

## 2-2-6 制限ばっ気による窒素低減の取組

東部第二下水道事務所中川水再生センター 井上 文恵 腰塚 昭春 山本 孝幸  
勅使川原 秀和（現 東京下水道サービス株式会社）

### 1 はじめに

下水道局では、水再生センターにおける水質改善と省エネルギーの両立を実現するため、『放流水の全窒素濃度』と『送風電力量原単位』の目標値を定めた二軸管理図による評価を行い、水処理運転の最適化に努めている。

今回は、放流水の全窒素濃度のさらなる低減に向けて、中川水再生センター（以下、「当センター」）における3つの処理方式（A<sub>2</sub>O法、AO法、標準法）の中で、窒素濃度が最も高いAO法と、処理水量の割合が高い標準法に着目し、好気槽の送風を一部制限して脱窒を促進させる調査を実施した。調査の結果、送風量を増やすことなく窒素低減の効果が得られたため、結果を報告する。

### 2 施設の概要

当センターの概要を表1に示す。第一沈殿池は共通であり、反応槽への流入水質は各処理方式で違いはない。反応槽は深槽・直線構造であり、A<sub>2</sub>O法、AO法は回路間に隔壁を有するが、標準法には隔壁がない。また、標準法では、りん処理のためA回路の送風を停止し嫌気部としている。

第二沈殿池はA<sub>2</sub>O法、AO法、標準法と処理方式で分かれており、それぞれ返送汚泥が引き抜かれる。なお、処理方式が異なっても反応槽・第二沈殿池は、基本的に同じ形状である。

表1 当センターの施設概要

		A <sub>2</sub> O法	AO法	標準法
反応槽	容量 (m <sup>3</sup> )	14,900	14,900	59,600
	形状	槽数 (-)	2	2
二沈	容量 (m <sup>3</sup> )	6,180	6,180	24,720
	形状	池数 (-)	1	1
R4年度 運転 実績*	処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	20,110	20,920	149,250
	A-HRT (時)	7.1	10.9	9.6
	BOD容量負荷 (kg/m <sup>3</sup> ・日)	0.17	0.17	0.25
	MLSS (mg/L)	1,330	1,440	1,160
	返送汚泥率 (%)	44.6	53.9	38.3
	送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	2.9	4.2	3.7
	A-SRT (日)	6.1	8.0	6.5

\*稼働実績を踏まえた年平均値である。

### 3 AO法における制限ばっ気調査

#### 3.1 反応槽最終回路の水質調査

当センターのAO法は、通年で硝化が進行していることから、好気槽内での脱窒を進めるために、まず、2槽ある反応槽のうち1-7号を調査槽とし、C回路の送風弁（2か所）を全開から寸開（汚泥が沈降せず目視で気泡が確認できる程度）へ変更して制限ばっ気とした。加えて、好気

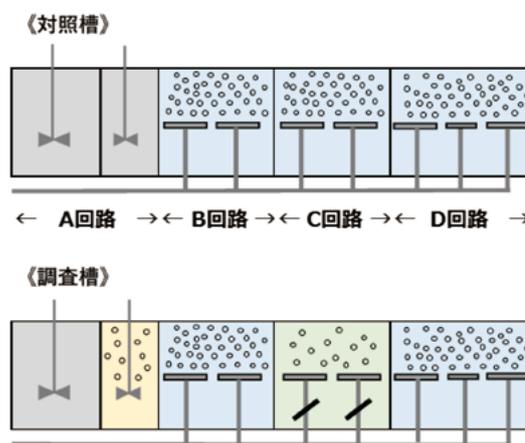


図1 AO法反応槽の調査模式図

部が不足することに備え、嫌気部である A 回路後段の水中攪拌機から送風を行った。なお、攪拌機自体は間欠運転である。図 1 に調査槽と対照槽の模式図を示す。

調査槽と対照槽の水質を比較するため、最終回路で 2 時間ごと 24 時間採水した。結果を表 2、図 2 に示す（調査日：令和 2 年 6 月 10 日～11 日）。

無機態窒素濃度（各時間の水量と濃度から負荷量を算出し、全水量で割り戻した平均値）は、調査槽が 7.6mg/L、対照槽が 7.9mg/L であり、調査槽が低かった。対照槽に対する調査槽の削減率は約 4%であった。

続いて、反応槽の条件を入れ替えて（調査槽：1-8 号）同様の調査を行った（調査日：令和 2 年 7 月 6 日～7 日）。結果を表 3、図 3 に示す。無機態窒素濃度は調査槽が 6.2mg/L、対照槽が 7.1mg/L であり、調査槽の方が低く、削減率は約 13%であった。

反応槽ごとの特性があること（1-7 号の方が流入水量は多く送風量が少ない傾向）や降雨の影響を受けた（2 回目の調査）ことにより、削減率に差はあるが、いずれも調査槽の方が無機態窒素濃度は低く、C 回路の送風を制限することで脱窒が進んだと推測された。

表 2 A0 法調査の運転条件（調査槽：1-7 号） 表 3 A0 法調査の運転条件（調査槽：1-8 号）

	調査槽 1-7 号	対照槽 1-8 号
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	10,210	9,140
送風量 (m <sup>3</sup> N/日)	46,621	49,084
送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	4.57	5.37
MLSS (mg/L)	1,200	1,220
無機態窒素 (mg/L)	<b>7.6</b>	<b>7.9</b>
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	1.9	0.9
DO 設定値 (mg/L)	0.8	0.8
平均送風倍率※	4.36	5.32

	対照槽 1-7 号	調査槽 1-8 号
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	20,930	19,790
送風量 (m <sup>3</sup> N/日)	44,350	44,070
送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	2.12	2.23
MLSS (mg/L)	1,160	1,180
無機態窒素 (mg/L)	<b>7.1</b>	<b>6.2</b>
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	0.9	1.0
DO 設定値 (mg/L)	0.8	0.8
平均送風倍率※	4.41	4.76

※降雨の影響のない直近 1 週間における送風倍率

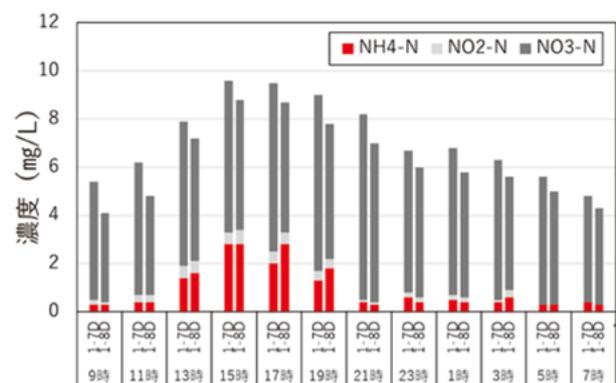
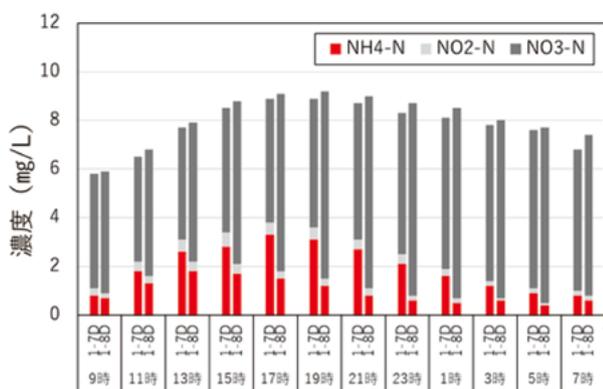


図 2 A0 法調査の窒素濃度（調査槽：1-7 号） 図 3 A0 法調査の窒素濃度（調査槽：1-8 号）

### 3.2 C 回路の DO 調査

C 回路の送風を制限した影響を確認するために、C 回路（出口側）の採水口にて深さ方向の DO を測定した。結果を表 4 に示す。送風を制限した調査槽（1-8 号）の DO は、全ての地点で対照槽よりも低い値であった。送風を制限することで C 回路内が無酸素状態となり、脱窒が進みやすくなったと推測された。

### 3.3 制限ばっ気の効果検証

3.1 と 3.2 の調査結果を踏まえ A0 法反応槽（全 2 槽）では、脱窒促進のため C 回路の送風を制限した運転を継続的に実施することとした。前述の調査時には A 回路後段で送風を行ったが、調査槽と対照槽で A 回路後段の水質に大きな違いが見られなかったことや、攪拌機からの送風は粗大な気泡であり送風効率が悪いと考えられたため、C 回路の制限ばっ気のみ実施することとした。

令和 2 年度から令和 4 年度における 11 月から翌 1 月末までの期間の A0 法処理水の全窒素濃度の推移を図 4 に示す。

令和 2 年度は通常運用（制限ばっ気なし）、令和 3 年度は 12 月 14 日まで制限ばっ気を実施し、その後は通常運用、令和 4 年度は制限ばっ気を継続実施している。

C 回路の制限ばっ気を継続した令和 4 年度は、処理が悪化しやすい年末年始でも全窒素濃度を 7mg/L 程度と従来に比べ低い濃度で維持することができた。

次に、施設停止や工事等の影響が比較的少ない 12 月（ひと月分）における過去 5 年分の水処理状況と水質データを表 5 にまとめた。処理水質は、降雨量や流入水量・水質など様々な影響を受けており、単純に制限ばっ気の効果だけを示すものではないが、C 回路の制限ばっ気を実施した令和 4 年度の全窒素濃度は 6.2mg/L であり、通常運用の令和 2 年度の 9.5mg/L と比べて全窒素濃度を約 35% 削減することができた。

表 5 A0 法反応槽の 12 月の処理状況の推移（R1 は施設停止）

	H29	H30	R2	R3	R4
降雨量 (mm)	14.5	42.0	10.0	114.0	49.0
一沈流出水 水温 (°C)	20.6	21.3	21.7	20.5	20.7
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	19,150	21,200	16,830	26,960	22,110
送風量 (m <sup>3</sup> N/日)	82,120	89,890	86,570	102,870	97,370
送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	4.29	4.24	5.14	3.82	4.40
一沈出口 COD (mg/L)	50	50	55	42	49
MLSS (mg/L)	1,440	1,410	1,240	1,390	1,390
処理水 T-N (mg/L)	<b>8.8</b>	<b>8.1</b>	<b>9.5</b>	<b>7.9</b>	<b>6.2</b>
処理水 T-P (mg/L)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
C 回路の制限ばっ気	無し	無し	無し	半月実施	実施

## 4 標準法での制限ばっ気（C 回路）調査

### 4.1 反応槽最終回路の水質調査

表 4 A0 法 C 回路出口の DO 値 (mg/L)

	対照槽 1-7 号	調査槽 1-8 号
水深 1 m	0.5	0.2
3 m	0.4	0.1 未満
5 m	0.2	0.1 未満
7 m	0.1	0.1 未満
9 m	0.2	0.1 未満

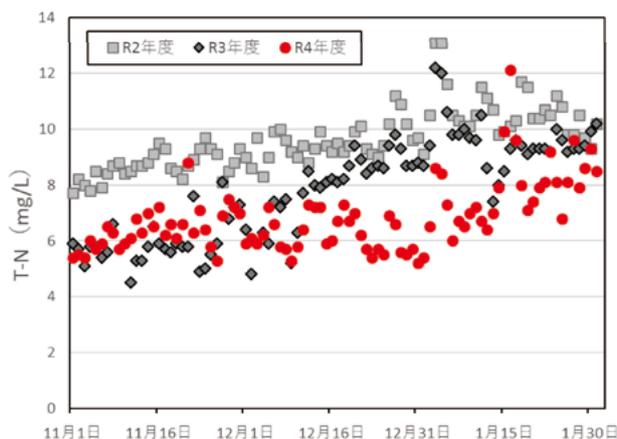


図 4 A0 法の 3 か年の全窒素濃度の比較

当センターの標準法は、隔壁がない直線構造の反応槽であり、従来、りん処理のために反応槽前段部（A回路）の送風弁を全閉にし、疑似嫌気部として運用している。

今回、A0法反応槽でのC回路制限ばつ気が窒素濃度の低減に効果があったため、標準法反応槽でも同様の効果が得られるか調査した。調査槽は、A回路の送風弁（3か所）全閉に加え、さらにC回路の送風弁（2か所）を寸開（A0法と同様に汚泥が沈まず気泡が確認できる程度）にした。図6に調査槽と対照槽の模式図を示す。

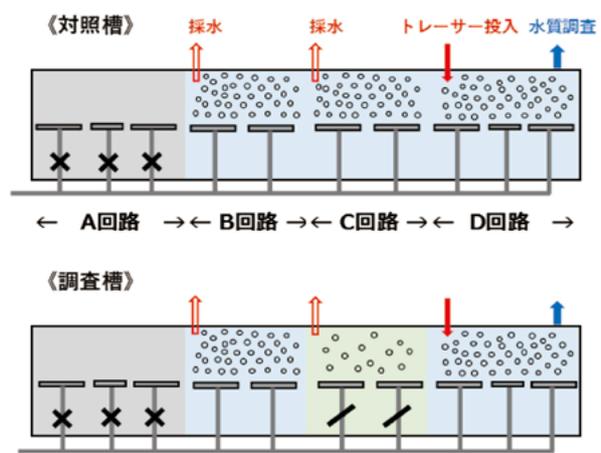


図6 標準法反応槽の調査模式図

今回の調査では、調査槽と対照槽で、送風量が概ね同等となるようDO設定値を調整した。なお、返送汚泥は、第二沈殿池4池分が混合されるため、調査槽と対照槽では同質の返送汚泥が投入されている。

まず、2-7号を調査槽とし（対照槽：2-5号）両槽における最終回路で2時間ごと24時間採水した（調査日：令和5年2月1日～2日）。結果を表6、図7に示す。調査槽の無機態窒素濃度は6.7mg/Lであり、対照槽の7.3mg/Lより低い結果となった（一部データ欠測のため当該の2回分を除いた平均値である）。対照槽に対する調査槽の削減率は約8%であった。

続いて、反応槽の条件を入れ替えて（調査槽：2-5号）同様の調査を行った（調査日：令和5年3月2日～3日）。結果を表7、図8に示す。無機態窒素濃度は調査槽が6.0mg/L、対照槽が7.5mg/Lと、調査槽の方が低い結果となり、削減率は約20%であった。

流入水量や送風量、MLSSなど、他の水処理条件に大きな差がない中、調査槽の方が無機態窒素濃度は低い結果となった。

表6 標準法調査の運転条件（調査槽：2-7号）表7 標準法調査の運転条件（調査槽：2-5号）

	対照槽 2-5号	調査槽 2-7号
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	15,340	15,414
送風量 (m <sup>3</sup> N/日)	81,079	81,396
送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	5.29	5.28
MLSS (mg/L)	1,450	1,360
無機態窒素 (mg/L)	<b>7.3</b>	<b>6.7</b>
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	1.2	1.8
DO設定値 (mg/L)	1.2	1.8
平均送風倍率※	5.71	5.69

	調査槽 2-5号	対照槽 2-7号
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	14,791	14,592
送風量 (m <sup>3</sup> N/日)	88,304	85,426
送風倍率 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	5.97	5.85
MLSS (mg/L)	1,490	1,390
無機態窒素 (mg/L)	<b>6.0</b>	<b>7.5</b>
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	1.5	1.2
DO設定値 (mg/L)	1.8	1.2
平均送風倍率※	5.83	5.73

※降雨のない直近1週間における送風倍率

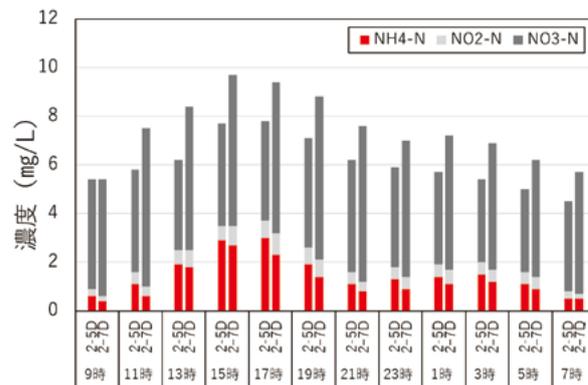
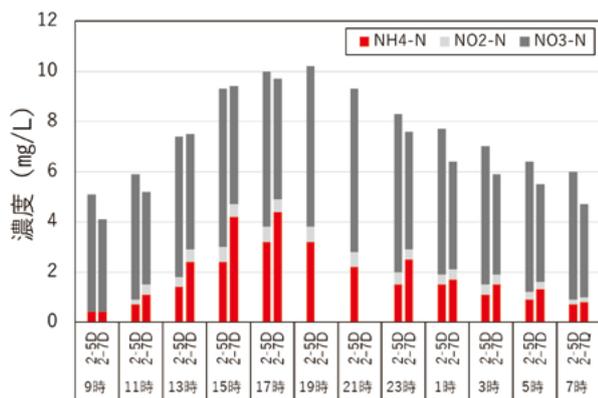


図7 標準法調査の窒素濃度（調査槽：2-7号） 図8 標準法調査の窒素濃度（調査槽：2-5号）

#### 4.2 C回路のD0調査

C回路での制限ばっ気の影響を確認するために、C回路における深さ方向のD0を測定した。調査箇所はC回路の前方（入口側）と後方（出口側）の2か所とし、時間を変えて3回測定した。結果を表8に示す。調査槽と対照槽でD0実測値に明確な違いは見られなかった。

D0の実測は、限られた採水口での測定であるため、反応槽の状態を確実に捉えることができていない可能性はあるが、標準法の反応槽はA0法と異なり、回路間に隔壁がなく、C回路の送風を制限しても他の回路と容易に混合することから、調査槽と対照槽でD0値に差が見られなかったのではないかと考えられる。

表8 標準法C回路のD0値（mg/L）

	対照槽 2-5号 (前方)	調査槽 2-7号 (前方)	対照槽 2-5号 (後方)	調査槽 2-7号 (後方)
水深 3m (8時)	0.5	0.8	0.4	0.4
7m (8時)	0.8	0.7	0.7	0.6
水深 3m (11時)	0.6	0.4	0.6	0.8
7m (11時)	0.6	0.4	0.9	0.6
水深 3m (14時)	0.5	0.5	0.9	0.5
7m (14時)	0.4	0.7	0.8	0.5

#### 4.3 条件変更時の水質の変化

図9に、令和5年4月から7月までの日常試験における標準法反応槽（2-5号と2-7号）の無機態窒素濃度と送風倍率の推移を示す。当初2-5号を調査槽としていたが、6月8日に反応槽の条件を入れ替えて、2-7号を調査槽へ、2-5号を従来のA回路のみ制限ばっ気へ変更した。この条件変更の日を境に、翌日の日常試験の結果で、調査槽にした2-7号の無機態窒素濃度が低下した。

調査期間中、調査槽と対照槽とで送風倍率は同等であり、改めて、A回路に加えC回路も制限ばっ気にすることで窒素濃度低減の効果があることを確認した。

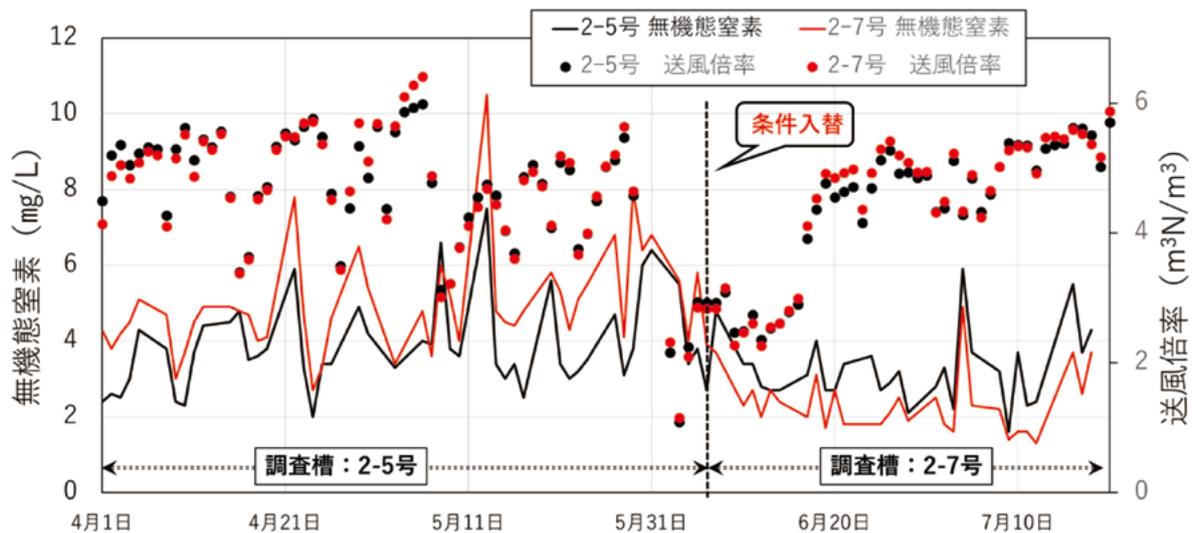


図9 日常試験時の標準法反応槽の水質と送風倍率

#### 4.4 トレーサー試験と水質結果

標準法反応槽では、他の処理方式に比べ窒素・りんともに良好な水質が得られており、その要因を掴むためにこれまで様々な調査が実施されてきた。隔壁がない直線構造という特徴から、従来の水質測定に加え槽内の混合特性についても調査しており、A回路の制限ばっ気によって反応槽後方からの混合・逆流があり、脱窒促進につながっていると考えられている。

今回は、過去の調査結果等を踏まえ、反応槽の途中にトレーサー物質を投入し、上流側で採水（2か所）することで、調査槽と対照槽の違いを探ることとした（図6参照）。

調査方法としては、調査槽と対照槽の両槽のD回路入口（以下、「D入」）の採水口に、トレーサー物質（臭化物イオン濃度が平均0.8mg/Lとなる量の臭化ナトリウム溶液）を午前10時に投入し、反応槽上流側であるC回路入口（以下、「C入」とB回路入口（以下、「B入」）の採水口にて、自動採水器を用いて5分間隔で2時間採水を行った。採水は水深1mとし、流入水量は両槽において一定量とした。

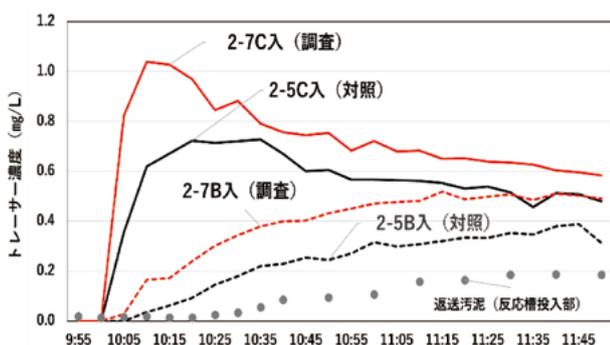


図10 トレーサー結果①（調査槽：2-7号）

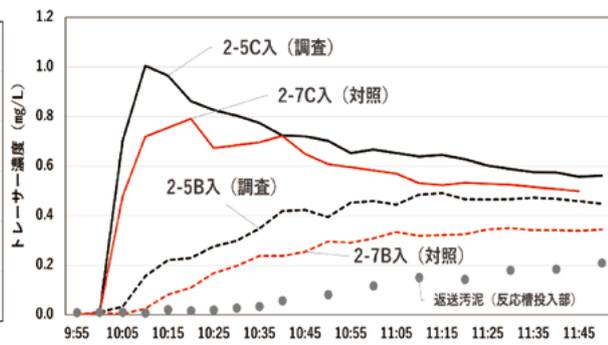


図11 トレーサー結果②（調査槽：2-5

図10に1回目のトレーサー試験（調査槽：2-7号、調査日：令和5年5月25日）の結果を、図11に条件を入れ替えた2回目のトレーサー試験（調査槽：2-5号、調査日：令和5年6月28日）の結果を示す。いずれも調査槽の方がC入、B入でトレーサー濃度が高く、ピーク時間も早かった。調査槽では、C入においてトレーサー投入後、10分程度で約1.0mg/Lと最大となり、その後徐々に低下した。D入に投入したトレーサー物質は、二沈から引き

抜かれた返送汚泥により反応槽入口からも流入すると考えられるが、返送汚泥（反応槽への投入箇所）では、トレーサー投入後、約 30 分間は検出されていないことから、少なくとも B 入の初期（10 時 30 分頃まで）に検出されたトレーサー物質は返送汚泥由来ではなく、D 入に投入したトレーサーが混合・拡散されたものと考えられる。また、トレーサー試験と同時に測定した B 入の水質結果を図 12、13 に示す。

B 入でも、調査槽の方が無機態窒素濃度は低く、C 回路の送風を制限することで、上流側の B 入の水質にも影響を及ぼしていることがわかった。

当センターの標準法反応槽は、隔壁のない直線構造であるため、蛇行している反応槽や隔壁のある反応槽よりも混合状態が強いと考えられるが、従来の A 回路のみ制限ばっ気に加えて C 回路の送風を制限することで槽全体の混合・逆流が進み、窒素濃度が低減したと推測された。

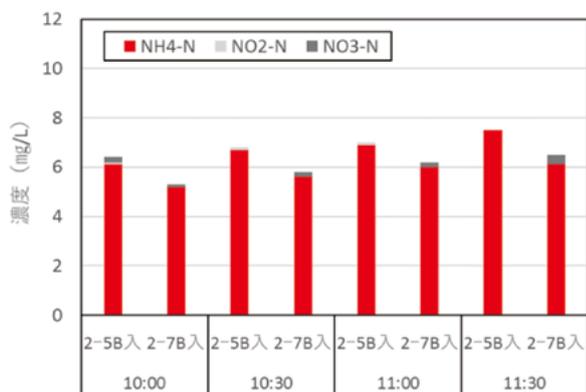


図 12 B 入口の水質① (調査槽: 2-7号)

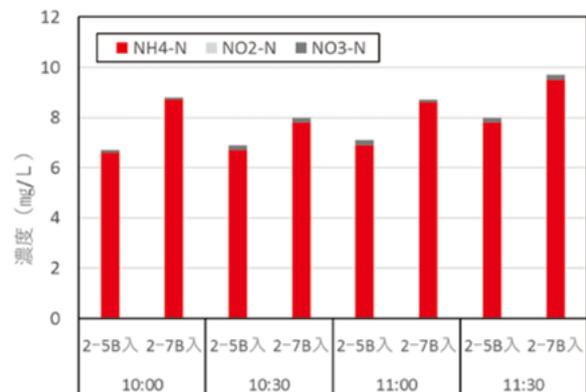


図 13 B 入口の水質② (調査槽: 2-5号)

## 5 まとめ

- ・ A0 法反応槽では、C 回路の送風を制限することで窒素低減の効果が見られた。制限ばっ気をした C 回路の DO 値は低下しており、無酸素状態となることで脱窒が進行したと推測される。
- ・ 施設停止等の影響が少ない 12 月（ひと月分）の全窒素濃度は、制限ばっ気を実施した令和 4 年度が 6.2mg/L であり、取組なしの令和 2 年度の 9.5mg/L と比べ、約 35% 削減することができた。
- ・ 標準法反応槽でも C 回路の送風を制限することで窒素濃度を約 20% 低下させることができたが、送風を制限した C 回路の DO 値は対照槽と差が見られなかった。
- ・ 標準法反応槽は隔壁がない直線構造であるため、反応槽後方からの混合・逆流がみられるが、トレーサー試験の結果、C 回路の送風を制限した調査槽では、反応槽内の混合・逆流が対照槽より促進されることがわかった。槽全体の混合が進み、窒素濃度の低減につながったと推測される。

## 6 今後の予定

放流水の窒素濃度のさらなる低減に向けて、今回調査した結果を元に制限ばっ気を継続運用した際の管理上の要点や課題を整理する。加えて、標準法反応槽における槽内の混合・逆流状況と処理水質との関係について解明していく。

・参考文献

施設管理部環境管理課：令和元年度 好気槽内脱窒要因解明調査委託 報告書