

2-2-6 東陽Ⅲ系における硝化液循環ポンプの運用について

東部第一下水道事務所 砂町水再生センター
○有野貴、福田宗昭、石田宏一、小谷野正雄、
高山恒一、島田祐介、六川正文、松井駿佑

1. はじめに

硝化液循環の効果は、一般的に無酸素槽における硝化液の脱窒作用による窒素除去率の向上と、NO_x態窒素の脱窒による曝気風量削減効果も期待できるとされている¹⁾。

しかし、硝化液循環ポンプを稼働させると、使用電力量が増加する。そのため、脱窒による水質改善と酸素回収による送風機の削減電力量と硝化液循環による使用電力量の関係を明らかにし、水質改善と省エネルギーの両立をしていく必要がある。

これまで、同時期に同一形状施設における硝化液循環による水質改善と省エネルギーの関係性について知見は報告されていない。

そこで、平成26年度4月より2か月間、砂町水再生センター（以下、「当センター」という。）では東陽Ⅲ系9号槽（処理能力30,000 m³/日×2槽 ステップA₂O施設）において、硝化液循環ポンプの運用による水処理への影響及び水処理電力量の比較調査を行い、水質改善と省エネルギーの両立運転についての知見を得たので報告する。

2. 調査方法

2.1 調査対象施設

調査にはステップA₂O法の東陽Ⅲ系9-1号槽と9-2号槽を用いた（図1）。東陽Ⅲ系は同形状の反応槽2槽から構成され、処理水量は定量制御で運転している。さらに、インバータ式の小型個別送風機を採用しているため、他系列の影響を受けないことや電力計測器が設置されているため、使用電力量の変動を詳細に計測できるといった利点があり、本調査において使用電力量の詳細な把握が可能であった。

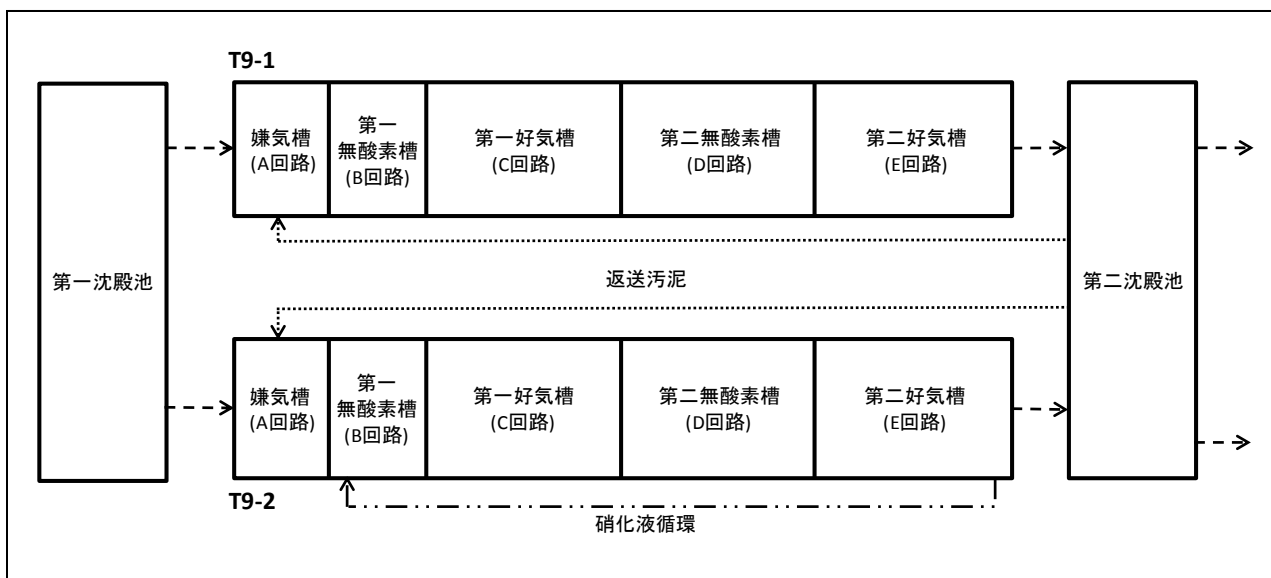


図1 東陽Ⅲ系水処理系統図

2.2 調査条件

硝化液循環ポンプを停止した 9-1 号槽を対照系とし、一方、実験槽とした 9-2 号槽は硝化液循環量 600m³/h で硝化液循環を行い、これ以外の条件（表 1）については同一として比較を行った。なお、調査期間中はステップ流入を実施していない。

表 1 運転条件

項目	硝化液循環なし(T9-1)	硝化液循環あり(T9-2)
水量	1,250 m ³ /h	
MLSS	約 1,300 mg/L	
返送汚泥量	550 m ³ /h	
硝化液循環量	0 m ³ /h	600 m ³ /h (簡易放流中は停止)
汚泥処理返流水	500 m ³ /h	

2.3 調査内容

(1) 脱窒状況調査

硝化液循環による脱窒状況を確認するため、両槽の反応槽流出水の溶解性全窒素濃度(以下、s-TN)を分析し、窒素除去率を算出し硝化液循環による窒素除去率の向上状況を明らかにした。

(2) 水処理電力使用量調査

硝化液循環による水処理電力使用量への影響を検証するため、水処理電力使用量として東陽Ⅲ系 9 号槽個別送風機、返送汚泥ポンプ、硝化液循環ポンプ及びかく拌機の電力使用量の和を求め、削減電力使用量を明らかにした。

3. 調査結果

3.1 脱窒状況調査の結果

調査開始に当たり、対照槽と実験槽を同一条件で運転し、同一の処理性能を有することを確認した。その結果、両槽の処理性能の差はおおむね 1%以内に収まり、同一の処理性能を有することが確認できた（表 2）。

(※期間：平成 26 年 6～8 月 両系列ともに硝化液循環を行い、ステップ流入は実施せず)

表 2 両槽の処理性能(期間平均)

	対照槽	実験槽
処理水量 (m ³ /h)	1,168	1,180
送風量 (Nm ³ /h)	2,674	2,706
送風倍率(-)	2.29	2.30
送風機電力使用量(kWh)	92.1	93.0
水処理電力使用量(kWh)	121.8	122.7
処理水 s-TN (mg/L)	7.8	7.7

次に、表 1 に示した運転条件で硝化液循環ポンプの稼働の有無による窒素処理の状況及び水処理電力使用量を調査した。

この調査期間を通じて、実験槽の s-TN 濃度は対照槽の s-TN 濃度を下回り、実験槽の窒素除去率は常に高く推移し(図 2、図 3)、全期間平均値で対照槽 10.8 mg/L、実験槽 8.3 mg/L となり、実験槽が 2.5 mg/L 低く、窒素除去率は全期間平均値で 10%向上した（表 3）。

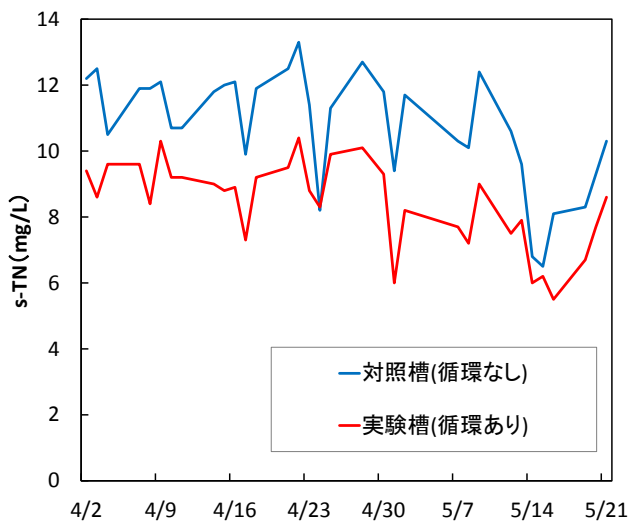


図 2 処理水全窒素濃度の経日変化

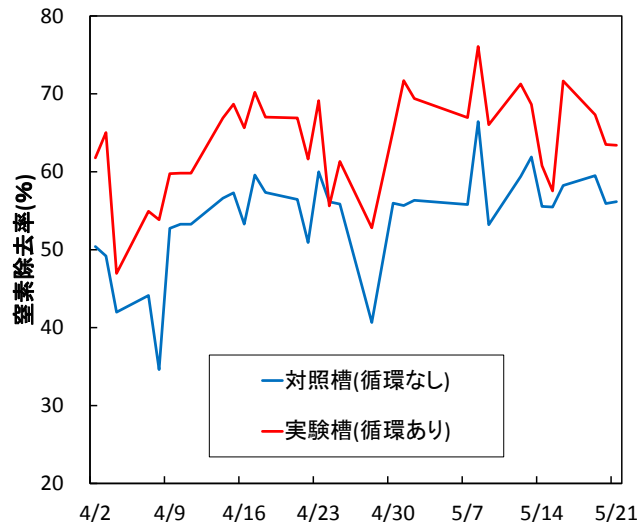


図 3 窒素除去率の経日変化

表 3 処理水質一覧(期間平均)

	対照槽	実験槽
NO ₃ -N (mg/L)	8.7	6.2
s-TN (mg/L)	10.8	8.3
窒素除去率 (%)	54.9	64.9

3.2 水処理電力使用量調査の結果

本調査では、先に述べた通り、送風機、返送汚泥ポンプ、硝化液循環ポンプ及びかく拌機の電力使用量の和を水処理電力使用量と定義した。さらに、水処理電力量の比較を容易にするため、反応槽内の溶存酸素濃度（以下、「DO」という。）を一定にし、硝化液循環量と返送汚泥量は一定量とした。調査期間の水処理電力使用量の経日変化を図 4 に示す。

調査期間を通じて対照槽に比べ実験槽の水処理電力量は低く推移しており硝化液循環運転による水処理電力使用量削減効果が示された(図 4)。

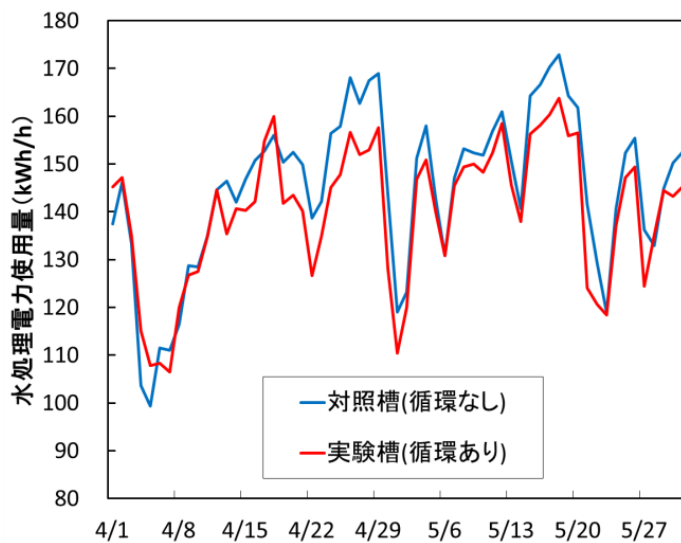


図 4 水処理電力使用量の経日変化

調査期間の水処理電力量差の平均値は 5.1kWh となり、硝化液循環を行うことで水処理電力量の 3.4%を削減することができた（表 4、図 5）。

表 4 水処理電力使用量内訳

電力使用量(kWh)	対照槽	実験槽
送風機	128.4	114.8
硝化液循環ポンプ	0.0	8.5
返送汚泥ポンプ	19.5	19.5
かく拌機	1.0	1.0
水処理電力使用量	148.9	143.8

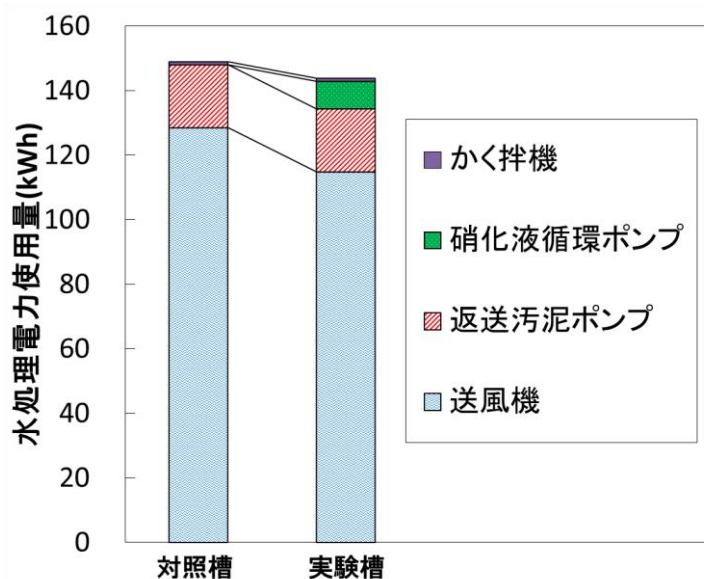


図 5 各処理系の水処理電力量内訳

4. 考察

4.1 窒素除去の効率について

本調査により、硝化液循環を行うことで、窒素除去率が向上するとともに水処理電力使用量は低減することが分かった。

そこで、単位時間当たりの水処理電力使用量[kWh/h]が除去する窒素量[kg-N]（以下、「窒素除去効率」という。）を算出し、窒素除去効率について硝化液循環の効果を考察する。窒素除去効率[kg-N / kWh]として式①を定義して算出した。

$$Eff_{R-N} [kg - N / kWh] = \frac{(Q_i - Q_o)}{P} \dots \text{①}$$

Eff_{R-N} : 窒素除去効率 [kg-N / kWh]
 P : 単位水処理電力使用量 [kWh/h]
 Q_i : 流入窒素負荷量 [kg-N/h]
 Q_o : 放流窒素負荷量 [kg-N/h]

窒素除去効率の算出結果を表 5 に示す。対照槽に対する実験槽の窒素除去効率は 25% 高く、実験槽では効率の良い窒素除去が行われていることが示された。

表 5 窒素除去効率

	対照槽	実験槽
単位水処理電力使用量(kWh/h)	148.9	143.8
窒素除去量(kg-N/h)	12.3	15.0
窒素除去効率(kg-N/kWh)	0.083	0.104
T9-1に対するT9-2の 相対差率(%)	-	25.0

4.2 送風電力使用量削減効果について

硝化液循環による電力使用量削減効果を明らかにするため、硝化液循環による酸素回収量と送風量削減による供給酸素削減量を比較し、その関係を明らかにした。

そこで、曝気風量削減の要因としての「硝化液循環に含有される NO_x 態窒素からの酸素回収量」の寄与分を算出し、実際に計測された曝気風量削減量との関係性を検討した。

まず、硝化液循環に含有される NO_x 態窒素からの酸素回収量は 9.48 kg-O₂/h となった(表 6、式②)。なお、調査期間において完全硝化状態であったため算出には硝酸態窒素濃度 (NO₃-N) を用いた。

表 6 NO_x 態窒素からの酸素回収量

期間平均値	
硝化液循環量(m ³ /h)	523
硝化液に含有されるNO _x 態窒素(mg/L)	6.04

$$523 \times 3 \times 6.04 \times \frac{1}{1000} = 9.48 \left[\frac{\text{kg} - \text{O}_2}{\text{h}} \right] \dots \textcircled{2}$$

次に、硝化液循環することで削減された曝気風量は表 11 に示すように 257Nm³/h であった。次に、これを反応槽への酸素供給量に換算した。

表 7 調査期間における平均曝気風量

実削減曝気風量	
対照槽曝気風量(Nm ³ /h)	3,047
実験槽曝気風量(Nm ³ /h)	2,790
削減曝気風量(Nm ³ /h)	257

換算に当たっては「下水道施設計画・設計指針と解説 後編」²⁾に記載されている式を用いた。まず、清水状態の削減酸素量を式③⁽²⁾で算出し、引き続き、反応槽内における補正削減酸素量を式④²⁾で算出した。

$$\text{SOR}_{\text{ReD}} = G_s \times E_A \times \rho \times O_w \times \frac{273}{273 + T} \dots \textcircled{3}$$

E _A	: 酸素移動効率(清水状態,20℃) (%) = 23.2 ³⁾
ρ	: 空気密度(kg/Nm ³ -Air) = 1.293
G _s	: 削減曝気風量(Nm ³ -Air/h)
O _w	: 空气中酸素含有重量(kg-O ₂ /kg-Air) = 0.232
SOR _{ReD}	: 削減酸素量(清水状態)(kg-O ₂ /h)
T	: 水温(℃) = 23.8

$$G_o = \frac{\text{SOR}_{\text{ReD}} \times 1.024^{(T_2 - T_1)} \times \alpha \times (\beta \cdot C_{s2} \times \gamma - C_A)}{C_{s1} \times \gamma} \dots \textcircled{4}$$

SOR _{ReD}	: 削減酸素量(清水状態) (kg-O ₂ /h),
G _o	: 補正削減酸素量(kg-O ₂ /h)
T ₁	: 水温(℃) = 20.0
T ₂	: 水温(℃) = 23.8
C _{s1}	: 清水中 T ₁ ℃での飽和酸素濃度(mg/L) = 8.84
C _{s2}	: 清水中 T ₂ ℃での飽和酸素濃度(mg/L) = 8.19
C _A	: 反応タンク内の DO 濃度(mg/L) = 3.0
α	: K _L a の補正係数 = 0.83,
β	: 酸素飽和濃度の補正係数 = 0.95
γ	: 散気水深による C _{s2} の補正係数 = 1.28

③、④式より、削減曝気風量に相当する酸素量は $G_0=9.16(\text{kg}\cdot\text{O}_2/\text{h})$ となり、この結果、硝化液循環に含有される NO_x 態窒素からの酸素回収量の収支率は図 6 の様になった。

図 6 より、実際の削減曝気風量に対し、 $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度と硝化液循環量から理論的に算出した削減曝気風量は 103.5% を占めた。したがって、3.5% の超過誤差分が出たものの、硝化液循環量と NO_x 濃度から求めた酸素回収量に見合った削減曝気風量となっていたと言える。

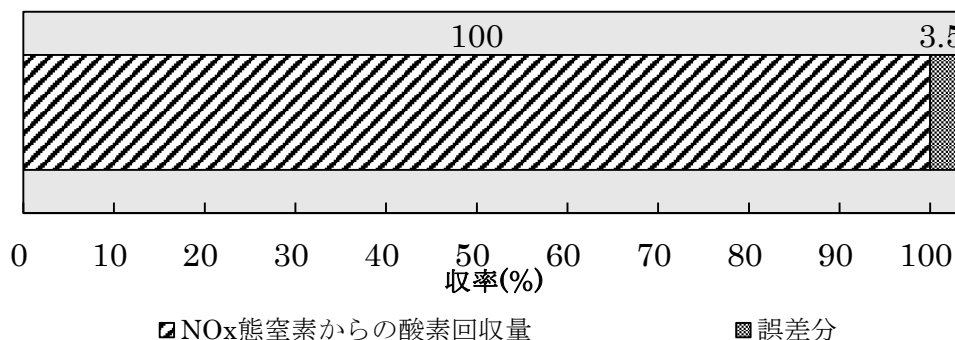


図 6 削減曝気風量収支

なお、超過した 3.5% について、DO の変動の影響が考えられる。感度分析の結果、DO が 0.5mg/L 変動した場合、削減酸素量は $\pm 7.3\%$ 程度のずれが生じることが分かった。したがって、水量変動や濃度変動によって生じた DO の変動が誤差に寄与したものとする。

4.3 最も効率的な硝化液循環量について

前節において、硝化液循環による酸素回収がリアに曝気風量の削減に寄与することが確認できた。

また、一般的に、硝化液循環量を増加させることにより処理水の TN 濃度は低減するが、硝化液循環量に対する窒素除去効率は低下する。したがって、脱窒効率が低下することで、単位当たりの曝気風量削減量が減少し、送風電力量削減量が減少する。

そこで、本節では硝化液循環ポンプを稼働させた際に、最も省エネルギー効果を得られる硝化液循環量を硝化液循環ポンプの電力使用量と硝化液循環量によって変化する送風機電力使用量の関係性を明らかにすることで、水質改善と省エネルギーの両立を実現する最も効率的な硝化液循環量について考察する。

計算方法として、硝化液循環量に対する処理水の無機態窒素濃度を式⑤にて求めたのち、式②～④を用いて理論削減曝気風量を算出した。その後、送風機の性能曲線より削減送風機電力使用量を求めた。なお、本試算は、無機態窒素はすべて硝酸態窒素まで完全硝化するとして行った。

$$C_{\text{TNin}} \times \left(1 - \frac{R}{1+R}\right) \times \alpha = C_{\text{NOx eff}} \dots \text{⑤}$$

C_{TNin}	: 流入水全窒素濃度 (mg/L) = 23.7 (調査期間平均値)
R	: 循環率(-)
α	: 処理水の全窒素に対する無機態窒素濃度の割合 = 0.8
$C_{\text{NOx eff}}$: 処理水無機態窒素濃度 (mg/L)

硝化液循環による曝気風量削減電力量と硝化液循環電力量との差が最も大きい硝化液循環量を水質改善と省エネルギーの両立に最適な硝化液循環量とした。図 7 より、硝化液循環量は 570m³/h となり、このときの処理水の硝酸態窒素濃度は 7.1mg/L となった。このことから、硝化液循環率を 50%程度で運転することが水質改善と省エネルギーの両立に最も適する条件であることが示された。

さらに、送風機電力使用量削減量が硝化液循環ポンプ電力使用量を上回る運転管理を行う場合の処理水の硝酸態窒素濃度を算出した(式⑥)。その結果、処理水の硝酸態窒素濃度は 5.4mg/L となるときの、水処理電力使用量を増やさずに処理水質の改善効果が最大化することが分かった。

これらの 2つのことから、流入水アンモニア濃度が完全硝化する条件において、日常の運転管理では、処理水の硝酸態窒素濃度を 5.4~7.1mg/L となるように硝化液循環率を決定することで、水処理電力使用量を増加させることなく、処理水質の向上を図ることが可能である。

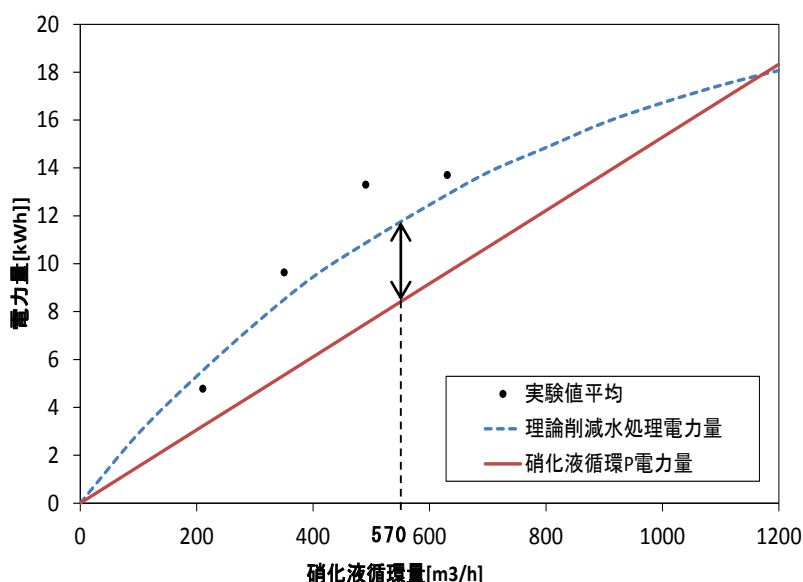


図 7 削減電力量と硝化液循環電力量の関係

$$\Delta E_b > \Delta E_c$$

$$\Leftrightarrow 3 \times \frac{1}{1000} \times Q_c \times C_{NO_x\text{eff}} \times \frac{1}{A} \times e_b > Q_c \times e_c$$

$$\Leftrightarrow 3 \times \frac{1}{1000} \times C_{NO_x\text{eff}} \times \frac{1}{A} \times e_b > e_c \dots \text{⑥}$$

ΔE_b	: 送風機電力使用量削減量 (kWh)
ΔE_c	: 硝化液循環電力使用量 (kWh)
$A = G_o/G_s$: 曝気風量中酸素重量割合 (kg-O ₂ /Nm ³ -Air) = 0.0356 (本調査結果より算出)
Q_c	: 硝化液循環量 (m ³ /h)
$C_{NO_x\text{eff}}$: 処理水の硝酸態窒素濃度 (mg/L)
e_b	: 送風機電力効率 (kWh/Nm ³ -Air) = 0.0338
e_c	: 硝化液循環ポンプ電力効率 (kWh/m ³) = 0.0153

4.まとめ

本調査により以下の結果を得た。

(1)硝化液循環運転を行うことにより、窒素除去率が10%向上し、水処理電力量も3.4%削減されたため、窒素除去効率は硝化液循環を行わない場合に比べ25%高いことが示された。

(2)硝化液循環運転による曝気風量の削減電力量の収支内訳を明らかにしたことで、硝化液循環運転の最適量を算出した。その結果、硝化液循環率を50%程度で運転することが最適運転条件であることが示された。

参考文献

- 1) 芝浦水再生センター 横井ら：準高度処理の導入による窒素の削減と送風電力の抑制，平成23年，
- 2) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 後編，平成21年10月，p230
- 3) 日本碍子株式会社，反応タンク設備基本容量計算書，平成19年2月，p9