特集2・再生水を親水用水として活用する

下水の高度処理技術の現状と課題

小 越 眞佐司*

1. はじめに

大気や水は地球規模で循環している資源です。しかし、水は地理的に偏在し、その恩恵をすべての生物が等しく享受することはできません。水の偏在は人類の持続的な発展における主要な制限要因の1つであり、これを克服するための技術が常に求められてきました。人口の増加や気候変動によって、水問題は今後さらに深刻化すると予想されており、その解決のため、降雨を貯えて利用するという伝統的手法に加えて、新たな水利用技術が必要とされています。下水処理水再利用はそのような新たな水利用技術の代表的なものであると考えられています。

2. 下水再利用の現状

都市における水の利用には飲用の他にさまざまな質的レベルを要求する多くの用途がありますが、現状では、ほとんどの用途に飲用水が用いられています。下水再生水の用途については利用実態の方すでに述べられていると思いますから、ここでは、個別循環利用による水洗トイレ用水利用も含めた日本の下水排水再利用の現状を海外の例と比較してみる

ことにします。

世界の水再利用は都市排水を農業用の灌漑に利用することが中心です。イスラエルやメキシコを初め多くの国々では下水およびその処理水が灌漑用に利用されています。これに対し、わが国の再利用は都市における非飲用用途への利用が中心である点に特徴があります。図-1¹⁾は米国カリフォルニア州における水の再利用とわが国の水の再利用（下水道を経ずに業務ビル等で浄化槽を介して再利用する個別循環利用を含み、工場等における工程水等の循環利用を除く）を比較したもので、水洗用、修景・環境維持用水等、都市の非飲用用途への利用率が農業用への利用率をはるかに上回る日本の水再利用の特徴が示されています。

なかでも特徴的なのは修景・環境維持用水としての利用です。日本では都市の中に子供の遊び場や住民の憩いの場となるような川がかって存在しました。それが経済発展に伴って行われた、道路舗装等による都市の不浸透化、雨水排除を含む下水道整備、流下能力だけに着目した都市河川改修等によって失われました。人々の生活が豊かになり、周辺環境の改善に対する要求が高まると、失われた都市の自然

図-1 日本とカリフォルニア州の再利用比較

*建設省土木研究所 Masashi OGOSHI

図-2
用途別の再生処理法

■ 二次処理 ■ 凝集
■ ろ過 ■ 活性炭
■ オゾン ■ RO膜
■ 生物ろ過

環境を取り戻す事業が行われるようになりました。そのようなものの中でも重要な事業として、失われた川の復活や、身近な公園にせせらぎを作ることが行われ、その水源に下水再生水が広く利用されることになりました。その結果が、図-1に示すような再利用用途の現状に現れているわけです。

図-2²⁾は下水処理水の再利用に際して下水処理場でどのような付加処理を行っているかを、再利用用途別に表したものです。図-2から、農業用水、事業場用水および融雪用水には、通常の下処理水である二次処理水または比較的簡単な高度処理であるろ過処理を行った水が用いられる場合がほとんどであるのに対して、水洗用水、修景・親水用水では、ろ過処理のほか、さまざまな付加処理を行った高度処理水が用いられることが多いことがわかります。農業用水、事業場用水および融雪用水の場合は一度に大量の水を必要とすることが多く、二次処理水程度の水質で十分利用可能であるため、費用がかかる高度な処理は行われていないのだと考えられます。また、利用者が特定されていて再利用水であることを十分認識しており、誤用の可能性が少ないことも付加処理の水準が低い理由の1つに上げることができます。他方、水洗用水、修景・親水用水では、比較的小規模な場合が多く、処理経費の総額が小さくて済むことから、高度な処理が行われることが多いものと考えられます。また、利用者が不特定多数で再利用水であることが周知されていない可能性があり、誤用の可能性が高いと考えられることも付加処理高度化の理由の1つとして考えられます。河川維

持用水は流量が大きく、高度な付加処理を行うとそれなりに費用も大きくなるのでろ過処理水を利用する場合があります。

3. 高度処理法と再生水質の基準

再利用にあたって行われることになる高度処理法は、その用途によって異なります。用途毎に要求される水質が異なることによるわけですが、現在わが国の下水処理水再利用において実施されている処理法は凡そ表1に示す通りです。これらは単位処理技術であり、実際にはいくつかが組み合わせられて処理が行われています。表中に*印を付けたものは水質を向上させる中核的な技術として用いられているものです。ここに示されているように窒素リン除去のための高度処理を除く主要な水処理技術が網羅されています。

一方、再生水を利用するための国の水質基準は未だ定められていません。現在、公に基準として使用されているのは、昭和56年度の建設、厚生、通産の3省合意に基づく水洗便所用水に関する暫定基準(案)で、表2に示す通りです。その他に、建設省が下水処理水の利用に関して示した暫定基準(案)(表3)と、平成2年に建設省高度処理会議が制定した修景・親水用水水質検討マニュアル(案)に記載された水質目標値(表4)があり、これらが自治体

表1
主な再生処理技術

再生技術	備考
急速ろ過	*
凝集ろ過	*
生物ろ過	*
活性炭吸着	*
凝集沈澱	
塩素消毒	*
オゾン処理	*
紫外線殺菌	
膜ろ過	

表2
水洗便所用水

水質項目	基準
大腸菌群数	10個/ml以下
pH	5.8～8.6
臭気	不快でないこと
外観	不快でないこと
残留塩素	検出されること

表3 下水処理水循環利用技術指針(案)

	散水用水	修景用水
大腸菌群数(個/ml)	検出されないこと	検出されないこと
残留塩素(結合)(mg/ℓ)	0.4以上	—
外観	不快でないこと	不快でないこと
濁度(度)	—	10以下
BOD(mg/ℓ)	—	10以下
臭気	不快でないこと	不快でないこと
pH	5.8～8.6	5.8～8.6

等で再利用を行う場合の水質設定根拠として利用されています。これらの基準(案)では、水質基準値は供給者から利用者へ水が引き渡される地点で供給者が保持しなければならない水質としているため、実際の再利用施設内の水質は利用者が管理しなければならないこととなります。

再生水に手足を浸すことが想定されている親水用水利用では、最も良好な水質が設定されていますが、特に大腸菌群数について、カリフォルニア州等における基準である2.2 MPN/100 ml以下と比較すると大変緩い基準値になっています。

4. 再生水利用の問題点

4.1 快適さ

再生水の非飲用利用に際して重要な点は、汚れていると感じない水であることです。用途によってはただ不快で無ければ良いということになります。ここで問題になるのはこのような快適さは実際に利用者が再生水と接する場でそのように感じるかどうかということです。現在用いられている暫定的な指針等でも、色、臭い、濁りといった快適さにつながる項目が定められていますが、それは再生水が利用者の設備に供給される時点でのことであり、利用設備内での変化については考慮されていません。このことが次に述べるような快適でないことに基づく問題につながっています。

4.1.1 藻類の繁茂

最も代表的な例は、修景施設で藻類が繁茂して汚れて見えたり(写真1)、独特の臭いが発生することです。云うまでもなく、その原因は再生水中に含まれる窒素やりんです。たとえその水が窒素・りん除去処理を受けたものであったとしても藻類が増殖するには十分な量が含まれているのです。したがって、光が当たる施設であれば、藻類の繁茂を防ぐことは

表4 修景親水用水利用の目標水質

	修景用水利用	親水用水利用
大腸菌群数	1000個/100 ml以下	50個/100 ml以下
BOD	10 mg/ℓ以下	3 mg/ℓ以下
pH	5.8～8.6	5.8～8.6
濁度	10度以下	5度以下
臭気	不快でないこと	不快でないこと
色度	40度以下	10度以下

困難で、程度の差はあっても上水を使う場合より藻類除去のための清掃や水換えの頻度を増やす必要があります。藻類の対策としては現在のところ何らかの防藻剤を添加するか、RO膜処理を行う以外に適当な技術は開発されていません。高度な窒素・りん等の栄養塩類除去技術の開発が待たれるところです。

4.1.2 スライムの発生

利用先で藻類以外の微生物が増殖して問題になる場合があります。それは、残留塩素が不十分になりがちなトイレのロータンク内部によく見られるスライム(写真2)で、時に剥離して利用者の目に触れ、不快感を与えたり、濁った水になったり、臭気が発生したりすることになります。その原因は再生水中に残存している有機物やアンモニアです。再生水1ℓ中に少し残存したそれらの物質が微生物スライムを産み快適さを損ねることになります。このような微生物スライムの対策としては、残留塩素のような抗菌剤を保持することや、栄養源になる有機物等を

写真1 修景施設の滝に付着した藻類

写真2 ロータンク内部のスライム

さらに除去することが有効であると考えられます。

残留塩素の保持については当研究室で検討しています。たとえば内壁が清浄なガラス容器では再生水中の残留塩素は図-3³⁾のように減少します。実際の施設では配管内壁等に薄い生物膜が存在しており、再生水の送水過程でも急速に残留塩素が消費されています(図-4⁴⁾)。このため、供給先の貯留槽などで残留塩素が消失する場合も予想され、利用施設での再注入等を検討する必要があると考えられます。

4.1.3 利用施設内配管の腐食・閉塞

再生水が供給されているマンション等で建物内の再生水配管が腐食して漏水したり、腐食によって生じた鉄錆による赤水が生じたり、また、鉄錆が末端管で蓄積されて管が閉塞し(写真3)、水が出にくくなったりする問題を生じることがあります。その原因は大別して2つあり、1つは管路の防食対策が不十分であったこと、他の1つは再生水の水質が金属の腐食を招きやすいことです。再生水による腐食・閉塞対策については、現在、当研究室でも調査中ですが、耐食性が高いと考えられる青銅製バルブやメーターからの銅溶出量が再生水の残留塩素消費量と共に増加する(図-5⁵⁾)という実験結果が出ており、当面の対策として、利用先の小口径配管には弁類を含め樹脂素材を用い

図-3 清浄容器内における再生水中の残留塩素の減少

ることが金属管等に種々の防食対策を施すより簡便であると考えられます。

4.2 安全性

再生水利用で最も重要な点は再利用を通じて水系感染が起こらないことです。かつて神奈川県や埼玉県で生じたクリプトスポリジウムの集団感染は水道を通じて生じたものですが、再生水は水系感染の感染源である汚水を処理した水であり、常に何らかの感染性微生物を含む可能性があることを念頭に置く必要があります。特に、人が直接再生水に触れる可能性が高い用途では嚴重に水系感染防止に努める必要があります。幸い、現在までのところ、再生水が感染源となった集団感染症の発生は無く、先に述べ

図-4 残留塩素濃度の変化

写真3 酸化鉄で閉塞したロータンク流入管

た各種の暫定基準等がある程度有効に働いているものと考えられます。しかし、これらの暫定基準は先述のカリフォルニア州等の基準のように感染リスクに関する科学的な検討が行われリスクが評価された結果では無いので、今後科学的な検討が必要であると考えられます。再利用に際して適用されている微生物除去・不活化技術は塩素、オゾン、紫外線による消毒と精密ろ過膜、限外ろ過膜、RO膜による除菌とがあります。クリプトスポリジウムオーシストのように非常に高い消毒耐性を示す原虫シストや細菌に比較すると消毒耐性が高く精密ろ過膜を透過するウイルス等、従来の大腸菌群数を指標とする消毒・除菌効果判定が有効でない病原微生物に対してどのような基準を設定するかが今後に残された重要な課題であると考えられます。また、塩素消毒に伴う有機ハロゲン化合物の生成や残留塩素による水生生物への影響等を考慮して、最近ではオゾンや紫外線が用いられる例が増えています。しかし、下水処理水は細菌等の栄養源になる物質を多く含んでいるため、オゾン、紫外線や精密ろ過等によって十分に消毒または除菌された後でも、外部から侵入してくる微生物は増殖する可能性があり、殺菌効果のある残留塩素保持が必要です。最近各地で感染による死亡者が報告されているレジオネラ菌に対する対策も、噴水や冷却用水への利用など再利用用途によっては必要になる場合があると考えられます。

4.3 経済性

再利用の実施に際して、最後に問題になるのが経済性です。水資源が絶対的に不足している場合は別にして、再生水の経済性は他の代替水資源との比較によって検討することができます。その場合の費用

図-5 消費全塩素と銅溶出量

概算に関して個別のケースでは積み上げ方式で比較検討することが必要ですが、一方で統計的に費用の実態を検討することも、積算結果の妥当性を検討するうえで有益であると考えられます。当研究室が平成10年度に実施したアンケート調査では、全再生施設の半分弱の施設から建設費等のデータを入手することができました。入手できなかった約半分の再生施設では建設費が他施設の建設費と分離できないなどの理由が付されており、現在の再生施設が下水処理施設の一部あるいは他の公園施設等の一部として設置されている実態を示すものと思われます。

調査の結果、再利用のために建設されるろ過施設やオゾン処理施設および配水管渠施設にはスケールメリットがあること、維持管理費に対しては規模の大きさと施設能力に対する実際の利用率が主要な影響因子であることがわかりました。図-6はろ過施設の単位水量当たり維持管理費と施設利用率の関

図-6 ろ過施設の単位水量あたり維持管理費と利用率の関係

表5
再生利用の推定標準原価
(平成9年度価格, 円/㎡)

再生処理法	塩素	ろ過	オゾン	生物ろ過	凝集ろ過	活性炭	逆浸透膜
原 価	10.2	19.3	61.1	80.9	92.8	118.3	1224
内 償却費	5.6	13.4	34.8	55.3	48.9	63.4	872
補修費	0.4	0.7	2.1	2.1	1.7	4.9	40
訳 維持管理費	4.2	5.2	24.2	23.6	42.3	50.0	312

注) オゾンはろ過+オゾン処理, 生物ろ過は生物ろ過+オゾン処理, 凝集ろ過は凝集ろ過後オゾン処理, 活性炭は凝集ろ過後活性炭処理, 逆浸透は凝集ろ過等の前処理を含む

係を示したグラフです。また、表5に今回のアンケート結果から求めた平均的な下水処理水再利用の費用を再生処理法別に示しました。表5から上水の平均原価約180円/㎡と比較すると、RO膜処理以外は安価であり、相当高度な処理を行っても上水の用途の一部を再生水に転換する経済的な意味は十分にあると考えられます。但し、表5の値は施設能力が100%発揮されたと仮定しての費用ですから、利用率が常に高く維持されるような再利用施設の全体計画、即ちソフト面の技術も要求されることになります。

先に述べたとおり、再生水の修景・親水用水利用では水生生物や人との接触を考慮して高度な付加処理が行われる場合があります。再利用の費用としては高い部類に入ることになります。そして、修景・親水用水利用や河川環境維持用水としての利用は不特定多数の一般市民への行政サービスとして実施されることが多く、料金徴収による経費回収が望めません。このような、市民へのサービスとして行われる再利用の場合は、その費用負担について事前に納税者への説明や財政面での措置を十分検討しておく必要があると思われます。

再生水利用にかかる経費の主要な部分は再生処理施設に関する費用で占められており、この部分を減らすことは今後の技術開発課題の1つであると考えられます。たとえば、凝集ろ過では従来の凝集沈殿+急速ろ過の機能が合成された結果、単一施設で済むことになり、建設、維持管理の両面で経費削減効果があったと考えられます。再生水として要求される水質を満たすために、必要なさまざまなプロセスを単純に組み合わせるのではなく、複合化によって所要の機能を満たす施設ができれば経費削減に有利に作用することになります。

5. お わ り に

ビオトープ、トンボ池、蛍の里、バースサンクチ

ュアリ等々、自然や環境をテーマにした施設が各地に設けられ、伝え聞いた人々で一頻り賑わうということが最近も時々報道されます。いずれも水に纏わるもので、下水処理水を生かしたのものの中にはあるようです。日本では下水処理水再利用の凡そ半分が都市環境を改善するための用水として利用されていますが、その中には問題が生じたものや十分な効果が得られないものもあります。不評のものが淘汰されて行くのは当然のことですが、そのことが報道され問題視されることで他の十分評価できるものに悪影響を及ぼす場合があります。再利用技術には本文中に述べたようにいくつか課題があり、どこかに問題が生じる可能性が残されています。そのような問題があることを前提に、周到的計画に従って再生水を安全に利用して行くことが必要です。技術的な問題解決は、しばしば、「費用面でノー」ということになってしまいますが、財政当局の説得には、再利用の価値を十分に評価しておくことが肝要で、そのためには再利用施設の費用効果分析やLCA評価を実施しなければなりません。このように再利用の実施にあたってはハード技術の他にソフト面の検討が必要な状況にあり、そのような検討の中から新たな再利用技術が産み出されるものと考えられます。

参 考 文 献

- 1) Ogoshi M, Suzuki Y, Asano T, "Water Reuse in Japan", IWA Proceeding of 3rd International Symposium on Wastewater Reclamation Recycling and Reuse
- 2) 鈴木, 小越「下水処理水再利用システムの評価に関する調査」, 土木研究所資料第3661号 pp139-144
- 3) 小越, 有働, 鈴木「下水処理水再利用システムにおける残留塩素の減衰予測」水環境学会年会講演集 pp294
- 4) 高橋, 小越「再生水供給施設における水質管理手法に関する調査」土木研究所資料第3374号 pp193-199
- 5) 有働, 小越, 鈴木「再生水の配管に及ぼす腐食に関する影響について」第37回下水道研究発表会講演集 pp755-757