

(公社)全国上下水道コンサルタント協会
2022年度 技術研修会 「広域化・共同化」

し尿等を投入した下水処理場における 処理機能の追跡調査

2022年12月16日

 株式会社 **NJS** 甘 長 淮

発表の流れ

1. はじめに *【背景、事前検討と追跡調査の経緯】*
2. 調査対象となる「N市S下水処理処理場」の概要
3. し尿投入影響に関する事前検討 *【平成22年度】*
※活性汚泥モデル(ASM)を活用
4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査 *【平成30年度】*
※影響検討時に構築した下水処理場システムモデルによる検証
5. 近年(R1~3)の処理状況 *【令和4年度、2回目追跡調査】*
6. し尿等投入による経済効果 *【令和4年度、2回目追跡調査】*
7. し尿等投入による環境影響 *【令和4年度、2回目追跡調査】*
8. 全国における下水処理場し尿投入の状況 *【令和元年度】* *※「下水道統計」により解析*

1. はじめに【背景】

背景

- ① し尿・浄化槽汚泥量の減少、下水処理施設の能力余裕
- ② し尿処理施設の老朽化、市町村財政状況の逼迫
- ③ 維持管理コストの削減、省エネルギー

下水処理場へのし尿・浄化槽汚泥投入（下水処理場とし尿処理場の二重投資を避け、下水処理施設を効率的に運用）

【し尿投入の問題点と課題】

- ① N-BODの発生による処理水BODの上昇
- ② 反応タンク混合液及び処理水のpHの低下
- ③ 処理水CODの上昇、着色（色度の上昇）
- ④ 曝気設備等の能力不足等

【今までの知見】

し尿等の下水道受入の目安

消化脱離液：流入下水量の0.5%以下

し尿：流入下水量の1.0%以下

文献

- 1) 月間下水道Vol.24, No.6, 「現場で困ったクレーし尿の受入について」
- 2) 若山, 堺, 山本, 「下水処理施設へのし尿受入に伴う技術的検討第1回」, 月間下水道, Vol21, No.16
- 3) 「終末処理場初期運転におけるし尿等混入対策調査(Ⅱ)調査報告書」, 日本下水道事業団, 昭和56年3月

1. はじめに【事前検討と追跡調査の経緯】

事前検討

- ①し尿等は浄化槽汚泥の混入比率が高く、性状が変化
- ②流入下水量に対する投入比が1.0%以上(約2%)
- ③下水処理水の排水基準:BOD、SS、放流先:海域(窒素、リンの検討も)
そのため、し尿等の投入にあたって、下水処理機能への影響及び設備能力の検討を実施した

追跡調査

- ①し尿等投入後、し尿等の性状と流入水質、運転条件と処理水質を確認し、投入前と比較するとともに、事前検討の妥当性を確認
- ②処理運転の実績からみた最適な運転方法の提案
- ③長期処理運転における経済効果と環境影響の確認

本研究での活性汚泥モデル(ASM)の活用: 窒素、リンを含む高精度検討のため

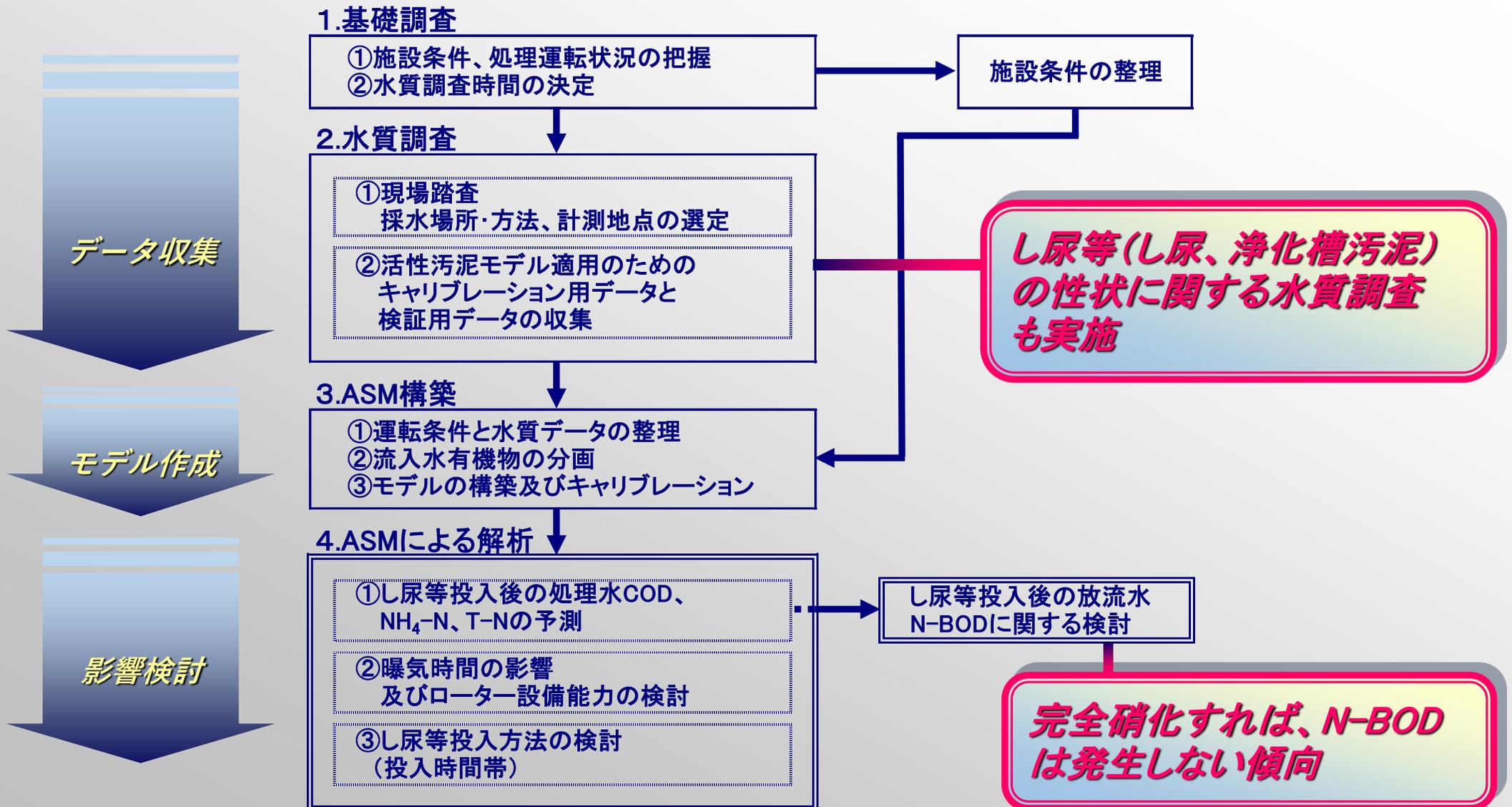
- 【事前調査】
- ①OD法処理場を対象に、処理への影響確認と最適運転条件を探索する検討手順を構築した。
 - ②し尿等の投入負荷が最大となる年次における最適な運転条件を提案した。
(※ここでは、主に窒素関係をご報告致します)。
- 【追跡調査】
- ①事前調査時に活性汚泥モデルにより構築した下水処理場のシステムモデルを用いて処理状況を検証した
 - ②処理水質の確保と省エネルギーの両面を考慮した運転方法を検討した。

2. 調査対象となる「N市S下水処理処理場」の概要

【対象処理施設】

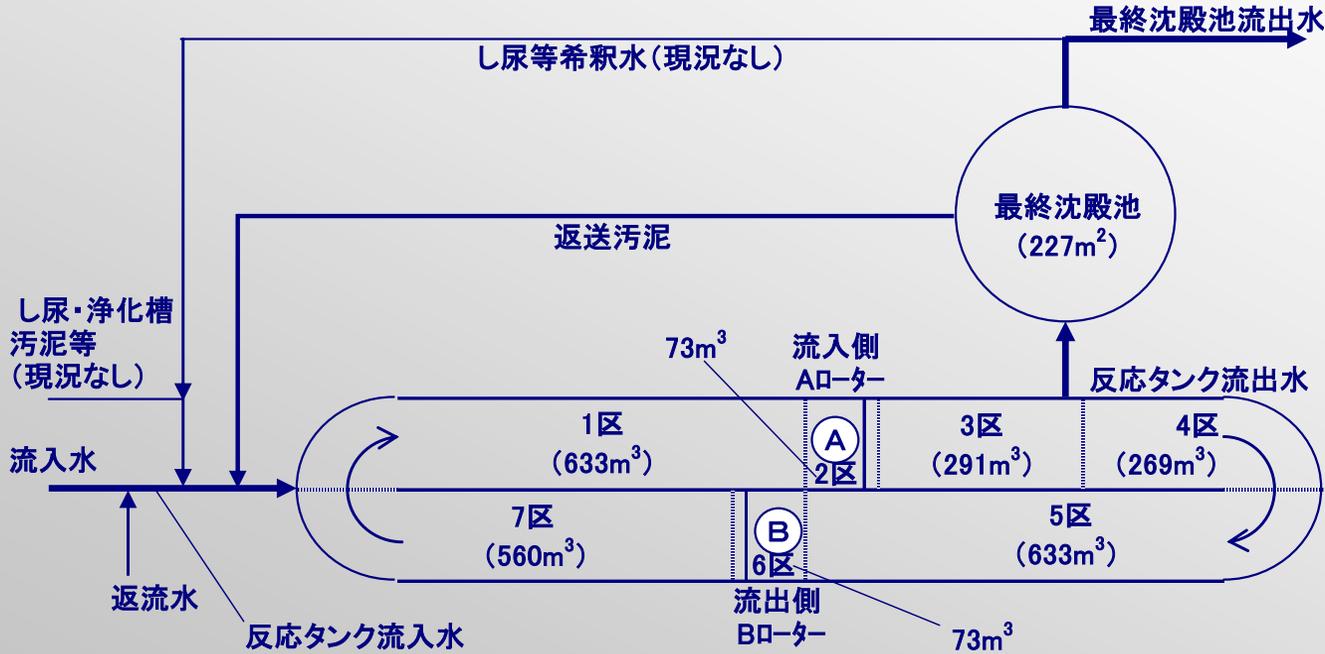
- ①処理方式：オキシデーションディッチ法(OD法)【3系列】
- ②処理能力：6,300m³/日【日最大, HRT29hr】
- ③処理水量：投入前(H17~21) 3,598m³/日【平均、HRT45.6hr、流入率57%】
し尿投入 H26.4.1~開始【希釈→圧送→下水道管渠マンホール】
投入後(H29) 4,368m³/日【平均、HRT41.9hr】
※内訳：下水 3,519m³/日、し尿等希釈液 849m³/日
投入後(R1~3) 4,054m³/日
- ④投入量：H29 64.6 kL/日【流入下水水量に対する投入率 1.8%】
※内訳：し尿 7.1kL/日(11%)、浄化槽汚泥 57.5kL/日(89%)
R1~3 53.9 kL/日【流入下水水量に対する投入率 1.6%】
- ⑤希釈倍率：約13倍【地下水】
- ⑥投入方法：下水流入ピーク(9:00~10:00、19:00~21:00)以外、
下水管にし尿等希釈液を流量一定投入

3. し尿投入影響に関する事前検討【検討フロー】



3. し尿投入影響に関する事前検討【プロセスモデルの構築】

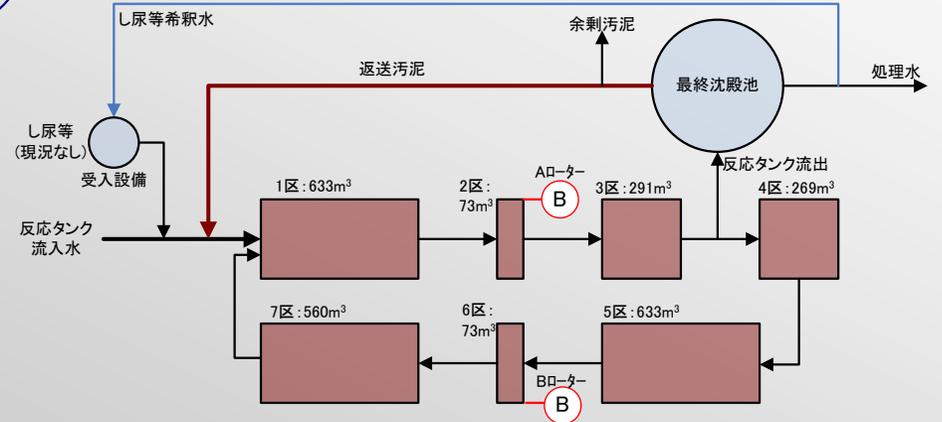
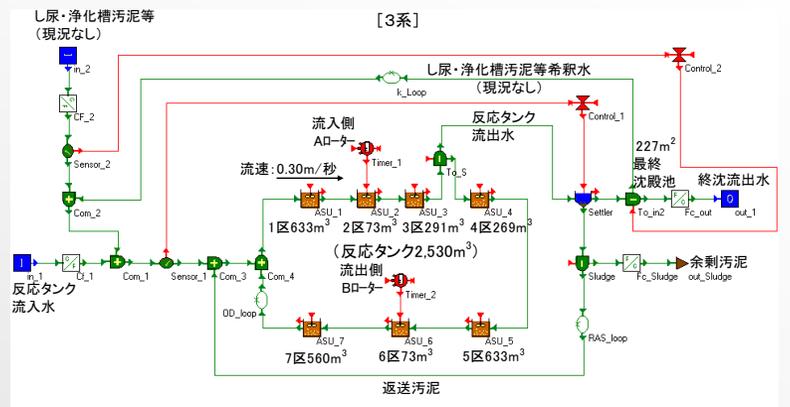
凡例: ----- 区分け線



【処理フロー概要】

- (1) ASM2dによりプロセスモデルを構築
- (2) 主要な付帯モデル
 - ① 反応タンク水理モデル (完全混合)
 - ② 酸素移動モデル (K_{La} 一定)
 - ③ 最終沈殿池モデル (理想沈殿池)

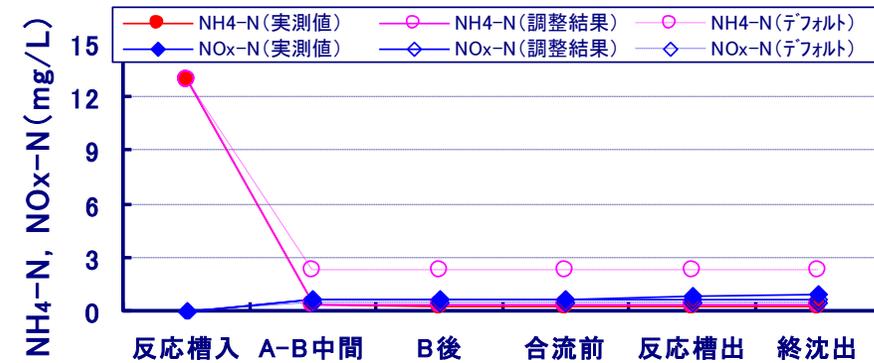
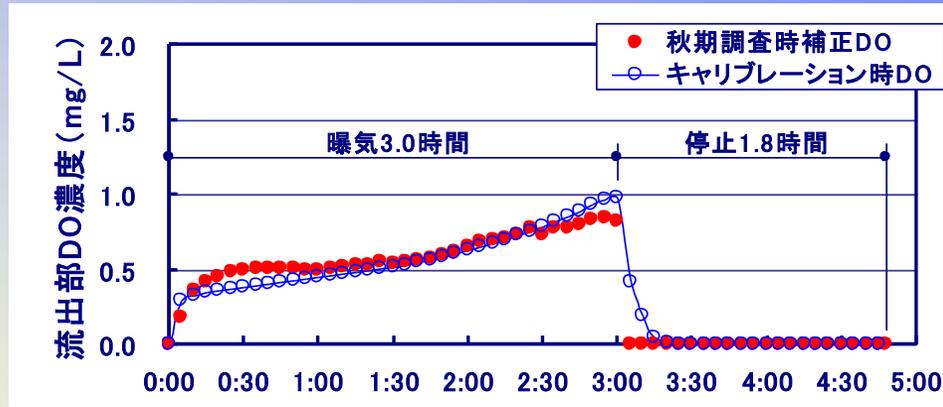
備考) ASM シミュレータ:「WEST」 Ver.3.7.5 (2010)



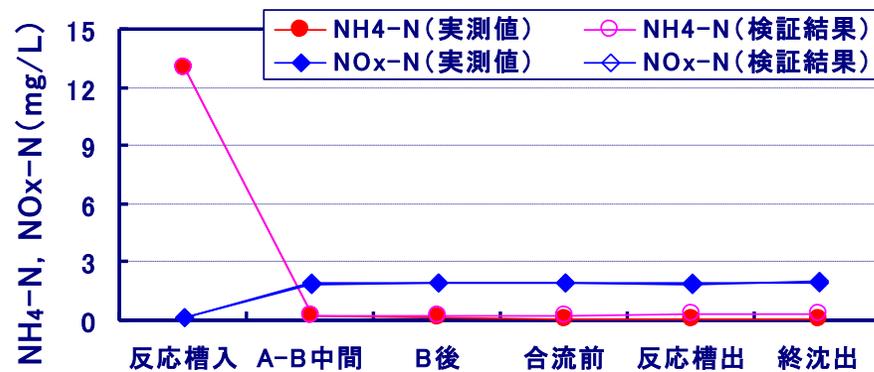
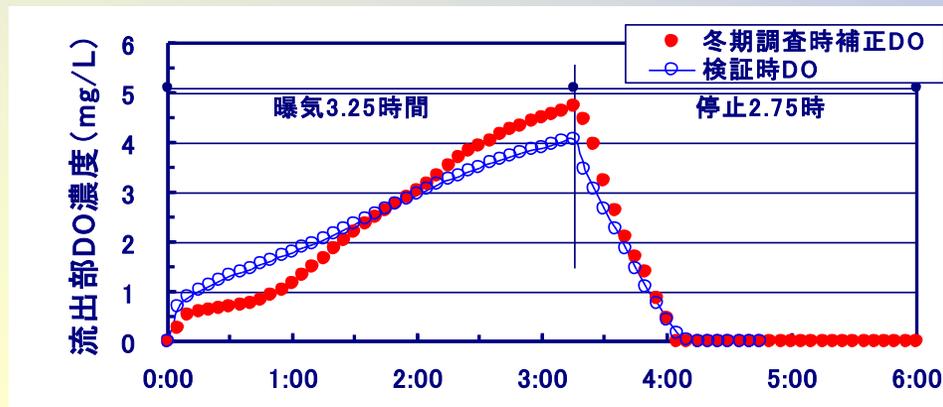
【ASMに適用するプロセスフロー】



3. し尿投入影響に関する事前検討【キャリブレーション・検証の結果】



キャリブレーションの結果(秋期データ)



検証の結果(冬期データ)

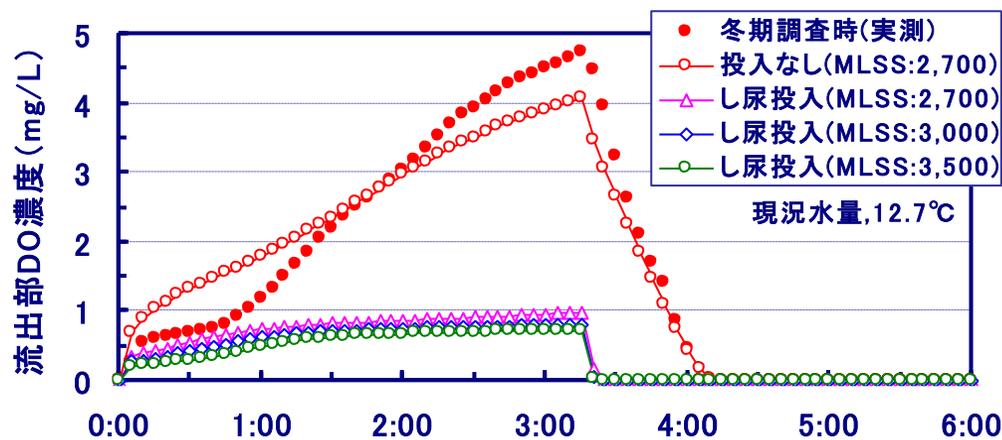
【予測誤差】 キャリブレーション・検証における反応タンク内各地点、終沈流出水のアンモニア性窒素濃度の実測値と計算値の差異は、0.2mg/L程度

3. し尿投入影響に関する事前検討【し尿等投入シミュレーション結果(例1)】

【MLSS濃度の影響】(現況水量に対する検討結果)



MLSSと処理水窒素の関係など

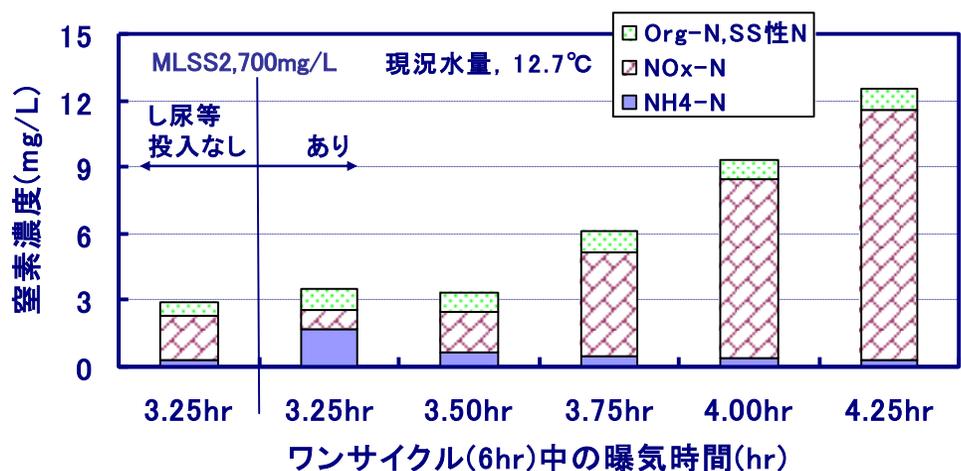


MLSSと反応タンク内DOの関係

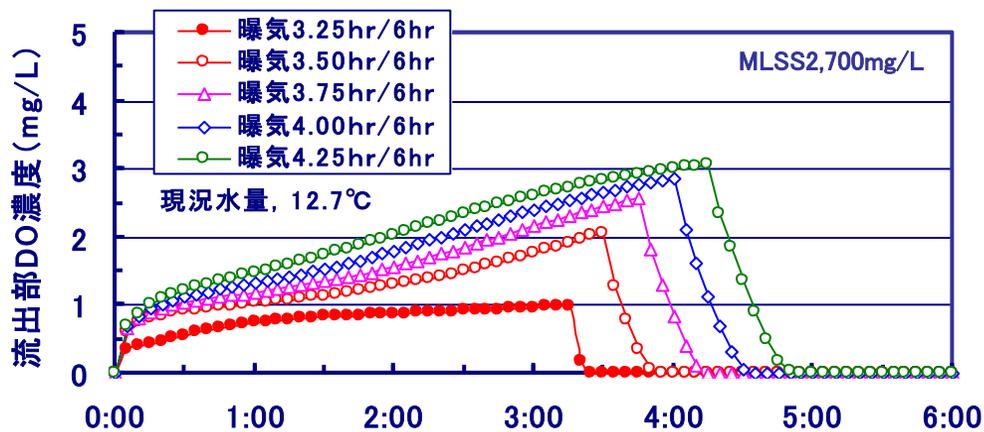
- ①現況、DO4mg/Lまで上昇、処理水NH₄-Nは殆どない
- ②し尿投入後、DO1mg/L弱までしか上昇せず、処理水NH₄-Nは残存傾向
- ③MLSS濃度が高くなるほどNH₄-Nの残存が顕著、現状の運転条件(ON3.25h/OFF2.75h)では酸素供給が不足(ローター回転速度限界)

3. し尿投入影響に関する事前検討【し尿等投入シミュレーション結果(例2)】

【曝気時間の影響】(現況水量に対する検討結果)



曝気時間の影響(処理水NH₄-N、NO_x-Nなど)



曝気時間と反応タンク内DOの関係

- ①曝気時間を長くすると、反応タンク内DO2~3mg/Lまで上昇
- ②NO3.5h/OFF2.5hの曝気モードが最適な運転条件
- ③嫌気時間が短縮されることにより、処理水NO_x-N濃度が高くなり、T-Nが上昇

3. し尿投入影響に関する事前検討【検討結果】

【ASMを用いて検討した結果】

- ①し尿投入後、DO1mg/L弱までしか上昇せず、処理水NH₄-Nは残存傾向である。
このため、処理水T-Nの上昇とN-BODの発生が懸念される。
- ②ローターのON/OFF時間を最適化することにより、し尿等の投入後においても現況と遜色ない窒素除去が可能となる。
運転条件： 現況3.25hr/2.75hr → 投入後3.5hr/2.5hr (※曝気時間延長)
処理水T-N： 現況2.7mg/L → 投入後3.4mg/L
- ③ただし、適切なDOを維持して安定的な処理運転を確保するため、また、計画流入条件に関する検討結果により、曝気設備の増強が必要と判断された。
(※し尿処理施設の更新と比較すると、大幅なコストの削減が可能)

4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【曝気装置の増強】

横軸型曝気装置の更新時期に合わせて曝気装置を増強した。

横軸型曝気装置 6基(2基/系×3系)



横軸型曝気装置 4基(2基/系×2系) + 縦軸型曝気装置 4基(2基/系×2系)

項目	1系【1池】		2系～4系【計3池】	
	横軸型	縦軸型 (酸素供給能力増強)	横軸型	縦軸型 (酸素供給能力増強)
～H23 【し尿投入影響事前検討】	躯体のみ			
H24～25 【縦軸2基新設】			6基 (2基/系×3系)	-
H26 【し尿等投入開始】				
H27～28 【横軸2基→縦軸2基更新】	-	2基 (2基/系×1系)	4基 (2基/系×2系)	2基 (2基/系×1系)
H30 【追跡調査】				
R4 【2回目追跡調査】				

注)通常、3つの系列【3池】により処理運転を行う。

※し尿等投入開始してから4年後に「追跡調査」を実施、8年後に「2回目追跡調査」を実施

4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【投入し尿等の性状】

投入し尿等性状及び一般的なし尿・浄化槽汚泥の性状

項目	投入し尿等性状		一般的なし尿・浄化槽汚泥の性状(除さ後)		
	データ数 (個)	混合汚泥 【現在実績値】	し尿 【文献値】	浄化槽汚泥 【文献値】	混合汚泥 【計算値】
混合比 (%)	-	し尿11%、 浄化槽汚泥89%	11	89	100
BOD (mg/L)	52	4,981 (2,120 ~ 10,550)	7,300 (2,500 ~ 15,000)	3,300 (220 ~ 9,800)	3,740 (471 ~ 10,372)
SS (mg/L)	223	7,797 (2,920 ~ 19,000)	6,000 (1,100 ~ 35,000)	8,300 (640 ~ 21,000)	8,047 (691 ~ 22,540)
COD (mg/L)	5	2,758 (1,620 ~ 4,246)	3,900 (1,300 ~ 8,100)	3,600 (240 ~ 8,700)	3,633 (357 ~ 8,634)
T-N (mg/L)	52	557 (37.4 ~ 1,400)	2,300 (700 ~ 3,900)	780 (210 ~ 2,300)	947 (264 ~ 2,476)
T-P (mg/L)	52	186 (32 ~ 820)	270 (140 ~ 1,100)	150 (70 ~ 320)	163 (78 ~ 406)

注：一般性状(除さ後)は、(財)日本環境衛生センター「精密機能検査結果から見た現状と課題」
(平成16年度技術管理者等ブロック別研修会テキスト)によるものである。

- ①し尿等64.6 kL/日を地下水により約13倍希釈して下水管に投入
- ②流入下水量(平均)は、3,519m³/日であり、これに対し、し尿等の投入率は1.8%となる

※現在(H23~27)、全国的に希薄化傾向。その原因は、

【し尿】

- ・簡易水洗便所の普及
- ・汲み取り時の便器洗浄水の混入など
- (便所の構造及び使用条件の変化)

例:

BOD 4,800(1,600~9,500)mg/L
SS 4,700(880~12,000)mg/L

【浄化槽汚泥】

- ・単独処理から合併処理への転換など

例:

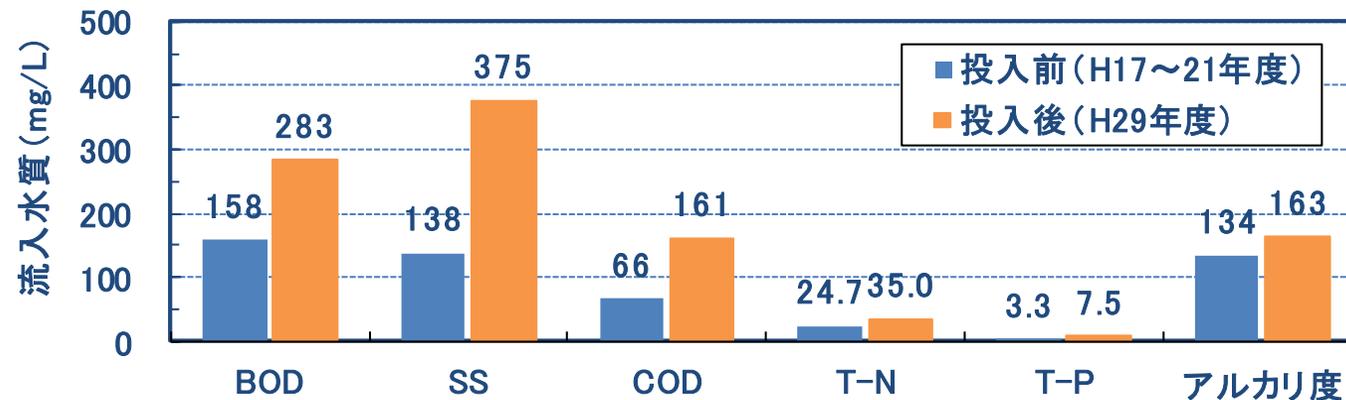
BOD 2,500(270~6,100)mg/L
SS 5,800(440~13,000)mg/L

4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【流入水質】

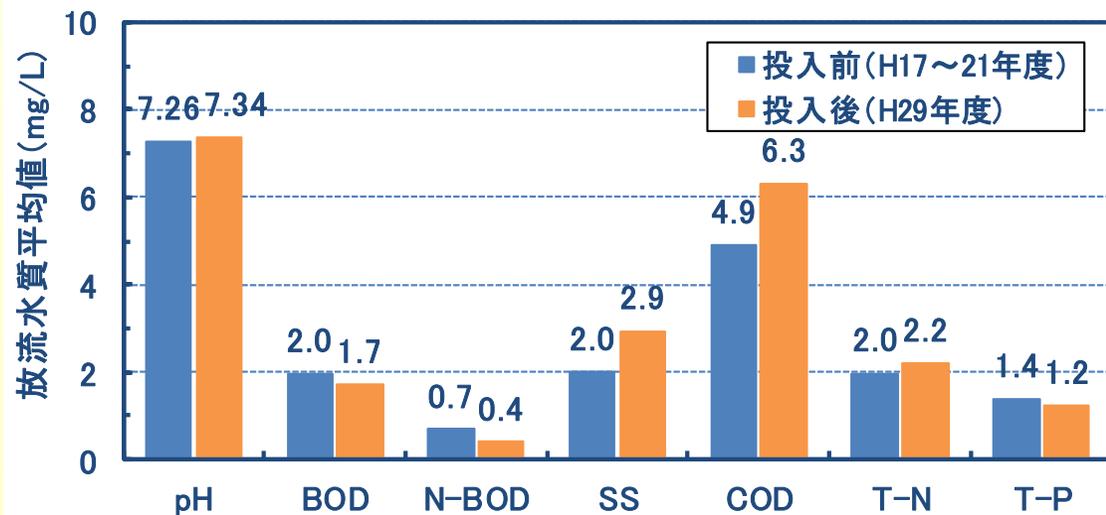
し尿投入前後における流入水質の比較

項目	流入水		
	投入前 (H17～21年度)	投入後 (H29年度)	投入後／投入前
BOD (mg/L)	158 (73 ~ 301)	283 (97 ~ 479)	1.8 倍
SS (mg/L)	138 (31 ~ 600)	375 (125 ~ 710)	2.7 倍
COD (mg/L)	66 (33 ~ 200)	161 (88 ~ 283)	2.4 倍
T-N (mg/L)	24.7 (15.4 ~ 49.8)	35.0 (20.7 ~ 87.0)	1.4 倍
T-P (mg/L)	3.3 (1.1 ~ 7.0)	7.5 (2.3 ~ 13.4)	2.3 倍
アルカリ度 (mg/L)	134 (58 ~ 184)	163 (96 ~ 190)	1.2 倍

- ① 流入水BOD1.8倍に上昇
- ② 流入水SS、COD、T-P濃度が投入前の2.3倍以上に上昇
- ③ 流入水T-N濃度が投入前の1.4倍に上昇



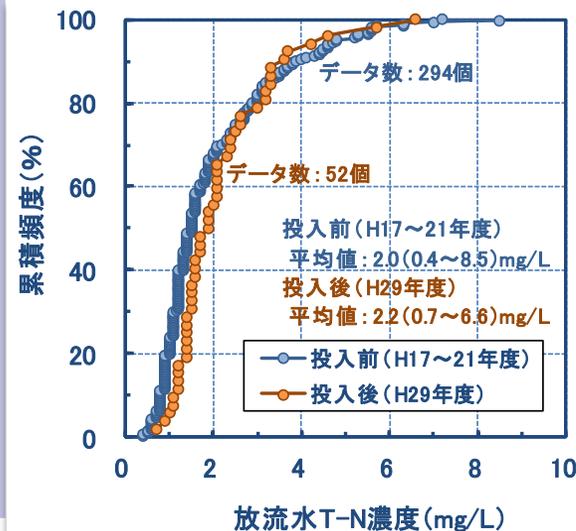
4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【放流水質】



し尿投入前後における放流水質の比較

【放流水アルカリ度】

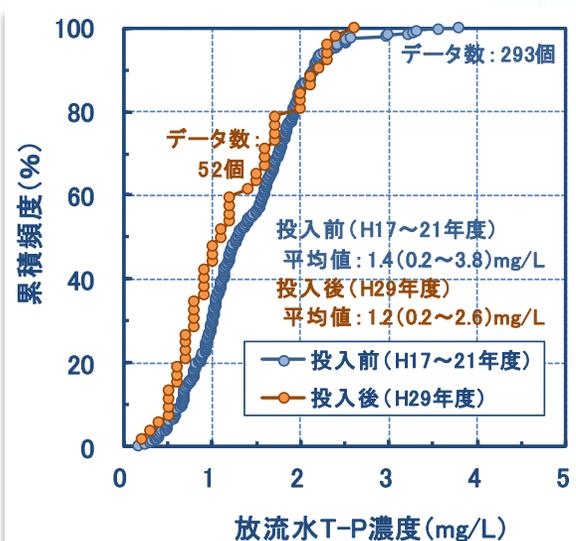
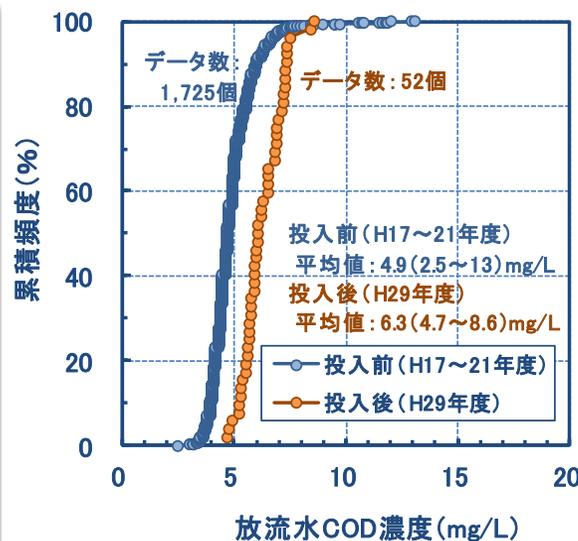
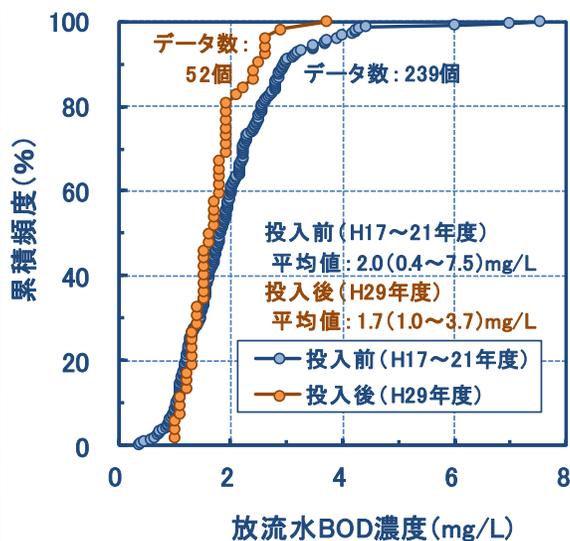
投入前 (H17~21年度): 60 (25~94) mg/L
 投入後 (H29年度): 87 (66~125) mg/L



①放流水BOD、T-N、T-P濃度に影響なく、投入前とほぼ同レベル

②放流水SS、COD濃度が投入前より各々0.9mg/L、1.4mg/L上昇

※若干悪化した水質項目があるが、影響なし



4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【反応タンク運転条件】

し尿投入前後における反応タンク運転条件

項目	投入前 (H17～21年度)	投入後 (H29年度)
HRT (時間)	45.6	41.9
BOD-SS負荷 (kgBOD/kgSS・日)	0.028	0.033
汚泥返送率 (%)	66.5	137.0
DO (mg/L)	0.5	1.9
pH (-)	6.83	6.96
MLSS (mg/L)	3,011	4,933
MLVSS/MLSS (%)	82.5	84.0
SVI (-)	330	200
RSSS (mg/L)	4,577	6,807

【投入後】

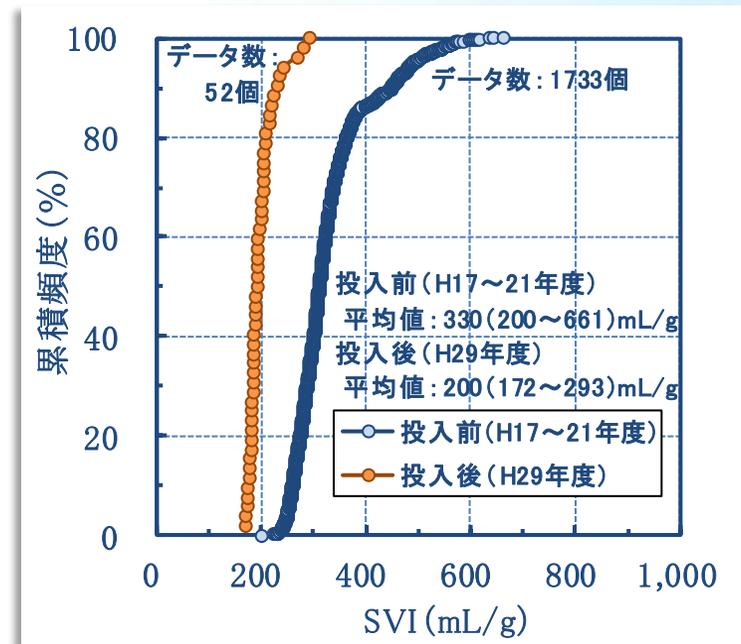
HRT: 平均値として41.9時間
(基準値24～36時間)

BOD-SS負荷: 平均値として0.033kgBOD/kgSS・日
(基準値0.03～0.05kgBOD/kgSS・日)

【投入後】

pH: 脱窒によるアルカリ度の回収により、
低下はなかった。

SVI: かなり改善された

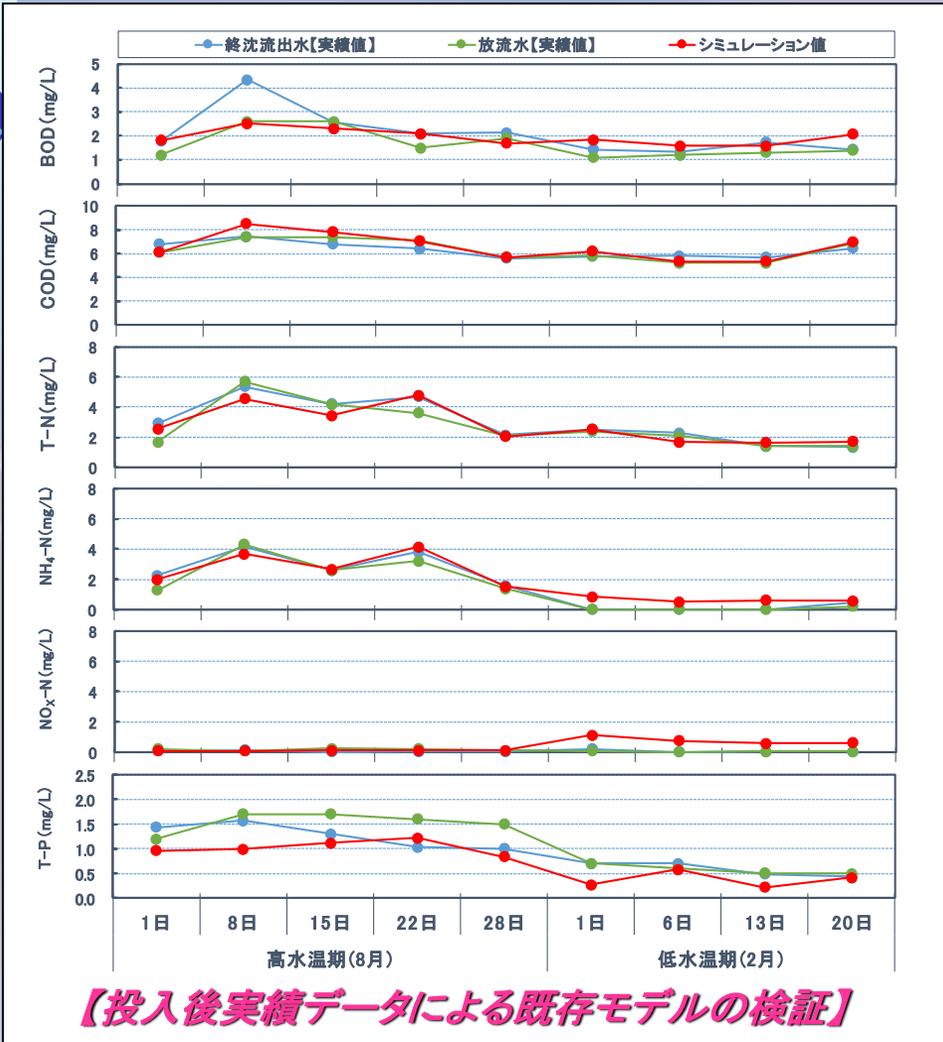


現況の運転状況の課題(省エネの観点から): MLSS標準値を超えている。

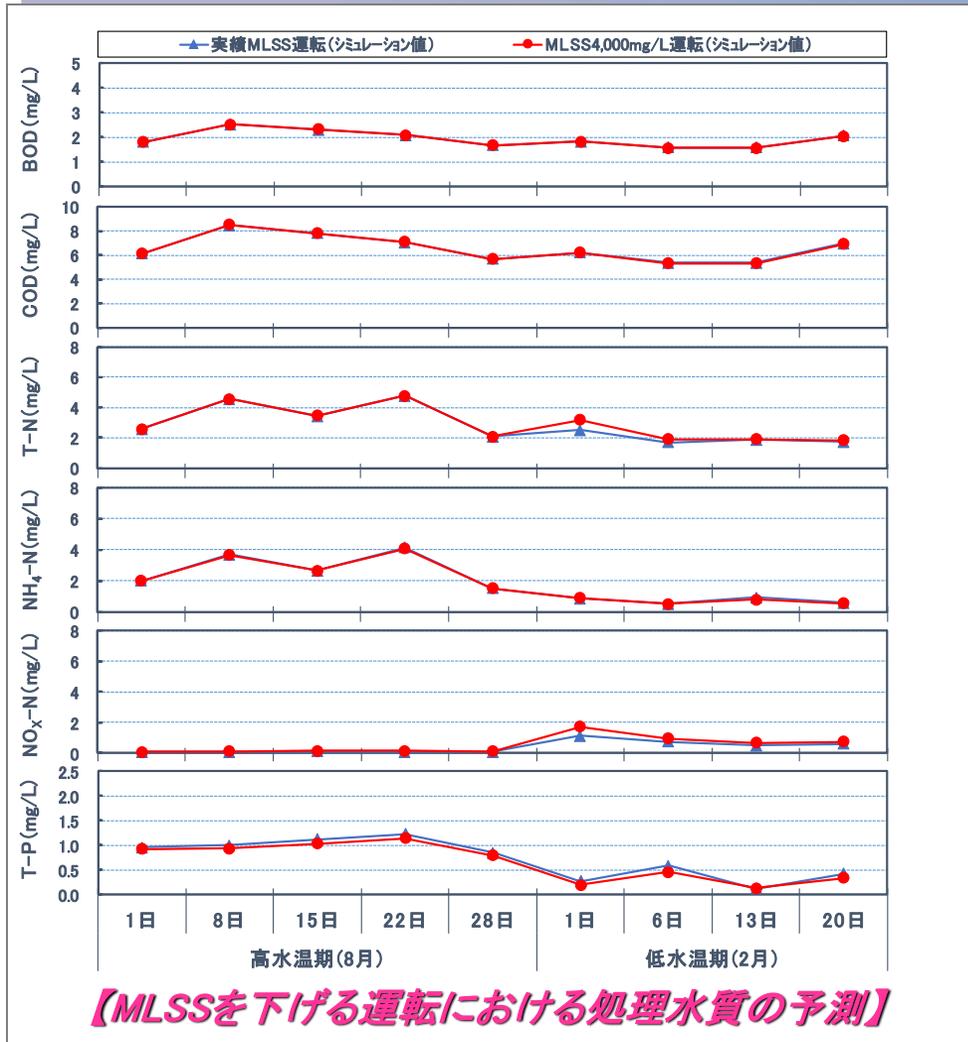
(3,000～4,000mg/Lに対して約5,000mg/L)

4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【省エネ運転方法の検討】

影響検討時に構築した下水処理場システムモデルによる検証・予測



【投入後実績データによる既存モデルの検証】



【MLSSを下げる運転における処理水質の予測】

【使用電力量の削減】 平均MLSS濃度 5,123 mg/Lから4,000mg/Lに下げる場合、必要な汚泥返送率は、121~137%から100~105%まで下がり、汚泥返送ポンプ使用電力量が20%削減可能



4. し尿等投入後処理機能に関する追跡調査【結論】

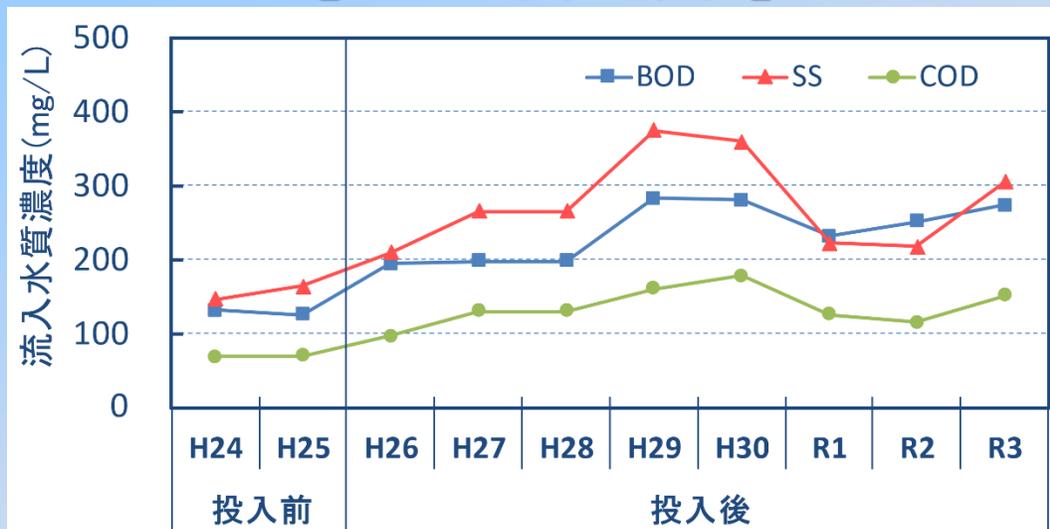
【処理機能に関する調査結果】

- ①対象処理場(OD法)は、施設能力に対して下水の流入率が57%と比較的低かったこと、事前検討による設備の見直しを行ったことで、流入下水に対してし尿等(し尿11%、浄化槽汚泥89%)を1.8%希釈・投入しても、放流水CODが投入前より1.4mg/L程度高くなった以外、他の水質項目は影響なく運用されている。
- ②活性汚泥モデルの適用は、し尿等受入に伴う水質の予測と下水処理機能を評価する際に有効であるとともに、処理水質の確保と省エネルギーの両面を考慮した運転方針の設定にも有効である。

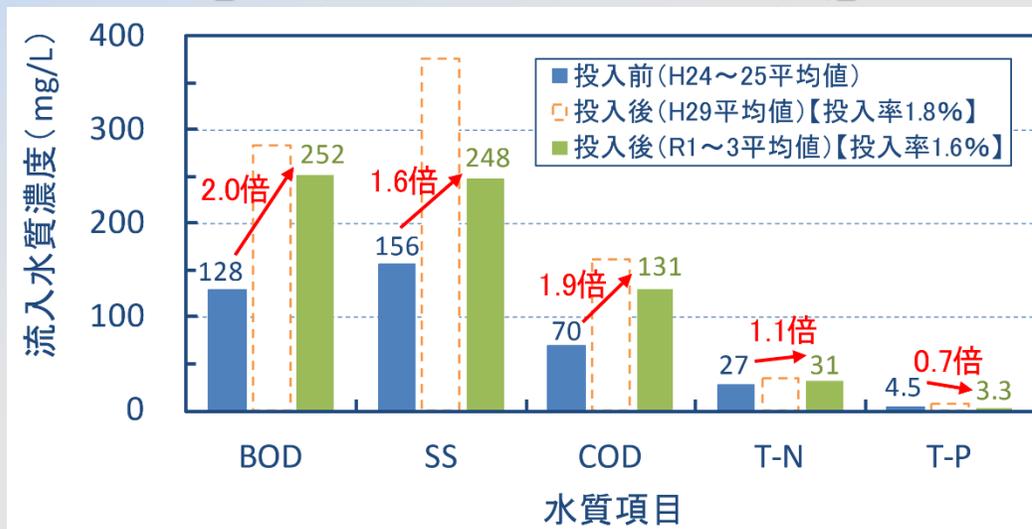
調査対象としたオキシデーションディッチ法(OD法)処理施設は、十分なHRTとSRTを確保されているとともに、投入方法を工夫し、流入状況の変動に対して曝気強度・パターンを適切に調整したことにより、良好な放流水質が得られている。

5. 近年(R1~3)の処理状況 【流入水質】

【流入水質の推移】



【近年(R1~3)の流入水質】

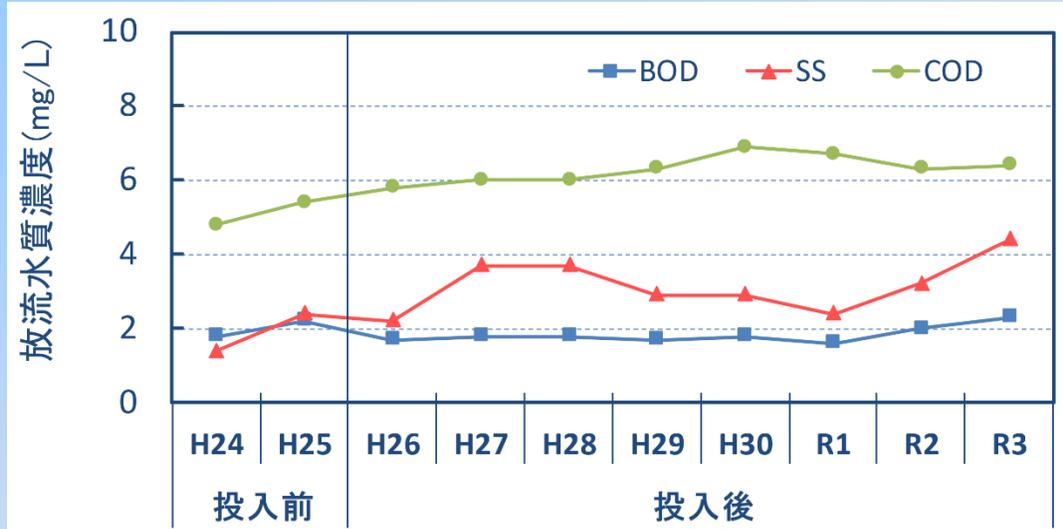


- ① 流入水BOD、SS、COD濃度が投入前の1.6~2.0倍に上昇
 - ② 流入水T-N濃度が投入前の1.1倍に上昇
 - ③ 流入水T-P濃度が投入前の0.7倍に下降
- ※重要な流入水質項目となるBODは、投入前の2.0倍に上昇

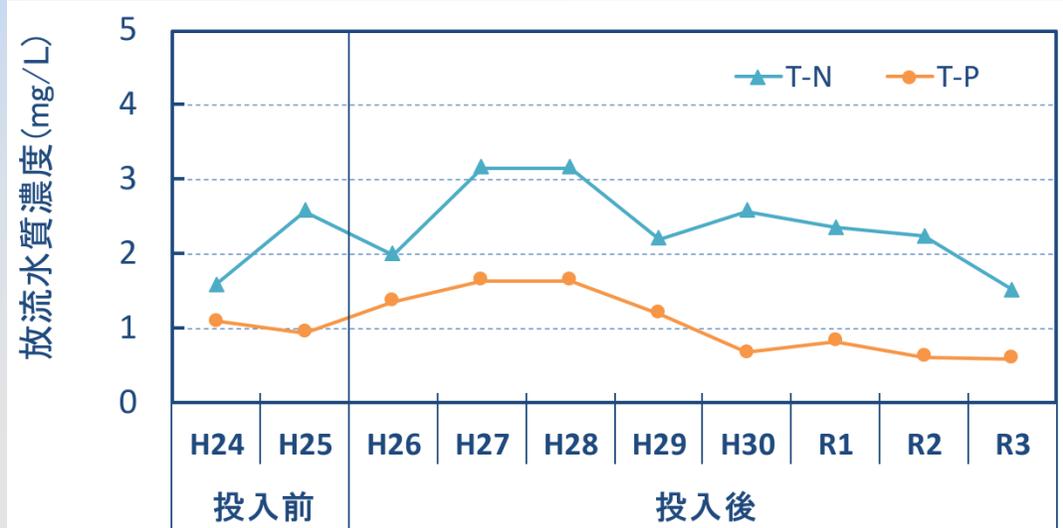
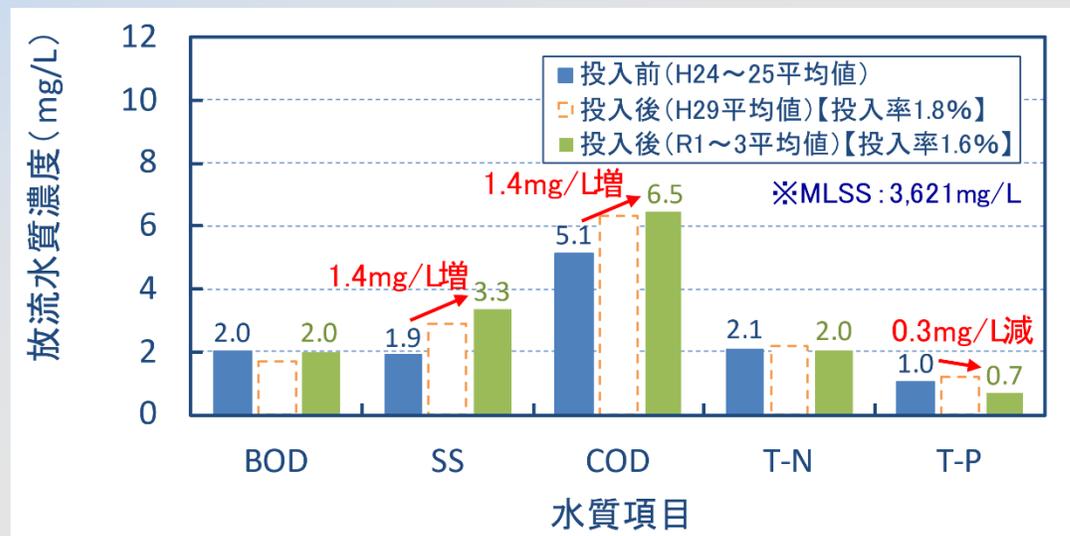


5. 近年(R1~3)の処理状況 【放流水質】

【放流水質の推移】



【近年(R1~3)の放流水質】

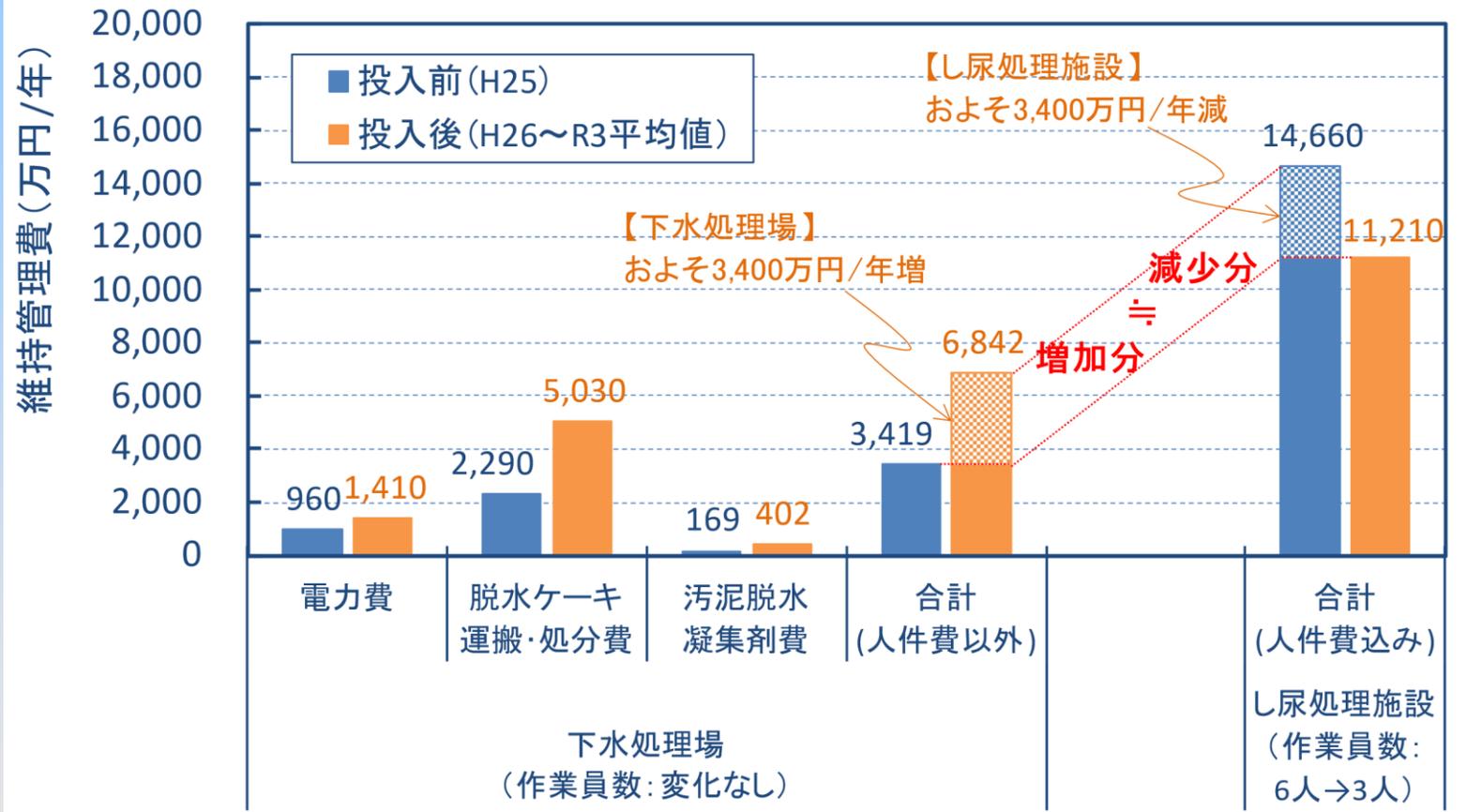


- ①放流水BOD、T-N濃度に影響なく、投入前とほぼ同レベル
 - ②放流水SS、COD濃度が投入前より各々1.4mg/L上昇
 - ③放流水T-P濃度が投入前より0.3mg/L下降、これは、流入水T-P濃度が投入前より低かったことによるもの
- ※1回目追跡調査と同様に影響なし



6. し尿等投入による経済効果【維持管理費】

【維持管理費：し尿処理施設での減少と下水処理場での増加】



【し尿処理施設】

維持管理費は、し尿等の前処理と希釈・圧送のみによるもので、投入前よりおよそ3,400万円/年減

【下水処理場】

維持管理費は、投入前よりおよそ3,400万円/年増

その中、脱水ケーキ運搬・処分費の増加は、2,740万円/年と最も多く、増加分全体の80%を占めている

し尿等投入後、汚泥濃縮・脱水設備は、稼働率が上昇したことにより、修繕費が増加傾向

※全体からみた維持管理費は、し尿等投入の前後、およそ変化なし

【建設費について】

- ① し尿処理施設では、前処理に関わる部分以外には更新が不要
- ② 下水処理場では、横軸型曝気装置を縦軸型曝気装置に更新した時に投入し尿等の負荷を考慮



7. し尿等投入による環境影響【臭気・腐食等、放流水色度】

【臭気・腐食等について】

①投入地点(マンホール)

- ・投入地点(マンホール)の上部周辺(地上)では、臭気の発生はなし
- ・投入地点(マンホール)では、やや腐食がみられるが、特に問題なし

※し尿等前処理施設(ポンプ圧送) → 投入地点(マンホール)

地下水により希釈(約13倍)・投入する方法は、し尿等投入を開始してから8年間を経過しても臭気・腐食が防止されている要因と考えられる。

②投入地点からの下流管渠

- ・下流管渠マンホールの上部周辺では、臭気発生などの問題はなし
- ・し尿等投入により下流管渠での固形物堆積等の問題が発生したことはない

【放流水色度について】

色度の測定は行っていないが、投入前後には差はなく放流水の着色は見られない。

※その原因としては、「地下水による13倍希釈」と「し尿・浄化槽汚泥におけるし尿の比率が1割程度しかない」である。 ※し尿には胆汁色素を主体とした色度成分が含まれ、色度は7,000度と非常に高い。これらは難分解性で活性汚泥法では除去できないため、し尿投入後、処理水色度の上昇が懸念される。一般的な下水処理水の色度は30～50度程度である。

【参考資料：「し尿受入れの検討とその実際(その1)」月刊下水道Vol.22 No.2 (1999.2)】

8. 全国における下水処理場し尿投入の状況(1)【令和元年度】

【全国し尿投入下水処理場数とその分布】

都道府県	下水処理場数 (箇所)	都道府県	下水処理場数 (箇所)
北海道	27	京都府	3
青森県	1	大阪府	10
岩手県	1	兵庫県	12
宮城県	3	鳥取県	2
福島県	1	岡山県	7
茨城県	2	広島県	2
群馬県	1	山口県	5
千葉県	2	香川県	1
東京都	1	愛媛県	1
神奈川県	4	福岡県	6
新潟県	4	佐賀県	2
富山県	2	長崎県	2
石川県	5	熊本県	5
福井県	2	大分県	4
長野県	2	宮崎県	6
岐阜県	3	鹿児島県	1
愛知県	8	沖縄県	2
滋賀県	2		
		合計	142

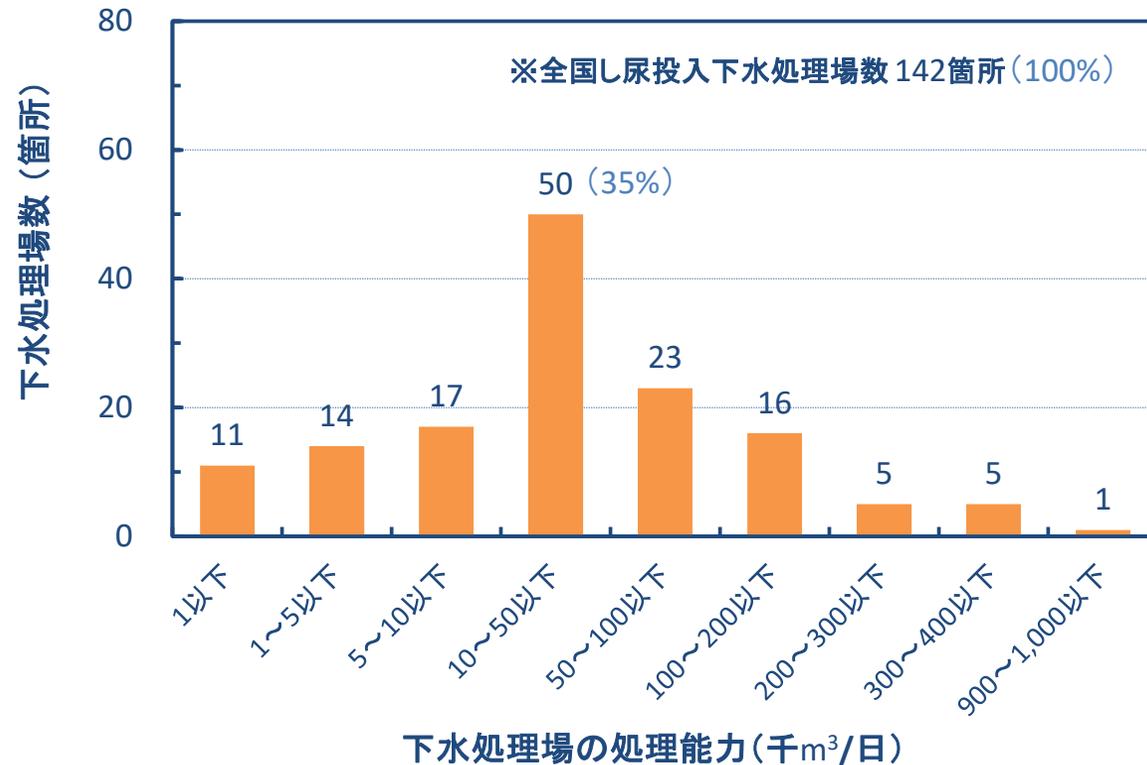


※令和元年度版「下水道統計」データにより集計

8. 全国における下水処理場し尿投入の状況(2)【令和元年度】

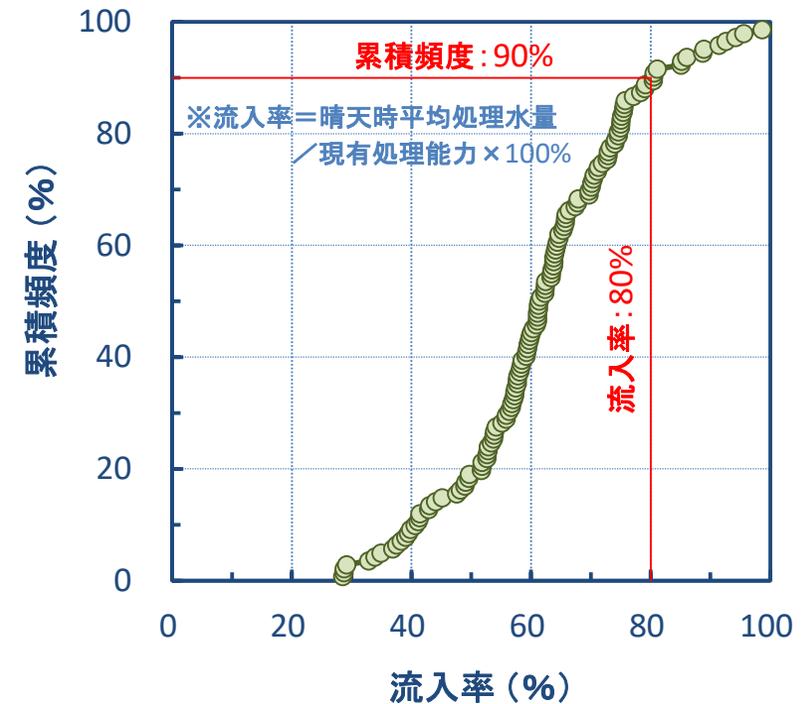
【全国し尿投入下水処理場数とその分布】

※令和元年度版「下水道統計」データにより集計



※処理能力が1~5万m³/日の下水処理場は、50箇所と最も多く、全体の35%を占めている

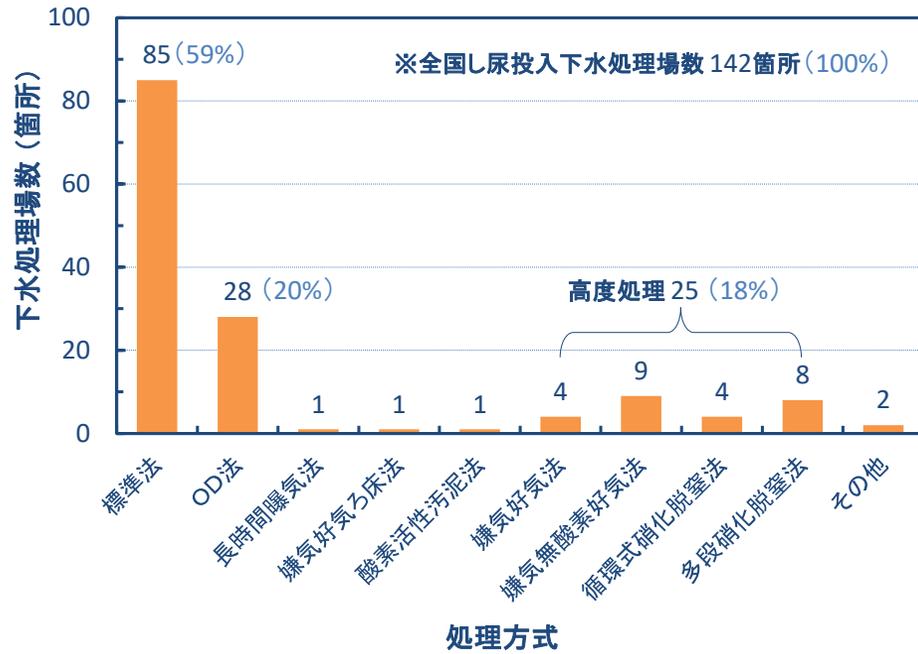
※全国し尿投入下水処理場数の9割は、流入率が80%以下



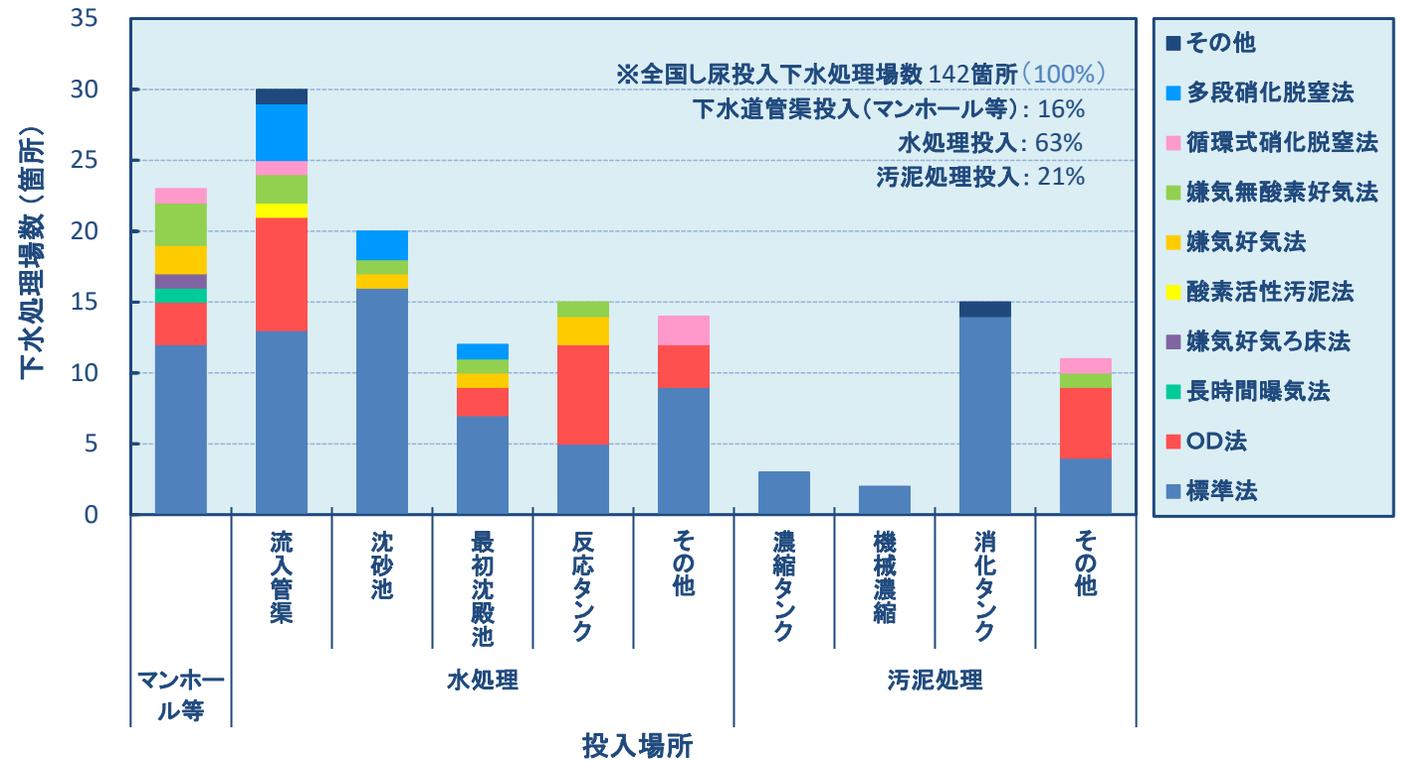
8. 全国における下水処理場し尿投入の状況 (3)【令和元年度】

【全国し尿投入下水処理場の処理方式と投入場所】

※令和元年度版「下水道統計」データにより集計



※反応タンクにし尿を投入している下水処理場は15箇所あり、初沈のない処理方式の以外には、標準法5箇所、嫌気好気法2箇所、嫌気無酸素好気法1箇所



※全国し尿投入下水処理場の処理方式は、標準法が85箇所 (全体の59%) と最も多く、次いでOD法が28箇所 (20%)、高度処理法が25箇所 (18%) を占めている

これらの処理方式と投入場所について、嫌気好気ろ床法は工夫が必要の以外、いずれの場合も投入影響の事前検討と投入後の追跡調査には、活性汚泥モデル(ASM)活用による評価手法が適用



ご清聴ありがとうございました！

【謝 辞】

本研究に多大なるご協力を頂きましたN市関係各位に謝意を表します。