

N-8 下水再生水システムの パフォーマンス評価に関する基礎的研究

○福嶋 俊貴^{1*}

¹メタウォーター株式会社 事業戦略本部技術戦略部 (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25
JR神田万世橋ビル)

* E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp

1. はじめに

平成26年7月に策定された新下水道ビジョン¹⁾では「循環のみち下水道の成熟化」のひとつとして、下水道システムの『水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化』が提唱された。下水道の有する資源・ポテンシャルを最大限活用することで、より一層の効率化、機能の高度化を促進するために、広い意味での水管理システムとして進化させ、下水道が地産地消の地域づくりに貢献することを目標とするとされている。

この中で再生水についても水循環として、再生水と熱の一体的利用によるエネルギー管理や、再生水利用による水輸送エネルギーの抑制等を通じて、低炭素・循環型まちづくりの構築に貢献することを目標とするとされた。しかしながら図1に平成23年度の再生水利用状況を示すが、再生水利用率は約1.3%に過ぎず、近年は横ばいで推移している。用途別にみると修景用水、河川維持用水といった環境用水としての利用が半数以上を占め、次いで都市用水である融雪用水が20%を占めているが海外で多い農業用水は10%未満に留まっている。

一方で、日本は「水の再利用」分野に関するISO/TC282の幹事国となり、SC3；リスクと性能評価(Risk and performance evaluation)を提案している²⁾。

日本における再生水の水質基準としては「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル³⁾」が平成17年に策定され、不特定多数の人が利用する施設に直接供給する場合の水質基準を提示している。(表1)海外における用途と水質基準項目を整理し⁴⁾、表2にまとめた。都市用水や環境用水に加えて、農業用水や工業用水に関する水質基準を設定している国もあり、水質項目ではSSやBODも対象とされている。なお、中国では窒素やリンも水質基準が設定されている。

米国では用途による処理方式が指定されている⁵⁾が、水質とエネルギーを合わせたパフォーマンス評価を実施している例はない。

表1 下水処理水の再利用水質基準

大腸菌	基本用途別	汎用用水	散水用水	修景用水	観水用水
菌数		不検出 ^{注1)}	不検出 ^{注1)}	備考参照 ^{注2)}	不検出 ^{注1)}
濁度		(管理目標値) 2度以下	(管理目標値) 2度以下	(管理目標値) 2度以下	2度以下
pH	再生処理 施設出口	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6
外観		不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
色度		不快でないこと ^{注3)}	不快でないこと ^{注3)}	40度以下 ^{注3)}	10度以下 ^{注3)}
臭気		不快でないこと ^{注3)}	不快でないこと ^{注3)}	不快でないこと ^{注3)}	不快でないこと ^{注3)}
残留塩素	責任 分界点	(管理目標値) 遊離残留塩素 0.1mg/L又は結合 残留塩素 0.4mg/L以上 ^{注4)}	(管理目標値) 遊離残留塩素 0.1mg/L又は結合 残留塩素 0.4mg/L以上 ^{注4)}	備考参照 ^{注2)}	(管理目標値) 遊離残留塩素 0.1mg/L又は結合 残留塩素 0.4mg/L以上 ^{注4)}
施設基準		砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	海軍沙塵→砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること

注1) 検出値は100mLとする(特定浄水処理施設)
 注2) 暫定的に取りまわす(水質基準値1,000CFU/100mL)を採用
 注3) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定
 注4) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて上乗せ基準値を設定
 注5) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて臭気強度を設定
 注6) 供給先で逆浸透膜法を行う場合には個別の指定等に基づくこととしても良い
 注7) 供給先で逆浸透膜法を行う場合には個別の指定等に基づくこととしても良い
 注8) 消毒の残留効力が特に必要ない場合は適用しない
 注9) 生体系保全の観点から塩素消費以外の処理を行う場合があること及び人間が触れることを前提としない利用であった場合は適用しない

表2 各国の再生水用途と水質基準項目

国名	用途	大腸菌	濁度	SS	BOD	窒素	リン
日本	都市用水	○	○	-	-	-	-
	環境用水	○	○	-	-	-	-
	観水用水	○	○	-	-	-	-
米国	都市用水	○	○	-	○	-	-
	農業用水	○	○	△	△	-	-
	工業用水	○	○	-	△	-	-
	環境用水	○	○	-	△	-	-
スペイン	都市用水	○	○	-	○	-	-
	農業用水	○	△	△	△	-	-
	工業用水	△	△	△	△	-	-
オーストラリア	都市用水	○	○	-	○	-	-
	農業用水	○	○	△	△	-	-
	環境用水	○	○	-	△	-	-
	観水用水	○	○	-	○	-	-
中国	都市用水	○	○	○	○	○	○
	農業用水	○	○	○	○	○	○
	工業用水	○	○	○	○	-	-
フランス	農業用水	○	-	-	-	-	-
	環境用水	○	-	-	-	-	-

「よくわかる水リサイクル技術:オーム社」より編集
 ○:必須、△:詳細用途により有、-:無

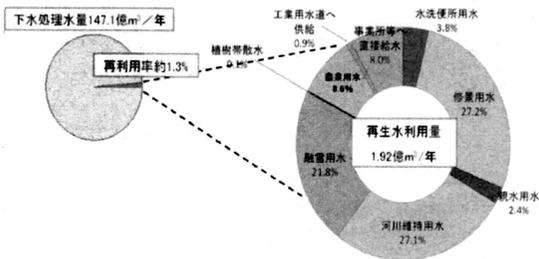


図1 再生水の用途別水量割合 (平成 23 年度)

2. 下水再生水システム

(1) システムフロー

下水再生水のパフォーマンス評価を行うにあたり、国内外の再生水水質基準を参考に以下の4段階の処理レベルを設定した。

- ① レベル1；二次処理
標準活性汚泥法（硝化抑制）＋塩素消毒
- ② レベル2；三次処理
標準活性汚泥法（硝化抑制）＋砂ろ過＋塩素消毒
- ③ レベル3；高度処理
嫌気無酸素好気法（A₂O法）＋砂ろ過＋塩素消毒
- ④ レベル4；再生水処理
嫌気無酸素好気法（A₂O法）＋再生水処理（オゾン＋セラ膜処理）

(2) モデル処理場

48,000m³/日という中規模処理場を対象に下水処理場シミュレータ[®]（PES；Performance Evaluation System）を使用し、再生水水質と使用電力量からパフォーマンス評価を実施した。水処理方式は標準活性汚泥法とし、汚泥処理は分離濃縮－脱水－焼却とし、各方式としては採用実績の多い遠心濃縮・遠心脱水・流動焼却を選定した。流入水質としては平成18年度下水道統計データ⁷から全国分布の中央値として「COD360mg/L, SS160mg/L, T-N35mg/L, T-P4.0mg/L」とした。なお、再生水は流入水の10%にあたる4,800m³/日製造するものとした。

3. 下水再生水システムのパフォーマンス評価

各レベルの再生水水質の計算結果を図2に示す。レベル1の二次処理では有機物であるCODは除去されていたがSS・T-N・T-Pは比較的残存していた。レベル2の三次処理では追加処理の砂ろ過によりSSが1.4mg/Lまで除去されていた。（窒素・リンは大部分が溶存態のため、ほとんど変化がない）レベル3の高度処理（A₂O法）ではT-N12.5mg/L, T-P0.5mg/Lと窒素・リンも良好に除去されていた。レベル4の再生水処理では凝集剤も併用のためSSとT-Pがさらに良好に除去されていた。

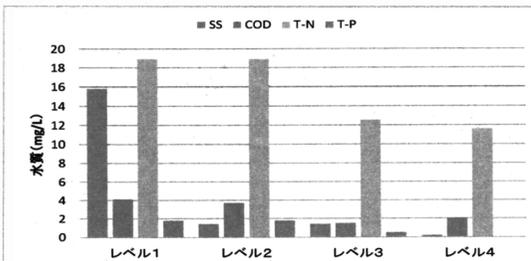


図2 再生水水質

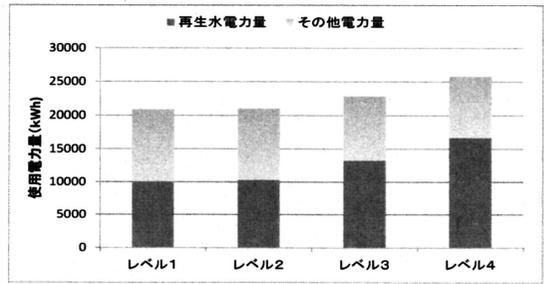


図3 使用電力量

同様に各レベルの使用電力量の計算結果を再生水電力量（汚水ポンプ＋水処理＋送風機＋再生水）とその他電力量（濃縮＋脱水＋焼却）とに分けて図3に示す。レベル1の処理場全体で20,820kWh（電力原単位；0.43kWh/m³）が高度処理を導入したレベル3では22,870kWh、再生水処理を導入したレベル4では25,830kWhと増大していた。特に再生水電力量の増加が大きく、レベル3では1.3倍にレベル4では1.7倍となっていた。高度処理の導入により有機物が嫌氣的に利用されるため、処理すべき汚泥量が減少し、その他電力量はむしろ減少するとの計算結果となった。

再生水水質と使用電力量を総合評価するために、再生水の利用先での溶存酸素消費量を環境への影響（環境負荷量）と考え、再生水に残存しているCOD・T-N・T-Pを換算係数[®]を使用してCODに統一して計算し、環境負荷残存量とした。（換算係数 T-N;19.7, T-P;142.5）

環境負荷残存量と再生水電力原単位と併せて図4に示す。レベル1・2の環境負荷残存量約30,000kgをレベル3では約15,000kgまで低下させるために電力原単位は0.07kWh/m³増加していた。

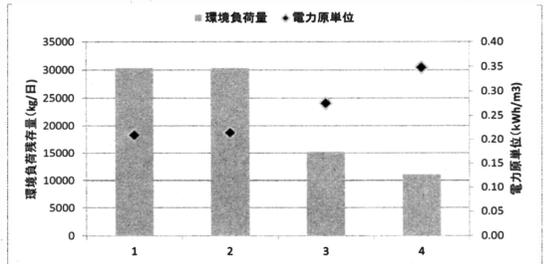


図4 環境負荷残存量と電力原単位

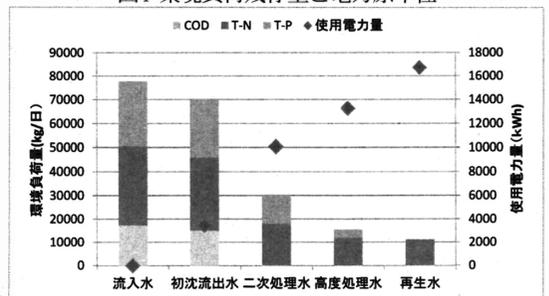


図5 再生水レベルと環境負荷残存量の変化

さらに、再生水レベルの向上に伴う環境負荷量と使用電力量の関係を図5に示す。流入水中に存在する78,000kgの環境負荷量が初沈では固形物が沈殿除去されることにより70,000kgへ若干低下し、活性汚泥法の反応タンクで有機物が分解されることにより二次処理水では30,000kgと60%以上が除去され、このために10,100kWhの電力が使用されていた。(溶解性の窒素・リンはほとんど除去されていない)高度処理水ではA₂O法により窒素・リンが除去されるため、環境負荷量は15,000kgとさらに半減していた。(使用電力量は13,280kWhまで増加)今回の再生水処理は臭気や色度除去を目的としているため環境負荷量の削減効果は小さく、11,000kgまでしか低下していなかった。(使用電力量は16,740kWhまでさらに増加)

再生水の用途により要求される再生水の水質レベルは異なり、電力使用量(エネルギー消費)も考慮にいれ、用途に応じた再生水の水質レベルを選択することが重要であると考えられる。一方、農業用水として利用する場合には窒素・リンは肥料効果も期待できる⁹ため、栄養塩類の季節的な能動的管理¹⁰も含めて別な観点からの評価(栄養塩類を保持するような処理)も必要と思われる。

検討した処理レベル2・3・4に対して、いくつかの施策の効果を図6に示す。レベル2(◆)に対しては同時凝集法によるリン除去を導入することにより、ほぼ同じ使用電力量で環境負荷量を21,000kgまで30%低減できる。レベル3(■)に対して季節的な能動的管理として冬場のノリ養殖のために窒素を供給することを目的に循環水を停止した場合には放流水T-Nが19.0mg/Lまで上昇し(環境負荷量は22,000kgまで増加)、使用電力量は12,280kWhまで低下する。レベル4(▲)に対して下水処理場全体での有機物の流れを変更するために、初沈に替り高効率固液分離¹⁰を導入すると有機物が反応タンクで好氣的に分解される量が減少し(余剰汚泥量も減少)、同じ再生水処理レベルを維持しながら使用電力量は15,260kWhと9%削減できると試算された。

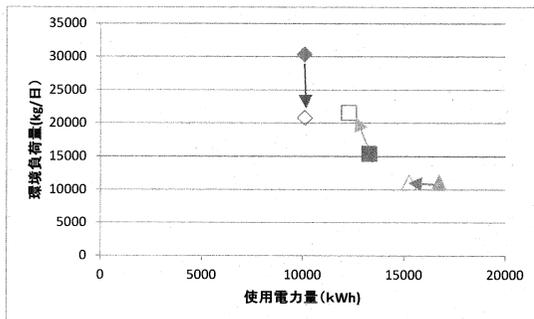


図6 各種施策の効果

4. おわりに

下水再生水システムを「再生水水質と使用電力量」からパフォーマンス評価として4つの再生水レベルを想定して実施した。得られた結果は以下のようである。

- ① 再生水水質としては、レベル1の二次処理では有機物であるCODは除去されていたがSS・T-N・T-Pは比較的残存していた。高度処理も導入したレベル3・4ではT-N・T-Pも良好に除去されていた。
- ② 使用電力量としては、レベル1の処理場全体で20,820kWh(電力原単位; 0.43kWh/m³)が高度処理を導入したレベル3では22,870kWh、再生水処理を導入したレベル4では25,830kWhと増大していた。特に再生水電力量の増加が大きかった。
- ③ 再生水に残存しているCOD・T-N・T-Pを環境負荷量に換算し、再生水電力原単位と併せて評価したところ、レベル1・2の環境負荷量約30,000kgをレベル3の高度処理では約15,000kgまで半減させるために電力原単位は0.07kWh/m³増加していた。
- ④ 流入水中に存在する78,000kgの環境負荷量が初沈では70,000kgへ若干低下し、二次処理水では30,000kgと60%以上が除去され、高度処理水ではA₂O法により窒素・リンが除去され、環境負荷量は15,000kgとさらに半減していた。

参考文献

- 1) 国土交通省下水道部・日本下水道協会; 下水道政策研究委員会報告書、新下水道ビジョン、平成26年7月
- 2) 造水促進センター; 造水技術ハンドブック<追補版>、平成26年4月
- 3) 国土交通省下水道部・国土技術政策総合研究所; 下水処理水の再利用水質基準等マニュアル、平成17年4月
- 4) 藤江幸一 [編著]; よくわかる水リサイクル技術、オーム社、平成24年
- 5) 大垣眞一郎 [監訳委員長]; 水再生利用学、技報堂出版、2010年
- 6) 福嶋俊貴・宗宮功; 下水処理場の流域における水・物質・エネルギー循環拠点化に関する研究、土木学会論文集G(環境)、Vol. 69, No. 7, III, 445-III, 451, 2013
- 7) 日本下水道協会; 平成18年度下水道統計、2006
- 8) 石田整, 花木啓祐, 荒巻俊也; 東京湾流域の下水処理場への排出権取引制度導入効果の推定、土木学会論文集No.804/VII, 37 pp73-81, 2005
- 9) 重松賢行・吉田綾子・山下尚之・田中宏明; 下水再生水の畑地灌漑利用における土壌及び水環境に及ぼす影響、環境工学研究論文集、Vol. 44, 2007
- 10) 国土技術政策総合研究所下水道研究部; B-DASHホームページ、平成26年9月アクセス

<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>