

# 持続可能な水資源としての排水再利用

カリフォルニア大学デーヴィス校  
名誉教授

浅野 孝



転換期を迎えた下水道事業の新たな方向性を探るために国土交通省と下水道機構が共同で開催している「下水道政策研究フォーラム」。その第7回は、地球規模での水需要の逼迫から近年大きな関心事となっている「排水の再利用」について、その研究の第一人者であるカリフォルニア大学デーヴィス校の浅野孝名誉教授にアメリカにおける現状と課題をうかがいました。

### 米国における水の再利用

“水の再利用”には長い歴史がありますが、その目的は「飲料水の確保」と「水質汚濁の低減」ということにあります。特に水資源としては、テクノロジーの確立によって水供給の信頼性が向上したため、経済的にもかなり魅力的なものになってきました。

そして今、考えられているのが「総合的な水資源管理における政策」です。つまり、節水、水の再利用、海水の淡水化などを大きな図式の中で考えていくことが大事になってきています。

下の図はIWMIインターナショナル・ウォーター・マネジメント・インスティテュート（NGO）から出ている図です。水再生利用をやっている所では、2025

年になっても水不足はありません。オーストラリア、中国、中東、アフリカなどが、将来の水不足地域になるということです。

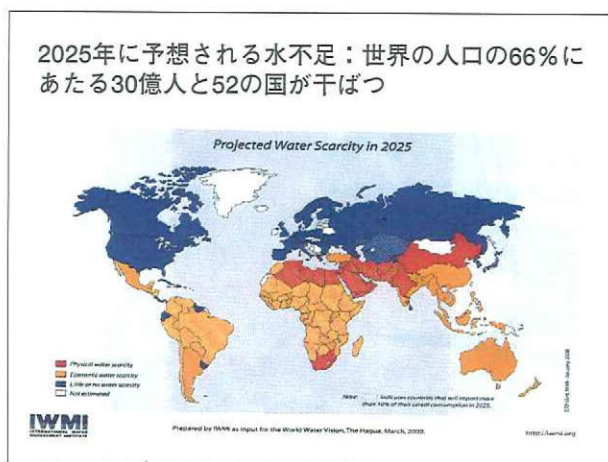
アメリカ合衆国には、現在、約16,400カ所の公共の下水処理施設があり、およそ1億5,500万 $\text{m}^3$ /日の下水処理水を排出しています。これに対し、約1,500カ所の水再生利用施設があり、都市排水の6%（1,000万 $\text{m}^3$ /日）が2005年に再利用され、年間15%増加しています。水の再利用は実は成長マーケットであるわけです。

その再利用のうちの約90%をアリゾナ、カリフォルニア、フロリダ、テキサスの4州で占めています。中でもカリフォルニアがリーダー格ですが、カリフォルニアでは人口の増加、都市化が急激に進んでおり、2020年予測で人口は95年を基準として48%増、都市用水は36%増の見通しです。そこで求められているのが、技術開発による「水再利用の安全性と公衆衛生の確保」、「市民への働きかけと合意形成」です。

ですから、次に大きな問題になってくるのが「利水の安全度」、つまり「サステナブル（持続可能性）と水」ということです。そのためには今までの考え方を転換する必要があります。

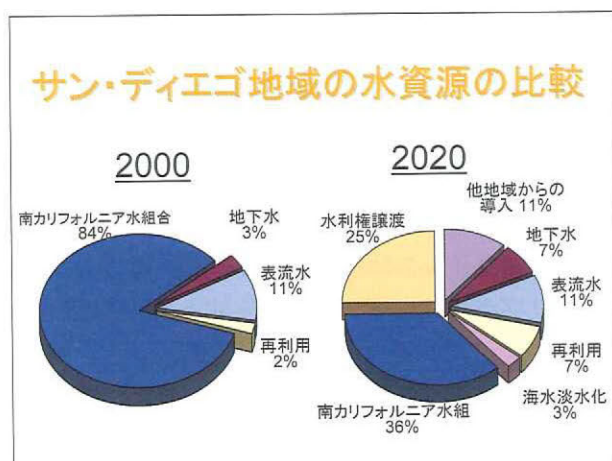
アメリカのいいところは、いろんなレポートが要所々々できちんと出ていて、それをウェブサイトでも見ることができるというところなんです。その一つに

2025年に予想される水不足：世界の人口の66%にあたる30億人と52の国が干ばつ



「カリフォルニア州水計画アップデート」というサイトが2005年にできまして、目下次の2009年のアップデートの審議をしている最中です。この中では「環境」が重要な水資源のアップデートの要素になっていて、「2020年までに将来に必要な水資源の約3分の1を再生水で賄おう」という水資源計画を立てています。

もう一つ「2030年における水再利用」という計画が2003年6月に出て、将来の予測を行っています。具体例の一つとして、下図にサンディエゴ地域の水資源をあげます。2000年には南カリフォルニア水組合からの水が84%を占めていましたが、これを2020年には36%にします。そして、農業用水から都市用水への水利権譲渡で25%、他地域からの導入で11%、地下水の利用を3%から7%に、そして現在2%の下水処理水の再利用を7%に拡大します。もう一つ新しい試みとして海水淡水化を導入して3%を確保するとしています。



## 下水処理水の再利用

では「下水処理水の再利用」についての話に移りましょう。一方では大きな規模、地球規模での「再利用」が論じられていますが、我々が考えているのは「都市の中での水再利用」です。

ロサンゼルス市にはハイペリオンという大きな処理場があって、現在は純酸素の活性汚泥法で二次処理を行っています。加えて大規模な再利用を行っている。処理水を砂ろ過、凝集沈殿、塩素滅菌のほか紫外線消毒や膜処理などを行い、工業用水・修景用水・灌漑用水として再利用しています。

生下水を受けて、前処理をやって、活性汚泥処理をやって、沈殿池に入れて、塩素消毒をして、放流する。

ここまでの二次処理ですが、そのあと石灰を入れてpHを上げて、エアーストリッピングをやってpHを元に戻して、砂ろ過→粒状活性炭吸着→逆浸透膜というのが従来の高度処理です。これに膜を使ったり紫外線を使ったりすると、上水よりも質のいい水がつくれます。シンガポールの「ニューウォーター」などがそうですね。

それに、現在は膜を使った活性汚泥法が出ていますので、膜処理をした処理水を逆浸透にもっていくなど、再利用のための高度な処理が簡単にできるようになってきました。

## 水再生利用のカテゴリー

水再利用の定義は「家庭・職場・都市から排出された使用後の水（都市下水）を、再利用できるように処理し、農業用水や冷却水として有益に使用する」とされていますが、その利用先について、改めて「水再利用の役割」を整理してみますと、水再利用の七つのカテゴリーが考えられます。

### 再利用のカテゴリー

1. 農業用水
2. 景観灌漑
3. 工業用水
4. レクリエーション利用と環境
5. 飲用以外の都市再利用
6. 地下水かん養
7. 飲用としての再利用

加えて、処理技術とプロセスの信頼性ですね。水再利用では「処理して、放流する」という図式に比べて、処理の信頼度がずっと重要になり、きちとしたモニタリングやプロセスの高度なコントロールが要求されてきます。むろん、水再利用の安全性についての議論をきちとやらなければいけないのですが、もっと将来のことを考えると、生態系との調和といった大きな理念のもとで水再利用を考えるべきだと思います。

カリフォルニアの場合、再利用量は年間4億4000m<sup>3</sup>で、非常に大がかりです。全体の48~50%が農業用水として使われています。工業用水への再利用は意外に

伸びなくて5%ぐらい。大きな要素になっているのが「地下水の人工かん養」です。海水侵入防止のための地下水かん養を含めると15%ほどやっています。

修景用水の事例を幾つかご紹介しますと、まずスペインのコスタブラヴァという地中海沿岸の保養地ではゴルフコースのかん漑を高度処理水でやっています。お墓には窒素・磷が含まれている処理水を撒いていますので綺麗な花が咲いています。ロサンゼルス市のテイルマンという処理場では日本庭園に処理水を使っています。大阪城のお堀の水も処理水ですし、札幌の郊外を流れている安春川のせせらぎ用水は、冬場は融雪用水として活用しています。

工業用水としては主に冷却水として使っているのがアメリカの例です。加えてボイラー供給、生産工程での使用水、大規模建築などです。飲用以外の都市用水としては防火、空調、水洗トイレ用水ですね。

ロサンゼルス市の南側にあるアーバインという町の新築建物の中は下の写真のように二重配管になっています。「誤配管があってはならない」という懸念から紫色のパイプを再生水用に使っていますが、更に注意して、これにテープを巻いて注意を呼びかけています。ヨーロッパはちょっと色合いが違いますが、赤みがかった紫色です。



海外で大都市の再開発のお話をする時には、東京の事例がいいと思ひまして、落合水再生センターのライドを使わせて頂いています。膜処理をした再生水で子供たちが遊んでいる写真ですが、これらは世界に輸出できるノウハウだと思います。

二次処理・砂ろ過・塩素消毒が一般的な再生水の処理ですが、カリフォルニアでは“タイトル22”という



処理方式が示されていて、二次処理、凝集沈殿、砂ろ過、消毒が世界的に使われています。問題は最後の「消毒」です。

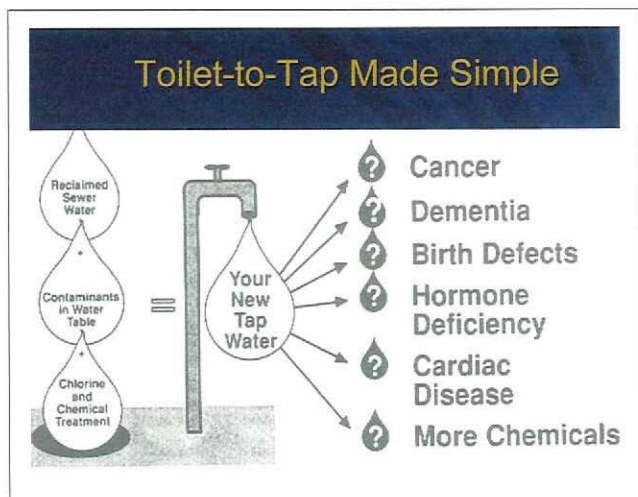
飲み水で使っている消毒はCとP、つまりコンセンレーションと対流時間・接触時間です。CとPで450mg/l (5 ppm) の塩素で90分の接触時間。これで安全性を確保しています。我々の経験では全大腸菌群が2.2/100ml となります。また、塩素滅菌の場合は濁度が大事ですから、これが2 NTU。この消毒をやると腸系ウイルスは検出されません。同じような基準がアリゾナ州、フロリダ州、テキサス州に使われています。

しかしながら、再利用に関しては、連邦政府では基準をつくっていません。カリフォルニア州を手本にして、各州で基準をつくっています。「飲用以外」の水の再利用に対しては市民からも強く支持されていますが、コスト面と公衆衛生の保護が懸念されています。それでも、これらの問題は、技術の向上と市民への教育などで解消されていくでしょう。問題は「次の段階」です。

## 再利用の安全性

やはり「飲み水」にまで持っていかなければ、経済的には問題になります。農業用水だと輸送距離があり、ポンプや二重配管などで経済性はぐっと落ちてきます。都市にある水資源だから都市で使いたい、従って間接的に飲料水にしたいという議論になってきます。

しかし、出発点が下水の処理水ですから、一般の人に、どのように受け入れてもらえるかということです。



下水処理水を高度処理して飲料水として再利用することについて、間接的ではありますが約50%の人が反対しているとの調査結果があります。やはり心理的に不快だと感じさせることと微量有機物質の長期的な健康への影響が懸念されているようで、いくつかのプロジェクトは、市民や政治による反対、環境への配慮のために中止されているのが現実の姿です。

健康リスクに懸念のある微量化学物質を $\text{g/l}$ から10のマイナス12乗( $\text{pg/l}$ )までで示しますと、我々の馴染んでいるBODやSSとかは $\text{mg/l}$ レベルですが、最近では測定技術が急激に進んでいて、今や $\text{pg/l}$ のレベルではいろんな分析技術が紹介されています。

長期にわたる健康リスクは、よく分からないところで議論されているのですが、 $\text{ng/l}$ や $\text{pg/l}$ のレベルを工学的にどう対応するのか。これが下水を飲み水にするための再利用の大きな問題です。

そこでまず“間接的な飲料水”としての再利用が考えられます。直接、飲み水の配管に入れるのではなくて、例えば湖や貯水池や地下水に入れるというような使い方ですね。「水再生利用の安全性」については、アメリカでは「100万人に1人の発がんリスクなら許容できる」というのが常識です。WHOの基準は「10万人に1人」ですので、アメリカではWHOの基準を使いません。日本は国連好きですからアメリカに比べると10倍危ないわけです。大腸菌の基準は1000ですが、アメリカは2.2。こちらはゴルフ場などの散水で健康リスクが450倍になっているわけです。

農業用、修景用なら問題ないですが、水資源としての「飲み水」となると、将来、どのように展開できるかが研究課題です。

近年の処理技術の向上は、よりよい膜処理技術や低い操作圧力（エネルギーコストの低減）、目詰まりの低下、長寿命、安定したろ過水質、コストということですが、このあたりの技術は日本が断然進んでいます。ただ欧米の企業と比べた場合、膜そのものはいいんだけど「システムとして組み込ませて売る」という技術がまだまだだという感じがしますね。

## おわりに

結論を申しますと、新しい水資源としての水再利用の重要性は認識されているわけですが、飲用水以外の再利用は経済的に限界に達しています。間接的な飲用水利用は将来的な水再利用の選択肢と言えますが、市民からの同意は確実ではありません。これを解決するには、価値、利益、代替手法についてのコミュニケーションが重要で、ステークホルダーの参加と協力が必要です。

### 水再利用の将来

- 統合的な地域に基づいた水資源計画
- 二元的な給水システム
- 地域循環(サテライト)による水再利用システム
- 間接的な飲用再利用
- 紫外線消毒の普及
- 膜プロセスの採用(精密ろ過と逆浸透)
- 微生物と医薬品のリスク評価
- 衛生基準の研究と適用
- 市民の理解と支持の研究

よって水再利用の将来は、上の図のようになります。「間接的な再生水の飲用利用は必ず起こるだろう」というのが我々の想定です。このうちの三つ四つがうまくいけばどんどん進むだろうと。

21世紀には、いい環境を保持しながら、信頼度の高い、水の賢い使い方を実現したいものです。