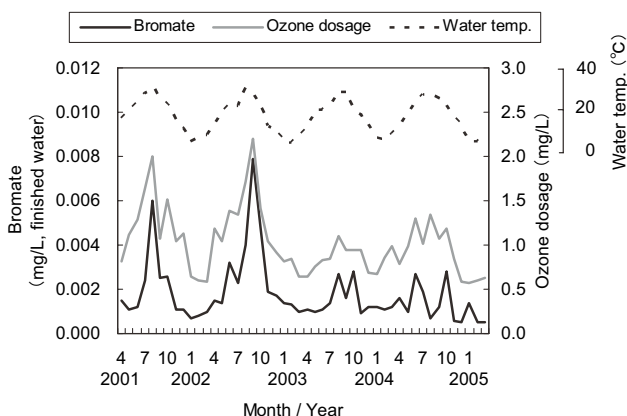


Fig. 5 Change of Bromate in finished water

水道法には一定頻度の検査毎の値が水質基準値を超えないように定められている。Fig.5はこの評価法に基づき全測定値をプロットしており、この間の最高値は0.0079mg/Lである。しかし、この値は年間12回の測定値の最高値ではあるが、浄水場から出たすべての水の最高値とはいえない。特に臭素酸など発癌性の物質で、その上に定量値が大きく変動する項目の評価には、Fig.4の信頼区間で表すような非超過確率値で取り扱う方がより合理的と思われる。水道法施行規則改正に伴って、2005年度から水質検査計画の策定と計画に基づく検査結果の公表が義務づけられているが、この公表は需要者にとってわかりやすく、かつ、水道水の安全性を円滑に伝達しうる評価方法でなくてはならない。評価方法は測定値の標本数やばらつきに依存するため、水質検査計画策定の際に明確にしておくことが重要である。

2.3 AOCの抑制

前述のクリプトスポリジウムと臭素酸については、原水から浄水に至る範囲の代表項目として取り上げたが、ここでは浄水場から給水栓に至る間の水質保持に焦点を合わせてみる。すなわち、送配水系統における水質変化を微生物学的観点から把握することを目的として、微生物増殖ポテンシャルの指標であるAOCと、その構成成分と考えられる蟻酸、シュウ酸、および酢酸について、遊離塩素存在下での変化を室内実験と実施設で調査を行ってみた。結果をFig.6に示したが、上記の各項目すべてに漸増傾向が認められた。

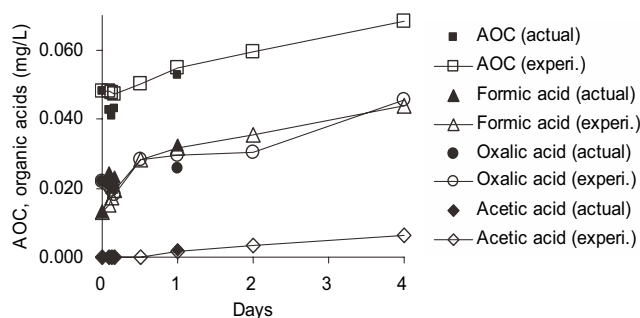


Fig. 6 AOC and organic acids in distribution system

これらの微生物増殖ポテンシャルの増加は、残留塩素の酸化力に起因しているものと考えられ、配水管網内で遊離塩素の酸化力が有効な間は増加すると推測された。また、浄水場から1日経過した供給地点での測定結果が室内実験と同程度の濃度であったことから、末端給水栓においても室内実験と同様のレベルで推移するものと考えられた。細菌類の再増殖抑制についてはAOCを0.01mg/L以下に制御しなければならないとの報告¹⁾もあり、今回得られたデータからは、実施設での微生物増殖の可能性を否定することはできない。

また、実態調査によると、送水管や配水池壁面には茶褐色の物質が付着しており、その中にアデノシン三リン酸、従属栄養細菌、およびAOCが検出され、送配水施設壁面付着物は生物膜と判断された。送配水施設の微生物は水中に浮遊しているのではなく、これらの生物膜中で、残留消毒剤の暴露から保護されて、長期間生存しているものと考えられる。

以上のように、室内実験による微生物増殖の可能性や、実施設送水管内の微生物の存在を考慮すると、水利用点に至るまでの微生物的安定性を確保するためには、これらAOC構成成分の挙動に着目するとともに、AOC抑制技術の確立が重要となってくる。

2.4 総合質管理への取り組み

水道の水質問題がクローズアップされはじめてから、今日までおよそ40年が経過した。この間の水源水質状況や阪神水道の浄水技術をごく簡単に振り返ると次のようになる。1969年に水源上流の琵琶湖で初めてかび臭が確認され、1979年からは程度の差はあるものの、今日に至るまで毎年のように発生している。1971年から粉末活性炭処理によって対応してきたが、1980年には給水区域全体で延べ1,000件近い苦情が殺到し、翌年と翌々年にも同様のクレームが相次いだ。粉末活性炭処理で対処し得ない一連の異臭味問題が、阪神水道の水質管理に、ひいては水源を共有する淀川下流取水事業者にも、多大な衝撃を与えた。

これを機として、抜本的な水質改善を目指した実験調査がそれぞれの事業者で開始され、阪神水道においては1993年の施設一部稼働を経て2001年には供給能力全量が、中オゾン・活性炭流動層システムを主とする新しい浄水

技術に切り替わった。従来の処理技術と比べて、かび臭物質の除去、トリハロメタンやハロ酢酸の抑制、クリプトスポリジウムや農薬成分の除去(但しシミュレーション)、AOC の抑制等に顕著な効果が現れている。オゾンや活性炭処理のトレード・オフ項目とされている生物やマンガンについても以前と比べて遜色なく、臭素酸の生成もオゾン処理導入ケースでは比較的低いレベルで推移している。

しかしながら一方では、水道の広域化や配水池容量の確保等、安定供給への施設整備に伴って送配水過程における滞留時間が増加し、その間の水質保持も重要視されるようになってきた。水道水質のリスク管理には、病原微生物への防御や化学物質の除去に加えて、酸化消毒副生成物や微生物再増殖の抑制が不可欠である。本章では、改正水質基準の施行に際して、新しい水質検査方法への取り組みを述べ、具体的な水質管理項目としてクリプトスポリジウム、臭素酸、並びに AOC を取り上げて整理してみた。浄水技術でこれらの除去や生成抑制を行い、送配水システムでの挙動を監視することによって説明責任を果たすとともに、水質検査計画に基づきながらデータを公表していくことで、需要者の視点に立った総合質管理へのアプローチが可能となる。2004 年 4 月から新しい水質基準が施行されたが、水質検査結果の積極的公開や水質管理技術に係る説明責任を基に需要者との健全なパートナーシップを築き、時代の要請に応じた水道水質の確保に努めなければならない。

3. 膜とメディアとを共存させた新しい固液分離技術

3.1 着想に至る背景

Fig.2 に阪神水道の浄水システムを示したが、この処理フローにおける固液分離は凝集沈澱(C/F/ES)、凝集濾過(C/RF)、および溶解空気浮上(DAF)の 3 種の操作の連携によって組み立てられている。これらの分離機能が合わさって、2.5-150 μ m の微粒子を 3-log 以上除去することができ、浄水のカウントは 10¹/mL 以下の範囲にある²⁾。上記 3 つの処理プロセスはいずれも重力の作用を利用したものであり、それぞれ、Gravity Sedimentation、Gravity Media Filtration、および Gravity Floatation というように分類することができる。

阪神水道には 916,900m³/d の猪名川浄水場と 373,000m³/d の尼崎浄水場がある。前者は 3 系列の浄水施設からなり、297,500m³/d × 2 系列と 321,900 m³/d × 1 系列で構成されている。すなわち、概ね 300,000m³/d 規模の浄水施設が全部で 4 系列存在することになる。なお、処理方式はすべて Fig.2 のフローとなっている。これらの中で、猪名川浄水場の 2 系列の濾過池が経年化してきており、近い将来に耐震化も含めた施設更新が計画されているところである。

この更新計画の原案では、2001 年に全面リニューアルされた尼崎浄水場の濾過池(アンスラサイト単層高速濾過池、ろ過速度 300m³/d)³⁾と同じ技術を導入することとなっている。

しかしながら、昨今の膜濾過技術の著しい進展を目の当たりにすると、重力に依存しない大規模膜技術による更新も検討していく必要が生じてきた。

3.2 大容量膜実現への条件:M-MAC

わが国の水道における膜濾過の導入事例は 2004 年度末現在で 442 箇所となっており、導入の目的はクリプトスポリジウム対策など、いわば水質の確保がほとんどである。ところが、トータル施設能力 360,000m³/d が示しているように、1 箇所平均では 1,000m³/d に満たない小さい規模となっている。このような状況の中で、300,000m³/d 規模の膜濾過施設を実現していくには、既往の概念とは全く異なる発想で取り組んでいかなければならない。

まず、濾過について重力利用の Media Filtration と重力に無関係の Membrane Filtration の 2 つの技術的側面から大容量化を考えてみる。前者は長い歴史を有し、分離能は 2-log 程度であるものの安定性には優れており、大容量化のスケールメリットがある。一方、後者は非常に高い分離能を有し、世界的にも目覚ましい躍進を遂げているが、スケールメリットを生じさせるためには、回収率や薬品洗浄など膜技術固有の指標や操作にかかる問題点を解消しておくことが前提となる。

機能的な面からは、前者には珪藻類などの藻類による濾過閉塞、後者にはマンガンや AOC 物質などによるファウリング⁴⁾という、それぞれにマイナス特性がある。注目すべきは、淀川をはじめ、日本の多くの河川表流水においては、藻類が問題となるのは春から夏にかけてで、また、マンガンや AOC 物質は渇水期となる秋から冬にかけてと、季節的な変化がある点である。

そこで、阪神水道は、これら全く異なる特性をもつ濾過機能を同一の処理装置内に共存させ、積極的に協調させることによって、年間を通して運転操作上のリスク回避を図る、Membrane-Media Active Collaboration (M-MAC) という新しい技術を提案した。

3.3 相互補完型濾過装置の提案:HHF

M-MAC のイメージを Fig.7 に示す。積極的な協調のメリットを有効に活かすという観点からは、膜とメディアの水量比は概ね同量が基本となろう。そして、この段階で従来の急速濾過池の 2 倍量を処理することができる。さらに、対象水(未濾水)中の懸濁成分量が少ない場合には、メディアの濾過速度と膜面積を増加させることによって、4 倍量の能力を期待することも可能となろう。

Fig.8 は重力開放型のメディア濾過池のセンター・ガリット(中央の流入排水渠)に、浸漬型の膜モジュール⁵⁾を配置した阪神水道型 M-MAC の原型となる構造で、二種類の異なった濾過機能の相互補完を特徴づけた Hanshin's Help-each-other Filter (HHF)である。ガリットが膜の浸漬槽としての役目を果たすことができ、薬品洗浄時の隔離も容易となる。本濾過装置全体の定期保守業務の一環として膜の薬品洗浄を位置付けることで、大容量化へのボトルネック

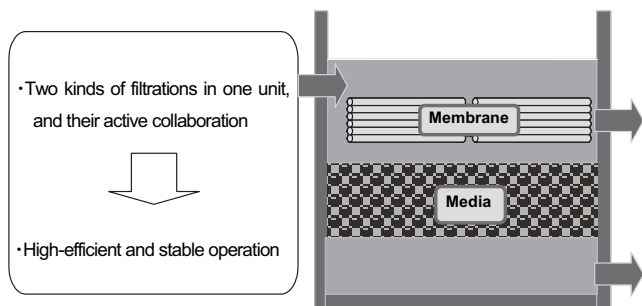


Fig. 7 Image of M-MAC

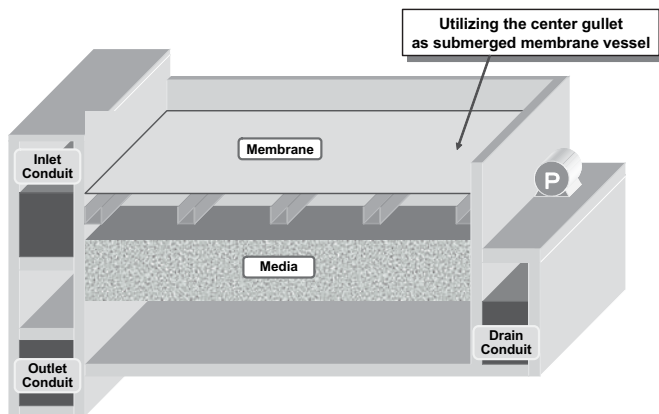


Fig. 8 Outline of HHF

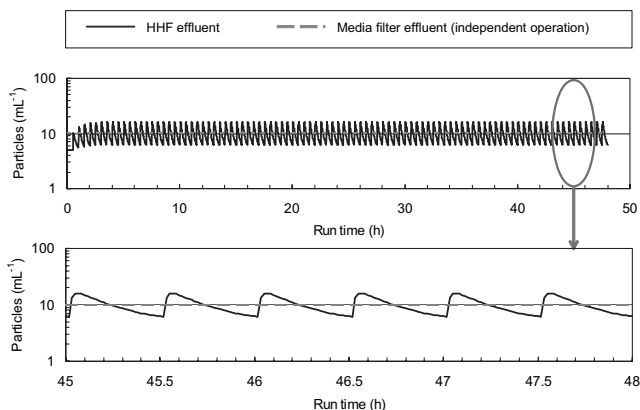


Fig. 9 Behavior in particles

となっている負の要素を排除できる。また、比較的短時間のサイクルで繰り返される膜の物理洗浄に伴う排水は、ガリット内で未濾水と混ざり合ってメディア濾過の原水となる。この操作で、回収率という指標も消し去ることができる。HHFでは膜濾過とメディア濾過の混合水が最終処理水となるが、その水質はそれぞれのHHFごとにFig.9に示すようなシミュレーションとなる。HHFの池数の増加につれて、ピークやボトムの影響を緩和することができる。なお、メディア濾過の逆洗排水は、従来の濾過池と同様の手順で処理される。したがって、浄水場内の水の循環や物質収支はFig.2と変わらない。

3.4 M-MAC、HHFの今後の展開

M-MACは膜の大容量化への諸条件をクリアしていった一つの基本技術で、それを具体化したモデルがHHFである。

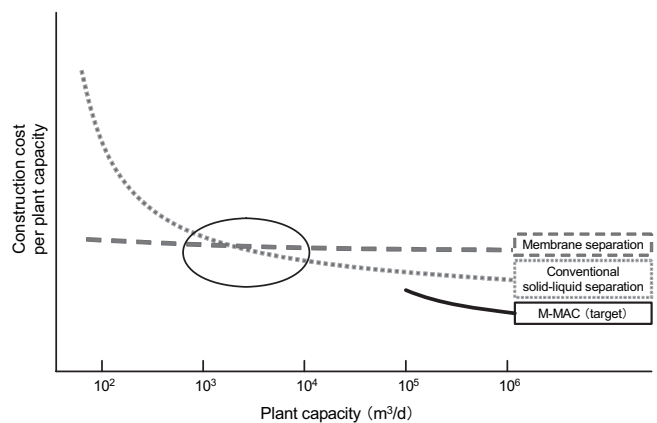


Fig. 10 Construction cost and plant capacity

膜とメディアのそれぞれの長所を積極的に引き出していくところに最大の特徴がある。言葉を変えれば、重力依存型のメディア濾過と、重力非依存型の膜濾過の、同一装置内共存による安定的かつ効率的な固液分離機能の確保ともいえる。

本技術の実用化に向けては、マスバランスの明確化や運転特性の評価、維持管理方法の確立等に必要となる情報を得るためのパイロット実験が不可避となろう。また、水道事業者や関連企業、行政機関が連携して、M-MACやHHFに合った膜の開発を進めていくことも前提となる。同時に、本件に関する情報を広く公開して、多方面の分野からの参画を促し、関係する個々の技術の開発競争へと展開していくことも肝要である。そして最終的には、Fig.10に示すようなM-MACのコスト特性が実現することを目指すものである。このような過程を経ることで、大規模浄水場への固液分離操作の導入オプションが増すとともに、大容量膜検討の機会と濾過に関わる技術改革の気運が高まっていくことを期待する。

【参考文献】

- 1) Van der Kooij D. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *Journal of AWWA*, 84(2), 57. (1992).
- 2) Sasaki T., Kobayashi K., Hanamoto T. and Nagashio D. An optimized water treatment system incorporating protection against *Cryptosporidium* oocysts. *Water Supply*, 18(1), 422. (2000).
- 3) 佐々木隆、長塩大司、花元隆司、最新技術を導入した施設更新、第5回水道技術国際シンポジウム、131. (2000)
- 4) Kimura K., Hane Y., Watanabe Y., Amy G. and Ohkuma N. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water. *Water Research*, 38(14-15), 3431. (2004).
- 5) Best G., Mourat D., Kosterman M. and Thorner K.A. Application of immersed ultrafiltration membranes for large scale drinking water treatment plants, *Proceedings of 2000 AWWA Water Quality Technology Conference*, 1298. (2000).