

3-1-6 臭化ナトリウムをトレーサー物質とした

汚泥処理返流水の影響評価による運転の工夫

西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター 中村 浩一郎
(現 三河島水再生センター)

佐藤 杏奈
山本 崇人
庄司 亮
舛田 昌司
玉本 博之

1. はじめに

みやぎ水再生センター（以下、当センター）は、東西二つの水処理系列（処理能力 35 万 m³/日）及び汚泥処理施設を有している。東京都では、汚泥処理の更なる効率化に向けた取組を進めており、当センターにおいても他センターからの受泥の一部処理を平成 30 年度に開始した。

この結果、汚泥処理返流水（以下、返流水）の影響を受け易いとされている東施設では、放流水りん濃度と PAC 使用量が増加するなど、不安定なりん処理が常態化した（図 1、図 2）。令和元年度には東施設のりん処理が更に不安定となり（図 1、点線）、早急なりん対策が必要となった。

速やかな運転改善を図る上で、短期間かつ定量的な返流水の影響評価が必要であったことから、今回、当センターで速やかに分析が行えるトレーサー試験の検討を行った。東西処理系列への返流水の分配割合、反応槽の滞留時間と短絡の大きさ等を調査し、運転の改善に資することとした。

今回の東施設における返流水りん対策に向けて実施した、新たなトレーサー試験による調査内容とこの結果を踏まえた運転改善の取組について報告する。

2. 本調査の概要

2.1 トレーサー物質の選定

今回トレーサー物質に選定した臭化ナトリウムは、青色 1 号や塩化リチウムなどのトレーサー物質として使用実績のある薬品と比較して表 1 に示すような長所があり、当センター水質試験室のイオンクロマトグラフィー（以下、IC）を使用することで分析できる等の

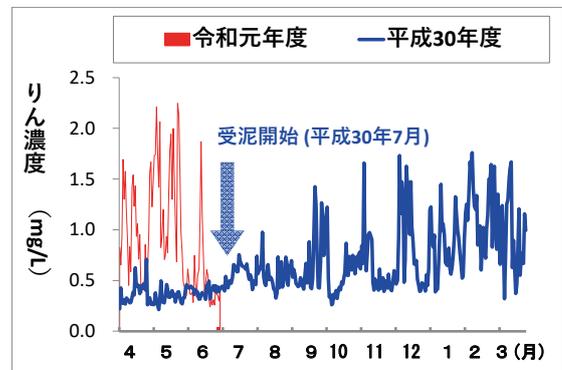


図 1 東放流水の全りん濃度の推移
(令和元年 6 月時点)

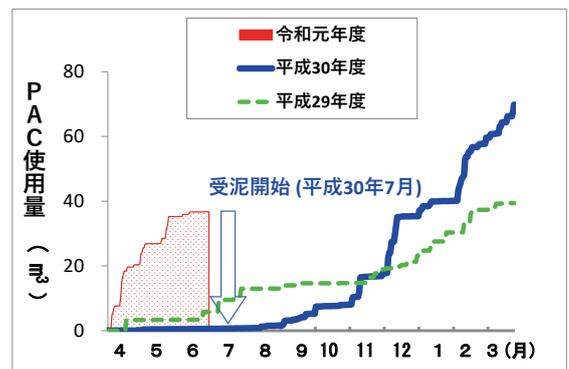


図 2 東施設の PAC 使用量（累積値）
(令和元年 6 月時点)

理由から、その利点を重視し選定した。

臭化ナトリウムの検量線の作成、下水試料における添加回収試験によるトレーサーとしての有用性を確認した上で、返流水の「流動調査」と反応タンクの「混合特性調査」を実施した。

2.2 臭化物イオンの分析と精度

2.2.1 使用薬品

①IC用陰イオン混合標準液 50mL

(F⁻5mg/L、Cl⁻10mg/L、NO₂⁻15mg/L、Br⁻10mg/L、NO₃⁻30mg/L、PO₄³⁻30mg/L、SO₄²⁻40mg/L)

②臭化ナトリウム (内容量 500g) 8~10 本/回

2.2.2 臭化物イオン分析の主な設定

ICはDIONEX社製ICS-2100を使用した(みやぎ水再生センター水質試験室に常設)。図3に示すように、Br⁻濃度ピークとNO₃⁻濃度ピークは接近しているため、濃度ピークの分離性に優れた装置・処理メソッドであるAS11HCを使用した。なお、定量下限値の向上を目的としてBr⁻濃度を小数2桁まで検出できるよう、ピーク検出・最小面積を0.0010【signal*min】とした。

2.2.3 臭化物イオン分析の検量線

IC用陰イオン混合標準液を用い、濃度が異なる5点の検量線を作成した。必要に応じ、当標準液を段階的に希釈し調製した。各濃度は3回ずつ測定を行い、繰り返し精度の確認を行った。

この結果を図4に示す。相関係数R²は1に近く、y切片は概ね0でありICによる臭化物イオン分析の検量線は、濃度0.1~10.0mg/Lの範囲において直線性であることを確認した。

表1 各トレーサー物質の長所と短所

臭化ナトリウム	○ イオンクロマトグラフィーで簡単に分析 ○ 水溶液は無色なため、放流水等は着色しない
青色1号	△ 分光光度計で分析可能(前処理操作が煩雑) × 使用用途次第では放流水への着色の懸念
塩化リチウム	× 水再生センターでは分析装置が無い ○ 水溶液は無色なため、放流水等は着色しない

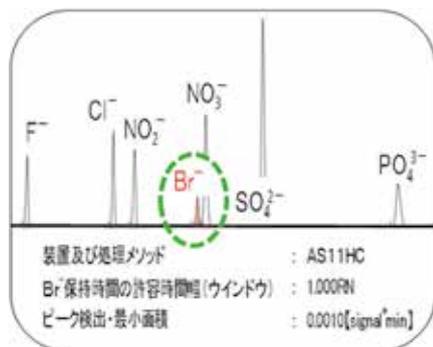


図3 陰イオン混合標準液のクロマトグラムとICの設定条件

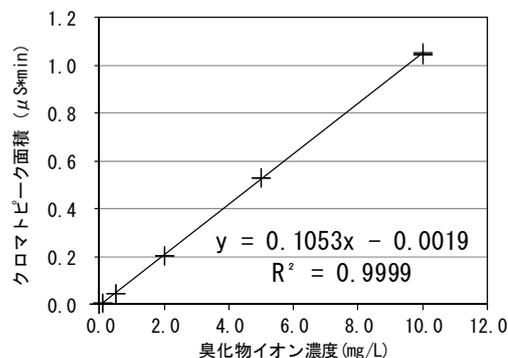


図4 ICによる臭化物イオンの検量線

2.2.4 実試料における臭化物イオンの添加回収試験

下水中の妨害物質の影響により臭化物イオンの検出濃度が変化せず、精度良く分析できることを確認するため、臭化物イオンの添加回収試験を行った。操作は次の通りである。

- (1) 恒量にした臭化ナトリウム 1.29g を水に溶かして 1L とした。これを 10 倍希釈し、臭化物イオン 100mg/L 溶液を作成した。次に、臭化物イオン 100mg/L 溶液 10mL を取り、各検体で 100mL とした。

- (2) 純水以外の検体は、孔径 $0.22\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過を行った。また、純水以外の検体は、ブランク補正を行った。
- (3) 実機の反応時間に配慮し、東反応タンク混合液は臭化物イオンと12時間接触させた。その他の検体は、臭化物イオンと1時間接触させた。

表 2 下水試料を用いた添加回収試験結果

	臭化物イオン 添加相当量 (mg/L)	平均値 (3回) (mg/L)	繰返し 精度	回収率 (%)
一沈流入水	10.3	10.2	良	98
活性汚泥混合液	10.3	10.3	良	100
返流水	10.3	10.3	良	100

2.2.5 実試料における臭化物イオンの添加回収試験

各下水試料について3回測定を行ったところ、一沈流入水、活性汚泥混合液、返流水において繰返し精度と回収率は良好であった(表2)。この結果を踏まえ、実際の現場調査において、返流水の流動調査、及び反応槽の混合特性調査を実施した。

2.3 返流水の「流動調査」

返流水の流入経路は、図5に示すように石神井幹線から高段沈砂池へ流入し吐出槽に送水された後、分水槽を經由し東西施設の一沈入口に流入する施設構造となっている。返流水は、分水槽と汚水ポンプの位置関係から全量が東施設に分配されると長年に渡り考えられていた(図5、点線)。

今回、トレーサー調査により、臭化ナトリウムを総合返水槽に投入し、その後の返流水の東・西施設への分配比率を求めた。実際の運転条件(揚水量)を踏まえて、表3の条件下で調査を繰り返した。

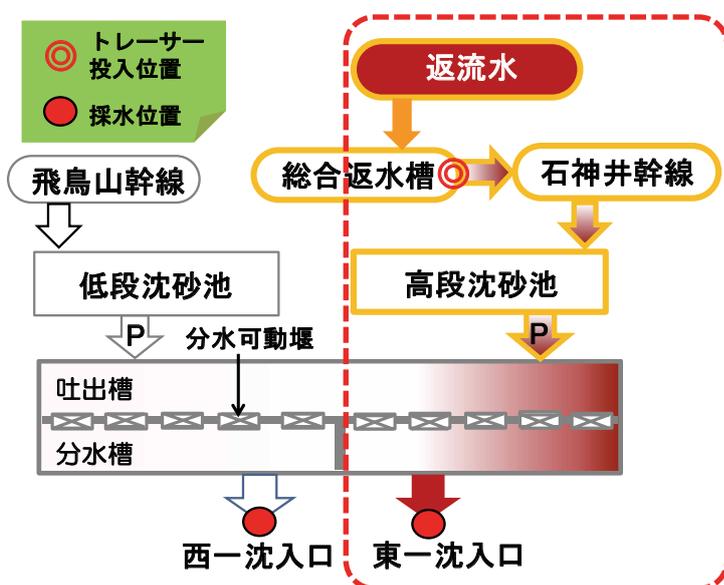


図 5 返流水の東西施設への分配イメージ図

表 3 流動調査時の汚水ポンプ
運転条件と揚水量割合

運転 条件	揚水量の比率	
	高段沈砂池 : 低段沈砂池	
①	2	1
②	1	1
③	1	2

2.4 東西反応槽の「混合特性調査」

東反応槽は深槽・片側旋回流方式であり、A回路からD回路まで各回路間に隔壁がある。3つの隔壁により東反応槽は4区画に仕切られている。西反応槽は浅槽・全面ばっ気式で各回路は蛇行しているものの、東施設と異なり各回路間の隔壁は無い。この施設的特点の違いにより、東西反応槽の混合特性にどの程度差が見られるかを調査し、りん処理の安定化に資するデータを収集することとした。

りん処理の安定化を向上させるためには、処理時間や処理効率に影響を及ぼす反応槽内の混合特性（実際の滞留時間、短絡の大きさ等）を把握する必要がある。本調査では、東及び西反応槽の入口に臭化ナトリウムを投入し、最終回路出口で自動採水器を用いて15分間隔で採水し、臭化ナトリウム濃度の経時変化を測定した。投入量は、希釈後の濃度から必要量を算出し4～5 kgとした。

3. 結果及び考察

3.1 返流水の流動調査結果

流動調査結果の一例を図6～図8に示す。東一沈入口で採水した濃度ピークに加えて、西一沈入口でも明瞭なピークが確認でき、東施設だけでなく西施設にも返流水が分配されていることが分かった。また、運転条件によって東西施設の分配比率が異なっており、高段沈砂池と低段沈砂池の揚水割合（表3、運転条件①～③）とトレーサー調査結果を相関図で整理すると、図9に示すように直線性のある回帰式が得られた。

令和元年5月における時間毎の高段沈砂池揚水比率と図9に示した回帰式から、返流水の東西施設への1日を通じた分配比率の日変化を求めた。その結果、1日を通して東施設へは70～80%程度、西施設へは20～30%程度の割合で分配されていることが判明した（図10）。

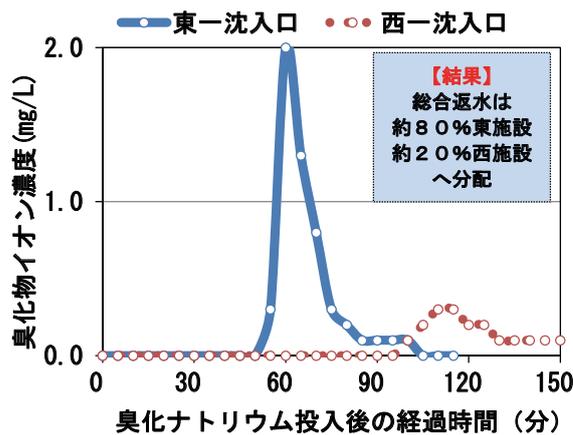


図6 条件①の返流水の分配比率

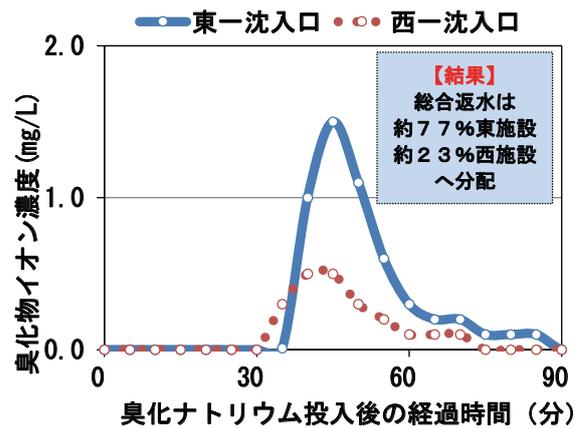


図7 条件②の返流水の分配比率

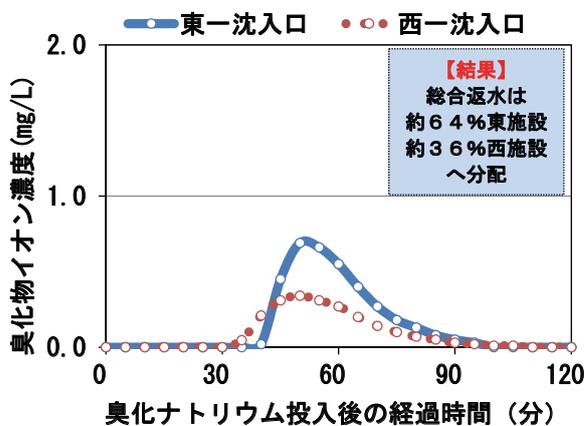


図8 条件③の返流水の分配比率

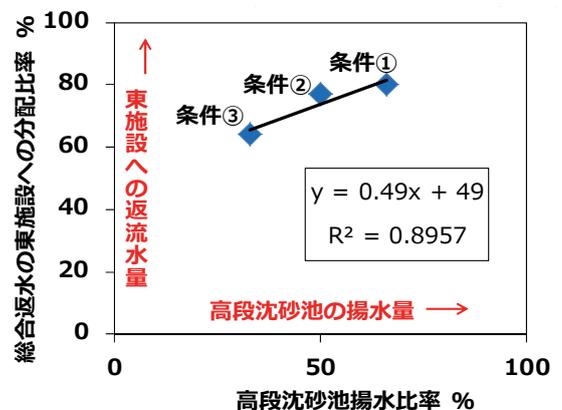


図9 運転条件①～③における回帰式

これまで、西施設では返流水の影響は極めて小さく、返流水のほぼ全量が東施設に流入しているものとして運転調整を図ってきたが、実際には当初想定していた以上の20～30%程度の返流水が分配されていることが明らかとなった。

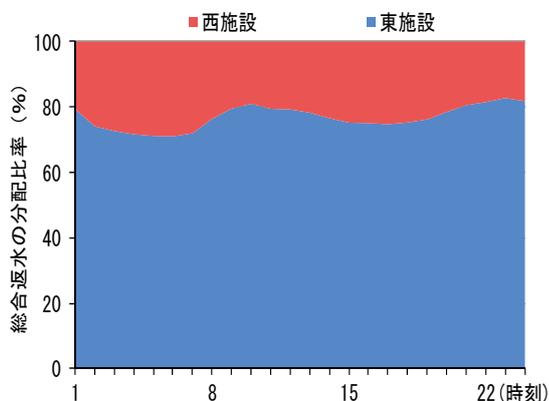


図 10 返流水の1日を通した分配比率

表 4 従来（想定）と本調査結果の返流水分配比率

	返流水の分配比率	
	東反応槽	西反応槽
従来の想定	概ね 100%	0%
本調査結果	70～80%	20～30%

3.2 反応槽の混合特性調査結果

3.2.1 東西反応槽の滞留時間（理論滞留時間との比較）

反応槽入口で臭化ナトリウムを投入後、反応槽D回路出口において15分間隔で測定したトレーサー試験の結果は、「下水試験方法・反応タンクの混合特性試験」に基づいて解析を行った。

図 11 に示す通り、理論滞留時間と今回実測した濃度ピーク時間を比較した。東反応槽では臭化物イオンの濃度ピーク時間 t は 3.7 時間、理論滞留時間 T は 4.4 時間であるのに対し、西反応槽では 4.1 時間と 6.5 時間となり西反応槽では実測の濃度ピークは理論滞留時間より 2.4 時間も早く表れており（図 11 右図矢印）、東反応槽よりも短絡が多く偏流が発生している可能性がある」と推察できた。

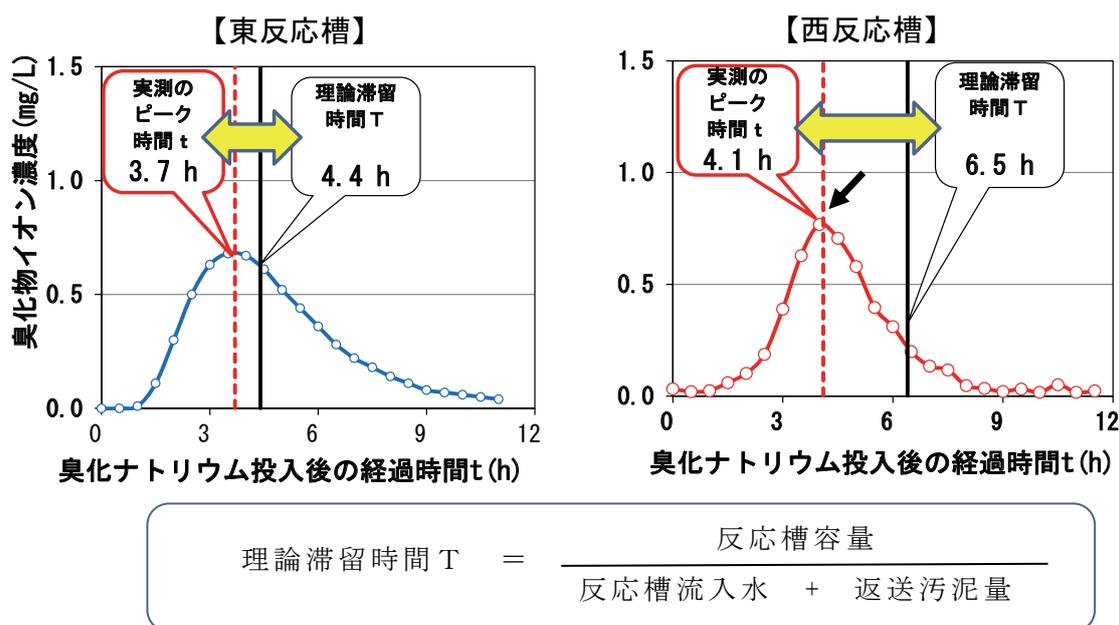


図 11 反応槽出口の臭化物イオン濃度と理論滞留時間の比較
(左：東反応槽、右：西反応槽)

3.2.2 東西反応槽の混合特性（短絡の評価）

① 混合の程度

図 11 で示した実測のピーク時間と理論滞留時間から東西反応槽の「混合の程度 N」を下式により算出した。この結果、東反応槽は N = 6、西反応槽は N = 3 となり東反応槽の方が西反応槽よりも N 値が高く「押し出し流れ」の傾向が高いことが分かった。西反応槽は「混合の程度」が N = 3 と数値が小さく、完全混合の傾向（A 回路から D 回路まで拡散混合し易い）があることが分かった。

$$\text{混合の程度 } N^{*1} = \frac{\text{理論滞留時間 } T}{\text{理論滞留時間 } T - \text{ピーク時間 } t}$$

② 短絡の量

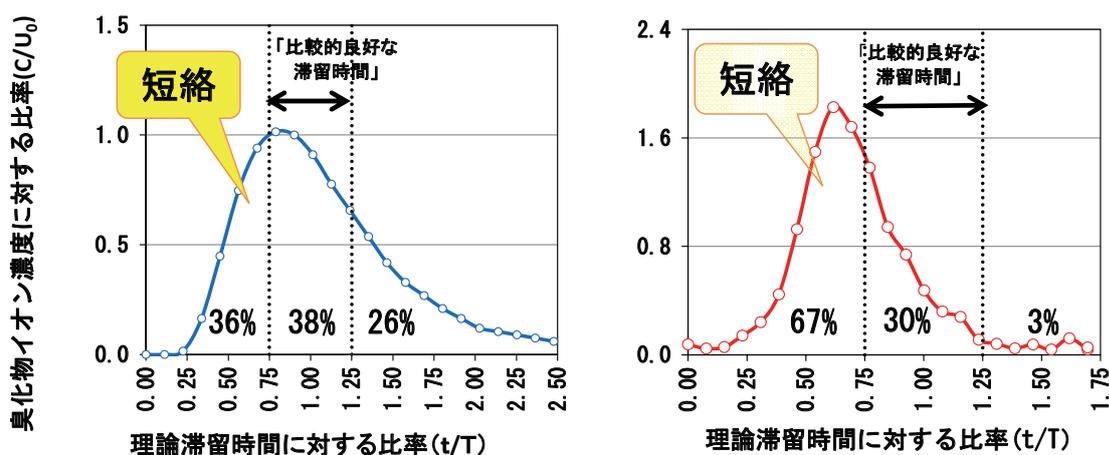
短絡の大きさを評価するため今回実施したトレーサー試験の結果から、図 12 に示すとおり臭化物イオン濃度の流過曲線を作成した。この図で示した理論滞留時間を 1.00 としたとき 0.75 から 1.25 の範囲で評価する「比較的良好な滞留時間^{*2}」の相を算出すると東施設で全体の約 38%、西施設は約 30% で同程度であった。

しかし滞留時間の短い 0.75 以下の相では、東反応槽で約 36% あるのに対し、西反応槽では約 67% と東反応槽の約 2 倍にまで増加していることが推察された。このことから、西反応槽では大半の水量が理論滞留時間に達するよりも前に反応槽を通過していることが感がられた。

東反応槽は、「混合の程度 N」が少なく押し出し流れの傾向があり、短絡が少ないものと推測できる。これは、東反応槽が隔壁により 4 区画に仕切られているため短絡が少なく、東反応槽は西反応槽と比べて、臭化物イオン濃度の実測ピーク時間と理論滞留時間との時間差が少なかったと思われる（図 11）。

※1：「混合の程度 N」とは、反応槽内が等容量の N 個の完全混合槽の直列群でできているとし、混合の程度を N 値で表す。N=1 で完全混合とし、N→∞ となれば押し出し流れになる

※2：「比較的良好な滞留時間」：下水試験方法・反応タンクの混合特性試験・データの解析例に記載された比較的良好な時間帯とする範囲



- C : 反応槽出口の臭化物イオン濃度 (mg/L)
- U0 : 平均臭化物イオン濃度 (mg/L)
- t : 経過時間 (時間)
- T : 理論滞留時間 (時間)

図 12 東西反応槽出口の流過曲線

③ 東西反応槽の混合特性比較

今回の調査により得られた返流水の分配比率と反応槽の混合特性を表5に整理した。りん処理を安定化させる上では、水量変動が大きい時間帯においても十分な好気処理に要する処理時間を確保しておく必要がある。西反応槽では今回の調査により、当初想定していなかった短絡が大きく発生しており、朝方など水量が急増する時間帯ではりん処理の好気処理時間が不足する可能性が考えられた。

東反応槽では、反応槽各回路に設置されている隔壁の効果により押し流れの傾向が強くなり短絡の量も小さいことから、りん処理の安定化にはAO運転に準じた好気条件の確保で対応できるものと判断できた。

表5 東西反応槽の返流水分配比率と混合特性の比較

		東反応槽	西反応槽
隔壁数 (A~D回路)		3	0
反応槽 混合特性 調査	混合の程度N	6	3
	混合の特性	押し流れ傾向	完全混合傾向
	短絡の量	少ない (全体の36%)	多い (全体の67%)
返流水 流動調査	返流水の 分配比率	70~80%	20~30%

4. 安定したりん処理に向けた運転改善

みやぎ水再生センターでは、返流水のりん負荷増加への対応を図るのみならず、二軸管理による水質の向上と省エネルギーの両立を目指し、窒素処理の向上(脱窒促進)にも取り組んでおり、反応槽前段と中間部に制限ばっ気を設けている(疑似AOAO運転)。

しかし、りん処理を安定化させる上では、十分な好気条件(DO確保)を常に確保することが必要であることから、この中間的な運転条件を新たに構築することとした。

本調査により、東西施設への返流水の負荷割合が定量的に評価できたこと、更に東西反応槽の短絡の大きさも確認できたことでりん処理を安定化させる上で必要な東西反応槽の好気条件の確保を以下の通り変更した(図13)。

- (1) 東反応槽：令和元年度当初、東放流水りん濃度が著しく増加していたため(図1)、4槽のうちりん処理に有効なAO運転を3槽以上切り替える予定であった。しかし、本調査結果を踏まえ、返流水の分配が当初想定した分配比率100%ではなく70~80%に留まっていたこと、短絡の量も全体の4割以下に留まっていたことから、AO運転への切替えは4槽中2槽までとした。他2槽は中間制限ばっ気による窒素処理の向上を引き続き維持する対応を図った。

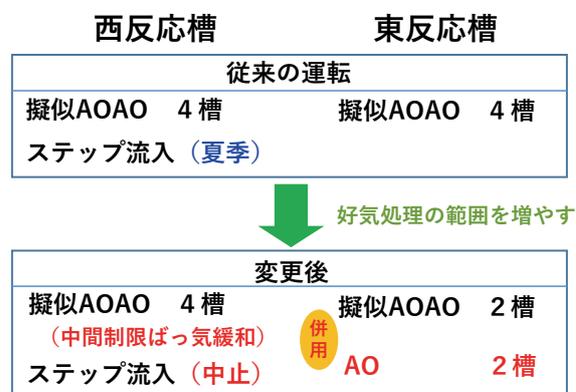


図13 東西反応槽の運転方法の変更内容

(2) 西反応槽：返流水の流入割合が 20～30%程度と従来想定していなかった返流水の負荷が大きく発生していたこと、さらに短絡の量も東反応槽よりも大きいことが判明したことから、安定したりん処理の改善を目的とした運転条件の改善を図った。ただし、東施設ほどの返流水の影響までには至らないことから、好気条件の一部向上を図り、C回路入口からのステップ流入の中止をした。また、中間制限曝気による低 DO 運転を行っていた C回路での DO 設定を上げる対応に留めた（図 13）。

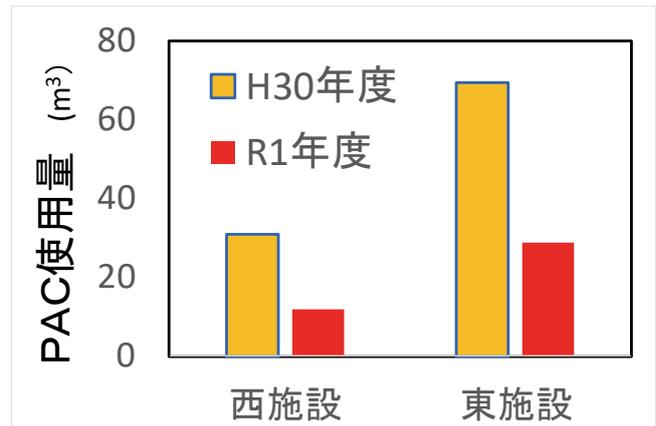


図 14 運転改善による PAC 使用量の削減効果 (7月～3月)

上記運転条件の変更を令和元年 7月に実施したところ、放流水りん濃度の増加が抑制され、低水温期の 11月以降においても安定したりん処理を維持することが可能となった。この結果、平成 30年 7月に落合受泥を一部開始して以降増加傾向となっていた PAC 使用量の抑制を図るに至った（図 14）。

本調査により、返流水の影響評価を行うことが可能となったことから、今後も受泥の増量状況に応じて運転方法の見直しを図っていく考えである。

5. まとめ

- (1) 臭化ナトリウムの下水試料（一沈流入水、活性汚泥混合液、返流水）への添加・回収試験では、98%～100%の回収率が得られ、本調査へのトレーサー物質としての有効性が確認できた。
- (2) 返流水の分配比率がこれまで「概ね 100%」と想定し運転調整を行ってきた。しかし、東施設では、本調査により分配率が「70～80%」であることが判明した。逆に西施設では返流水の分配比率が「20～30%」となり、りん処理安定化に向けた新たな対応も必要であることが判明した。
- (3) 東西施設の反応槽の混合特性調査により、短絡の大きさは東施設で約 4割、西施設で約 7割となり、西施設反応槽の短絡の発生が著しいことが確認できた。
- (4) 今回のトレーサー調査結果を踏まえた運転改善により（東施設：疑似 AOA0 運転と AO 運転の併用、西施設：中間制限曝気緩和＋ステップ流入中止）、りん処理の安定性が向上したことで、落合受泥の一部再開に伴うりん負荷の増加により急増した PAC 使用量の増加抑制が図れた。

参考文献

- 1) 宅間大吉ら（2019）「臭化カリウムを使ったトレーサーの開発」, 第 56 回下水道研究発表会論文集, 日本下水道協会
- 2) 日本下水道協会編（2012）「下水試験方法 2012 年度版」, 第 2 章 第 2 節 反応タンクの混合特性試験, 日本下水道協会