

# 都市下水の飲用再利用とオゾン

## Ozone and Potable Water Reuse

○池端慶祐

テキサス州立大学理工学部

### 論文要旨

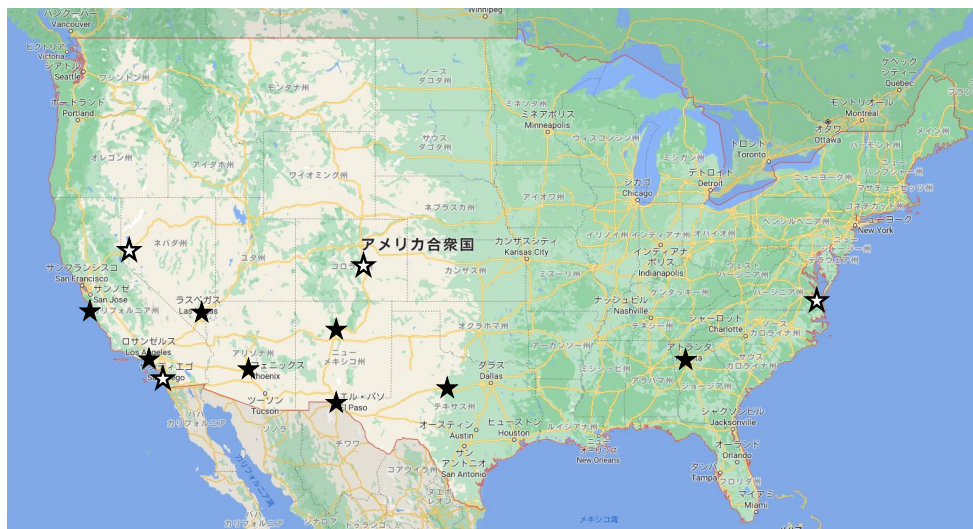
都市下水は生物処理された後、表流水に放流され、多くの場合下流で水源として用いられている。近年は二次・三次処理水をさらに高度処理した高度再生水が間接もしくは直接飲用再利用されるケースが増えてきており、重要な水資源の一つとして認識されてきている。強力な殺菌・酸化力を持つオゾンは都市下水の飲用再利用に大きな役割を持つ。この講演では様々な形式の都市下水飲用再利用においてオゾンが用いられている事例を紹介し、その有用性や今後の展望・課題を議論する。

After secondary or tertiary treatment, domestic wastewater is discharged to nearby surface water, which is often used as a drinking water source downstream. In recent years, advanced water purification of recycled water is becoming an important method for water utilities to secure alternative water resources. Ozone plays an important role in potable water reuse. In this paper, the benefits and challenges of ozone in various types of potable water reuse are discussed.

### キーワード：オゾン， 飲用再利用， 実例紹介

#### 1. はじめに

2010年代はアメリカ南西部を襲った渇水の影響で、カリフォルニア州・テキサス州・フロリダ州などを中心に都市下水の飲用再利用に多くの注目が集まった10年間であった。2020年代最初の2年間は新型コロナウイルスが猛威を振るい、上下水道業界も一時COVID-19対策を中心としたプロジェクトにシフトしたものの、飲用再利用プロジェクトはカリフォルニア州を中心に比較的順調に進行している。飲用再利用を含めた米国における下水分野のオゾン利用については2016年と2020年のオゾン技術に関する講習会<sup>(1,2)</sup>および2017年の年次研究講演会<sup>(3)</sup>において発表させていただいたが、オゾンの優れた殺菌・酸化作用は継続して注目されており、フルスケールの高度再生水処理施設において積極的に採用する例が出てきている<sup>(4,5,8,7)</sup> (図1)。とはいえ、高度再生水処理スキームのボトルネックでもある逆浸透 (RO) 膜をオゾン・生物活性炭ろ過で置き換える試みの展開は残念ながら未だそれほど活発とは言い難く、現在のところはROを中心とするスキームにオゾンを追加される形で用いられることが多い。



図ー1 米国におけるオゾンが導入された計画的な都市下水飲用再利用 (2023年現在、筆者作成)  
(黒星：フルスケール施設、白星：パイロット・デモンストレーション施設)

都市下水の飲用再利用には大きく分けて間接飲用再利用（indirect potable reuse、IPR）と直接飲用再利用（direct potable reuse、DPR）以下の形式があり、それぞれにおいてオゾンの有用性があると考えられる。

- 事実上間接飲用再利用（de facto IPR）
- 積極的間接飲用再利用（planned IPR）
  - 表流水放流型（surface water augmentation）
  - 地下水涵養型（groundwater recharge）
- 直接飲用再利用（DPR）
  - 原水混合型（source water blending）
  - 直接配水型（pipe to pipe/direct distribution）

そこで以下ではこれらの形式におけるオゾンの役割を実例を挙げて考察する。

## 2. 事実上間接飲用再利用

間接飲用再利用は特別認識されていないだけで、米国、日本をはじめ世界各地でごく一般的に実施されている。生物処理された都市下水は多くの場合、河川や湖などの表流水に放流され、下流に流れ最終的には海に到達する。その過程で下流の都市が都市下水の影響を受けている表流水を飲用水の原水として用いることでIPRが成立すると考えられる。河川の流量と処理下水の放流量の比率によりその影響に差はあるが、処理下水中の栄養塩、有機物、塩分、病原微生物、微量有機化合物が下流側の浄水処理に大きな影響を与える。そのため米国の浄水場において消毒は常に大きな課題であり、1980～1990年代にオゾン高度処理が多くの浄水場で導入された理由として消毒とクリプトスポリジウムの不活化が挙げられるなど、その効果は広く認識されている。また、処理下水放流水中の栄養塩などによるカビ臭の発生は深刻な問題になっており、その対応策としてオゾンは非常に有効である。

一方で下水処理場側からの認識は未だ低いため、この形式での飲用再利用を視野に入れた下水オゾン導入は米国においてまれであると言える。最近の例としては、米国環境保護庁の水質浄化法（Clean Water Act）が規定するNational Pollutant Discharge Elimination Systemの順守を目的にオゾン高度処理を導入したアーカンソー州フェイエットヴィル市のノーランド下水処理場などが挙げられる。フェイエットヴィル市のような内陸部の都市が拡張・発展していくためには水質保全是大きな課題であり、クリプトスポリジウム・ジアルジア・ウイルスなどの病原微生物を効果的に不活化でき、多くの微量有機化合物を分解除去することができるオゾンは重要な役割を果たすと考えられる。しかし費用対効果と、その必要性が明確に規定されていないなどの問題もあり、今後はより積極的な再利用プロジェクトへの転換が必要となってくると考えられる。

## 3. 積極的間接飲用再利用・表流水放流型

表流水放流型の間接飲用再利用は下水処理場が処理下水の放流先である水源の水質を積極的に保全することを目的として高度処理を導入し、IPRを認識し公言する形式である。この形式は前項の事実上間接飲用再利用の発展型とも言うことができるが、放流先の水源を用いる水道局や自治体が下水処理場を保有・運転管理している、もしくは下水道局との連絡が密接で協業がスムーズであるケースにおいて顕著である。ネヴァダ州ラスベガス市近郊のクラーク郡、ジョージア州アトランタ市近郊のガイネット郡、テキサス州アビリーン市<sup>(4)</sup>、テキサス州ダラス市近郊北テキサス水道局などがこの形式の間接飲用再利用の例で、これらの水道局において、オゾンは非常に重要な役割を果たしている。

クラーク郡のフラミンゴ水資源センターにおいて二次処理水の一部が限外ろ過（UF）とオゾン酸化で処理されており、ミード湖に放流されている。ミード湖は南ネヴァダ水道公社が保有・運転管理する2か所の浄水場の水源となっており、これらの浄水場でもオゾンが用いられていることはよく知られている。ガイネット郡でも下水処理場であるウェインヒル水再生場においてオゾンが用いられており、さらに浄水場においてもオゾンが用いられている。現在のところ北テキサス水道局では下水処理にオゾンは用いられていないが、浄水場において大規模なオゾン処理設備が導入されている<sup>(8)</sup>。

この形式の積極的間接飲用再利用はどちらかというと飲用再利用の本流とは言い難く、水源と放流の位置など立地条件にも大きく左右されるため、今後大いに発展していくとは考えにくい。ただ、テ

キサス中部など事実上の飲用再利用が実施されている地域において、水質低下の懸念、そして人口増加や気候変動などで水需要の増加が予測されている地域では、下水処理もしくは浄水処理においてオゾンの導入が求められるケースも今後増えていくのではないかと考えられる。

#### 4. 積極的間接飲用再利用・地下水涵養型

積極的間接飲用再利用のもう一つの形式は飲用水の原水として使われている地下帯水層に注入する地下水涵養型である。この形式はカリフォルニア州南部、テキサス州西部など地下水を水源としている地域で比較的活発に行われており、オレンジ郡水道局の高度再生水処理場はこの代表格の一つである。地下水涵養には注入井戸を用いる直接注入型と涵養池をを介する浸透型がある。また、土壌浸透処理 (soil aquifer treatment, SAT) を期待するケースもある。地下水涵養は都市下水処理水 (再生水) 以外にも余剰雨水や表流水・輸入水などを用いて行われており、近年は帯水層貯水 (aquifer storage and recovery, ASR) と呼ばれ、渇水対策としての有効性が注目されている。

カリフォルニア州の高度再生水処理場では原則的に RO が必須とされているため、オゾンの役割は低圧膜ろ過のファウリング対策等の副次的な物であることが多い。ウエストベイスン地域水道局のエドワード・C・リトル水再生場<sup>(5)</sup>やモントレピュアウォータープロジェクトの処理施設が現在運転中のオゾンを含む高度再生水処理場である。カリフォルニア州外ではプロセススキームの選択が比較的フレキシブルであるため、オゾン・生物活性炭ろ過を用いた高度再生水処理が採用されるケースがある。現行の施設としてはニューメキシコ州リオランチョ市高度再生水処理場<sup>(6)</sup>、アリゾナ州スコッツデール市スコッツデールウォーターキャンパス高度再生水処理場<sup>(7)</sup>、テキサス州エルパソ市フレッド・ハーベイ水再生場がオゾンを利用した地下水涵養型間接飲用再利用施設を運転している。また、東海岸ヴァージニア州ヴァージニアビーチ市のハンプトンロード下水道局では、オゾンベースと RO ベースのスキームを比較するパイロット試験を経て、現在オゾン・生物活性炭・粒状活性炭・紫外線消毒を用いたデモンストレーション施設が運転中である。

カリフォルニア州では前述のとおり間接飲用再利用に RO が必須となるため、今後もオゾンが積極的に導入されるケースはまれであると考えられる。カリフォルニア州外では特に内陸部でのプロジェクトでオゾン・生物活性炭ベースのスキームが選択される可能性は大いに考えられる。これは RO の最大の弱点である濃縮液の処分がオゾン・生物活性炭では不要であることに起因する。ただし、オゾン・生物活性炭処理では再生水中の塩分を除去することができないため、長期にわたる渇水が生じると雨水による涵養が行われなため帯水層の塩分濃度が上昇するリスクがある。これは前項の表流水放流型の間接飲用再利用でも同様で、水面で蒸発が起こるため気候と渇水の影響はより深刻である。このため貯水することができる帯水層がある場合は地下水涵養形式の方にメリットがあると考えられる。

#### 5. 直接飲用再利用

オゾンはナミビア・ウィントフック市の直接飲用再利用施設であるゴレアンガブ下水処理場において利用されていることがよく知られているが、米国における直接飲用再利用目的でのオゾン導入例は未だみられない。米国で現在運転されている直接飲用再利用施設はテキサス州ビッグスプリング市のもののみであり、後続のプロジェクトは建設中もしくは計画中となっている。完成に近いと思われる施設はテキサス州エルパソ市そしてカリフォルニア州サンディエゴ市のもので、前者は直接配水型、後者は原水混合型の直接飲用再利用となっている。このうちサンディエゴ市のピュアウォーター・サンディエゴは 2012 年からデモンストレーション施設が運転されており、オゾン・生物活性炭処理をカリフォルニア州における間接飲用再利用のスタンダードスキームである精密ろ過 (MF) もしくは UF・RO・紫外線過酸化水素促進酸化の前段に追加する形となっている。カリフォルニア州において直接飲用再利用を実現するには「未処理下水」からウイルス・ジアルジア・クリプトスポリジウムをそれぞれ 20、14、15 ログ除去する必要があるため、そのための有効な手段としてオゾンが認識されている。また、コロラド州コロラドスプリングス市、ネヴァダ州リノ市でも直接飲用再利用プロジェクトが計画・進行中であり、これらのプロジェクトは RO ではなく、オゾン・生物活性炭をベースにしたものとなっている。

このように都市下水の直接飲用再利用が現実化することで、高度再生水処理へのオゾンの利用がより加速されるのではないかと考えられる。とはいえ、直接飲用再利用へのハードルとしては、建設・運用コスト・住民からの賛同や承認・法規制などがあり、これらは少しずつ解消しつつあるとはいえ、ブレイクスルーにはまだしばらく時間がかかりそうである。

## 6. まとめと今後の展望

以上のように、都市下水の事実上の間接飲用再利用においてはオゾンには以前から大きな役割を担っており、積極的な飲用再利用に用いられるケースも少しずつではあるが増えてきていることが分かる。オゾンに期待されている役割は基本的には消毒で、有機物の酸化分解はファウリング対策などの比較的副次的なものとなっている。医薬品等の微量有機化合物は現在のところ米国で規制されていないが、都市下水を原水とする飲用再利用ではこれらの化合物の濃度が表流水・地下水と比べると高いため、オゾン・生物活性炭処理による除去が期待される。1,4-ジオキサンやニトロソアミン類は現在のところ水道水質基準項目ではないが州によっては規制対象となっており、それぞれオゾン処理による分解・生成が行われるため注視が必要である。また、臭素酸イオンはオゾン処理の副生成物の一つであり、その監視・生成抑制は飲用再利用、特に直接飲用再利用プロジェクトにおいて重要である。そのため、テキサス州立大学では現在、長崎大学・鹿児島大学との共同でオゾンを含む高度再生水処理における消毒副生成物の生成と抑制を監視するプロジェクトが進行中である。

現在、米国環境保護庁によって飲用水中のペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS)、ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS)、ペルフルオロノナン酸 (PFNA)、ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS)、ペルフルオロブタンスルホン酸 (PFBS)、ヘキサフルオロプロピレンオキシドダイマー酸 (HFPO-DA) の6種類の有機フッ素化合物の法規制が進んでおり、これらの化合物除去が高度再生水処理においても重要になることが予想されている。これらの化合物はオゾンでは分解できないことが分かっており、活性炭吸着・高圧膜ろ過 (RO もしくはナノろ過) ・イオン交換処理が必要になる。有機フッ素化合物除去後の吸着担体や濃縮液、廃液処理も大きな課題である。

都市下水の飲用再利用において大きく見落とされている重要事項としては異臭味対策がある。飲用再利用における原水は二次・三次処理水であり、下水由来の異臭味物質はアンモニア、硫化水素などの無機化合物から有機窒素・硫黄化合物、ハロゲン化アニソールなど多岐にわたる。テキサス州立大学における予備実験によるとジェオスミン、2-メチルイソボルネオールなどシアノバクテリア由来の化合物も検出されている。水道における異臭味問題が大きな課題であることは言うまでもないが、都市下水の飲用再利用に対する最大のハードルの一つが住民からの賛同・承認であることを考えると、これらの異臭味物質の監視と除去は注目に値すると考えられる。オゾン・生物活性炭処理はジェオスミン、2-メチルイソボルネオール対策には定評があり、その他の異臭味物質に対しても分解・除去能力が期待される。異臭味対策としてのオゾン利用は飲用再利用においても大きな役割を担う可能性があるのではないかと考えられる。

また、高度再生水処理において RO の前段に位置する低圧膜ろ過のファウリング対策・洗浄剤としてオゾンを積極的に利用する可能性があると考えられる。低圧膜は膜分離活性汚泥処理槽 (MBR) の浸漬式、もしくは加圧式で用いられており、そのファウリング防止は大きな課題である。セラミック膜などのオゾン耐性のある膜設備を用いることにより、エネルギー・薬品コストを抑え、全体的なコストダウンが提供できればオゾン導入への大きなカギとなりうるかもしれない。

## 参考文献

- (1) 池端慶祐 (2016) 進展する米国における下水分野のオゾン利用. 第 34 回オゾン技術に関する講習会講演要旨, pp. 45–51.
- (2) 池端慶祐 (2020) 米国における都市下水処理の飲用再利用とオゾン処理. 第 38 回オゾン技術に関する講習会 (WEB 配信), パワーポイント資料.
- (3) 池端慶祐、趙元媛、Harshad V. Kulkarni、(2017) 米国における下水分野のオゾン利用—飲用再利用への応用. 日本オゾン協会第 27 回年次研究講演会要旨, pp. 97–100.
- (4) 池端慶祐 (2020) オゾン利用施設紹介アビリー市水再生場施設紹介. オゾンニューズインジャパン, 114, pp. 12–15.
- (5) 池端慶祐 (2018) オゾン利用施設紹介ウエストベイソン地域水道局エドワード・C・リトル水再生場施設紹介. オゾンニューズインジャパン, 107, pp. 20–23.
- (6) 池端慶祐 (2018) オゾン利用施設紹介ニューメキシコ州リオランチョ市高度再生水処理施設紹介. オゾンニューズインジャパン, 105, pp. 7–10.
- (7) 池端慶祐 (2020) 米国における水処理の最新動向 (第 7 回) オゾン・飲用再利用・スコッツデール市スコッツデールウォーターキャンパス高度再生水処理場. 水道公論, 56:11, pp. 48–51.
- (8) 池端慶祐 (2019) 米国の上下水道におけるオゾンの採用動向 (第 2 回) 北テキサス地方水道局ワイリー浄水場. 水道公論, 55:2, pp. 59–61.