

下水再生水の有効活用

～シンガポールの NEWater プロジェクトを視察して～

チーフコンサルタント 加納 達也

下水再生水の有効活用

平成 18 年度末時点で我が国の下水道普及率は 70% を超え、下水道に流入する水量は膨大なものになっています。これまでも下水処理水は、トイレ用水等の雑用水や親水用水などで使われてきましたが、その利用率はわずか 1.4% と低い水準にとどまっています。世界では降水量の少ない地区を中心に、水需要増大への対応やダム開発によらない持続可能な代替水源として下水再生水の利用が積極的に進められています（表 1）。

今後は、我が国においても、渇水リスクへの対応や災害時における防火用水への活用、地域冷暖房やヒートアイランド対策における温冷熱供給源としての活用が期待されています。また、近年の膜処理等の水処理技術の進歩が、再生水利用への期待を更に高めることになっています。

下水再生水の活用においては、世界的にもシンガポールが有名です。同国では、下水再生水の膜処理によって、飲料も含む国内水消費の実に 15% をまかなっています。

（表 1）主要国の下水処理水の再利用率と利用量

国	利用率	利用量
米国	6%	365,000 万 m ³
イスラエル	83%	28,000 万 m ³
スペイン	12%	35,000 万 m ³
イタリア	7%	23,000 万 m ³
*シンガポール	30%	6,200 万 m ³
日本	1.4%	20,000 万 m ³

国土交通省報告書（2009 年 2 月）

*シンガポールはヒアリング結果からの推計値

このたびシンガポールの再生水の利用状況について現地における視察調査を行ってまいりました。そこで得た情報を踏まえながら、同国の下水再生水の有効活用について概要を報告いたします。

シンガポールの水事情

シンガポールは、東京 23 区とほぼ同じ面積の小さな島

国です。国内にまとまった大きさの内陸湖が無く、水の確保にはこれまでも大変に苦労してきたようです。同国では、大きく 4 つの水源をもっています。1 つ目の水源は、雨水や河川水を貯水池にためて利用するもの（Local Catchment）です。同国には 15 箇所の貯水池がありますが、そのうちのひとつが今回視察したマリーナ堰（Marina Barrage）です。これらの貯水池は互いにパイプラインで連系され、水量の調整ができるようになっています。このように河川水を水道水源として利用するという仕組み自体は、我が国の水道事業と変わりません。そのような意味では、これから述べる 3 つの水源が、同国にとって特徴的な水源となります。

2 つ目の水源は、隣国のマレーシア Johor Bahru から輸入される水です。輸入される水は、実にシンガポールで使用される水の半分です。シンガポールでは一日に 3 億ガロン^aの水が使用されますので、日量平均でおよそ 5.7 億リットル（東京ドーム 0.5 杯分）の水がパイプラインを通してマレーシアから輸入されていることとなります。水の購入価格をめぐっては、しばしば両国間で対立があり、マレーシア側の外交カードとして使われてしまいます。水の輸入には二つの相互契約があり、それぞれ 2011 年と 2061 年に契約が終了します。シンガポールにとっては、最初の契約が切れる 2011 年までには水の自給率を 100% にするのが悲願となっています。3 つ目の水源は、下水処理場から海に放流されていた再生水を、膜処理技術によって高純度な水として浄化したものを、産業用や飲料水の原料として使うというものです。これが、今回のメインの視察先である“NEWater プロジェクト”で、後ほど詳しくご紹介いたします。4 つ目の水源は海水の淡水化です。これは Hyflux という民間企業が建設運営するプロジェクトで同国の Jurong 地区にプラントがあり“Tuas プロジェクト”と呼ばれています。Tuas は 2005 年に竣工し、一日に同国で使用する水の 10% にあたる 3,000 万ガロンの水がつくられています。これは、シンガポールで最初の PPP（官民共同：Public-Private Partnership）案件として事業化されました。Tuas の淡水化の技術は、NEWater と同じ膜技術が採用されています。シンガポールは島国ですので、海水は同国の特徴に適った水源といえますが、塩分濃度が高いため、NEWater よりコストは高くついてしまうようです。

^a 1 ガロンは 3.8L として換算

このほかに“ABC Waters (Active Beautiful Clean)”と呼ばれる、河川護岸を親水化するようなプロジェクトも含めて、今後5年間で水に関する28もの事業が計画されています。このように河川管理から上水道、下水道等、水に関する一連の業務は公益事業庁（PUB: Public Utilities Board）が所管しています。少なくとも水に関連したことについては、日本の国土交通省と厚生労働省、及び自治体の水道局と下水道局などが一つになったような機関がPUBです。

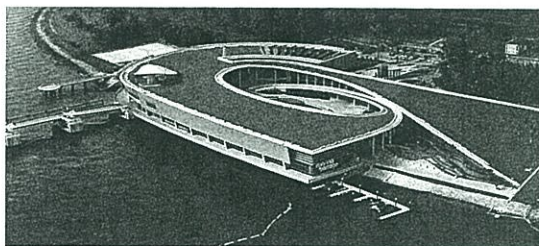
同国では家庭での一人あたり一日の水の使用量は156リットルだそうです。これは我が国の200リットルと比べて少ない水準です。PUBでは水源の確保とともに水の節約のPRにも積極的に取り組んでいます。

マリーナ堰の概要

昨年秋に竣工したマリーナ堰（写真1及び写真2）は、市街地に立地する唯一の貯水池で貯水量も最大級です。マリーナ堰の集水面積は10,000haで、これはシンガポールの国土の1/6に相当します。多目的堰であるマリーナ堰は大きく、①利水、②洪水調節機能、③親水の3つの機能を持っています。総工費はS\$2.5億ですので、日本円に換算すると170億円程度^bになります。マリーナ堰には、“SUSTAINABLE SINGAPORE GALLERY”と呼ばれるシンガポールの水の施策を紹介する展示スペースがあります。そこでは、マリーナ堰の機能のほかにも、周辺のウォーターフロント整備計画やPUBの推進する水に関するプロジェクトが分かりやすく紹介されていました。見学を予約すれば説明員も無料でついていただけます。



（写真1）マリーナ堰（向かって左が河川側、右が海側）



（写真2）マリーナ堰の概観（PUB Web site）

マリーナ堰は、長さが315mで7つの可動ゲートと排水ポンプをもった河口堰です。20年ほど前に当時のリー・クアンユー首相が、水源の確保を主たる目的としたマリーナ堰構想を提唱したことを契機に開発が進められました。周辺のカジノ開発と一体となった臨海都市は2010年に完成する予定です。日本でこのような大規模な河口堰を開発する場合には、漁業や環境への影響、経済性などの観点から社会的な議論を呼ぶことは必至です。シンガポールではどうだったかを質問しましたが、説明員には、「なぜそんなことを聴くのか」といったふうに、私のこの質問の意図が実感としていま一つ理解できなかったようです。おそらく、水源確保という最優先の目標の前に、国全体が一丸となってこの事業の実現に邁進してきたということでしょうか。

しばしば洪水に悩まされてきた同地区では、マリーナ堰の洪水調節機能にも大きな期待が寄せられています。大雨などで堰の中の水量が定められた量をこえると、7つあるゲートが一斉に開放され海に放流されます。高潮などで海への放流ができない場合は、ポンプを使って強制放流を行います。これによって同国における洪水の被害想定エリアが3,200haから70haにまで激減したということです。排水ポンプは電動式ですが、電源として系統電源に拠らないディーゼル発電機が設置されていました。

建物の屋上は緑化され、訪れる人のためにオープンスペースとして開放されていました。また、屋上の一角には70kWの発電容量のソーラーパークが設置されていました（写真3）。これはシンガポールでは最大規模の太陽光発電所で、この建物で使用する照明や空調等の電力の50%をまかなうことができるそうです。



（写真3）屋上庭園と奥に見えるソーラーパーク

マリーナ堰は竣工しましたが、今は堰内の水が完全に淡水化していないので水源としては使えません。2年後には完全に淡水化される予定で、同じく2年後に完成する予定の新しい2つの貯水池とあわせて、第1の水源であるLocal Catchmentにより同国の2/3の水がカバーされる予定です。

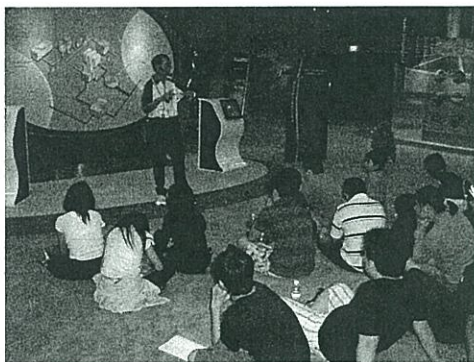
^b 1シンガポールドル=70円で換算

NEWater の概要

NEWater は、1998 年に米国の膜技術や水利用の仕組みを参考にしつつ、PUB 傘下の水資源局（Singapore national water agency）と環境省（MEWR: Ministry of the Environment and Water Resources）の共同により研究がスタートしました。2003 年に Bedok 地区と Kranji 地区で最初のプラントが竣工しました。続いて 2004 年には Seletar 地区のプラントが完成し、更に 2007 年 3 月には Ulu Pandan Plant がスタートしました。これら 4 つのプラントで、シンガポールで使用する水の 15% が供給されています。2008 年 1 月には、Changi 地区において 5 番目となる最大級のプラントの建設が着手されました。このプラントが稼動する 2010 年には、同国で使用する水の 30% を NEWater でまかなうことができるようになります。これで、2 年後を目処に Local Catchment で確保される水源とあわせて、計算の上では 100% 近い自己水源を確保することができることになります。

Bedok プラントに併設されるかたちで、NEWater のビジターセンターがあります。ここは、NEWater に対する国民の理解と水の大切さを知ってもらうために作られた展示施設です。マリーナ堰のギャラリーと同様に、日本から事前に PUB のウェブサイトに見学の申し込みをしておく必要があります。私たちが訪れた日は、インドネシアから修学旅行できていた小学生の団体が一緒でした。NEWater のプラントは、大切な水源施設ですから厳重な警備のもとに PUB による直営管理がされていますが、ビジターセンターの案内は PUB から委託された民間の説明員が英語で行います（写真 4）。入場は無料で、最寄の駅から無料のシャトルバスも出ています。

NEWater のビジターセンターにいくと、膜処理された水にミネラル分などを転嫁したペットボトルが配られます（写真 5）。はじめは恐る恐る飲んでみましたが、先入観さえなければ、日本で飲むミネラルウォーターと全く遜色のない水であることが確認できました。



（写真 4）子供たちへの説明の様子



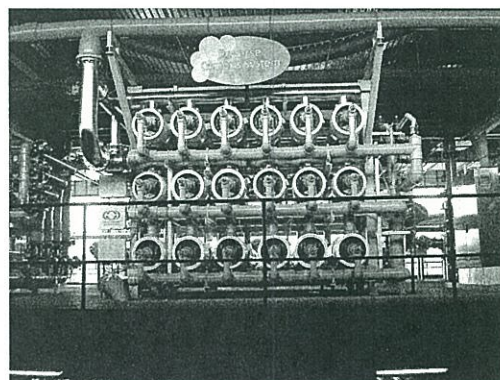
（写真 5）NEWater のペットボトル

NEWater の膜処理技術

NEWater は、下水再生水を膜処理することで、飲んでも人体に安全な水を供給します。浄化工程は、大きく 3 つに分かれます。はじめに、MF（MicroFiltration）もしくは UF（UltraFiltration）によって前処理されます。ここで固形物、細菌、一部のウイルスなどが除去されます。膜は 3～6 週間に一回の頻度で洗浄するそうです。MF は日本の旭化成、UF は米国の GE 社のものが使われています。

2 つ目の工程では、逆浸透（RO: Reverse Osmosis）膜（写真 6）により、微細な重金属や、農薬、ウイルス、大腸菌などが除去されます。RO 膜による処理水は、ほぼ純水に近い状態になります。6 ヶ月に 1 回の頻度で膜の洗浄を行い、5 年おきに膜の交換を行っています。RO 膜は日本の日東電工のものが使用されていました。3 つ目の工程は、紫外線殺菌で、ここではここまで処理できなかったバクテリアやウイルスが完全に殺菌されます。

これらの工程は 3 交代勤務によって 24 時間体制で管理されています。



（写真 6）RO 膜装置

NEWater は、2000 年にデモ工場が竣工、導入までに 3 万回におよぶ実証テストが行われ、専門家による検討が重ねられました。2002 年に米国の環境庁（USEPA）や世界

保健機構 (WHO) の飲料水の基準をクリアすることが確認され (表 2)、シンガポールにおける水の安定的確保に必要なものと位置づけられました。

(表 2) NEWater と USEPA/WHO の水質比較

Water Quality Parameters	NEWater	USEPA/WHO Standards
濁度 (NTU)	<5	5/5
pH	7.0-8.5	6.5-8.5/-
塩素イオン (mg/L)	<20	250/250
アルミニウム (mg/L)	<0.1	0.05-0.2/0.2
銅 (mg/L)	<0.05	1.3/2
鉄 (mg/L)	<0.04	0.3/0.3
亜鉛 (mg/L)	<0.1	5/3
大腸菌 (個/100mL)	検出されない	検出されない

PUB web site など

2002 年 8 月には首相自ら NEWater の水を飲むパフォーマンスが国民に流されました。次いで、同国で最も大切な日である 8 月 9 日の独立記念日には NEWater の入ったペットボトルが全戸に配布され、国民的プロジェクトとしての機運が高められました。

1974 年にも一度は下水再生水の利用検討が行われたようです。その際はイオン交換による浄化で、水質確保としては一定の成果をあげたものの、コスト面での折り合いがつかないためにこの構想は頓挫したようです。また、同じ造水技術でも中東などで採用されている蒸発濃縮法も検討されましたが、蒸発に必要な熱源の一つである火力発電所が下水処理場から離れた場所に立地しており、コスト的な要因から採用は見送られました。

NEWater の再生水の供給先

NEWater の水は、産業・商業用のユーザー向けをメインに使用されています。また、NEWater で作られる水の数%とわずかな量ですが、一部は飲料用水の原料として貯水池にブレンドされて使われています。このような水源にブレンドして使うことを「計画的な間接利用」という意味で、“Planned Indirect Potable Use (IPU)”と呼んでいます。Bedok プラントでは精製される水のうち 2%がこの IPU で使用されています。IPU は、米国の南カリフォルニアのオレンジ郡やバージニア州などで、20 年も前から行われていた方式です。再生水の安全な使い方としてビクターセンターでも積極的にアピールされていました。なお、川の上流で水を放流し下流地点で取水するという方法は、同じ間接利用方式でも「非計画的」という意味で、“Unplanned Indirect Potable Use”と呼ばれます。日本でも、上流部にある下水処理場から河川に放水された再生水は、結果的に河川水とともに下流で取水され水道水として使われています。あまり意識されてはいませんが、日本でも非計画的な IPU は行われていることにな

ります。NEWater において水を直接的に使わない理由は、下水再生水ということによる心理的な要因が一番大きいようです。また膜によって得られる水の純度が高すぎるために、人に不可欠なミネラル分が欠乏していることも理由としてあげられますが、一旦貯水池に混ざれば、ミネラル分も補われます。現状で一日に消費される水の 1%に相当する 300 万ガロンが IPU によって供給されています。マレーシアからの輸入契約の一つが切れる 2011 年には、これを 2.5%にまであげていく予定です。

産業・商業の主な用途は、エレクトロニクス工場向けの純水や、ビルのクーリングタワー用冷却水、ボイラー補給水などです。NEWater からの水は弱酸性ですので、苛性ソーダによって中和された後に使用されています。不純物の少ない水としてそのまま使用できますが、これを超純水まで精製して使用しているユーザーもあります。ユーザーは随時募集されており、PUB のウェブサイトからユーザーの希望を伝えることができます。RO 膜による水質が良いために、利用の希望は多いという説明でしたが、既に膜処理能力の 90%以上の水供給を行っており、これ以上需要が高まれば設備規模を増強する必要があるということでした。既に、Bedok プラントでは需要にあわせるために一日の精製能力を 700 万ガロンから 1700 万ガロンに増強しています。NEWater の原水となる下水再生水のうち 30%が使われ 70%は海に放流されているそうですので、現状の 2 倍強の供給余力が残っているといえます。

実際にユーザーに使ってもらうためには、何らかのインセンティブが必要になります。PUB の説明によると、NEWater の水は極めて純度が高いために、自前で精製を行うより効率がよいこと、また NEWater を使った場合に、水の使用にかかる税金が免除されることがインセンティブとして大きいとされています。水の供給価格は PUB として利益の出るレベルではなく、できるだけ安く供給し、少しでも多くの水を使ってもらうことに意味があるのだと、PUB の職員が力をこめて説明されていました。経済性のことを重視するあまり、ユーザーに使われなくなってしまうようでは、本末転倒なことになってしまいます。

最後に

今回視察した再生水利用では、日本の膜を使うなど、技術的には日本でも可能なプロジェクトです。技術的にできることが社会制度面の障壁によりできないということは本件に限ったことではありませんが、国情の違いこそあれシンガポールのダイナミックな動きを見るにつれ、我が国でも下水再生水を都市における重要な水資源として位置づけ、何がその利用の妨げになっているのかを改めて考えてみるべきだと感じたところです。(終)