

特集：下水道技術が支える市民生活

下水処理水再利用の拡大に向けた 温室効果ガス排出量の定量的評価

宮本綾子* 西村峻介** 山縣弘樹*** 小越眞佐司****

1. はじめに

人口の増加にともなう水需要の増大、また気候変動に伴う自然の水循環の変化により世界的に水資源の不足が懸念されており、下水処理水の再利用が注目されている。我が国においても下水処理水の再利用は雨水利用とともに、水需給の逼迫した地域を中心に水の有効利用方策として導入されている。しかし再生水量は平成20年度で下水処理水全体の1.4%程度に過ぎず、用途の拡大などを通して再利用の推進を図っていく必要がある。

一方、化石燃料の大量消費に伴って放出された二酸化炭素等、温室効果ガスによる地球温暖化の進行を抑制し、持続可能な発展を実現するため、低炭素社会の実現に向けた国際的な取組が進められている。平成19年度から20年度にかけて国交省下水道部に「下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会」が設置され、再生水の利用を促進する上では、再生水利用によるCO₂削減効果の定量化（上水または個別循環との比較等）が必要であるとの提言が行われた¹⁾。

本報では、電力消費等に伴う間接的な排出量を含めたCO₂換算排出量（以下、CO₂排出量とする）を対象とし、再生水利用に係るCO₂排出量を評価する場合に比較対象となる既存の上水道システムからのCO₂発生率調査、また、広域循環、個別循環による再生水利用のCO₂排出量定量化を目的とした調査について報告する。なお、この調査では水処理・汚泥処理から発生するN₂O、CH₄等の温室効果ガスは対象としていない。

2. 上水供給のCO₂発生率調査

再生水利用の導入によるCO₂排出量削減効果を評価する場合、既存の上水供給のCO₂排出量が比較対象として適当であるが、現状ではデータが存在しない。この項では既存の上水道システムのCO₂発生率エネルギー消費構造を明らかにするため、平成20

年度統計資料²⁾に基づいて試算した結果について述べる。

2.1 調査方法

調査対象には地形、人口密度、水源の条件が異なる12都市を選択した。表-1に対象とした都市の水利用の概要を示す。試算対象範囲は、都市の水道事業者が行う取導水、

表-1 上水道CO₂発生率の調査対象都市

対象地域	地形	人口密度 (人/ km ²)	取水量合計 (千m ³)	受水量割合 (%)
札幌市	平坦地	1,699	200,788	0.0
新潟市	平坦地	1,119	116,284	7.3
君津市	平坦地	279	11,451	47.4
新城市	丘陵	101	4,722	51.1
堺市	平坦地	5,586	104,238	99.5
神戸市	傾斜地	2,783	212,083	84.4
広島市	平坦地	1,293	147,360	11.1
高松市	平坦地	1,116	52,563	57.2
多度津町	平坦地	965	4,046	38.5
福岡市	平坦地	4,251	147,214	36.7
長崎市	傾斜地	1,093	47,671	0.0
糸満市	平坦地	1,220	6,524	100

表-2 CO₂発生率の算定に使用した換算原単位
(電力は平成20年度の調整後原単位)

原単位区分	CO ₂ 原単位(kg-CO ₂ /kgもしくはkWh)
次亜塩素酸ナトリウム	0.321
PAC	0.405
硫酸アルミニウム	0.357
塩化第二鉄	0.318
苛性ソーダ(24wt%)	0.225
硫酸	0.087
電力(代表値)	0.561
関西電力	0.299
沖縄電力	0.946

浄水、送水、配水プロセスとした。また、試算対象項目は各プロセスにおける電力、薬品、燃料の消費量とし、それぞれの値は、水道統計から引用し、各換算原単位（表-2）を用いてCO₂排出量に換算した。なお、電力由来のCO₂排出量は、都市ごとに電力供給を受けている電力会社が異なり、また発電方法等によりCO₂排出量の原単位が異なるため、それぞれ該当する原単位を用いた。また、各都市で水道事業者以外の水道水供給事業者（県や公団）からの水供給がある場合は、受水分としてCO₂排出量を推定し、加算した。

2.2 調査結果

CO₂発生率を試算した結果を図-1に示す。対象都市の中では、糸満市のCO₂発生率が、1.25 kg-CO₂/m³となり最も高い値を示した。一方、最も低い札幌市のCO₂発生率は、0.11 kg-CO₂/m³となり、糸満市と比較しておよそ1/10程度となった。全国の水道事業者及び水道水供給事業者を対象とした場合のCO₂発生率は、0.33 kg-CO₂/m³であり、都市に

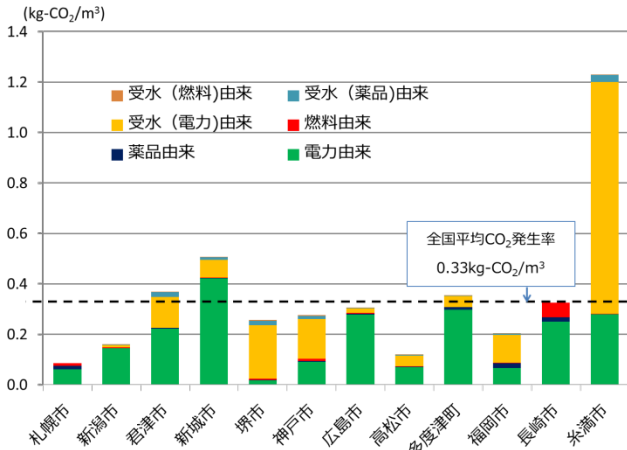


図-1 12都市の上水供給に係るCO₂排出量原単位

よって水供給に係るCO₂発生率に大きなばらつきがみられた。また、全ての都市で、電力由来のCO₂発生割合が9割程度を占めていた。

糸満市に電力を供給している沖縄電力の原単位は、国内の電力会社で最も高く、糸満市のCO₂発生率の試算結果が高くなった原因の一つと考えられた。さらに、糸満市は、水供給が可能な水源を市内や近郊に有していないため、全量を供給事業者からの給水で賄っている。その結果、糸満市の供給事業者からの給水は沖縄本島北部からの長距離送水が必要となることから、受水（電力）由来の割合が他都市と比較して大きくなっていると考えられた。一方、最もCO₂発生率の低い札幌市は市内に豊富な水資源を有しているため水源からの送水に係るCO₂排出量が小さくなっていると考えられた。また、CO₂発生率が全国平均より高い君津市、新城市、多度津町では、エアレーション（君津市）UF膜（新城市）、NF膜＋RO膜*（多度津町）といった電力消費の大きい高度浄水処理を行っていることが影響している可能性がある。

水需要が高く上水供給にかかる電力消費の大きい地域では特に、再生水利用を新しい水資源として導入することにエネルギー消費とCO₂排出量削減の点でメリットがあると考えられる。

3. 広域循環と個別循環のCO₂発生率

広域循環と個別循環それぞれの再生水利用に伴うCO₂排出量について実態調査に基づく定量化を行い、削減効果を評価した。

3.1 広域循環と個別循環

再生水の都市利用用途の形態には、下水道を介して広域的に再生水を供給する方式（広域循環）と、

個別建物内で発生した廃水を再生利用する方式（個別循環）がある。各施設は以下のような特徴を持ち、再生水製造に伴うエネルギー消費量やCO₂発生率が異なる。

(1)広域循環

広域循環利用では二次処理水を再生水源としており、砂ろ過、凝集沈殿等に加えて脱色と微生物の不活化を兼ねたオゾン処理を採用する事例が多い¹⁾。近年では膜処理の導入も行われている。

(2)個別循環

個別循環は大規模建築物や開発事業に導入されており、処理水はトイレ洗浄水、散水用水として水道水の代替として使用されている。「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」により建築物内においては尿を含む水の再利用用途が制限されていることから、厨房・洗面所からの雑排水が主な再生水源で、一部の施設では雨水も利用されている。また、再生水のみで必要水量をまかなえない場合は上水を補給水として使用することがある。個別循環利用施設では雑排水の再生処理として生物処理が多く導入されており、有機物の処理を兼ねている。生物処理後はろ過処理等で微細SSを除去して再利用される²⁾。

3.2 広域循環施設における運転時CO₂発生率調査

3.2.1 調査方法

広域循環による再生水の利用に伴うCO₂排出量の実態を把握するため、4つの再生処理施設を対象とし、アンケートおよび聞き取り調査を実施した。各施設の二次処理までの水処理は対象外とし、再利用のための処理プロセスと利用先までの送水ポンプを調査の対象として、1年間の再生利用水量と再生処理および送水のために要した電力、薬品等の消費量を把握した。これらの結果をまとめ、電力、薬品等についてのCO₂換算原単位を乗じた後、合算した結果を年間再生水供給量で除して、各施設のCO₂発生率とした。

3.2.2 調査結果

調査対象施設の概要と各施設の再利用CO₂発生率を表-3に示す。CO₂発生率が最も少ない施設Dでも2.2で試算した上水実績国内年間給水量の平均CO₂発生率の0.33kg-CO₂/m³より21%大きい³⁾が、糸満市、新城市の原単位よりは少ない結果となった。稼働率とCO₂発生率の関係を見てみると、稼働率が高いほどCO₂発生率は減少する傾向がみられた。施設Aは

*土木用語解説：UF膜、NF膜、RO膜

特に稼働率が低いことからCO₂発生率が高くなったものと推定され、稼働率がこれまでで最大の41%であった時点でのCO₂発生率はそれより少ないと推計された。

これらの結果より、CO₂発生率の観点からみれば、広域循環による再生水利用の導入は上水道供給からのCO₂発生率が高い地域に適していると考えられる。広域循環では、下水処理場から遠く、かつ、処理場よりある程度以上高い位置の利用先への送水は不利であり、再利用を計画する際にはポンプ位置や配水エリアを適切に設計することが重要である。

3.3 再生水利用によるLC-CO₂

3.3.1 調査方法

前項の調査では広域循環施設の運転時におけるCO₂発生率を算定した。ここでは広域循環と個別循環が行われている地域での再生水利用について、建設・運用段階を含めたLC-CO₂*により評価した結果について述べる。

(1)評価対象の選定

広域循環については、自治体の協力を得て広域循環実施施設を対象に行ったアンケート調査で、再生水利用規模が計画で100 m³/日程度以上と回答した建物の中から選定した。個別循環については、延床面積1万m²超の建築物について環境への取組を公表する「建築物環境計画書制度」のデータ等より、主用途がトイレ洗浄水であり、雨水併用利用ではなく、雑用水利用規模が計画で100 m³/日程度以上の建物から選定した。それぞれの評価対象建物に対してヒアリングを行い、稼働実績やLC-CO₂検討の基礎データの収集を行った。特に広域循環については、利用先建物だけでなく、下水処理場の再生処理施設と再生水供給施設に関するLC-CO₂検討の基礎デー

タについて、事業者へヒアリングを行った。

LC-CO₂評価対象とした建物の概要を表-4に示す。広域循環の再生処理方式は表3のDである。再生水の水源は、ビルAでは全量下水処理場から送水された再生水であり、ビルB及びCでは雑排水であった。利用用途は、広域循環・個別循環共にトイレ洗浄が主であり、ビルA・Bでは植栽への散水も行っていた。ビル全体の水使用量に対する再生水使用量の比率を節水率と定義すると、ビルBは節水率が20%と低く、雑用水の需要の一部しか再生水で賄われずに上水の補給が行われている。一方、ビルAでは節水率が69%と高く、広域循環では個別循環に比べより高い節水効果が示唆された。

(2)LC-CO₂の検討範囲の設定

LC-CO₂の時間境界は、建設（施工除く）・運用・更新・廃棄までを対象とすることを原則とした。ただし、広域循環の再生処理施設の建設時における環境負荷排出量は、従来の下水処理場へのLC-CO₂検討の事例等から、運用段階の環境負荷量に比べ少ないと想定されたため、今回の評価の対象外とした。標準耐用年数は、土木施設で50年、処理施設で15～20年とした。なお膜処理導入施設（ビルC）については、膜の耐用年数はヒアリングに基づき5年とした。

LC-CO₂の空間境界は、広域循環については、下水処理場の再生処理施設及び供給施設と、再生水利用先建物とし、個別循環については、個別循環実施建物とした。なお広域循環・個別循環共に、建物内の再生水の送水システムについても、材質・管渠延長や稼働時間等のデータを収集し、評価対象に含めた。対象とする環境負荷項目は、エネルギー利用や資材等製造に伴うCO₂とし、N₂OやCH₄等の他の温

表-3 広域循環におけるCO₂発生率調査結果

処理方式	規模 (m ³ /日)	稼働率	CO ₂ 発生率 (kg-CO ₂ /m ³)
A 凝集沈殿+生物膜ろ過+オゾン	1600	9%	2.86 (稼働率最大：41% で1.09)
B 凝集沈殿+高速繊維ろ過+オゾン	7200	73%	0.77
C 生物膜ろ過+高速繊維ろ過+オゾン	7900	44%	0.96
D 生物膜ろ過+高速繊維ろ過+オゾン	5000	45%	0.40

表-4 LCA 評価対象建物の再生水利用の概要

循環方式	個別循環の処理方式	延床面積(m ²)・階数	再生水量 (計画) (m ³ /日)	再生水量 (実績) (m ³ /日)	雑用水量 (実績) (m ³ /日)	水使用量 (実績) (m ³ /日)	節水率 (%)	再生水用途
ビルA 広域循環	生物膜ろ過+高速繊維ろ過+オゾン	約1.8万(12階)	170	28.4	28.4	41.2	69%	トイレ洗浄・散水
ビルB 個別循環	回分法+砂ろ過	約9.8万(25階)	205	56	116	276	20%	トイレ洗浄・散水
ビルC 個別循環	加圧浮上+膜分離活性汚泥法	約4.2万(13階)	113	42.3	—	—	—	トイレ洗浄

*土木用語解説：LC-CO₂

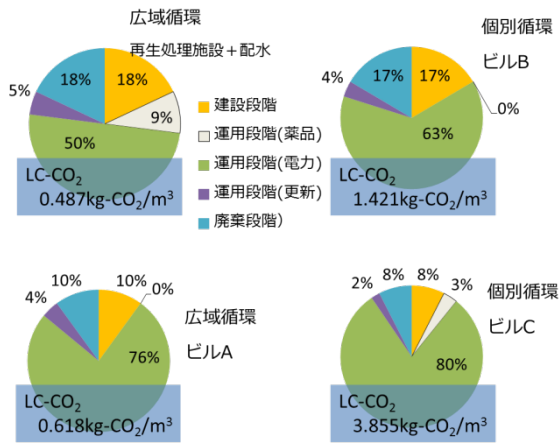


図-2 再生水利用の LC-CO₂ 評価結果

室効果ガスは評価対象外とした。

3.3.2 調査結果

CO₂発生率を整理した結果を図-2に示す。今回の調査では、いずれの施設も、LC-CO₂のうち運用段階の負荷が6~8割程度を占めていた。また、下水再生施設・再生水送水施設とビルAの合計値で示される広域循環のLC-CO₂は1.11 kg-CO₂/m³となり、個別循環（ビルBまたはC）のLC-CO₂および運用段階のCO₂排出量より小さかった。ビルCのLC-CO₂がビルBと比較して大きくなった要因としては、水処理方式と稼働時間の違い、また、ポンプの配置の違いなどがあると考えられる。また、ビル内での送水に伴うCO₂排出量は、再生処理による排出量に比べて多くなる場合もあった。再生水を使用しない場合にはこれと同等のエネルギーが水道水の送水ポンプに加算されるため、この分が再生水利用による環境負荷の増加であるとはいえないが、ビル内では水を上層階に送る必要があるため送水に比較的大きなエネルギーが消費されていることが示唆された。

4. まとめ

CO₂削減効果の定量化方法の提示を目的として、比較対象となる既存の上水道システムからのCO₂発生率の調査、また、再生水利用によるCO₂発生率調査を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 既存の上水道システムのCO₂発生率を試算した結果、全国平均のCO₂発生率は、0.33kg-CO₂/m³であったが、都市間のばらつきが大きかった。
- 2) 広域循環による再生水利用の運転時CO₂発生率を算定したところ、全国の上水道システムからのCO₂発生率平均値より高いが、導入先によっては上水道より有利になる場合があった。
- 3) 広域循環施設と個別循環施設を対象とした再生水利用によるLC-CO₂を試算したところ、広域循環の水再生施設と送水先ビルの合計値は個別循環施設よりも小さくなった。また、ビル内での送水には比較的大きなエネルギーが消費されていた。

今後は流域全体からのCO₂排出量を削減することを目的とした水循環システムの最適化についての調査を実施していく予定である。

なお、上水供給のCO₂発生率調査はCREST領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において「21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で実施している京都大学との共同研究の成果である。

参考文献

- 1) 「再生水利用による地球温暖化の緩和策としての効果の検討について」、国土交通省 <http://www.mlit.go.jp/common/000033103.pdf>, 2012年10月9日閲覧
- 2) 社団法人 日本水道協会、平成20年度 水道統計

宮本綾子*



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水処理研究室研究官
Ayako MIYAMOTO

西村峻介**



滋賀県東北部流域下水道
事務所(前 国土交通省国
土技術政策総合研究所下
水道研究部下水処理研究
室研究官)
Shunsuke NISHIMURA

山縣弘樹***



国土交通省水管理・国土
保全局下水道部下水道事
業課課長補佐(前 国土技
術政策総合研究所下水道
研究部下水処理研究室研
究官)
Hiroki YAMAGATA

小越眞佐司****



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水処理研究室研究官
Masashi OGOSHI