

各種消毒技術の経済比較に関する調査

1. 研究目的

塩素消毒は下水処理水の消毒技術として国内では最も採用されている。消毒処理別で見ると塩素系消毒剤を用いた消毒処理を実施している処理場は全国で約 1,900 処理場、紫外線消毒は約 150 処理場、オゾン消毒は 26 処理場となっている（H24 下水道統計より）。しかしながら、塩素系消毒剤を用いた消毒は、処理水中の残留塩素やトリハロメタン等の消毒副生成物による放流先の水生生物への影響、塩素臭など環境に与える影響や、処理場における薬品管理の難しさ（人体への危険性、塩素濃度の低下）等、様々な問題も提起されている。そのため、塩素に代わる消毒技術として紫外線やオゾンを用いた代替消毒技術の開発も行われており、「最近の消毒技術の評価に関する報告書 平成 9 年 7 月」（日本下水道事業団）

（以下、「最近の消毒技術の評価」という。）においては、これら 3 消毒技術に関する知見や経済性に関する情報の整理がなされている。

しかし、「最近の消毒技術の評価」の発刊より 15 年以上経過した今日においても、紫外線消毒やオゾン消毒の採用事例はあまり増加していないのが実情である。その主な原因は、塩素消毒とその他消毒技術とのイニシャルコスト、維持管理コストの差異と考えられる。

以上の点を踏まえ本調査は、紫外線消毒やオゾン消毒技術に関して平成 9 年度当時よりも技術革新や低コスト化が進んでいる可能性に着目し、消毒技術メーカーへのアンケート形式により「最近の消毒技術の評価」と同様な手法でのコスト比較により、平

成 26 年度現在における各種消毒技術の経済性の差異を明らかにすることを目的に、実施した。

更に、その結果を今後の改築・更新事業等において代替消毒技術の採用も比較対象とすべきか否かの検討をする際に参考とすることが可能な基礎資料として取りまとめることも目的とした。

2. 研究体制

本調査は、国土交通省水管理・国土保全局下水道部からの受託である「病原性微生物に係る指標微生物に関する検討業務」における検討の一部として実施したものである。

3. 研究成果

3.1 各種消毒技術に関するケーススタディ条件

本調査において対象とする消毒技術は、塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒の 3 消毒技術とし、各消毒技術の建設費（土木工事費、建築工事費、設備工事費）及び維持管理費（電力費、薬品費、補修費、人件費）に関するケーススタディを消毒技術メーカーへのアンケート形式により実施した。

ケーススタディは処理水量（日最大）別に 1,000、3,000、10,000、100,000、300,000（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）の 5 ケースにおいて実施し、消毒技術・処理水量別に比較を行った。ここで、ケーススタディの実施においては、「下水道施設計画・設計指針と解説－2009 年版－」（以下、「下水道指針 2009」という。）に準じた各種消毒設備の設計を想定した。また、検討条件に関し

てメーカー間でばらつきが生じないよう、「最近の消毒技術の評価」等における検討条件も参考にした。

ケーススタディ検討条件を表-1及び表-2に示す。

表-1 消毒設備ケーススタディ検討条件(1)

処理水量(日最大) (m ³ /日)	1,000、3,000、10,000、100,000、300,000 の5ケース	
処理水量(時間最大) (m ³ /日)	日最大の1.5倍 ^{※1}	
対象水	下水二次処理水(高級処理水)	
消毒性能 大腸菌群数3,000個/cm ³ 以下	塩素	注入率:2~4mg/L ^{※2} の最小値である2mg/Lとした。
	紫外線	必要照射量:300~500J/m ² ^{※2} の範囲内でのメーカー推奨とした。
	オゾン	注入率:5~10mg/L ^{※2} の範囲内でのメーカー推奨値とした。

※1:紫外線消毒については「下水道指針2009」に準じるものとし、消毒装置の能力は計画時間最大汚水量(日最大×1.5)により算出した。

※2:「下水道指針2009」に記載されている数値。

表-2 消毒設備ケーススタディ検討条件(2)

項目	単価	単位	摘要
■共通			
土工事費(消毒槽)	40	千円/m ³	最近の消毒技術の評価
建築工事費(消毒棟)	200	千円/m ²	最近の消毒技術の評価
機械設備工事費			工事費:機器費の50%を考慮
電気設備工事費			工事費:機器費の50%を考慮
電力費	15	円/kWh	
人件費	2	千円/時間	
■塩素消毒関連			
塩素濃度	2	mg/L	下水道指針2009
固形無機塩素系消毒剤	500	円/kg	下水道事業における費用効果分析マニュアル(案)(追補版)平成20年4月
有効塩素	70	%	下水道指針2009
次亜塩素酸ナトリウム溶液	50	円/kg	最近の消毒技術の評価
有効塩素	12	%	下水道指針2009

3.2 アンケート回答状況と結果の整理方法

アンケートは、消毒技術メーカー13社に対して実施した。回答状況と結果の整理方法を表-3に示す。

表-3 アンケート回答数と回答結果の整理方法

処理水量 (日最大) (m ³ /日)	消毒方式			
	塩素消毒 (固形塩素)	塩素消毒 (次亜塩素酸ソーダ)	紫外線消毒 [※]	オゾン消毒
1,000	2社 (2社平均価格)	1社 (1社単独価格)	6社 (5社平均価格 及び最小価格)	2社 (2社平均価格)
3,000	2社 (2社平均価格)	1社 (1社単独価格)	7社 (6社平均価格 及び最小価格)	1社 (1社単独価格)
10,000	-	3社 (3社平均価格)	6社 (6社平均価格 及び最小価格)	2社 (2社平均価格)
100,000	-	3社 (3社平均価格)	6社 (6社平均価格 及び最小価格)	1社 (1社単独価格)
300,000	-	3社 (3社平均価格)	6社 (6社平均価格 及び最小価格)	1社 (1社単独価格)

※紫外線消毒に関しては、7社中6社が低圧ランプにて建設費・維持管理費を算出していたのに対し、1社は中圧ランプであった。そのため、平均価格の整理においては中圧ランプの1社を除外した。

① 塩素消毒(固形塩素・次亜塩素酸ソーダ)

3社からの回答を得られた。うち2社からは、1,000、3,000(m³/日)については固形塩素による消毒を想定した回答であった。塩素消毒は一般的な技術であり、

納入実績は多数ある反面、カタログ等を作成しておらず、公的評価も受けていないケースが多いことが、回答数が少なかった理由として推察される。

② 紫外線消毒

7社からの回答を得られた。回答数が他の消毒技術と比べて多く、各メーカーが算出した建設費・維持管理費の価格範囲も広がった。そこで、納入実績と価格の連動性を考慮し、紫外線消毒においては「平均価格」とともに「最小価格」についても整理を行った。

③ オゾン消毒

2社からの回答を得られた。うち1社の回答は、処理水量1,000、10,000(m³/日)のみであった。従って、その評価の取り扱いについては、注意を要する。また、回答数が少なかったのは、現段階においてオゾン消毒技術の導入実績に限られており、概算費用の試算が困難であったことに起因するものと推察される。

3.3 消毒技術の経済比較(m³単価(処理能力))

各消毒技術の建設費・維持管理費を、処理能力(m³)で除し、m³単価として整理した。

① 建設費 m³単価(処理能力)

平均価格に関して、3消毒技術のうち最も安価なものは総じて塩素消毒であった。さらに塩素消毒でも固形塩素については消毒棟が不要なことから、次亜塩素酸ソーダよりも安価となった。一方、最も高価な傾向を示したのはオゾン消毒であった。しかし、処理水量(日最大)が100,000(m³/日)以上となると、オゾン消毒と紫外線消毒とではほぼ同等であった(図-1)。

また、紫外線消毒の最小価格は、同技術の平均価格の47~85%程度を示し、処理水量が増加するほど安価となる傾向となった。メーカー間の価格差が広いことがうかがえる(図-2)。

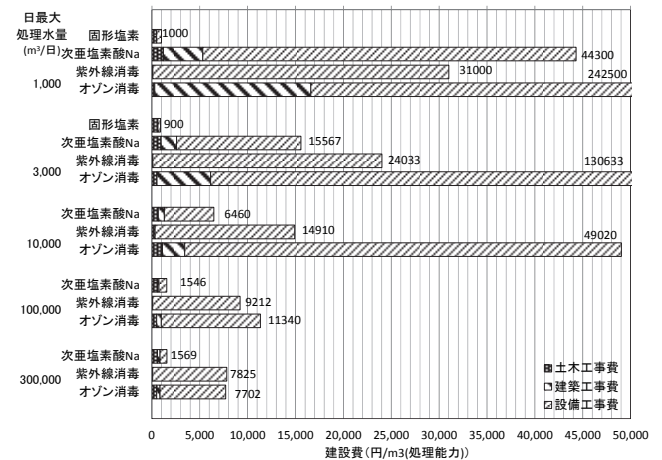


図-1 各消毒技術の建設費 m³単価(処理能力)
(紫外線消毒は平均価格を使用)

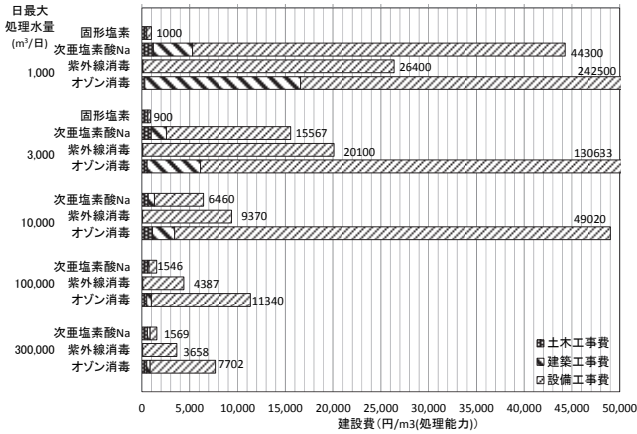


図-2 各消毒技術の建設費 m³ 単価 (処理能力)
(紫外線消毒は最小価格を使用)

更に、処理水量が大きくなるにつれて建設費 m³ 単価 (処理能力) が小さくなっていることから、3 消毒技術全てにおいてスケールメリットが働いていることが判る。特にオゾン消毒においてその効果は大きい (図-1, 図-2)。

② 維持管理費 m³ 単価 (処理能力)

平均価格に関して、3 消毒技術のうち最も高価な傾向を示したのは総じてオゾン消毒であった。オゾン消毒は他の処理技術と比較して電力費の占める割合が高いことがうかがえる。また、次亜塩素酸ソーダと紫外線消毒 (平均価格) とでは総じて次亜塩素酸ソーダの方が安価であったが、ほぼ同等の結果であった。さらに、処理水量 (日最大) 1,000、3,000m³/日では、固形塩素を用いた塩素消毒が次亜塩素酸ソーダ、紫外線消毒よりも高価であった。これは固形塩素の薬品費が影響していることが原因である (図-3)。

また、紫外線消毒の最小価格は、同技術の平均価格の 46~64% 程度を示し、すべての処理水量にわたって最も安価であった (図-4)。

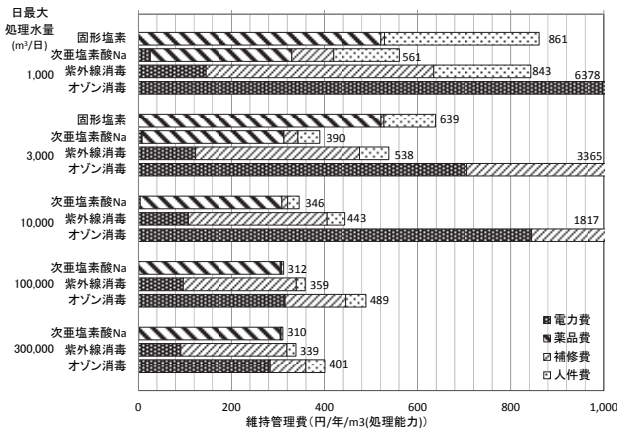


図-3 各消毒技術の維持管理費 m³ 単価 (処理能力)
(紫外線消毒は平均価格を使用)

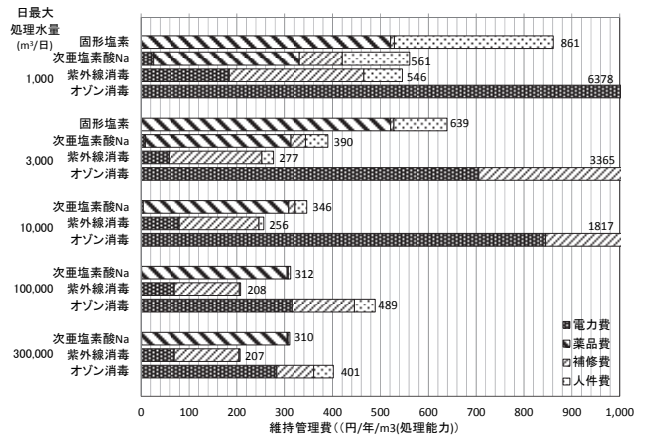


図-4 各消毒技術の維持管理費 m³ 単価 (処理能力)
(紫外線消毒は最小価格を使用)

更に、処理水量が大きくなるにつれて維持管理費 m³ 単価 (処理能力) が小さくなっていることから、3 消毒技術全てにおいてスケールメリットが働いていることが判る。特にオゾン消毒においてその効果は大きい (図-3, 図-4)。

3.4 消毒技術の経済比較 (m³ 単価 (処理水量))

アンケート回答を以下の計算方法で整理し、汚水 1 m³ の消毒処理に要する建設費+維持管理費の比較を行った。結果を図-5 及び図-6 に示す。

<汚水 1 m³ の消毒処理に要する建設費>

- 各消毒技術の建設費を「持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構築策定マニュアル 平成 26 年 1 月」(国土交通省、農林水産省、環境省) を参照し、土木・建築は耐用年数 50 年、機械・電気は耐用年数 25 年として年価換算。
- 建設費年価換算 (円/年) を、年間処理水量* (m³/年) で除し、汚水 1 m³ の消毒処理に要する建設費を算出。

<汚水 1 m³ の消毒処理に要する維持管理費>

- 維持管理費 (円/年) を、年間処理水量* (m³/年) で除し、汚水 1 m³ の消毒処理に要する維持管理費を算出。

※年間処理水量; 日最大水量の 0.75 倍を日平均水量とし、365 日を乗じることで算出。

図-5 を見ると、汚水 1 m³ の消毒処理に要する建設費+維持管理費が最も安価な技術は塩素消毒であることが分かる。一方で、図-6 を見ると、処理水量 3,000~300,000 (m³/日) の領域では、紫外線消毒 (最小価格) の年価換算値は次亜塩素酸ソーダ (平均価格) の 1.0~1.1 倍程度と僅差であった。これより、導入条件によっては両者の経済性はほぼ同等となる可能性が示唆される。

また、図-5 及び図-6 の下部に記載の表からは、汚水 1m³ の消毒処理に要する建設費と維持管理費それぞれの占める割合を読み取ることができる。

塩素消毒（次亜塩素酸ソーダ）に関しては、処理能力 3,000m³/日までは維持管理費よりも建設費の占める割合が大きく、処理能力 10,000m³/日を超えるとその関係が逆転していることが判る。（図-5及び図-6）。

紫外線消毒（平均価格）に関しては、処理能力 10,000m³/日までは維持管理費よりも建設費の占める割合が大きく、処理能力 100,000m³/日ではほぼ同等となり、処理能力 300,000m³/日でその関係性が逆転することが判る（図-5）。

更に、紫外線消毒（最小価格）に関しては、処理能力 10,000m³/日までは維持管理費よりも建設費の占める割合が大きく、処理能力 100,000m³/日でその関係性が逆転していることが判る（図-6）。

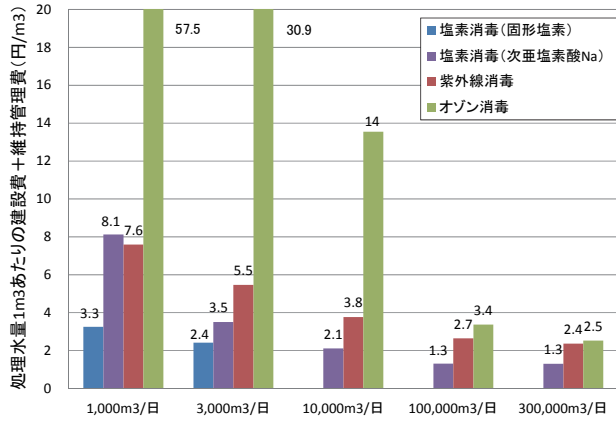


図-5 汚水 1 m³ の消毒処理に要する「建設費+維持管理費」の比較（紫外線は平均価格を使用）

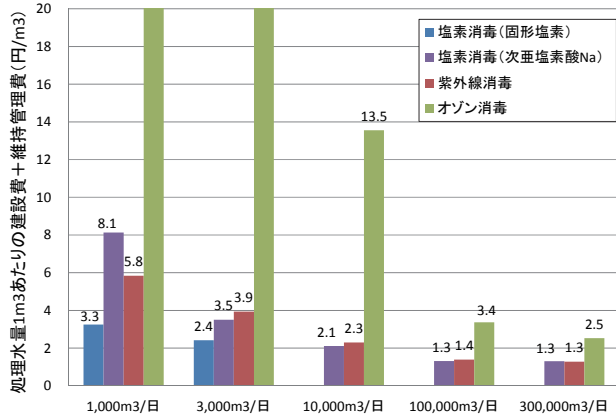


図-6 汚水 1 m³ の消毒処理に要する「建設費+維持管理費」の比較（紫外線は最小価格を使用）

3.5 消毒技術の経済比較 (m³単価(処理能力)相対値)

各消毒技術の建設費、維持管理費を m³ 単価(処理能力)に換算し、処理水量（日最大）3,000 (m³/日)の次亜塩素酸ソーダを「100」とした場合の相対値を処理水量別に整理した。これら整理結果を図-7～図-10に示す。各消毒技術ともに処理水量が増加するほど建設単価、維持管理単価は低下する傾向がうかがえる。

また、紫外線消毒とオゾン消毒の建設費相対値(平均価格)を比較した場合、処理水量（日最大）1,000～10,000 (m³/日)の領域では、オゾン消毒は紫外線消毒の約 3.3～7.8 倍もの価格差となっているが、処理水量 100,000～300,000 (m³/日)の領域では、その差は 1.0～1.2 倍と僅差となっており、処理場規模が大きくなるに従い両者の建設費の価格差は小さくなる傾向がうかがえる（図-7）。またその傾向は、維持管理費についても同様である（図-9）。

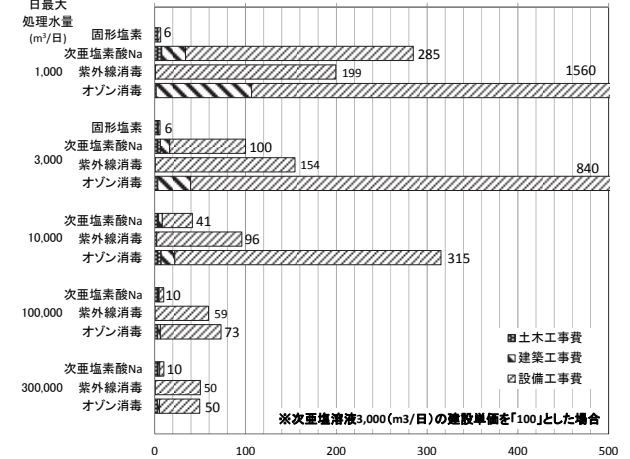


図-7 各消毒技術の建設費 m³ 単価(処理能力) (相対値) (紫外線消毒は平均価格を使用)

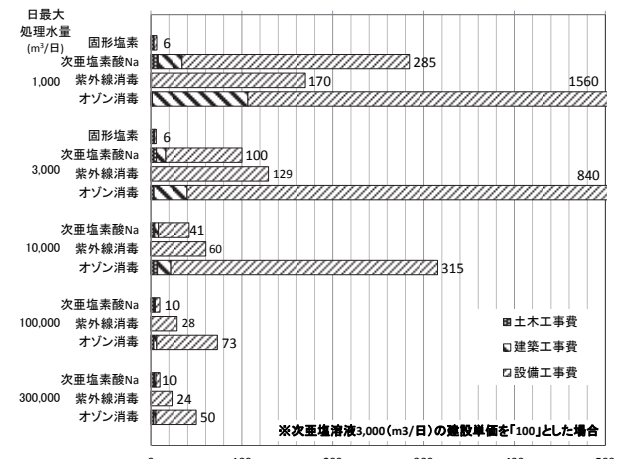


図-8 各消毒技術の建設費 m³ 単価(処理能力) (相対値) (紫外線消毒は最小価格を使用)

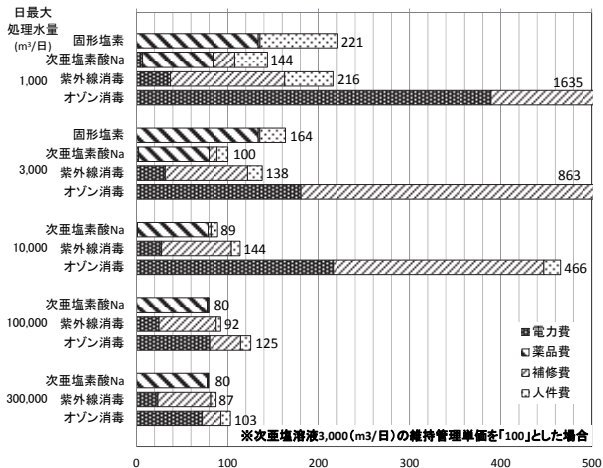


図-9 各消毒技術の維持管理費 m³ 単価 (処理能力) (相対値) (紫外線消毒は平均価格を使用)

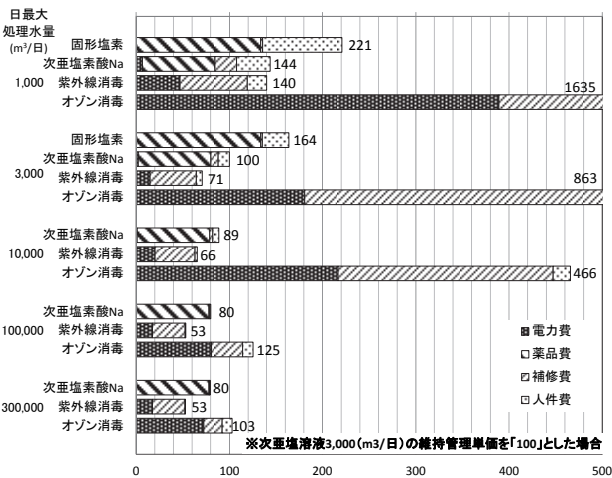


図-10 各消毒技術の維持管理費 m³ 単価 (処理能力) (相対値) (紫外線消毒は最小価格を使用)

3.6 経済比較の整理

以上までの整理結果から、各消毒技術の建設費、維持管理費の経済性について整理する。

1) 建設費について

①塩素消毒

- ・次亜塩素酸塩ソーダの場合、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建設費 m³ 単価 (処理能力) は大幅に低減する。また、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低下する。
- ・固形塩素の場合、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紫外線消毒

- ・建設費は設備工事費がその大半を占める。また、処理場規模が大きくなっても、他の処理技術と比べて建設費 m³ 単価 (処理能力) の建設費はあまり低減しない。

③オゾン消毒

- ・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ると建設費 m³ 単価 (処理能力) は大幅に低減する (※注)。また、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低下する。
- ・塩素消毒や紫外線消毒と比較して建設費は大きくなるが、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) 維持管理費について

①塩素消毒

- ・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 (処理水量 1,000~3,000 m³/日) の場合、次亜塩素酸塩溶液を用いる場合よりも処理能力 1 m³/日当りの薬品費が高くなる。

②紫外線消毒

- ・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維持管理費 m³ 単価 (処理能力) はあまり低減しない。

③オゾン消毒

- ・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ると維持管理費 m³ 単価 (処理能力) は大幅に低減する (※注)。

※注：オゾン消毒について

本調査ではオゾン消毒のアンケート回答数が2回答であり、うち1回答は処理水量 1,000、10,000 m³/日のみであったため、今回評価結果の取扱いについては注意を要する。

3.7 平成9年度当時の経済性との比較

本項では、「最近の消毒技術の評価」において提示されている平成9年度当時の塩素消毒及び紫外線消毒の建設費 m³ 単価 (処理能力)・維持管理費 m³ 単価 (処理能力) (紫外線消毒は最小価格) と、本調査 (平成26年度) にて得られた建設費 m³ 単価 (処理能力)・維持管理費 m³ 単価 (処理能力) (紫外線消毒は最小価格) とを比較することで、平成9年度当時からの経済性の状況変化に関する検討を行った。なお、オゾン消毒についてはアンケート回答数が少なくデータの信頼度が低いことから比較の対象外とする。

建設費 m³ 単価 (処理能力) の比較結果を表-4、維持管理費 m³ 単価 (処理能力) の比較結果を表-5に示す。

表-4 H9年度とH26年度の建設費 m³単価(処理能力)の相対値比較(紫外線は最小価格を使用)

日最大 処理水量 (m ³ /日)	消毒方法	平成9年度 ^{※1}		平成26年度	
		建設費単価 の相対値 ^{※2}	紫外線 ÷ 次亜塩素酸 ソーダ	建設費単価 の相対値 ^{※2}	紫外線 ÷ 次亜塩素酸 ソーダ
1,000	次亜塩素酸Na	—	—	285	0.60
	紫外線	182	—	170	
3,000	次亜塩素酸Na	100	1.15	100	1.29
	紫外線	115		129	
10,000	次亜塩素酸Na	43	1.88	41	1.46
	紫外線	81		60	
100,000	次亜塩素酸Na	11	—	10	2.80
	紫外線	—	—	28	

※1 「最近の消毒技術の評価に関する報告書 平成9年7月」(日本下水道事業団) 図9-1より。

※2 次亜塩素酸ソーダ3,000m³/日の建設費単価を「100」とした場合の相対値。

表-5 H9年度とH26年度の維持管理費 m³単価(処理能力)の相対値比較(紫外線は最小価格を使用)

日最大 処理水量 (m ³ /日)	消毒方法	平成9年度 ^{※1}		平成26年度	
		維持管理費 単価の 相対値 ^{※2}	紫外線 ÷ 次亜塩素酸 ソーダ	維持管理費 単価の 相対値 ^{※2}	紫外線 ÷ 次亜塩素酸 ソーダ
1,000	次亜塩素酸Na	—	—	144	0.97
	紫外線	118	—	140	
3,000	次亜塩素酸Na	100	1.00	100	0.71
	紫外線	100		71	
10,000	次亜塩素酸Na	91	0.90	89	0.74
	紫外線	82		66	
100,000	次亜塩素酸Na	82	—	80	0.66
	紫外線	—	—	53	

※1 「最近の消毒技術の評価に関する報告書 平成9年7月」(日本下水道事業団) 表9-7より。

※2 次亜塩素酸ソーダ3,000m³/日の建設費単価を「100」とした場合の相対値。

表-4及び表-5より、建設費と維持管理費の状況変化について以下に考察する。

1) 建設費の状況変化

処理水量(日最大)3,000~10,000(m³/日)の場合、平成9年度当初の紫外線消毒の建設費 m³単価(処理能力)相対値は、塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)の1.15~1.88倍であったのに対して、本調査(平成26年度)においては1.29~1.46倍であった。

紫外線消毒と塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)の建設費 m³単価(処理能力)相対値は、経済性の差が全般的に縮小してきているが、これは紫外線ランプ性能の向上やランプ価格の低下が進行したことによるものと推察される。

2) 維持管理費の状況変化

処理水量(日最大)3,000~10,000(m³/日)の場合、平成9年度当初の紫外線消毒の維持管理費 m³単価(処理能力)相対値は、塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)の0.90~1.00倍であったのに対して、本調査(平成26年度)においては0.66~0.97倍であった。

の0.90~1.00倍であったのに対して、本調査(平成26年度)においては0.71~0.74倍と、塩素消毒を大きく下回る結果であった。

紫外線消毒の維持管理性がより向上したことがうかがえるが、これは紫外線ランプの価格の低下や、技術革新による省エネルギー化、長寿命化が進行したことによるものと推察される。

なお、平成9年度当時の経済性との比較にあたっては「最近の消毒技術の評価」を参考としたが、本書からは平成9年度当時の維持管理費の算出条件が詳細には読み取れなかった。そのため、算出条件が本調査とすべて同一ではない点には留意が必要である。

4. 本調査のまとめ

本調査は、消毒技術メーカー各社の協力のもと、処理水量(日最大)1,000~300,000(m³/日)の5ケースにおいてケーススタディを実施し、塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒の3消毒技術に関する建設費及び維持管理費の動向を調査した。

その結果、平成9年度当時の経済性との比較においては、紫外線消毒技術の建設費の経済性は概ね向上していることが確認され、塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)との差が縮小していることが示された。さらに、平成9年度当時は塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)とほぼ同等であった紫外線消毒の維持管理費の経済性は、技術革新等の結果として、さらに向上していることが示された。

また、上記の結果として、処理水量(日最大)3,000~300,000(m³/日)の領域において、汚水1m³の消毒処理に要する「建設費+維持管理費」に関して、紫外線消毒(今回アンケート回答の最小価格)の値は、塩素消毒(次亜塩素酸ソーダ)の値の1.0~1.1倍程度と僅差となっていた。これは、導入条件によっては両者の経済性はほぼ同等となる可能性が示唆される。

今後、残留塩素やトリハロメタン等の消毒副生成物による放流先水生生物への影響や塩素臭などの改善など、健全な水環境の創出の視点がますます重要になってくることを踏まえると、既存消毒設備の改築・更新時には、代替消毒技術のひとつとして紫外線消毒やオゾン消毒等の採用についても検討していくことが求められる。

今後、本機構としても、代替消毒技術の普及拡大に向けて協力していく。

●この研究を行ったのは

研究第一部	三宮 武
研究第一部	小塚 俊秀
研究第一部	森谷 敦人
研究第一部	小高 悠

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部	中島英一郎
研究第一部	小塚 俊秀
研究第一部	中野 善彰
研究第一部	森脇 隆一