

最近の消毒技術の評価に関する 報告書

平成 9 年 3 月 2 8 日

日本下水道事業団技術評価委員会

審議の経過

平成6年	9月29日	第29回技術評価委員会
平成6年	11月25日	第1回消毒技術専門委員会
平成7年	3月3日～4日	第2回消毒技術専門委員会
平成7年	3月22日	第30回技術評価委員会
平成7年	7月28日	第3回消毒技術専門委員会
平成7年	9月22日	第31回技術評価委員会
平成8年	2月26日	第4回消毒技術専門委員会
平成8年	3月25日	第32回技術評価委員会
平成8年	8月1日～2日	第5回消毒技術専門委員会
平成8年	9月5日	第33回技術評価委員会
平成8年	12月25日	第6回消毒技術専門委員会
平成9年	2月25日	第7回消毒技術専門委員会
平成9年	3月24日	第34回技術評価委員会

委員の構成

(平成9年3月24日現在)

技術評価委員会

会長	東北大学・東京大学名誉教授	松本順一郎
委員	東京理科大学教授	柏谷 衛
〃	東京大学教授	松尾 友矩
〃	日本大学教授	田中 和博
〃	九州大学教授	楠田 哲也
〃	摂南大学教授	金子 光美
〃	建設省都市局下水道部長	安中 徳二
〃	建設省土木研究所下水道部長	京才 俊則
〃	仙台市下水道局長	瀬藤 一郎
〃	東京都下水道局技監	川上 宏一
〃	横浜市下水道局長	安久津 赳
〃	大阪市下水道局長	田野 隆一
〃	日本下水道協会理事	西口 勇
〃	日本下水道事業団理事	古澤 實
〃	日本下水道事業団常任参与	北井 克彦

消毒技術専門委員会

委員長	摂南大学教授	金子 光美
委員	東京大学教授	大垣眞一郎
〃	東北大学教授	大村 達夫
〃	麻布大学教授	平田 強
〃	建設省都市局下水道部公共下水道課課長補佐	森田 弘昭
〃	建設省土木研究所下水道部三次処理研究室長	鈴木 穰
〃	東京都下水道局施設管理部施設管理課長	荻島 美住
〃	横須賀市下水道部水質管理課長	高橋 禮重
〃	滋賀県土木部下水道建設課課長補佐	澤井 源市
〃	神戸市建設局下水道部水質指導課長	能勢 元昭
〃	福岡市下水道局管理部水質管理課長	波多野浩一
〃	日本下水道処理施設管理業協会業務部長	広瀬富士夫
〃	日本下水道事業団技術開発部長	佐藤 和明
〃	日本下水道事業団計画部上席調査役	谷戸 善彦
〃	日本下水道事業団工務部次長	松村 桓生

旧委員	建設省都市局下水道部公共下水道課課長補佐	岡久 宏史
〃	建設省土木研究所下水道部三次処理研究室長	高橋 正宏
〃	東京都下水道局施設管理部施設管理課長	地田 修一
〃	神戸市建設局下水道部水質指導課長	松前 孝雄
〃	横須賀市下水道部水質管理課長	芹澤 利男
〃	日本下水道処理施設管理業協会業務部長	山内 元
〃	日本下水道事業団技術開発部長	浦田 健一
〃	日本下水道事業団計画部上席調査役	石川 和秀
〃	日本下水道事業団計画部上席調査役	瀬藤 一郎
〃	日本下水道事業団工務部次長	岩崎 美行

(旧委員の所属職名は委員委嘱当時のもの)

目 次

(消毒技術評価の経緯)	265
(評価の対象技術)	265
(評価の範囲)	267
(下水処理水の消毒目標)	267
(消毒技術の選定)	267
(塩素消毒技術の特徴)	268
(紫外線消毒技術の特徴)	272
(オゾン消毒技術の特徴)	275
(より高い消毒目標への対応)	279

（消毒技術評価の経緯）

わが国では下水処理水の消毒はこれまで一般に塩素を用いて行われ、安定した消毒効果を確保してきた。

近年、下水道の普及が進んで水道水源水域や水産水域等に放流する処理場が増加するにしたがい、放流水中の有機塩素化合物（トリハロメタン等）や残留塩素のいっそうの抑制が必要となるとともに維持管理がより容易な消毒技術が求められている。このような要求に対する塩素消毒技術の対応性に関する検討が行われるとともに、塩素に代わる消毒技術の開発が進んで一定の実績をあげている。

反面、これらの最近の消毒技術に関する知見は十分には整理されておらず、適正な消毒方法の選定及び導入を行うために技術評価が必要となっている。

そこで本委員会は、平成6年9月29日に出された日本下水道事業団理事長の「最近の消毒技術について」の諮問に応じ、下水処理水の塩素消毒技術及び塩素に代わる消毒技術について、その消毒特性、消毒機能上の特徴等を明らかにするために審議を行い、検討結果を本報告書として報告することとした。

（評価の対象技術）

本評価の対象とする技術は、下水処理水の塩素消毒技術及び塩素に代わり得る消毒技術である。塩素に代わる消毒技術として実用的で実績のあるものは、現状では紫外線消毒とオゾン消毒である。

なお、今回の諮問の参考資料においては、対象とする消毒技術の中に二酸化塩素消毒も含まれていたが、本委員会の検討結果からは

近い将来に実施設で二酸化塩素消毒の適用が進むとは予測されないことから、今回の報告では別添資料に参考として紹介するにとどめた。

評価対象の各消毒技術の消毒原理及び消毒設備の概要は次のとおりである。

1 塩素消毒

下水処理水に塩素剤を注入し、その酸化力によって病原性微生物細胞内の酵素の失活等を起こして消毒を行うものである。大規模処理場や中規模処理場では塩素剤として主に次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いており、設備は塩素剤貯蔵設備、塩素剤注入装置、接触タンク等からなる。また、小規模処理場では塩素剤として固形塩素を用いる場合がある。

2 紫外線消毒

紫外線ランプを点灯して発生させた紫外線を下水処理水に照射し、病原性微生物細胞内の核酸の損傷を起こして消毒を行うものである。設備は紫外線ランプ、安定器等からなる。

3 オゾン消毒

無声放電等によって生成したオゾンを下処理水に注入し、その強い酸化力によって病原性微生物の細胞膜系の破損や蛋白質の変性等を起こして消毒を行うものである。設備は、オゾン発生装置、オゾン注入装置、反応タンク、排オゾン処理装置等からなる。下水処理水の脱色等と合わせた複合的な効果を目的としてオゾン処理を行う場合が多い。

（評価の範囲）

評価の範囲は下水処理水を消毒して放流するまでとする。

（下水処理水の消毒目標）

下水道に流入した微生物は下水処理過程において吸着、捕食、衰退等によって減少し、二次処理水では流入下水と比較して通常99%（対数生残比 -2 log）程度の大腸菌群数の減少が認められる。しかし、下水道には病原性微生物が流入する恐れがあり、下水処理水の消毒によって放流水の衛生的安全性を高める必要がある。下水道法や水質汚濁防止法では、病原性微生物による汚染状況を示す指標として大腸菌群数を用いて水質基準を設けており、下水道からの放流水の水質は「大腸菌群数3,000個/cm³以下」でなければならないと定めている。

現状では塩素消毒によってこの基準値を安定的に満足する消毒効果が確保されている。塩素に代わる消毒技術を用いる場合も同等の消毒効果が確保できるような消毒性能を備える必要がある。

（消毒技術の選定）

塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒の各消毒技術は、下水処理水の水質による影響、脱色等の複合的効果、消毒効果残留の有無等の点でそれぞれ違いが見られることから、消毒特性、消毒機能上の特徴、維持管理性等の技術上の特徴を考慮して各下水処理場に適した消毒技術を選定する必要がある。

(塩素消毒技術の特徴)

1 消毒特性

(1) 消毒機序

次亜塩素酸ナトリウム、固形塩素、液化塩素などの塩素剤は水と反応して次亜塩素酸や次亜塩素酸イオンなどの遊離型有効塩素を生成する。通常の下水二次処理水ではアンモニア性窒素が存在することが多く、その場合は速やかに結合型有効塩素であるクロラミンを生成する。これらはその酸化力によって細胞内の酵素の失活等を起こして微生物を不活化する。

(2) 消毒性能

塩素消毒では、有効塩素濃度と接触時間との積が大きいほどその消毒効果大きい。アンモニア性窒素が存在する通常の下水二次処理水に塩素を $2\text{ mg/l} \sim 4\text{ mg/l}$ 程度注入して15分間程度接触させることにより、大腸菌群の平均殺菌率97%程度(対数生残比 $-1.5\log$ 程度)を得ることができ、放流水中の大腸菌群数を安定的に $3,000\text{ 個/ml}$ 以下にすることができる。硝化が完全に進んだ下水処理水では、酸化力の強い遊離塩素が生成するためより少ない塩素注入率で足りる。

2 消毒機能上の特徴

(1) 下水処理水の水質による影響

- 1) 亜硝酸性窒素やCODが高い下水処理水では塩素が消費されるため消毒に必要な塩素注入率が高くなる。
- 2) 次亜塩素酸の方が次亜塩素酸イオンよりも消毒力が強く、中性付近のpH領域では酸性側の方が次亜塩素酸の存在比が

高くて下水処理水に対する消毒効果が強い。

- 3) アンモニア性窒素との反応で生成するクロラミンについてみると、消毒力が強いジクロラミンの存在比は下水処理水のpHが低い方が大きい。

(2) 副生成物

塩素は下水処理水中のフミン質等と反応して有機塩素化合物(トリハロメタン等)を生成するが、塩素消毒を行っている下水処理場の放流水中トリハロメタン濃度は、一般に水道水の水質基準値と比べてかなり低く、流入下水中のトリハロメタン濃度と同程度である。ただし、塩素注入率と接触時間との積が大きいほどトリハロメタンの生成量は多くなる傾向がある。また、硝化が完全に進んだ下水処理水では、遊離塩素の作用によってトリハロメタンが生成し易い。

(3) 残効性

塩素剤を一度注入すると有効塩素が残留する間は消毒効果が継続する。水産水域等への放流に当たっては残留塩素濃度に注意する必要がある。

3 設計に当たっての留意事項

(1) 塩素剤

- 1) 塩素剤としては、大規模処理場や中規模処理場では一般に次亜塩素酸ナトリウム溶液を用い、小規模処理場では次亜塩素酸ナトリウム溶液又は固形塩素を用いる。また、初期対策として固形塩素を用いることもある。
- 2) 次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いる場合は貯留タンク、注

入装置、接触タンク等が必要であり、固形塩素を用いる場合は接触装置と接触タンクが必要である。

塩素剤は通風の良い冷暗所に貯蔵して紫外線の遮光に留意し、次亜塩素酸ナトリウム溶液貯留タンクの周りには漏洩時の対策として防液堤を設ける。また、塩素剤の貯蔵設備は耐震、耐火構造として配管の要所には可とう管を入れる。

(2) 注入設備

- 1) 次亜塩素酸ナトリウム溶液注入装置の容量は、下水処理水の水量及び水質の変動に対応できるように定める。
- 2) 次亜塩素酸ナトリウム溶液の注入に当たっては、下水処理水量に対して注入率一定制御を行うのが標準的である。
- 3) 次亜塩素酸ナトリウム溶液との接液部は耐食性の材料とする。
- 4) 固形塩素の接触装置は、固形塩素が容易に補給できて効率的に下水処理水と接触するような構造とするとともに、水量変動等があっても適正な塩素注入率が確保できるように配慮する。

(3) 接触タンク

接触タンクの容量は下水処理水と塩素剤との接触時間が放流水路を含めて15分程度確保できるように定める。

(4) 簡易処理放流への対応

合流式下水道において雨天時に簡易処理放流を行う場合は、浮遊物質や還元性物質による塩素消費量が多いことから、大腸菌群数を3,000個/ml以下にするためには一般に7～10mg/l程度の注入

が必要とされている。

4 維持管理上の留意事項

(1) 消毒状況の確認

- 1) 接触タンク出口等の残留塩素濃度を把握して塩素剤の注入量を適正に保つ。
- 2) 放流水中の大腸菌群数を定期的に測定する。

(2) 設備の保全

- 1) 設備の腐食や配管の閉塞等を定期的に点検する。
- 2) 塩素剤を劣化させないため、長期の貯留を避ける。

(3) 安全管理

塩素剤は強力な酸化力をもつので取扱いに注意する。

5 建設費及び維持管理費

(1) 建設費

次亜塩素酸塩溶液を用いる場合は、建設費に占める注入装置等の設備工事費の割合が大きく、処理場規模が大きくなると処理水1 m³当たりの建設費は大幅に低減する。処理場規模が大きくなると、設備工事費の建設費に占める割合はやや低下する。

固形塩素を用いる場合は、設備工事費が小さいため、他の消毒方法と比較して最も安価である。

(2) 維持管理費

維持管理費の大半を薬品費が占めることから、維持管理費は処理水量にほぼ比例する。固形塩素を用いる場合は、次亜塩素酸塩溶液を用いる場合よりも処理水1 m³当たりの薬品費が高い。

(紫外線消毒技術の特徴)

1 消毒特性

(1) 消毒機序

紫外線は、細胞内の核酸の損傷を起こして微生物を不活化する。消毒効果が最も高い紫外線の波長は250nmから270nm程度である。

紫外線によって不活化された細菌に太陽光などに含まれる可視光があたると、酵素の働きで一部の細菌が再び活性を取り戻す現象がみられ、光回復現象とよばれている。紫外線消毒を行った下水処理水中でこの現象がみられる場合があるが、その大きさは、細菌の種類、紫外線照射量、可視光強度、可視光照射時間等によって異なる。

(2) 消毒性能

紫外線消毒では、紫外線照度と照射時間との積が大きいほどその消毒効果が大きい。通常の下水二次処理水の消毒において、紫外線照射直後で大腸菌群の平均殺菌率を99.9%(対数生残比-3 log)程度とすることができるような紫外線消毒設備を設置すると、光回復を考慮しても大腸菌群殺菌率でみて現状の塩素消毒設備と同等の消毒性能であることから、放流水中の大腸菌群数を安定的に3,000個/ml以下とすることができる。

2 消毒機能上の特徴

(1) 下水処理水の水質による影響

- 1) 下水処理水のCODやSSが高いほど紫外線透過率が低下するため、紫外線ランプの必要本数が多くなる。
- 2) 懸濁物粒子の内部や裏側に存在する微生物は、紫外線到達

量が少ないため不活化されにくい。

(2) 副生成物

有害な副生成物はみられない。

(3) 残効性

紫外線は水中に残存しないので放流水中での残効性はない。

(4) 紫外線照度の分布

紫外線消毒設備内では、紫外線ランプからの距離等によって紫外線照度に分布がみられ、施設内の位置によって消毒効果に差が生じるが、設備全体としての消毒性能は指標微生物の生残比によって確認することができる。

3 設計に当たっての留意事項

(1) 紫外線ランプ

1) 消毒用の紫外線ランプには、点灯時の水銀蒸気圧が低い低圧水銀ランプと水銀蒸気圧が高い中圧水銀ランプがあり、発生する紫外線の波長分布、ランプ出力、設置方法、電力消費等がランプによって異なることから、各処理場の状況に応じてランプを選択する。

2) 紫外線ランプの設置本数は、保護管等の通常の汚れ、ランプの経日的な劣化、処理水量及び水質の変動等に対応できるように定める。

(2) 消毒設備の設置

1) 消毒設備の設置方法としては、紫外線ランプを保護管に入れて下水処理水が満水状態で流れる管内に設置する密閉型、同様にして自由水面をもつ流路内に浸漬させて設置する開水

路型、及び管内に下水処理水を流して管の外側から紫外線を照射する外照型があり、設置方法は紫外線ランプの種類や各処理場の状況に応じて選択する。

2) 消毒に必要な紫外線照射時間が短いので、消毒設備の設置容積及び設置面積は小さい。

3) 消毒設備は流入水量の増加に合わせて増設し、処理場稼働初期に過剰な設備とならないよう配慮する。

4) 放流水路に消毒設備を開水路型で設置する場合は、水量変動に伴う水位の上下が小さくなるよう配慮する。

5) 開水路型配置で紫外線ランプを水流と垂直方向に設置する場合は、ランプ自身が放射する可視光による光回復の影響を考慮する必要がある。

6) 巡回時に紫外線ランプの点灯の有無を容易に確認できるように配慮する。

7) 保護管等の清掃及びスケール洗浄が行い易いよう配慮する。

4 維持管理上の留意事項

(1) 消毒状況の確認

1) 下水処理水の紫外線透過率の変動を把握して消毒状況を確認する。

2) 放流水中の大腸菌群数を定期的に測定する。

(2) 設備の保全

1) 保護管等のよごれやスケール生成を定期的に点検し、必要に応じて洗浄を行う。

2) 紫外線ランプ等の消耗品を適正な期間で交換する。

(3) 安全管理

眼などに紫外線の照射を直接受けないように注意する。

5 建設費及び維持管理費

(1) 建設費

建設費は設備工事費が大半を占め、低圧紫外線ランプを用いる場合は処理場規模が大きくなっても処理水 1 m³当たりの建設費はあまり低減しない。

(2) 維持管理費

維持管理費の主な構成要素は紫外線ランプ交換費、電力費、及び機器補修費であり、処理場規模が大きくなっても処理水 1 m³当たりの維持管理費はあまり低減しない。

(オゾン消毒技術の特徴)

1 消毒特性

(1) 消毒機序

オゾンは、その強い酸化力によって微生物細胞膜系の破損や蛋白質の変性等を起こして微生物を不活化する。

(2) 消毒性能

オゾン消毒では、溶存オゾン濃度と接触時間との積が大きいほどその消毒効果大きい。有機物や亜硝酸等の還元性物質が少ない下水二次処理水では 5 mg/ℓ 程度以下の注入で大腸菌群数 3,000 個/ℓ 以下を達成できる場合があるが、還元性物質が多い場合はオゾンが速やかに消費されるためより多くのオゾン注入が必要である。

2 消毒機能上の特徴

(1) 下水処理水の水質による影響

- 1) 下水処理水中の亜硝酸性窒素は特にオゾン消費量が多く、CODやSSが高い場合もオゾンが消費される。
- 2) オゾンは水に溶けやすいため水温変動による溶解効率への影響は小さい。

(2) 副生成物

通常の下水処理水ではオゾン酸化による有害な副生成物の生成量は非常に少ない。

(3) 残効性

水中では速やかに自己分解するため、放流水中にはほとんど残留しない。

3 設計に当たっての留意事項

(1) オゾン処理の複合的効果

下水処理水のオゾン処理は、脱色、脱臭、COD除去等を主な目的として行われる場合が多く、オゾン消毒を行う場合はこれらとの複合的効果が期待できる。

(2) オゾン発生設備

- 1) 原料ガスには空気と酸素があり、酸素原料の方が高濃度のオゾンが得られる。
- 2) オゾン発生装置は、下水処理水量及び水質の変動に対応できる設備容量とするとともに、その補機類を含めて2系列以上として予備機を設ける。
- 3) オゾン発生器の投入電力を調節することによってオゾン発

生量を容易に制御することができ、制御方式としては注入率一定制御や排オゾン濃度制御が用いられる。

4) 冷却装置には空冷式と水冷式があるが、下水処理水のオゾン処理においては冷却効率の高い水冷式が多く用いられている。

(3) オゾン反応設備

1) オゾン注入装置は、オゾン溶解効率や維持管理性を考慮して一般にディフューザーが用いられている。

2) 反応タンクは耐食性および安全性を考慮してコンクリートもしくはステンレス製の密閉構造とし、下水処理水への溶解と反応を確実に進めるためにタンクの有効水深を4 m以上として接触時間を十分にとる必要がある。

3) オゾンの吸収効率は、反応タンクの水深、発生オゾン濃度、ガス空塔速度等によって異なるが、80%～90%程度を目途とする。

4) 排オゾン処理装置には活性炭吸着法と触媒分解法があり、発生オゾン量等によって選択される。

(4) 前処理

下水処理水のCODやSSが高い場合は砂ろ過等の前処理を行うとオゾン消費量を低減することができる。

4 維持管理上の留意事項

(1) 消毒状況の確認

1) 排オゾン濃度を把握してオゾン注入量を適正に保つ。

2) 放流水中の大腸菌群数を定期的に測定する。

(2) 設備の保全

- 1) 空気原料を用いたオゾン発生装置では、電極の清掃を年1回程度実施して窒素酸化物の付着等による放電効率の低下を防止する。
- 2) 排オゾン処理装置の活性炭又は触媒、各種シール部品等の消耗品を適正な期間で交換する。
- 3) 発生オゾン濃度計、排オゾン濃度計、環境オゾン濃度計等を適宜校正する。

(3) 安全管理

- 1) 環境オゾン計の利用等によって作業環境中のオゾン濃度を監視する。
- 2) 排水した反応槽内で作業を行うときは、事前に換気を十分に行う。

5 建設費及び維持管理費

(1) 建設費

建設費の中で設備工事費が占める割合が大きく、処理場規模が大きくなっても処理水1 m³当たりの建設費はあまり低減しない。塩素消毒や紫外線消毒と比較して建設費が大きいが、複合的効果を目的とする場合は経済性を他の消毒方法と比較することは難しい。

(2) 維持管理費

維持管理費に占める電力費の割合が大きく、処理場規模が大きくなっても処理水1 m³当たりの維持管理費はあまり低減しない。

(より高い消毒目標への対応)

放流先水域における下水処理水放流量の比率が高い場合は、放流先水域の環境基準達成のために、下水処理水の放流に関して一般の排水基準より厳しい消毒目標の設定が求められることがある。また、下水処理水を再利用する場合はその用途に応じてより高い目標水質が設定されている。このような高い消毒目標を達成するためには、高度処理の導入等によって良好な処理水質を確保し、その処理水質に対応して消毒方法を検討する必要がある。