東 京 都 下 水 道 局

技 術 調 査 年 報

−2015−

Vol.39

Annual Report on Technical Research & Development

Bureau of Sewerage , Tokyo Metropolitan Government

平成 28 年 3 月

東京都下水道局

目　次

本書について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
＜参考資料＞　特許などの取得状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

要旨集 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

論文集 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35

No.		タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
		1　安全性・快適性の向上				
		1-1　再構築技術				
1	1-1-1	横坑掘進用エントランスの考案 ～大深度施工時の掘進マシン及びトンネルの止水保持～	建設部 土木設計課	金井　伸二	5	37
2	1-1-2	小松川第二ポンプ所建設その11工事におけるケーソン沈設に伴う近接構造物への影響と対策について	第一基幹施設再構築事務所 工事第一課	山口　貴士	6	43
3	1-1-3	大礫径・流速の速い地下水・急勾配におけるシールド施工について～豊島区目白三丁目、新宿区下落合二丁目付近再構築その3工事～	第一基幹施設再構築事務所 工事第二課	貞本 健志	7	48
		1-2　浸水対策技術				
4	1-2-1	時間75ミリの降雨に対応した下水道幹線の設計手法について	第二基幹施設再構築事務所 設計課	渡邊　裕介	8	55
		1-3　震災対策技術				
5	1-3-1	汚泥処理施設における安定的な電源確保について～ガスエンジン発電機の導入～	建設部　設備設計課	片岡　紘亮	9	59
6	1-3-2	町屋ポンプ所における非常用発電機の設置について～隅田川を利用した機器搬入の記録～	北部下水道事務所 ポンプ施設課	大槻 俊介	10	63
		2　水環境向上、環境負荷低減				
		2-1　合流式下水道の改善技術				
7	2-1-1	下水道施設の上部空間の活用～芝浦水再生センター上部利用事業～	計画調整部　事業調整課	晴山　雄太	11	68
8	2-1-2	目黒川における合流式下水道の改善の取組	計画調整部　事業調整課	中道　元紀	12	74
9	2-1-3	水理模型を用いた合流改善対策用貯留管の水理現象及び圧縮空気塊に関する検証	南部下水道事務所　建設課	遠藤　光	13	79
		2-2　水処理技術				
10	2-2-1	活性汚泥中の細菌叢に関する基礎検討調査	計画調整部　技術開発課	濵本　亜希	14	86
11	2-2-2	水再生センターにおける直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（LAS）の実態調査	施設管理部 環境管理課	樫原　慎久	15	96
12	2-2-3	好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理）の開発	施設管理部 環境管理課	葛西　孝司	16	105
13	2-2-4	北多摩二号水再生センターにおけるNH_4-N＋DO制御について	流域下水道本部　技術部 北多摩二号水再生センター	小泉　僚平	17	117
14	2-2-5	処理性能と省エネルギー両立のためのステップA_2O法の処理条件	流域下水道本部　技術部 北多摩二号水再生センター	和光　一紀	18	123
15	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	19	133
16	2-2-7	浅槽反応槽での窒素削減に向けた新たな取り組みについて	西部第一下水道事務所　落合水再生センター	佐藤　麻貴	20	141
		2-3　汚泥処理技術				
17	2-3-1	汚泥焼却炉の低温廃熱を利用した補助燃料削減の取組	施設管理部　施設管理課	佐藤　崇仁	21	145

No.		タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
		2-4 地球温暖化対策技術				
18	2-4-1	エネルギー自立型焼却システムの開発	計画調整部 技術開発課	竹谷 修平	22	148
19	2-4-2	水処理からのN_2Oの生成・排出抑制シミュレーション調査	計画調整部 技術開発課	濵本 亜希	23	157
20	2-4-3	森ヶ崎水再生センター太陽光発電設備工事の設計について	建設部 設備設計課	根岸雄一郎	24	171
21	2-4-4	汚泥焼却炉の計画的管理による温室効果ガスの削減	流域下水道本部 技術部 施設管理課	北島 秀彦	25	178
22	2-4-5	二軸管理手法を用いた水質改善と省エネルギー化の両立の取り組みの拡大について	流域下水道本部 技術部 施設管理課	伊藤喜代志	26	182
23	2-4-6	ターボ型流動焼却炉導入における温室効果ガス削減効果の検証	東部第二下水道事務所 葛西水再生センター	小川 誠	27	190
		3 維持管理向上、事業効率化他				
		3-1 維持管理向上、効率化などの技術				
24	3-1-1	設備アセットマネジメントの構築に向けた設備保全管理システムの実用化検証	施設管理部 施設保全課	石森 健二	28	196
		4 国際会議発表論文				
		4-1 第9回IWA（国際水協会）世界会議 -2014.9.21～9.26 ポルトガル・リスボン-				
25	4-1-1	アセットマネジメント手法と再構築のスピードアップ Asset Management Technique and Accelerated Restructuring of Sewerage System	計画調整部 計画課	森 勇人		
		英語論文			(203)	203
		日本語（訳）			29	207
26	4-1-2	国指定重要文化財「旧三河島汚水処分場喞筒場施設」保存・復原工事 Preservation and Restoration Project for Important Cultural Properties in Japan Mikawashima Sewage Disposal Plant and Pumping Station Facilities, National Important Cultural Assets	施設管理部 施設保全課	渡邊 龍也		
		英語論文			(210)	210
		日本語(技術調査年報2014掲載論文参照)			30	-
		4-2 第5回EWA（欧州水協会）/WEF（米国水環境連盟）/JSWA（日本下水道協会）特別会議 (Water and Energy 2015) -2015.6.7～6.10 米国・ワシントンD.C-				
27	4-2-1	温室効果ガス削減と水質改善を両立するための新たな下水処理施設の維持管理の取組 A New O&M Approach for both Improvement of Water Quality and Reduction of Greenhouse Gas Emissions in Wastewater Treatment Plants	計画調整部 計画課	森川 拓未		
		英語論文			(213)	213
		日本語（訳）			31	224
28	4-2-2	下水道事業におけるエネルギー基本計画「スマートプラン2014」について Basic Energy Plan "Smart Plan 2014" for sewerage system	計画調整部 技術開発課	竹谷 修平		
		英語論文			-	231
		日本語（訳）			32	242
29	4-2-3	アンモニア計と硝酸計を用いた同時硝化脱窒処理活性汚泥プロセスの開発 Development of Simultaneous Nitrification and Denitrification Process in Aerobic Tank of Suspended Growth Treatment Process using Ammonia and Nitrate Sensors	東部第一下水道事務所 お客さまサービス課	湯田 恵		
		英語論文			(251)	251
		日本語（論文は2-2-3と同様の内容のため掲載省略）			33	-

Copyright©(2016) by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government
All rights reserved. No Parts of this report may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.
The mention of trade names or commercial products in this report is for illustrative purposes and does not constitute endorsement of recommendation for use by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.
本書に関する権利は、東京都下水道局にあります。したがって、本書の全部又は一部の転載、複製は、東京都下水道局長の文書による承認が必要です。また、本書の中の商品名又は製品名は、事例として示したものであり、東京都下水道局が使用上の性能を確認したり、推奨したりするものではありません。

本書について

◆本書の目的

本書は、東京都下水道局で行った下水道技術の研究と開発の成果を共有し、将来へ技術を継承することを通じて、下水道技術の維持向上を図ることを目的として発行しています。

① 局内の技術情報を網羅し、技術情報の共有による職員相互の技術力の維持向上と技術の継承及び技術的課題の糸口となること

② 下水道事業に関わる課題と課題解決への取組みの成果について、先駆的に情報発信を行い、産学公の技術交流を深め、局の事業運営の効率化に寄与すること

◆本書の構成

本書は、平成 26 年度に局内各部署が実施した下水道技術に関する調査・研究・計画・設計・工事についてまとめたものです。各論文は、平成 28 年 2 月に策定した「経営計画 2016（東京都下水道局)」の経営方針に沿った３つの技術テーマ別（安全性・快適性の向上を図る技術、良好な水環境と環境負荷の低減を図る技術、維持管理の向上・事業の効率化などを図る技術）に分類して掲載しています。

１ 安全性・快適性の向上・・・・・・・・・・・・ 6 編
２ 水環境向上、環境負荷低減・・・・・・・・・・17 編
３ 維持管理向上、事業効率化他・・・・・・・・・ 1 編
４ 国際会議発表論文・・・・・・・・・・・・・・ 5 編
計 29 編

◆本書の沿革・閲覧場所

本書は、昭和 52 年（1977 年）9 月の「技術調査報告書」を初版として、昭和 54 年度（1979 年）からは「技術調査年報」として毎年発行しており、2015 年版は 39 刊目にあたります。局内および都庁内の各局、研究機関、大学、政令指定都市等に 2005 年版まで配布していましたが、2006 年版からは東京都下水道局公式ホームページでの掲載を主体として利活用を図ることとし、各機関への冊子の配布を取りやめています。

本書や過去の技術調査年報の論文は、東京都下水道局公式ホームページに掲載しています。(http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn/gn.htm)

なお、都民情報ルーム(都庁第一本庁舎３階)、都立中央図書館、都立多摩図書館において本書を閲覧することができます。

◆本文中の用語

本文中の用語は、「下水道用語集 2000 年版」((社)日本下水道協会) に準拠しています。ただし、以下の用語は、東京都下水道局で使用している用語としています。

・人孔（マンホール）
・ポンプ所（ポンプ場）
・第一沈殿池（最初沈殿池）
・第二沈殿池（最終沈殿池）

（本書に関するお問合せ先）
東京都新宿区西新宿 2-8-1 東京都庁第二本庁舎 28 階
東京都下水道局 計画調整部 技術開発課 電話 03-5320-6606

＜参考資料＞　特許などの取得状況（産業財産権の件数）

東京都下水道局では職員が着想したアイデア、民間企業などとの共同研究や工事請負契約などから生まれた発明について、特許庁へ出願を行い、多数の産業財産権を取得しています。

下表は当局が所有している産業財産権の分野別の登録件数を示したもので、平成 26 年度末現在の登録件数は合計 123 件にのぼります。

下表以外で出願中の産業財産権が平成 26 年度末現在 12 件あり、登録済のものと合わせると、当局所有の産業財産権の件数は 135 件になります。

産業財産権　登録件数一覧（平成 26 年 3 月末時点）（単位：件）

部門	分野	特許	実用新案	意匠	商標	計
管きょ技術	管きょ	１９	1	2	0	２２
	雨水対策	2	0	0	0	2
管きょ技術計		**２１**	**1**	**2**	**0**	**２４**
維持管理	維持管理	１３	0	0	0	１３
	設備	２２	0	0	0	２２
	計測	7	1	0	2	１０
	環境	5	0	0	0	5
維持管理計		**４７**	**1**	**0**	**2**	**５０**
水処理技術	水処理技術	２８	0	0	0	２８
水処理技術計		**２８**	**0**	**0**	**0**	**２８**
汚泥処理技術	汚泥処理技術	１５	0	0	0	１５
汚泥処理技術計		**１５**	**0**	**0**	**0**	**１５**
有効利用	光ファイバー	1	0	0	0	1
	汚泥の資源化	1	0	0	4	5
	熱利用	0	0	0	0	0
有効利用計		**2**	**0**	**0**	**4**	**6**
合計		**１１３**	**2**	**2**	**6**	**１２３**

要　旨　集

番号	1-1-1	表題	横坑掘進用エントランスの考案 ～大深度施工時の掘進マシン及びトンネルの止水保持～

内　容	シールド工法の発進・到達時の止水対策は、坑口に仮設のゴムパッキンとフラップを設置し、立坑背面を地盤改良することで止水性を確保し、掘進後は支障となるため、仮設は通常撤去されるのが一般的である。 今回計画された芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間連絡管工事は、最大土被りが概ね 58m の大深度、高水圧下での工事となり地盤改良が困難であった。このため、通常の止水対策に代えて、工事費の削減と工事期間の短縮を図れる、恒久的な止水装置「横坑掘進用エントランス」を考案した。			
キーワード	坑口、超大深度、止水、連絡管			
処理区名	芝浦処理区、森ケ崎処理区		位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	土木		施策区分	再構築
状態区分	設計		新規性	新規知見あり
実施年度	平成 25 年度		全体期間	
担当部署	建設部　土木設計課			
発 表 履 歴	局内	平成 26 年度　下水道局公開研修「下水道新技術」		
	局外	もんけん（東京都建設技術協会）69 号，平成 27 年 6 月		
調査方法				
関連情報				

番号	1-1-2	表題	小松川第二ポンプ所建設その 11 工事におけるケーソン沈設に伴う近接構造物への影響と対策について

内　容

小松川第二ポンプ所は、既設の大島ポンプ所と小松川ポンプ所流域の雨水流出量の増大に伴う対応と、合流式下水道の改善対策として、雨水貯留池の整備を行うとともに、大島ポンプ所の放流先を流れの少ない旧中川から荒川に変更するために新設するポンプ所である。

本工事は、小松川第二ポンプ所建設のため、ニューマチックケーソン工法により東西方向で最大 38.8m、南北方向で 26.5m のケーソンを T.P.-42.24m まで沈下させるものである。

ケーソン沈設は、傾斜・揺動の繰返しを伴うことから、周辺地盤に傾斜・揺動による地盤の引き込みと押し込みによる影響が交互に発生するため、近接する離隔約 26m の荒川ロックゲートへの影響が懸念された。影響を最小限にするため、事前にロックゲート及び周辺地盤への変状等を影響解析を行って対策工を検討した。

検討の結果、ケーソン沈設による周辺地盤への影響低減対策として、引き込みについては鋼矢板を、押し出しについては場所打ち杭を対策工とする併用工法を採用した。

対策工の施工は、ロックゲートの挙動を計測管理しながら慎重に進め、ロックゲートへの影響を管理値内に抑え、無事に竣工を迎えることができた。

キーワード	小松川第二ポンプ所、ニューマチックケーソン工法、水平変位量、近接施工		
処理区名	砂町処理区	位置区分	ポンプ所
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、合流改善
状態区分	工事	新規性	
実施年度	平成 24 年度	全体期間	平成 23 年度～平成 27 年度
担当部署	第一基幹施設再構築事務所　工事第一課　山口　貴士		
発表履歴	局内	平成 26 年度　設計・工事事例発表会	
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報			

番号	1-1-3	表題	大径礫・流速の速い地下水・急勾配におけるシールド施工について ～豊島区目白三丁目、新宿区下落合二丁目付近再構築その３工事～

内　容	「豊島区目白三丁目、新宿区下落合二丁目付近再構築その３工事」は、当該地域における既設管きょの雨水排除能力の増強を図るため、新たな管きょ（⊙ 2400㎜）を泥土圧シールド工法によって施工するものである。 当シールド工事の通過地層は、上層から洪積の粘性土、礫、砂質土からなり、このうち礫層は50㎜～250㎜に及ぶ大径礫で構成され､その層内には被圧された地下水が1.2㎝/分程度の速い流速で流れていることが確認された。さらに、本工事では礫層をできるだけ避け、粘性土を掘削する方針で線形が計画されていたが、急激に地形及び地層構造が変化する一部区間では、礫層を急勾配（105.1‰）で掘進する必要があった。 これらの課題に対して行った、①大径礫への対策、②流速の速い地下水への対策、③急勾配施工への対策について報告する。

キーワード	泥土圧シールド工法　大径礫　流速の速い地下水　急勾配施工　礫層			
処理区名	三河島処理区		位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	浸水対策
状態区分	工事		新規性	
実施年度	平成 25 年度～平成 27 年度		全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度
担当部署	第一基幹施設再構築事務所　工事第二課　工事係　貞本　健志			
発 表 履 歴	局内	平成 26 年度　設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法				
関連情報				

番号	1-2-1	表題	時間 75 ミリの降雨に対応した下水道幹線の設計手法について

内　容	東京都下水道局では、平成 25 年に都の施設整備水準である 1 時間 50 ミリを超える集中豪雨などにより 23 区内で 700 棟を超える甚大な浸水被害が発生したことから、「豪雨対策下水道緊急プラン」を策定し、雨水整備水準のレベルアップを含めた対策を実施している。 本稿では、この対策のうち市街地において初めて 1 時間 75 ミリの降雨に対応できる施設を建設する「75 ミリ対策地区」の一つに指定された蛇崩川幹線流域を対象として、蛇崩川幹線を増強する新たな施設整備計画及びその設計手法について報告する。		
キーワード	豪雨対策下水道緊急プラン　75 ミリ対策地区　蛇崩川幹線流域　設計手法		
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	浸水対策
状態区分	計画	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 26 年度
担当部署	第二基幹施設再構築事務所　設計課　事業調査係　渡邊　裕介		
発 表 履 歴	局内	平成 26 年度　建設部門業務発表会	
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	1-3-1	表題	汚泥処理施設における安定的な電源確保について～ガスエンジン発電機の導入～

内　容	東日本大震災の発生後、計画停電の実施や電力使用制限令が発令され、当局の下水処理施設では、電力需要に対し買電電力が供給不足に陥った。汚泥処理施設においては貯留設備の活用や水再生センター間の送泥調整等を行い、処理量を低下させることで対応した。このような停電や電力不足に対応する汚泥処理施設の自己電源の増強として、南部汚泥処理プラントに都市ガスによるガスエンジン発電設備（7,800kW）を整備する。発電した電力は停電時に使用するほか、電力需給逼迫時における電源確保も実現する。ここでは、ガスエンジン発電設備の概要、機器構成及び他の発電機機関との比較検討等について報告する。

キーワード	計画停電、ガスエンジン、発電設備、汚泥処理、自己電源		
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	汚泥
職種区分	設備	施策区分	危機管理、エネルギー　熱利用
状態区分	設計	新規性	
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度
担当部署	建設部設備設計課　片岡紘亮　甲田裕章　齋藤健士　青柳正俊		
発 表	局内		
履 歴	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報			

番号	1-3-2	表題	町屋ポンプ所における非常用発電機の設置について～隅田川を利用した機器搬入の記録～

内　容	本稿は、町屋ポンプ所に非常用ガスタービン発電設備を設置した工事の記録である。 当ポンプ所はディーゼル発電機を既に備えているが、事故又は震災時の計画停電等で停電した場合、それだけでは雨水ポンプを全台運転することができない。そのため非常用発電機を増設し自己電源の増強を図った。 敷地の都合上、ポンプ所建屋と隅田川に挟まれた狭隘なスペースに発電機を設置するため、河川から台船で発電機を運搬し、クレーン台船を用いて堤防を越えて搬入した。また、増設発電機設置スペースの基礎築造のため、鋼管杭の打ち込みが必要となったが、東京メトロ千代田線のシールドトンネルとの離隔 1.8m の近接施工となった。 今回工事では経済産業省、尾久消防署、都環境局ほか多岐にわたる関係部署との調整を行った。このほか、近隣住民に対して事前に工事の内容を分かりやすく示したパンフレットを配布するなどのこまめな対応を行った。これらの取組により事故ゼロ、苦情ゼロで工事を完了した。

キーワード	非常用発電設備、クレーン台船、杭打ち、近隣住民			
処理区名	三河島		位置区分	ポンプ所
職種区分	土木、設備		施策区分	震災対策、危機管理
状態区分	工事		新規性	
実施年度	平成 25 年度		全体期間	
担当部署	北部下水道事務所ポンプ施設課ポンプ所設備整備係　大槻俊介			
発　表 履　歴	局内	平成 26 年度　設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法				
関連情報				

番号	2-1-1	表題	下水道施設の上部空間の活用 ～芝浦水再生センター上部利用事業～

内　容

芝浦水再生センターでは、品川地区再開発や新駅開業等、周辺のまちづくりの機運の高まりを受け、区、住民及び民間事業者と連携した施設上部利用事業を行った。

本事業では、既存の施設上部に覆蓋を設置するとともに、下水道事業として初めて立体都市計画制度を活用し、再構築する雨天時貯留池の上部に環境性能の高い業務・商業ビル「品川シーズンテラス」を整備した。

また、環境モデル都市形成の中核を担う拠点づくりに向け、雨天時貯留池の整備、下水熱の活用、緑豊かなオープンスペースの整備を行った。品川シーズンテラス整備にあたっては、民間の建築・土木の最先端技術・ノウハウを活用することで、省エネ設備や自然エネルギーを積極的に活用し、国内最高水準の環境性能評価が得られた。

今後は、他の施設についても、計画段階から地元の声や地域特性などを踏まえ、地元自治体や民間事業者など多様な主体と連携して、上部空間の複合的な活用を検討し、幅広い観点から地域のまちづくりに貢献していく。

以上の通り、本件は、施設再構築に合わせ、上部空間を有効活用し、業務商業ビル建設によるにぎわいと、2.6ha の緑豊かな広場を創出することで、周辺のまちづくりに貢献した事業展開の事例である。

キーワード	再構築　上部利用　まちづくりとの連携　下水熱　雨天時貯留池		
処理区名	芝浦処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	土木	施策区分	再構築
状態区分	計画、設計、工事	新規性	
実施年度	平成 23 年度～平成 26 年度	全体期間	平成 23 年度～平成 26 年度
担当部署	計画調整部　事業調整課　施設計画係　晴山　雄太		
発表履歴	局内		
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会 平成 27 年度　東京都建築技術発表会	
調査方法			
関連情報	経営計画 2013		

番号	2-1-2	表題	目黒川における合流式下水道の改善の取組

内　容	東京都目黒区、品川区を流れる目黒川は、上流が旧河川に蓋かけをした合流式下水道の幹線であり、雨天時には雨水で希釈された汚水の一部が吐口から放流されるため水質改善が課題となっている。 合流式下水道の改善として、これまで雨水貯留機能を兼ねた遮集幹線を整備したが、河川整備が進んでいないため浸水対策の貯留管として暫定利用してきた。 今回、河川管理者と連携し、河川整備の進捗に合わせ目黒川への放流量を拡大する方針となったことから、浸水対策効果を損なうことなく、遮集幹線を本来目的である合流改善として利用することを検討した。 流出解析モデルを用いて河川の安全性の検証を行い、合流式下水道の改善と浸水対策が両立できる対策であることを証明できた。

キーワード	目黒川　合流改善　浸水対策　流出解析モデル			
処理区名	森ヶ崎		位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	合流改善　浸水対策
状態区分	調査　研究　計画		新規性	
実施年度	平成 26 年度～平成 27 年度		全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度
担当部署	計画調整部　事業調整課　施設計画係　　中道　元紀			
発 表 履 歴	局内			
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	2-1-3	表題	水理模型を用いた合流改善対策用貯留管の水理現象及び圧縮空気塊に関する検証

内　容	閉鎖性水域である勝島運河は、合流式下水道からの雨天時越流水などの影響により、水質悪化が問題となっている。このため、東京都下水道局は合流式下水道の改善を行う重点水域のひとつとして位置付け、降雨初期の特に汚れた下水のうち、流域内降雨 6 ㎜分を貯留する合流改善施設（φ2200 の貯留管）を現在施工中である。 本施設の問題点として圧縮空気塊の噴出等が想定されるが、空気抜きや取水構造が及ぼす複雑な水理挙動は、机上の検討では十分に把握できない。このため、水理模型実験による検証を行った。本稿では、実験により明らかになった課題と、対策の検証結果を報告する。		
キーワード	合流改善、貯留管、圧縮空気塊、水理模型実験		
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	合流改善
状態区分	設計	新規性	
実施年度	平成 25 年度～26 年度	全体期間	平成 25 年度～26 年度
担当部署	南部下水道事務所　建設課　建設工事係　遠藤　光		
発 表 履 歴	局内	平成 26 年度　設計・工事事例発表会	
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	2-2-1	表題	活性汚泥中の細菌叢に関する基礎検討調査

内　容

硝化細菌は水温低下の影響を受けやすいため、冬季に硝化が十分に進まず放流水の窒素濃度が高くなる傾向がある。そのため、都内の水再生センターでは、MLSS 濃度を高めたり、DO 濃度に基づく風量制御の DO 目標値を高くして硝化促進を図っており、センターによっては送風量が冬季に増加することがあった。また、流入負荷変動が大きいセンターや流入水の汚泥転換率が高いセンター等では、硝化に必要な A-SRT を確保していても冬季に反応槽末端でアンモニアや亜硝酸が残存することがある。

そこで、短期的なアプローチとして、硝化能力の高い細菌を適用すること等により処理能力を高める方法について検討を行った。その中で、活性汚泥の硝化能力および細菌叢について寒冷地と都内センターとの比較や流入水が細菌叢に及ぼす影響に関する調査を行った。その結果、以下のことがわかった。

・東京都と寒冷地の活性汚泥について硝化速度の水温依存性を比較した結果、アンモニア酸化速度については寒冷地の活性汚泥も東京都と同程度に水温の影響を受けることがわかった。ただし、亜硝酸酸化速度については、寒冷地の方が東京都と比較して水温依存性が小さく水温低下の影響を受けにくい性質をもっていた。

・寒冷地の活性汚泥を用いて東京都の下水を処理させると、寒冷地の活性汚泥の細菌叢が徐々に東京都の活性汚泥の細菌叢に近づく結果となった。

・そのため、特定の細菌を反応槽内に定着させる場合には、定期的な投入もしくは、担体化を検討する必要がある。

キーワード	細菌叢　低水温　硝化細菌		
処理区名		位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質	施策区分	維持管理向上
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 24～26 年度	全体期間	平成 24 年度～平成 26 年度
担当部署	計画調整部技術開発課		
発表履歴	局内		
	局外		
調査方法	委託調査		
関連情報	経営計画 2013		

<table>
<tr><td>番号</td><td>2-2-2</td><td>表題</td><td colspan="3">水再生センターにおける直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（LAS）の実態調査</td></tr>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（以下「LAS」という）は、界面活性剤の一種であり、主に家庭用の洗濯用洗剤として使用されている。
平成 15 年の環境基本法に基づく水質汚濁に係る環境基準（自然環境での目標値）の改正に際し「水生生物保全に係る水質環境基準」が創設され、平成 25 年 3 月には当該基準の対象物質に LAS が追加された。環境基準が定められると、その達成のため将来的に水再生センター等の事業場排水に基準値が設定されることが考えられる。
そこで、平成 25 年度から平成 26 年度に、東京都区部の水再生センターにおける LAS の流入・放流状況並びに 2 水再生センターでの流入水・放流水の時間変動及び生物反応槽内での処理状況について夏季と冬季に調査を実施した。その結果、以下の実態が明らかになった。
・流入水中の LAS 濃度は、夏季と冬季で大きく変わらなかった。また、時間により 2 倍程度の幅で変動した。
・放流水中の LAS 濃度は、ほとんどのセンターで夏季、冬季ともに環境基準値よりも低い値であった。また時間による変動はほとんどなかった。
・LAS 濃度は生物反応槽流入直後に大幅に減少し、そのほとんどが水中から除去された。</td></tr>
<tr><td>キーワード</td><td colspan="5">直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩、LAS、水生生物保全に係る水質環境基準</td></tr>
<tr><td>処理区名</td><td colspan="2"></td><td>位置区分</td><td colspan="2">処理場　水再生センター</td></tr>
<tr><td>職種区分</td><td colspan="2">水質</td><td>施策区分</td><td colspan="2">微量物質・病原性微生物等対策技術</td></tr>
<tr><td>状態区分</td><td colspan="2">調査　研究</td><td>新規性</td><td colspan="2">新規知見あり</td></tr>
<tr><td>実施年度</td><td colspan="2">平成 25 年度～平成 26 年度</td><td>全体期間</td><td colspan="2">平成 25 年度～平成 26 年度</td></tr>
<tr><td>担当部署</td><td colspan="5">施設管理部環境管理課　樫原、森谷</td></tr>
<tr><td rowspan="2">発 表
履 歴</td><td>局内</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>局外</td><td colspan="4">平成 26 年度　第 51 回下水道研究発表会
平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会</td></tr>
<tr><td>調査方法</td><td colspan="5">委託調査</td></tr>
<tr><td>関連情報</td><td colspan="5">経営計画 2013</td></tr>
</table>

番号	2-2-3	表題	好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理）の開発

内　容

放流水質の改善、特に窒素とりんの除去には高度処理の導入が不可欠であるが、既存の標準活性汚泥法施設を高度処理（嫌気無酸素好気法）施設に改造すると、同じ反応タンク容積で処理できる水量が減少すること、処理水１m^3当たりの電力使用量が増大することなどの課題がある。そこで、著者らは、従来の高度処理法に比べて処理能力が大きく、かつ、電力使用量が少ない処理技術の確立をめざし、好気タンクにおける脱窒に着目しこれを安定して行う技術を検討した。具体的には、深槽式反応タンクの旋回流を利用して、溶存酸素（DO）の高い散気設備の上部で硝化、DO の低い下部で脱窒が進むよう風量を制御し、これを流下方向に繰り返すことで窒素除去を行う技術である。

調査は、まず好気タンク内の脱窒の程度をタンク内の DO 分布と関連付け、それを机上実験により再現することで、好気タンク内において脱窒が進行する状況を推定した。つづいてそのような状況を実現する風量制御システムの検討を行い、深槽式の好気タンクの前半は硝酸性窒素と亜硝酸性窒素の合計（NO_x-N）濃度を指標として、後半はアンモニア性窒素（NH_4-N）濃度を指標として、それぞれ個別に風量を制御することで好気タンク内において効率的に脱窒を行うことが可能との結論に至った。そして最後に、そのシステムを実施設に導入し、一定レベル以下の窒素の負荷条件で嫌気無酸素好気法（A_2O 法）と同等以上の窒素除去率が得られること、および標準活性汚泥法に比べて少ない電力使用量で処理が可能であることを確認した。

キーワード	好気タンク内脱窒、NOx-N 計、NH_4-N 計、高度処理、省エネルギー		
処理区名	芝浦処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質	施策区分	高度処理　温室効果ガス低減対策
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 23 年度～平成 25 年度	全体期間	平成 23 年度～平成 25 年度
担当部署	中部下水道事務所　芝浦水再生センター　葛西　孝司		
発表履歴	局内		
	局外	下水道協会誌 Vol.52　No.635　2015.9 2015 年　第 5 回 EWA/WEF/JSWA 特別会議　米国・ワシントン D.C	
調査方法	簡易提供型共同研究		
関連情報	経営計画 2013		

番号	2-2-4	表題	北多摩二号水再生センターにおける NH_4-N+DO 制御について

内　容	当局で採用する送風量制御方法には、DO 制御、NH_4-N 制御、NH_4-N+DO 制御がある。当センターでは、制限曝気 A_2O 法施設において、B 回路と C 回路の送風量を NH_4-N 制御とし、D 回路の送風量を DO 制御とする NH_4-N+DO 制御を採用している。これは、各回路の送風量を個別に制御する点で小菅水再生センターでの NH_4-N+DO 制御と異なる。処理性や送風量の観点から当該制御方法について調査した結果、各回路 DO 制御との比較で 10%程度の送風量削減が可能であった。各回路 NH_4-N 制御との比較では、送風量は同等だったものの、処理水 NH_4-N 濃度の変動が抑えられ、処理水の安定化という点で有利であった。			
キーワード	制限曝気 A_2O 法　NH_4-N 制御　DO 制御　送風量削減			
処理区名	北多摩二号処理区		位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質		施策区分	高度処理　温室効果ガス削減
状態区分	調査　研究		新規性	新規
実施年度	平成 26 年度		全体期間	
担当部署	流域下水道本部　技術部　北多摩二号水再生センター　小泉僚平			
発 表	局内	平成 26 年度　水質技術研究発表会		
履 歴	局外			
調査方法	直営			
関連情報	経営計画 2013			

番号	2-2-5	表題	処理性能と省エネルギー両立のためのステップ A_2O 法の処理条件

内　容	ステップ A_2O 法では、A_2O 法等の他の処理方法と異なり、ステップ流入比や第一・第二好気槽の硝化量についても制御が必要となる。処理プロセスを考慮すると、これらは処理性や必要送風量に強く影響を与えると考えられるが、両者の関係は十分に明らかにされていない。 当センターではこの点に関する調査を平成 24 年度から継続している。平成 25 年度以降の取組で、嫌気槽 BOD－SS 負荷とりんの除去性能との関係や、第一好気槽の硝化量と必要送風量との関係等が新たに明らかになった。これは、りんや窒素の処理性能を確保しつつ送風量を低減できることを示唆するもので、当処理方法は水質改善と省エネルギーの両立という観点から、非常に有効なものとなり得ると考える。		
キーワード	ステップ A_2O 法　硝化量　必要送風量　水質改善　省エネルギー		
処理区名	北多摩二号処理区	位置区分	処理場　水再生センター 処理水　放流水
職種区分	水質	施策区分	エネルギー　熱利用　維持管理向上
状態区分	維持管理	新規性	
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 24 年度～平成 26 年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　北多摩二号水再生センター　水質管理係		
発 表 履 歴	局内　平成 26 年度　水質技術研究発表会		
	局外　平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-2-6	表題	東陽Ⅲ系における硝化液循環ポンプの運用について

内　容	一般的に窒素除去を目的とした高度処理施設の硝化液循環の効果は、硝化液に含まれるNOx態窒素の脱窒作用による窒素除去率の向上と、NOx態窒素の酸素回収による曝気風量削減効果も期待できるとされている。本調査は、硝化液循環を行うことによる窒素除去性能と水処理電力量の関係を明らかにすることで、硝化液循環の最適化を図ることを目的として実施した。 硝化液循環を最適化したことで、窒素除去率が約10%向上するとともに、曝気風量削減により水処理電力量が 3.1%削減された。このため、単位電力量当たりの窒素除去量は従来法と比べ25%向上した。 さらに、硝化液循環による曝気風量削減と NOx態窒素からの酸素回収量の関係性を明らかにしたことで、水質改善と省エネルギーの両立を可能とした最適な硝化液循環量について考察した。その結果、硝化液循環率は約50%で運転することが最適であると算出された。

キーワード	硝化液循環運転、窒素除去率、水処理電力量		
処理区名	砂町処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質	施策区分	高度処理　温室効果ガス削減対策
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成26年度	全体期間	平成26年度　4月～6月
担当部署	東部第一下水道事務所　砂町水再生センター　水質管理係　　有野　貴		
発表履歴	局内	平成26年度　水質技術研究発表会	
	局外	平成27年度　第52回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-2-7	表題	浅槽式反応槽での窒素削減に向けた新たな取り組みについて

内　容	落合水再生センターは、放流水が河川水質に直ちに影響を及ぼす特徴があるため、水質のさらなる向上が課題である。しかし、処理能力や敷地に余裕がないことを鑑みると、新規施設の導入は容易ではない。また、反応槽の大部分が浅槽式であり内部に嫌気部分ができないことから窒素除去が容易ではない。 そこで、既存の施設での取り組みとして、反応槽中段で制限曝気を行い疑似的な無酸素槽を設ける方法と、さらにそこへ沈殿下水をステップ流入させる方法の二種類を試みたところ、いずれも窒素削減の効果がみられた。

キーワード	窒素削減　浅槽式反応槽　中段制限曝気　ステップ流入		
処理区名	落合処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質	施策区分	高度処理
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成 26 年度	全体期間	
担当部署	西部第一下水道事務所　落合水再生センター　水質管理係　佐藤　麻貴		
発 表 履 歴	局内		
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-3-1	表題	汚泥焼却炉の低温廃熱を利用した補助燃料削減の取組

内　容	東京都下水道局では、補助燃料使用量を約 2 割削減できる多層燃焼型流動焼却炉や過給式焼却炉の導入などの第二世代型汚泥焼却炉により、焼却炉自体の燃焼効率を高める対策を施してきたが、未だ多くの補助燃料を使用しており、燃料価格高騰等を受けてのエネルギーコストが増加している。 そこで、既設の汚泥焼却設備に、これまで活用されていなかった焼却炉燃焼ガスの低温廃熱（300～450℃）のみを熱源として利用する汚泥乾燥設備を南部スラッジプラントに設置することで、焼却時に使用する補助燃料を大幅に削減する取組を行った。 本システムは、これまで未利用であった白煙防止の余剰廃熱を汚泥乾燥用の熱として有効利用し、脱水汚泥の一部を乾燥することで、焼却炉に投入する汚泥の含水率を低下させ、補助燃料の削減を図るものである。

キーワード	焼却炉、補助燃料の削減、低温廃熱、汚泥乾燥設備、エネルギーコスト			
処理区名	森ヶ崎処理区		位置区分	汚泥
職種区分	設備		施策区分	熱利用
状態区分	設計		新規性	
実施年度	平成 26 年度		全体期間	
担当部署	施設管理部施設管理課　佐藤崇仁			
発 表 履 歴	局内			
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報	経営計画 2013、スマートプラン 2014			

番号	2-4-1	表題	エネルギー自立型焼却システムの開発

内　容	当局では、下水道事業における地球温暖化防止計画「アースプラン 2010」の取り組みを不断に継続し、地球温暖化対策を積極的に推進するために、省エネルギー・再生可能エネルギー効果の高い技術の導入を進めている。 汚泥処理工程で発生する温室効果ガスに関しては、焼却炉の高温焼却や、運転管理の工夫により二酸化炭素(CO_2)排出量を大幅に削減してきたが、電力使用による CO_2 排出量は横ばいであった。 そこで、汚泥焼却時に買電より安価な発電を行い、汚泥焼却炉における使用電力量を発電電力量が年間で上回り、かつ補助燃料を必要としない「エネルギー自立型焼却システム」の構築に向けた共同研究を実施した。本報告では、システムの構成設備である「超低含水率型脱水機」及び「エネルギー自立型焼却」の研究内容及び結果について報告する。

キーワード	省エネルギー　再生可能エネルギー　電力自立　補助燃料不必要		
処理区名		位置区分	処理場　水再生センター、汚泥
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減対策、汚泥処分 汚泥資源化、エネルギー　熱利用
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 25 年度～平成 27 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度
担当部署	計画調整部　技術開発課　竹谷　修平		
発 表 履 歴	局内		
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法	開発技術の導入を前提とした共同研究		
関連情報	経営計画 2013、スマートプラン 2014		

番号	2-4-2	表題	水処理からの N_2O の生成・排出抑制シミュレーション調査

内　容	東京都下水道局では、水処理工程で発生する温室効果ガスの一種である N_2O（亜酸化窒素）の削減する手法として、送風量制御により好気槽前段における硝化をゆっくり進めて N_2O の生成自体を抑制する技術の開発を行った。 開発の過程で、上記 N_2O の生成抑制に効果的な風量条件を定量的に把握し、運転管理上の指針作成等に役立てることを目的として、IWA（国際水協会）が提唱する活性汚泥モデル（ASM）とアンモニア酸化細菌（AOB）による N_2O 生成の数学モデルを組み込んだモデルを構築した。その後、水処理実験プラントにおける窒素処理状況と N_2O 排出量の実績値を用いてキャリブレーションを行った上で、各回路への送風量の配分を変えて、N_2O 生成を抑制できる送風条件の検討を行った。 その結果、反応槽中の NO_2-N 濃度が 0.6 mg/Ｌを超えないように好気槽各回路への送風量を制御することにより、N_2O 排出量を抑制できることが明らかとなった。

キーワード	N_2O　生成抑制			
処理区名			位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質		施策区分	温室効果ガス削減対策
状態区分	調査　研究		新規性	
実施年度	平成 26 年度		全体期間	平成 26 年度
担当部署	計画調整部技術開発課			
発　表	局内			
履　歴	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報	アースプラン 2010			

番号	2-4-3	表題	森ヶ崎水再生センター太陽光発電設備工事の設計について

内　容	東京都の下水道事業では、未利用・再生可能エネルギーの積極的導入により、温室効果ガスの削減を推進している。また、東日本大震災の発生を契機に、電源の確保・多様化が求められている。 本工事では、森ヶ崎水再生センターに太陽光発電設備（1,000ｋW）を新設し、発電した電力は下水処理に使用する。 今回、反応槽の上部覆蓋に太陽電池モジュールを配置することで、上部空間の有効利用を図る。ここでは、太陽光発電設備の概要及び機器構成の検討について報告する。		
キーワード	未利用・再生可能エネルギー　太陽光発電　温室効果ガス削減　電力		
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	設備	施策区分	エネルギー 温室効果ガス削減対策
状態区分	設計	新規性	
実施年度	平成 25 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度
担当部署	建設部　設備設計課　電気設計第二係　根岸　雄一郎		
発　表 履　歴	局内	平成 26 年度　下水道設備研究発表会	
	局外		
調査方法			
関連情報			

番号	2-4-4	表題	汚泥焼却炉の計画的管理による温室効果ガスの削減

内　容	流域下水道では、平成 25 年度から「汚泥焼却炉温室効果ガス排出量管理図」に基づき、パフォーマンスの良い焼却炉を中心に高温焼却や、連続運転実施などにより、温室効果ガスを削減している。 平成 26 年度は、上半期に効率の良い第二世代型焼却炉の連続運転などを徹底して温室効果ガス排出量を削減し、その成果を踏まえ下半期は補助燃料削減運転による動力費削減を基本として計画的管理を実施した。 具体的には、センターごとの年間及び四半期毎の削減目標を設定し、良好な取組事例は他センターでも水平展開を図った。一方、目標達成できない場合は、原因分析はもとより、次の四半期で焼却温度をさらに上げるなどの対策を実施した。 本稿ではこれらの取組みについて報告する。

キーワード	温室効果ガス　焼却炉連続運転　目標排出量　計画的管理			
処理区名			位置区分	水再生センター
職種区分	設備		施策区分	温室効果ガス削減対策
状態区分	維持管理		新規性	
実施年度	平成 26 年度		全体期間	平成 25 年度～26 年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　施設管理課　北島　秀彦			
発 表 履 歴	局内			
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-4-5	表題	二軸管理手法を用いた水質改善と省エネルギー化の両立の取り組みの拡大について

内　容	東日本大震災以降電力使用量の削減が求められる中、東京都下水道局では 3 ヵ年の事業計画「経営計画 2013」を策定し、水質改善と電力使用量削減の両立による地球温暖化対策のさらなる推進を目指すこととなった。その中で各水再生センターにおける水処理施設の運転を最適化するため、電力削減と水質改善を両輪とする「二軸管理図」による管理手法を新たに導入し、平成 25 年度より維持管理への活用をスタートした。 本報告では、平成 25 年度から導入を開始した送風機電力原単位を使った二軸管理や、平成 26 年度からチャレンジとして流域下水道本部が新たに取り組みに着手した水処理電力原単位による二軸管理に取り組んだ成果とともに、今後の取り組みや設備の導入等について紹介する。			
キーワード	電力削減　水質改善　二軸管理　原単位			
処理区名			位置区分	処理場　水再生センター 処理水　放流水
職種区分	水質		施策区分	エネルギー　熱利用　維持管理向上
状態区分	維持管理		新規性	
実施年度	平成 26 年度		全体期間	平成 25 年度～平成 26 年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　施設管理課　水質保全係			
発 表 履 歴	局内			
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報				

番号	2-4-6	表題	ターボ型流動焼却炉導入における温室効果ガス削減効果の検証

内　容	東京都下水道局では、下水道事業初のエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を策定し、エネルギー削減に向けた様々な取り組みを推進している。 葛西水再生センターにおいても、省エネ機器の導入を積極的に進めており、平成 26 年度から「ターボ型流動焼却炉（以下、「ターボ炉」という）」と近接設置された低含水率型脱水機を組み合わせた第二世代型焼却システムが運用を開始した。 ターボ炉は従来の流動焼却炉に必要な、電力を大量に消費する送風設備の一部が不要となり、消費電力が大幅に削減されるとともに、加圧高温下にて焼却処理することで N_2O（温室効果ガスの一種）排出量の削減効果が期待できる。 本報告では、平成 26 年 10 月～平成 27 年 2 月のターボ炉と当センターの従来型の焼却炉（以下、「従来炉」という）との運転データの比較を行い、エネルギー削減および温室効果ガスの削減効果について検証を行ったので報告する。

キーワード	ターボ型流動焼却炉、過給機、温室効果ガス、流動ブロワ、誘引ファン		
処理区名	葛西処理区	位置区分	処理場　水再生センター、汚泥
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減対策、 汚泥処分　汚泥資源化
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 26 年度
担当部署	東部第二下水道事務所　葛西水再生センター　設備管理係　小川　誠		
発表履歴	局内		
	局外	平成 27 年度　第 52 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報	経営計画 2013、アースプラン 2010、スマートプラン 2014		

番号	3-1-1	表題	設備アセットマネジメントの構築に向けた設備保全管理システムの実用化検証

内　容	下水道局経営計画 2013 の「水再生センター、ポンプ所の再構築」において、アセットマネジメント手法を活用して経済的耐用年数で設備を再構築することが示された。さらに「設備再構築基本計画　平成 25 年 3 月(東京都下水道局)」では、基本タイムスケジュールを作成し、設備アセットマネジメントの「見える化」を図っている。 現在、下水道局では、下水道設備の維持管理において維持管理情報システム(以下、GMS という)及び保全業務において機器保全データ管理装置(以下、HOMS という)の２つのシステムを運用している。設備のアセットマネジメントを運用する上で、これらのシステムの活用を検討したが適用困難であることが判明した。そこで、東京都下水道サービス株式会社(以下、TGS という)が開発した下水道設備保全管理システム(以下、エスキューブという)について、設備アセットマネジメントを効率的に運用するための基盤システムとして活用できるか、その有効性を実際の機場を使用して検証したので報告する。		
キーワード	アセットマネジメント　ライフサイクルコスト　GMS　HOMS　エスキューブ		
処理区名		位置区分	ポンプ所、処理場　水再生センター
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 25～平成 26 年度
担当部署	施設管理部　施設保全課　調査係　石森　健二		
発 表	局内	平成 26 年度　下水道設備研究発表会	
履 歴	局外		
調査方法	簡易提供型共同研究		
関連情報			

番号	4-1-1	表題	アセットマネジメント手法と再構築のスピードアップ Asset Management Technique and Accelerated Restructuring of Sewerage System

内　容	東京都 23 区内にある下水道管は、20 年後には約半数の下水道管が耐用年数の 50 年を超える。限られた財政・体制で再構築を確実に実施するために、アセットマネジメントを採用した事業方針を策定した。 この事業方針は、経済的耐用年数を約 80 年と設定し、事業を平準化したうえで、事業のスピードアップを図るものである。		
キーワード	再構築、老朽化対策、アセットマネジメント、経済的耐用年数 80 年、スピードアップ		
処理区名	区部全域	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	再構築
状態区分	計画	新規性	あり
実施年度	平成 24 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度
担当部署	計画調整部計画課		
発 表 履 歴	局内		
	局外	2014 年　第 9 回 IWA（国際水協会）世界会議　ポルトガル・リスボン 2015 年　第 6 回 IWA-ASPIRE（IWA アジア太平洋地域会議）（ポスター発表） 中国・北京	
調査方法	直営調査		
関連情報			

<table>
<tr><td>番号</td><td>4-1-2</td><td>表題</td><td colspan="3">国指定重要文化財「旧三河島汚水処分場喞筒場施設」保存・復原工事
Preservation and Restoration Project for Important Cultural Properties in Japan Mikawashima Sewage Disposal Plant and Pumping Station Facilities, National Important Cultural Assets</td></tr>
<tr><td colspan="2">内　容</td><td colspan="4">旧三河島汚水処分場（現三河島水再生センター）は、日本の近代下水道の発祥の地であり日本最初の下水処理施設として大正 11 年に運用を開始した。喞筒（ポンプ）場施設は、平成 11 年に休止するまで 77 年間稼働を続けた歴史的な建造物である。
当施設は、阻水扉室、沈砂池、喞筒室などの一連の建造物が、旧態を保持しつつまとめて残っており、その高い歴史的価値が認められ、平成 19 年 12 月に、国指定重要文化財（建造物）に指定された。
下水道局は、歴史的価値のある建造物を保護・保存しつつ、下水道への理解とその進展に寄与するために、保存計画を策定した。これに基づき、平成 22 年度から 3 年間をかけて保存・復原工事を実施し、できるだけ創建当時の姿に復することや、地下構造物を公開するための工夫を凝らした整備を実施した。
下水道の歴史と意義を発信し下水道事業の重要性や役割を多くの人々に理解していただくために、平成 25 年 4 月から施設の一般公開を行っている。</td></tr>
<tr><td colspan="2">キーワード</td><td colspan="4">日本の近代下水道の発祥の地、国指定重要文化財、歴史的価値、保存・復原工事、下水道の歴史と意義、施設の一般公開</td></tr>
<tr><td colspan="2">処理区名</td><td colspan="2"></td><td>位置区分</td><td>処理場　水再生センター</td></tr>
<tr><td colspan="2">職種区分</td><td colspan="2">建築</td><td>施策区分</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">状態区分</td><td colspan="2">工事</td><td>新規性</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">実施年度</td><td colspan="2">平成 22 年度～平成 24 年度</td><td>全体期間</td><td>平成 22 年度～平成 24 年度</td></tr>
<tr><td colspan="2">担当部署</td><td colspan="4">施設管理部　施設保全課　建築保全係　渡邊龍也</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">発 表
履 歴</td><td>局内</td><td colspan="3">平成 25 年度　設計・工事事例発表会、設備研究発表会</td></tr>
<tr><td>局外</td><td colspan="3">平成 24 年度　全建賞受賞事業発表会　平成 25 年度　第 50 回下水道研究発表会
2014 年　第 9 回 IWA（国際水協会）世界会議　ポルトガル・リスボン</td></tr>
<tr><td colspan="2">調査方法</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">関連情報</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

番号	4-2-1	表題	温室効果ガス削減と水質改善を両立するための新たな下水処理施設の維持管理の取組 A New O&M Approach for both Improvement of Water Quality and Reduction of Greenhouse Gas Emissions in Wastewater Treatment Plants

内　容	東京都下水道局は、汚水の浄化のため東京都内の年間電力使用量の約１％を消費していることから、これまでも温室効果ガス削減のために電力削減に努めてきた。更に、東日本大震災後の原子力発電所の停止と火力発電の燃料高騰による大幅な電力料金の値上げ等により、更なる電力削減が求められることとなった。しかしながら、過度の電力削減は水質を悪化させてしまう。そこで当局では、トレードオフの関係にある水質改善と電力削減を両立させるためのツールとして「二軸管理」手法を考案・導入し、運用している。 「二軸管理」手法運用の結果、以下の効果があった。 １．放流水中の全窒素濃度と送風電力量原単位の推移を視覚化したベクトルを描くことで、設備改善や運転改善の工夫の効果が明確に把握できるようになった。 ２．処理場毎に目標値を設定し、目標に向けて適宜運転条件の変更を行っていくことで、水質改善と省エネの両立への意識づけが図られたことにより、取り組みが進みやすくなった。		
キーワード	維持管理　全窒素濃度　送風電力量原単位		
処理区名		位置区分	処理場　水再生センター 処理水　放流水
職種区分	水質	施策区分	高度処理　温室効果ガス削減対策 維持管理向上
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 26 年度	全体期間	
担当部署	施設管理部環境管理課		
発 表 履 歴	局内		
	局外	2015 年　第 5 回 EWA/WEF/JSWA 特別会議　米国・ワシントン D.C	
調査方法	調査研究		
関連情報	経営計画 2013		

<table>
<tr><td>番号</td><td>4-2-2</td><td>表題</td><td colspan="3">下水道事業におけるエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」について
Basic Energy Plan "Smart Plan 2014" for sewerage system</td></tr>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">当局では、日本国の下水道事業初となるエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を平成 26 年 6 月に策定し、総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合を 2024（平成 36）年度までに 20%以上とすることを目指している。
スマートプランでは 4 つの取組方針として、「1 再生可能エネルギー活用の拡大」「2 省エネルギーの更なる推進」「3 エネルギースマートマネジメントの導入」「4 エネルギー危機管理対応の強化」を掲げ、エネルギーの高度化、効率化、安定化を推進している。
本稿では、それぞれの取組方針に基づく主な取組について報告する。</td></tr>
<tr><td>キーワード</td><td colspan="5">再生可能エネルギー、省エネルギー、エネルギー管理、危機管理対応強化</td></tr>
<tr><td>処理区名</td><td colspan="2"></td><td>位置区分</td><td colspan="2">処理場　水再生センター、汚泥</td></tr>
<tr><td>職種区分</td><td colspan="2">設備</td><td>施策区分</td><td colspan="2">危機管理、温室効果ガス削減対策、エネルギー　熱利用</td></tr>
<tr><td>状態区分</td><td colspan="2">計画、工事、維持管理</td><td>新規性</td><td colspan="2">新規知見あり</td></tr>
<tr><td>実施年度</td><td colspan="2">平成 26 年度</td><td>全体期間</td><td colspan="2">平成 26 年度～平成 36 年度</td></tr>
<tr><td>担当部署</td><td colspan="5">計画調整部　計画課</td></tr>
<tr><td rowspan="2">発 表
履 歴</td><td>局内</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>局外</td><td colspan="4">2015 年　第 5 回 EWA/WEF/JSWA 特別会議　米国・ワシントン D.C</td></tr>
<tr><td>調査方法</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>関連情報</td><td colspan="5">経営計画 2013、アースプラン 2010</td></tr>
</table>

番号	4-2-3	表題	アンモニア計と硝酸計を用いた同時硝化脱窒処理活性汚泥プロセスの開発 Development of Simultaneous Nitrification and Denitrification Process in Aerobic Tank of Suspended Growth Treatment Process using Ammonia and Nitrate Sensors

内　容	下水処理水中の窒素とりんの除去には高度処理の導入が不可欠である。しかし、既存の標準活性汚泥法施設を高度処理施設に改造すると、反応タンク容積あたりの処理能力が低下し、処理に係る電力使用量も増大する課題がある。 そこで、従来の高度処理に比べて処理能力が大きく省エネルギー型の処理技術の確立を目指し、好気タンクにおける脱窒に着目して、これを安定的に行う技術を検討した。本技術は、深槽式反応タンクの旋回流を利用して、溶存酸素（DO）の高い散気設備の上部で硝化、DO の低い下部で脱窒が進むよう風量を制御し、これを流下方向に繰り返すことで窒素除去を行うものである。また、本技術では、このような状況を実現するため、好気タンク内を前段と後段に分け、それぞれ硝酸計とアンモニア計で個別に風量制御を行った。実施設での調査結果から、本技術により効率的に脱窒が行えることが明らかとなった。さらに、一定レベル以下の窒素の負荷条件で嫌気無酸素好気法（A_2O 法）と同等以上の窒素除去率が得られること、および標準活性汚泥法に比べて少ない電力量で処理が可能であることを確認した。

キーワード	高度処理　省エネルギー　好気タンク内脱窒　アンモニア計　硝酸計		
処理区名	芝浦処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	水質	施策区分	高度処理　温室効果ガス低減対策
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 23 年度～平成 25 年度	全体期間	平成 23 年度～平成 25 年度
担当部署	施設管理部環境管理課		
発　表 履　歴	局内	－	
	局外	2015 年　第 5 回 EWA/WEF/JSWA 特別会議　米国・ワシントン D.C	
調査方法	簡易提供型共同研究		
関連情報	経営計画 2013		

論　文　集

1-1-1 横坑掘進用エントランスの考案

～大深度施工時の掘進マシン及びトンネルの止水保持～

建設部 土木設計課 金井 伸二
（現 施設管理部施設保全課）

1. はじめに

シールド工法は、中大口径のトンネル工事としては、下水道以外にも都市土木としては最も多く採用される工法となっている。開発から今日、種々の技術改良または新技術が開発され発展し続けている。

一方で、発進・到達時の止水対策は、坑口にゴムパッキンとフラップを設置し、立坑背面を地盤改良することで止水性を確保するのが一般的である。下水道工事では、坑口は仮設として使用されることが多く、水の流れを阻害することや、さや管として使用される場合には、配管等に支障となるため掘進後は通常撤去される。大深度、高水圧下での工事となる今回の工事では、地盤改良が困難であることから、通常の止水対策に代えて、工事費の削減と工事期間の短縮を図れる、恒久的な止水装置「横坑掘進用エントランス」を考案した。

2. 芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間連絡管事業の概要

東京都の区部に位置する芝浦水再生センターは、計画水量 850,000m^3/日の処理能力を持ち、昭和6年に運転が開始され、施設の老朽化が進んでいる。

一方、森ケ崎水再生センターは西処理施設と東処理施設からなり、東西合わせて計画水量 1,540,000m^3/日となる国内最大級の処理能力を有している。西処理施設は、昭和41年に運転が開始され、芝浦水再生センターと同様に老朽化し、今後は両水再生センターともに、施設再構築の必要が高まっている。

両水再生センターは、敷地いっぱいに水処理施設が配置され、単独の水再生センターで水処理施設を再構築するだけの敷地に余裕がない。このため、施設再構築時の処理能力を他の水再生センターで補完するための相互融通及び、大地震等による災害時の危機管理対応として、区部では初となる「芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間連絡管」(以下、連絡管)事業に着手している。

両水再生センターともに運河に近いことから、比較的直線的で最短となる運河占用案と通常の道路占用案を選定し、連絡管のルートを比較検討した。運河占用案の選定にあたっては、計画時から運河管理者である港湾局と協議した結果、事業に対し理解と協力をいただき、路線の大部分を京浜運河下に占用することとなった（延長約8ｋｍ）（図1参照）。

連絡管内には、汚水を相互送水する汚水送水管ほか、維持管理のため換気ダクトや照明設備、送泥管、再生水管、光ファイバーケーブル等が収容される（図2参照）。

運河には、各企業のトンネルや橋梁などの土木工作物があり、各企業と離隔について協議した結果、縦断線形は、既設構造物に影響を与えない離隔を確保したことなどから、最大土被りが概ね 58m となる大深度となった（図 3 参照）。このことから立坑形状は、大深度において壁厚を薄くすることができる円形構造とし、将来は管理用人孔として立坑躯体を本体利用することからニューマチックケーソン工法を採用した。

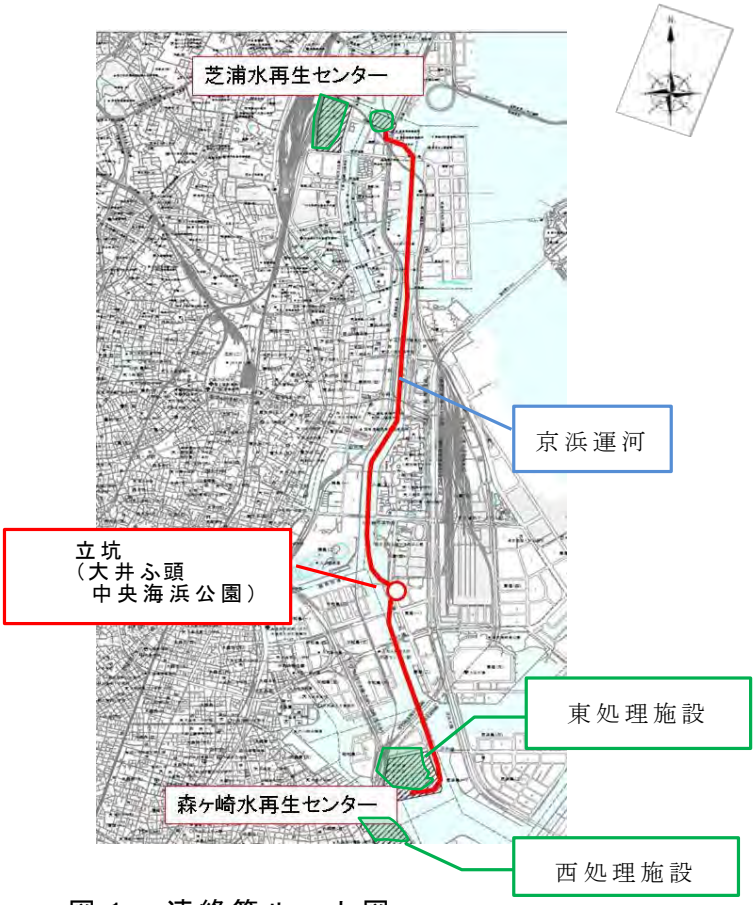


図 1　連絡管ルート図

●連絡管の概要
内径……6,000 ㎜
延長……約 8ｋｍ

●収容する主な施設
汚水送水管（ダクタイル鋳鉄管）
換気ダクト
照明設備
送泥管
再生水管
光ファイバーケーブル

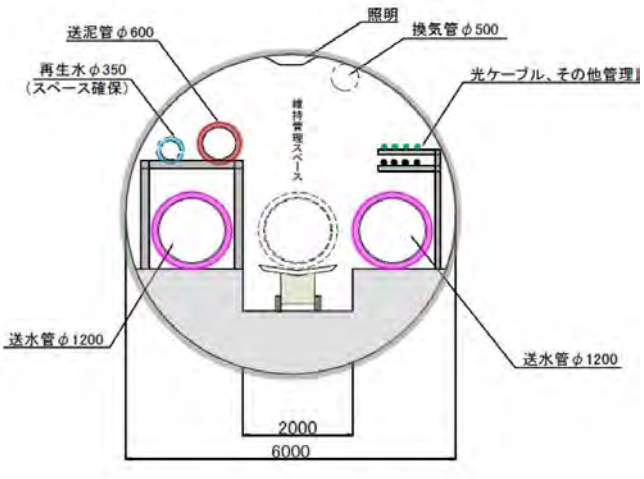


図 2　連絡管断面図（イメージ）

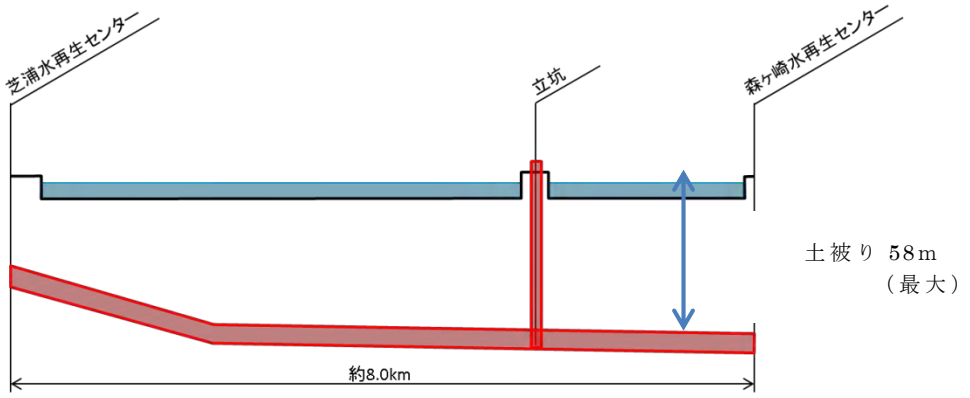
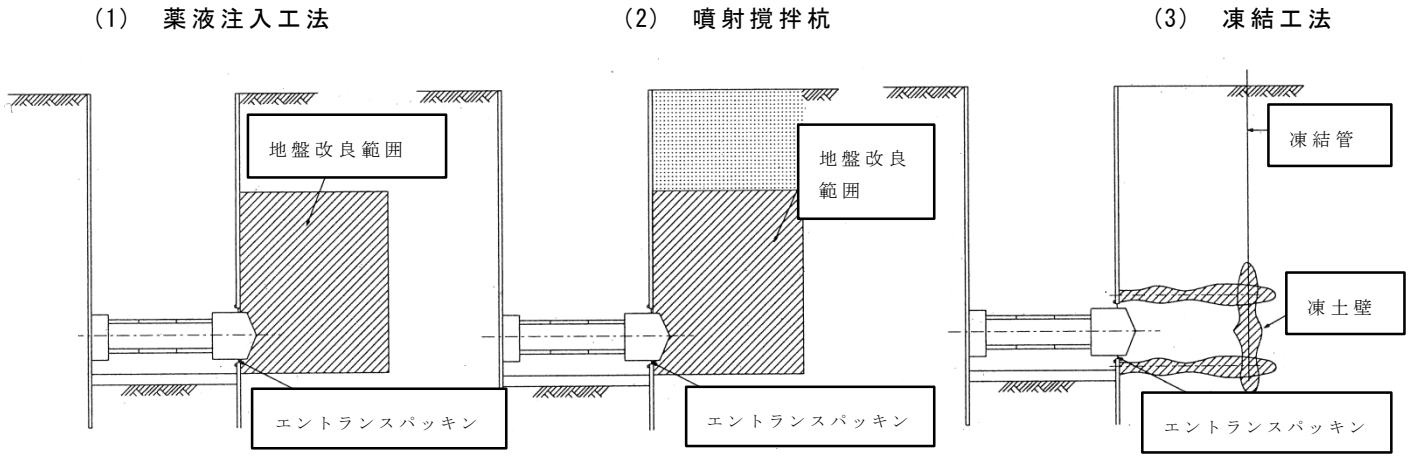


図 3　連絡管縦断面概略図

3. 坑口の止水の現状と課題

下水道仮設設計マニュアル(東京都下水道局)では、シールド機の発進及び到達部の止水については、「①掘削機械が、地山に貫入するまで、または立坑内に引き込むまでの地山の自立、地下水の流入防止」、「②立坑設置時の地山のゆるみの影響防止」、「③エントランスパッキンの負担軽減」等の検討が必要で、検討に当たっては、土質、地下水、シールドの形式、土被り、作業環境等を考慮して決定することとしている。立坑発進時の防護工の参考例を図 4 に示す。



出典：下水道仮設設計マニュアル（東京都下水道局）に加筆

図 4　立坑発進・到達時の防護工（参考例）

発進立坑は、芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間を結ぶ中間点に位置し、維持管理用管内換気機能を確保することで、掘進完了後は維持管理用人孔として使用される。このため、漏水は、管路内に配管する送水管や換気ダクト、照明設備等の劣化を促進する可能性を高め、維持管理上の観点からも重大な課題である。

本工事では、大深度施工となることから、地盤改良対象深度が深く、薬液注入工法や噴射撹拌工法の施工事例もなく、技術的な困難性が高まり費用は莫大となる。また、凍

結工法も、恒久的な止水をするには凍結を継続しなければならないため現実的ではない。このため、立坑とシールド掘進完了後のトンネルと立坑壁とのボイドの止水性を確保することが大きな課題となった。

4. 横坑掘進用エントランスの概要（図 6）

下水道工事では、ポンプ揚程の制約から深いものでも土被り 30m前後であるため、ゴムパッキンとフラップを取り付けた仮設坑口と地盤改良等の組合せが、経済的設計となるため、この方法が多く採用されている。

一般的に、立坑内に構築する坑口は、リング状にエントランスパッキンを一段または二段設置し、立坑背面を地盤改良する。また、セグメントと地山の間にできるテールボイドは、裏込め材の注入により止水性を確保する。セグメントと立坑壁部のボイドはセグメント組立後、裏込め注入により裏込め材に置き換えられ、地山とセグメント周辺の水みちを遮断し、止水性を確保する。

しかし、本工事の坑口はシールド掘進後に取り外されるため、立坑壁部とセグメント外周のボイドは、大深度の高水圧下では、裏込め材のみの止水では漏水する可能性が高かった。

そこで今回考案した「横坑掘進用エントランス」は、円筒ケーソン躯体が本設構造物として使用されることから、立坑とセグメント外周の止水を確実に行うために、躯体内に一段本設となる止水装置を三次元に設置することとした。三次元となるのは、円筒形の立坑から円筒形が突出る形状となるためである。

三次元的に設置されるチューブパッキンの特徴として、他にワイヤーブラシパッキンに置き換えて装着することが可能である。チューブパッキン及びワイヤーブラシパッキンを展開すると図 5 のような形状となる。

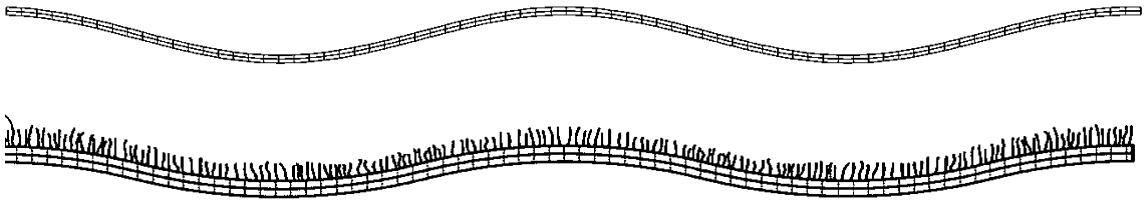


図 5　チューブパッキン（上図）及びワイヤーブラシパッキン（下図）の展開図

この装置は、シールドマシン外周にチューブパッキンが三次元状態に接触されて止水効果が生じるように構成されている。本止水装置は、フラッパーとチューブパッキンで構成され、設置時は、坑口に対し水平な状態で設置されており、立坑内に配置された圧送パイプを経てチューブパッキンに水、又は止水材を充填する。止水材等の充填により、チューブパッキンが円筒形立坑の掘進開口部内側に三次元的に密着されることにより、止水機能を保持することができる。

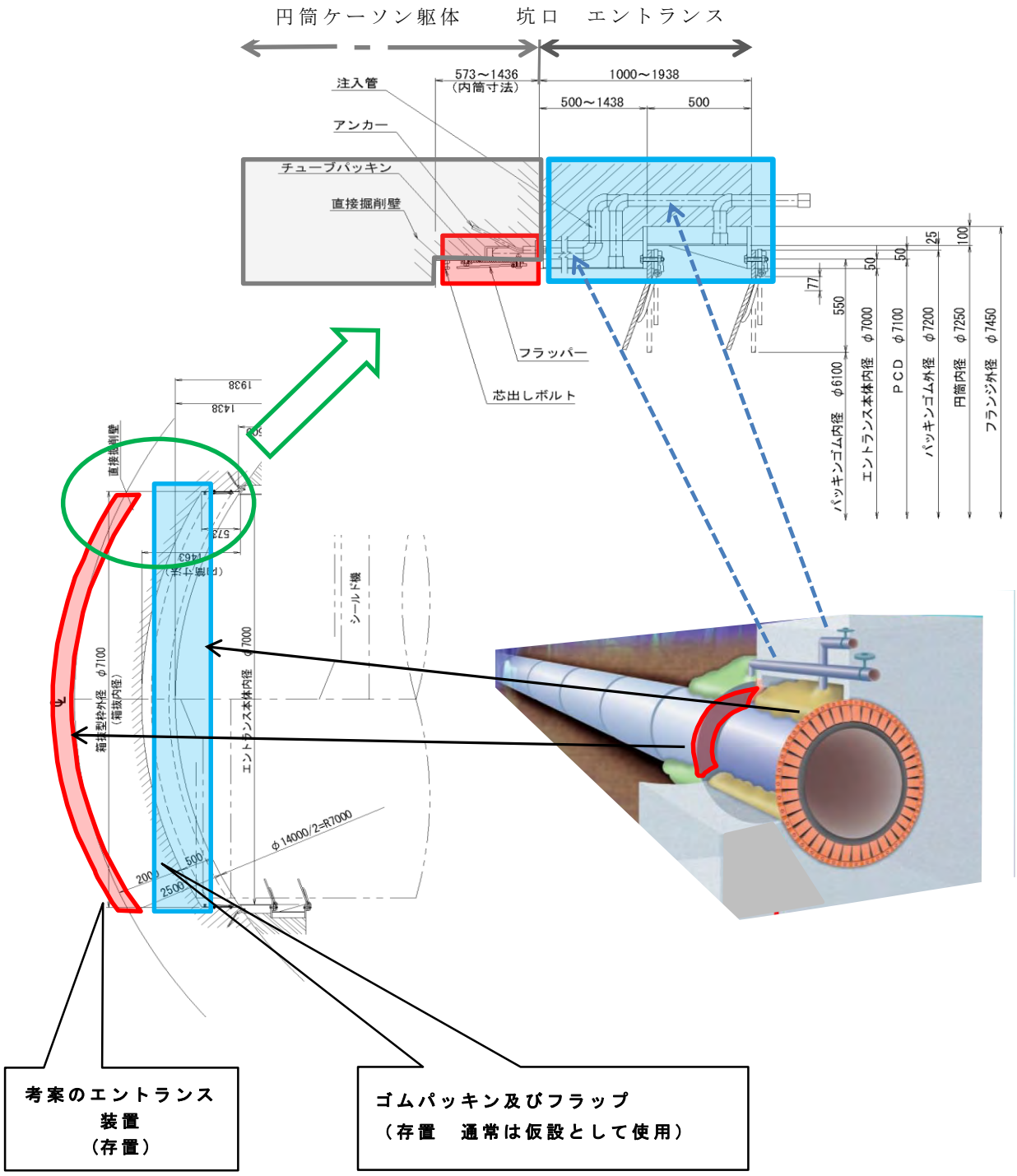


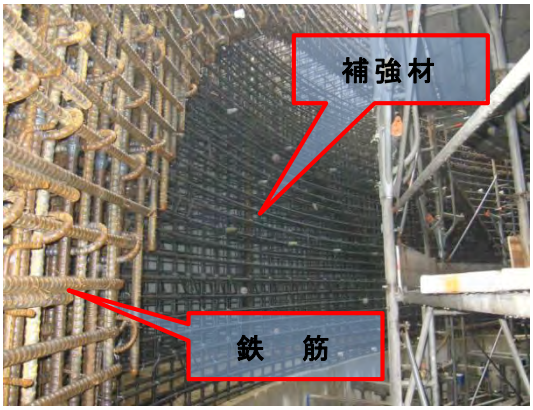
図 6 横坑掘進用エントランスの概要図

5. 補強材による横坑掘進用エントランス設置スペースの確保

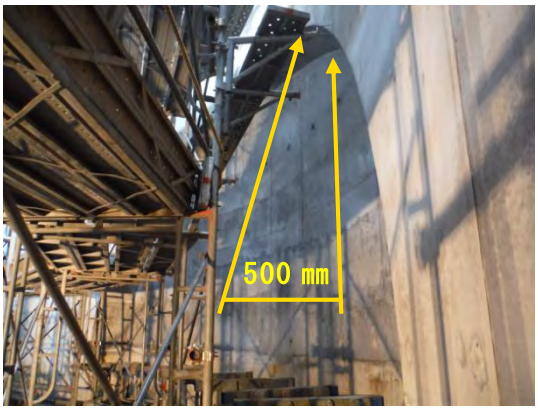
今回計画した連絡管の大深度立坑は、構築する施工期間が２か年程度となることから、立坑築造と同時に本装置を設置することは、錆等の劣化によるフラッパー可動部の不具合を引き起こすことが予想される。このため、シールドマシン発進時期に合わせて設置

することが望ましい。そこで今回は、鉄筋と同等の強度を有し、かつシールドマシン発進時に鏡切りをすることなく直接掘削が可能となる補強材を配置した（図7参照）。

補強材を使用したことにより、坑口部分の壁厚を周辺より500㎜先行切削することが可能となったことから、横坑掘進用エントランスの設置スペースを確保することができた。



坑口周辺配筋状況



コンクリート打設後

図 7　立坑坑口付近現地写真

5. おわりに

本考案は、平成 26(2014)年 2 月に実用新案を出願し、同年 4 月に登録された。その後、特許庁に「実用新案技術評価」を申請し、「新規性も進歩性もあり、原則として権利行使をすることが出来る技術」であることが確認され、同年 8 月、評価 6 を得た。

今回の考案は、長年の課題であった立坑内の浸入水を克服する一案といえる。また、都市化が進展している大都市においては、更なるインフラ整備を進めるために大深度化することは避けられない。考案した横坑掘進用エントランスは、非開削工法を実施する際の立坑が、大深度になるに従い平面形状が矩形断面より、構造的に有利となる円形断面になる傾向にあることから、こうした施工条件にも対応できるものである。

また、下水道工事にとらわれず、道路、鉄道などのシールド工事等の坑口部でも使用することが可能であることから、インフラ整備やリニア新幹線整備工事など、非開削工事において本案が採用されることを期待する。

1-1-2 小松川第二ポンプ所建設その 11 工事における ケーソン沈設に伴う近接構造物への影響と対策について

第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 山口 貴士

1. はじめに

小松川第二ポンプ所は、既設の大島ポンプ所と小松川ポンプ所流域の雨水流出量の増大に伴う対応と、合流式下水道の改善対策として、雨水貯留池の整備を行うとともに、大島ポンプ所の放流先を流れの少ない旧中川から荒川に変更するために新設するポンプ所である。

本工事は、小松川第二ポンプ所建設のため、ニューマチックケーソン工法により東西方向で最大 38.8m、南北方向 26.5m の 4 号ケーソンを T.P.-42.24m まで沈下させるものである。

4 号ケーソンと近接する国土交通省の荒川ロックゲート（閘門）はケーソン南辺と平行に位置しており、その離隔は約 26m（図 3）であった。ケーソン沈設は、傾斜・揺動の繰返しを伴うことから、周辺地盤に傾斜・揺動による地盤の引き込みと押し込みによる影響が交互に発生すると考えられた。

このことから、本工事では、4 号ケーソンの沈設において近接する荒川ロックゲートへの影響を最小限とするため、事前に荒川ロックゲート及び周辺地盤への変状等の影響解析報告する。

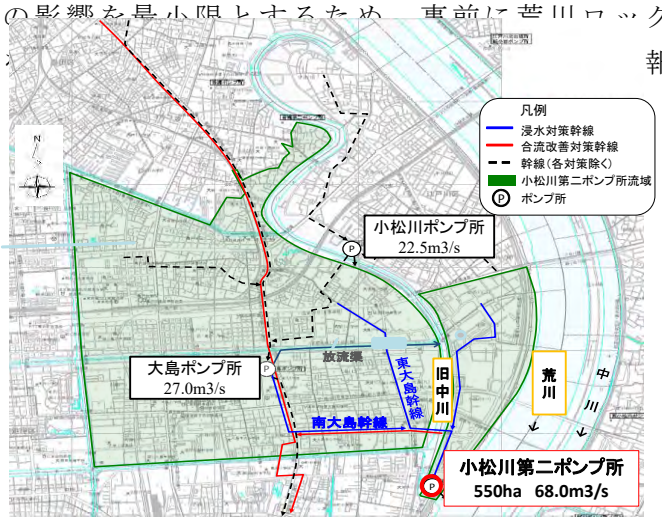


図 1 施工位置図

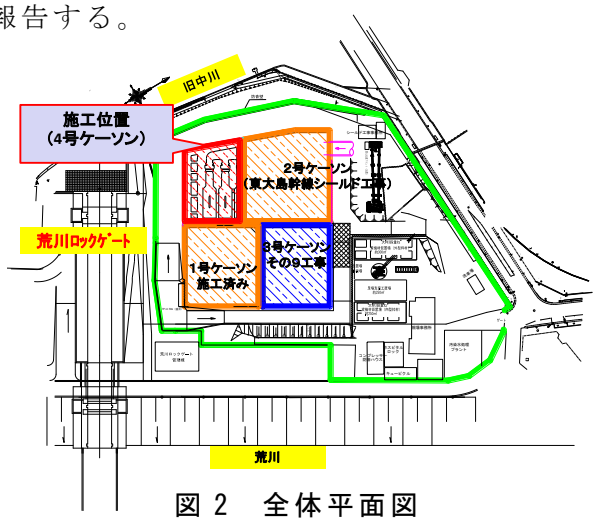


図 2 全体平面図

2. 荒川ロックゲートへの影響検討

4 号ケーソン沈設による影響範囲は、図 3 のとおりであり、国土交通省との協議の結果、荒川ロックゲートの基礎杭の許容水平変位量の管理値は表 1 の数値に定められた。

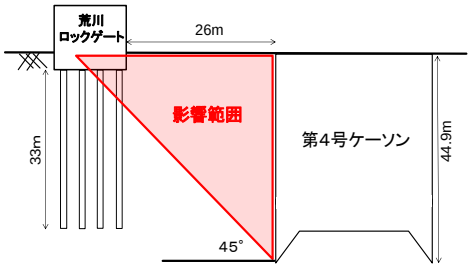


図 3 影響範囲図

地盤変状解析は、一般に有限要素法(FEM)による解析が採用されている。

本工事では、荒川ロックゲートと４号ケーソンが、ほぼ平行に位置することから、解析は二次元ＦＥＭを採用した。モデル化にあたっては、小松川第二ポンプ所地質調査報告書[1)]を参照し地質構成を定め、土質定数を決定した。

ケーソン沈設に伴う周辺地盤への主な影響は、図 4 に示す引き込みと押し出しである。無対策で４号ケーソンを沈設した場合の影響解析を行った結果、表 2 より、荒川ロックゲート基礎杭頭部の最大水平変位量は、許容値（10 ㎜）以上となった。

このことから、4 号ケーソンの沈設による荒川ロックゲートの変位量を許容値以内とするため、次に述べるような対策について検討を行った。

表 1　荒川ロックゲート基礎杭の許容水平変位量

1次管理値	2次管理値	許容値
7㎜	9㎜	10㎜

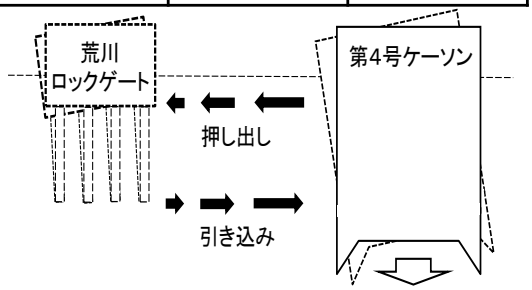


図 4　ケーソン沈設に伴う近接構造物への影響イメージ図

表 2　無対策時の水平変位量

	引き込み	押し出し	許容値
ロックゲート最大水平変位量	20mm	13mm	10㎜

3. 対策工の選定

本工事では以下のとおり、ケーソン沈設に伴う引き込みと押し出しによる周辺地盤への影響を低減する対策として、ケーソンと対象構造物の間に遮断壁を設置する方法について検討を行った。

3.1　引き込み対策工（鋼矢板）の検討

ケーソン沈設に伴う引き込みに対しては、一般的に縁切りの鋼矢板が有効であり、小松川第二ポンプ所内で先行的に施工した３号ケーソン沈設においても L=30m の VL 型の鋼矢板を設置している。そこで、本工事においてもケーソン沈設に伴う引き込みによる周辺地盤への影響低減のために、図 5 に示すように、L=30m の VL 型の鋼矢板をケーソン周辺に設置し、影響低減に対する解析を行った（表 3)。解析結果より、荒川ロックゲート基礎杭の最大水平変位量は、1 次管理値内の 4 ㎜となり、鋼矢板は引き込みに対して有効な対策であることが判明した。一方、押し出しについては、最大水平変位量が 13 ㎜となり、許容値を超える値となったため、押し出しに対しての対策工が別途必要となった。

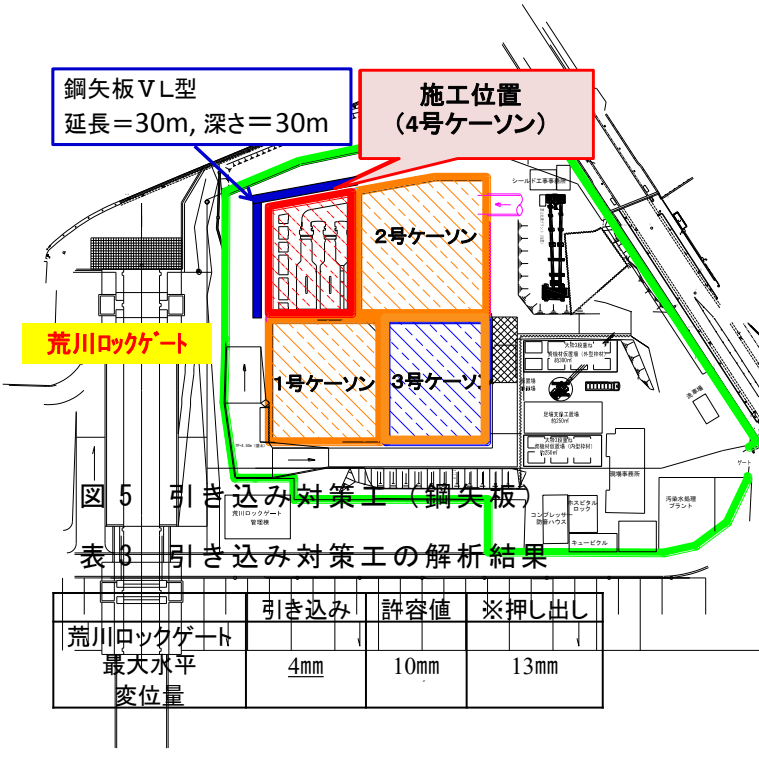


図 5　引き込み対策工（鋼矢板）

表 3　引き込み対策工の解析結果

	引き込み	許容値	※押し出し
荒川ロックゲート最大水平変位量	4㎜	10㎜	13㎜

3.2 押し出し対策工（防護壁）の検討

上記のとおり鋼矢板による対策工は、ケーソンの引き込みの影響に対しては有効であったが、押し出しに対しては有効ではないため、次に防護壁による対策工について検討を行った。

二次元 FEM 解析の結果より、地盤の変形は、防護壁が防護する構造物に近い方が小さくなる結果となり、地盤を押し出す力が掘削面から離れるにつれて小さくなるためと推定できた。そこで、押し出し対策の防護壁の設置位置について、敷地内で掘削面からロックゲートの最大離隔となる位置に防護壁を設置することについて検討を行った。

防護壁として、場所打ち杭（B=1.57m、L=32m)、鋼管矢板（φ800、L=38m)、高圧噴射撹拌杭（L=38m)、SMW での壁体(L=38m)の 4 種類を考えた。

それぞれの案を解析した結果、いずれの対策工も、押し出しの影響については、許容値を満足するが、引き込みについては、許容値を満足できなかった。

このため､引き込みと押し出しの対策工を組み合わせた併用工法を検討することとした。

表 4 押し出し対策工の解析結果

荷重ケース	押し出し	許容値	※引き込み
場所打ち杭（B=1.57m、L=32m）	2 mm	10 mm	19 mm
鋼管矢板（φ800、L=32m）	5 mm	10 mm	19 mm
高圧噴射撹拌杭（L=32m）	7 mm	10 mm	19 mm
SMW（L=38m）	6 mm	10 mm	19 mm

3.3 引き込み対策と押し出し対策の併用工法の検討

表 4 に示す 4 種類の押し出し対策工に、引き込み対策工の鋼矢板を追加した併用工法を対象として、荒川ロックゲートの変形抑制効果(基礎杭の水平変位量)と経済性等の比較を行い、対策工法を選定することとした。

解析の結果、図 6 に示すように、いずれの工法においても、荒川ロックゲート基礎杭の水平変位量を許容値以下に抑えられることが判明した。

表 5 に示すとおり、鋼矢板と場所打ち杭による対策工は、荒川ロックゲートの変形抑制効果及び工期、経済性のいずれにおいても有利な結果となったことから、本工事で採用した。

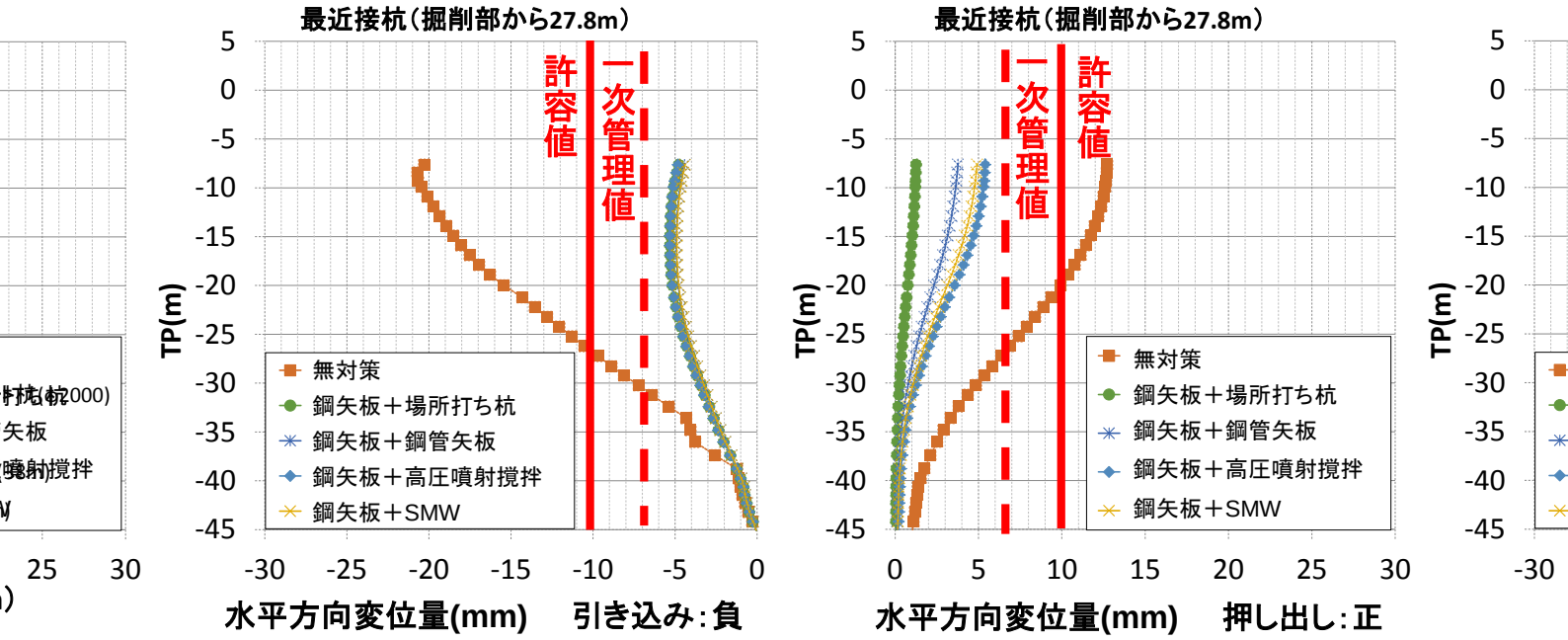


図 6　引き込み対策と押し出し対策の併用工法の解析結果

表 5　引き込みと押し出しの両方に有効と考えられる対策工の比較

工法分類		① 鋼矢板 ＋ 場所打ち杭	② 鋼矢板 ＋ 鋼管矢板	③ 鋼矢板 ＋ 高圧噴射撹拌杭	④ 鋼矢板 ＋ SMW	備考
効果	引き込み	7mm	7mm	7mm	7mm	許容値 10mm
	押し出し	2mm	4mm	5mm	5mm	
	評価	◎	○	○	○	
工期		98日 ◎	175日 ×	150日 △	156日 △	
費用		◎	○	×	△	
総合評価		◎	△	×	△	

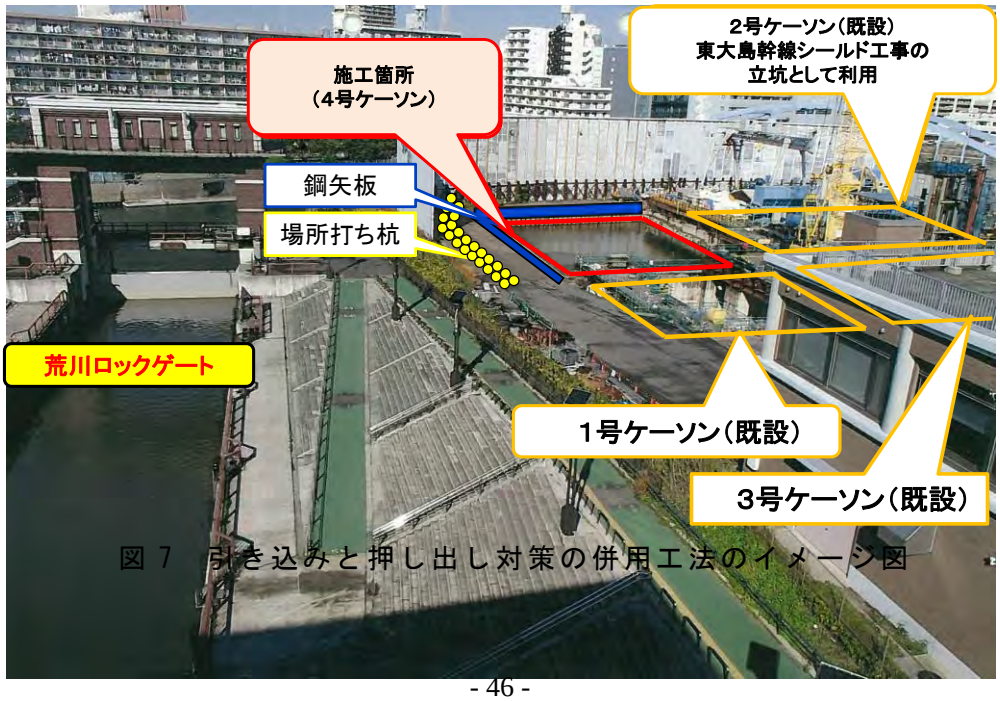


図 7　引き込みと押し出し対策の併用工法のイメージ図

3.4 計測管理及び計測結果

前項において選定した対策工の施工は、荒川ロックゲートと周辺地盤の挙動を計測管理しながら慎重に進めることとした。

図 8 に計測位置、表 6 及び図 9 に計測結果を示す。

工事期間を通して、ロックゲートへの影響を管理値内に抑えることができ、無事に竣工を迎えることができたことから、今回採用した引き込みと押し出しの併用工法は有効な対策だったといえる。

表 6 荒川ロックゲート基礎杭計測結果

	実測値 （引き込み）	実測値 （押し出し）
基礎杭 水平変位量 （最大値）	2mm	3mm

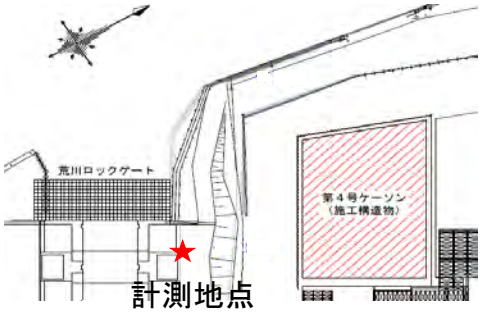


図 8 計測位置図

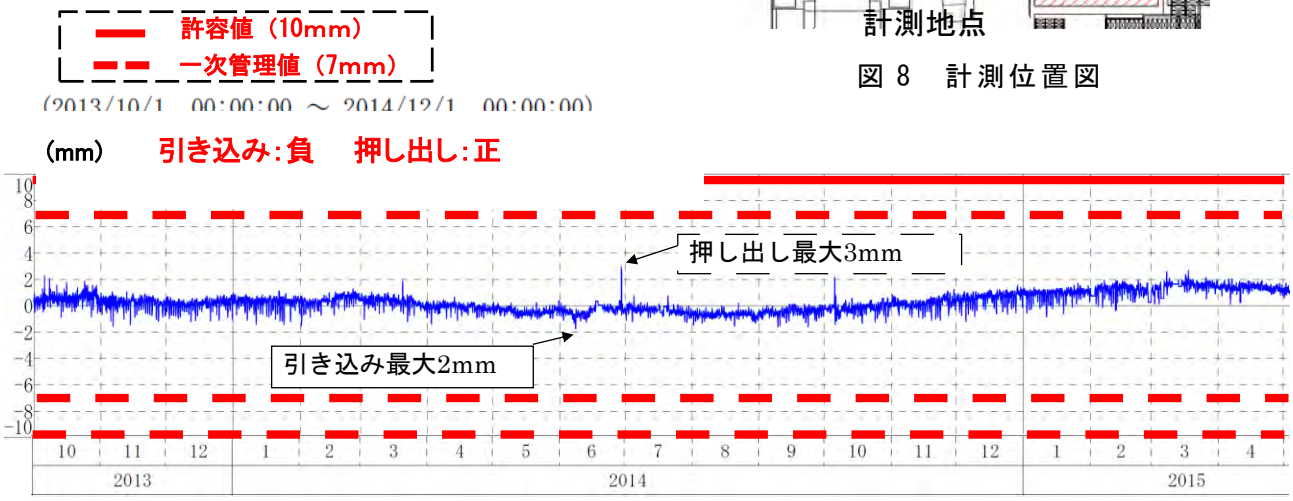


図 9 荒川ロックゲート基礎杭計測結果

4. まとめ

本工事では、ニューマチックケーソン工法を採用した場合の重要構造物との近接施工にあたり、ケーソン沈設による周辺地盤への影響低減対策として、引き込みについては鋼矢板を、押し出しについては場所打ち杭を対策工とする併用工法を採用し施工した。

また、本工事では対策工に加えて、荒川ロックゲート及び周辺地盤の挙動の計測管理により、常にケーソンの施工によるリスクを最大限低減する措置を講じた。

今後も、当局のポンプ所等の大規模構造物の建設において、本工事と類似するような重要構造物との近接施工に際し、引き込みと押し出しの両対策が必要となると考えられる。今回の経験を活かし、第一基幹施設再構築事務所の「安全は、何よりも優先する」を合言葉に、ケーソン沈設に伴う重要構造物への影響を最小限にとどめる対策を図り、工事を安全に施工していきたい。

参考文献

1) 小松川第二ポンプ所地質調査報告書、平成 10 年

1-1-3 大径礫・流速の速い地下水・急勾配における

シールド施工について

～豊島区目白三丁目、新宿区下落合二丁目付近再構築その３工事～

第一基幹施設再構築事務所　工事第二課　貞本健志

1. はじめに

本工事は、既設管きょの雨水排除能力の増強を図るため、新たな管きょ（⊙2400mm）を泥土圧シールド工法によって施工するものである。当シールド工事の通過地層は、上層から洪積の粘性土、礫、砂質土となっており、このうち礫層は 50 ㎜～250mm に及ぶ大径礫で構成され、その層内には被圧された地下水が 1.2cm/分程度の速い流速で流れていることが流向流速測定調査により確認された。さらに、本工事では礫層をできるだけ避け、粘性土を掘削する方針で線形が計画されていたが、急激に地形及び地層構造が変化する一部区間では、礫層を急勾配（105.1‰）で掘進する必要があった。

こうしたことから、本工事では①大径礫への対策、②流速の速い地下水への対策、③急勾配施工への対策を講じて施工を行った。今回、その内容について報告する。

2. 工事概要

2.1 工事目的

ＪＲ目白駅付近は過去に浸水事故が発生しており、早急な対策が必要となっていた（写真 2.1）。このため、本工事では豊島区目白一、三丁目、高田三丁目、新宿区下落合二、三丁目付近の既設管きょの雨水排水能力の増強を図ることを目的として、泥土圧シールド工法により新たな管きょ 1,256m を敷設した。工事区間は図 2.1 のとおり、ＪＲ目白駅付近の発進立坑（「その１工事」で施工済み）から学習院大学の南側に新設する到達立坑までであり、到達立坑において既設幹線に接続している。

写真 2.1　過去の浸水被害状況（H24.8）

図 2.1　工事案内図

2.2 構造物内容

・円形管（泥土圧シールド工法）一次覆工
　⊙ 2400 ㎜　　（194.40m）
・円形管（泥土圧シールド工法）一次覆工
　（二次覆工一体型）
　⊙ 2400 ㎜　　1061.55m
・円形管（泥土圧シールド工法）二次覆工
　⊙ 2400 ㎜　　194.40m
・人孔　　1 箇所
・立坑　　1 箇所

写真 2.2　シールドマシン

2.3 土質面の課題

当該地域の地層は、粘性土、礫、砂質土からなる。本工事着手前の準備段階において追加の土質調査を行った結果、当該地域の地層に関して以下の二つの問題が浮上した。

2.3.1 大径礫

当初計画では、既存のボーリング調査結果から、礫の最大径を 70mm であると想定していた。そこで、シールドマシンは想定された礫径を 3 倍した 210mm を取り込めるよう計画していた。しかし、現場着手後の追加調査結果により、地層には大径礫が多く、最大径は 250mm に及ぶことが判明した（写真 2.3～2.4）。

この結果、当初計画のシールドマシンでは、スクリューコンベアが閉塞してしまうなど、不具合が出る可能性があるため、マシンの設計を見直す必要が生じた。

写真 2.3　礫サンプル

写真 2.4　礫サンプル（拡大図）

2.3.2 流速の速い地下水

今回、ボーリング孔を用いた熱量法によって、地下水の流向流速測定を行った。その結果、対象層内には被圧された地下水が 1.2cm/分程度の流速で流れていることが確認された。砂礫層における通常の地下水が 1×10^{-1}～1×10^{-2}cm/分 [1)]であることを考えると、非常に流速が速いため、加泥材が流出するなど、地盤に影響を及ぼす恐れがあった（写真 2.5～2.6）。

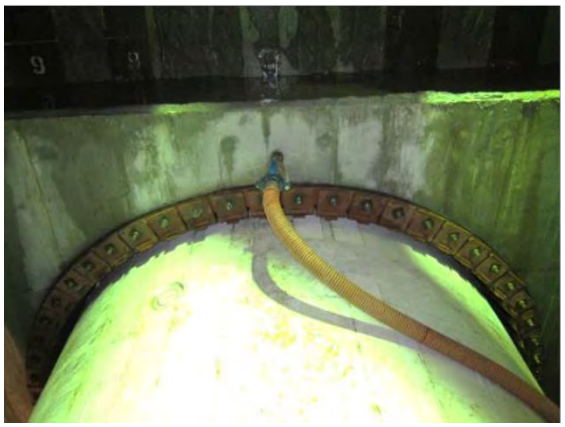


写真 2.5　地下水調査状況

写真 2.6　地下水調査状況

3. シールド線形の課題

本工事では礫層をできるだけ避け、粘性土内を掘削するルートで計画されていた。しかし、急激に地形及び地層構造が変化する一部区間では、礫層を急勾配（105.1‰）で掘進する必要があり、安全性や工期面での対策が求められた（図 3.1）。

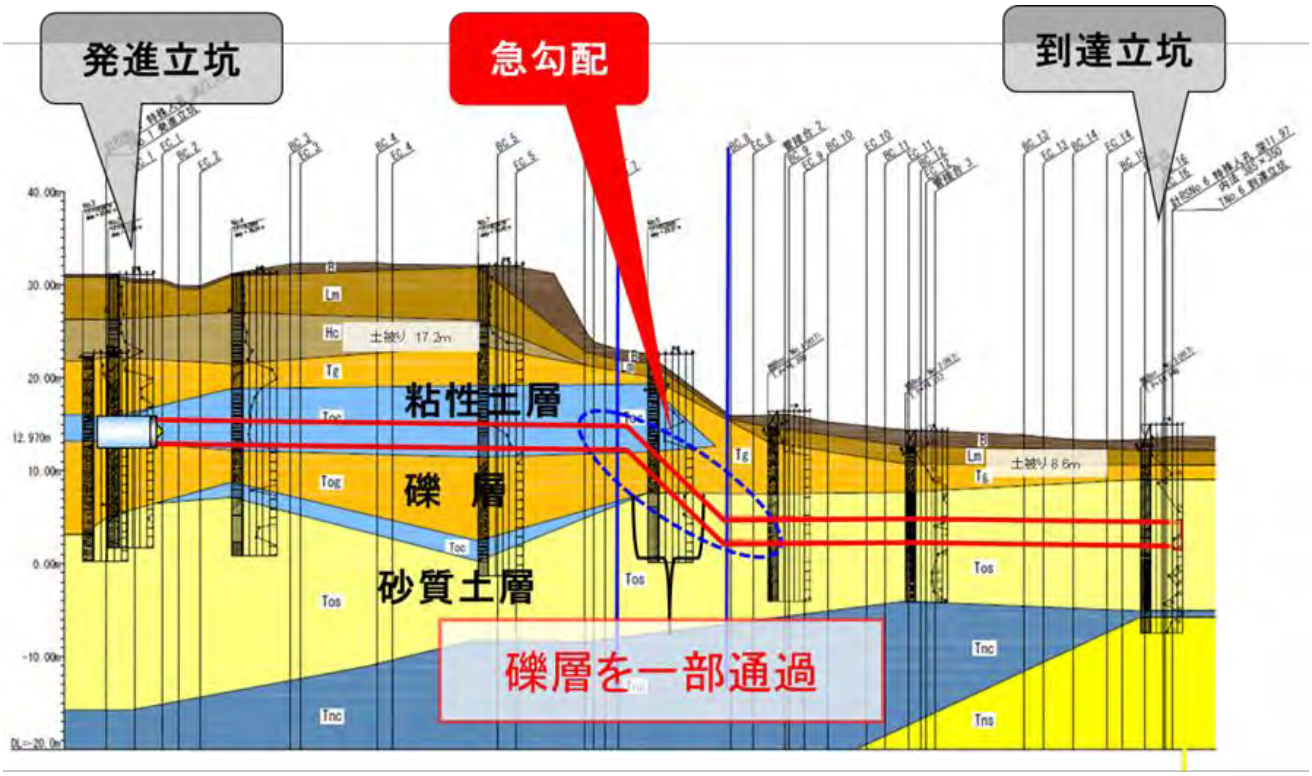


図 3.1　シールド線形及び土質断面図

4. シールドマシンの変更及び安全対策

前述のとおり、土質調査によって明らかになった大径礫、流速の速い地下水及び急勾配施工の 3 つの課題に対して、以下に示すシールドマシンの変更及び安全対策を行った。

4.1 大径礫への対策

(1) カッタービット

大径礫を掘削することによって、カッタービットが想定以上に摩耗することや欠損することが考えられた。そこで、当初設計よりもカッタービットを 24 箇所増設し、大径礫にも対応できるように変更した（写真 4.1、図 4.2）。

写真 4.1 シールドマシン（前面）

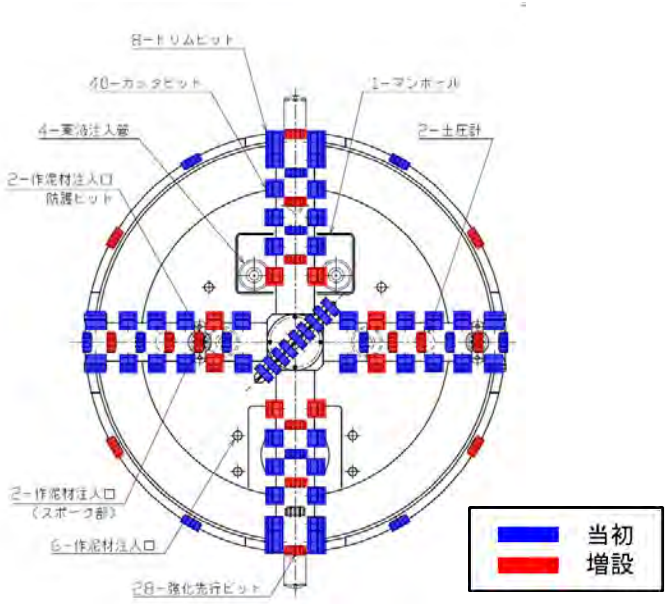


図 4.2 シールドマシン（前面）

(2) スクリューコンベア

大径礫を取り込む際、スクリューコンベアが停止して、搬送作業ができなくなることが考えられた。そこで、スクリューコンベアの径を当初設計の 400mm から 450mm に増径して、大径礫を取り込めるようにした。

また、一般に掘削土砂に大径礫が含まれている場合には、軸を備えていない「リボン式スクリューコンベア」を使用するが、これは止水性に劣っている。一方、「軸付きスクリューコンベア」は止水性に優れている。そこで当現場のスクリューコンベアは、先端を「リボン式」、後端を「軸付き」とすることで、大径礫の排出と止水性の両方を満足できる構造とした（図 4.3）。

(3) カッター支持方式

上記のスクリューコンベア増径によって、シールドマシン機内での作業スペースが縮小されてしまうことが懸念された。そこで、カッターの支持方式を当初計画の「センターシャフトタイプ」から「外周支持タイプ」に変更することで、作業スペースを確保した（図 4.3）。

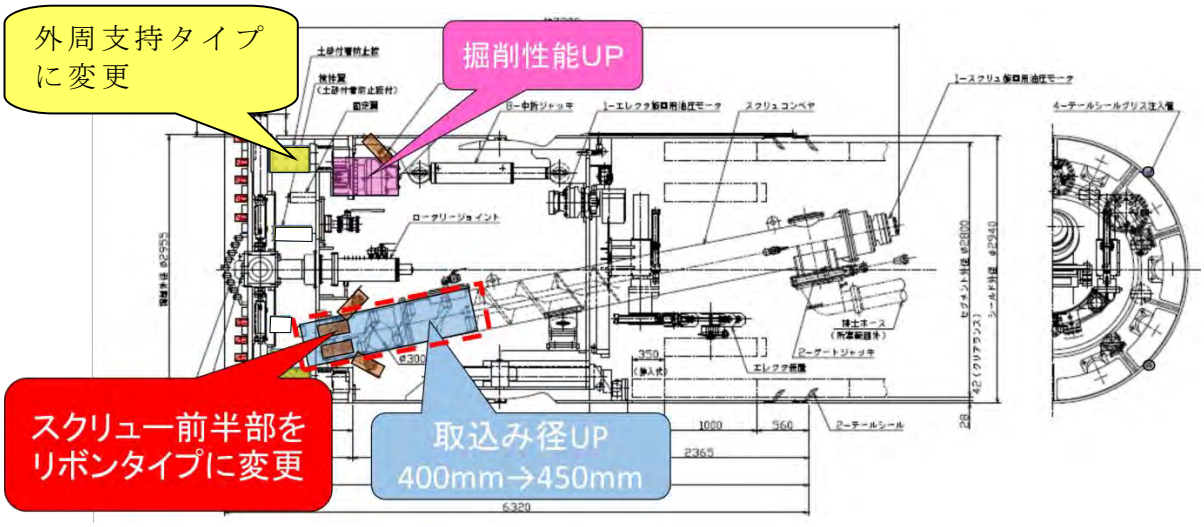


図 4.3　シールドマシンの変更内容（側面）

4.2　流速の速い地下水への対策

（1）カッター駆動モーター

流速の速い地下水への対策として、駆動能力の高いモーターに変更し、最大回転数を上げることで、掘削性能を向上させた（図 4.3）。

（2）加泥材注入口

流速の速い地下水によって、加泥材が流されてしまい、切羽の安定が保てず周辺地盤や家屋に影響を与えることが考えられた。そこで、非常事態に備えて、マシン外周やスクリューコンベア部等複数箇所から加泥材を注入できる機構として、加泥材が流された場合に迅速に追加注入できる加泥材注入口を 6 箇所増設し、計 8 箇所とした（図 4.4）。

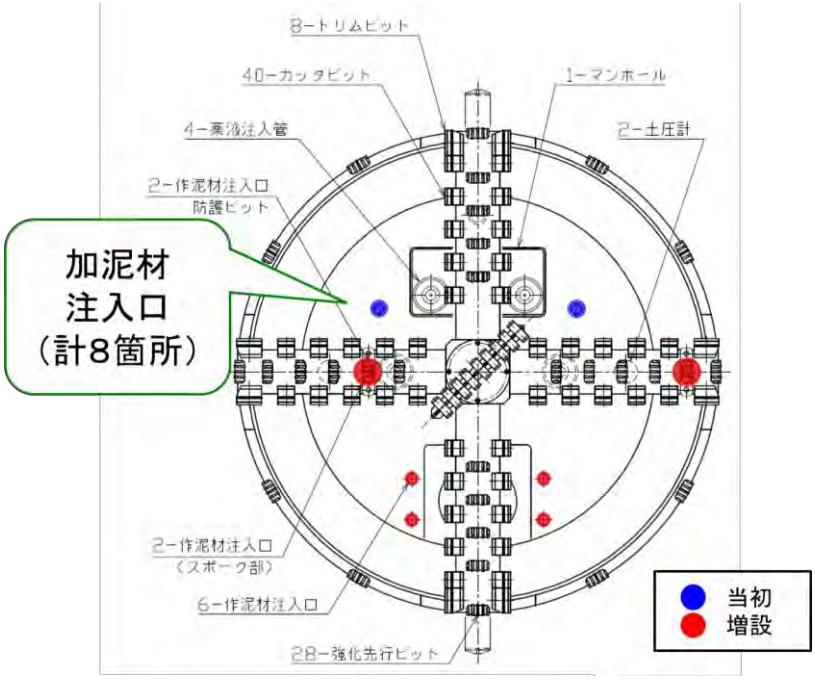


図 4.4　シールドマシン（前面）加泥材注入口の増設

4.3 急勾配施工への対策

「労働安全衛生規則第 202 条」には、「トンネル工事で用いられる軌条の勾配は、バッテリー機関車等の動力車を使用する場合は 50/1000（50‰）以下とすること」とされている。当現場では 105.1‰の急勾配での施工であることから、セグメント搬送等に使用されるバッテリー機関車の安全対策が問題となった。そこで、当現場では機関車に「ピンラック＆ピニオン方式サーボロコ」を使用した（写真 4.2）。

これは従来のサーボロコにピニオンギアを装備したものである。平坦部では通常の車輪の駆動力、急勾配部では軌条に設置したピンラックにピニオンギアが噛み込み、ピニオンギアの駆動力によって牽引力とする方式であり、ピンラックが逸走防止の歯止めの役割も兼ねている（写真 4.3）。

また、サーボロコに浮上防止機構も装着した。ピンラック上部にフランジがあり、これを挟み込むように、上部に押え付け用ローラー、下部に補助板を有し、台車とピンラックが一体となることで、機械の浮上や転落を防止することも可能になっている（図 4.5）。

後続台車についてもブレーキ機構がないため、急勾配対策を講じる必要があった。計画段階では、専属監視員を配置して、電動ウインチによる送出し方式等の検討もしたが、ヒューマンエラーによる事故等が懸念された。そこで安全を確実なものにするため、急勾配手前でシールド機と後続台車を切離し、後続台車を置き去りにし、ホース・配管類を延長していく初期掘進方式を採用した（写真 4.4）。

写真 4.2 サーボロコの稼働状況

写真 4.3 ピニオンギア設置状況

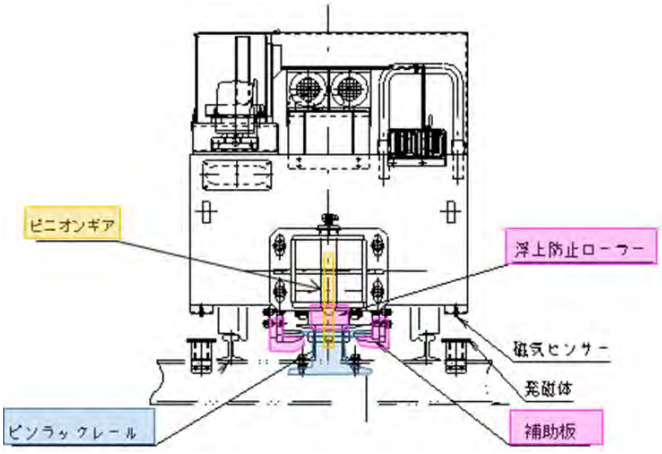


図 4.5 サーボロコの逸走防止及び浮上防止機構

写真 4.4 急勾配手前において切離した後続台車、ホース・配管類の延長部（初期掘進方式掘削）

5. おわりに

今回、数々の厳しい施工条件の下で泥土圧シールド工法による施工を行った。

250mm を最大径とする礫層掘進対策として、カッタービットを 24 箇所増設し、スクリューコンベアも増径するとともに、リボン式スクリューと軸付きスクリューの複合型を採用して大径礫を取り込めるようにした。また、流速の速い地下水対策として、カッター駆動モーターの最大回転数を上げて掘削能力を向上させ、非常事態に備えて加泥材注入口も増設した。さらに、105.1‰の下り急勾配対策として、「ピンラック＆ピニオン方式サーボロコ」を使用して、逸走防止や浮上・転落防止を図った。

これらの対策によって 1,256m の一次覆工を完了し、平成 27 年 9 月に到達した(写真 5.1)。

今回の事例が今後の類似工事において参考となれば幸いである。

写真 5.1 シールドマシン到達状況（H27.9）

参考文献

1) 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会：機関誌「地質と調査」、1990 年

1-2-1 時間 75 ミリの降雨に対応した下水道幹線の設計手法について

第二基幹施設再構築事務所 設計課 渡邊 裕介

１.はじめに

東京 23 区では、東京都の施設整備水準である時間 50 ミリを超える集中豪雨が平成 25 年に 4 回発生した。特に、平成 25 年 7 月 23 日の集中豪雨では時間 100 ミリを超える雨が降り続き、平成 25 年では 23 区の南西部を中心に 700 棟以上の浸水被害が発生した。この被害状況を受け、東京都下水道局では「豪雨対策下水道緊急プラン」を策定し、これまでの時間 50 ミリ対策と地下街対策として行っていた 75 ミリ対策に加えて、甚大な浸水被害が発生している地域においても時間 75 ミリ降雨に対応する下水道施設計画に着手することとした。

本稿では、市街地において初めて 1 時間 75 ミリの降雨に対応できる施設を建設する「75 ミリ対策地区」の一つに指定された蛇崩川幹線流域を対象として、蛇崩川幹線を増強する新たな施設整備計画及びその設計手法について報告する。

２.流域概要

目黒区と世田谷区に位置する蛇崩川幹線は、延長約 9.7km、内径 φ 1350mm～5700mm×3200mm の合流式の下水道幹線である。桜の名所となっている二級河川目黒川の支川であったが昭和 30 年代に河川に蓋をかけて下水道幹線化したものであり、土被りが非常に浅い。全体では約 641ha の流域となっており、最下流部の目黒川に雨水の放流を行っている。流域は都市化が進んでおり、過去にも浸水被害が頻発したことから雨水調整池を 2 箇所（貯留量約 1.2 万 m^3）設置している。平成 25 年 7 月 23 日の集中豪雨では、主に幹線沿いで浸水被害が発生し、流域全体では床上浸水が 30 棟以上、床下浸水を含む浸水被害としては約 60 棟発生した（図１）。

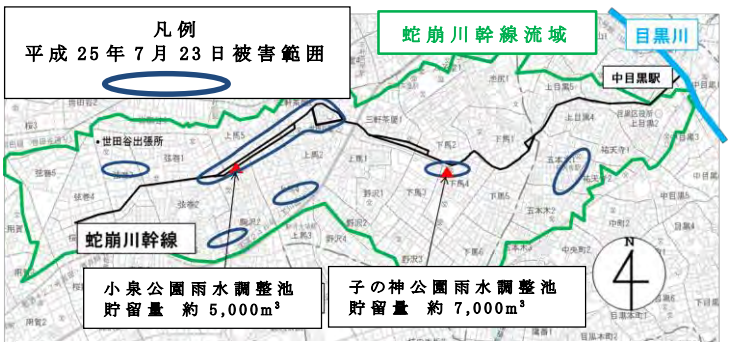


図 1 蛇崩川幹線流域における浸水被害

３.設計手法

（1）基本的な考え方

東京都では、50mm/hr 降雨までは流下方式により雨水を排除する方式を採用している。75mm/hr 降雨について、河川施設が 75mm/hr 対応を目標に掲げたことから、下水道施設としても基本的には流下方式とすることとした。また、増強幹線は既存の埋設物等により、深い土被りの施設となる。

① 自然流下方式

本流域は 50mm/hr 計画において自然流下方式（ポンプに依らない方式）と位置付けられていること等から 75mm/hr 計画においても最下流部における河川への接続方式は自然流下方式とした。また、増強幹線は深い土被りの施設となることから、河川への自然流下による放流が困難となるため、ふかし上げ方式を採用した。

② 既存施設の有効活用

既設幹線は水量も多く、供用しながらの布設替えは非常に困難であること等から、新たに増強幹線を布設し 2 つの幹線で 75mm/hr 降雨に対応できる施設とした。増強幹線のルートは、既設幹線上で浸水被害が多く発生したことから、既設幹線の下に基本的に増強幹線を布設し、既設幹線から分水して雨水を取り込むこととした。

(2) 施設規模

図 2 の設計フローに沿って施設規模を決定した。

①既設幹線の能力評価 Q_1(m^3/s)

施設台帳より既設幹線の構造を把握し、等流計算により将来の再構築断面を想定した各スパンの能力（Q_1）を評価する。

②能力を超える水量の算出（q_2）

合理式（50mm/hr）により、各スパンの流出量（q_1）を求め、再構築後の既設幹線の能力を超える分の水量（q_2）を算出する。計算にあたっては、2 割分の余裕を考慮する。

③増強幹線の施設規模 Q_2(m^3/s)の設定

上記により算出された水量 q_2 より、増強幹線の施設規模を設定する。(施設規模の能力：Q_2) 計算にあたっては、2 割分の余裕を考慮する。

$Q_1+Q_2 \geqq 1.2(q_1+q_2)$

④流出解析シミュレーションの実施

流出解析ソフトを用いて、当該流域の既設下水道枝線（φ600mm 以上）をモデル化し、75mm/hr 降雨を流域全体に一様に降らせシミュレーションを行う。シミュレーションの主な条件は表 1 のとおりである。

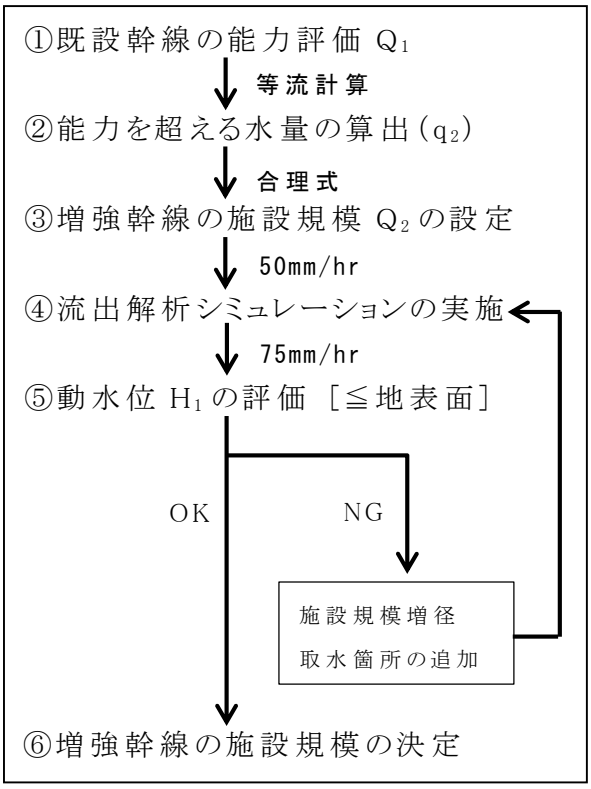


図 2 設計フロー

表 1 シミュレーション条件

項目	内容
解析面積	641ha
対象降雨	時間75ミリ降雨 $I=1700/(t^{0.7}+4.8)$ I:降雨強度(mm/hr) t:降雨継続時間(min)
既設蛇崩川幹線	縮径 (再構築断面を想定)
既設下水道枝線	増径(浸水しない)
取水形式	既設幹線から横越流
放流先河川水位	HWL
既設雨水調整池	考慮する

⑤動水位 H_1 の評価

シミュレーションの結果より、既設幹線の動水位（H_1）が地表面を超えて浸水しないように確認を行う。

H_1 ≦ 地表面

⑥増強幹線の施設規模の決定

⑤の評価で動水位が地表面を超えていた場合、増強幹線の増径や取水地点の追加等を行い、再度流出解析シミュレーションを実施し動水位が地表面以下となる規模を決定する。

（3）シミュレーション結果

シミュレーションの結果、既設蛇崩川幹線（φ1350mm～5700mm×3200mm）に対して、増強幹線はφ2200mm～5000mmの規模となった。シミュレーションによる既設幹線の管内水位を図3に、動水位を図4に示す。

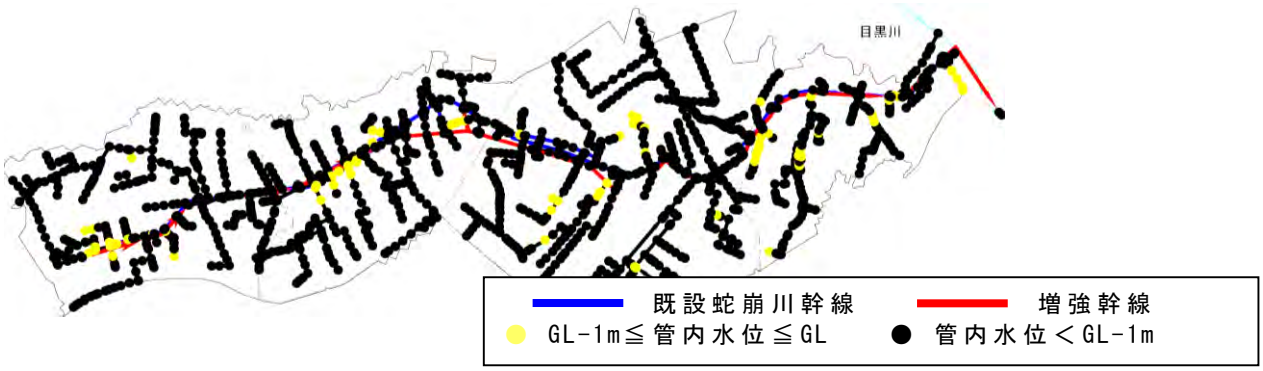
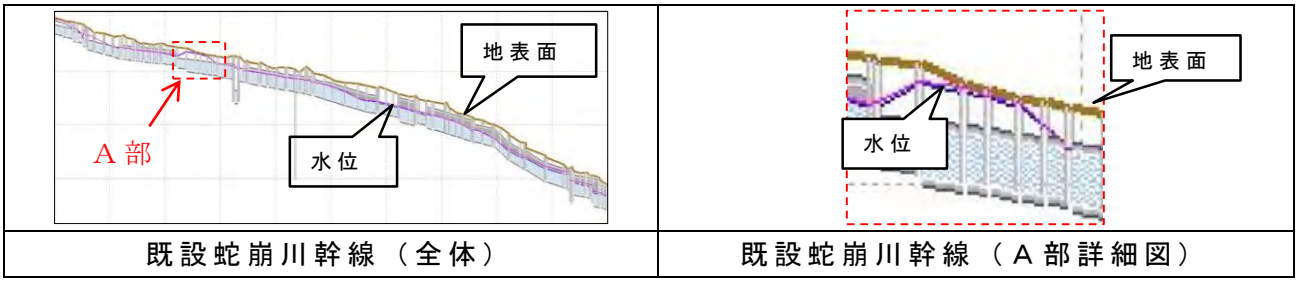


図 3 シミュレーション結果（管内水位）



既設蛇崩川幹線（全体）　既設蛇崩川幹線（A部詳細図）

図 4 シミュレーション結果（動水位）

4.段階的な施設整備計画

75mm/hr 降雨に対応することから、施設規模は大規模となり、既設埋設物の関係で縦断計画も大深度となる。

整備にあたっては、規模や構造よりシールド工法を計画しているが、施設完成までは、相当の長期間を要することが想定される。

このため、増強幹線の上流部の約 2.7km を先行整備期間と定め、段階的に工事を先

行して実施し、工事完了後は暫定的に貯留管として供用させ、浸水対策の効果を早期に発現させる予定である。

これまでの検討では、先行整備区間は貯留量として約 4 万 m^3 となり、同流域に整備済みの貯留施設の総容量(約 1.2 万 m^3)を大きく上回ることとなり、浸水軽減に絶大な効果が期待される（図 5)。

図 5　増強幹線の段階的な施設整備計画

５.おわりに

東京都で初めて市街地において時間 75 ミリ降雨対策施設の整備計画を立案した。平成 27 年度現在、先行整備区間の実施設計を行っており、平成 27 年度末にはシールド立坑の用地整備工事に着手する予定である。道路や公園等の管理者との円滑な協議・調整に努め、2020 年（平成 32 年）に開催される東京五輪・パラリンピックまでに効果発現を目指していく。

参考文献

1）東京都：東京都豪雨対策基本方針（改定） 平成 26 年 6 月

1-3-1 汚泥処理施設における安定的な電源確保について

～ガスエンジン発電機の導入～

建設部 設備設計課 片岡 紘亮
甲田 裕章
齋藤 健士
青柳 正俊

1. 導入の経緯

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災では震災直後の停電に加え、その後計画停電が実施され、また夏季には電力需給ひっ迫により、大口需要家に対して電力使用制限等規則及び、それに基づく告示（以下「電力使用制限令」という。）が発令されるなど、我が国の電力需給の信頼性が揺るがされる事態となった。東京都下水道局の施設においても運転調整による設備停止や非常用発電機の運転による対応を強いられ、大きな影響を受けた。これまで当局では、非常用発電機の電力負荷は揚水設備と水処理設備の一部（合流式の雨天時の場合）とし、汚泥処理設備は対象外としてきた。しかし、この震災による汚泥処理設備の停止が施設全体の運営に影響を及ぼしたことから、汚泥処理施設における電力確保の必要性を再検討した。その結果、経営計画 2013 において「震災時の自己電源の確保」として位置付け、南部スラッジプラントでは新たに発電機を導入し安定的な電源確保を図ることとなった。

発電機を導入するにあたり、原動機を比較検討した結果、今回の条件では、ガスエンジンが最適であると判断し、ガスエンジン発電機の導入に至った。しかし、当局では今までガスエンジンを採用した例がないため、ガスタービン発電機と比較し、冷却系や負荷投入時の制限等新たな項目の検討が必要となった。

ここでは、ガスエンジンの選定に至るまでの検討内容や、設計上の留意点等について報告する。

2. 汚泥処理施設に適切な発電設備の選定

汚泥処理施設における安定的な電源確保を実現するには、「停電時の電源確保」と「電力使用制限令発令時に対応するための電源の確保」という 2 点の課題を解決する必要がある。これらを解決するシステムとして、「非常用・常用兼用発電機」の設置と「非常用発電機＋電力貯蔵設備」の設置の 2 案が考えられる。

一方で、汚泥処理施設では水処理施設と比較し求められる発電機の要求事項が異なるため、汚泥処理施設における最適なシステムとする必要がある。そこで、発電機に使用する原動機の種類と、電力貯蔵設備の設置の要否を検討し、汚泥処理施設の特徴にあったシステムを選定した。

(1) 汚泥処理施設と水処理施設との発電機要求事項の比較検討

汚泥処理施設、水処理施設それぞれにおける使用条件として発電機に必要な要件を比較した。

ア 発電機短時間始動の必要性

水処理施設については揚水設備があるため、短時間での始動が必要となるが、汚泥処理設備ではそのような短時間始動を要する設備はない。

イ 連続運転時間について

水処理設備において、停電状況下でのポンプの運転は、過去の実績より最大でも 2 時間程度である。また、電力使用制限令への対応は、電力貯蔵設備による不足電力の供給で対応している。一方、汚泥処理設備に関しては、施設の安全な停止のために 3 時間程度を要する。さらに電力使用制限令に対応するためには、11 時間の発電機運転もしくは電力貯蔵設備による対応が必要になる。

(2) 使用燃料の検討

発電機で使用する燃料について検討した。燃料は主に都市ガスと液体燃料があるが、都市ガスについては、当施設ではすでに焼却施設のための中圧 B ガス管が使用されており、また敷地に面する道路にガス会社が管理する中圧 A ガス管もある。さらに中圧ガス管は耐震性に優れ、震災時にも供給が停止しなかった実績がある。一方、液体燃料については当施設に貯蔵タンクはないため、新たに設置しなければならない。また、東日本大震災時にはタンクローリーが不足し、当局施設に発災から少なくとも 10 日間は燃料が供給されなかった実態がある。したがって、常時燃料を必要とする常用発電機については液体燃料を使用する原動機を除外して検討した。

(3) 発電システムの比較

各発電システムの特徴を表 1 にまとめ、比較検討した。なお、ガスエンジン発電機は常用・非常用に区分はなく、停電時始動に必要な付帯設備を含む形で記載している。

表 1　各発電システムの特徴

発電機機関	ガスエンジン	ガスタービン		ディーゼル エンジン
常用／非常用区分	常用･非常用	非常用	常用	非常用
燃料	都市ガス	灯油	都市ガス	軽油/重油
発電効率	**約 45%**	約 20%	約 30%	**約 40%**
始動時間	約 10 分	**約 3 分**	約 10 分	**約 40 秒**
窒素酸化物（NOx）	200ppm	150ppm	150ppm	950ppm
排ガス処理装置	不要 （規制値※1:200ppm）	－	要 （規制値※1:60ppm）	－
ﾎﾞｲﾗｰ･ﾀｰﾋﾞﾝ主任技術者	不要	不要	要	不要
電力貯蔵設備	不要	要	不要	要

※1　窒素酸化物(NOx)の排ガス規制値。

これら特徴から､汚泥処理施設における発電設備要件に関しては､上記すべての機関が要件に合致する。したがって、電力貯蔵設備や排ガス処理装置等が必要ないガスエンジン発電機を選定した。

3. ガスエンジン発電機の概要と仕様

ガスエンジン発電機の基本構成は図 1 のとおりである。都市ガスを使用する原動機の特徴として、流入ガス圧力が低い場合に対応するためガス圧縮機が必要になり、その付帯設備にも冷却設備が必要になる。本発電機の燃料の供給圧力は、ガス会社との協議により最低 0.3MPa、通常時 0.7MPa となる。本発電機では最低 0.45MPa の圧力が必要であるため、これより圧力が低い場合にはガス圧縮機が運転される。一方、供給圧力が 0.45MPa より高い場合は昇圧の必要がないため、バイパス経路を通るシステムを構築し、圧縮機を停止させることにより省エネを図っている。

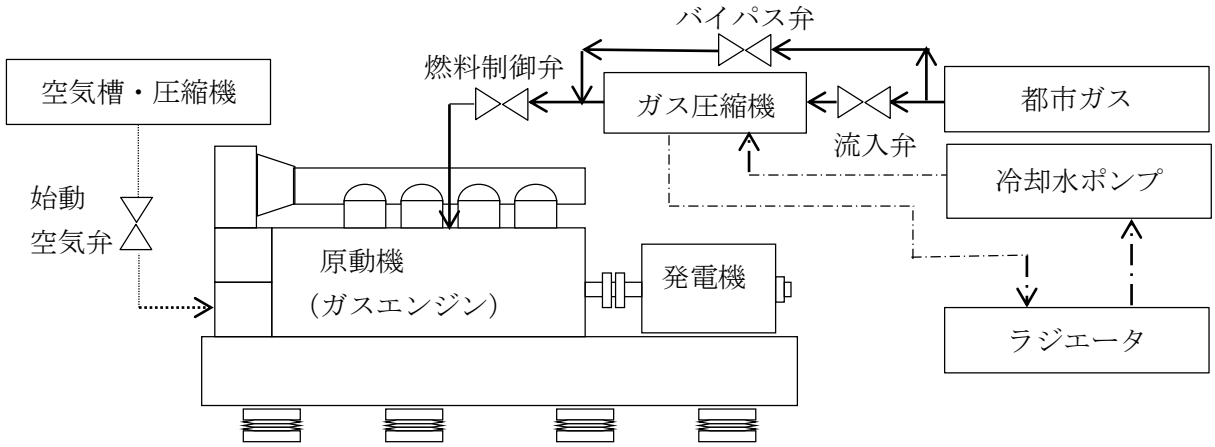


図１　ガスエンジン発電機概略図

発電機本体には、ガスタービンやディーゼルエンジンと同じ横軸、空冷、全閉、無保護形の同期発電機を採用している。表－2 にガスエンジン、発電機の仕様を示す。

表 2　原動機・発電機仕様

	原　動　機　仕　様
形　　式	4 サイクル、V 型、水冷（ラジエータ式）
定 格 出 力	発電機端出力　7,800kW
年間運転時間	6000 時間以下（クラス A 相当※1）
年間始動回数	500 回未満（レンジⅡ相当※1）
継続運転時間	168 時間以上
始 動 装 置	空気式
始 動 時 間	電圧確立まで 3 分、定格運転まで 10 分
使 用 燃 料	都市ガス（13A）
冷 却 方 式	空冷及び水冷

	発　電　機　仕　様
形　　式	横軸、空冷、全閉、無保護形、回転界磁式
定 格 出 力	8,667kVA
定 格 電 圧	6.6kV
定格周波数	50Hz
相　　数	三相
力　　率	90%（遅れ）
励 磁 方 式	ブラシレス形永久磁石発電機式
冷 却 方 式	空冷

※1 ガスタービンの調達仕様（JIS B 8042-2）との比較のために記した。

4. ガスエンジン発電機の設計上の留意点

設計時に発現した固有の留意点を以下に述べる。

（1）停電時起動の条件

今回導入のガスエンジン発電機は、始動時にガス圧縮機及び冷却水ポンプの運転が確立していないと、停電時に自立運転ができない。そのため、停電時には小型非常用発電機により各付帯設備を運転し、ガスエンジンの始動を可能とした。なお、ガスエンジンが定格運転を確立した後に小型非常用発電機は停止する。

（2）冷却系の信頼性

ガス圧縮機や潤滑油冷却について、発熱量が大きく空冷を選択できないため、水冷設備を設置しなければならない。近年、当局における発電機の冷却方式は、空冷を基本原則としてきた。これは水冷方式の場合、災害時に冷却水の供給が不能となると発電機の運転が不可能となるためである。そこで本発電機では、ラジエータで冷却水の熱交換を行い、水の供給がなくても運転できるシステムとした。

(3) 負荷変動への対応

ガスエンジンは、軽負荷運転を行うと不完全燃焼を起こし、シリンダ内にススが残りクランク破損の恐れがある。また負荷変動に対する許容が小さく、大型機器の同時運転あるいは同時停止をすることができない。これらについて、商用電源との系統連系時は負荷分担することで対応できるが、単独運転時に主幹での制御はできないことになる。そこで本発電機では、乾式負荷装置を設置することで負荷変動の制御を行い、機器の運転、停止の自由度を確保し、かつ軽負荷時の運転を可能にした。

5. まとめ

ガスエンジン発電機は、中圧ガスを使用する場合に液体燃料を使用した発電機と比較し災害に強く、また環境負荷の小さい発電機である。下水道施設におけるガスエンジンの採用の可否は、発電機の使用形態や起動時間の長さと負荷投入条件が合致するか、ガス管敷設や排ガス処理装置設置の費用が主な判断基準となる。これら条件に合致していれば、費用対効果に優れた非常用・常用兼用の発電機としての選択肢の一つになる。

なお本発電機は、現在、製作段階に入っている。稼働は平成 28 年 4 月を予定している。

1-3-2 町屋ポンプ所における非常用発電機の設置について

～隅田川を利用した機器搬入の記録～

北部下水道事務所　ポンプ施設課　大槻 俊介

1. 工事の目的

町屋ポンプ所は、昭和30年に稼働したポンプ所であり、荒川区と北区の一部地域の汚水を吸揚し三河島水再生センターへ送水するとともに、雨天時には雨水排除を行っている。

当ポンプ所には非常用発電機としてディーゼル発電機(1250kVA)が既に設置されているが、何らかの事故又は計画停電等で停電した場合、ディーゼル発電機では4台ある雨水ポンプを全台運転することができない。こうした課題に対応するため、経営計画2013において震災対策における非常用発電設備の整備が施策の一つとして実施されることになり、町屋ポンプ所に非常用発電機（ガスタービン発電設備）を増設し、自己電源の増強を図ることとなった。狭隘なポンプ所において、新たな発電機を設置することは、施工上様々な課題があった。こうした課題に対して、どのように克服したかを報告する。

図1　町屋ポンプ所案内図

図2　町屋ポンプ所正門

2. 工事概要

工 事 件 名：町屋ポンプ所ガスタービン発電設備整備工事
受　注　者：株式会社 明電舎
工　　期：平成25年2月18日～平成26年2月25日
工 事 内 容：自家用発電設備一式、配電盤設備一式、監視制御設備一式、計装設備一式

3. ガスタービン発電機仕様

定格出力：1,250kVA
定格電圧：3.15kV-6.3kV
定格周波数：50Hz

相　　数：三相
使用燃料：Ａ重油

4. 制限の多い施工環境

(1)発電機搬入に関わる課題

本ポンプ所は非常に狭小な敷地にあり、発電機はポンプ所建屋と隅田川堤防に挟まれたわずかなスペースに設置する以外に選択肢がなかった（図 3)。また、町屋ポンプ所は場内の通路が非常に狭く､正門から場内通路を使って発電機本体を搬入することは困難だった。このため、発電機を台船で運搬し、河川からクレーン台船を用いて、堤防を越えて搬入することとした（図 4)。

発電機の輸送経路については、まず工場から陸路で新木場まで輸送し、新木場にあるヤードにて発電機本体を運搬船に積み込み、荒川を船で遡上した（図 5)。隅田川沿いにある町屋ポンプ所への輸送にあたって、隅田川に架かる橋は低いものが多いため、積荷との接触が懸念された。また、隅田川河口付近は遊覧船の往来も多く危険が伴うことから、荒川を河口から上っていくルートを選択した。荒川から隅田川へは上流の岩淵水門から入り、隅田川を下る経路で町屋ポンプ所に発電機を輸送・搬入した（図 6)。

図3　発電機搬入位置

図4　クレーン台船による発電機搬入の様子

図5　発電機輸送経路①

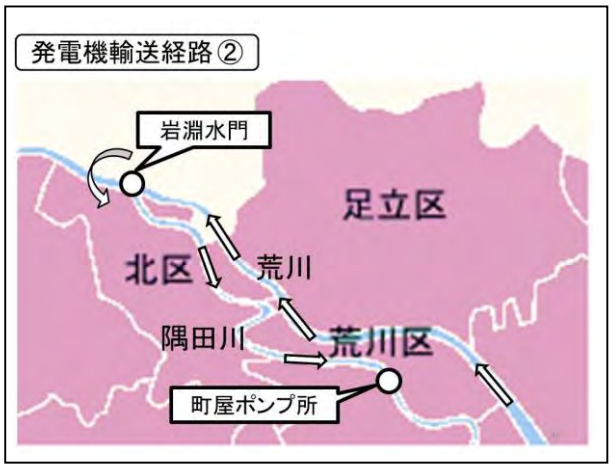


図6　発電機輸送経路②

(2)発電機基礎工事に関わる課題

発電機を設置するスペースは、事前のボーリング調査で地盤が弱いことが分かり、地盤改良だけでは支持力不足で圧密沈下の可能性があった。構造計算を行った結果、発電機基礎にはおよそ30mの鋼管杭を15本打ち込む必要があることが分かった。さらに、本ポンプ所の地下25m付近には地下鉄の東京メトロ千代田線が走っており、そのシールドトンネルと鋼管杭との離隔がわずか1.8mであることが判明した。

このようなことから、東京地下鉄株式会社（以下「東京メトロ」）と施工協議を行った。東京メトロ千代田線からは、シールドから1m以上の離隔を取って杭打ちをすれば問題ないとの見解が示された。最も接近する杭は、図面上シールドから1.8mのところを通過する。杭打ちの精度から安全性を検討したところ、施工誤差は10mあたり最大5cmであることが確認できた。このことから、杭とシールドの間に1m以上の離隔を確保できることが確認でき、東京メトロから杭打ち施工を許諾された。許諾の条件として、東京メトロの立会いのもと施工を行うことと、シールド付近となる地下20mより深く打ち込む部分については、杭打ち速度を十分落として行うことが提示されたため、これらの条件のもと杭打ちを施工した。

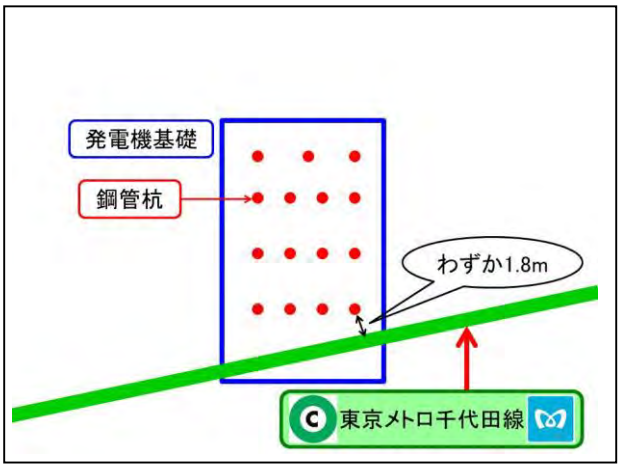


図 7　杭打ち平面図

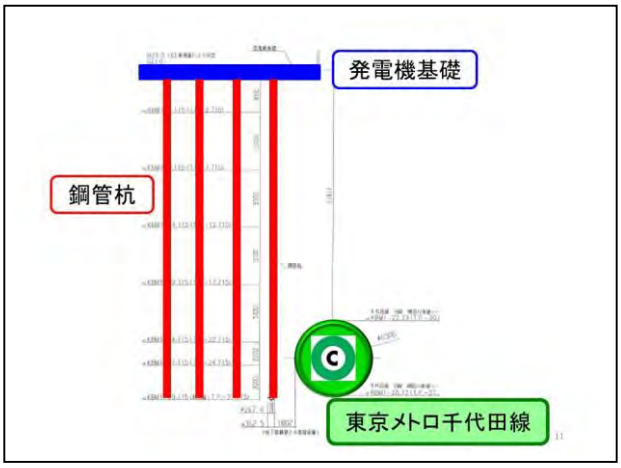


図 8　杭打ち断面図

図 9　杭打ち施工現場①

図 10　杭打ち施工現場②

5. 多岐にわたる関係部署との調整

本工事は、多岐にわたる関係部署との調整や、許認可・届出等の提出書類が必要であった。以下に主な関係部署と調整内容を示す。

(1) 発電機の設置に関して

ア 経 済 産 業 省：電気事業法に基づき、工事計画届出書の提出。

イ 尾 久 消 防 署：火災予防条例に基づき、電気設備設置届出書の提出。
燃料小出槽を設置するため、火災予防条例に基づき、少量危険物貯蔵取扱届出書の提出。
完成後の立会い検査。

ウ 東京都第六建設事務所：河川保全区域内への設置となるため、河川法に基づき、許可申請書の提出。

(2) 発電機基礎の築造に関して

ア 東京都環境局：発生土を搬出するため、都民の健康と安全を確保する環境に関する条例に基づき、土地利用の履歴等調査届出書の提出。

イ 東京地下鉄株式会社：打設する鋼管杭が地下鉄千代田線シールドと至近距離であるため、施工協議を実施。離隔距離の確認、施工方法の協議および施工時の現場立会い。

(3) 河川からクレーン台船による搬入について

ア 東京都第六建設事務所：搬入時護岸に停泊するため、河川法に基づき、水面使用許可申請書の提出。

6. 近隣環境への配慮

図３にも示したとおり、町屋ポンプ所はマンションと隣接しているため、本工事では近隣環境及び騒音への配慮に重点を置いた。発電機基礎の築造から発電機用の防音壁設置、発電機搬入後の試運転まで約７か月間の現場作業が行われた。この間、重機が何度も行き来し騒音が発生するため、マンションと隣接する町屋ポンプ所では常に苦情の心配があった。

そこで、工事の内容や騒音の出る作業の日時を、マンションや周辺のお客さまに事前に知っていただくため、住民向けパンフレットを作成し、良好なコミュニケーションづくりを心掛けた。このパンフレットには、いつ騒音が出るかだけでなく、実際どんな作業をする

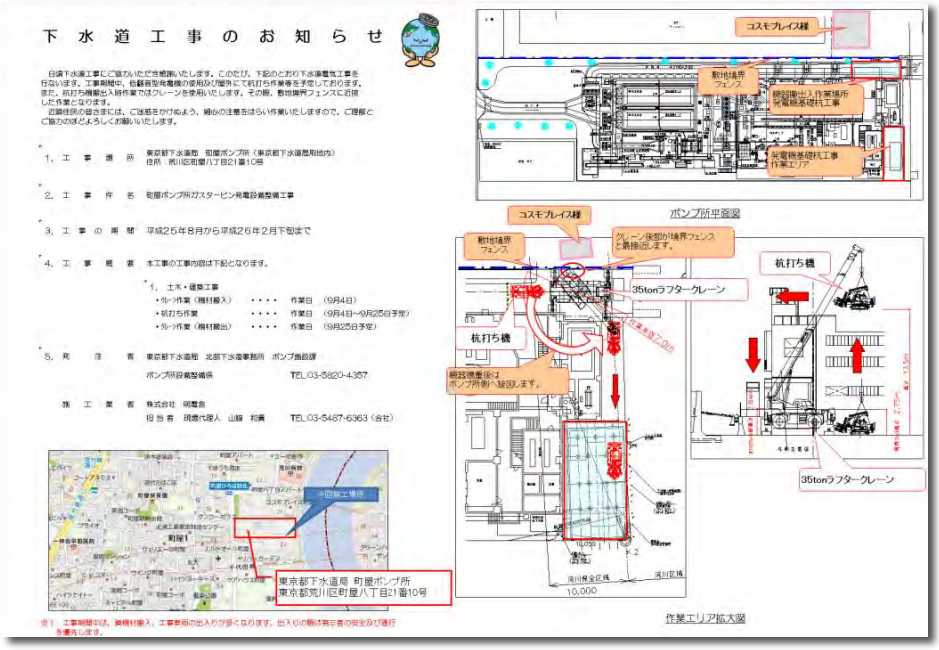


図 11 住民向けパンフレット

のか、何のために実施する工事なのか、などを分かりやすく記載した。

これらの取組により、本工事は無事故、苦情ゼロで施工を完了した。

2-1-1 下水道施設の上部空間の活用

～芝浦水再生センター上部利用事業～

計画調整部 事業調整課 晴山 雄太

1. はじめに

これまで当局は下水道施設の上部空間を主に公園やスポーツ場など、公共性の高い用途に提供し、地域のまちづくりに貢献してきた。しかし、近年の都心部における開発機運の高まりを受けて、下水道施設の上部空間は、都心に残された貴重な空間として、さらなる高度利用が求められている。今後、都心部の下水道施設の再構築に合わせて、地域の核となる下水道施設の上部空間の活用を図っていくことが必要である。

その最初の取組として、芝浦水再生センターにおける老朽化した水処理施設の再構築を行い、雨天時貯留池を建設するとともに、その上部に業務・商業ビル「品川シーズンテラス」を整備する芝浦上部利用事業（以下「本事業」という。）を平成 23 年度から平成 26 年度にかけて実施した（図 1 及び図 2）。

今後、リニア中央新幹線始発駅やＪＲ品川・田町駅間新駅の開業など、さらなる開発が見込まれる品川駅周辺地域において、環境モデル都市形成の中核を担う拠点づくりの取組について報告する。

図 1 芝浦水再生センターと新たに整備した品川シーズンテラス

図 2 芝浦水再生センター側から見た品川シーズンテラス

2. 芝浦水再生センター再構築と上部利用事業

芝浦水再生センターでは、昭和 20 年代から 30 年代に稼働した水処理施設が更新時期を迎えるとともに、雨天時における放流水質を改善するための合流式下水道の改善施設の整備が求められていた。

一方、芝浦水再生センターの位置する品川駅周辺地域は、東海道新幹線品川駅の開業や

羽田空港の発着枠拡大など、世界と日本各地をつなぐ交通の結節点として重要な役割を果たすことが期待されていた。こうした中、「品川駅・田町駅周辺まちづくりガイドライン」（平成 19 年）が策定され、芝浦水再生センター地区は、環境モデル都市形成の中核的な役割を担う拠点として優先整備地区として指定された。

こうした背景を受けて、芝浦水再生センターの段階的整備の第一期工事として、老朽化の著しい旧第二沈殿池を一部撤去し、新たに容量約 76,000m³ の雨天時貯留池を整備することとした。合わせて、新拠点形成に寄与する機能の導入や環境モデル都市形成、魅力と活力にあふれたまちづくりの推進を目指して、合築で環境配慮型の業務・商業ビル等を建設する事業者を公募し、事業に着手した。

3. 本事業の特徴

3.1 立体都市計画制度の活用

従来の上部利用では、都市計画決定されている下水道施設の区域内においては、都市計画法に規定する建築制限が課され、下水道以外の用途に活用することが困難であった。

しかし、平成 12 年 5 月に都市計画法の一部改正で創設された立体都市計画制度の活用により、計画区域内に他の用途の建築物等を建設することが可能になった。

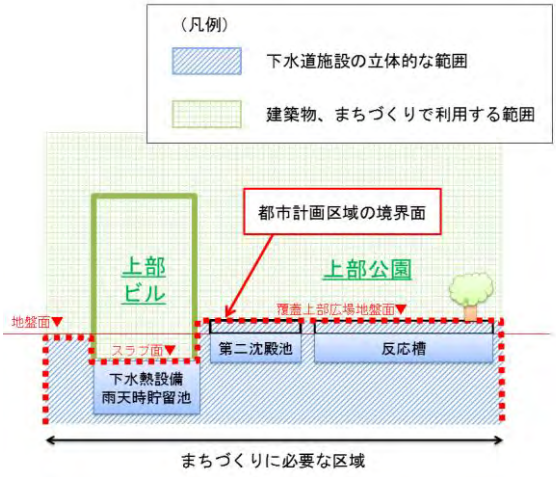


図 3 下水道の立体的な範囲設定

本事業では、下水道施設に日本で初めて立体都市計画制度を適用した（平成 23 年 10 月都市計画告示）。具体的には、図 3 に示す通り、下水道施設の都市計画区域のうち、まちづくりに必要な区域（予め「地区計画」を策定した区域）に、下水道施設の立体的な範囲を定めた。

このことにより、図 3 の境界面より上の空間を、下水道以外の用途である業務・商業ビルの建築敷地として複合的に利用することが可能となり、建築敷地約 5 ha の容積（容積率 400%、延床面積約 20 万㎡）が活用できるようになった。

図 4 メガトラス構造の人工地盤

3.2 維持管理や再構築計画に配慮した人工地盤設計

既存の水処理施設の上部に人工地盤を築造するにあたり、通常の補強では大規模となり、稼働中の水処理施設の機能に影響を及ぼす恐れがあった。

そこで、人工地盤の構造として、大スパン鉄骨トラス構造（メガトラス）を採用した（図４）。支点となる箇所に補強杭、梁を増設することで、既存躯体への影響を極力抑制し、補強工事範囲を最小限に抑えた。

また、再構築を直近に予定している範囲については、人工地盤部分を先行的に築造した。将来の水処理施設の配置計画を踏まえた位置に、構真柱を築造し、先端を支持層まで入れ深礎杭により固定することで、今後下部の再構築工事の施工中でも人工地盤を支持し、上部空間を引き続き利用できる構造としている。

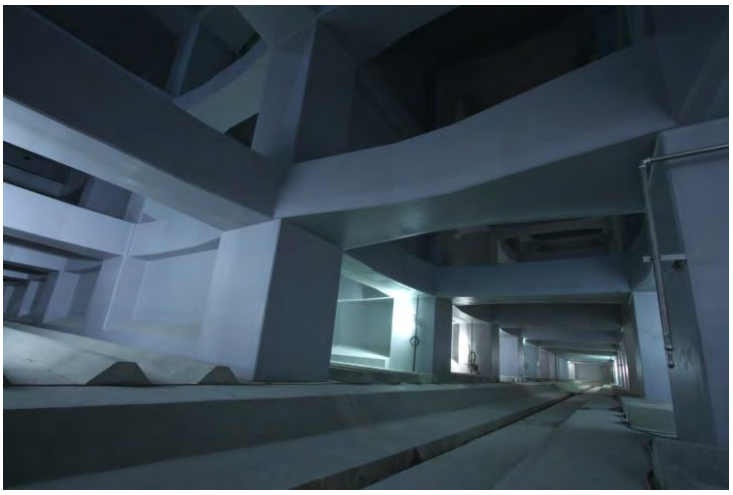
4. 環境モデル都市形成に向けた取組

本事業においては、環境モデル都市形成の中核を担う拠点づくりに向け、以下に挙げる取組を行った。

4.1 雨天時貯留池の整備

雨天時には、水再生センターの処理能力を超える分は簡易処理して放流しているが、通常の処理より汚濁物質の除去率が劣ることから、放流水質が悪化する。このため、特に汚濁負荷の高い降雨初期の下水を一時的に貯留し、放流される汚濁負荷量を削減するための施設が雨天時貯留池である（図５）。

本事業では、76,000m^{3}の雨天時貯留池を新たに整備することで、水再生センターから雨天時に放流される汚濁負荷量を約３割削減する。これにより、放流先の高浜運河、ひいては東京湾の水質改善に効果を発揮する。



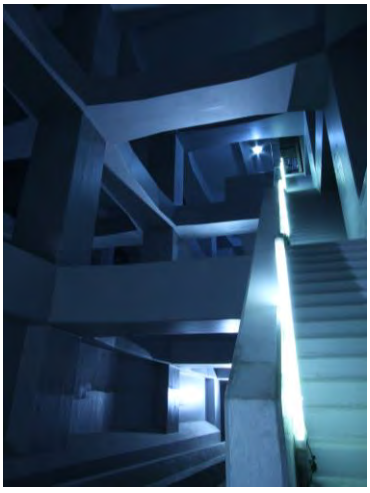


図５ 業務・商業ビルの地下に位置する 76,000m^3 の雨天時貯留池

4.2 下水熱の活用

本事業では、下水道資源である下水熱の積極的な利活用を図った。下水熱は、気温と比べ「夏は冷たく、冬は暖かい」下水の温度特性を活用するもので、ヒートポンプ（図 6）により冷暖房用の熱源として利用される（図 7）。

また、蓄熱槽を装備し、冷房として約 74 GJ/h、暖房として約 41 GJ/h の熱量を下水処理水により供給しており、当ビルの冷暖房の熱需要の全てを賄っている。

図 6　ヒートポンプ

気温と下水水温の比較

図 7　下水熱利用の仕組み

4.3　緑豊かなオープンスペースの整備

ビルの整備に併せて、既存下水道施設上部に新たに約 2.6 ha の人工地盤を整備し、既存公園と一体的に利用できる 3.5 ha の緑豊かなオープンスペースを整備した（図 8）。このオープンスペースは、都心部のヒートアイランド現象を緩和させる「風の道」の役割を担うとともに、発展を続ける品川駅周辺の「憩いの場」としての役割が期待されている。

整備にあたっては、地域住民の意見を反映させるために、ワークショップを開催した。子供達が自由に遊べる広い原っぱ、花見のできる桜並木、水と触れ合える場、季節を感じる森等の意見が出され、コンセプトとして設計に反映させた。

また、単に緑を配置するだけではなく、生態系ネットワークの観点からも武蔵野台地の樹林生態系と臨海部の沿岸生態系をつなげる結節点となるよう、地域の植生を考慮した樹種を選定・配置した（図 9）。

さらに、上部公園の植栽の灌水や湿性花園への給水には、立地条件を活かし、水再生センターから供給した下水再生水を使用している（図 10）。

図 8　整備後のオープンスペース

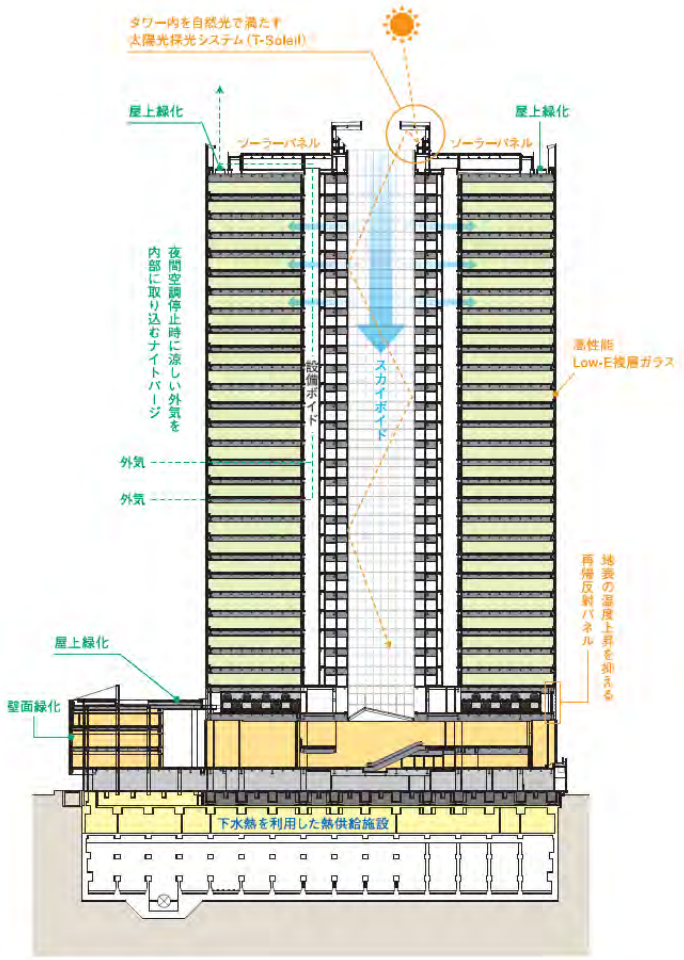
図 10　下水再生水を利用した湿地

図 9　オープンスペースにおける主な樹種

4.4 環境モデルビル「品川シーズンテラス」の整備

品川シーズンテラスは、民間の建築・土木の最先端技術・ノウハウを活用した国内最高水準の環境配慮型オフィスビルとして平成 27 年 2 月に竣工した。事業者公募の段階において、建築物の環境性能評価（東京都建築物省エネルギー性能評価書、DBJ Green Building、CASBEE）での最高ランクの取得を義務付けることで、民間の有する環境技術のノウハウを多く取り入れた。

特に省エネ設備や自然エネルギーを積極的に活用し、環境負荷軽減と快適な室内環境を両立している。主な取組を図 11 に示す。



【スカイボイド】太陽光採光システムにより建物内を自然光で照らす

【オフィス】高性能 Low-E 複層ｶﾞﾗｽや人検知ｾﾝｻｰ付き LED 照明を採用

図 11 品川シーズンテラスにおける省エネへの取組(左図)と主な省エネ設備(右写真)

5. 本事業の成果と今後の展望

下水道施設の再構築に合わせて、環境モデルビルとして地域開発の中核を担う「品川シーズンテラス」を建設することにより、地域のまちづくりに貢献できた。また、公募にあたっては、事業者に環境に配慮した提案を義務付け、事業に反映させることで、民間の有するノウハウを活用することができた。

このように、水再生センターの上部利用事業は、都心に残された数少ない空間を有効に活用できるとともに、地域のまちづくりにも寄与することができる。実施にあたっては、下水道本来の事業に支障を与えないように、拡張計画や再構築計画にも十分配慮して、計画を策定することが重要である。

今後、下水道局では、他の施設についても計画段階から地元の声や地域特性などを踏まえ、地元自治体や民間事業者など多様な主体と連携し、上部空間の複合的な活用等を検討し地域のまちづくりに貢献していく。

2-1-2 目黒川における合流式下水道の改善の取組

計画調整部 事業調整課 中道 元紀
佐久間 隆
持田 智彦
（現 建設部土木設計課）
大石 英之
（現 品川区防災まちづくり事業部河川下水道課）

1. はじめに

目黒川は、東京都区部、世田谷区を上流端とし、目黒区、品川区を東流しながら東京湾に注ぐ延長 8.0km、流域面積約 45.8km²の二級河川である。目黒川に流入する支川として、北沢川、烏山川、蛇崩川があり、これらは現在暗渠化され、合流式下水道の幹線となっている（図 1）。

これらの支川を上流に持つ目黒川には下水道の吐口が 63 か所あり、雨天時には雨水で希釈された汚水の一部やごみが放流され、白濁やスカム等の発生が確認されるなど、水質改善が課題となっている（写真 1）。

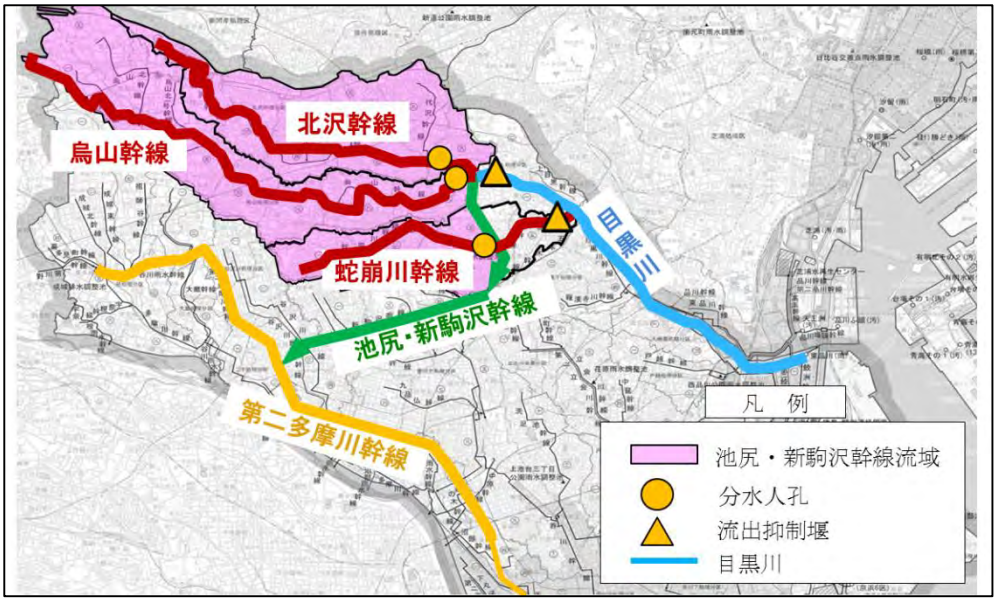


図 1 対象流域

写真 1 目黒川の白濁の様子

現在、東京都では、合流式下水道の改善として、雨天時の下水をより多く水再生センターに送水する幹線（以下、しゃ集幹線）の整備や、降雨初期の特に汚れた下水を貯留する施設（以下、貯留施設）の整備を進めている。目黒川においても、しゃ集幹線と貯留施設を兼ねた「池尻幹線・新駒沢幹線（以下、池尻・新駒沢幹線）」が昭和 62 年に整備されたが、河川改修が途上であった当時の判断から、下水道幹線の浸水対策用の貯留管として暫定利用され、現在に至っている。

今回、流出解析モデルを利用し、河川管理者と粘り強い協議を進め、目黒川への放流量を増やすことで浸水対策の機能を低下させることなく、池尻・新駒沢幹線を合流改善の本来目的で利用し、水質改善に寄与することが可能となった。本稿ではこの取組について報告する。

2. 池尻・新駒沢幹線の暫定利用の状況

しゃ集幹線と雨天時汚水の貯留施設を兼ねた池尻・新駒沢幹線を浸水対策で利用するにあたっては、以下のように分水人孔を改造する暫定対応がこれまで行われていた（図 2、図 3）。

① 分水人孔には、池尻・新駒沢幹線に雨天時汚水を流入させる開口が設けられている。この開口を縮小し、汚水を入りにくくすることで、浸水対策の貯留容量を確保する対応が行われていた。

② 降雨時のピークカット効果を発揮させるため、流入幹線の水位が上昇した場合に取水できるよう、分水人孔の上部に開口を設ける対応が行われていた。

今回の一連の検討を進めるにあたり、下水道管網と護岸などの河川施設をモデル化した流出解析モデル（以下、モデル）を作成した。暫定利用の効果をモデルから算出したところ、汚水のしゃ集量は計画汚水量の 2.4 倍程度に抑制されていた一方で、大雨時には上部開口からの流入があり、幹線水位を低下させる効果があることが確認された。

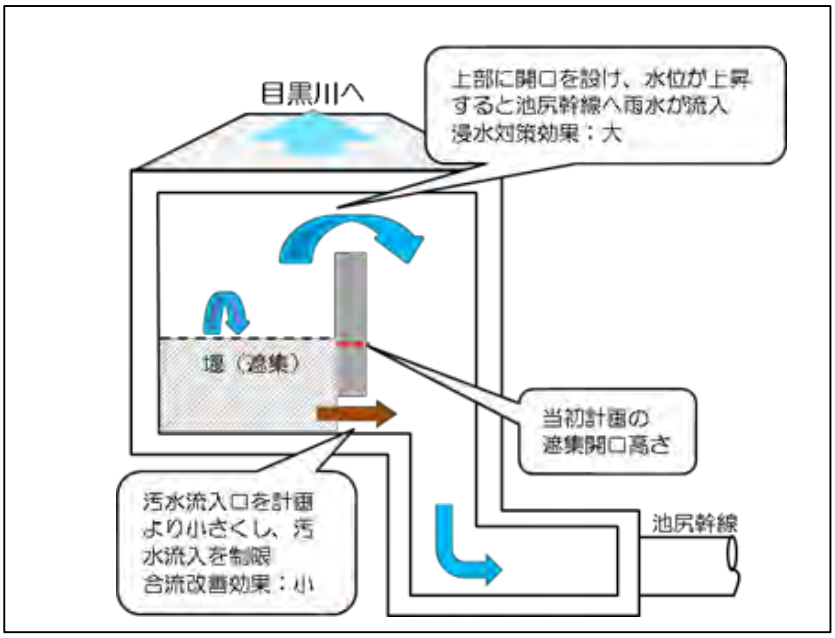


図 2　分水人孔の改造による池尻・新駒沢幹線の暫定利用

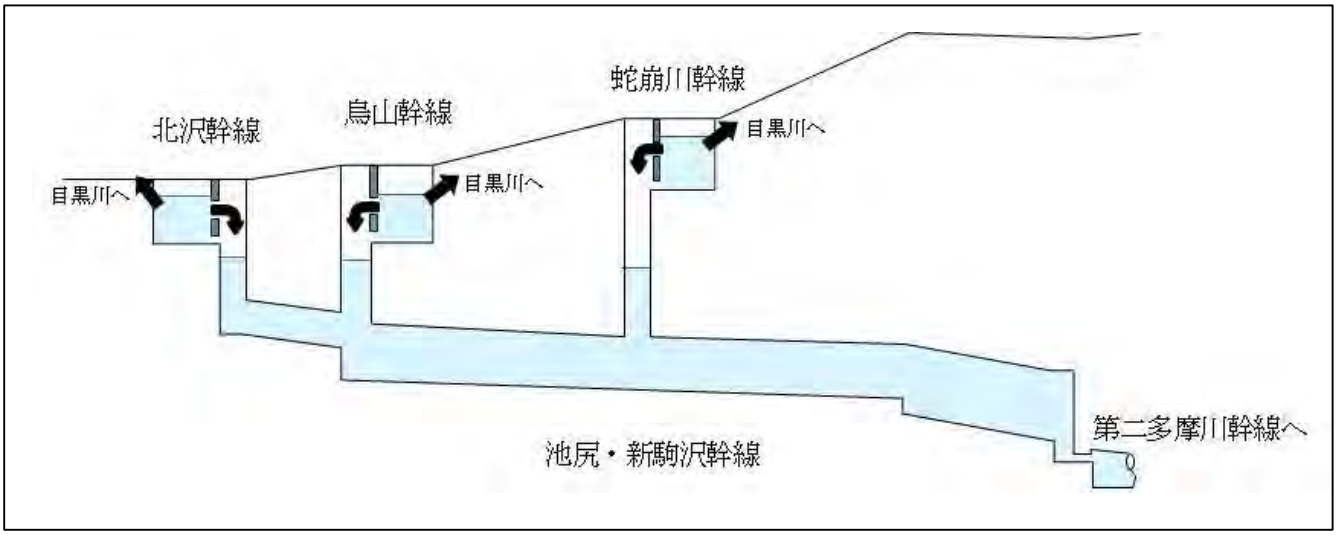


図 3　池尻・新駒沢幹線と流入幹線の関係

3. 暫定利用の解消と合流改善の推進

池尻・新駒沢幹線の暫定状態を解消し、合流改善を推進するためには、しゃ集口を拡大し、降雨初期の汚れた下水を効果的に取水することを検討した（図 4）。

しゃ集口を拡大したケースをモデルにより検証した結果、計画汚水量の 3 倍をしゃ集できるとともに、さらに初期雨水 12.5 万 m^3 を貯留することができ、大きな合流改善効果が得られることがわかった（図 5）。

一方、池尻・新駒沢幹線の貯留容量を降雨初期の下水で占めてしまうため、大雨時に上部開口からの流入量が減り、河川への越流量が増える結果となった。目黒川へ放流する放流渠には、河川への放流量を規制する流出抑制堰があるため、その部分で水位が上昇し、浸水被害の危険性が高まることがシミュレーションにより判明した（図 6）。

この対策として、流出抑制堰を撤去すれば、放流渠部分の水位は低下し、浸水被害は発生しないことがわかった。しかしその場合、河川への放流量が増えることになり、河川施設の安全性が脅かされる恐れがあった。そこで、河川管理者と協議を行い、目黒川の流下の安全性を検証することとなった。

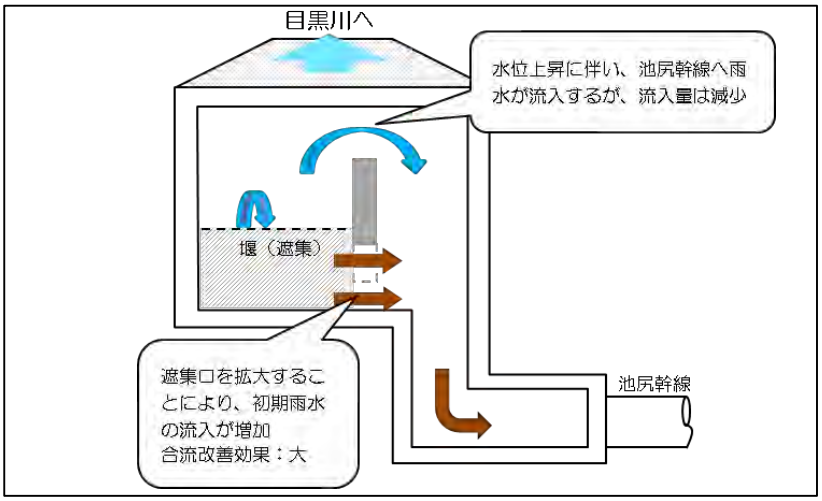


図 4　しゃ集口の拡大

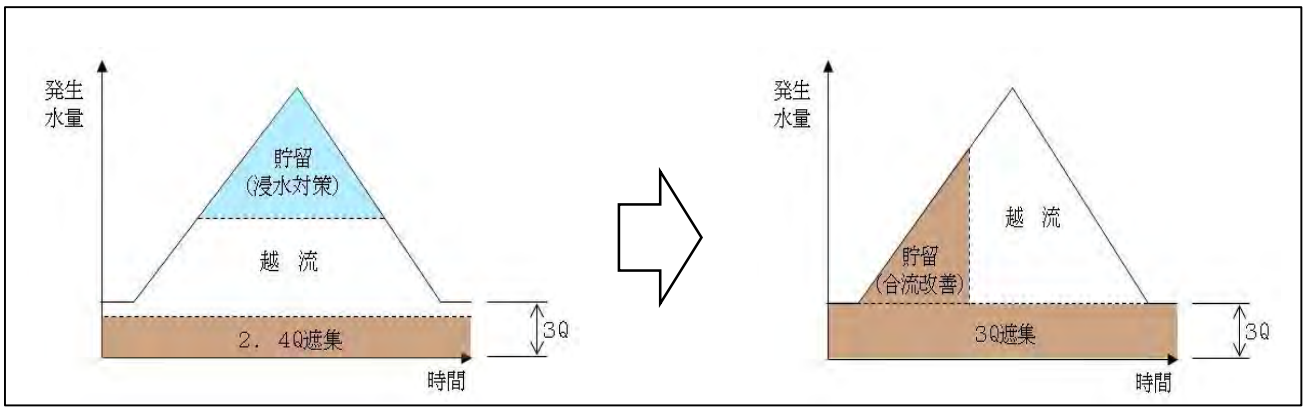


図 5　池尻・新駒沢幹線を本来利用することによる合流改善効果向上のイメージ

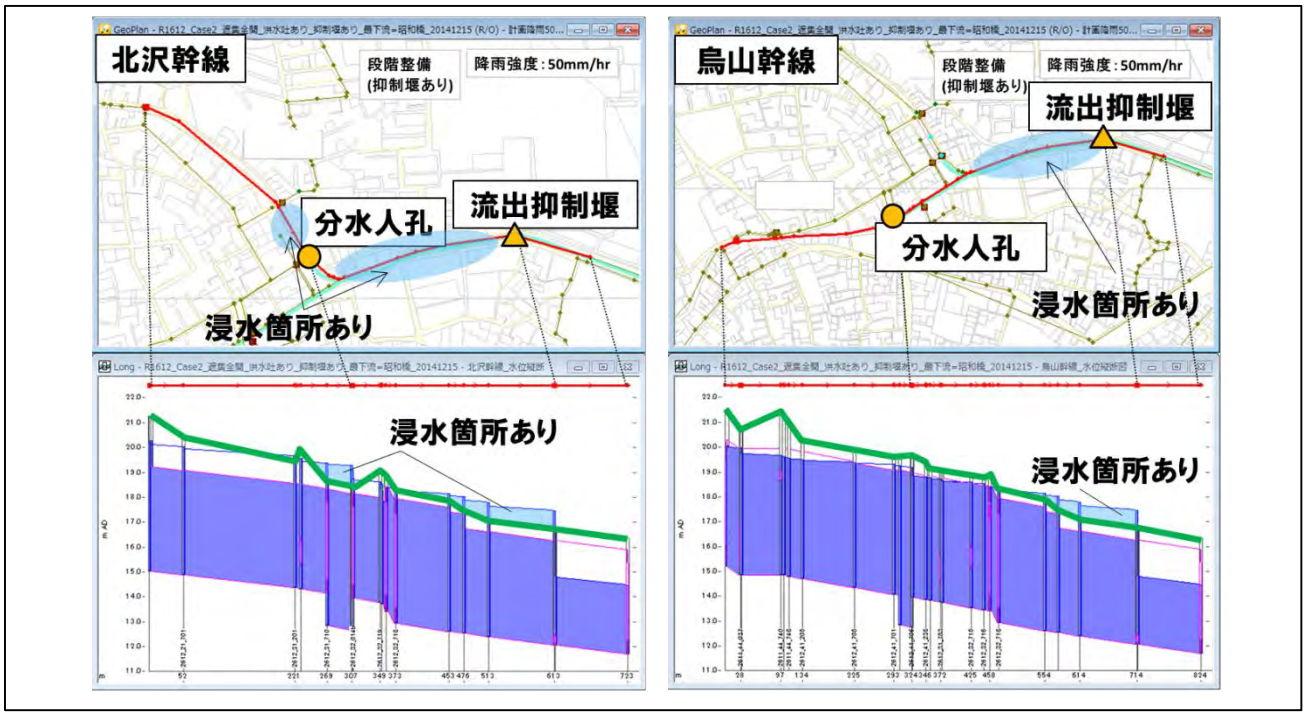


図 6　シミュレーション結果（流出抑制堰未撤去の場合）

4. 河川の安全性の検証

目黒川の流下の安全性を検証するにあたり、以下の条件を満たすことが求められた。

① 30 ㎜/hr 程度の複数の実績降雨でモデルを検証し、河川水位の計算値と実績値が同等となるよう、キャリブレーションされたモデルを使う。

② 下水道からの放流量が増加した状態においても、河川の現況の HWL（計画高水位）を超えることがなく、かつ、橋梁等のネック箇所においても安全に流下できる。

解析結果は以下のとおりとなり、河川管理者と解析条件等について繰り返し協議を行い、目黒川の流下の安全性を証明した（図 7）。

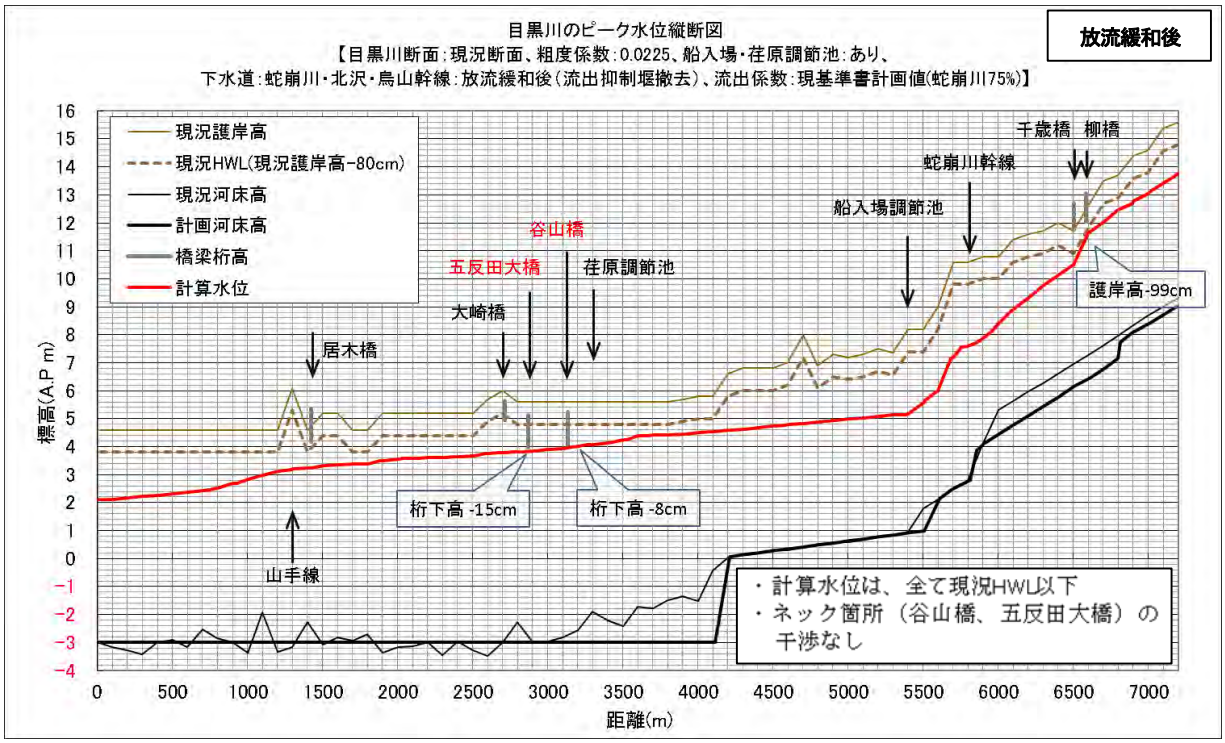


図 7　時間 50 ミリ降雨時の目黒川の水位縦断

5. 対策の効果

今回検討した対策の効果は、以下のとおりである。

① 池尻・新駒沢幹線の暫定利用の解消（しゃ集口の拡大）により、しゃ集（汚　水の 3 倍量）＋初期雨水貯留（12.5 万 m^3）として機能を発揮でき、目黒川流域の合流改善（分流並み）で必要とされる貯留量の約 70%を達成できる。

② 汚水混じりの雨水放流量が 4 割程度に減少する。

③ 大雨時に目黒川に多く放流できるようになり、概ね 45 ㎜/hr 相当まで、浸水対策機能が向上する。

今回の目黒川の対策は、河川管理者と課題を共有し、水質改善という共通の目的に向かって協力して取り組んだものである。合流式下水道からの雨天時の放流という課題に対する対応策のひとつとして参考にされたい。

2-1-3 水理模型を用いた合流改善対策用貯留管の水理現象及び圧縮空気塊に関する検証

南部下水道事務所 建設課 遠藤 光

1. はじめに

閉鎖性水域である勝島運河は、合流式下水道からの雨天時越流水などの影響により、水質悪化が問題となっている。このため、東京都下水道局は合流式下水道の改善を行う重点水域のひとつとして位置付け、降雨初期の特に汚れた下水のうち、流域内降雨6mm分を貯留する合流改善施設（φ2200の貯留管）を現在施工中である（図1）。

本施設は貯留管であるため、圧縮空気塊の噴出等が想定される。しかし、初期降雨を貯留する合流改善施設の実績は少なく、空気抜きや取水構造が及ぼす複雑な水理挙動を机上検討で十分に把握することが困難である。そこで、平成25、26年度に模型による実験を行うこととした。

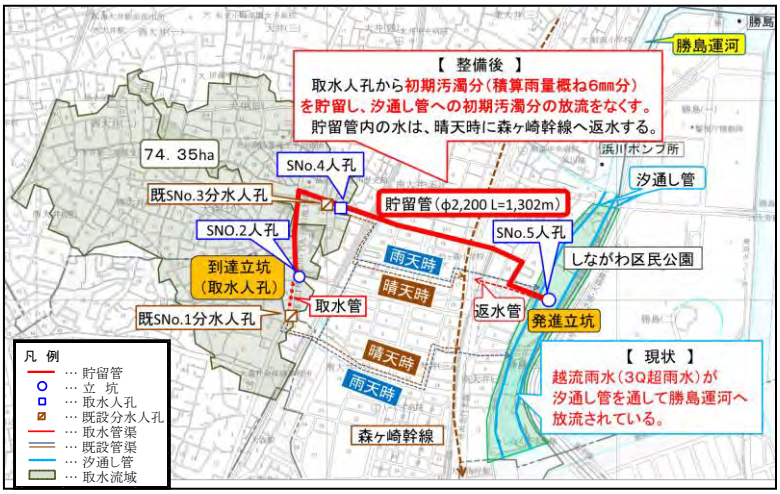


図1 合流改善対策用貯留管の概要図

2. 課題及び目的

本施設は貯留管という施設構造のため、空気抜き施設を配置するなど圧縮空気塊の噴出に対する対策を行う必要がある。本施設では、取水位置と貯留管終点部（最下流部）の地上での高低差が約6mあることから、貯留管終点部の空気抜き施設は6m以上の高さが必要であると想定された（図2）。しかし、6m以上の空気抜き施設を設置することは、現場の土地利用の状況から困難である。

そこで、勝島運河合流改善施設の全体（取水施設・貯留管）を再現した水理模型を使用し、貯留過程に現れる様々な水理現象の検証と現実的な空気抜き施設の検討を行った。

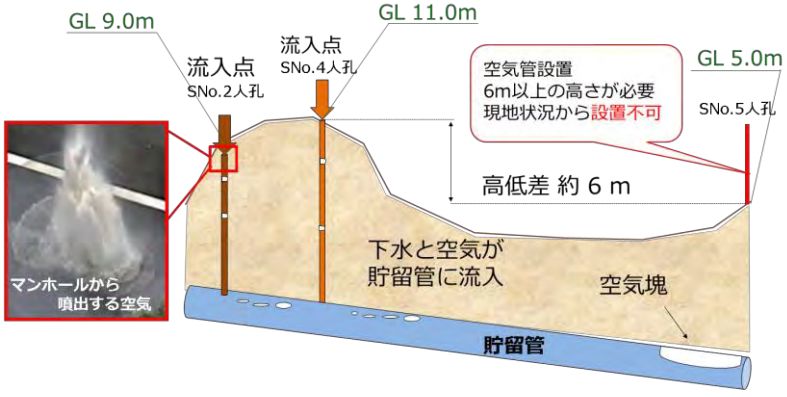


図2 貯留管における課題の概要図

3. 水理模型実験の概要

本水理模型実験では、貯留管、取水管、流出入管及び人孔を対象（縮尺：【貯留管：断面方向 1/11.0、流下方向 1/13.6】【その他：1/11.0】）として再現した（図 3～7）。実験条件は、時間降雨 50 mm/h とし、近年頻発している局所的集中豪雨を鑑み、危険側の条件である前方集中型の計画降雨（ピーク流量発生時の直前に貯留管が満管になる）で実験を行った。

図 3　水理模型で再現した対象施設の概要

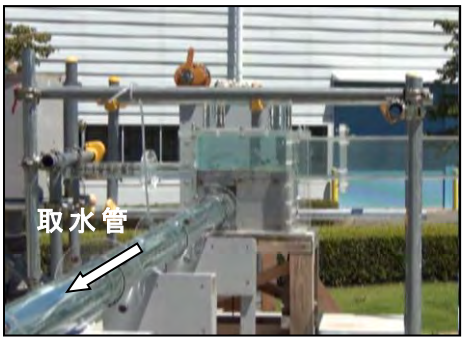


図 4　既 SNo.1 分水人孔

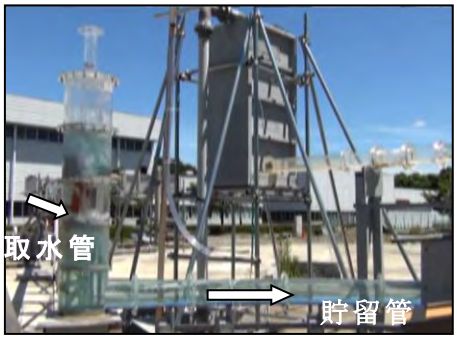


図 5　SNo.2 流入人孔

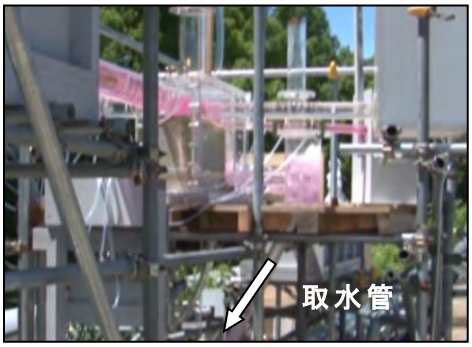


図 6　左側：既 SNo.3 分水人孔
右側：SNo.4 流入人孔

図 7　SNo.5 流末人孔

3.1 原設計の実験結果

合流改善を目的とした初期雨水を取水する貯留管において、今回対象とした前方集中型の降雨の場合、水理模型実験により次のような現象及び課題を確認した。

（ｉ）貯留管満水時の水位上昇（水の噴出）・・・課題１

既 SNo.1 分水人孔の原設計形状を図 8 に示す。既 SNo.1 分水人孔は、汚水遮集管への流入が 3Q を超えた後、人孔内の横堰を超えて人孔底部に流れ落ち、この水が放流管の入口に設置された堰にあたって、人孔内で放流管と対面側に設置されている取水管（貯留管への導水管）に導かれる構造となっている。

また、放流管入口の取水用堰高は、原設計では放流管径の 1/2 の高さに設定され、放流管口が 1/2 の断面に絞られている。このため、実験では貯留管満水時に分水人孔内の水位が上昇し、人孔上部より水の噴出が発生した。

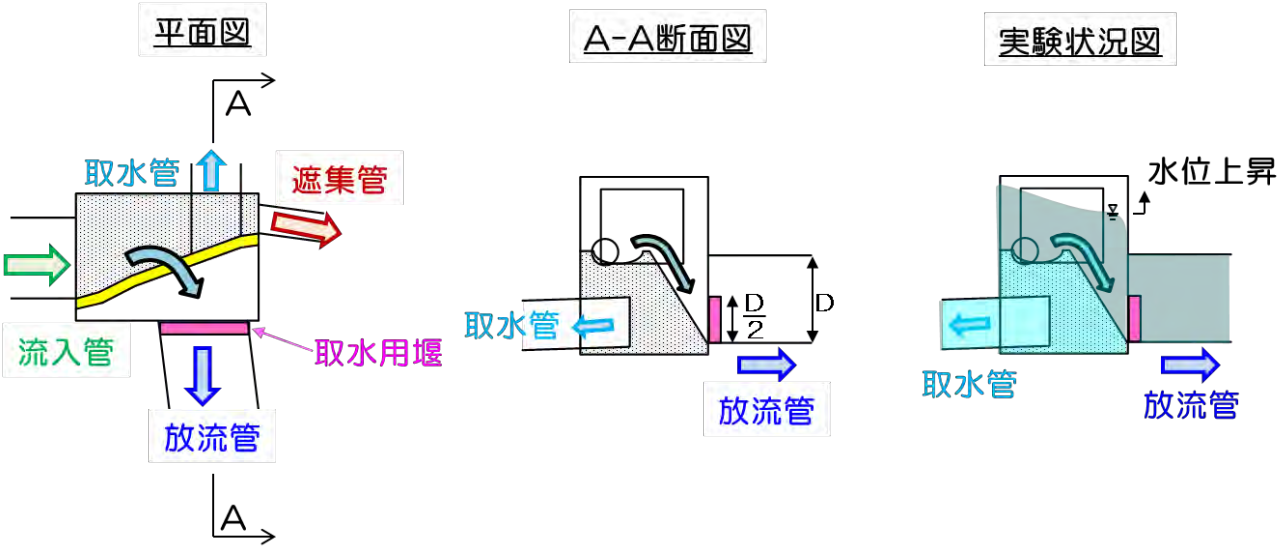


図 8 既 SNo.1 分水人孔における原設計形状及び実験状況

（ⅱ）圧縮空気塊の噴出・・・課題２

貯留管内における空気塊の形成概念図を図 9 に示す。一般的に貯留管内では、流れが流末部へ到達後、上流側へ向かう段波が発生する。この段波は、SNo.4 流入人孔（斜行管）からの流入水により遮られ、空気塊が形成される。この空気塊は、貯留管満水後に被圧されて、さらに上流側に遡上し、既 SNo.1,SNo.2,4 人孔から噴出することが確認された。また、地盤高が低い SNo.5 流末人孔では、地盤高から最大水位 6m相当の水しぶきを伴う空気塊を確認した（図 10～14）。

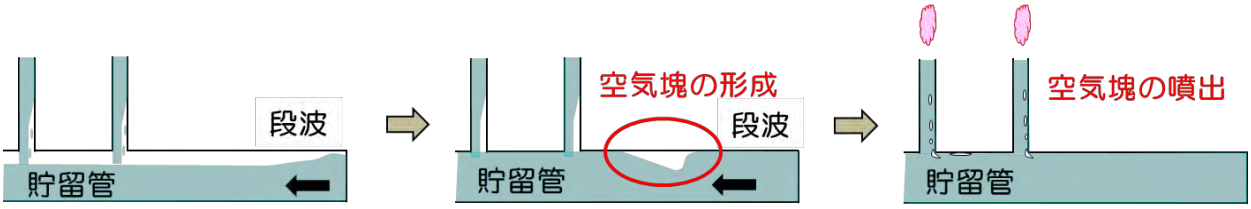


図 9　空気塊の形成概念図

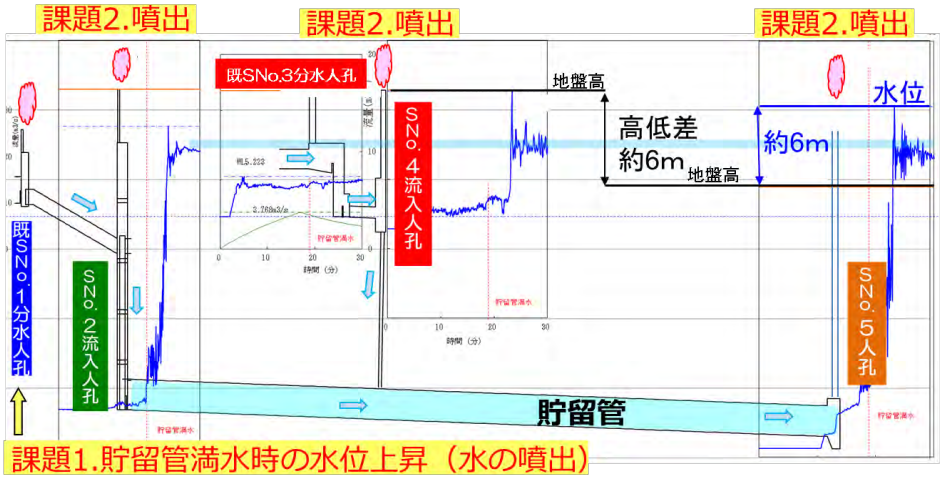


図 10　原設計における実験結果（水及び空気塊の噴出）

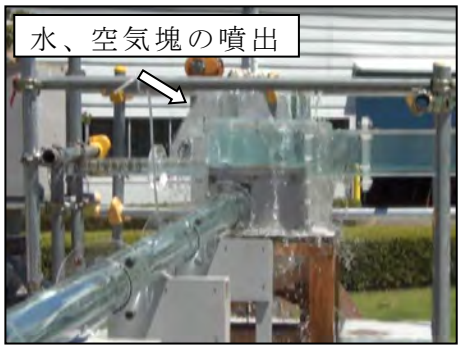


図 11　既 SNo.1 分水人孔における流況

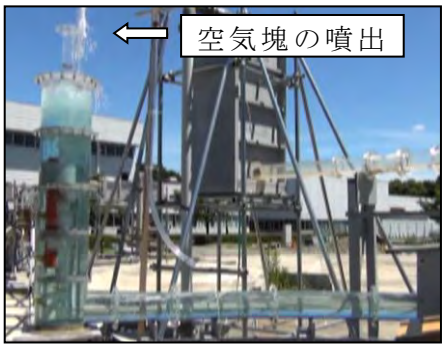


図 12　SNo.2 流入人孔における流況

図 13　左側：既 SNo.3 分水人孔
右側：SNo.4 流入人孔
における流況

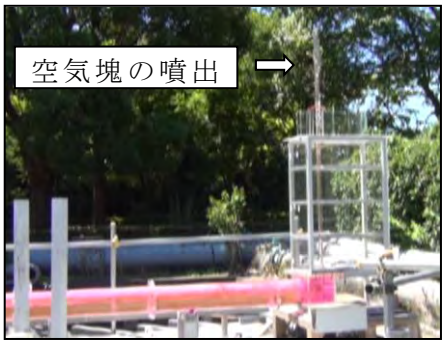


図 14　SNo.5 流末人孔における流況

3.2 改良案の検討

原設計における２点の課題について、次のような改良案を検討した。

（ｉ）貯留管満水時の水位上昇（水の噴出）に対する改良案

既 SNo.1 分水人孔における水位上昇の要因は、降雨初期の雨水を取水管に取り込むために放流管入口に設置された堰が放流管の断面を阻害していることと考えられた。これを改善するため、取水管への取水と人孔内の水位上昇のバランスをとりながら、図 15 のように 3Q 分水堰の形状を変更し堰長を長く取るとともに、放流管入口の取水用堰の位置を分水人孔の内側に変更した。これにより有効離隔が大きくなるとともに、放流管への開口面積拡大を図ることで、水位上昇の抑制が期待できる。

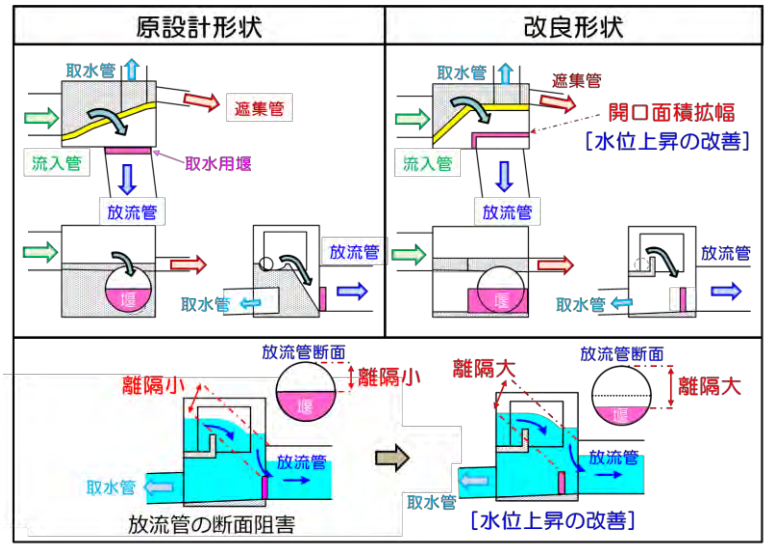


図 15 既 SNo.1 分水人孔における改良案の概念図

（ⅱ）圧縮空気塊の噴出に対する改良案

各人孔における圧縮空気塊の噴出を抑えるため、SNo.2,4,5 人孔付近に排気管を設置した。排気管の規模は、人孔蓋浮上・飛散防止や周辺環境に配慮し、地表 12 m/s 、管内 48 m/s を制限風速として決定した。なお、（ｉ）案の改良により SNo.5 人孔での水位上昇が地盤高から+1.6m 程度の高さに抑えられたため、1 割程度の安全性を考慮して SNo.5 の排気管を 1.8m で設定して実験を行った。

3.3 改良案の実験結果

3.2 の改良案で行った実験により、原設計の課題に対して以下の抑制効果が確認できた。

（ｉ）貯留管満水時の水位上昇（水の噴出）に対する抑制効果

既 SNo.1 分水人孔における実験時の動水位を図 16 に示す。原設計では実験時に雨水吐室が完全に満水状態になり、流入管の動水位も管頂よりも高く、完全な圧力状態であった。一方、改良案では中間スラブ付近まで動水位が低下したことから、人孔改造が水位上昇の抑制に有効であることを確認できた。

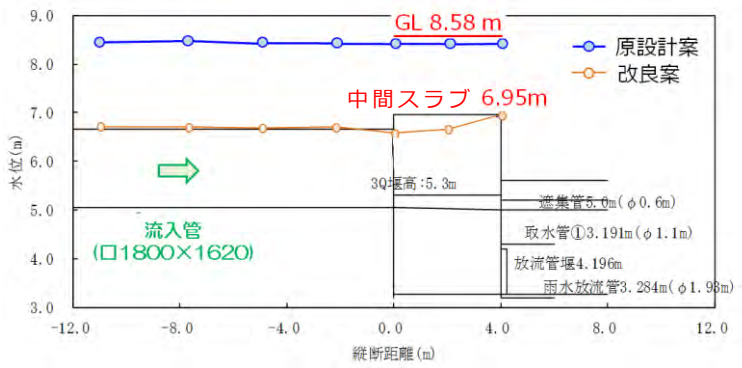


図 16　既 SNo.1 分水人孔における実験時の動水位

（ⅱ）圧縮空気塊の噴出に対する抑制効果

図 17 に実験結果を示す。

原設計で確認された SNo.2,4,5 における圧縮空気塊の噴出現象は、排気管の設置により解消された。

一方、SNo.5 人孔では、サージング現象により水位が不安定となり、貯留水の噴出が確認されたため、排気筒を追加して予備実験を行い、サージング現象の緩和が可能で、最大水位が排気筒から越流しない最小の径として内径φ2000×1.8mH を採用した。

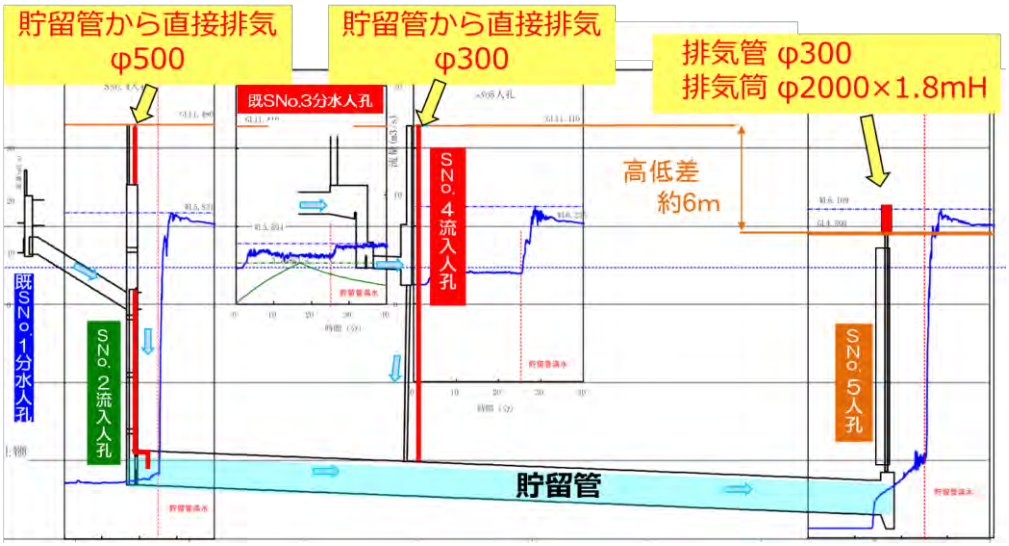


図 17　改良案における実験結果（水及び空気塊の噴出解消）

4. まとめ

本実験では、大きく２つの課題が判明した。

（ⅰ）原設計では、降雨初期の雨水を貯留管へ取り込むために放流管入口に堰を設置しており、この堰が貯留管が満水になった後、放流管への放流を阻害し、人孔内の水位を上昇させている。

（ⅱ）段波及び斜行管からの流入水により貯留管内に閉じ込められた空気塊によって、圧縮空気塊が噴出する。

このような現象を解消するため、次のような対策を行った。

（ⅰ）堰によって制限された放流量の増加を目的とした放流管の開口面積拡大
（ⅱ）圧縮空気塊を先行的に排出させることを目的とした排気管の設置

近年頻発している集中豪雨のような前方集中型の降雨では、合流改善を目的とした貯留管は急激に満水になるため、圧縮空気塊が発生しやすい等の課題がある。そのため今回実施した水理模型実験による検証等によって、次のような事項を設計に反映させることが重要である。

（ⅰ）合流改善効果のみに捉われた検討により浸水被害を誘発させることのないよう、放流管断面を阻害しない取水構造とすること。
（ⅱ）圧縮空気塊を速やかに排気させるための施設を各人孔ごとに設置すること。

2-2-1 活性汚泥中の細菌叢に関する基礎検討調査

計画調整部 技術開発課
濱本 亜希 佐藤 浩一 富田 雅昭

1. はじめに

下水の活性汚泥処理は、微生物（細菌）のはたらきを利用して有機物や窒素、りん等を除去する生物処理であるが、生物活動は温度の影響を受けるため、水温が低下する冬季は処理性能が低下する。なかでも窒素処理に関わる硝化細菌は他の従属栄養細菌と比べて酸化・増殖速度が遅いうえに、水温低下の影響を受けやすいため、冬季に硝化が十分に進まず放流水の窒素濃度が高くなる傾向がある。

そのため、都内の水再生センター（下水の終末処理場、以降、「センター」という）では、最終沈殿池から汚泥流出しない範囲で活性汚泥浮遊物質（MLSS）濃度を高めたり、溶存酸素(DO)濃度に基づく風量制御を行っている場合はDO設定値を高くした運転を行うことで、硝化細菌の系外への流出を抑えて硝化促進を図っている。

しかし、流入負荷やその時間変動が大きいセンターや流入水の汚泥転換率が高いセンター等では、流入負荷が低くなる時間帯等に余剰汚泥の引抜に伴って硝化細菌が系外にウォッシュアウトされ、冬季に反応槽末端でアンモニアや亜硝酸が残存することがある。

対策としては、流入負荷やその時間変動を小さくするための貯留池の整備や、担体添加活性汚泥法の導入があるが、整備や導入には時間を要する。そこで、短期的なアプローチとして、硝化能力の高い細菌を投入して保持すること等により処理能力を高める方法について検討を行った。その中で、活性汚泥の硝化能力および細菌叢について寒冷地と都内センターで比較を行ったので、以下にその結果と流入水が細菌叢に及ぼす影響について報告する。

2. A-SRTと硝化率の関係

完全硝化に必要な硝化細菌を反応槽内に保持させるためには、硝化細菌の増殖速度に見合ったA-SRTを確保した運転管理を行う必要がある。

「下水道施設計画・設計指針（2009年版）」では、この硝化に必要なA-SRT（必要A-SRT）を標準活性汚泥法の下水処理場において各水温でケルダール窒素除去率が 80%以上となるA-SRTの下限値を表す式として、式①を設定している。

式①の妥当性については別途検証する必要はあるが、今回、都内8センター10処理系列を対象とし、毎月のA-SRTの実績値（式②で算出）の必要A-SRTに対する比（以降「「必要A-SRT比」という）と反応槽における硝化率（式③で算出）との関係を図1に整理した。その結果、必要A-SRT比が1以上の系列については、一部のセンターを除き硝化率がほぼ90%以上であった。一方A-SRT比が1を下回る処理系列については、多くの系列で硝化率が低下した。

また、図2に都内J・Kセンターと寒冷地にある2つの処理場（寒冷地A・B処理場）について、必要A-SRT比と硝化率の関係を示す。寒冷地B処理場では、必要A-SRT比が1を下回り、A-SRTの実績値が必要値を満たしていなかったが、都内Jセンターと異なり、硝化率は年間を通じて 90%以上であった。理由として硝化細菌叢（多様な硝化細菌の集合）が異なることが考えられたため、当該寒冷地処理場と都内センターにおいて、活性汚泥の

比較を行った。

表 1 A-SRT・硝化率の算出式

項目	内容
必要 A-SRT	必要 A-SRT= 20.65×exp(-0.0639×水温)・・・式① ※必要 A-SRT＝11.0×exp(-0.0525×水温)（好気槽前半の DO≧1.0）…式①’
A-SRT	$A-SRT$ ＝好気槽比率 × $\frac{MLSS\ 濃度 \times 反応槽容量}{余剰汚泥濃度 \times 余剰汚泥引抜量}$ ・・・式②

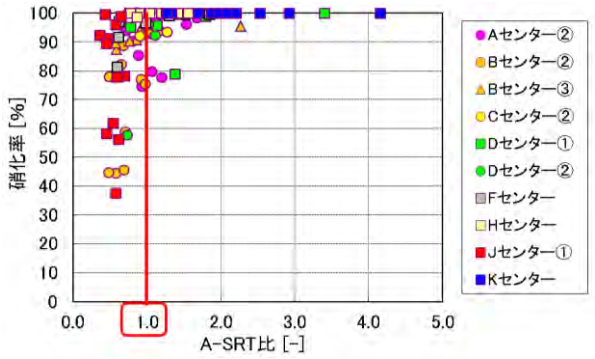


図 1 A-SRT 比と硝化率の関係（22 年度）

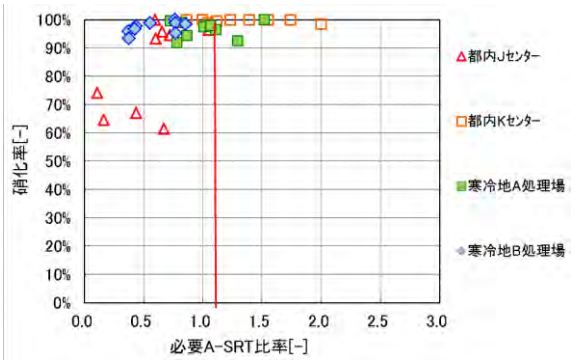


図 2 A-SRT 比と硝化率の関係（24 年度）

硝化率	硝化率 $[\%] = \frac{NH_4-N,in - NH_4-N,eff}{NH_4-N,in} \times 100$ ・・・式③ NH_4-N,in：一沈流出水の NH_4-N 濃度、NH_4-N,eff：反応槽末端の NH_4-N 濃度

3. 東京都および寒冷地における活性汚泥中の硝化細菌数および硝化能力の比較

前項寒冷地処理場について、運転条件や水質状況に関する情報収集を行うとともに、活性汚泥中の硝化細菌数（アンモニア酸化細菌（AOB）・亜硝酸酸化細菌(NOB)）や硝化速度（アンモニア酸化速度・亜硝酸酸化速度）を測定して、都内センターの場合と比較した。硝化細菌数の測定は、東京理科大学の御協力をいただき、FISH 法により、Amman らの方法[1)]に準じて行った。

3.1 調査対象施設の処理方式と運転・水質状況

平成 24 年 7 月から平成 28 年 3 月までの都内センターおよび寒冷処理場における運転条件および水質状況を表 2 に示す。

調査対象とした寒冷地処理場の処理方式は、A 処理場については、反応槽全 4 回路のうち第 1 回路が擬似嫌気槽の擬似 AO 法(11～4 月は第 3 回路にステップ流入させるステップ AO 法)、B 処理場については、反応槽に隔壁はないが好気槽前段 20%を粗大気泡で曝気する擬似 AO 法である。一方、都内で調査対象とした J センターは反応槽全 4 回路のうち第 1 回路を制限曝気とした擬似 AO 法であり、K センターは A_2O 法である。また、風量制御方法としては、都内センターが DO 一定制御であるのに対し、寒冷地 A・B 処理場では、1 日の負荷変動と DO 濃度に応じてブロアの運転台数を調整するパターン制御である。そのため寒冷地処理場では槽内の DO 濃度が高く、平均 6.6、5.6 mg/L と非常に好気的な環境となっていた。

処理状況については、寒冷地処理場では水温が最低 14℃と都内センターより 3～5℃低か

ったが、寒冷地 B 処理場については、処理水 NH_4-N 濃度が最大で 1.0～1.6mgN/L 、NO_2-N 濃度は最大 0.4 ～0.5 mgN/L 未満で、硝化は良好であった。一方、都内 J センターについては、NH_4-N 濃度が最大で 7.1 mgN/L、NO_2-N 濃度は 3.2 mgN/L となり硝化率が低下することがあった。寒冷地処理場において、硝化が安定していた理由の一つとしては、流入水温 10℃を下回ると硝化能力に応じて処理水量を調整した運転も影響していると考えられた。

表 2 調査対象施設の処理方式と運転・水質状況（平成 24 年 7 月～平成 25 年 3 月）

施設名称			東京都						寒冷地					
			Jセンター			Kセンター			A処理場			B処理場		
調査対象系列 処理方式			擬似AO法			A_2O法			①ｽﾃｯﾌﾟAO法（4月～11月） ②擬似AO法（11月～4月）			擬似AO法		
			平均	（最小）	（最大）	平均	（最小）	（最大）	平均	（最小）	（最大）	平均	（最小）	（最大）
運転	HRT	hr	9.1	7.0	12.3	17.8	15.2	19.6	9.4	6.6	11.5	7.5	5.6	10.0
	実A-HRT	hr	5.4	4.1	6.9	4.1	3.8	4.3	4.2	2.9	5.4	3.8	2.8	5.0
	MLSS	mg/L	1,300	1,000	1,600	1,900	1,700	2,100	1,500	1,100	2,300	1,800	1,300	2,800
	送風倍率	－	4.1	1.4	5.7	4.8	3.5	6.0	5.5	3.2	6.7	3.6	2.6	4.4
	槽末端DO		2.1	1.0	4.1	2.9	2.6	3.2	6.6	5.3	9.6	5.6	0.3	9.8
	必要A-SRT比	－	0.56	0.11	1.06	1.32	0.95	1.91	0.60	0.38	0.86	1.03	0.73	1.53
水質	採取時水温	℃	23.7	17.2	32.1	24.6	19.1	30.4	17.9	14.0	24.8	18.0	13.8	25.2
	BOD,in	mg/L	112	72	160	120	78	140	129	67	190	141	83	200
	T-N,in	mg/L	24.4	16.3	32.4	35.5	29.3	43.5	23.0	11.0	35.0	26.6	18.0	35.0
	NH_4-N,in負荷	mgN/gSS･hr	2.5	1.2	4.4	3.2	2.9	3.9	3.2	1.4	5.4	2.4	1.5	3.7
	NH_4-N,eff	mg/L	2.0	<0.1	7.1	0.2	0.0	0.4	0.4	0.0	1.0	0.6	0.0	1.6
	NO_3-N,eff	mg/L	8.1	2.3	12.2	9.3	8.3	12.1	8.8	3.2	14.0	9.1	5.8	12.0
	NO_2-N,eff	mg/L	0.8	<0.1	3.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.2	0.0	0.5
	硝化率	%	83.1	61.5	100.0	99.7	98.6	100.0	97.2	93.3	100.0	96.6	92.0	100.0

黄色部分：調査当日データより整 青色部分：調査日付近の水質試験日におけるデータより整理

BOD,in：一沈流出水BOD濃度 T-N,in：一沈流出水全窒素濃度 NH_4-N,eff：反応槽末端アンモニア性窒素濃度

NO_2-N,eff：反応槽末端亜硝酸性窒素濃度 NO_3-N,eff：反応槽末端硝酸性窒素濃度 実A-HRT:返送汚泥等を考慮した好気的水理学的滞留時間

$$\text{NH4-N,in負荷} \Rightarrow \frac{NH_4\text{-}N,in}{MLSS \times \text{実}A\text{-}HRT}$$

3.2 東京都と寒冷地における硝化細菌数と硝化能力の比較

特定の菌群・菌種に特異的な蛍光標識プローブを利用して分子生物学的に染色し、検出・定量する検出法に、FISH 法（fluorescence *in situ* hybridization）という方法がある。

都内および寒冷地における活性汚泥中の硝化細菌数を比較するため、同検出法を用いて、代表的なアンモニア酸化細菌（AOB）である *Nitrosospira* 属・*Nitrosomonas* 属の細菌数を測定した（図 3）。

その結果、AOB 細菌数は、都内、寒冷地いずれの施設においても冬季に減少する傾向が認められたが、単位水量あたりの細菌数としては、10^6 オーダー（桁数）で同程度に存在していた。都内 J センターについては冬季に細菌数が大きく減少しており、硝化率が低下した原因の一つと考えられた。また、アンモニア酸化細菌のうち *Nitrosmonas* 属については、細菌数と硝化速度に関係が認められ細菌数が多くなるほど硝化速度が速くなる傾向が認められた。

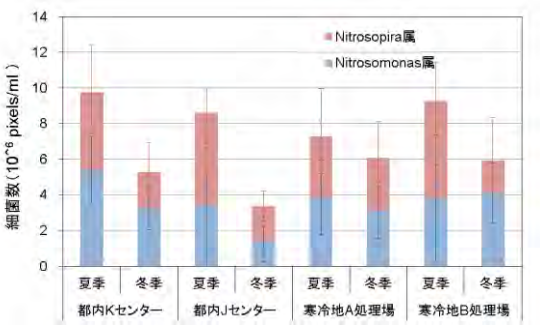


図 3 都内・寒冷地処理場のｱﾝﾓﾆｱ酸化細菌数
（*Nitrosospira* 属・*Nitrosmonas* 属）

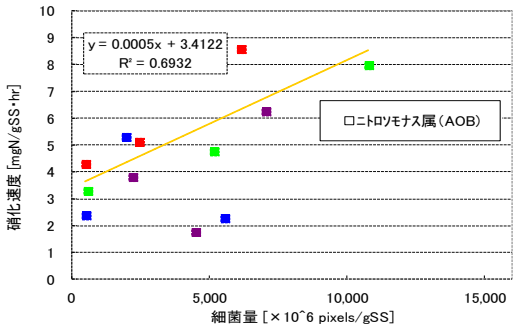


図 4 *Nitrosmonas* 属の細菌数と硝化速度
■K ｾﾝﾀｰ ■J ｾﾝﾀｰ ■A 処理場 ■B 処理場

4. 東京都と寒冷地における硝化速度および硝化速度の水温依存性の比較

寒冷地の活性汚泥が水温低下の影響を受けにくいかどうかを定量的に評価することを目的として、都内Jセンターと寒冷地B下水処理場の活性汚泥を採取し、異なる水温条件（10℃、20℃、25℃）でアンモニア酸化速度と亜硝酸酸化速度の測定を行った。

アンモニア酸化速度試験は下水試験方法に準拠して行い、NH_4-N が 20mg/L となるように NH_4Cl を、添加後濃度が 240mg/L となるように $NaHCO_3$ を、試験開始時に添加した。

また、亜硝酸酸化速度試験では、NO_2-N が 10mg/L となるように $NaNO_2$ を、添加後の濃度が 10mg/L、240mg/L となるようにそれぞれ ATU、$NaHCO_3$ を試験開始時に添加した。

さらに、試験に用いた活性汚泥について、表 3 に示すプライマーを用いて、アンモニア酸化酵素をコードする遺伝子 ammonium monooxygenase (amoA)をリアルタイム PCR 法で定量することにより、アンモニア酸化細菌群を一括定量した。また亜硝酸酸化細菌については、代表的な *Nitrobacter* 属と *Nitrospira* 属の 2 種類について定量を行った。

表 3 AOB および NOB の分析に用いるプライマー

	Target	Primer/Probe	参考文献
1	ｱﾝﾓﾆｱ酸化細菌 amoA	amoA1f（GGG GTT TCT ACT GGT GGT） amoA2r（CCC CTC KGS AAA GCC TTC TTC）	*1
2	Nitrobacter属 norB	NxrB 1F （ACGTGGAGACCAAGCCGGG） NxrB 1R （CCGTGCTGTTGAYCTCGTTGA）	*2
3	Nitrospira属 16S	NSR1113f （CCTGCTTTCAGTTGCTACCG） NSR1264r （GTTTGCAGCGCTTTGTACCG）	*3

*1 Rotthauwe et al 1997 Applied and Environmental Microbiology 63(12):4704-4712

4.1 東京都と寒冷地における硝化速度の比較

都内センターJおよび寒冷地B処理場の活性汚泥の水温別の硝化速度は表5のようになり、いずれの施設においても水温低下に伴い硝化速度が低下する水温依存性が認められた。

硝化速度と硝化細菌数の関係をみると、SSあたりの硝化速度に経月的な傾向はみられなかったが、SSあたりの硝化細菌数は経月的に減少した影響で、細菌数あたりの硝化速度は都内、寒冷地ともに経月的に高くなった。細菌数あたりの硝化速度（硝化活性）は、運転状況等によって変化すると考えられた。

同水温における単位MLSSあたりの硝化速度を比較すると、図5・6に示すように、アンモニア酸化速度については東京都よりも寒冷地の方が高い傾向にあったが、亜硝酸酸化速度については、東京都と寒冷地で同程度であった。また、硝化速度に影響を与える因子として、水温やDO濃度のほかに流入 NH_4-N 負荷が考えられた。そこで、単位細菌数あたりの流入 NH_4-N 負荷と硝化速度の関係を整理すると、amoA(AOB)あたりの NH_4-N 負荷と amoA(AOB)

あたりのｱﾝﾓﾆｱ酸化速度には正の相関がみられ、負荷の増減と硝化速度が対応していた。

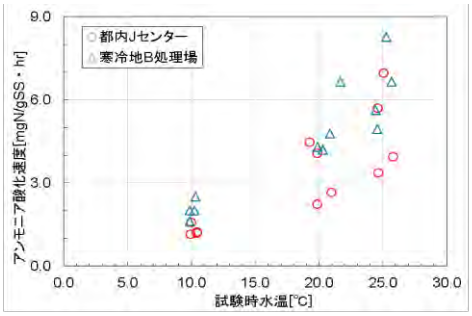


図 5 水温とｱﾝﾓﾆｱ酸化速度との関係

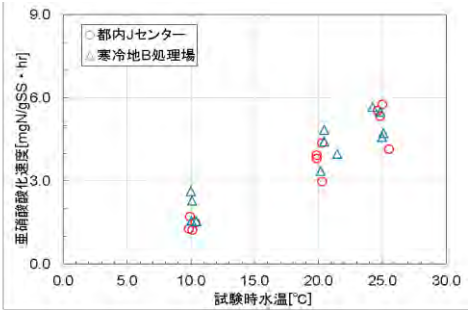


図 6 水温と亜硝酸酸化速度との関係

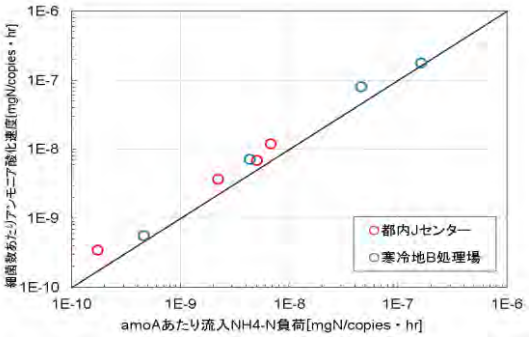


図 7 流入 NH_4-N 負荷と硝化速度の関係

表 4 水温別の硝化速度および硝化細菌数

項目			単位	都内Jセンター			寒冷地B処理場		
				H25.12	H26.1	H26.2	H25.12	H26.1	H26.2
活性汚泥濃度	MLSS		[mg/L]	1,300	2,000	1,100	1,700	1,700	2,400
硝化速度	ｱﾝﾓﾆｱ酸化速度	10℃	[mgN/gSS・hr]	1.2	1.2	1.6	2.5	2.0	1.6
		20℃	[mgN/gSS・hr]	2.7	2.2	4.1	4.3	4.8	4.2
		25℃	[mgN/gSS・hr]	3.9	3.4	5.7	4.9	6.6	5.6
	亜硝酸酸化速度	10℃	[mgN/gSS・hr]	1.2	1.7	1.3	1.6	2.3	2.6
		20℃	[mgN/gSS・hr]	3.0	3.8	3.9	3.4	4.4	4.8
		25℃	[mgN/gSS・hr]	4.2	5.5	5.3	4.7	5.5	5.7
細菌数	AOB(amoA)		[copies/mL]	1.3E+06	6.3E+05	2.3E+05	7.5E+05	5.9E+04	3.3E+04
	NOB(Nitrospira)		[copies/mL]	8.3E+07	6.8E+07	2.6E+07	9.9E+07	8.8E+07	5.1E+07
	NOB(Nitrobactor)		[copies/mL]	定量下限以下	定量下限以下	定量下限以下	7.4E+03	定量下限以下	定量下限以下
	AOB(amoA)		[copies/gSS]	1.0E+09	3.2E+08	2.1E+08	4.4E+08	3.5E+07	1.4E+07
	NOB(Nitrospira)		[copies/gSS]	6.3E+10	3.4E+10	2.4E+10	5.8E+10	5.2E+10	2.1E+10
	NOB(Nitrobactor)		[copies/gSS]	定量下限以下	定量下限以下	定量下限以下	4.4E+06	定量下限以下	定量下限以下
細菌数あたり硝化速度	ｱﾝﾓﾆｱ酸化速度	10℃	[mgN/copies・hr]	1.2.E-09	3.7.E-09	7.7.E-09	5.7.E-09	5.7.E-08	1.2.E-07
		20℃	[mgN/copies・hr]	2.6.E-09	7.1.E-09	2.0.E-08	9.7.E-09	1.4.E-07	3.0.E-07
		25℃	[mgN/copies・hr]	3.8.E-09	1.1.E-08	2.8.E-08	1.1.E-08	1.9.E-07	4.0.E-07
	亜硝酸酸化速度	10℃	[mgN/copies・hr]	1.9.E-11	5.1.E-11	5.3.E-11	2.7.E-11	4.4.E-11	1.2.E-10
		20℃	[mgN/copies・hr]	4.7.E-11	1.1.E-10	1.6.E-10	5.7.E-11	8.5.E-11	2.3.E-10
		25℃	[mgN/copies・hr]	6.5.E-11	1.6.E-10	2.2.E-10	8.0.E-11	1.1.E-10	2.6.E-10

4.2 活性汚泥の硝化能力の水温依存性比較

活性汚泥モデルでは、生物反応の速度を温度補正係数 a を用いて a^{T-20} のように指数式により補正しており、硝化反応では温度補正係数 a は 1.12 程度とされている。

そこで異なる水温条件で測定したアンモニア速度試験・亜硝酸酸化速度試験の結果を用いて、都内Jセンターおよび寒冷地B処理場における温度補正係数を求めた。下式のとおり、「各水温における硝化速度の自然対数：Kx_T」は水温Tを用いた線形式で表すことができる。このときの傾き「ln(a)」より温度補正係数aを求めた。

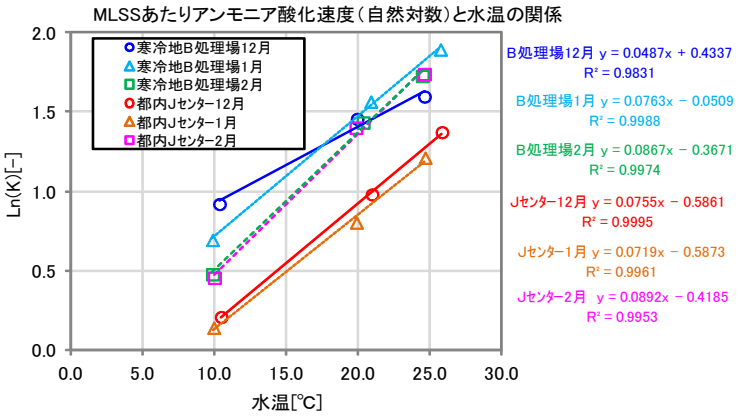
$$Kx_T = Kx_{20} \times a^{T-20} \quad \Rightarrow \quad \ln(Kx_T) = T \times \ln a + \ln Kx_{20} - 20 \times \ln a$$

T［℃］：硝化速度試験時における平均水温　a　［-］：温度補正係数
Kx_T［mgN/gSS・hr］：T℃におけるアンモニア酸化速度もしくは亜硝酸酸化速度
Kx_{20}［mgN/gSS・hr］：20℃におけるアンモニア酸化速度もしくは亜硝酸酸化速度

温度補正係数の計算結果を図8に示す。アンモニア酸化速度については、温度補正係数（a_{AOB}）は1.05～1.09程度であり、活性汚泥モデルにおける1.12程度よりは小さい値となったが、寒冷地B処理場と都内Jセンターで水温依存性に違いはみられなかった。またいずれの施設においても2月に高い値となったが、SRTが小さく細菌が水温変化に対する感度が高くなっていたためと推察された。一方、亜硝酸酸化速度については、温度補正係数（a_{NOB}）は1.05～1.10程度であり、寒冷地B処理場の活性汚泥の方が、都内Jセンターの活性汚泥よりも水温依存性が低く、水温低下の影響を受けにくい傾向が認められた。

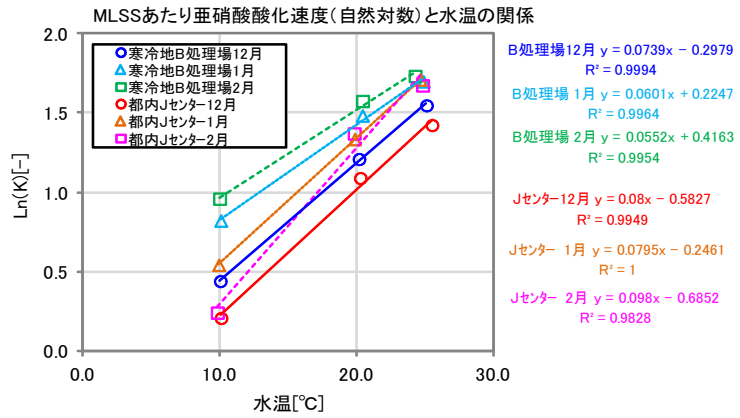
○アンモニア酸化速度(MLSSあたり)

月	設定水温 [℃]	都内Jセンター 試験時水温 [℃]	都内Jセンター Ln(K) [-]	寒冷地B処理場 試験時水温 [℃]	寒冷地B処理場 Ln(K) [-]
12月	10	10.5	0.21	10.3	0.92
	20	21.0	0.98	19.9	1.46
	25	25.8	1.37	24.6	1.60
	Ln(a)	0.0755	–	0.0487	–
	a	1.078	–	1.050	–
1月	10	9.9	0.14	9.9	0.69
	20	19.9	0.80	20.9	1.57
	25	24.7	1.21	25.7	1.89
	Ln(a)	0.0719	–	0.0763	–
	a	1.075	–	1.079	–
2月	10	10.0	0.45	9.9	0.48
	20	19.8	1.40	20.3	1.43
	25	24.6	1.74	24.5	1.73
	Ln(a)	0.0892	–	0.0867	–
	a	1.093	–	1.091	–



○亜硝酸酸化速度(MLSSあたり)

月	設定水温 [℃]	都内Jセンター 試験時水温 [℃]	都内Jセンター Ln(K) [-]	寒冷地B処理場 試験時水温 [℃]	寒冷地B処理場 Ln(K) [-]
12月	10	10.1	0.21	10.1	0.44
	20	20.3	1.09	20.2	1.21
	25	25.5	1.42	25.1	1.55
	Ln(a)	0.080	–	0.0739	–
	a	1.083	–	1.077	–
1月	10	9.9	0.54	10.1	0.82
	20	19.9	1.34	20.4	1.48
	25	24.7	1.71	24.9	1.70
	Ln(a)	0.0795	–	0.0601	–
	a	1.083	–	1.062	–
2月	10	9.8	0.24	10.0	0.96
	20	19.8	1.37	20.5	1.58
	25	24.8	1.67	24.3	1.73
	Ln(a)	0.098	–	0.0552	–
	a	1.103	–	1.057	–



○硝化速度のa値比較

月	アンモニア酸化速度 砂町 [-]	アンモニア酸化速度 手稲 [-]	亜硝酸酸化速度 砂町 [-]	亜硝酸酸化速度 手稲 [-]
12月	1.078	1.050	1.083	1.077
1月	1.075	1.079	1.083	1.062
2月	1.093	1.091	1.103	1.057
平均	1.082	1.073	1.090	1.065

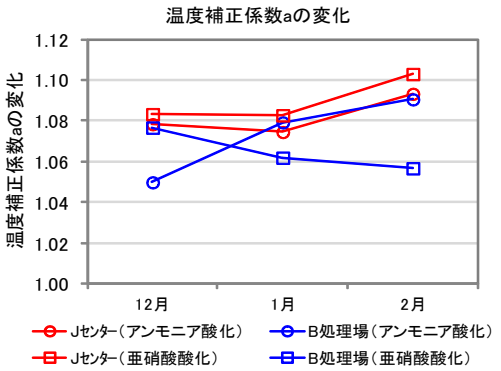


図 8　温度補正係数 a の算出結果

5. 東京都と寒冷地における活性汚泥の硝化細菌叢比較

細菌叢解析の手法として、同定できないものの遺伝子の塩基配列の違いから、細菌叢を構成している細菌の種類の多様性を評価できる T-RFLP 解析（terminal restriction fragment length polymorphism）がある。細菌叢を構成する全細菌の DNA を抽出して蛍光標識したﾌﾟﾗｲﾏｰで PCR 増幅させた後、特定の塩基配列を切断する制限酵素を作用させると、細菌種毎に蛍光標識された長さの異なる遺伝子断片ができる。これらを断片長毎に分離・検出することで細菌種の多様性を把握できる。

東京都 J センター、F センターと寒冷地 B 処理場における活性汚泥について、Fukushima

ら（2013）の方法により *Nitrosomonas* 属の T-RFLP 解析を行い、アンモニア酸化細菌叢を比較した結果を図 9 に示す。寒冷地の活性汚泥で T-RF441 および（断片長が 441bp となるアンモニア酸化細菌の種類を示す。以下も同様）T-RF491 が東京都に比べて明らかに多いが、東京都の活性汚泥では T-RF206 が多く検出された。

図 10 に示した検出波形をみても、東京都もしくは寒冷地に特有のﾋﾟｰｸが認められ、アンモニア酸化細菌を構成する細菌叢が東京都と寒冷地の活性汚泥で異なることがわかった。

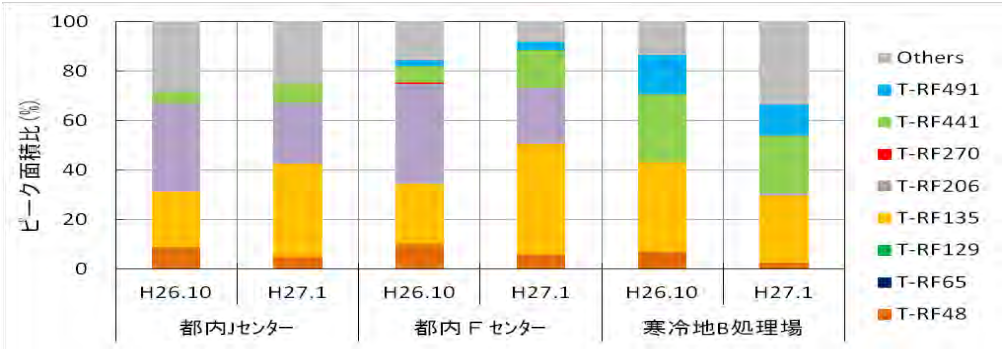
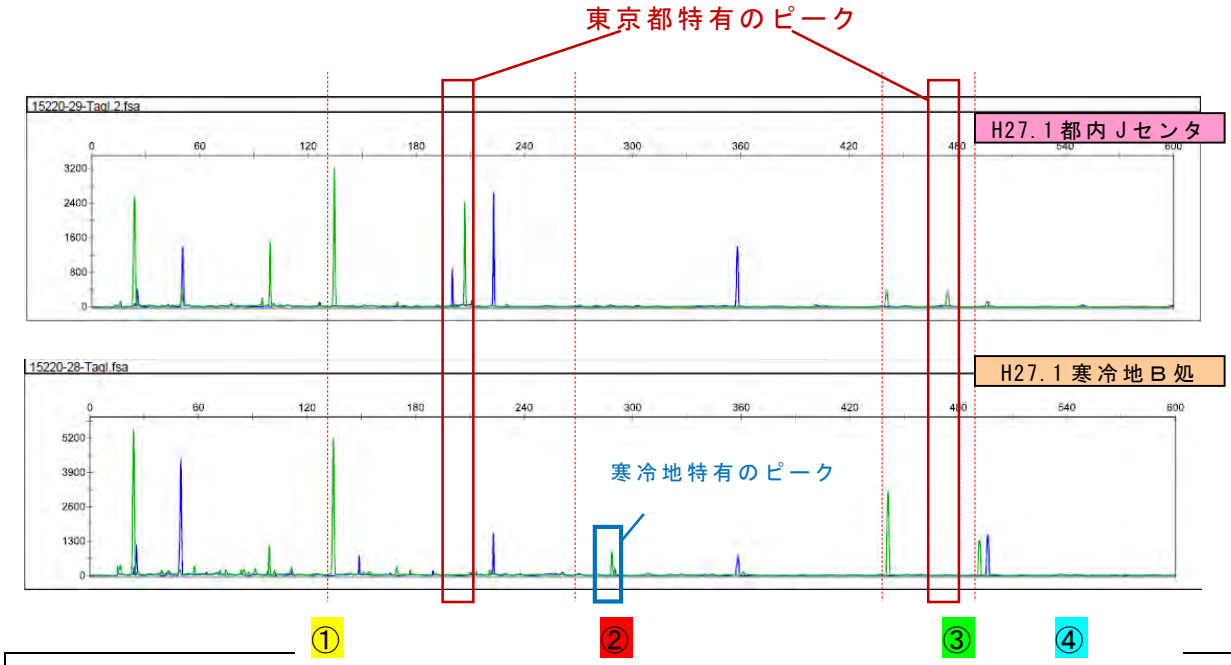


図 9　東京都と寒冷地の硝化細菌叢解析結果（T-RFLP 解析）



①48/135：*N. nitrosa*（*Nitrosomonas nitrosa*）　②219/270：*N. europaea*（*Nitrosomonas europaea*）

③48/441：*N. nitrosa*（*Nitrosomonas nitrosa*）　④491/491：*N. eutropha*（*Nitrosomonas eutropha*）

図 10 T-RFLP 解析結果（断片長のピーク）

6. 流入下水が活性汚泥を構成する細菌叢に及ぼす影響

6.1 調査概要

寒冷地の活性汚泥で東京都の流入下水を処理させた場合に、細菌叢を維持できるかどうかを確認するため、図 11 に示すような連続式の処理実験装置を 2 式作成し、各装置に都内 J センターおよび寒冷地 B 処理場の活性汚泥を投入し、都内 J センターの反応槽流入水を連続流入させて、処理実験を行った。処理期間は 4 週間/回とし、水温条件を変えて 2 回試験を行った。週 1 回、曝気槽内の MLSS 濃度および原水、処理水の各態窒素濃度（NH_4-N, NO_2-N, NO_3-N）を測定し、処理状況を確認した。

連続処理調査における活性汚泥を用いて、調査（培養）開始時、終了時（第 4 週目）の 2 回、硝化速度試験（アンモニア酸化速度、亜硝酸酸化速度）を実施した。また活性汚泥および流入下水について、週 1 回、リアルタイム PCR 法および T-RFLP 法によりアンモニア酸化細菌と亜硝酸酸化細菌の細菌叢解析を行った。

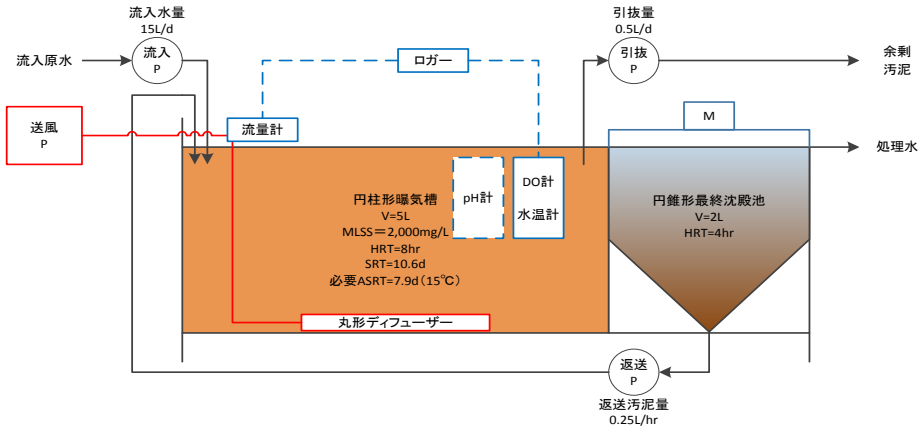


図 11 連続処理装置

6.2 調査結果

(1) 運転・水処理状況

培養期間中はほぼ完全硝化であった。活性汚泥の固形物が循環する回数を求めると、概ね培養 3 週間程度で両系列ともに一巡する傾向にあった。

(2) 硝化速度

培養開始時は寒冷地の活性汚泥を投入した系列の方がアンモニア酸化速度・亜硝酸酸化速度ともに高くなっていたが、培養 4 週間後では両系列の速度が同程度となり、異なる細菌叢・硝化速度をもつ汚泥であっても、4 週間同じ流入水で培養することで同程度の硝化能力になることが分かった。

(3) 細菌解析結果

図 12 にリアルタイム PCR 法による硝化細菌数の結果を示す。流入水では *amoA*、*Nitrospira*、*Nitrobacter* のそれぞれが、活性汚泥に比べて 10^4 から 10^6 オーダー程度低く、流入水の細菌種が活性汚泥の細菌種の構成に与える影響は軽微であるといえた。

T-RFLP 解析の結果を図 13 に示す。寒冷地の活性汚泥を投入した系列の細菌叢について、培養開始時は T-RF491 や T-RF441 が都内 J センターより明らかに多かったが、4 週間培養するにつれて徐々に減少し、代わりに東京都系列に特徴的で多く占められていた T-RF206 が出現、増加し、東京都系列の細菌叢に近づく様子が観察された。

以上の結果から、寒冷地の活性汚泥を都内センターに投入したとしても、都内センターの流入水を処理することによって都内センターの活性汚泥の細菌叢に近づくことがわかった。ただし、流入水において、東京都の活性汚泥に特有の T-RF206 が殆ど検出されていないことから、東京都の活性汚泥で同ピークが特有である理由は、原水由来ではなく、馴致環境由来（例：流入負荷（窒素、塩化物イオン濃度）、水温、運転上条の因子、阻害物質等）の増殖であると考えられた。

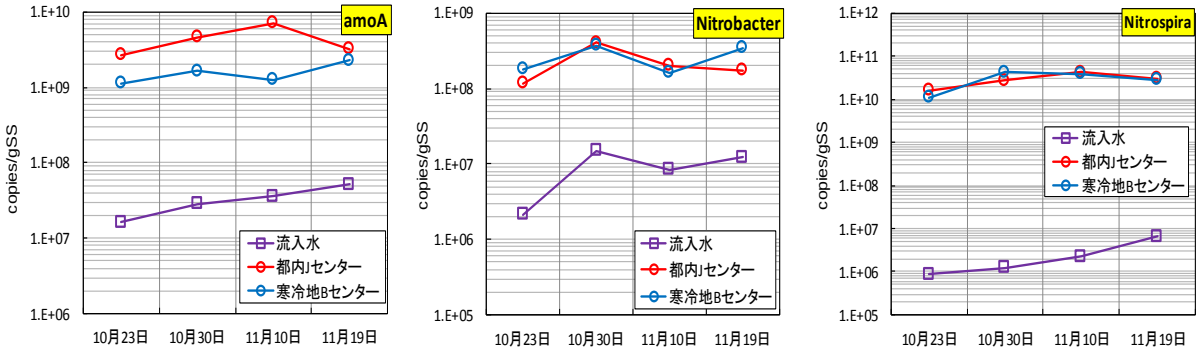


図 12　培養実験における硝化細菌数の変遷（ﾘｱﾙﾀｲﾑ PCR 法）

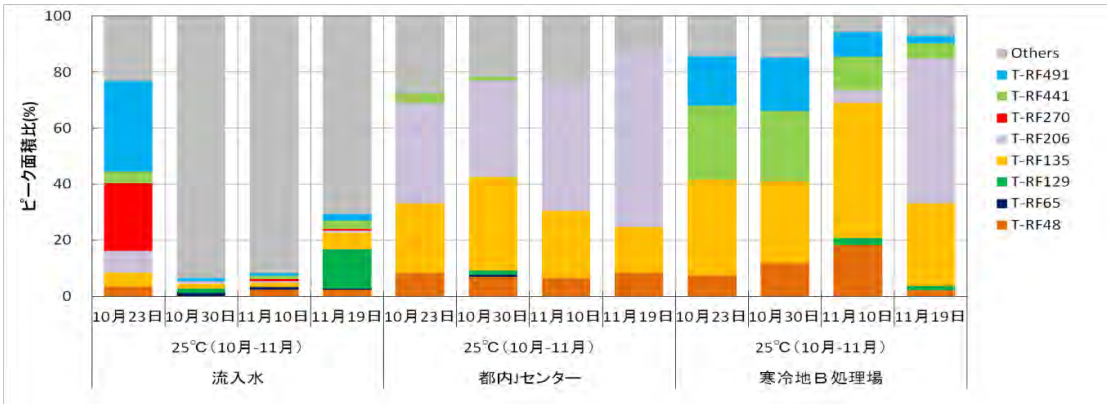


図 13　培養実験におけるアンモニア酸化細菌叢の変遷（T-RFLP 解析）

7. まとめ

・東京都、寒冷地の活性汚泥について硝化速度の水温依存性を比較した結果、アンモニア酸化速度については寒冷地の活性汚泥も東京都と同程度に水温の影響を受けることがわかった。ただし、亜硝酸酸化速度については、寒冷地の方が東京都と比較して水温依存性が小さく水温低下の影響を受けにくい性質をもっていた。

・寒冷地の活性汚泥を用いて東京都の下水を処理させると、寒冷地の活性汚泥の細菌叢が徐々に東京都の活性汚泥の細菌叢に近づく結果となり、活性汚泥の細菌叢は処理環境の影響を大きく受けると考えられた。

・そのため、特定の細菌を反応槽内に定着させる場合には、定期的な投入もしくは、担体化を検討する必要がある。

参考文献

1) Amann, R. I. : *In situ* identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes, In Molecular microbiol ecology manual, 1-15 (1995)

2) Fukushima *et.al.* : Nitrifying bacterial community structures and their nitrification performance under sufficient and limited inorganic carbon conditions、Appl Microbiol Biotechnol (2013) 97:6513–6523.

2-2-2 水再生センターにおける直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（LAS）の実態調査

施設管理部 環境管理課
樫原 慎久、森谷 典子

1. 調査背景

1.1 LASの物性や用途

直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（以下「LAS」という）は、界面活性剤の一種であり、常温で白色または黄色の水溶性の固体である。直鎖部分の炭素数は10から14である（図1）[1)]。

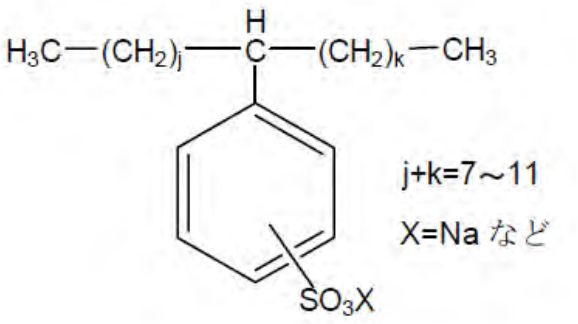


図1 LASの構造式

LASは生分解性が低く河川での環境汚染の原因となった分岐鎖アルキルベンゼンスルホン酸（ABS）に代わる生分解性の高い界面活性剤として1960年代後半に開発された。主な使用用途は家庭用の洗濯用洗剤であり、生産量（平成21年度で約55,000t）の約8割を占める[1)]。残り約2割が業務用洗浄剤としてクリーニングや車両洗浄などに使われており、繊維を染色加工する際の分散剤や農薬などの乳化剤にもわずかに使用されている[2)]。

1.2 LASの環境基準設定の経緯

平成15年に環境基本法に基づく水質汚濁に係る環境基準が一部改正された際、既存の「人の健康の保護に関する環境基準」「生活環境の保全に関する環境基準」に加え、新たに公共用水域における水生生物の生息及び生息環境の保全を目的に「水生生物保全に係る水質環境基準」が創設された。現在までに亜鉛、ノニルフェノール、そしてLASの3物質について、水生生物の生息状況等に応じて区分した類型ごとに基準が定められている（表1）。また、要監視項目として、クロロホルム、フェノール、ホルムアルデヒド、4-t-オクチルフェノール、アニリン、2,4-ジクロロフェノールの6物質に指針値が定められている。

表1 水生生物の保全に係る水質環境基準

類型		環境基準（年間平均値） 亜鉛	ノニルフェノール	LAS
環境基準設定時期		平成15年11月	平成24年8月	平成25年3月
河川	生物A	30	1	30
	生物特A	30	0.6	20
	生物B	30	2	50
	生物特B	30	2	40
海域	生物A	20	1	10
	生物特A	10	0.7	6
排水基準		2,000	-	-

※単位はμg/L

環境基準の定められた3物質のうち、水質汚濁防止法に排水基準が定められているのは亜鉛のみであり、他の2物質については平成27年現在定められていない。これらについて

も将来的な排水基準値の設定に向けて現在環境省で検討がなされているが、LAS については、その使用用途より発生源の中心は生活排水（ノンポイント）となるため、新たな基準設定の考え方や排出規制手法が取り入れられることも考えられる。

以上の動きをうけ、区部水再生センターにおける LAS の流入・放流状況及び反応槽内処理状況を把握する実態調査を平成 25 年度、平成 26 年度の 2 か年で行った。なお、国土交通省でも排水基準設定を視野に入れ、平成 25 年 6 月に全国の終末処理場を対象とした実態調査を行っている（結果は未公表）。

2. 調査内容と方法

2.1 流入水・放流水実態調査

これまで東京都水再生センターへの流入水中の LAS 濃度や水再生センターからの放流水の LAS 濃度について調査が行われておらず、その実態が不明であることから、平成 25 年度に東京都区部にある全 13 水再生センターにおいて夏季、冬季の 2 回、午前 10 時にスポット採水（処理系列が複数ある場合は、そのうち 1 系列を代表系列として採水）した流入水及び放流水の LAS 濃度を測定した。

これに引き続き平成 26 年度は、平成 25 年度の調査において流入水、放流水それぞれで最も高い値を示した三河島、有明の 2 水再生センターを対象として、流入水及び放流水の時間変動を調査した。調査は、夏季、冬季の 2 回、午前 9 時から翌朝午前 9 時まで 2 時間毎に 24 時間、計 12 回流入水及び放流水を採水し、LAS 濃度を測定した。

なお、LAS 濃度は環境基準対象物質である C10～C14－LAS の濃度の合計値とし、分析方法は環境省告示第 30 号（平成 25 年 3 月 27 日）付表 12 に準拠し、固相カラムを用いて濃縮処理した試料を、高速液体クロマトグラフ・タンデム質量分析計（LC/MS/MS）を用いて分析した。当局は本機器を保有していないため委託した。

LAS 濃度測定は、次の 3 点に注意して行った。

①試料採取容器、試料瓶等を水で洗浄し、更にアセトン及びメタノールで洗浄した後使用する。

②試料瓶はガラス製とする。

③採取した試料は冷暗所に保存し、速やかに分析する。

2.2 生物反応槽内での LAS 処理状況調査

平成 26 年度には、生物反応槽内での LAS の処理状況を把握するため、三河島、有明の 2 水再生センターを対象として、夏季、冬季の 2 回、反応槽流入水及び反応槽各回路末端の処理水を採水し LAS 濃度を測定した。反応槽流入水は午前 10 時に採水し、反応槽各回路末端の処理水はその予想流達時間に採水した。

各回路末端で採取した試料は活性汚泥を除去するため、JIS P 3801 のろ紙 5 種 C でろ過したのち LAS 濃度を測定した。

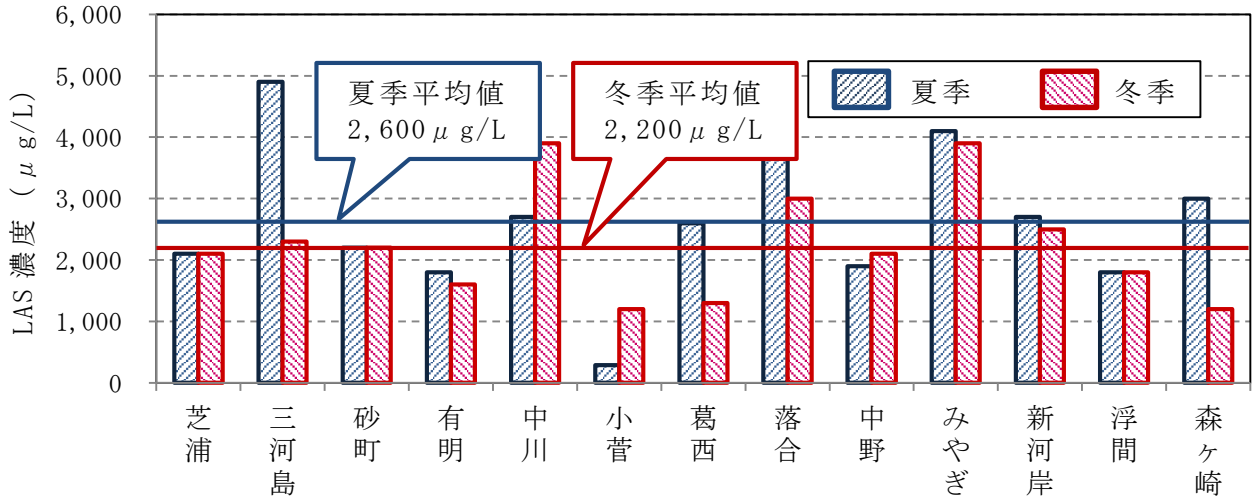
3. 結果と考察

3.1 流入水・放流水実態調査

3.1.1 スポット採水による調査

全 13 水再生センターにおけるスポット採水による流入水実態調査の結果を図 2 に示す。図上部において測定結果をグラフに、図下部において測定値を表にまとめている。（図 3 以降も同様のまとめ方になっている。）

流入水中の LAS 濃度は、多くのセンターにおいて夏季と冬季でほとんど変わらなかった。その中で三河島、小菅、葛西、森ヶ崎の 4 センターでは、夏季と冬季で LAS 濃度が 2 倍以上変化していた。スポット採水で調査を行っているため、日内変動や季節変動、天候等が影響し、このような濃度差が生じた可能性があると考えられる。



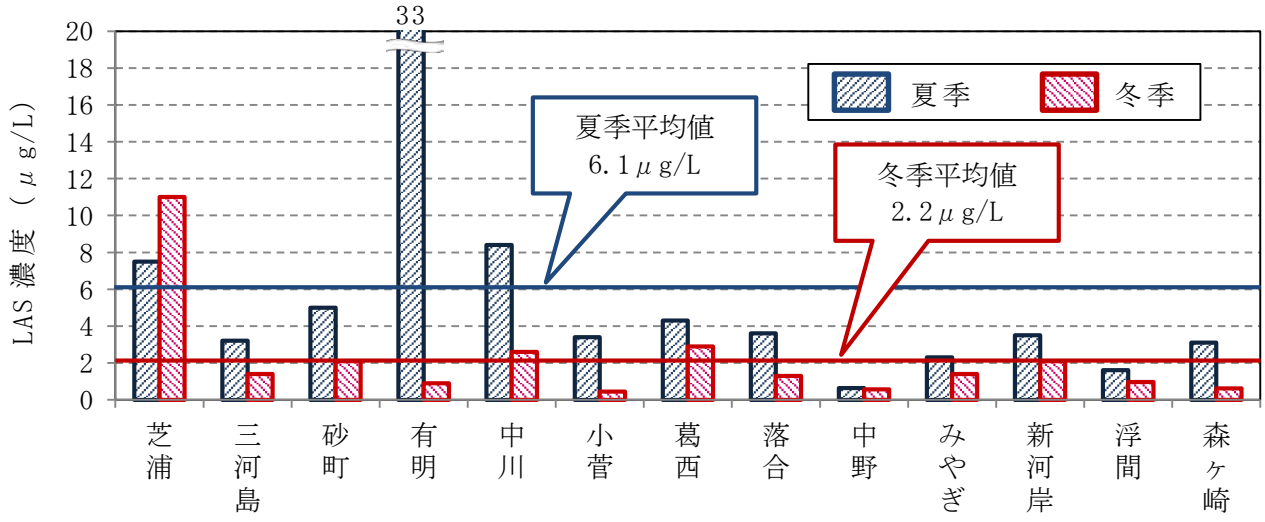
※単位はμg/L

	芝浦	三河島	砂町	有明	中川	小菅	葛西	落合	中野	みやぎ	新河岸	浮間	森ヶ崎
夏季	2,100	4,900	2,200	1,800	2,700	290	2,600	3,900	1,900	4,100	2,700	1,800	3,000
冬季	2,100	2,300	2,200	1,600	3,900	1,200	1,300	3,000	2,100	3,900	2,500	1,800	1,200

図 2　各センターにおける流入水中 LAS 濃度（平成 25 年度）

スポット採水による放流水実態調査の結果を図 3 に示す。

放流水中の LAS 濃度は、ほとんどのセンターで東京都区部の環境基準で最も厳しい値の 10μg/L（海域・生物 A）よりも低い値であったが、有明水再生センターにおいては、流入水 LAS 濃度は夏季、冬季でほとんど変わらなかったものの、放流水 LAS 濃度は夏季と冬季で大きく異なり、夏季の値は 10μg/L を大きく上回っていた。



※単位はμg/L

	芝浦	三河島	砂町	有明	中川	小菅	葛西	落合	中野	みやぎ	新河岸	浮間	森ヶ崎
夏季	7.5	3.2	5.0	33	8.4	3.4	4.3	3.6	0.63	2.3	3.5	1.6	3.1
冬季	11	1.4	2.1	0.9	2.6	0.45	2.9	1.3	0.56	1.4	2.1	0.96	0.61

図 3　各センターにおける放流水中 LAS 濃度（平成 25 年度）

流入水、放流水実態調査における区部平均 LAS 濃度及びその除去率を表 2 に示す。

区部平均の LAS 除去率は、夏季、冬季ともに平均で 99%以上であり、流入水中の LAS のほとんどが、活性汚泥処理によって除去できていることが分かった。また、ほとんどの試料について夏季よりも冬季のほうが LAS 濃度は低く、除去率は冬季のほうが高かった。

表 2　各試料での区部平均 LAS 濃度と除去率

試　料	夏　季		冬　季	
	区部平均	範　囲	区部平均	範　囲
流入水	2,600	290 ～ 4,900	2,200	1,200 ～ 3,900
放流水	6.1	0.63 ～ 33	2.2	0.45 ～ 11
除去率	99.8%	98.2%～99.9%以上	99.9%以上	99.5%～99.9%以上

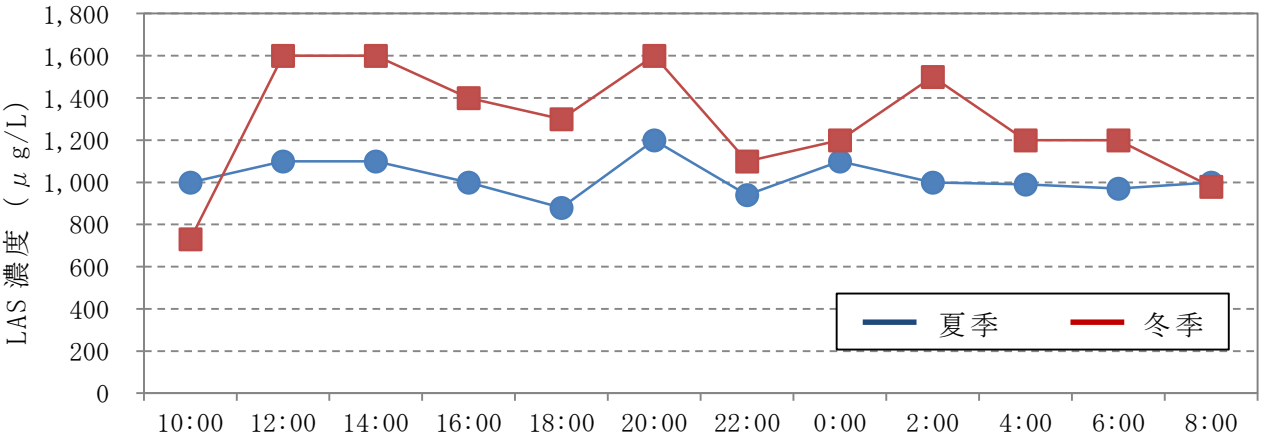
※濃度の単位はμg/L

3.1.2　時間変動調査

流入水、放流水それぞれで最も高い値を示した三河島、有明の 2 センターを調査対象センターとして平成 26 年度の調査を実施した。流入水中の LAS 濃度の時間変動調査の結果を図 4 及び図 5 に示す。

両センターとも時間により 2 倍程度の幅で変動した。また、平成 25 年度のような高い濃度の流入は観測されず、季節による流入水質の大きな差異も見られなかった。

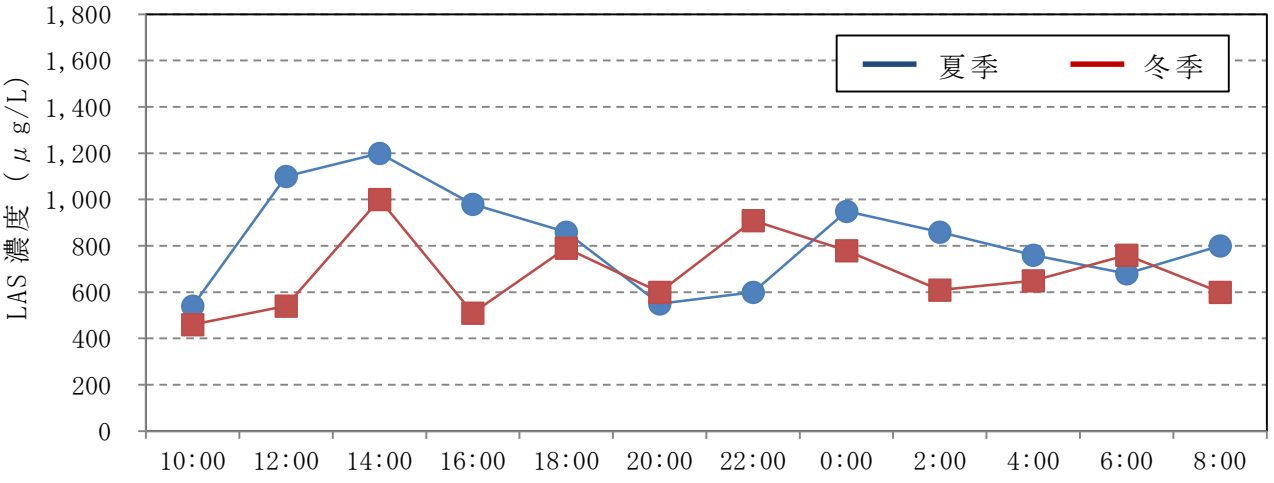
立野ら[3)]が 2014 年 1 月 8 日に京都市鳥羽水環境保全センターで行った調査でも、流入水は 820～2400μg/L で変動しており、両センターと同程度の結果であった。しかし、時間変動を見ると、京都市の調査では流入水 LAS 濃度が午前 10 時頃から 18 時頃まで高く、それ以降の夜間は相対的に低下しており、LAS は生活系排水に由来する可能性が高いことが考えられるとしているのに対し、本調査では 12 時、14 時頃に流入水 LAS 濃度が高いものの京都市のような夜間の大きな濃度低下は見られなかった（図 6）。夜間に活動する人口が多いこと等により、東京都区部では昼夜の濃度差が小さかったものと考えられる。



※単位はμg/L

	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00	8:00
夏季	1,000	1,100	1,100	1,000	880	1,200	940	1,100	1,000	990	970	1,000
冬季	730	1,600	1,600	1,400	1,300	1,600	1,100	1,200	1,500	1,200	1,200	980

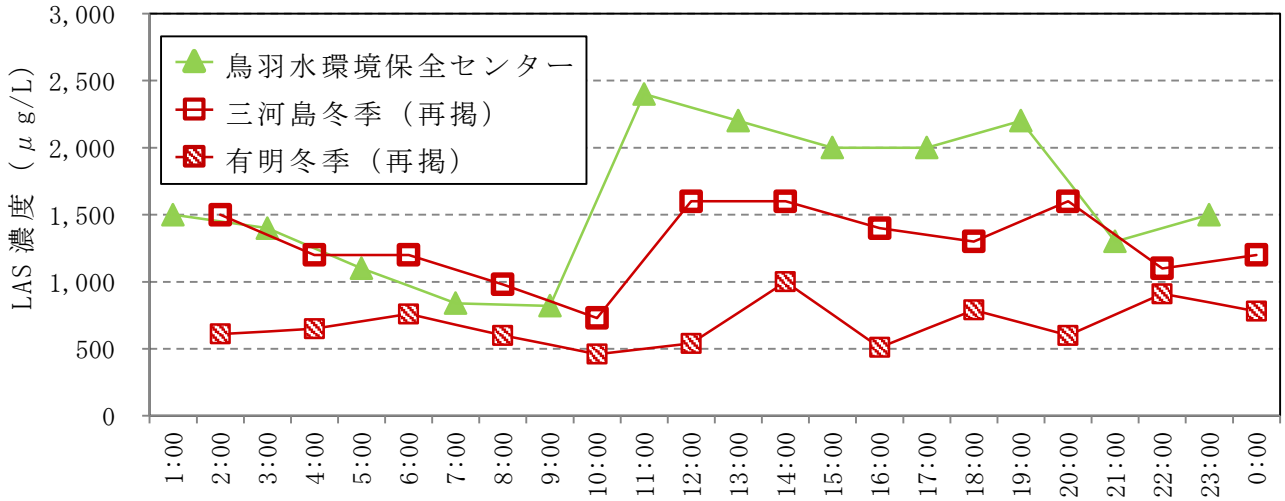
図 4　三河島水再生センターにおける流入水中 LAS 濃度の時間変動



※単位はμg/L

	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00	8:00
夏季	540	1,100	1,200	980	860	550	600	950	860	760	680	800
冬季	460	540	1,000	510	790	600	910	780	610	650	760	600

図 5　有明水再生センターにおける流入水中 LAS 濃度の時間変動



※鳥羽水環境保全センターは奇数時刻、前後 1 時間のコンポジット試料である。
三河島・有明両センターは偶数時刻、スポット試料である。

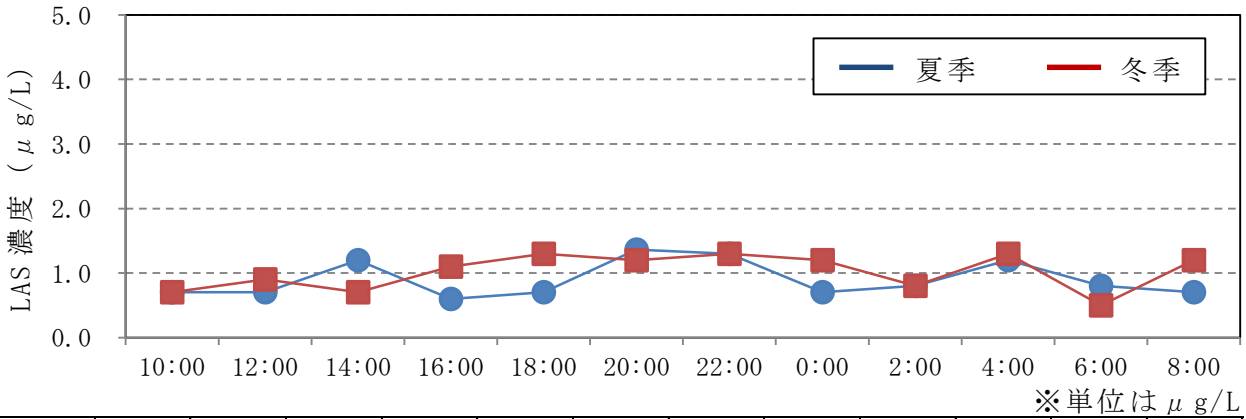
※単位はμg/L

0:00～2:00	2:00～4:00	4:00～6:00	6:00～8:00	8:00～10:00	10:00～12:00	12:00～14:00	14:00～16:00	16:00～18:00	18:00～20:00	20:00～22:00	22:00～0:00
1,500	1,400	1,100	840	820	2,400	2,200	2,000	2,000	2,200	1,300	1,500

図 6　鳥羽水環境保全センター（京都市）における流入水中 LAS 濃度の時間変動

放流水中の LAS 濃度の時間変動調査の結果を図 7 及び図 8 に示す。

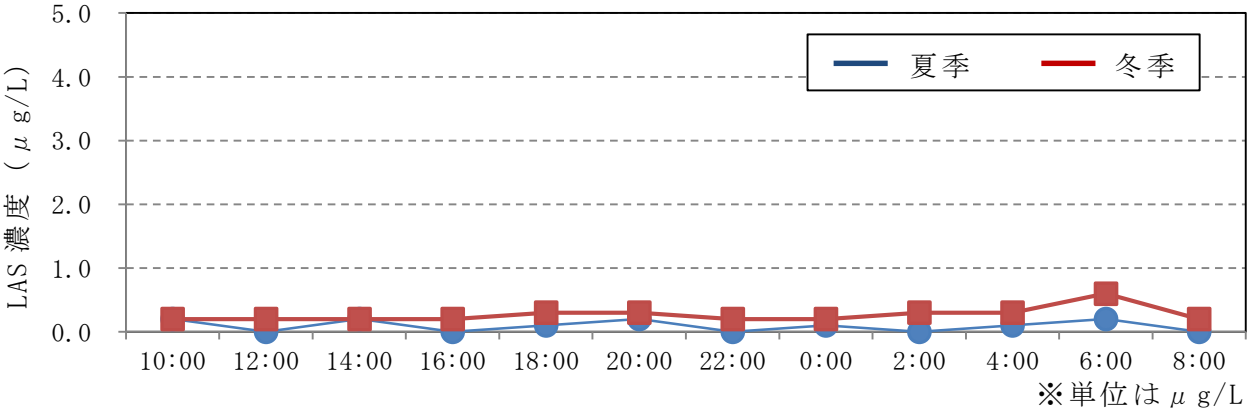
両センターとも環境基準のうちもっとも厳しい値である 6μg/L（海域・生物特 A）を下回り、平均値は三河島水再生センターが 1.0μg/L、有明水再生センターが 0.2μg/L であった。また、平成 25 年度のような高い濃度の放流は観測されず、季節による差異もほとんど見られなかった。鳥羽水環境保全センターにおける測定結果とも大きな差は見られなかった。



※単位はμg/L

	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00	8:00
夏季	0.7	0.7	1.2	0.6	0.7	1.4	1.3	0.7	0.8	1.2	0.8	0.7
冬季	0.7	0.9	0.7	1.1	1.3	1.2	1.3	1.2	0.8	1.3	0.5	1.2

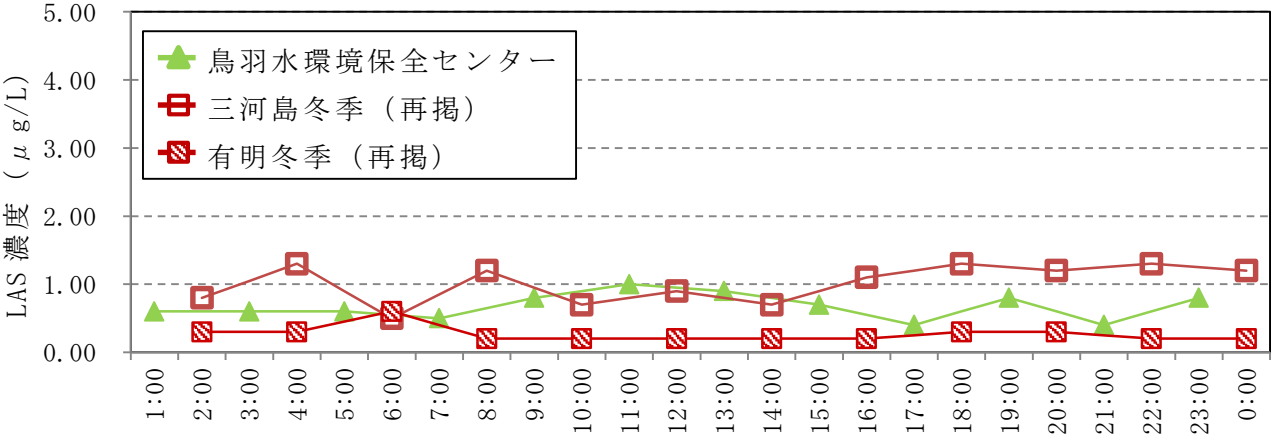
図 7　三河島水再生センターにおける放流水中ＬＡＳ濃度の時間変動



※単位はμg/L

	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00	8:00
夏季	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0
冬季	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.2

図 8　有明水再生センターにおける放流水中 LAS 濃度の時間変動



※鳥羽水環境保全センターは奇数時刻、前後 1 時間のコンポジット試料である。
三河島・有明両センターは偶数時刻、スポット試料である。

※単位はμg/L

0:00 ～ 2:00	2:00 ～ 4:00	4:00 ～ 6:00	6:00 ～ 8:00	8:00 ～ 10:00	10:00 ～ 12:00	12:00 ～ 14:00	14:00 ～ 16:00	16:00 ～ 18:00	18:00 ～ 20:00	20:00 ～ 22:00	22:00 ～ 0:00
0.6	0.6	0.6	0.5	0.8	1.0	0.9	0.7	0.4	0.8	0.4	0.8

図 9　鳥羽水環境保全センター（京都市）における放流水中 LAS 濃度の時間変動

流入水・放流水中 LAS 濃度の時間変動調査結果を夏季、冬季の結果をあわせた年間データとして表 3 にまとめる。

両センターとも LAS の年間平均除去率は 99.9%以上であり、夏季、冬季を問わず LAS が良好に除去されていることが明らかになった。

表 3　流入水・放流水中 LAS 濃度の時間変動調査結果まとめ

		年間範囲	年間平均	年間平均除去率
三河島水再生センター	流入水	730～1,600	1,200	99.9%以上
	放流水	0.5～1.3	1.0	
有明水再生センター	流入水	460～1,200	750	99.9%以上
	放流水	0.1 未満～0.6	0.2	

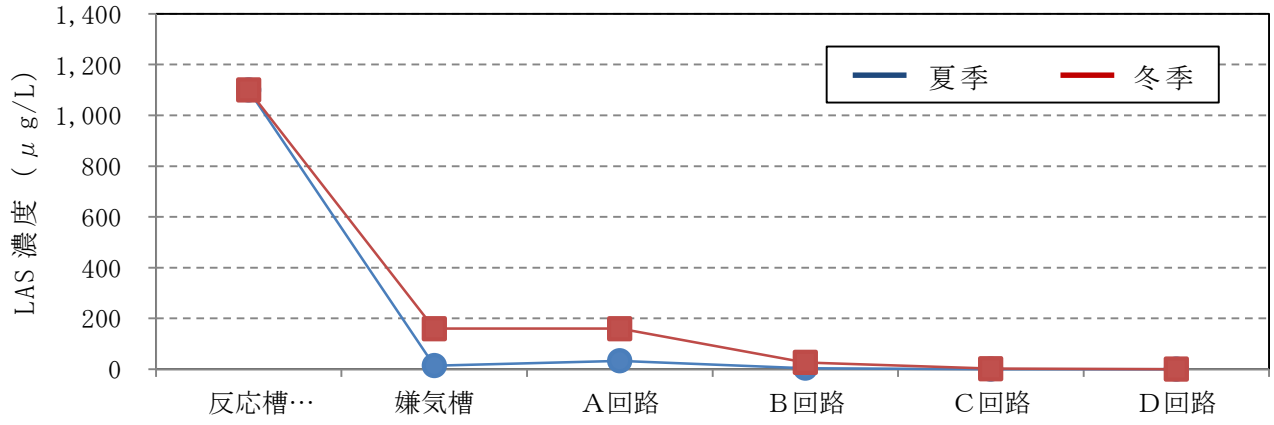
※単位はμg/L

3.2　三河島・有明水再生センターで行った生物反応槽内での LAS 処理状況調査

生物反応槽内での LAS 処理状況調査結果を図 10 及び図 11 に示す。

両センターとも夏季、冬季を問わず生物反応槽に流入した LAS は流入直後の嫌気槽でそのほとんどが水中から除去された。これは生物反応槽に流入した LAS が生物反応槽内の活性汚泥に吸着し水中から除去されたためと考えられる。

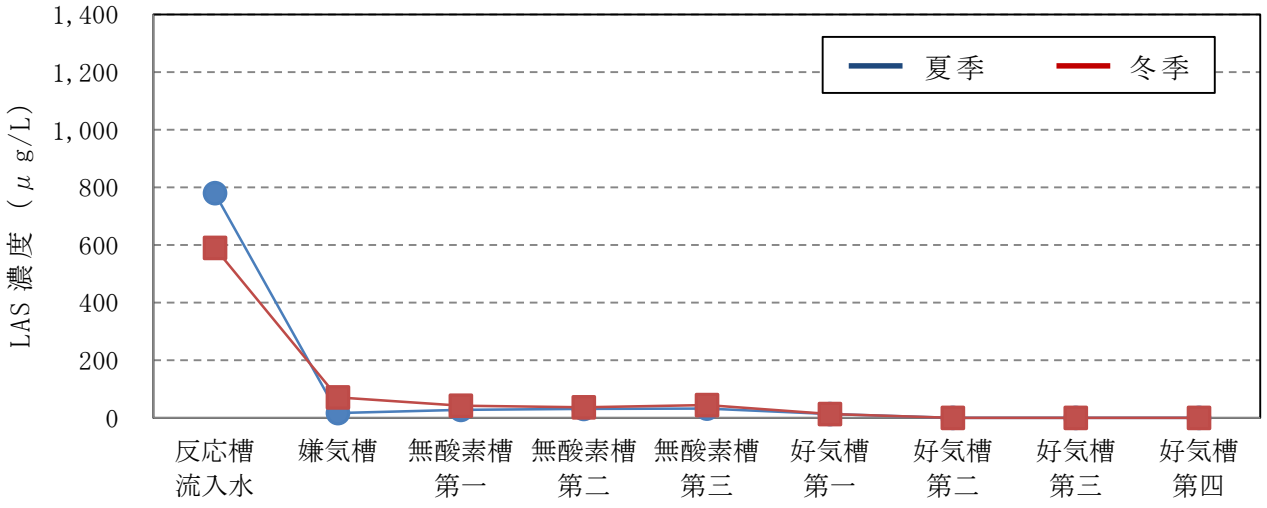
その後、好気槽を通じて LAS 濃度は徐々に減少し、生物反応槽での LAS の除去率は 99.9%以上、生物反応槽末端では環境基準以下となった（表 4）。国内外の報告においても下水処理場での LAS の除去率は 97～99.9%であることが確認されており [4]、両センターにおいてもこれらと同様に汚水処理過程において LAS が良好に除去されていることが明らかになった。



※単位はμg/L

	反応槽流入水	嫌気槽	A回路	B回路	C回路	D回路
夏季	1,100	14	33	4.1	0.6	0.5
冬季	1,100	160	160	27	2.3	0.6

図 10　三河島水再生センター生物反応槽内における LAS 処理状況



※単位はμg/L

	反応槽 流入水	嫌気槽	無酸素槽 第一	無酸素槽 第二	無酸素槽 第三	好気槽 第一	好気槽 第二	好気槽 第三	好気槽 第四
夏季	780	17	28	32	33	14	0.7	0.6	0.1
冬季	590	72	43	37	45	14	0.3	0.1	0.2

図 11　有明水再生センター生物反応槽内における LAS 処理状況

表 4　生物反応槽内での LAS 処理状況調査結果まとめ

		反応槽処理状況	除去率
三河島水再生センター	夏　季	1,100　⇒　0.5	99.9%以上
	冬　季	1,100　⇒　0.6	99.9%以上
有明水再生センター	夏　季	780　⇒　0.1	99.9%以上
	冬　季	590　⇒　0.2	99.9%以上

※単位はμg/L

4.　まとめ

⑴　流入水 LAS 濃度は 1,000～5,000μg/L と高かった。

⑵　ほとんどの水再生センターの放流水 LAS 濃度は、環境基準のうち東京都区部で最も厳しい値の 10μg/L を下回った。

⑶　ＬＡＳは水再生センターの通常運転で 99%以上除去できる。

⑷　反応槽流入直後に LAS 濃度は大幅に減少していることから、そのほとんどが反応槽内の活性汚泥に吸着し水中から除去されたと考えられる。

⑸　流入水や放流水中の LAS 濃度や生物反応槽内の処理状況に季節による大きな変動は見られなかった。

今後も国における排水基準の検討状況を注視しながら、必要な調査を行っていく。

参考文献

1) 環境省「化学物質の環境リスク評価　第６巻」
http://www.env.go.jp/chemi/report/h19-03/index.html
2) 経済産業省「経済産業省生産動態統計年報　化学工業統計編　2013年版」
http://www.env.go.jp/chemi/report/h19-03/index.html
3) 今川智章、立野信也　下水処処理における直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩の実態調査について　第51回下水道研究発表会講演集　p301-303
4) 山本昭子、西山直宏、吉田浩介、山根雅之、石川百合子、三浦千明（2010）　直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩（LAS）の水圏生態リスク評価　水環境学会誌　Vol.33 No.1　pp.1-10

2-2-3 好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理）の開発

中部下水道事務所　芝浦水再生センター　葛西孝司
計画調整部　技術開発課　濱本亜希

1. 新たな高度処理技術の開発の経緯

放流水中の窒素とりんの低減には高度処理の導入が不可欠であるが、A_2O 法では嫌気タンクおよび無酸素タンクが必要となるため、同じ反応タンク容積では処理できる水量が減少する。また、電力使用量が増大することなどのデメリットがある。特に、無酸素タンクは比較的容積が大きく、また、かくはん機や硝化液循環設備が必要であることから、これらが不要となればデメリットの多くが解消され、水質改善と省エネルギー化を両立する処理が可能となる。

そこで、東京都下水道局は、本来有機物の分解と硝化の役割を担っている好気タンクにおいて、運転条件によっては脱窒が進行する現象[1)]を積極的に活用することで無酸素タンクを不要とする省エネ型の高度処理技術の確立を目指していた。そして、このほど東京都下水道サービス㈱およびメタウォーター㈱と共同で、好気タンクの風量制御を前半と後半に分割し、前半を NOx-N 計、後半を NH_4-N 計で個別に風量を制御することで、好気タンク内での脱窒を促進する新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理技術：以下、本技術という）を開発した。

2. 好気タンク内脱窒の原理の確認

（1）調査・実験を行った下水処理場の概要

調査および実験を行った芝浦水再生センターの処理施設の概要を表 - 1 に示す。

表 - 1　芝浦水再生センター処理施設の概要
（平成 25 年度の実績：年間平均値）

系　　列		浅槽系	深槽東系	深槽西系	西系	東系
日平均処理水量	(m^3/日)	118,860	163,260	130,900	45,710	85,070
反応タンク形状	有効水深 (m)	4.1	10.2	10.2	10.0	11.2
	幅 (m)	6.7	9.1	9.1	9.0	13.5
	長さ (m)×水路数	80×4	91×2	91×2	83.5×1	65×2
	容積 (m^3)	8,790	16,890	16,890	11,260	13,100
	池数	6	3	3	2	3
	散気水深 (m)	3.6	4	4	4	3.7
平均HRT	(時間)	10.6	7.4	9.3	11.8	11.1
汚泥返送比		0.51	0.56	0.59	0.71	0.64
反応タンク流入水（平日平均）	BOD (mg/L)	150			120	110
	T-N (mg/L)	40.5			38.2	39.6
	NH_4-N (mg/L)	30.2			29.9	30.5
	T-P (mg/L)	4.2			3.9	3.9

反応タンクは、有効水深 4.1m の浅槽式 1 施設と有効水深 10m程度の深槽式 4 施設の合わせて 5 施設であり、いずれも旋回流方式のエアレーションを採用している。浅槽系から深槽西系の 3 施設は最初沈殿池を共有しており、反応タンク流入水質は同一である。また、当センターの処理区は都心のオフィス街の割合が大きいため、平日は休日と比較して流入水量が多く、かつ、窒素濃度も高いため、窒素負荷は休日より約 4 割高い。なお、当センターはすべて合流式の処理施設である。

（2）好気タンク内脱窒の状況（実験前の調査結果）

好気タンク内での脱窒は、程度の差はあるものの深槽式反応タンクで特異的にみられる現

象[2]で、浅槽系ではほとんど見られない。また、同じ施設でも窒素負荷が低い休日に比較的脱窒が進み、負荷が高い平日にはほとんど脱窒しないこともあった。深槽系で、休日の好気タンク内での脱窒が大きいときの状況を図-1に示す。

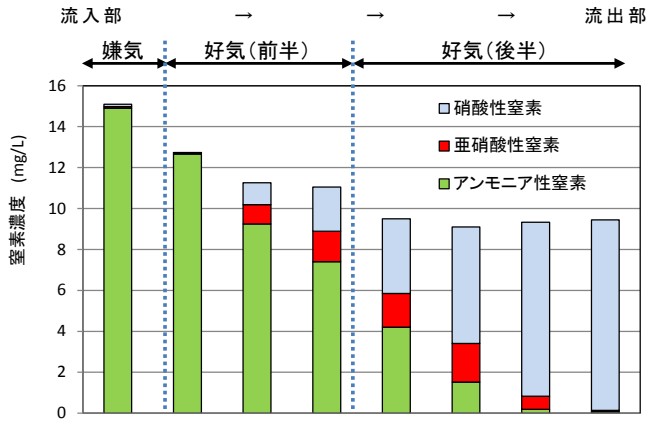


図-1 好気タンク内脱窒の例
(2012.1.2 13:30採取)

図-1は、嫌気タンクから好気タンク出口にかけて、等間隔の位置で試料を採取し、形態別窒素を測定した結果である。好気タンク前半では NH_4-N 濃度の低下にともなって窒素濃度も低下する一方、好気タンク後半では、NH_4-N 濃度が低下していくにつれ NO_x-N 濃度が増加し、窒素濃度に変化がない。この挙動は、

(ア)前半は有機物濃度が高いことで、酸素消費速度や脱窒速度が速く、かつ、反応タンク底部で低DOで脱窒可能なゾーンが形成されやすいこと、

(イ)後半は有機物の処理が進むことで、酸素消費速度が低下しDOが高くなりやすいことに加え、有機物の減少により脱窒速度が遅くなること、

と考えると説明できる。

(3)浅槽式と深槽式反応タンクのDO分布の比較

脱窒を促進するためには、積極的に低DO条件を整える必要がある。そこで、好気タンク内での脱窒状況に差がみられる浅槽系(5号槽D回路上流部)と深槽西系(4号槽B回路出口)において、反応タンクの横断面方向でのDO分布を測定した。その際、測定位置によって水面付近のDOが異なることから、両者の差を比較しやすくするため、今回は散気設備上部の水面付近のDOが1.5mg/Lの地点をそれぞれ選んで行った。

その結果、好気タンク底部のDOに着目すると、浅槽系でDOが最も低い散気設備の下部でも1.0mg/Lまでしか下がっておらず脱窒は不可能と考えられる一方で、深槽西系の散気板の下部では0.1mg/Lまで低下し脱窒が可能と考えられる状態にあった(図-2)。

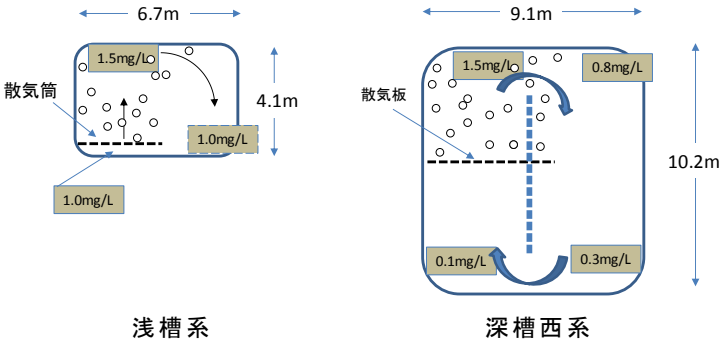


図-2 好気タンク内のDO分布の比較
(2012.2.10 13～14時)

このことから、深槽好気タンク内での脱窒のメカニズムについては、旋回流の中において、

(i) DOが比較的高い散気設備の上部で硝化が進み、
(ii) DOが比較的低い散気設備の下部で脱窒され、
(iii) (i)と(ii)が流下方向に繰り返される、

というかたちで、窒素除去が行われると考えられる。

(4) 机上実験による検証

前述の（3）で仮定した窒素処理の状況が成り立つには、生物反応である硝化反応と脱窒反応が比較的短時間に切り替わる（正確には、それぞれの生物活性の卓越状況が切り替わっていると考えられる）ことが必要である。そこで、短い時間で両反応の切り替わりが実際に起こるかを、机上実験によって確認することとした。

まず、机上実験に必要な硝化反応と脱窒反応が切り替わる時間を知るために、実施設で 1 旋回に要する時間を次の方法で実測した。好気タンク内の散気設備とは反対側の旋回流が潜り込む位置（浅槽系 5 号槽 C 回路中央部、深槽西系 4 号槽 C 回路中央部）にトレーサー（青色 1 号の水溶液）を瞬時に投入し、同じ位置で活性汚泥混合液を連続して採取した。その上澄水を 0.45μmメンブレンフィルタでろ過し、628nm の吸光度からトレーサー濃度を測定した（2012 年 2 月 8 日および 2 月 9 日）。1 回の旋回に要する時間は、経過時間とともに周期的に変化するトレーサーのピーク間隔から求めた（表 - 2）。

表 - 2　各系列の旋回時間調査結果

系列名	ピーク時間（秒）	旋回時間（秒）
浅槽系	50、80、110、140	30
深槽西系	1 回目　105、195	90
	2 回目　60、125	65

なお、旋回に要する時間は風量によって変化すると考えられることから、標準的な旋回時間を知るため、机上実験の対象とする深槽西系については日を改めて 2 回測定し、その平均値で旋回時間は 80 秒程度となった。次に、深槽西系反応タンクの断面構造（図-2 右）を参考に散気設備から水面までの部分をばっ気エリア、残りの部分を無ばっ気エリアと仮定して、ばっ気時間を旋回時間の四分の一に相当する 20 秒、残りの 60 秒を無ばっ気時間に割り振り机上実験を行った。

表 - 3　間欠ばっ気の実験条件

水温	28.4℃
MLSS	1,980mg/L
試料量	4.5L
ばっ気時の風量	2.13L/分
1 回のばっ気時間	20 秒
1 回のばっ気停止時間	60 秒

机上実験には、深槽西系 5 号槽 A 回路（嫌気タンク）から採取した（2012 年 8 月 2 日 9：40）活性汚泥混合液を用い、80 秒周期で間欠ばっ気を繰り返し、窒素と DO の挙動を確認した。実験条件は表 - 3 に示すとおりである。

実験中の DO の動きを図 - 3 に示す（DO の測定は卓上型 DO 計　YSI MODEL 58 を用いて連続測定）。なお、DO の変化は、80 秒の周期で上下を繰り返しているため、5 時間分の表

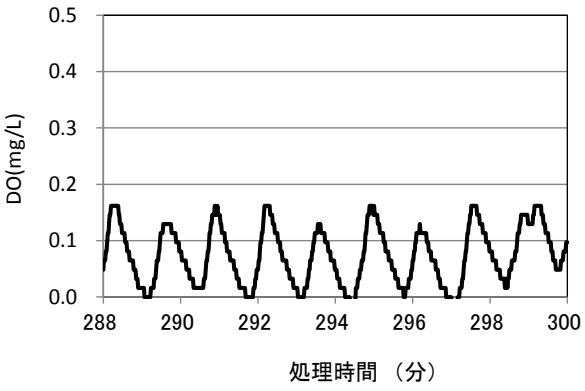


図 - 3　間欠ばっ気によるＤＯの挙動
（実験終了直前）

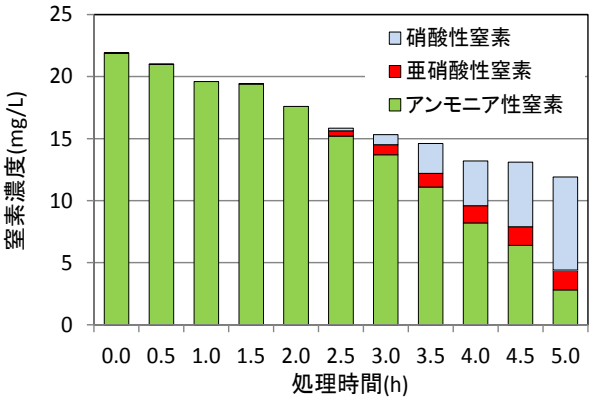


図 - 4　間欠ばっ気による窒素の挙動

示では詳細な動きが分かりにくいことから、図 - 3 では、実験終了直前の 12 分間分に限定して示す。

ばっ気によって上昇した DO は、ばっ気再開の直前には 0mg/L 付近にまで低下しており、実験終了時まで脱窒可能な低 DO 状態の形成が維持されていることがわかる。

次に、実験開始から終了時までの形態別窒素濃度(いずれもイオンクロマトグラフで測定)の変化を図 - 4 に示す。実験開始当初では NH_4-N の低下に対して、NO_x-N の発生が見られないことから硝化で生成した NO_x-N がすべて脱窒されていると推定され、短時間の間欠ばっ気の繰り返しの中で硝化反応と脱窒反応が切り替わることが確認できた。なお、図 - 2 で示した深槽西系の散気設備上部の DO と下部の DO の差は図 - 3 に比べて大きいが、窒素処理の状況は、この間欠ばっ気の机上実験で再現できたと考えている。

（5）好気タンク内脱窒が生じる条件のまとめ

実施設での窒素の挙動や DO 分布に加え、机上実験の結果などから、好気タンクにおいて旋回流により脱窒させるための条件としては、以下の 3 つに整理した。

① 反応タンクの構造

図 - 2 で示したように好気タンク内の DO 分布から、旋回時間が長く、脱窒可能な領域（主に散気設備の下部）を形成することができる深槽式反応タンクであることが条件の 1 つとなる。

② 硝化と脱窒のバランスを確保する風量制御

好気タンク内での脱窒を調査する過程で深槽式反応タンクの風量を変えると、過剰な送風では散気設備の下部の DO が上昇し硝化は進むが脱窒が阻害され、逆に風量が不足すると硝化が進まず、結果的に脱窒も生じないという窒素の挙動が確認されたことから、風量のバランスが重要であることが分かった。このことから、有機物や窒素の負荷変動に対し、好気タンク横断面における硝化領域と脱窒領域がバランスよく形成されるように風量制御することが 2 つめの条件といえる。

③ 硝化細菌の保持

脱窒を行うには、その前提となる硝化を確実に継続させることが必要で、硝化細菌の保持が不可欠である。しかし、好気タンク内で脱窒させる運転では、従来の処理に比べて送風量を少し抑えることになるため、硝化細菌の活性が低下し硝化の継続に支障をきたすおそれがある。このため、好気タンク内で硝化が完了できるような風量制御を行うことが 3 つめの条件となる。

また、好気タンク内に脱窒可能な低 DO 領域を増やすため、硝化細菌が硝化を行える領域（容積）が縮小すると考えられる。そのため、硝化細菌を保持するには、従来の A_2O 法等で言われている硝化に必要な ASRT 以上の汚泥滞留時間の確保が必要と考えられる。加えて、限られた容積の中で脱窒を行うために十分な脱窒速度を確保することも必要である。これらの理由から、可能な限り高めの MLSS、少なくとも設計指針に記されている MLSS（2,000～3,000mg/L 程度）での運転が望ましい。

3. 風量制御システムの検討

前述の①～③の条件をすべて満たし、好気タンク内での脱窒を安定して行う風量制御システムを検討した。

（1）好気タンクの風量制御の分割

好気タンク内でより多くの脱窒を行わせるには、流下方向に低 DO（無酸素状態）領域を継続的に形成することが必要であること、一方で、前述したように硝化可能な好気条件を整えてアンモニア処理（硝化）を常に完了させ、硝化細菌の活性と菌数を維持することも必要である。このように異なる条件を両立させるために、有機物濃度が高く脱窒が起こりやすい好気タンク前半は風量を抑えて硝化と脱窒のバランスを確保し脱窒を促すゾーンとして、後半は硝化を確実に完了させるゾーンとして、風量を別々に制御することにした。

（2）風量制御に使用するセンサーと設置位置

次に､好気タンクの前半と後半に別々の機能を持たせるために適したセンサーを検討した。

硝化と脱窒のバランスを確保し脱窒を促す前半の風量制御は、１回の旋回の中で脱窒可能な量だけ硝化が進むように、すなわち、

散気設備上部での NO_x-N の増加量（硝化量）

≒　散気設備下部での NO_x-N の減少量（脱窒量）

となるように制御する必要がある。そこで、硝化反応と脱窒反応の両方に関係し硝化や脱窒不足の指標となる NO_x-N 濃度で風量コントロールを行うことが最適と考え、NO_x-N 計を用いることとした。また、その設置位置は、前半の出口付近かつ、硝化量の把握ができる水面付近とした（図 - 5）。なお、NO_x-N 計については、NO_2-N 濃度と NO_3-N 濃度を分離して測定するタイプと、合計値のみ測定するタイプの 2 種類があるが、本技術においては、個別にキャリブレーションする必要がなく取り扱いが容易な、合計値のみを測定するタイプのものでも実用上十分である。

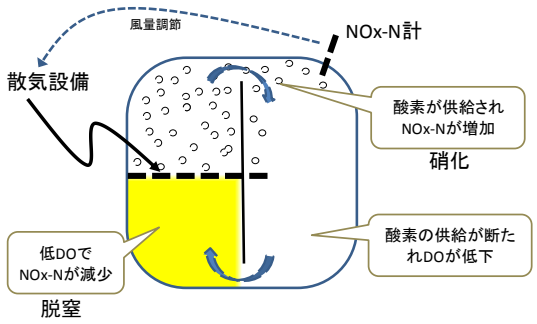


図 - 5　旋回流による硝化・脱窒の考え方

好気タンク後半の風量制御には、硝化を確実に完了させる一方で、可能な限り低 DO 領域を確保しつつ脱窒を継続させることができるものが適している。つまり、硝化に必要な最低風量に制御できることが重要である。そこで、処理対象物質である NH_4-N 濃度が連続測定可能な電極式アンモニア計を用いることとした。ただし、電極式アンモニア計は、濃度が 1mg/L 未満になると測定精度が低下することから、その設置位置は好気槽出口で硝化が完了する条件において、NH_4-N 濃度が 2～5mg/L 程度となる位置（好気タンク出口よりも少し上流）とした。

（3）センサー設定値の考え方

好気タンクの前半を制御する NO_x-N 計の設定値については､図 - 6 に示す硝化速度と脱窒速度に関する考え方をもとに設定することとした。

硝化反応は、下水試験法[3)]に記述されている『硝化速度の測定方法』からわかるように酸素の供給が十分であれば反応時間に対して直線的に進む（0 次反応）。よって、DO 制御で完全硝化させている好気タンク内の NH_4-N 濃度は、おおよそ好気タンク流入部の濃度（①の点）から流出部の濃度（②の点）を結んだ図中の破線（直線）に沿って低下する。一方、溶存態窒素濃度は、当初直線的に減少するものの、脱窒に必要な有機物濃度の低下と酸素利用速度の低下による低 DO 領域の減少によって脱窒が進まなくなることで、図中①と③を結ぶ

直線的な挙動を示す。

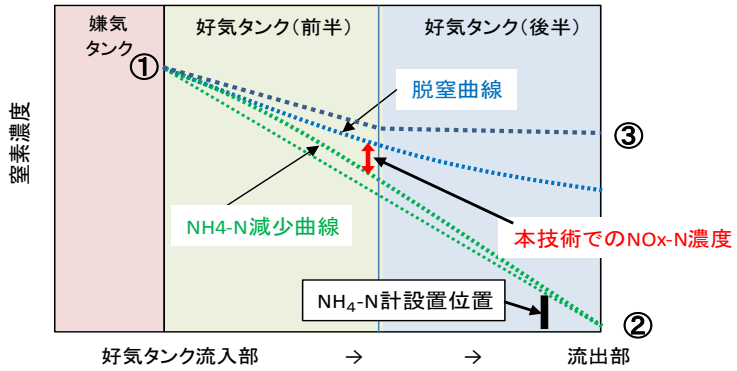


図 - 6 好気タンク内での窒素の挙動（模式図）

これに対して本技術では、好気タンク前半の硝化を抑えて脱窒を促進するため、NH_4-N 濃度の減少曲線は DO 制御時の減少線に対して上凸型曲線になり、溶存態窒素濃度の減少線は DO 制御時に比べ脱窒がすすむことで下凸型曲線になると考えられる。そこで、DO 制御時より低い NO_x-N 濃度（溶存態窒素濃度と NH_4-N 濃度の差）が設定値となる。なお、実際の設定値は流入するアンモニアの負荷量によって変わってくるが、前半での硝化を過度に抑制すると後半の硝化能力を超えるアンモニアが残存してしまうことに注意して設定する。

一方、好気タンク後半の風量を制御するアンモニア計の設定値は、原理的観点からいえば好気タンク出口の NH_4-N 濃度がゼロとなるように設定すればよい。しかし、実際にそのように管理した場合、

ア）硝化による酸素消費が消滅すること

イ）有機物の分解による酸素消費速度も低下していることで好気タンク底部の DO が高くなりやすく脱窒が阻害されるおそれがあること

ウ）過剰な送風が確認できないこと

の 3 つの影響が考えられるため、好気タンク出口ではアンモニアを少しだけ（NH_4-N 濃度として 0.5～1mg/L 程度）残留させるよう管理することが、脱窒を少しでも促進するうえで重要であると考えている。ただし、前述のとおりアンモニア計は、測定精度の観点から NH_4-N 濃度が 2～5mg/L 程度となる位置に設置することとなるため、設定値もおおむね 2～5mg/L となる。

4. 実施設での検証と考察

前述のシステムの検討結果に基づいて、深槽西系の反応タンク 3 槽に図 - 7 で示した位置に NO_x-N 計とアンモニア計を設置し、実際に風量制御を行い、制御の安定性や DO 制御との処理性能比較などを行ったのち、連続運転で窒素除去性能を検証した（2012 年 8 月

表 - 4 実験に使用した NOx-N 計とアンモニア計

反応タンク	NOx-N 計	アンモニア計
4 号	ドイツ WTW 製 NiCaVis701IQNI	ドイツ WTW 製 AmmoLytPlus700IQ
5 号	アメリカ HACH 製 NITRTAX	アメリカ HACH 製 AISE
6 号	ドイツ WTW 製 NiCaVis701IQNI	ドイツ WTW 製 AmmoLytPlus700IQ

～2013 年 9 月)。なお、水質センサーは実績的に信頼性のある表 - 4 のものを使用した。

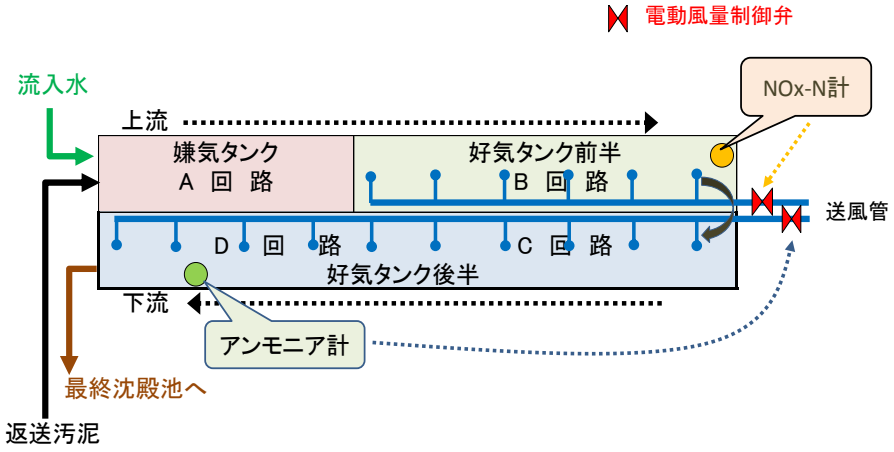


図 - 7　反応タンクの構造と好気タンクの分割

図 - 7 で示したように、検証に使用した深槽西系は、嫌気好気活性汚泥法（AO 法）の施設で 2 つの水路を往復する構造となっており、水路ごとに送風管 1 本と電動風量制御弁 1 基が設置されている。よって、1 水路目の好気タンクが前半部、折り返した 2 水路目の好気タンクが後半部となるが、反応タンク前半の流入部には嫌気タンクがあるため、好気タンクの前半と後半の容積比は 3：5 である。

好気タンク前半は脱窒を優先した制御をすることから前半の割合が大きくなるほど窒素除去と風量削減効果が大きくなると考えられるが、好気タンク後半での硝化を担保する必要があることから、好気タンク前半と後半の最適な比率は、アンモニアの負荷量によって変わると予想される。この点については今後の調査で確認していく予定である。

（1）風量制御方法の検討

DO 計による風量制御には、フィードバック制御の 1 つである PID 制御（Proportional - Integral - Derivative）が用いられることが多い。本技術の制御も当初 PID 制御で行ったが、図 - 8 に示すように風量が大きく上下し、また、風量と NH_4-N 濃度の変化に時間のズレが生じた。この現象は、P、I、D それぞれの係数を調整しても解消できなかった。その理由として、DO は風量の変動に対する応答が速く PID 制御で安定した風量制御が可能であるのに対し、

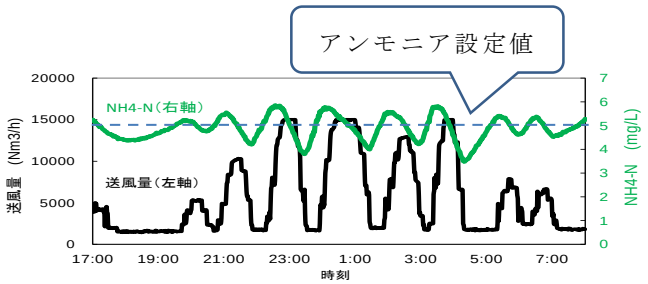


図 - 8　PID 制御時の NH_4-N 濃度と送風量の時間変動
（2012.11.7～8）

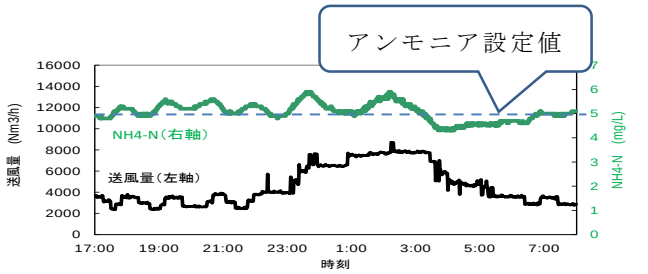


図 - 9　状態予測制御時の NH_4-N と送風量の時間変動
（2012.11.4～5）

NO_x-N 濃度や NH_4-N 濃度は風量の変動に対する応答が遅いことや、実験を行った深槽西系の水量の時間変動が比較的大きいことなどによるものと考えられる。そこで、制御方法を流入水量、NO_x-N 濃度、NH_4-N 濃度、既存の MLSS 計指示値などの変化から必要風量を演算するフィードフォワードによる状態予測制御機能[4)]を付加したところ、制御が安定し送風量の変化が緩やかになり、また、NH_4-N 濃度の変化に対する風量の増減する時間帯がほぼ一致するようになった（図 - 9)。

（2）窒素の負荷と窒素除去率の関係

次に、本技術による連続運転で窒素除去性能を確認した。なお、試料採取場所、分析項目と測定法は表 - 5 のとおりである。

当該施設では、前述したように平日と休日で有機物や窒素の負荷量が大きく異なる。そこで、負荷量の変化が極力安定するタイミングを捉え、負荷の高い平日のデータとしては水曜～木曜日を、負荷の低い休日のデータとしては日曜～月曜日のそれぞれ 24 時間の混合試料の水質を測定することにより、出来るだけ幅広い窒素負荷量条件でのデータを集めた。なお、設定値の考え方は前項(3)で述べたように、流入するアンモニアの負荷に合わせ、アンモニア計の設定値は休日で 2mg/L 前後、平日で 4～5mg/L とした。一方、NO_x-N 計の設定値については、好気タンク前半では硝化量を脱窒可能量に均衡させるような風量制御を行っており原理的に NO_x-N の値はあまり大きく変化しない（図 - 6 参照）ことから、平日・休日ともに 1.5 mg/L 前後とした。

表 - 5　分析項目と測定法

試料名	項目	分析方法
反応タンク流入水（24時間混合試料）	SS	JIS K0102 14.1
	BOD	JIS K0102 21
	ATU-BOD	JIS K0102 21 備考1
	T-N	JIS K0102 45.2 紫外線吸光光度法
	NH_4-N	JIS K0102 42.5 イオンクロマトグラフ法
	T-P	JIS K0102 46.3ペルオキソ二硫酸カリウム分解法
処理水（24時間混合試料）	SS	JIS K0102 14.1
	BOD	JIS K0102 21
	ATU-BOD	JIS K0102 21 備考1
	T-N	JIS K0102 45.2 紫外線吸光光度法
	NH_4-N	JIS K0102 42.5 イオンクロマトグラフ法
	NO_2-N	JIS K0102 43.1.2 イオンクロマトグラフ法
	NO_3-N	JIS K0102 43.2.5 イオンクロマトグラフ法
	T-P	JIS K0102 46.3ペルオキソ二硫酸カリウム分解法
	PO_4-P	JIS K0102 46.1.1 モリブデン青吸光光度法
反応タンク（10時採取）	NH_4-N	JIS K0102 42.5 イオンクロマトグラフ法
	NO_2-N	JIS K0102 43.1.2 イオンクロマトグラフ法
	NO_3-N	JIS K0102 43.2.5 イオンクロマトグラフ法
	PO_4-P	JIS K0102 46.1.1 モリブデン青吸光光度法
	MLSS	下水試験方法 第4編第1章第6節2 ガラス繊維ろ紙法

窒素の負荷量と窒素除去率の関係でデータを整理すると、降雨時のデータを除き、反応タンク 1m^3 当たりの窒素負荷量が低くなるほど窒素除去率が高くなる関係性が認められた（図 - 10)。A_2O 法との比較のため、他の処理場で得られた A_2O 法のデータを併記する（A_2O 法は 2009 年 6～9 月のデータ)。

反応タンクへの窒素負荷量が減少するほど窒素除去率が向上するという現象は、NO_x-N 計とアンモニア計で風量を制御することにより、負荷

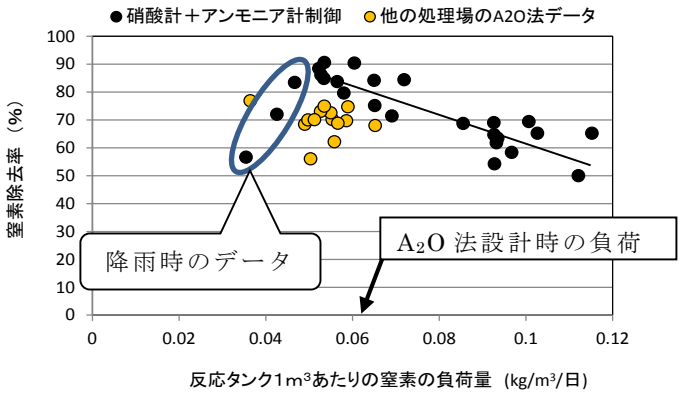


図 - 10　窒素負荷量と窒素除去率との関係
（2013.6～9）

変動に対し最小限の硝化ゾーン（容積）でアンモニアの処理（硝化）を終了させるとともに、残りの好気タンク容積を最大限の脱窒可能ゾーン（容積）とする、という処理機構（図 - 11）により説明できる。

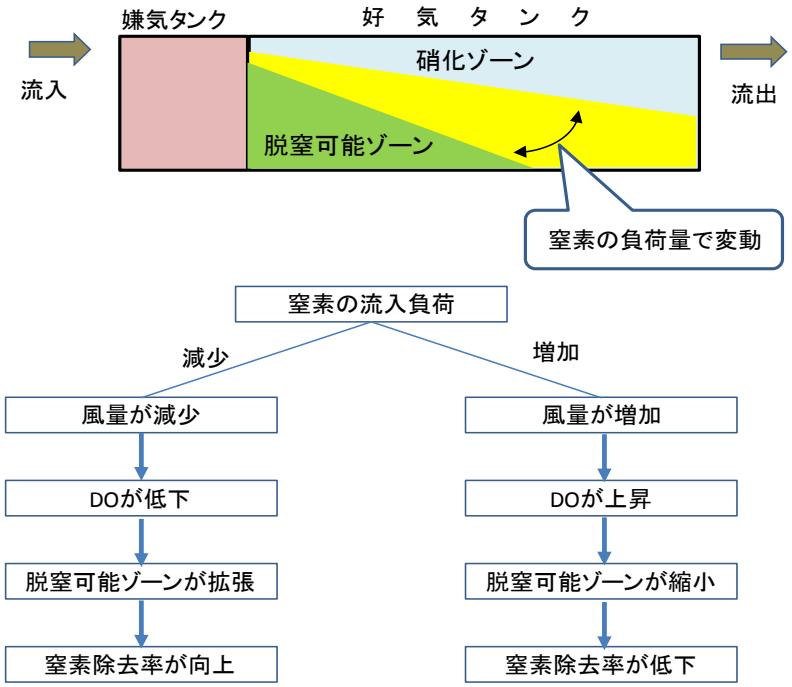


図 - 11　負荷変動に対する好気タンク内での硝化ゾーンと脱窒可能ゾーンの変動
（処理機構のイメージ）

ただし、流入水質や反応タンクの形状によって窒素除去率に差が生じると予想されることから、このような特長を設計に反映させるには、条件の異なる施設で 1 年程度データを収集する必要があると考えている。

図 - 10 から、窒素負荷量が同レベルであれば、本法は A_2O 法よりも高い窒素除去率が得られた。言いかえると、同じ窒素除去率であれば A_2O 法施設より高い負荷で運転できる可能性が示唆された。なお、降雨時に窒素除去率が低下するのは、流入水の窒素濃度の著しい低下により、風量制御範囲の最低風量でも過剰な送風となり、好気タンク全体の DO が上昇することで、脱窒が阻害されるためであることを確認している。

本技術が A_2O 法施設より高負荷で同レベルの窒素除去率が達成できる理由としては、A_2O 法施設では無酸素タンクでの脱窒と好気タンクでの硝化がそれぞれ確実に完了するよう、各タンク容積に余裕が設けられている（大きく造られている）のに対し、本技術は先に述べたように好気タンク内を負荷の変動に応じて硝化ゾーンと脱窒可能ゾーンを自動的に拡大・縮小し硝化と脱窒を行うことから反応タンクの容積が効率よく使え、結果的に省容積ですむものと考えている。よって、最大窒素負荷流入時や冬期の低水温時には A_2O 法と同程度の処理性能であり、低負荷時や硝化速度・脱窒速度が速い高水温時にはより高い処理性能が発揮されることになる。

（3）反応タンク内の DO の分布と窒素の挙動

風量制御方法の違いによる脱窒状況の違いを比較するため、流入水および返送汚泥をほぼ同一運転条件とした同じ系列の 2 つの反応タンクを使用して、一方を DO 制御（B 回路と D 回路に設置した DO 計での個別の風量制御）、他方を本技術による風量制御としたうえで、好

気タンク内の DO 分布および窒素の挙動を比較した。

図 - 12、13 は、低負荷時の好気タンク（B～D 回路）の DO 分布である。DO 制御では、負荷の高いときにも硝化できるように DO の設定値を高めに決めているため、D 回路での DO 値が 4mg/L にまで上昇しており、D 回路では脱窒が望めない状態であった。（図 - 12）

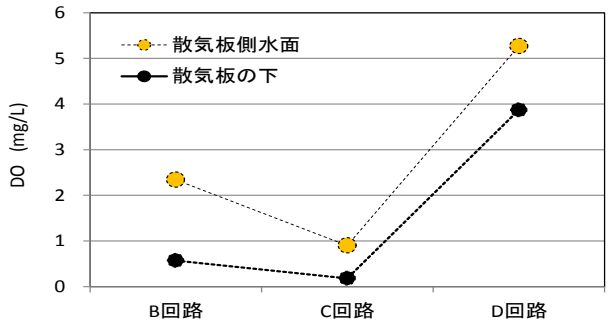


図 - 12　DO 制御（AO 法）での DO 分布（4）号槽）
（2013.3.11　9：00～9：20）

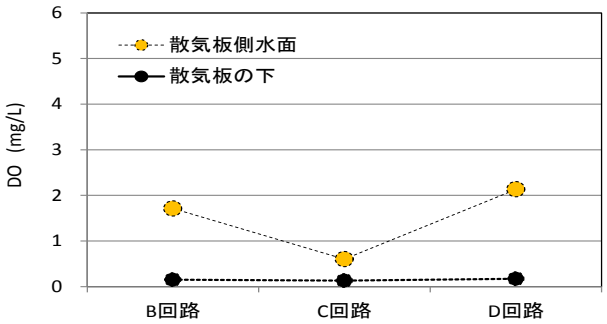


図 - 13　NO_x-N 計と NH_4-N 計を用いた制御（本技術）での DO 分布（5 号槽）
（2013.3.11　9：20～9：40）

一方、NO_x-N 計とアンモニア計により NH_4-N の負荷変動に合わせ風量制御を行った場合は、D 回路まで散気設備の下部に低 DO 状態が形成されていることが確認できた。（図 - 13）この DO 分布の違いが、好気タンク内での脱窒に影響し溶存態窒素濃度の挙動に大きな差を生んだと考えられる（図 - 14、15）。

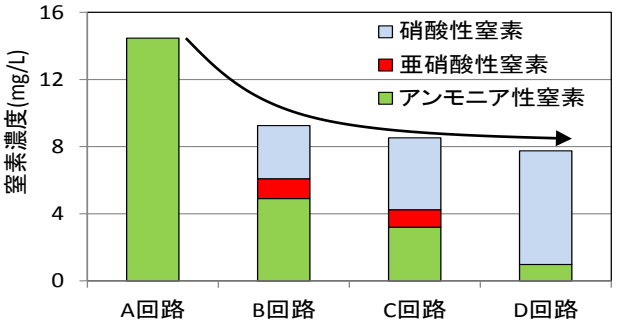


図 - 14　DO 制御（AO 法）での窒素の挙動

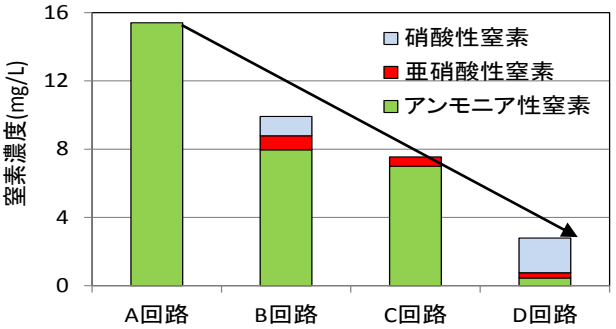


図 - 15　NOx-N 計と NH_4-N 計を用いた制御（本技術）での窒素の挙動

（4）電力使用量の削減効果

A_2O 法では、一般的に標準活性汚泥法に比べ処理水 $1m^3$ 当たりの電力使用量が 3 割ほど多くなり[5]、その大部分を無酸素タンクのかくはん機と硝化液循環設備の稼働に要する電力使用量が占めている。本技術では、これらの機器がないことでこの電力が確実に削減できる。また、窒素除去率の向上（脱窒の促進）に伴い、風量の削減が図れる。さらに、前項（3）で述べたように、NO_x-N 計とアンモニア計を用いて風量制御を行う本技術は、DO 制御に比べ風量に無駄が少なく効率的であり、これによる電力使用量の削減も期待できる。

共同研究での比較では、好気タンク前半の風量制御を B 回路の DO 計で、後半の風量制御を D 回路の DO 計で行った対照系列（DO 制御）に比べて、風量の平均で約 10%減、中でも本技術で窒素除去率が高くなる休日（低負荷時）に限定すると約 25%減となった。なお、電力使用量の削減効果は送風設備の性能によって変わることもあるが、最大で風量削減率と同

程度の削減効果が見込めると考えている。

これらの理由から、本技術は、A_2O 法等の高度処理はもとより、硝化促進運転の標準活性汚泥法よりも少ない電力使用量で高度処理を行える、水質改善と省エネルギー化が両立する技術といえる。

（5）りん除去への影響

窒素とりんの同時除去は、各々の処理原理から最適な運転方法が相反し、その運転に苦慮することがある。本技術においても窒素除去率が 9 割程度にまで上がると、処理水の全りん濃度が高くなる現象がみられた（日平均りん濃度で 1.2～1.5mg/L）。このとき、反応タンク出口では PO_4-P が不検出で、処理水の NO_x-N 濃度が 1mg/L 前後であったことから、最終沈殿池において活性汚泥が沈降する過程で、汚泥周辺の NO_x-N が脱窒により消滅し嫌気状態が形成され、PO_4-P が溶出したと考えている。この対策として、アンモニア計の設定値を 2.5mg/L から 1.8mg/L に下げ､好気タンク後半の風量を増すことで脱窒を少し抑制し NO_x-N の残存量を少し高く（NO_x-N で 2～4mg/L 程度と）した。この措置により､処理水中の PO_4-P 濃度を安定させることができ、かつ、窒素除去率 8 割程度を確保できた。

5. まとめと今後の予定

ここまで述べてきたとおり、深槽式の好気タンクの前半を NO_x-N 計で、後半をアンモニア計で個別に風量制御することにより、好気タンク内での脱窒を促進する「同時硝化脱窒処理」が可能であることを確認した。さらに、本技術が反応タンクへの窒素負荷量が少なくなるほど窒素除去率は高くなる特徴を持ち、一定レベル以下の窒素負荷量（今回の実験条件では反応タンク 1 m^3 当たりの窒素の負荷で 0.09kg/m^3/日。HRT に換算した場合、10 時間程度以上を確保できる負荷量）であれば A_2O 法以上の窒素除去率が得られること、言いかえると、A_2O 法に対しより高い窒素負荷量で同等の除去率を得ることが可能であり、A_2O 法より処理能力が高い技術であることを示すことができた。

また、好気タンク内で硝化と脱窒を行うことで、A_2O 法に必要な無酸素タンクとそれに付随するかくはん機や硝化液循環設備を不要としたこと、前述のように脱窒量を増加（窒素除去率を向上）させ風量を削減したこと、さらに、NO_x-N 計とアンモニア計を用いて風量を制御し送風量の無駄をなくしたことにより、本技術は、A_2O 法はもとより硝化促進運転の標準活性汚泥法（DO 制御）よりも単位処理水量あたりの電力使用量が少ない省エネルギー型の高度処理技術であることを示した。加えて、本技術には、既存施設を高度処理施設化する場合、A_2O 法に改造するよりも小規模な改造で済むという経済的なメリットもある。

そこで、今後は次のような手順によって、本技術を水質改善と省エネルギー化の両立を可能にする新たな高度処理法として、国が示す運用通知への位置づけを目指していく予定である。

ア）長期の連続運転による処理性能の確認

芝浦水再生センターを含む都の 3 つの下水処理場に先行的に導入し、流入水質や反応タンクの形状等が異なる条件で長期の連続運転によって処理性能を確認する。

イ）設計・維持管理マニュアルの作成

上記の 3 か所のデータをもとに、新たな高度処理法としての設計マニュアルと維持管理マニュアルを作成する。

参考文献

1)「下水道施設計画・設計指針と解説（2009 年版)」(社)日本下水道協会　p.177-181（硝化内生脱窒法）

2）岸野俊明、葛西孝司:「好気槽における脱窒促進運転について」　東京都下水道局技術調査年報 2012　p.133-143

3)「下水試験方法（2012 年版)」(社)日本下水道協会　p.706-710

4）高橋 宏幸、草野 吏、古屋 勇治：「曝気空気量制御における高度制御技術の適用とその効果の検証」第49回下水道研究発表会講演集　公益社団法人日本下水道協会　p.1108－1110

5）葛西孝司、池田広数、渡瀬誠司、松下勝一：「制限曝気 A_2O 法による水質改善効果および処理コストの比較」　東京都下水道局技術調査年報 2010　p.139-150

2-2-4 北多摩二号水再生センターにおける NH_4-N+DO 制御について

流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター 水質管理係
和光一紀 伊部一星 ○小泉僚平 塩見浩

1. はじめに

流域下水道本部の各水再生センターでは、二軸管理に代表されるよう、水質改善と省エネルギーの両立を目指した取組を行っている[1),2)]。当センターでは、処理方法ごとの水質改善効果、および送風量制御方法等について調査・研究を進めている。その中で今回、NH_4-N+DO 制御についての一定の知見が得られたことから本稿にて報告する。

当センターの制限曝気 A_2O 法施設(3 系反応槽)は、各回路の送風量を個別に制御可能であることに加え、それぞれについて制御方法を DO 制御と NH_4-N 制御から選択できる。このため、好気槽上流部を NH_4-N 制御、下流部を DO 制御とする NH_4-N+DO 制御が可能である。NH_4-N+DO 制御の局内先行事例としては小菅水再生センターがあり、処理水質の安定化、送風量の低減等の効果が報告されている[3)]。今回提案する制御方法は補正等の複雑なプログラムを必要としない点で小菅水再生センターと異なるが、NH_4-N 制御と DO 制御の組合せにより、送風量の無駄を省きつつ、安定した処理水質が得られると期待できる。このことから、当処理方法を送風量や処理性の観点から他の処理方法と比較し、効果や課題を整理した。

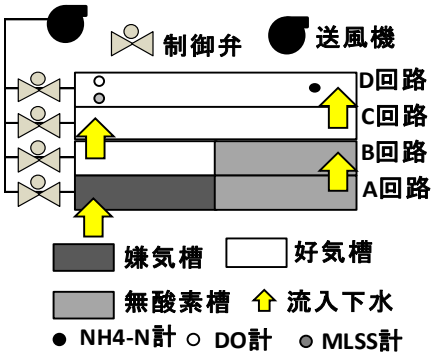


図 1 3 系反応槽の概要

表 1 各回路の最大送風量・制御方法

回路	散気板(枚)	最大送風量 (Nm^3/h)	制御方法
A	48	150 程度	固定風量
B	588	1,200	固定風量/DO/NH_4-N
C	1,128	2,400	固定風量/DO/NH_4-N
D	1,128	2,400	固定風量/DO/NH_4-N

2. 3 系反応槽の概要

2.1 処理方式・計装設備の概要

当センターの 3 系反応槽の平面図を図 1 に示す。当反応槽では、散気板の枚数を減らし、空気撹拌により疑似嫌気・無酸素状態を形成する制限曝気 A_2O 法を採用している。A 回路前段～中段が疑似嫌気槽、A 回路中段～B 回路中段が疑似無酸素槽、それ以降が好気槽となっており、計装設備として、MLSS 計と DO 計が D 回路末端に、NH_4-N 計が D 回路上流部に設置されている。A・B・C・D 各回路の送風管に制御弁が付いていることから、監視室からの送風量自動制御が可能で、それぞれ固定風量・NH_4-N 制御・DO 制御を選択可能である。また、散気板の枚数が異なることから、最大送風量は、A 回路で 150Nm^3/h、B 回路で 1,200Nm^3/h、C・D 回路で 2,400Nm^3/h と各回路で異なっている(表 1)。

2.2 送風量制御方法

3 系反応槽の送風量制御方法は、DO 制御、NH_4-N 制御、NH_4-N+DO 制御から選択可能とな

っている。以下、それぞれについて特徴を述べる。

① DO 制御

処理状況に応じて D 回路末端の DO 値が変動するのを、全体の送風量を増減させて設定値に保つ制御方法である。水質変動への送風量の応答性が低いことから、流入水質の変動が大きい場合には処理水質の悪化や、過剰送風を招くなどの課題がある。

② NH_4-N 制御

処理状況に応じて NH_4-N 計指示値が変動するのを、全体の送風量を増減させて設定値に保つ制御方法である。処理水 NH_4-N 濃度をおおむね一定に制御できるため、流入水質の変動に伴う過剰送風や水質悪化を抑制できる。一方で、送風量変動への NH_4-N 計指示値の応答時間が長いため、制御の追従性が低下することから、処理水 NH_4-N 濃度が目標濃度を中央値として振動する。このため、振幅の大きさによっては、一時的な処理水質の悪化等を招くことがある。

③ NH_4-N+DO 制御

当センターの NH_4-N+DO 制御は、各回路の送風量が個別に自動制御可能なことを強みとし、B・C 回路は D 回路上流部の NH_4-N 濃度(図 2 の D1 地点)を、D 回路は D 回路末端の DO 値(図 2 の D2 地点)を一定に制御するよう送風量を増減する。流入水質の変動に B・C 回路の NH_4-N 制御で対応することで、D 回路を DO 制御としつつも、過剰送風と水質悪化を抑制できる。また、制御計器から離れた位置にある B 回路の NH_4-N 設定値を、C 回路よりも高めに設定することで、負荷が高い時間帯にのみ送風量が増加する補助的回路とできる。このようにすることで、B・C 回路の合計送風量の変動を抑制し、D1 地点の NH_4-N 濃度をより安定的に制御できると考えられる。

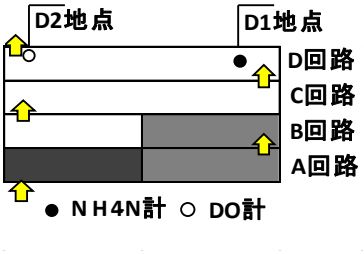


図 2　3 系反応槽の計器位置・採水地点

3.　各制御方法の比較

DO 制御と NH_4-N 制御の比較は、当センターで平成 22 年度に行っており、省エネルギーの観点から NH_4-N 制御が優れるとの結論を得ている。ここでは、NH_4-N+DO 制御を DO 制御及び NH_4-N 制御と比較した結果を述べる。なお、DO 制御では図 2 中 D2 地点の DO 計の指示値、NH_4-N 制御では D1 地点の NH_4-N 計の指示値が、一定の値(設定値)になるよう各回路の送風量を制御した。

表 2 調査条件

((a)DO 制御と(b)NH4-N+DO 制御の比較)

	(a)	(b)
期間	3/11 14:00～3/12 5:00	3/26 14:00～3/27 5:00
制御方法(設定値)	B～D：DO 制御(1.5mg/L)	B：NH_4-N 制御(7.5mg/L) C：NH_4-N 制御(6.0mg/L) D：DO 制御(1.0mg/L)
NH_4-N 目標値	---	好気槽出口で 2.0mg/L

3.1　DO 制御と NH_4-N+DO 制御の比較

最初に、DO 制御と NH_4-N+DO 制御を比較した結果を示す。本調査は、平成 26 年 3 月に実施した。調査条件を表 2 にまとめる。ここで(a)が DO 制御、(b)が NH_4-N+DO 制御である。なお、NH_4-N+DO 制御では、B 回路

の NH_4-N 設定値を C 回路よりも高めに設定し、負荷が高い時間帯に B 回路の送風量を増量するようにしている。

図 2 に採水地点と計器の位置を、図 3 に(a)及び(b)の期間中送風量を、図 4 に D1、D2 地点の NH_4-N 濃度を示す。なお、送風量は時間平均値、NH_4-N 濃度は毎正時の測定値である。

(a)について、当該期間 DO 設定値は 1.5mg/L と低水温期としては低めだったが、B 回路は全期間で最大送風量、C・D 回路では 1,500Nm^3/h～2,300Nm^3/h で推移するなど、必要送風量が多かった。水質面では、好気槽出口の NH_4-N 濃度最大値が 1.3mg/L と低濃度で抑えられた一方、19:00～23:00 のように D 回路途中で硝化が終了したと思われる時間帯もあった。

(b)について、当該期間中は、D 回路の送風量は D2 地点の DO を一定に保つためほぼ全期間で最大送風量となっていた。一方、B 回路及び C 回路では D1 地点の NH_4-N 濃度の変動に合わせて送風量が増減しており、NH_4-N 濃度は D1 地点でおおむね 6.0mg/L、D2 地点で 1.0～3.0mg/L 程度で推移するなど、目標値を中央値として適切に制御できていた。

表 3 に、上記の両期間における反応槽流入水 NH_4-N 濃度、反応槽の合計送風量、処理水全窒素濃度をまとめた。流入 NH_4-N 濃度及び処理水全窒素濃度は測定誤差等を考慮すると両期間で(a)、(b)はほぼ同等と判断できた。その一方で、送風量については明確に(b)のほうが 1 割程度低かった。これは、NH_4-N+DO 制御では処理水 NH_4-N 濃度を目標値前後に制御できることから、DO 制御に見られた過剰送風が抑制されたためと考える。

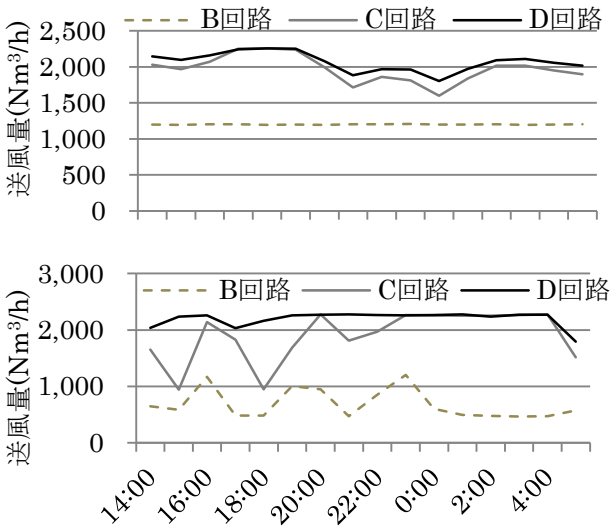


図 3 調査中の送風量(上：(a)、下：(b))

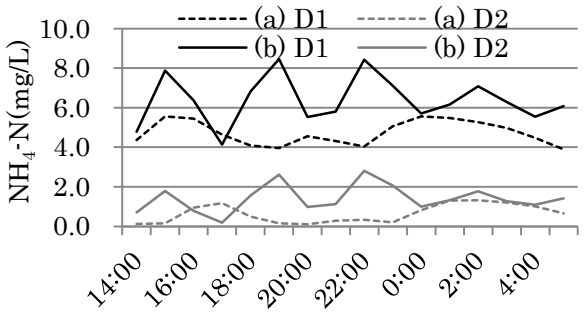


図 4 D1・D2 地点の NH_4-N 濃度

表 3 処理状況比較

	流入 NH_4-N 平均値(mg/L)	送風量 (Nm^3/h)	処理水量 (m^3/h)	処理水全窒素 平均値(mg/L)
(a)	22	5,240	884	8.3
(b)	20	4,780	883	8.7

表 4 調査条件

((C)NH_4-N 制御と(d)NH4-N+DO 制御の比較)

	(c)	(d)
期間	7/3 18:00～7/4 6:00	6/17 18:00～6/18 6:00
制御方法 (設定値)	B～D：NH_4-N 制御 (5.0mg/L)	B：NH_4-N 制御(7.5mg/L) C：NH_4-N 制御(6.0mg/L) D：DO 制御(1.0mg/L)
NH_4-N 目標値	好気槽出口で 2.0mg/L	

3.2 NH_4-N 計制御と NH_4-N+DO 制御の比較

次に、NH_4-N 制御と NH_4-N+DO 制御を比較した結果を示す。本調査は、平成 26 年 6、7 月に実施した。調査条件を表 4 にまとめる。ここで(c)が NH_4-N 制御、(d)が NH_4-N+DO 制御である。両制御とも、好気槽出口 NH_4-N 濃度を 2.0mg/L 程度とするような NH_4-N 設定値としている(設定値の導出に用いる反応槽流入水 NH_4-N 濃度を毎月変更しているため、C 回路の設定値が両者で異なっている)。

図 5 に調査中の送風量を示す。(c)では各回路でほぼ同様の変動傾向を示したのに対し、(d)では各回路で変動傾向が異なった。これは、上述のとおり(d)では各回路で制御方法や設定値を変えているためである。特に、(d)では、C 回路よりも高い設定値としていることで B 回路の送風量変動が抑えられていた。

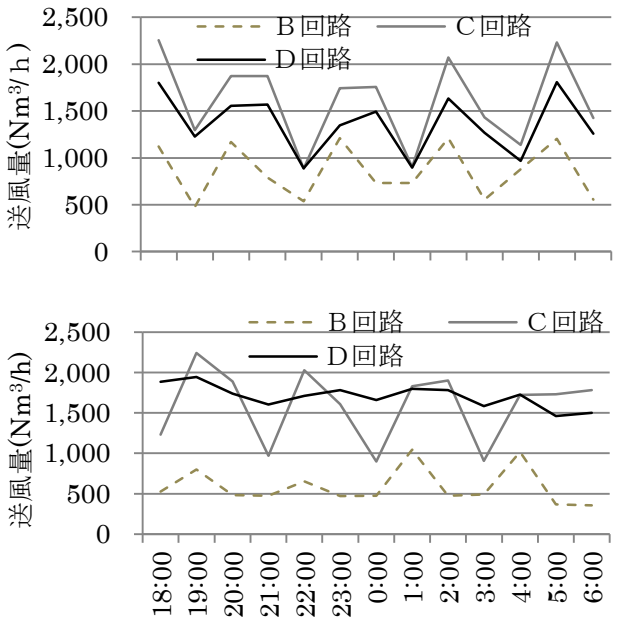


図 5　調査中の送風量(上：(c)、下：(d))

図 6 に D1・D2 地点の NH_4-N 濃度の変動を示す。(c)では B 回路と C 回路の合計送風量が大きく変動したことから、D1 地点における NH_4-N 濃度の変動が(d)に比べて大きくなった。この結果、D2 地点の NH_4-N 濃度が最大で 5.0mg/L 程度となるなど、(d)と比較して好気槽出口の水質が不安定であった。

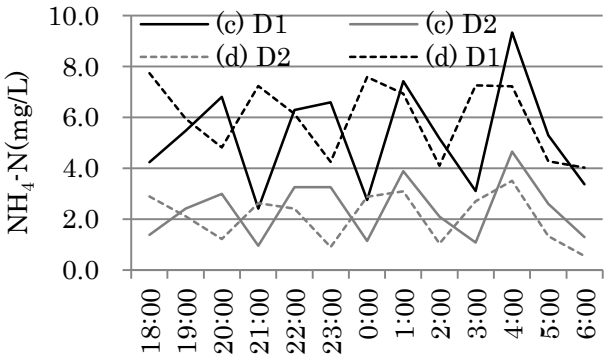


図 6　D1・D2 地点の NH_4-N 濃度

表 5 に、上記の両期間における反応槽流入水 NH_4-N 濃度、反応槽の合計送風量、処理水全窒素濃度をまとめた。流入 NH_4-N 濃度及び送風量は(c)と(d)で大きな差が無かった。このことから、NH_4-N 制御と NH_4-N+DO 制御は、送風量についてほぼ同等と評価できる。一方、水質的には処理水 NH_4-N 濃度の安定性等の観点で NH_4-N+DO 制御が優れると考える。

表 5　処理状況比較

	流入 NH_4-N 平均値(mg/L)	送風量 (Nm^3/h)	処理水量 (m^3/h)	処理水全窒素 平均値(mg/L)
(c)	15	3,830	1,200	9.6
(d)	15	3,890	1,180	8.8

4.　硝化脱窒同時処理の検討

これまでの結果をまとめると、各制御方法について、おおむね表 6 のように評価できると考える。このように、当センターの制限曝気 A_2O 法施設においては、水質・送風量の観点から総合的に NH_4-N+DO 制御が最適と考える。ただし、NH_4-N 制御においても、B 回路の設定値や NH_4-N 計の設置位置等を検討することで安定した水質を得られ

表 6　制御方法の評価

制御方法	水質	送風量
DO	○	△
NH_4-N	△	○
NH_4-N+DO	**○**	**○**

る可能性がある。この点は、今後、各制御方法をより深く追及していく過程での検討課題となってくると考える。

ここで、当制御方法では、NH_4-N 設定値と DO 設定値の組合せ次第で、B・C 回路で硝化を抑え、D 回路で硝化を促進する運転が可能である。これにより、B・C 回路での硝化・脱窒の同時進行[4),5)]が期待でき、硝化液循環を用いずともある程度の窒素低減が可能となると考えられる。既報論文等によると、好気槽での硝化・脱窒は、有効水深が大きいほど[4)]、散気板下部領域が広いほど[5)]、進みやすいとされる。3 系反応槽は有効水深が 7.5m、散気板設置位置が水深 4.5m であることから、構造面で好気槽での硝化脱窒同時処理に適すると考えられる。このため、送風方法の工夫により一定の効果が得られると考え、検証調査を行った。

調査は平成 26 年 8 月 5 日 16:00～6 日 8:00 に、3 系反応槽施設の好気槽入口・C 回路出口・D 回路出口で 1 時間ごと採水・分析し、好気槽での硝化脱窒の同時進行について評価した。調査期間中、表 7 に示すように、処理能力におおむね等しい 1,030m^3/h を処理し、硝化液循環は実施しなかった。MLSS は、硝化脱窒同時進行に有利となるよう、余剰汚泥引抜量等を調整して 2,400mg/L まで上昇させた(通常時は 2,000mg/L 程度)。C 回路 NH_4-N 設定値を 7.5mg/L とし、好気槽上流部での硝化を抑える一方、D 回路の DO 設定値を 1.5mg/L とやや高めとし、D 回路で硝化を促進することとした。調査の結果得られた各地点での NH_4-N 濃度および送風量についての時間平均値を、処理水量から計算した好気時間に対してプロットしたものを図 7 に、無機窒素の時間平均値を図 8 に示す。

表 7 調査条件(H26/8/5 16:00～8/6 8:00)

処理水量 (m^3/h)	返送汚泥 (m^3/h)	硝化液 (m^3/h)	MLSS (mg/L)	NH_4-N 設定値 B /C 回路 (mg/L)	DO 設定値 D 回路 (mg/L)
1,030	258	0	2,400	9.0／7.5	1.5

図 7 に見られるように B～C 回路では硝化を抑えつつ、D 回路で硝化を促進することで、最終的に 1.0mg/L 程度まで NH_4-N 濃度を低減できた。また、図 8 より、B～C 回路にかけて好気槽流入水比 15%程度に相当する 2.2mg/L の無機窒素を低減できており、好気槽内での硝化・脱窒の同時進行が確認できた。なお、今回は C 回路の NH_4-N 設定値を 7.5mg/L としたが、この値を精査することで、窒素低減効果を高めることが可能と考えられる。これについては今後の検討課題である。

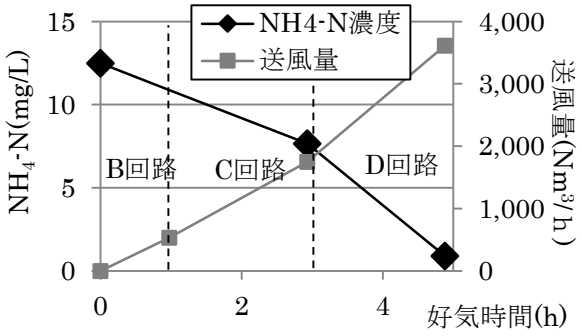


図 7 好気時間と NH_4-N 濃度・送風量

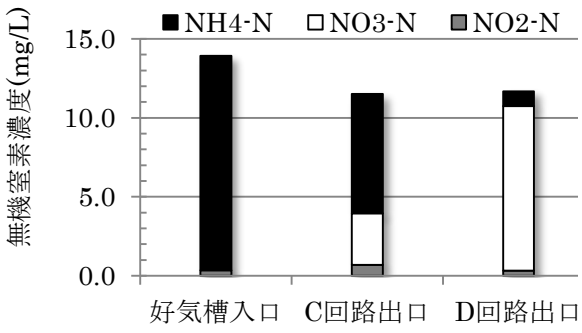


図 8 好気槽各地点の無機窒素濃度

5. まとめ

調査結果から、好気槽各回路を個別に

制御する当センター独自の NH_4-N+DO 制御について、以下の知見が得られた。

(1) NH_4-N+DO 制御は、DO 制御と比べて処理水質はほぼ同等であったものの、送風量では 10%程度抑えられた。

(2) NH_4-N+DO 制御は、NH_4-N 制御と比べて送風量はほぼ同等であったものの、処理水 NH_4-N 濃度の変動が抑制されており、水質的な安定性が高かった。

(3) B～C 回路で硝化を抑え、D 回路で硝化を促進するような設定値とすることで、好気槽上流部で硝化・脱窒を同時に進行させつつ、処理水 NH_4-N 濃度を良好に保てることが分かった。

(4) 上述のように好気槽で硝化と脱窒を同時進行させた結果、硝化液循環ポンプによらず15%程度の窒素低減が可能であった。

当制御方法は、送風管ごとに制御弁が設置されているセンターであれば、NH_4-N 制御の導入のみで適用可能である。制御方法や設定値の組合せが多岐にわたることから、さまざまな流入水質特性に合わせた制御が可能であり、汎用性が高いと考える。現在、二軸管理の推進に代表されるように、処理水質を維持しつつ電力量を削減していくことが局の重要課題となっており、NH_4-N+DO 制御は今後も技術的に追及していく価値のある制御方法であると考える。

参考文献

1) 東京都下水道局　島田 誠一ほか：二軸管理手法を用いた電力削減に向けた新たな取り組み,平成 26 年度下水道研究発表会,

2) 岩井 毅大ほか：北多摩二号水再生センターにおける二軸管理の取組について（事例報告），東京都下水道局 技術調査年報 2014,

3) 遠藤 和広ほか：アンモニア計と DO 計を用いた送風量制御システムの開発，東京都下水道局 技術調査年報 2009

4) 岸野俊明ほか：好気槽における脱窒促進運転について，東京都下水道局 技術調査年報 2012

5) 高瀬直樹：高度処理施設における微好気タンクの影響調査,第 50 回下水道研究発表会論文集，p.829-831

2-2-5 処理性能と省エネルギー両立のためのステップA_2O法の処理条件

流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター 水質管理係
○和光一紀 伊部一星 小泉僚平 塩見浩

1 はじめに

ステップ A_2O 法は、嫌気無酸素好気法を発展させ、さらに窒素・りん除去率の向上が見込める当局が開発した処理方法である[(1)]。好気槽の中間に無酸素槽を設け、同槽に下水をステップ流入させることで、効率的に脱窒を行うことができる。また、小さい硝化液循環ポンプで高い窒素除去率が得られるため、嫌気無酸素好気法と比べて使用エネルギーが少ない利点がある。

また、当処理法は、前段ステップ流入比や第一・第二好気槽の硝化量など、嫌気無酸素好気法等と比べて制御項目が多い。処理プロセスを考慮すると、これらは処理性能や必要送風量に影響を与えると考えられるが、この点に関する調査・研究は局内的に進んでいない実態がある。

このような中、当センターでは NH_4-N 一定制御が可能であることの強みを生かし、前段ステップ流入比及び各好気槽硝化量が処理性能・送風量に与える影響に関する調査を平成 24 年度から継続している。平成 25 年度以降の取組で、①嫌気槽 BOD-SS 負荷とりんの除去性能との関係や、②第一好気槽の硝化量と必要送風量との関係等に関する新たな知見が得られた。本稿では、これらを中心に、処理性能と省エネルギーの両立のための処理条件について検討した結果を報告する。

2 ステップ A_2O 法の概要

ステップ A_2O 法は、図 1 に示すように、嫌気槽、第一無酸素槽、第一好気槽、第二無酸素槽、第二好気槽からなり、第一沈殿池流出水は、嫌気槽のほか第二無酸素槽にもステップ流入する。全体に占める嫌気槽への流入下水量の割合を前段ステップ流入比(以下、ステップ比)と定義し、通常 0.5～1.0 で制御する。

処理性能面では、第一好気槽で生成した NOx-N を第二無酸素槽で脱窒することで高い窒素除去率を安定的に得られる。一方、りん処理については、降雨後や処理水量低下時等に不安定になりやすいとの報告がある[(2)]ように、当処理方法の課題となっている。しかしながら、この点

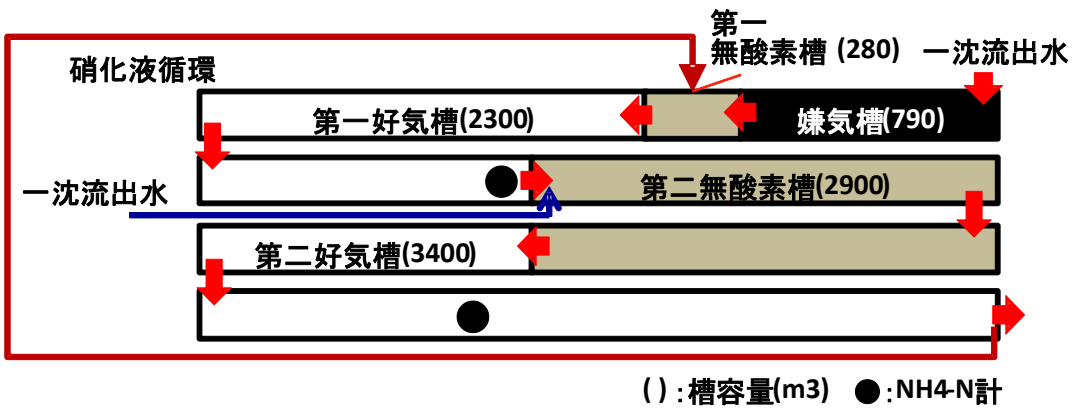


図 1 ステップ A_2O 法施設平面図

を解決することで、当処理方法は嫌気無酸素好気法等と同等以上の処理水質を少ないエネルギーで確保できる理想的な処理法となり得る。

3 りん処理とステップ比

3.1 嫌気槽 BOD-SS 比と処理水全りん濃度

上述のように、ステップ A_2O 法は、りん処理に課題がある。しかしながら、処理プロセスを考慮すると、有機物が十分に嫌気槽に供給されれば、嫌気無酸素好気法と同等のりんの除去性能が得られると考えられる。このため、嫌気槽での BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度を評価指標としてステップ A_2O 法のりんの除去性能を検証した。

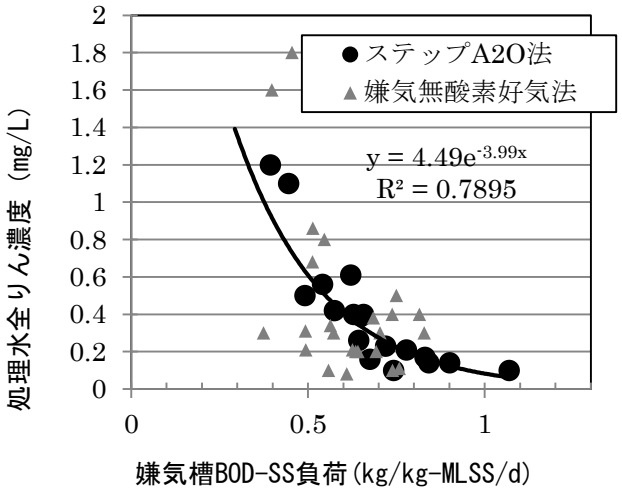


図 2 BOD-SS 負荷と全りん濃度の関係

図 2 は、ステップ A_2O 法と嫌気無酸素好気法の嫌気槽での BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度との関係を示したものである。ステップ A_2O 法は平成 25 年 1 月～26 年 3 月まで、嫌気無酸素好気法は平成 23 年 8 月から平成 26 年 3 月までの、月一回測定した 1 日平均 BOD を用いてその時の処理状況から BOD-SS 負荷を計算した。ここでデータ採取期間が両処理法で異なるのは、施設の稼働時期の違いによる（ステップ A_2O 法施設は平成 24 年度稼働開始）。

図 2 より、ステップ A_2O 法と嫌気無酸素好気法ともに、BOD-SS 負荷が 0.6kg/kg-MLSS/d を下回ると急激に処理水全りん濃度が上昇する傾向が見られた。ステップ A_2O 法は、流入下水 BOD 濃度低下時にもりんの除去性能が比較的安定するとの報告[(3)]があるが、データ数が少なく同図から明確には判断できない。いずれにせよ、嫌気槽での BOD-SS 負荷を高く維持すれば、当処理法においても嫌気無酸素好気法と同等のりんの除去性能が得られると考える。

3.2 ステップ比と処理水全りん濃度

ステップ A_2O 法ではステップ比により嫌気槽の MLSS や流入下水量が変動し、それに伴い同槽での BOD-SS 負荷が変化する。図 3 は、図 2 より得られるステップ A_2O 法における嫌気槽 BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度の関係式から、平時の処理状況（処理水量 1,000m^3/h、反応槽末端 MLSS 2,000mg/L）における流入下水 BOD 濃度と処理水全りん濃度日平均値の関係を、ステップ比ごとまとめたものである。図 3 では、ステップ比が

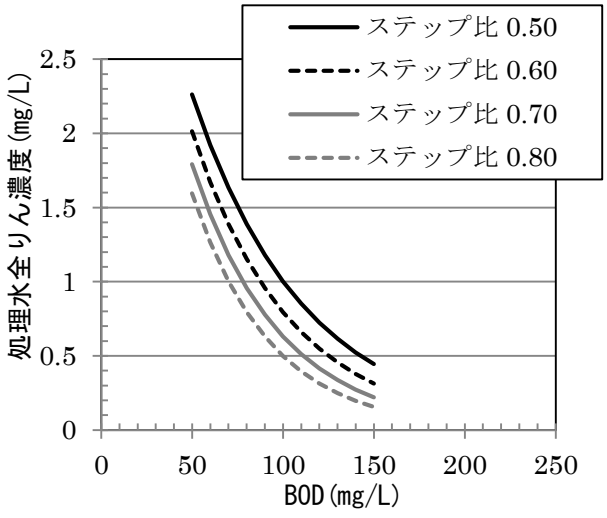


図 3 BOD と全りん濃度の関係

高くなるにつれ全りん-BOD 曲線が全りん低濃度側にシフトしている。これより、ステップ比が高いほど流入下水 BOD 濃度低下時においても全りん濃度が低く抑えられると考えられる。このことは、ステップ A_2O 法におけるりんの除去性能に関する既報の論文[4]と結論が一致する。ただし、ステップ比が 1.0 に近づくと嫌気硝化脱窒法(AOAO 法)となり、逆にりん処理が不安定になると考えられる[5]ことから、りん処理を安定的に行うためのステップ比については、今後も検討を継続する必要がある。

3.3 水量急増時への対応

ステップ A_2O 法の反応槽は、隔壁の数が多いことから、内部の流動が完全混合+押出流れとなっていると考えられる[6]。このため、水量変動に対する緩衝作用が弱く、水量急増時には処理水全りん濃度が一時的に高濃度となる危険性が高まる。合流式下水道の場合、降雨時等には短時間で大量の下水を処理する必要があることから、水量急増時にも安定的にりん処理を行うための運転方法の確立が課題となる。

図 4 は反応槽内 PO_4-P 濃度の状況把握を目的に行った調査結果である。図より、ステップ比 0.75 では第二無酸素槽での PO_4-P 吐出しが抑えられており、第二好気槽入口の PO_4-P 濃度が約 3.0mg/L と低い。このため、ステップ比 0.75 においては、ステップ流入下水量が急増し、第二好気槽での HRT が急激に低下した場合にも、りん処理に大きな影響は出ないと考えられる。そこで、降雨時等におけるりん処理安定化の観点から、流入下水量の増加時にステップ流入下水量のみを増加させる運転を検討した。図 5 は、おおむねステップ比 0.75 一定制御、図 6 はステップ比 0.75 時に表 1 に従い流

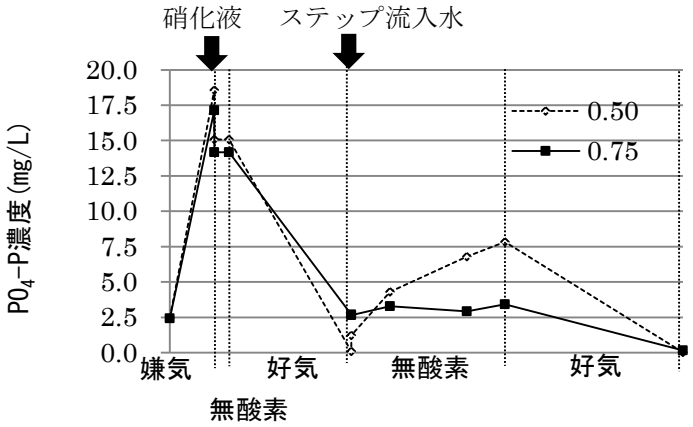


図 4 反応槽でのりん処理状況
(H24 年 11～12 月調査結果)

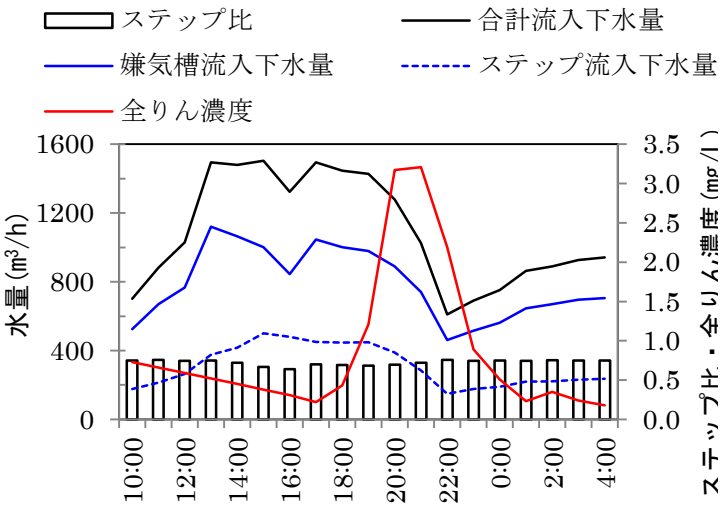


図 5 処理水量と全りん濃度(H24/11/26～11/27)

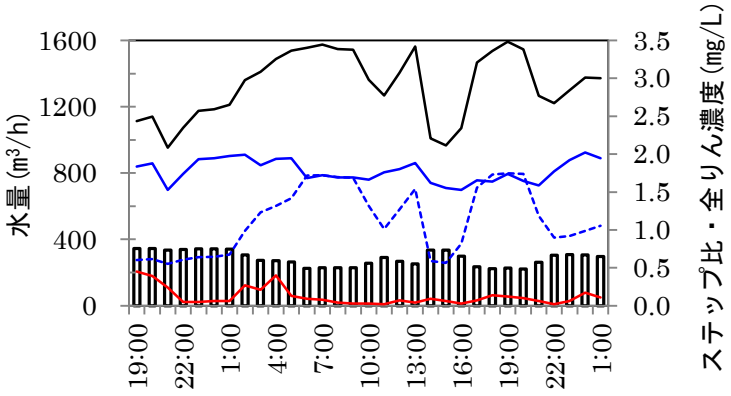


図 6 処理水量と全りん濃度(H25/9/24～9/25)

入下水量の増加に伴ってステップ比を調整した時の処理水全りん濃度の経時変化である。図 5 では反応槽への流入下水量とともに嫌気槽流入下水量が増加し、その後しばらくして処理水全りん濃度が急上昇した。一方、ステップ比の調整により、嫌気槽への流入下水量を一定に保ちつつステップ流入下水量のみを増減させた図 6 では、9/25 1:00 から流入下水量が急増したものの、その後の全りん濃度の上昇は見られなかった。このように、通常時に高ステップ比で運転しつつ、水量に合わせてステップ比を調整することで、水量急増時にも安定的なりん処理が可能となる。

表 1　流入水量とステップ比

流入下水量	ステップ比	嫌気槽流入下水量
1,200	0.60	720
1,300	0.60	780
1,400	0.60	840
1,500	0.55	825
1,600	0.50	800

4　窒素除去率と必要送風量

りん処理を安定的に行うために高ステップ比での運転が有効となることを述べた。以下では、処理性能を維持しつつ送風量を低減できるような運転条件を検討した結果について報告する。

4.1　第一好気槽 NH_4-N 設定値と送風量

一般に嫌気無酸素好気法では、処理水 NH_4-N 濃度が上昇すると窒素除去率が低下する。一方、ステップ A_2O 法での窒素除去率は式-1 で表わされ、第一好気槽出口 NH_4-N 濃度の影響を受ける一方、処理水 NH_4-N 濃度の影響は受けない。このため、当処理方法では、NH_4-N 制御を用いることで、処理水 NH_4-N 濃度を一定に保ちつつ窒素除去率を変動させることができる(7)。当センターでは、図 7 に示すように NH_4-N 計を設置して第一好気槽と第二好気槽において NH_4-N 一定制御を行っている。ここで、窒素除去率に合わせて送風量が変動する場合、流入下水の季節的な水質変化等、処理状況に応じ、処理水質を良好に維持しながらも送風量を削減できると考えられる。

そこで、処理水 NH_4-N 濃度を一定に保ちつつ窒素除去率が変動するよう、各好気槽の NH_4-N 設定値を変更して運転を行い、送風量の変化を検証した。図 8 はステップ比および第一好気槽 NH_4-N 設定値を変更しつつ運転し、処理水量あたり送風量を比較したものである。具体的には

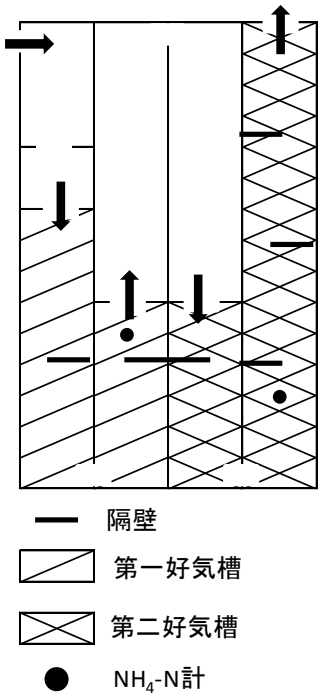


図 7　好気槽平面図

$$E_N = \frac{(1-k)\times(\alpha+R_r+R_n)}{1+R_r+R_n} \quad \cdots \text{式-1}$$

$$k = \frac{NH4_{o1}}{NH4_{in}}$$

E_N：無機窒素除去率　α：ステップ比
R_r：硝化液循環比　R_n：汚泥返送比
$NH4_{\mathrm{in}}$：反応槽流入下水NH_4-N濃度
$NH4_{o1}$：第一好気槽出口NH_4-N濃度

第一好気槽の NH_4-N 設定値を、ステップ比 0.75 では 5.0mg/L と 6.5mg/L、ステップ比 0.80 では 7.5mg/L と 9.0mg/L とし、各条件で 1 週間程度連続運転して比較した。なお、処理状況の比較のため、処理水量や汚泥返送量、処理水 NH_4-N 濃度、処理水全りん・全窒素濃度について、期間の平均値を表 2 に示した。図 8 より、ステップ比 0.75、0.80 ともに第一好気槽 NH_4-N 設定値を高くすることで必要送風量が低下した。一方、処理水質については、全窒素濃度が上昇したものの、NH_4-N 濃度や全りん濃度はおおむね一定であった(表 2)。このように、NH_4-N 設定値を高く設定して第一好気槽の硝化を抑制することで、窒素除去率が低下する一方で、必要送風量は低減できると考えられる。

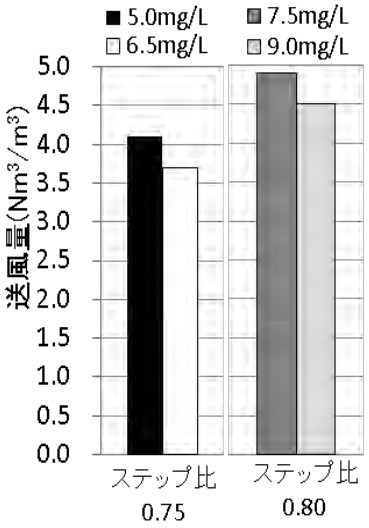


図 8　第一好気槽 NH_4-N 設定値と送風量

表 2　各条件の処理状況

ステップ比	処理水量 (m³/h)	流入下水水温(℃)	NH_4-N(mg/L)		送風量(Nm³/h)		全りん (mg/L)	全窒素 (mg/L)
			第一好気槽設定値	処理水※	第一好気槽	第二好気槽		
0.75	1,060	26.1	5.0	1.0	2,770	1,600	0.2	5.8
	1,020	27.2	6.5	0.4	2,100	1,720	0.2	6.6
0.80	980	22.3	7.5	1.4	2,892	1,941	0.3	7.5
	1,040	21.4	9.0	1.9	2,582	2,085	0.5	9.0

※第一・第二好気槽 NH_4-N 計計測値から算出

4.2　第一・第二好気槽での硝化特性

処理水 NH_4-N 濃度が一定にもかかわらず送風量が低下する要因について、第一・第二好気槽の硝化特性の点から考察した。図 9 はステップ比 0.75 と 0.80 時における、各好気槽での硝化量と送風量との関係性を示したものである。反応槽流入下水の水量や水質がおおむね一定となるように調査日を選定し、各時刻の NH_4-N 濃度と処理水量等から時間当たりの硝化量を算出した。図 9 より、ステップ比 0.75 と 0.80 ともに、各好気槽で硝化量と必要送風量に明確な関係性が見られるとともに、第一好気槽に比べて第二好気槽の方が近似直線の傾きが緩やかで、硝化量当たりの送風量が少ないこ

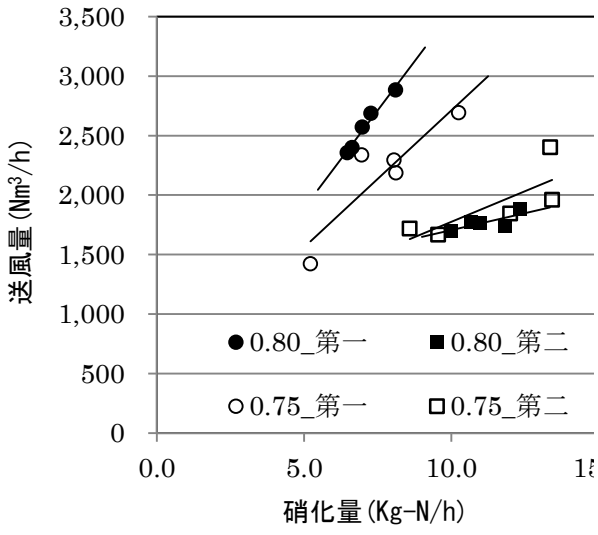


図 9　硝化量と送風量の関係

表 3　調査時の処理状況(n=6)

ステップ比	流入下水量(m^3/h)		硝化液循環量	汚泥返送量
	嫌気	ステップ	(m^3/h)	(m^3/h)
0.75	650	220	140	430

とが分かった。

この理由について、水質面と構造面から考察した。水質的要因として、好気槽入口での有機物濃度の違いが挙げられる。図 10、表 3 は、平成 25 年 5 月に調査した、第一無酸素槽入口から第二好気槽出口までの各槽における溶解性成分の紫外吸光度(E260)及びその時の処理状況である。なお、図 10、表 3 ともに、6 回調査した結果を回数平均したものを示している。ステップ A_2O 法では、硝化液循環ポンプが小さいことから、第一無酸素槽での脱窒量が少なく、同槽での有機物濃度の低減効果は小さい。一方、第二無酸素槽では、第一好気槽で生成した NOx-N を完全脱窒することから、有機物濃度の低減効果が大きい。図 10 に見られるように、今回行った調査でも、第一好気槽入口の E260 は 0.4 と、第一無酸素槽入口とほぼ同値であったが、第二好気槽入口の E260 は 0.2 と、第二無酸素槽入口と比較して 30%程度低い値となった。硝化菌は有機物濃度が低い環境で活発に活動する[8]ことから、この点が第二好気槽で硝化量当たり送風量が少ない一因と考える。

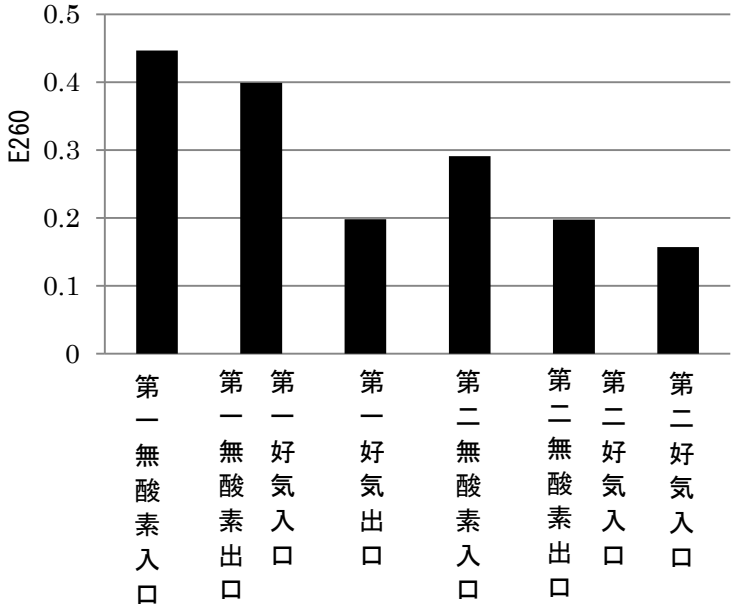


図 10　E260 測定結果(ステップ比 0.75)

構造面の理由としては、水流の強さによる総括酸素移動容量係数(KLa)の向上が挙げられる。なお、KLa は好気槽内での酸素供給能力を示す指標であり、KLa が高いほど単位時間当たりの酸素供給量が増加する。既報論文から槽内の流動状況は KLa に影響を及ぼすと考えられる[9]が、これは撹拌強度 G 値(式-2、式-3)と KLa の関係から説明できる。図 11 は、25℃の反応槽流入下水を、0.4L/min で曝気しつつ最大 550rpm まで徐々に回転速度を高めて撹拌し、各回転速度に対応する

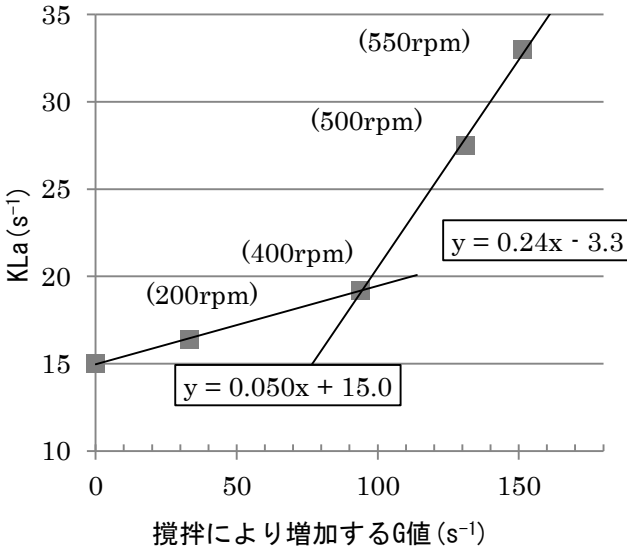


図 11　回転数・G 値と KLa の関係

KLa を測定した結果である。なお、実験結果をもとに実施設での現象を考察するため、回転速度は式-2 によりG値に変換している。同図に見られるように、KLaの初期値は15s^{-1}であったが、G 値とともに上昇し、最終的に33s^{-1}と初期値の2倍以上の値となった。また、両者の関係性はG値90s^{-1}を前後して2本の近似直線で表すことができ、G 値90s^{-1}以上では、G値が1s^{-1}上昇するごとに KLa が 0.24s^{-1}(KLa 初期値の 1.5%程度に相当)と大きく上昇するようになった。送風量と KLa の関係を調べた既報論文には、気泡が小さいほど送風量の増加に伴う KLa の上昇速度が大きくなることが報告されている[10]。本実験において、目視では、G値が 90s^{-1}(400rpm)を超えると、気泡の細分化が起きることを確認した。このことから、撹拌強度の増加に伴う KLa 上昇効果についても、気泡が小さいほど大きいと考えられる。

$$G = \sqrt{\frac{\rho C \sum_i (a_i v_i^3)}{2\mu V}}$$ (フラッシュミキサ式)・・式-2

$$G = \sqrt{\frac{\rho g Q h}{\mu V}}$$ (迂流式)・・・式-3

G：撹拌強度(s^{-1})　ρ ：水の密度(kg/m^3)
C：撹拌翼抵抗係数　a_i：撹拌翼面積(m^2)
v_i：撹拌翼速度(m/s)
μ ：水の粘性係数(kg/(m･s))　g：重力加速度(m/s)
Q：流量(m^3/s)　h：損失水頭(m^3)　V：槽容量(m^3)

表 4　各好気槽で水流により増加する G 値(ΔG)

	第一好気槽		第二好気槽
処理水量	1,000m^3/d		
循環率	返送：0.2 / 硝化液：0.14		
槽容量	2,320		3,370
隔壁	2		4
屈曲部	1		1
ΔG(s^{-1})	ステップ比		25.0
	0.75	0.80	
	14.5	15.6	

迂流式水路の場合、G 値は式-3 で定義されるように、水量と損失水頭の関数である[11]。このため、処理水量が多いほど、隔壁の数が多いほど、撹拌効果が強まる。隔壁の数や槽容量等の構造上の情報を基に、平均的な処理条件において各好気槽で水流により増加する G 値(ΔG)を計算した結果を表 4 に示す。表 4 より、第二好気槽のΔG は第一好気槽に比べて 10s^{-1}程度高かった。当反応槽では第一・第二好気槽とも、散気板の気孔径が小さく、生成する気泡が微細なことから、撹拌強度の増加による KLa 上昇効果は高いと考えられる。

4.3　第一好気槽 NH_4-N 設定値の範囲

これまでの結果から、第一好気槽の NH_4-N 設定値と処理水全窒素濃度及び送風量との関係は、第二好気槽で NH_4-N 制御を実施することを条件におおむね表 5 のように整理できる。実際の運用では、送風量と処理水質が目標を満足するよう、流入下水の水質に合わせて第一好気槽 NH_4-N 設定値を変動させる。このため、同槽における NH_4-N 設定値の至

表 5　第一好気槽 NH_4-N 設定値と送風量・処理水質

第一好気槽 NH_4-N 設定値	送風量	処理水質(mg/L)		
		NH_4-N	全窒素	全りん
高い	少ない	一定	高い	一定
低い	多い		低い	

適範囲を定量的に求めることが実務上の課題となる。

ここで、第一好気槽の NH_4-N 設定値を上げていくと、同槽での NOx-N 生成量が減少し、第二無酸素槽が嫌気槽と同様の機能を発揮するようになる。これによる弊害として、嫌気槽での BOD-SS 負荷の実質的な減少、第二無酸素槽での PO_4-P 吐出し等が考えられる。このため、第一好気槽 NH_4-N 設定値の上限は、これらの弊害を考慮し、費用対効果を見極めて判断する必要がある。これには長期にわたり高い NH_4-N 設定値で運用し、データ採取を行わなければならず、現時点では十分な結論が出せない。

表 6 調査条件

流入下水 NH_4-N	15mg/L
処理水量	1,200m^3/h
循環比 (返送/硝化液)	0.14/0.2
第一好気 NH_4-N 濃度(設定値/実測値)	7.0/7.3mg/L

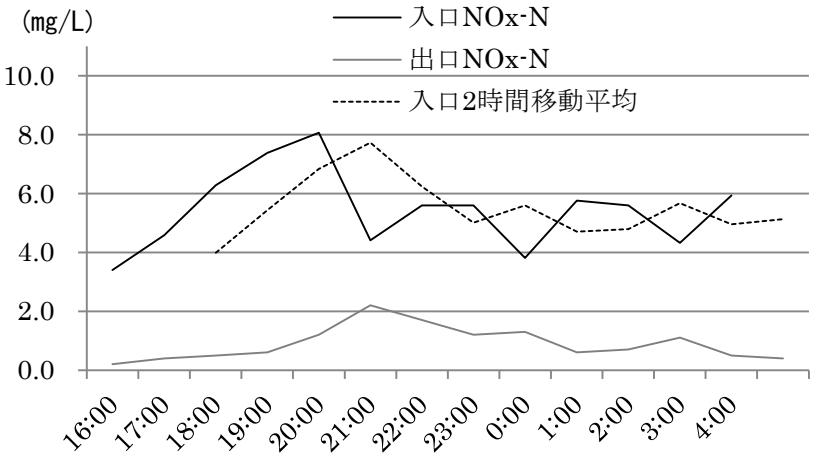


図 12 第二無酸素槽での脱窒状況

一方、第一好気槽の NH_4-N 設定値を下げていくと同槽での NOx-N 生成量が増加するが、第二無酸素槽の脱窒能力を超えて生成した NOx-N は、その後脱窒されることはない。このため、第一好気槽 NH_4-N 設定値の下限は第二無酸素槽の脱窒能力から定量的に求めることができる。

ステップ A_2O 法では、ステップ比により第二無酸素槽での脱窒能力が変化する[12]ことから、第一好気槽 NH_4-N 設定値の下限については、各ステップ比について評価する必要がある。ここでは、ステップ比 0.80 について調査した結果を述べる。

平成 26 年 6 月 17 日、16:00 から翌日 8:00 まで一時間ごと第二無酸素槽入口と出口の NOx-N 濃度を測定し、脱窒状況を調査した。調査条件を表 6 に、結果を図 12 に示す。図 12 より、19:00 から 20:00 にかけて第二無酸素槽入口の NOx-N 濃度が 7.0mg/L を上回ったことにより、同槽出口で最大 2.0mg/L 程度の NOx-N が残存した。ピーク濃度の比較で、同槽での NOx-N 低減濃度は最大 6.0mg/L 程度と推定された。

ステップ比 0.80、反応槽流入 NH_4-N 濃度 19mg/L(H25 平均値)、処理水量 1,000m^3/h(処理能力相当)時の、第一好気槽 NH_4-N 設定値とそれをもとに計算した第二無酸素槽入口 NOx-N 濃度推定値を表 7 に示す。同表では、NH_4-N 設定値が 7.0 を下回ると第二無酸素槽流入 NOx-N 濃度が 6.0mg/L を上回ることから、ステップ比 0.80 においては、第一好気槽 NH_4-N 設定値は 7.0mg/L を下限とするのが望ましいと考えられる。

表 7 NH_4-N 設定値と第二無酸素槽入口 NOx-N 濃度(mg/L)

設定値	第二無酸素入口 NOx-N
5.0	7.4
6.0	6.9
7.0	6.1
8.0	5.4
9.0	4.6
10	3.9

5 まとめ

調査の結果、ステップ A_2O 法では、高ステップ比での運転によってりんの除去性能を確保しつつ、処理状況に応じて第一好気槽の NH_4-N 設定値を変動させることで、除去性能を確保しつつ送風量を低減できることが分かった。本稿の結論を以下にまとめる。

(1) ステップ比を高くし、嫌気槽への BOD-SS 負荷を高めることで、ステップ A_2O 法でも良好なりんの除去性能が得られることが分かった。

(2) 高ステップ比で運転する場合、処理水量増加時にステップ流入水量のみを増加させることが可能であり、降雨時等の水量変動時におけるりん処理安定化に効果的であった。

(3) 第一好気槽 NH_4-N 濃度設定値を高くし、処理プロセスでの窒素除去率を下げることで処理水の全りんや NH_4-N 濃度を悪化させずに送風量を低減できることが分かった。

(4) 第二好気槽では第一好気槽に比べて硝化量当たり送風量が少ないが、これは有機物濃度や槽内の隔壁数等の相違によるものと考えられた。

6 今後の予定

文中で触れたが、ステップ比の選択や第一好気槽の NH_4-N 設定値等の処理条件によって、第二無酸素槽で PO_4-P の吐出しが起こる。吐出し量が多い場合、ステップ流入下水量の急増時に、処理水全りん濃度が悪化する危険性が高まる。さらに、第二無酸素槽が嫌気槽の機能を持つことによって嫌気槽が実質的に拡大し、平時のりん処理にも悪影響を与える可能性がある。

また、ステップ比を高くすると、当処理法は嫌気硝化脱窒法(AOAO 法)に近い処理特性を示すと考えられる。しかしながら、AOAO 法では降雨後等にりんの除去性能が悪化する傾向にあるとの報告があり[(5)]、ステップ比が高いほどりん処理に有利となるとした本稿の結論と矛盾する。これについて、AOAO 法で運用した実績が無いことから、十分な知見が得られていない。

上記事項は、ステップ比や第一好気槽の NH_4-N 設定値の至適範囲を定量的に求める上で、明らかにしていく必要があるステップ A_2O 法の課題である。このため、今後は第二無酸素槽での有機物・窒素・りんの挙動等、同槽の機能について詳細な調査が必要と考える。

また、当処理法では、各好気槽の NH_4-N 計指示値から処理水 NH_4-N 濃度を推定することができる。このため将来的には、第一好気槽の NH_4-N 濃度指示値から、処理水 NH_4-N 濃度を目標値とするための硝化速度を算出して第二好気槽の NH_4-N 設定値に反映する、硝化速度制御も可能と考える。今後、これに向けた基礎的調査についても、実施していきたいと考えている。

参考文献

(1) ステップ流入式嫌気－無酸素－好気法設計マニュアル（案），平成 14 年 3 月 ，東京都下水道局計画調整部
(2) 清瀬水再生センターのステップ A_2O 法について ，平成 21 年度水質管理研修,古澤和樹ほか
(3) ステップ流入による生物学的リン･窒素同時除去法の処理効率の改善について,下水道協会誌,Vol.23,No.266,1986, pp.16-26, 栗林 宗人ほか
(4) 実施設におけるステップ流入と嫌気好気法による脱窒,脱りんについて,下水道協会誌 Vol.31,No.368,1994/4,p.16-22 ， 渡辺浩基
(5) 嫌気・無酸素・好気法と嫌気・硝化脱窒法との処理状況比較について,第 47 回下水道研究発表会講演集,2010,pp.170-172,坂本俊彦ほか
(6) 北多摩二号水再生センターにおける反応槽流動シミュレーションを用いた新規施設の立上げ（事例報告）,平成 24 年度水質技術研究発表会, 和光一紀ほか
(7) ステップ A_2O 法の処理特性及び NH_4-N 制御の有効性について,平成 25 年度水質技術研究発表会, 和光一紀ほか
(8) 活性汚泥法において有機物負荷が硝化速度に及ぼす影響, 環境技術 Vol. 27(1998) No. 4, pp.282-288, 長坂實上ほか
(9) 水中プロペラ撹拌式オキシデーションディッチの酸素移動現象に関するシミュレーション,NKK 技報 NO.177, pp.21-28,岡本幸彦ほか
(10) 単一オリフィスにより生じる気泡の性状と酸素移動に関する一考察,土木学会論文報告集,第 175 号,pp.49-57,松本順一郎
(11) 水道施設設計指針 2012, 社団法人日本水道協会
(12) ステップフィード嫌気好気活性汚泥法の最適ステップ率と槽容量配分に関する実験および理論解析,環境工学論文集,Vol.35, pp.367-377,藤井滋穂ほか

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A_2O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A_2O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。

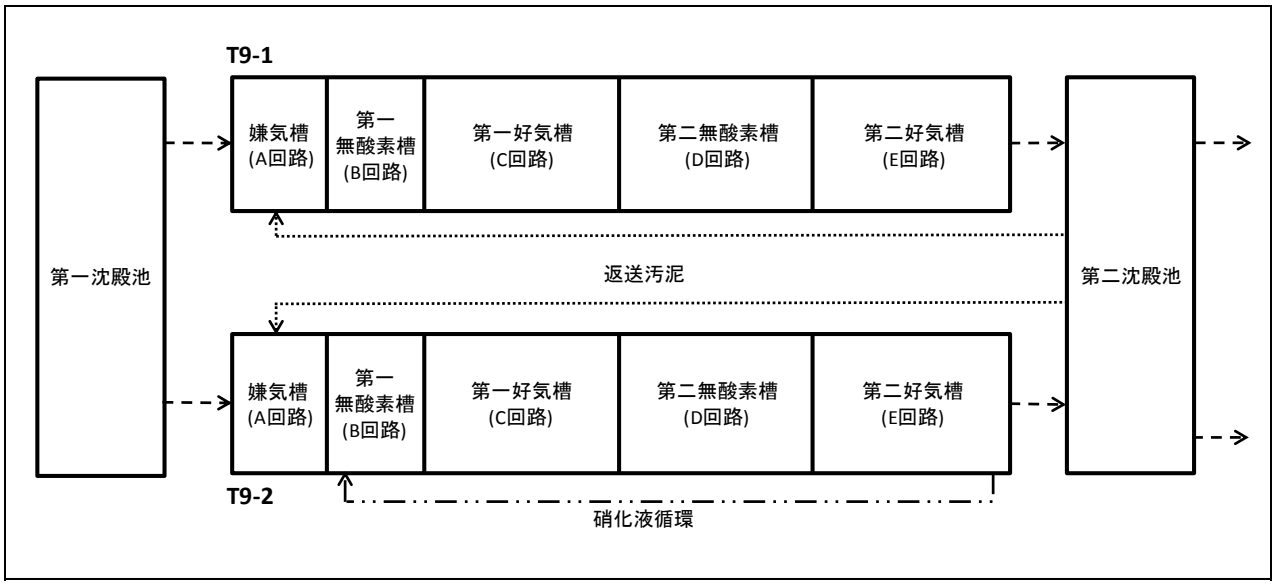


図1 東陽Ⅲ系水処理系統図

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動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)。

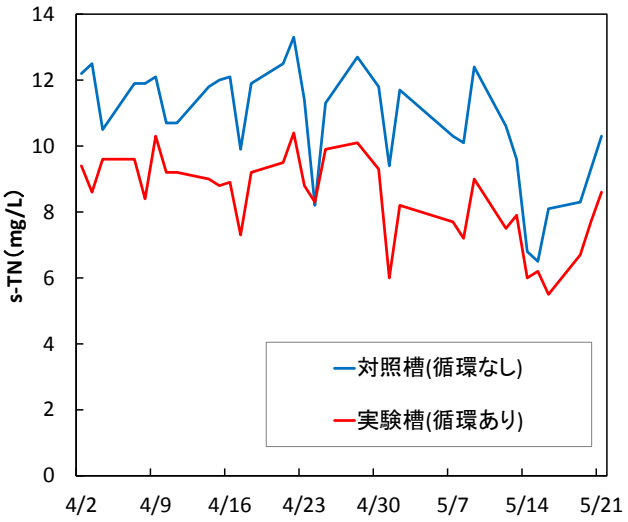


図 2　処理水全窒素濃度の経日変化

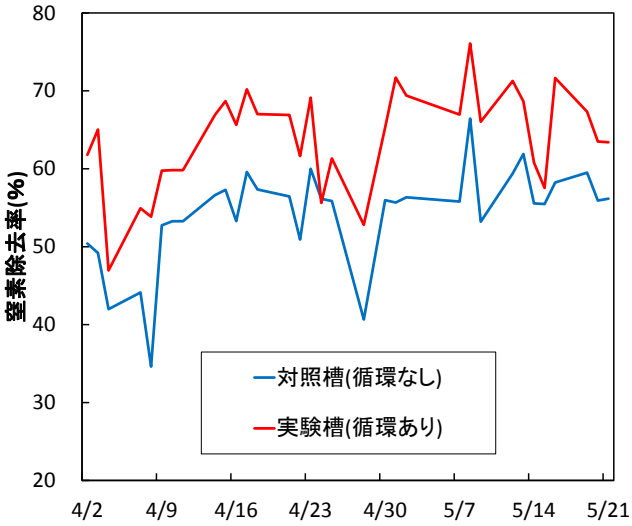


図 3　窒素除去率の経日変化

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)。

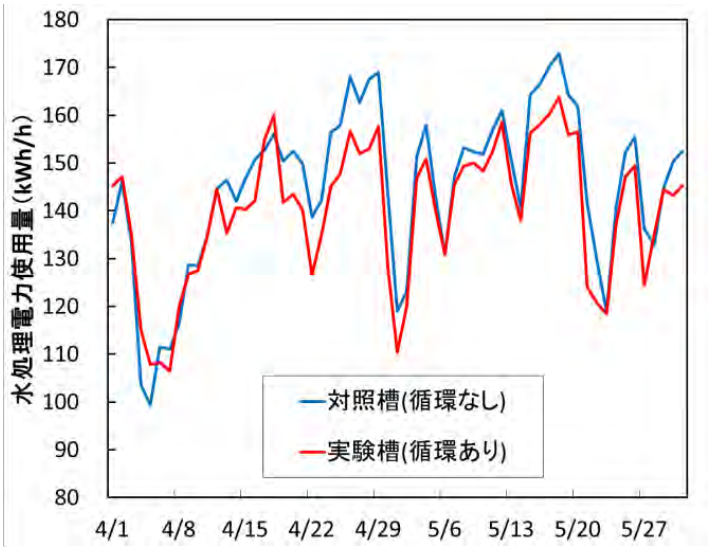


図 4　水処理電力使用量の経日変化

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

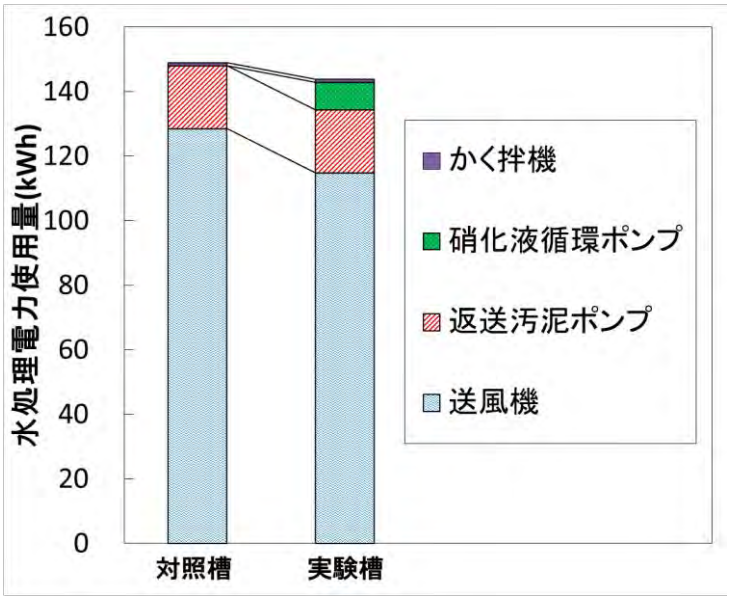


図 5　各処理系の水処理電力量内訳

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。

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

$Eff_{R\text{-}N}$：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-O_2/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（NO_3-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_3態窒素(mg/L)	6.04

$$523 \times 3 \times 6.04 \times {}^{1}\!/_{1000} = 9.48 \left[kg - O_2 / h \right] \cdots ②$$

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 257Nm^3/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④[2)]で算出した。

$$SOR_{ReD} = G_S \times E_A \times \rho \times O_W \times \frac{273}{273 + T} \cdots ③$$

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 ：空気中酸素含有重量(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

$$G_O = \frac{SOR_{ReD} \times 1.024^{(T_2 - T_1)} \times \alpha \times (\beta \cdot C_{S2} \times \gamma - C_A)}{C_{S1} \times \gamma} \cdots ④$$

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_La の補正係数 = 0.83,
ß ： 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 Go＝9.16(kg-O_2/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、NO_X-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 NOx 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。

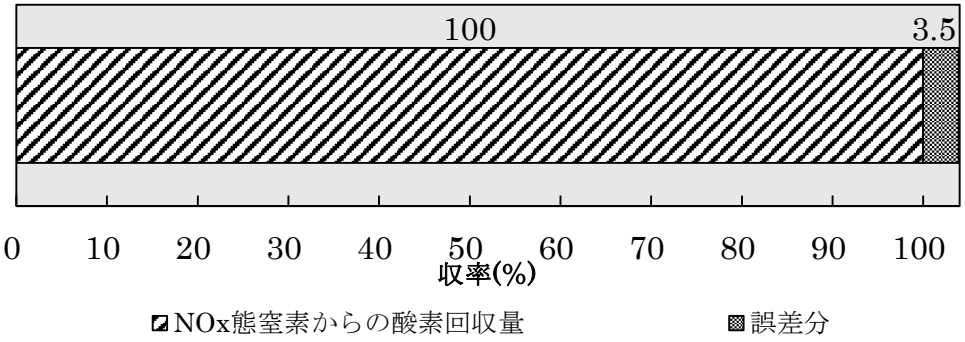


図 6　削減曝気風量収支

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±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考える。

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ニ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。

$$C_{TN_{in}} \times \left(1 - \frac{R}{1+R}\right) \times \alpha = C_{NOx_{eff}} \quad \cdots ⑤$$

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_{NOXeff}	：	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、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。

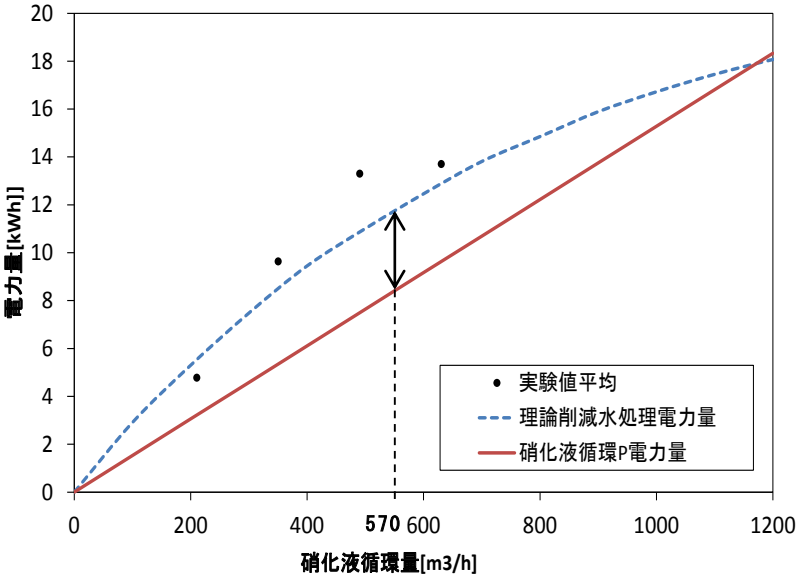


図 7　削減電力量と硝化液循環電力量の関係

$$\Delta E_b > \Delta E_c$$

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

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

ΔE_b	：送風機電力使用量削減量（kWh）
ΔEc	：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/Nm³-Air）= 0.0356（本調査結果より算出）
Q_c	：硝化液循環量（m³/h）
C_{NOxeff}	：処理水の硝酸態窒素濃度（mg/L）
e_b	：送風機電力効率（kWh/Nm³-Air）= 0.0338
e_c	：硝化液循環ポンプ電力効率（kWh/m³）= 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

2-2-7 浅槽式反応槽での窒素削減に向けた新たな取り組みについて

西部第一下水道事務所 落合水再生センター 水質管理係
佐藤麻貴、太田裕誌（現 東京都下水道サービス）、松下勝一、松田寛子
伊藤潤子、岡崎敏之（現 西部第一下水道事務所お客様サービス課）、関口郁子

1. はじめに

落合水再生センター（以下、落合セ）は、晴天時には約 32 万 m^3/日を標準法で生物処理し、全量を砂ろ過したのちに神田川及び城南三河川（渋谷川・古川、目黒川、呑川）に放流している。これらの河川は都心部の人口密集地域を流れる中小河川であり、当該河川は上流からの河川水量が少ないため、落合セの放流水質が直ちに河川水質に影響を及ぼす特徴がある。また、放流水質のさらなる向上は避けて通れない課題である。しかしながら、放流水質向上のために高度処理法等を導入するには、処理能力や敷地に余裕がないことを鑑みると容易なことではない。また、東京都で開発した「新たな高度処理技術」[1)]は、深槽式反応槽での処理技術のため、施設の大部分が浅槽式反応槽である落合セには導入困難である。そこで、浅槽式反応槽の一部を用いて新たな取り組みを行ったところ、従来よりも窒素削減が見られたので、本稿で報告をする。

2. 調査背景

落合セでは、図 1 に示す水処理フローのように、余剰汚泥を第一沈殿池に戻している。このため、硝化促進型制限曝気（疑似 AO）運転によるりん除去を行うと、汚泥に取り込まれたりんが第一沈殿池で再溶出してしまうため、継続的にりん除去を行うとりんが系内を循環して活性汚泥中のりん含有量が増加し続ける。汚泥中のりん含有量が 5%を超えるとりん除去が限界となる場合が多く、最終的に放流水の全りん濃度が基準値を超えるおそれがある。そのため、落合セでは疑似 AO 法等によるりん除去を行っていない。

一方、放流水質の向上には窒素の削減も重要であることから、新たな取り組みとして「中段制限曝気法」、「ステップ流入脱窒法」の 2 つを試みた。

中段制限曝気法とは、反応槽中段の前半分を制限曝気することで擬似的な無酸素槽を設けて内生脱窒させ、残りを好気槽とし硝化を行う処理法である。一般的な硝化内生脱窒法との大きな違いは、①流入下水ではなく第一沈殿池流出水（以下、沈殿下水）を処理する、②反応槽全体のうち無酸素槽の割合が少ない、③硝化途中の段階で無酸素状態にすることで内生脱窒を促す、④後段好気槽は再曝気が目的ではなく完全硝化を目的としている、の 4 点である。

ステップ流入脱窒法とは、脱窒を効率的に進行させることを目的として、中段制限曝気法の制限曝気部に沈殿下水をステップ流入させる処理法である。

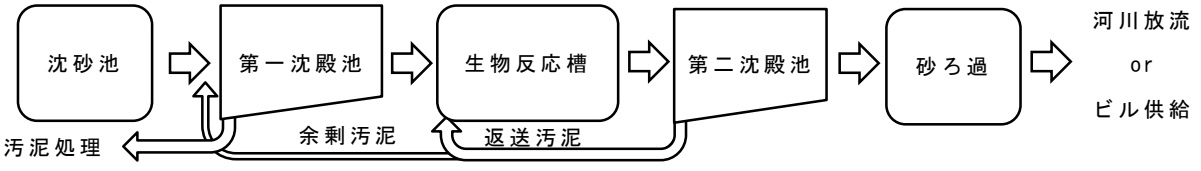


図 1 落合水再生センター水処理フロー

3. 調査内容

3.1 窒素削減調査

調査にあたっての水処理条件を表1に、調査の概略図を図2、図3に示す。

表1 ステップ流入脱窒法と中段制限曝気法の実施調査での水処理条件

		5号槽 ステップ 流入脱窒法	6号槽 標準法	7号槽 中段制限 曝気法
DO制御設定		D回路：1.5mg/L		
MLSS濃度		1,000～1,200mg/L		
A:B:C:D 送風比率		15:35:20:30	10:30:35:25	15:35:20:30
制限曝気部分		C回路前段	なし	C回路前段
流入扉開度	A回路	120 (60+60)	200(100+100)	200(100+100)
	C回路	80 (80)	0 (0)	0 (0)

反応槽5号・7号は制限曝気をするC回路前段までに十分に硝化させるため、A～B回路の送風比率を標準法の6号槽よりも高くし、制限曝気をするC回路の送風比率を減らした。なお、各反応槽の流出水量は全槽（5～7号槽）同じになるように調整した。

採水箇所は反応槽流出部であるD回路末端で行い、溶解性全窒素を測定した。

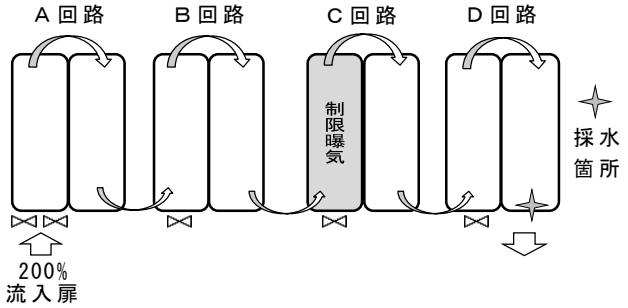


図2 中段制限曝気法調査の概略図

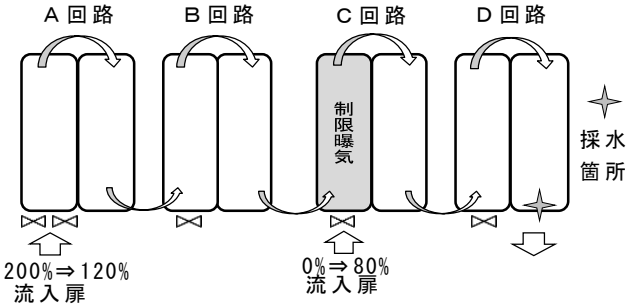


図3 ステップ流入脱窒法調査の概略図

3.2 窒素除去と送風量調査

反応槽の1系（1～4号槽）を基準槽として標準法で継続して処理を行い、2系（5～8号槽）を調査対象槽として処理法を順次変更することで、1系・2系の窒素と送風量の関係を調査した。今回の調査では、反応槽流出部の溶解性全窒素ではなく、二次処理水（第二沈殿池流出水）の全窒素で調査した。系統別で調査した理由は、反応槽個々に水量計が無く系統別でしか水量を把握できないことによる。なお、1系・2系共に同じ水質の沈殿下水が流入する。

4. 調査結果

4.1 窒素削減効果の検証

3.1の条件で行った調査結果を図4に示す。調査当初は降雨の影響により、溶解性全窒素の傾向にバラつきがあった。しかし、9/16以降は傾向が鮮明になり、標準法・中段制限曝気法・ステップ流入脱窒法の順に溶解性全窒素が低くなった。この間、3処理法とも処理水中のアンモニア性窒素が1mg/L以下であり、良好な硝化状況であった。また、りん酸性りん濃度は3処理法とも1mg/L以下であり差はなかった。

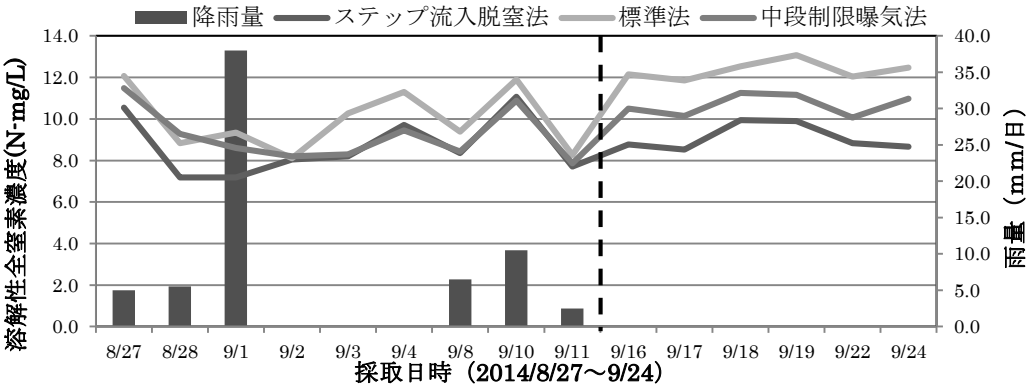


図 4　ステップ流入脱窒法と中段制限曝気法及び標準法の窒素処理状況

4.2　窒素除去と送風量の検証

3.2 の条件で行った調査期間における水処理条件、運転状況および全窒素濃度を表 2 に示す。また、1 系・2 系の二次処理水の全窒素を図 5 に、運転状況のうち、送風倍率比率（2 系/1 系）の各日の状況を図 6 に示す。なお、Run1（両系とも標準法）において 1 系の送風倍率が 2 系より高いのは、1 系の 2 槽が旧来型の散気装置であり、高効率型に更新済である他の 6 槽よりも送風効率が悪いためである。

表 2　送風量の検証調査での水処理条件、運転状況および全窒素濃度の期間平均
（1 系：基準槽、2 系：調査槽）

	2 系の処理法	平均送風量 (m³/日)		平均処理水量 (m³/日)		送風倍率			全窒素 (N-mg/L)		
		1 系	2 系	1 系	2 系	1 系	2 系	比率	1 系	2 系	削減率 (※)
Run1 (12/15～12/30)	標準法	556,000	429,000	134,200	132,400	4.14	3.24	78.3%	12.2	11.9	－
Run2 (1/9～1/26)	ステップ流入脱窒法	560,000	463,000	131,100	137,200	4.27	3.37	78.9%	12.7	10.7	13.2%
Run3 (2/10~2/25)	中段制限曝気法	625,000	487,000	143,800	141,800	4.35	3.43	78.9%	12.0	10.6	9.2%

※削減率は（1 系全窒素－2 系全窒素）÷1 系全窒素×100-Run1（1 系全窒素－2 系全窒素）÷1 系全窒素×100 の計算式で表す。

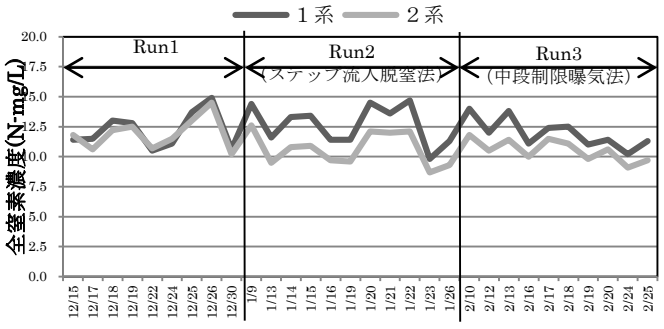


図5　1系・2系二次処理水の全窒素比較
(Run1～Run3)

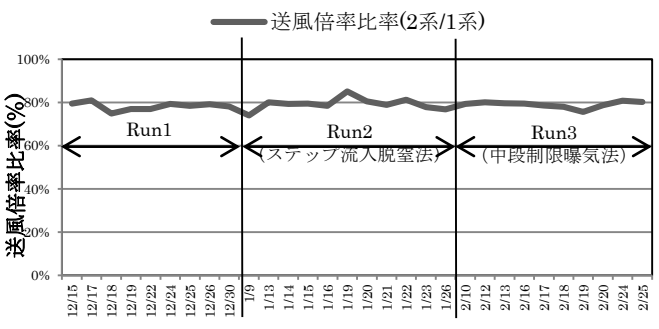


図6　送風倍率比率（2系/1系）
(Run1～Run3)

図 5 に示すとおり、4.1 の窒素削減効果の検証と同様、ステップ流入脱窒法、中段制限曝気法は標準法に比べて窒素削減効果が高かった。削減率については、ステップ流入脱窒法に切り替えた Run2 が 13.2%、中段制限曝気法に切り替えた Run3 は 9.2%であった（表 2 参照)。ステップ流入脱窒法の窒素削減効果は硝化液循環を 15%増加させたことに相当する。

なお、この間、BOD 容積負荷 0.45～0.55kg/m^3･日、HRT6～7 時間、SRT5～8 日、返送汚泥率 40～60%で 1 系・2 系同様の条件であった。また、両系統において、処理水中のアンモニア性窒素が 1mg/L 以下であり、低水温期であっても良好な硝化状況であった。

送風量は、表 2 のように Run1～Run3 の送風倍率比率（2 系/1 系）の平均値に差が少ないこと、図 6 のように送風倍率比率（2 系/1 系）がいずれの期間も 80%前後と変化が少ないことから、標準法と同程度の送風量で処理が可能であると判断した。

5. まとめ

浅槽式反応槽での窒素削減に向けた新たな取り組みとして、実施設で中段制限曝気法とステップ流入脱窒法を試みたところ、以下の知見が得られた。

(1) 中段制限曝気法、ステップ流入脱窒法のいずれも窒素削減効果があり、その効果はステップ流入脱窒法の方が大きい。

(2) 窒素削減を目的とした運転方法であっても、標準法と同等の送風量で処理が可能である。

以上から、標準法施設である落合セにおいて、浅槽式反応槽中段に制限曝気による擬似的な無酸素槽を設けることで、送風量を増やすことなく窒素削減が可能であることが判明した。この結果、硝化液循環に依存しない窒素削減方法の可能性が見出せた。特に、中段制限曝気法は、ステップ流入扉が無い施設でも容易に試すことができるため、多くの処理場への展開が期待できる。

今後は、無酸素槽（制限曝気槽）の位置・滞留時間や MLSS・DO 等の運転条件を精査し、より効果的な窒素削減と経済性運転に繋げていく。

参考文献

1) 葛西孝司/他：NO_x計・NH_4計を用いる新たな高度処理技術の開発:同時硝化脱窒処理技術、第 51 回下水道研究発表会講演集、2014

2-3-1 汚泥焼却炉の低温廃熱を利用した補助燃料削減の取組

施設管理部 施設管理課 佐藤崇仁

1. はじめに

東京都下水道局（以下、当局という）では、平成 25 年度の実績として区部で約 450 万 m^3／日の汚水を処理し、その過程で発生する約 2,500t／日の脱水汚泥を焼却処理して減量化を図っている。

この汚泥の焼却処理には都市ガスを補助燃料として使用しており、使用量は約 35,000Nm^3／日に上っている。

一方、汚泥を焼却処理する過程では N_2O 削減のため、燃焼排ガスを炉出口で約 850℃の高温としている。このため、これまでも熱回収を行い、焼却炉の熱効率を高めるために燃焼用空気の予熱等に利用する他、廃熱発電や消化槽加温、地域冷暖房などに有効利用している。

これまで当局では、補助燃料使用量を約 2 割削減できる多層燃焼型流動焼却炉や過給式焼却炉の導入などの第二世代型汚泥焼却炉により、焼却炉自体の燃焼効率を高める対策を施してきたが、未だ多くの補助燃料を使用しており、燃料価格高騰等を受けてのエネルギーコストが増加している。

そこで今回、既設の汚泥焼却設備に、これまで活用されていなかった焼却炉燃焼ガスの低温廃熱（300～450℃）のみを熱源として利用する汚泥乾燥設備を南部スラッジプラントに設置することで、焼却時に使用する補助燃料を大幅に削減する取組を行ったので報告する。

2. 設備概要

2.1 システム概要

南部スラッジプラント新 1 号炉では、汚泥焼却による廃熱の一部は、燃焼用空気の予熱や煙突からの白煙防止に利用されているが、このうち、過剰に白煙防止として回収されている廃熱については煙突から排気ガスとともに大気へ放出していた。

本システムでは、これまで未利用であった白煙防止の余剰廃熱を汚泥乾燥用の熱として回収し、有効利用することで、脱水汚泥の一部を乾燥し、含水率 20～30%程度の乾燥汚泥とする。

そして、この乾燥汚泥と脱水汚泥を混合し、焼却炉に投入する汚泥の含水率を低下させてから焼却炉への投入することで、図 2 に示すとおり自燃カーブを異動させ、補助燃料の削減を図るものである。

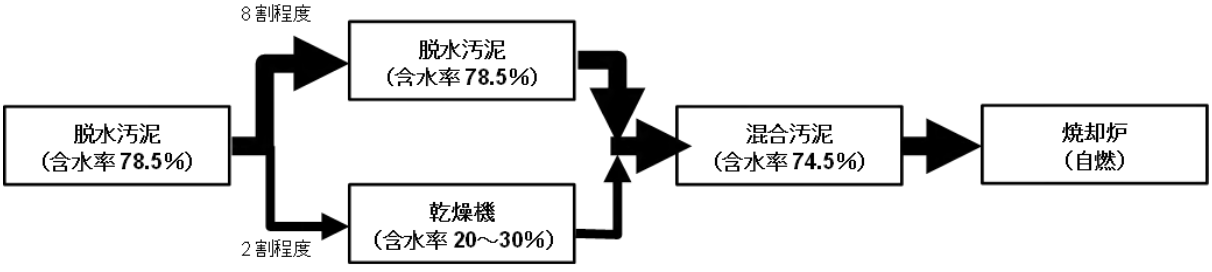


図 1 システム概要

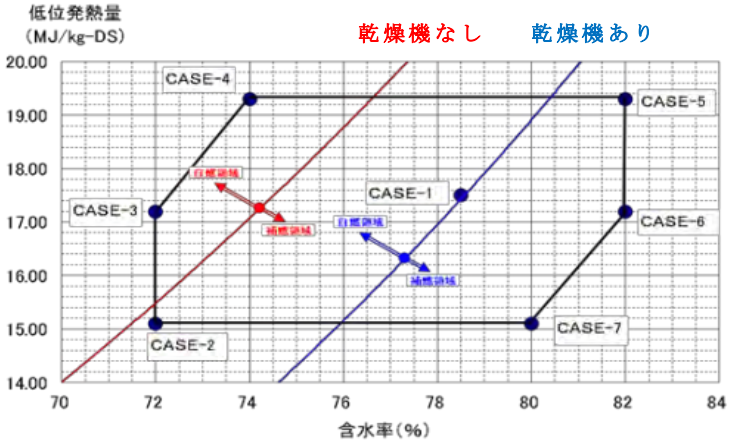


図 2　乾燥機導入による自燃カーブの移動

2.2　設備概要

今回南部スラッジプラント焼却設備新 1 号炉に導入する乾燥設備の特徴は、次のとおりである。

ア　既設焼却炉の一部を改良し、乾燥設備を追加した。

イ　既設焼却設備との取合いは汚泥と未利用廃熱の授受のみとし、設備的に独立したものとすることで、乾燥設備停止時においても焼却設備のみでの通常の汚泥処理運転の継続が可能な設備フローとした。

ウ　未利用廃熱のみで乾燥し、発生する臭気の分解は既設の焼却炉で行うため、乾燥設備で補助燃料は使用しない。

乾燥設備の設備フローは図 3 に示すとおりで、焼却設備の処理量（300t/日）の約 2 割に当たる 65t/日の脱水汚泥をロータリー式熱風乾燥機内で解砕しながら低温廃熱（約 450℃）の空気を用いて乾燥させ、焼却炉へ投入するための二軸スクリュー式の押込み機で一部の脱水汚泥と混合する。

また、乾燥に用いる空気は循環して熱とともに利用するが、余剰となった空気は粉塵等の除去を行った後、焼却炉上部で燃焼脱臭することで臭気の漏えいを防止する。

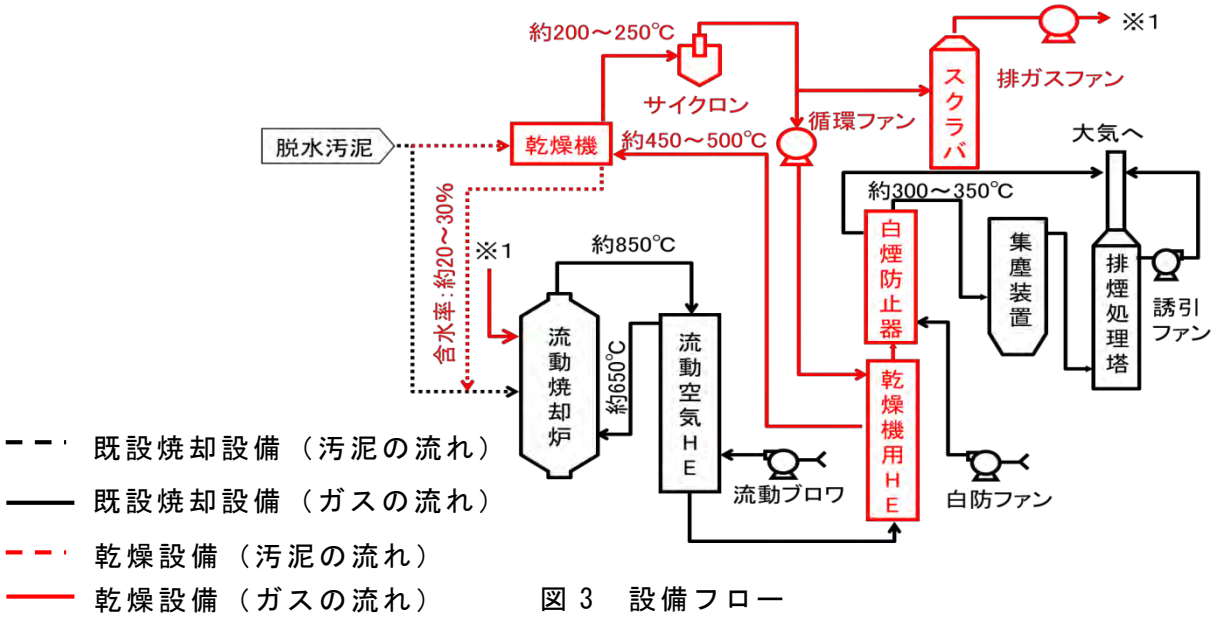


図 3　設備フロー

3. 乾燥機の導入効果について

3.1 導入の費用対効果について

南部スラッジプラント新1号炉への乾燥設備の導入に当たり、費用対効果の検討を行った。なお検討に当たっては、焼却設備の残存年数を15年とした。

乾燥設備のランニングコストは表1のとおりである。機器点数の増加により電力使用量は増加するが、南部スラッジプラントの汚泥性状においては補助燃料を9割弱削減できるため、エネルギーコストは127百万円削減できると試算した。

一方、機器点数が増えることから、運転期間で平均した補修費は11百万円増加することとなる。

以上より、合計して年間116百万円のコスト縮減効果が15年間得られるため、本設備の導入により1,740百万円のランニングコストの縮減が出来る。

したがって､工事価格を差し引いても約8億9千万円の費用回収が行えると考えている。

表1 ランニングコストの比較　　百万円/年

	導入前	導入後	増減額
電力	96	111	▲ 15
補助燃料	156	14	142
苛性ソーダ	25	25	0
小計	277	150	127
補修費	50	61	▲ 11
合計	327	211	116

3.2 温室効果ガス削減効果について

本設備の導入により、試算では電力使用による温室効果ガス排出量は約500t-CO_2増加するものの、補助燃料使用による温室効果ガス排出量は約3,100t-CO_2削減できる。

したがって、エネルギー由来の温室効果ガス排出量は年間で約2,600t-CO_2削減できる。

4 おわりに

今回、補助燃料削減対策として、これまで活用されていなかった焼却炉燃焼ガスの低温廃熱を有効利用し、焼却炉全体のエネルギー効率を向上させる取組みを行った。

本設備は当局で初めて、平成27年度に稼働するため、今後は工夫を重ね、汚泥性状の季節変動も踏まえたエネルギー効率の最も良い運転方法を確立していく。

これにより、本設備が東京都下水道局のエネルギー基本計画である「スマートプラン2014」の達成に向けた推進力となるものと考える。

2-4-1 エネルギー自立型焼却システムの開発

計画調整部 技術開発課 竹谷 修平

1. はじめに

当局では、下水道事業における地球温暖化防止計画「アースプラン 2010」(平成 22 年 2 月策定)の取り組みを不断に継続し、地球温暖化対策を積極的に推進するために、省エネ・再エネ効果の高い技術の導入を進めている。こうした中、汚泥処理工程で発生する温室効果ガスに関しては、焼却炉の高温焼却により一酸化二窒素(N_2O)排出量の低減や、運転管理の工夫により補助燃料の使用による二酸化炭素(CO_2)排出量を大幅に削減してきたが、電力使用による二酸化炭素(CO_2)排出量は横ばいであった。

そこで、汚泥焼却時に買電より安価な発電を行い、汚泥焼却炉における使用電力量を発電電力量が年間で上回り、かつ補助燃料を不要にすることにより(以下、「エネルギー自立」という。)二酸化炭素(CO_2)排出量を一層削減可能な「エネルギー自立型焼却システム」(下水道事業におけるエネルギー基本計画スマートプラン 2014 より)の開発が完了したことから、その開発内容について紹介する。

2. エネルギー自立型焼却システム

エネルギー自立型焼却システムは、「超低含水率型脱水機」と「エネルギー自立型焼却炉」により構成される(図 1 右側)。このうち「超低含水率型脱水機」は、脱水汚泥の水分量を低動力で一層削減する脱水機で、年間の大部分を脱水汚泥含水率 71%以下で、汚泥の性状が悪化した場合でも脱水汚泥含水率 74%以下を達成する脱水機である。この更なる低含水率化により、第二世代型焼却システム(図 1 左側)に対し、汚泥焼却時における潜熱(脱水汚泥中の水分を水蒸気にする際に必要とされるエネルギー)が小さく、顕熱(脱水汚泥中の水分が水蒸気になった後の利用可能エネルギー)が大きくなるため、汚泥焼却炉における効果的な発電が可能となる。このため「エネルギー自立型焼却炉」は、第二世代型焼却システムの「高温省エネ型焼却炉」に発電機を付加することにより、エネルギー自立型の汚泥焼却を可能としたものである。

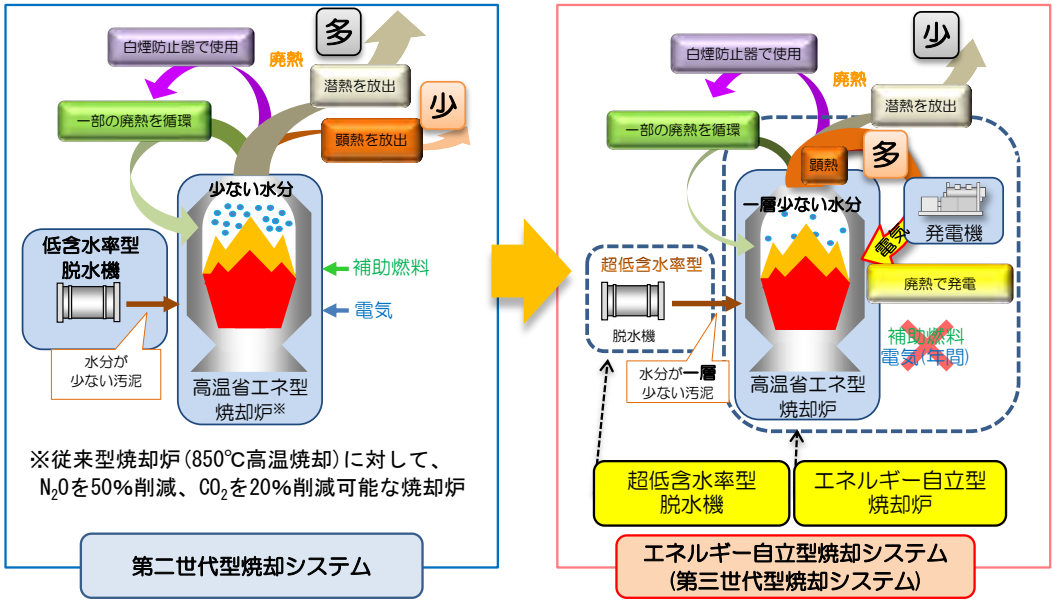


図１　エネルギー自立型焼却システム概要図

3. 超低含水率型脱水機の開発に関する共同研究

超低含水率型脱水機は、前述のとおり従来の低含水率型脱水機よりも更に含水率を低下させる技術であり、脱水技術のレベルが高く技術開発が必要と考えた。このため、超低含水率型脱水機の開発は、当局の汚泥を用いた脱水実証試験により実施することとした。

平成 25 年 7 月に「開発技術の導入を前提とした共同研究」の公募を行い、共同研究者 6 社 1 グループと平成 25 年 8 月～平成 27 年 2 月の期間で共同研究を実施した。なお、応募条件は、「下水汚泥用脱水機(処理能力 10m^3/h を超える)を、過去 10 年間に、公共下水道又は流域下水道施設に製作した実績を有する企業」とした。

(1) 研究目標

目標性能の設定に当たり、過去 3 年間の当局の汚泥性状に関する基礎調査(以下、「基礎調査」という。)を行ったのち、基礎調査結果に対する脱水機の開発可能性について、脱水機メーカーへのヒアリングを行った。

その結果、焼却炉で補助燃料を必要としない含水率 74%以下の脱水性能は、表 1 に示すとおりの汚泥性状範囲で達成可能であると想定された。この泥性状範囲に該当する汚泥は、基礎調査から年間出現率を 3 割と見込んだ。但し、この範囲の性状は、夏季等における悪化した汚泥性状に相当し、高分子凝集剤のみでの性能達成が困難な場合があることも想定されるため、無機凝集剤の添加も認める条件とした。

また、含水率 71%以下の脱水性能は表 1 に示すとおりの汚泥性状範囲で、達成可能であると想定された。この泥性状範囲に該当する汚泥は、基礎調査から年間出現率を 7 割と見込んだ。

この想定を基に、汚泥焼却炉における熱収支計算を行った結果、使用電力量を発電電力量が年間で上回ると試算されたことから、脱水機の目標性能を表 1 のとおり設定した。このうち、高分子凝集剤注入率や消費電力及び固形物回収率の目標値については、エネルギー自立を図る上で重要な脱水汚泥の低含水率化を優先し、従来の低含水率型脱水機と同等とした。

表 1　脱水機目標性能

目標脱水汚泥含水率(%)			71以下		74以下	
汚泥性状	濃縮汚泥	種別	混合汚泥		混合汚泥	
		汚泥濃度(%)	2.0以上	※1	1.3以上	※2
		有機分比(%)	88以下		90以下	
		繊維分(100mesh) (%)	15以上		4以上	
目標性能条件	凝集剤	種別	※3 カチオン系高分子凝集剤溶液（溶解濃度：0.2%程度）		※3 カチオン系高分子凝集剤溶液（溶解濃度：0.2%程度）	※4 無機凝集剤 ポリ硫酸第二鉄（溶解濃度:11%程度）
		注入率	1.0以下		1.0以下	15%程度
	固形物回収率(%)		95以上			
	消費電力(kwh/m³)		1.5以下			
処理能力(m³/h・台)			15,20,25,30,40,50,60 （各処理能力の脱水機を製造可能）			

※1,※2 全て満たしている場合を指す。
なお、※1及び※2両方の条件を満たしている濃縮汚泥については脱水汚泥含水率71%以下とする。
※3 葛西水再生センターで使用している凝集剤と同等品を目安とする。
※4 高分子凝集剤のみで、脱水汚泥含水率74%以下の達成が困難な場合に無機凝集剤の添加を認める。

(2)研究方法

基礎調査の結果、葛西水再生センターの汚泥が最も脱水困難な汚泥であることが分かった。開発後の局内での導入を考慮し、汚泥性状が局内で最も悪い葛西水再生センターにおいて、共同研究者が実証機(製品又は製品と同等の機構・性能を有する装置で処理能力1.5m³/h 以上)を設置し、同センターで使用している凝集剤を用いて実証試験を実施することとした。

実証試験は、年間の汚泥性状変化に対する性能を確認するため、四季(春：6 月、夏：7-8 月、秋：10 月、冬：12 月)毎に平日 48 時間及び休日 24 時間の連続運転を各 1 回行い、その時の濃縮汚泥及び脱水汚泥の性状分析を行った。また、共同研究者の性状分析が正しいことを確認するため、当局でも別途、性状分析の調査を行いクロスチェックを行った。この分析結果より、研究目標の達成状況を確認することとし、実機よりも小型の実証機で試験を行った場合には、実機サイズでの設計性能が研究目標を達成できることを JIS 規格や自社基準等により示すこととした。

(3)研究成果評価方法

四季の連続運転時のデータが、脱水機目標性能（表 1）を達成するかどうかを確認した。その際、脱水汚泥含水率は日単位で評価した。汚泥性状が、連続運転期間中に悪化した場合は、目標脱水汚泥含水率を 74%をとした。

(4)研究結果

共同研究者 6 者（5 社 1 グループ）の技術が、すべて研究目標を達成し、当局の平成 27 年度第 1 回技術管理委員会にて超低含水率型脱水機として実用化技術として承認された。

承認された技術を図 2 に示す。

・圧入式ｽｸﾘｭｰﾌﾟﾚｽ型脱水機：㈱石垣

・遠心脱水機：㈱クボタ・寿工業㈱

・遠心脱水機：三機工業㈱

・遠心脱水機：月島機械㈱

・遠心脱水機：巴工業㈱

・遠心脱水機：㈱西原環境

図 2　超低含水率型脱水機

4. エネルギー自立型焼却炉の開発に関する共同研究

エネルギー自立型焼却炉は、前述のとおり「高温省エネ型焼却炉」に発電機を付加することにより、エネルギー自立型の汚泥焼却を可能とする焼却炉である。ベースとなる高温省エネ型焼却炉の性能については、これまでに当局が実施した共同研究における実証試験で確認済である。また、これに付加するバイナリー発電機等の性能については、共同研究者が有する発電機の運転記録及び実績等により評価可能と考えた。このため、エネルギー自立型焼却炉の開発は、超低含水率型脱水機の共同研究における実証試験結果(脱水汚泥含水率の出現割合)に基づき、実証試験に代えて熱収支計算によりエネルギー自立が図れることの確認を行うこととした。

平成 27 年 1 月に「開発技術の導入を前提とした共同研究」の公募を行い、共同研究者 5 者と平成 27 年 2 月～平成 27 年 3 月の期間で共同研究を実施した。なお、応募条件は、「高温省エネ型焼却炉を製造できる企業」とした。

(1) 研究目標

目標性能は、高温省エネ型焼却炉と同等の N_2O 排出量を満足した上で、エネルギー自立を図ることとした。焼却炉の目標性能を表 2 に示す。

ここで、脱水汚泥含水率については、超低含水率型脱水機の共同研究により 71%以上 74%以下とし、その他の脱水汚泥性状(代表値)及び性状範囲については、基礎調査よりｽﾞ 3 及び表 3 に示すとおり設定した。また、焼却炉における電力量区分は図 4 に示すとおりとした。

さらに、コスト条件として、焼却設備の建設費及び維持管理費は高温省エネ型焼却炉と同等し、発電設備の発電目標単価(発電設備の建設費及び維持管理費の総計/総発電電力量)は 14 円/kWh 以下とした。

表 2　焼却炉目標性能

目標性能	N_2O排出量(kg-N_2O/t-DS)	1.15以下	
	使用電力量(kWh/t-DS)	161以下	※1
	補助燃料使用量(Nm^3/t-DS)	0	※2
	発電は発電目標単価14円/kWhより安価に行い、 焼却炉における使用電力量を発電電力量が年間で上回る		※3

※1 含水率74%(他の性状は図3及び表3による)の脱水汚泥焼却時のものとし、
焼却能力300t/日に換算したものする。
なお、発電電力量の一部で使用電力量を賄ってもよいこととする。
※2 焼却炉の立上げ・立下げ時及び脱水汚泥含水率が74%を超える時を除く。
※3 含水率は年間の7割が71%、3割が74%(他の性状は図3及び表3による)とする。

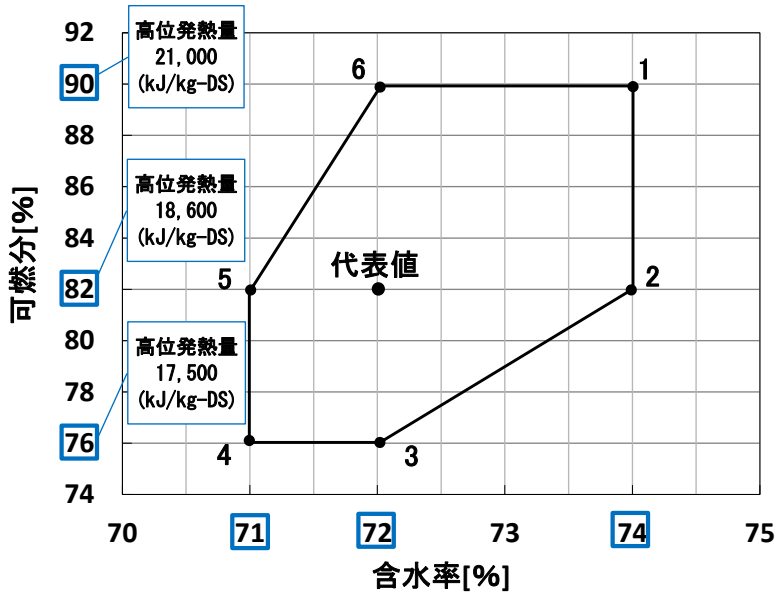


図 3　脱水汚泥の性状範囲

表 3　脱水汚泥の性状（代表値）

種別		混合汚泥
含水率(%)		72
可燃分(%-DS)		82
灰分(%-DS)		18
高位発熱量 (kJ/kg-DS)		18,600
組成比率 (%-VTS)	炭素	51.5
	水素	7.8
	窒素	6.0
	酸素	33.6
	硫黄	1.0
	塩素	0.1

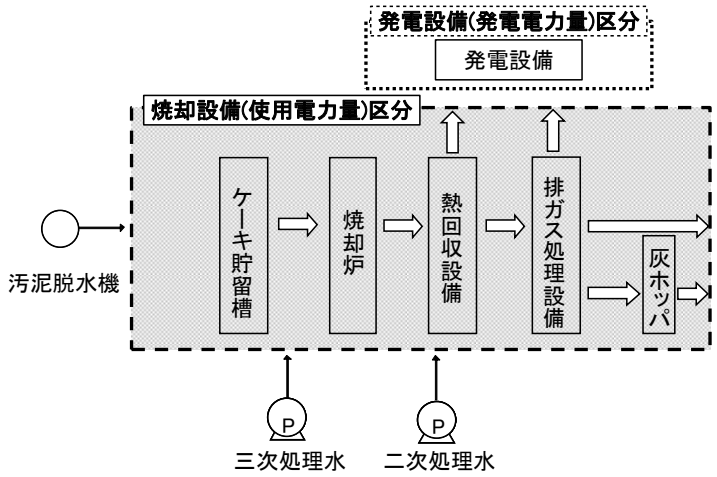


図 4　焼却炉設備（電力量）区分

(2)研究方法

共同研究者が、熱収支計算、建設・維持管理費に関する費用の算出を行い、当局が研究目標の達成状況を確認することとした。

(3)研究成果評価方法

上記結果から焼却炉目標性能を達成するかどうか確認した。

その際、発電電力量を評価するとともに、使用電力量の目標性能値である 161kWh/t-DS を上回る技術については、省エネ性能を評価に加えた。これにより廃熱の利用方法が違う技術を公平に評価することができた。

(4)研究結果

共同研究 5 者の技術が、すべて研究目標を達成し、当局の平成 27 年度第 1 回技術管理委員会にてエネルギー自立型焼却炉として実用化技術として承認された。承認された技術を表 4 に示す。また、各者のエネルギー自立型焼却炉フローについて、図 5～9 に示す。

表 4　エネルギー自立型焼却炉

	三機工業㈱	㈱タクマ	月島機械㈱	三菱重工環境・化学エンジニアリング㈱	メタウォーター㈱
高温省エネ型焼却炉	・ターボ型流動炉	・ストーカ炉	・ターボ型流動炉	・燃焼最適化システム付流動焼却炉	・タービン多層型流動炉 ・タービンガス化炉
発電機	・バイナリー発電機	・蒸気タービン発電機	・バイナリー発電機	・バイナリー発電機	・バイナリー発電機

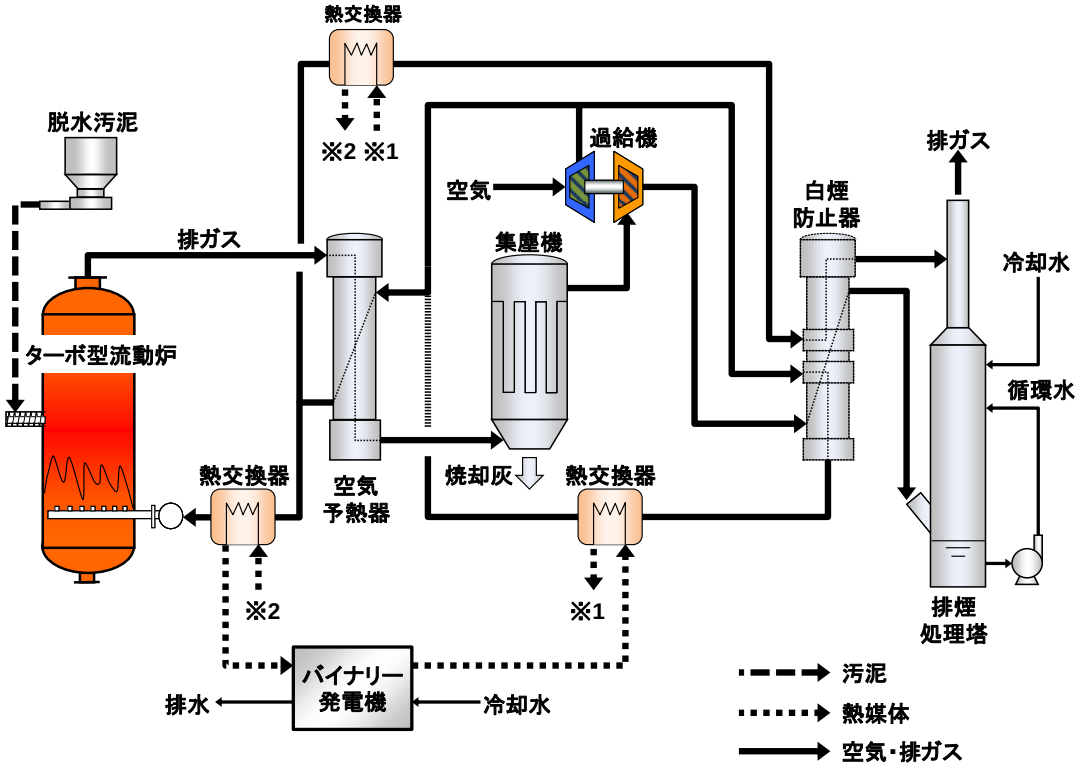


図 5　エネルギー自立型焼却炉フロー：三機工業㈱

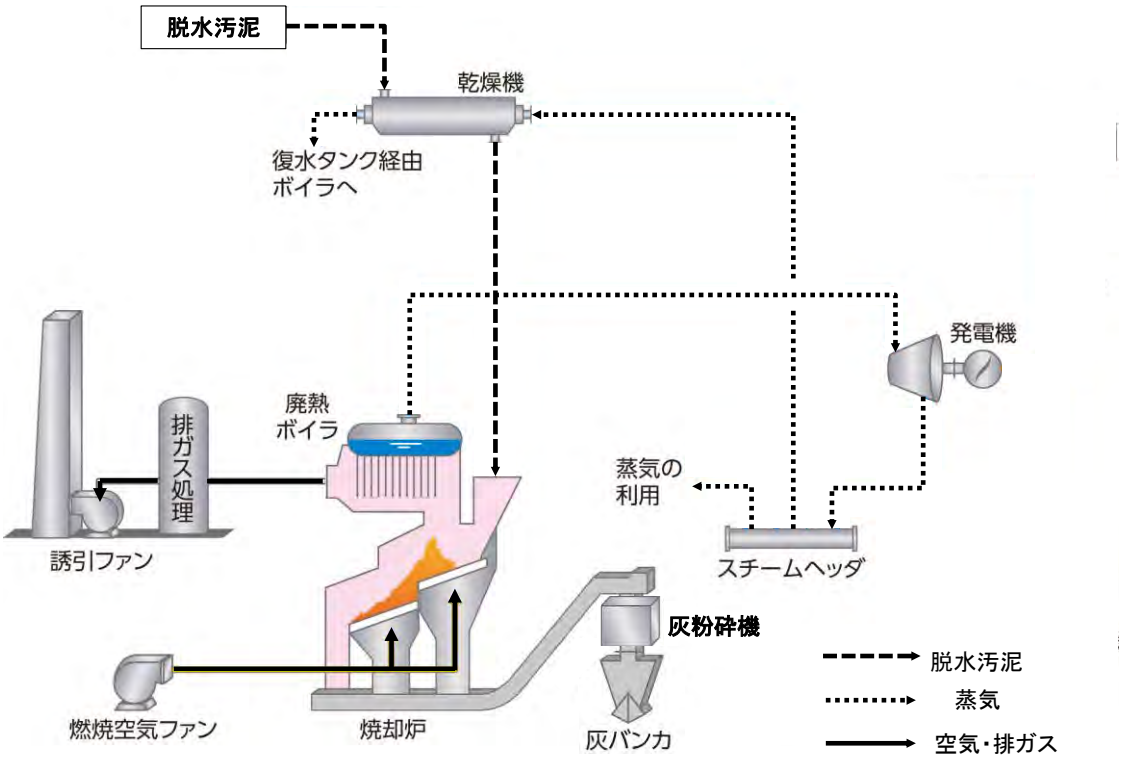


図 6　エネルギー自立型焼却炉フロー：㈱タクマ

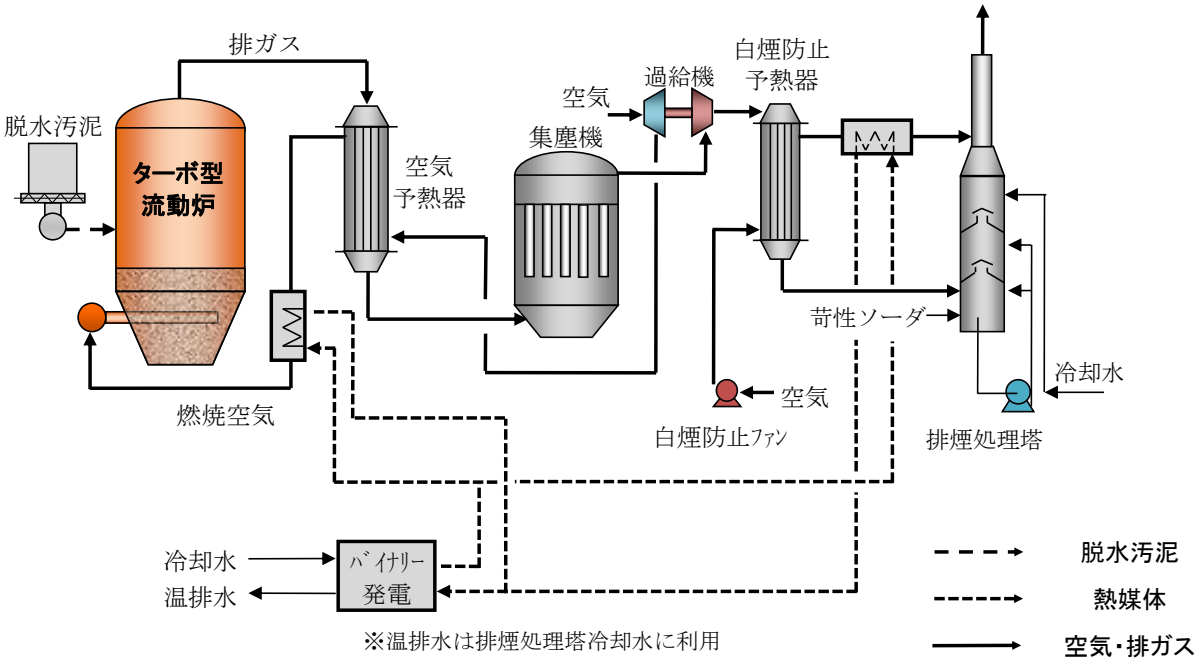


図 7　エネルギー自立型焼却炉フロー：月島機械㈱

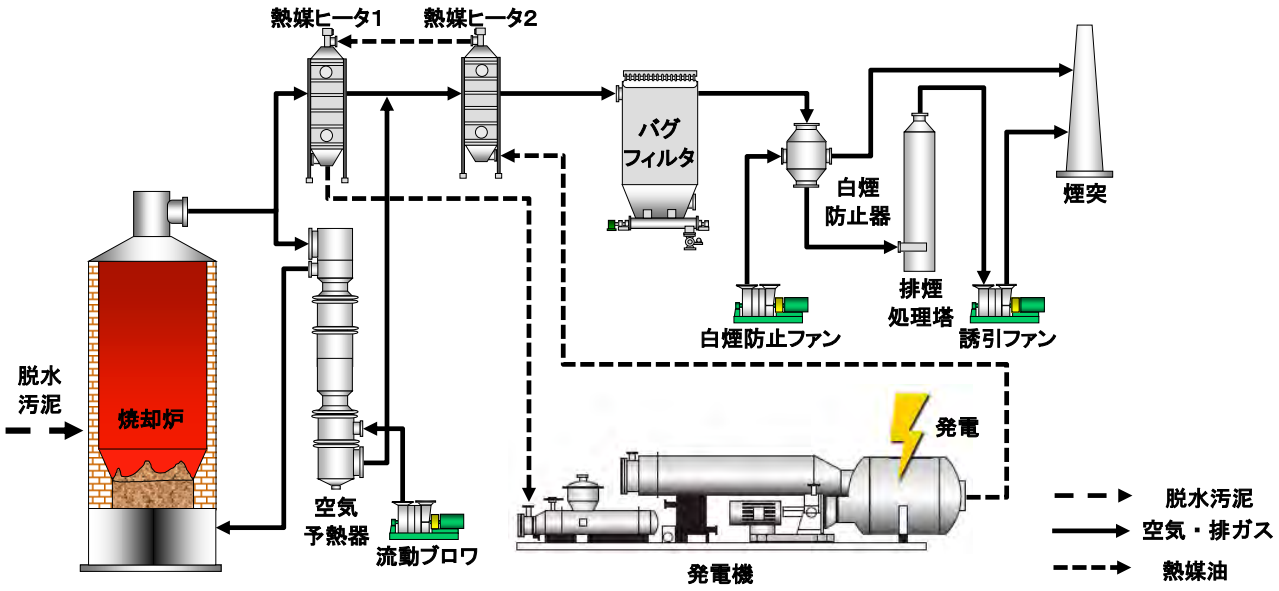


図 8　エネルギー自立型焼却炉フロー：三菱重工環境・化学エンジニアリング㈱

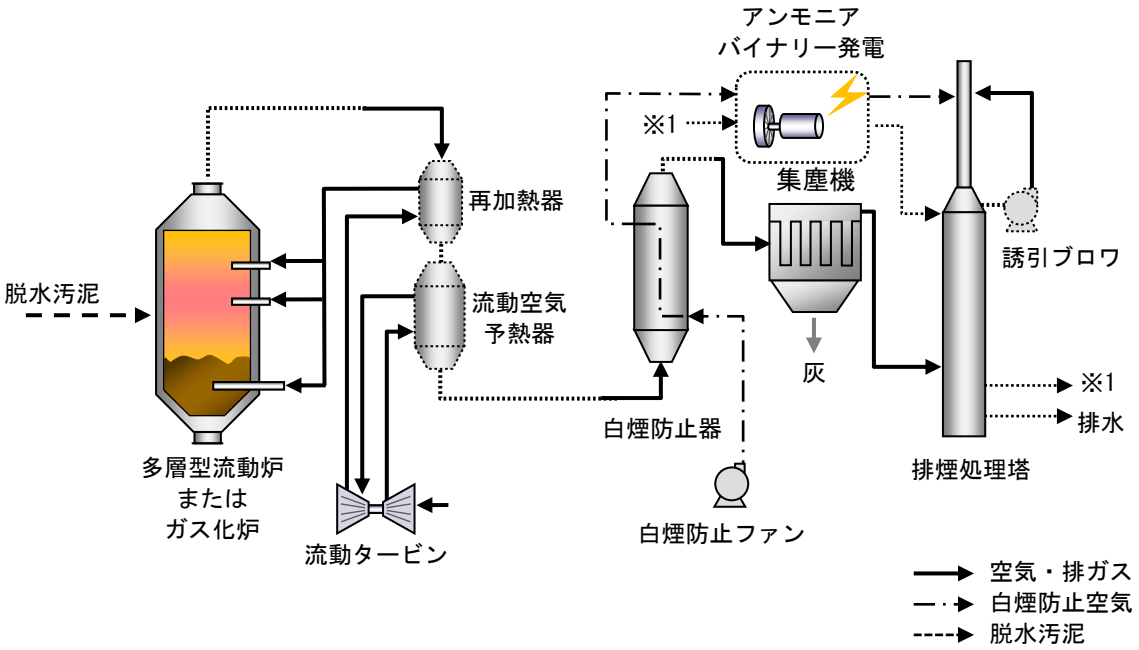


図 9　エネルギー自立型焼却炉フロー：メタウォーター㈱

5. 終わりに

今後、実用化の承認を得た機器を仕様書で指定し工事を発注した後、導入した実機の性能について研究目標が達成されていることを事後評価する予定である。

2-4-2 水処理からの N_2O の生成・排出抑制シミュレーション調査

計画調整部 技術開発課
濱本亜希 北村清明

1. はじめに

東京都下水道局では、水処理工程で発生する温室効果ガスの一種である N_2O（亜酸化窒素）の削減する一手法として、主な生成・排出場所である好気槽において、送風量制御により好気槽前段における硝化をゆっくり進めることで、N_2O の生成自体を抑制する技術の開発を行った。

開発の過程で、上記 N_2O の生成抑制に効果的な風量条件を定量的に把握し、運転管理上の指針作成等に役立てることを目的として、IWA（国際水協会）が提唱する活性汚泥モデル（ASM）とアンモニア酸化細菌（AOB）による N_2O 生成の数学モデルを組み込んだモデルを構築した。その後、水処理実験プラントにおける窒素処理状況と N_2O 排出量の実績値を用いてキャリブレーションを行った上で、各回路への送風量の配分を変えて、N_2O 生成を抑制できる送風条件の検討を行った。

また、水温が低下する冬期は、亜硝酸酸化が進まず反応槽内に亜硝酸が蓄積することで、N_2O 生成・排出量が増加する傾向がある。そこで、硝化に影響を及ぼすと考えられる因子のうち、水量変動の影響について、当該モデルを用いて評価を行ったので、以下にその内容について報告する。

2. N_2O の生成・排出抑制シミュレーション

2.1 N_2O 生成・排出モデルの構築

水処理工程からの N_2O の生成・排出を抑制するシミュレーションを実施するため、まず、IWA（国際水協会）が提唱する活性汚泥モデル（ASM））にアンモニア酸化細菌（AOB）による N_2O 生成の数学モデルを組み込んだ N_2O 生成・排出モデルを構築した（図 1）。

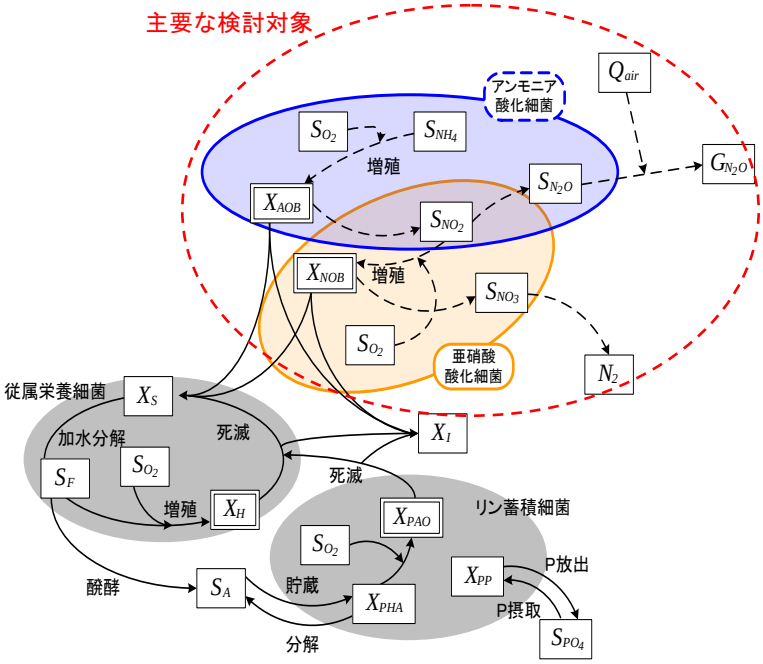
水処理方法は標準活性汚泥法とし、N_2O 生成の数学モデルの内容およびデフォルトの係数については文献[1)2)3)]およびそれらの引用文献等を参考に設定した。

検討にあたっては、我が国の実施設における活性汚泥モデルの適用事例の大半を占めかつ、有機物・窒素・りんを解析対象物質とする ASM2d を基本として、以下に示すモデル変更を行った。

- ASM2d は窒素処理の中間生成物である NO_2-N を NO_3-N と区別して予測するモデル構造となってはいないが、N_2O の生成を再現するため、ASM2d 上の S_{NO3} を S_{NO2} と S_{NO3} に分け、さらに S_{N2O} を組み込んだモデルを構築した。
- ASM2d では硝化細菌を X_{AUT} として一括して取り扱っているが、これをアンモニア酸化細菌 X_{AOB} と亜硝酸酸化細菌 X_{NOB} に分割して定義し、その生物反応を表現できるモデル構造とした。
- 好気槽排ガス中の N_2O 濃度を G_{N2O} と定義し、液相中の N_2O（S_{N2O}）が曝気により気相へ移行するプロセスを計算した。

主要な計算対象物質は S_{NH4}、S_{NO2}、S_{NO3}、S_{N2O}（水質項目）および、G_{N2O}（ガス）とした。ASM2d 変更モデル（N_2O 生成・排出モデル）の概要を図 1 に示す。

シミュレーションソフトウェアは AQUASIM2.0 を用いた。

モデル構成要素	モデル構造
① 溶存酸素（SO_2） ② 易分解性溶存態有機物（S_F） ③ 醗酵産物（S_A） ④ ｱﾝﾓﾆｱ態窒素（SNH_4） ⑤ **亜硝酸態窒素（SNO_2）** ⑥ **硝酸態窒素（SNO_3）** ⑦ りん酸態りん（SPO_4） ⑧ 非分解性溶存態有機物（S_I） ⑨ アルカリ度（S_{ALK}） ⑩ 溶存窒素（SN_2） ⑪ 遅分解性懸濁態有機物（X_S） ⑫ 非分解性懸濁態有機物（X_I） ⑬ 従属栄養細菌（X_H） ⑭ **アンモニア酸化細菌（X_{AOB}）** ⑮ **亜硝酸酸化細菌（X_{NOB}）** ⑯ りん蓄積細菌（X_{PAO}） ⑰ X_{PAO}細胞内蓄積ﾎﾟﾘりん酸（X_{PP}） ⑱ X_{PAO}細胞内蓄積有機物（X_{PHA}） ⑲ TSS（X_{TSS}） ⑳ **一酸化二窒素態窒素（SN_2O）** ㉑ **一酸化二窒素（GN_2O）**	解析対象物質：有機物・窒素・りん 

※モデル構成要素欄の下線太字は ASM2d から変更する項目を表す.
※モデル構造欄の Qair は「ASM 上の酸素供給量から計算される送風量」を表す.

図 1　ASM2d 変更モデル（N_2O 生成・排出モデル）の概要

2.2　キャリブレーション計算の実施

2.2.1　槽列モデルの構築

下水道局下水道技術研究開発センターに設置された水処理実験プラント２号機（標準法）の施設諸元に合わせた槽列モデルを構築した。

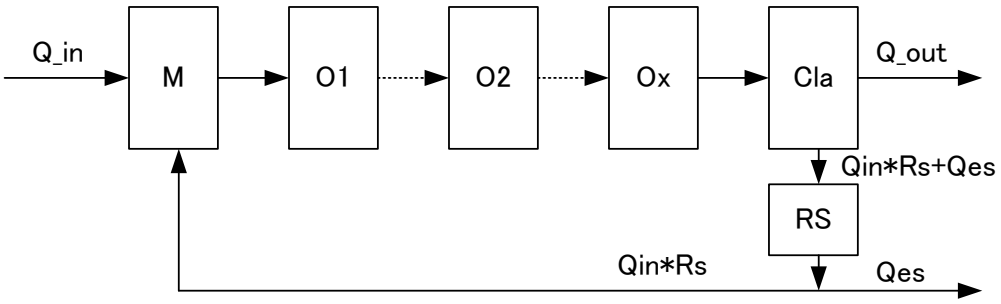
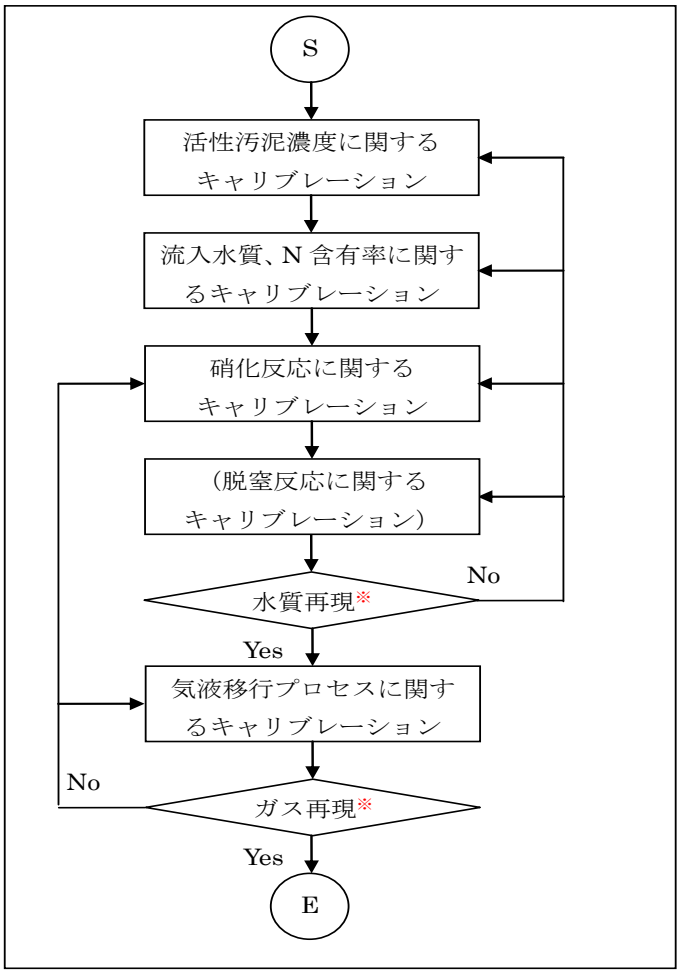


図 2　槽列モデルの概念図

2.2.2 キャリブレーションの検討方針

（１）検討手順

前項で構築した槽列モデルに N_2O 生成・排出モデルを適用し、水温条件は 20℃として、図 3 に示す手順で定常状態におけるキャリブレーションを行った（窒素項目のみ）。



※水質再現では各態窒素濃度（S_{NH4}、S_{N02}、S_{N03}）の再現検討を、ガス再現では各態 N_2O 濃度（S_{N20}、G_{N20}）の再現検討を行った

図 3 キャリブレーションの検討手順

（２）気液移行プロセスに関するキャリブレーション

気液移行プロセスに関するキャリブレーションは以下の方法で検討した。

① 送風量の検討方法

液相中の N_2O（S_{N20}）が曝気により気相へ移行するプロセスを計算する際に、送風量と移行量（移行割合）を関連づけて検討する必要がある。このため、シミュレーションでは、図 4 に示すように与条件として【活性汚泥混合液の溶存酸素濃度】を与え、強制的に DO を固定する計算を実施する。このときに、シミュレーション上で必要となる酸素供給量を集計し、溶解効率や空気比重、酸素割合等を考慮して送風量を推定した。

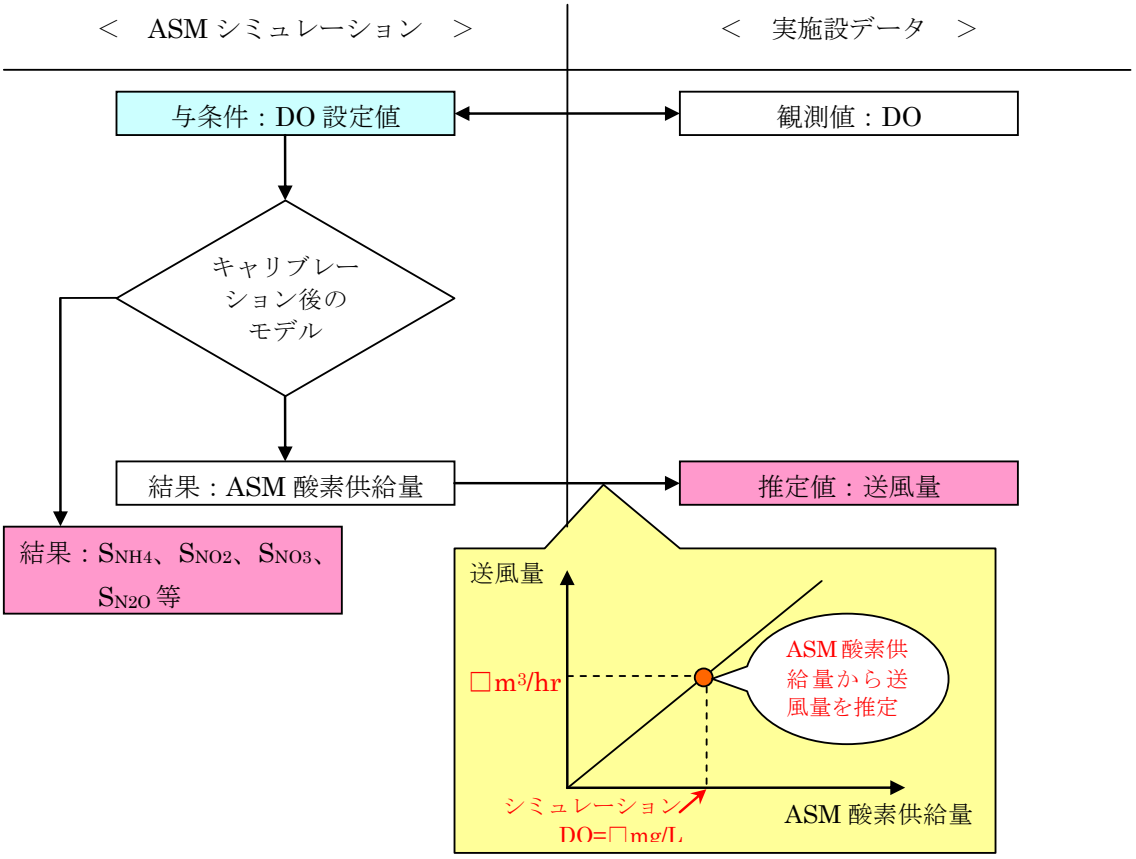


図 4　ASM シミュレーション結果と実施設データの対応

② 気液移行プロセスの検討方法

N_2O の気液移行は、ASM を実施設での N_2O 排出量が推定できるモデルに拡張することを試みた文献[3]に記載される下式より rN_2O（単位時間当たりに液体から気体へ放出される N_2O の量）を求めることで表現した。

$$r_{N2O} = H_{N2O} \cdot S_{N2O} \left(1 - \exp\left(-\frac{K_{L,N2O}a}{H_{N2O}} \cdot \frac{V_l}{Q_g} \right) \right) \cdot \frac{Q_g}{V_l}$$

r_{N20} ：SN20 が気体として放出される速度[g/(m³・d)]　　Q_g：送風量[m³/d]
V_l ：反応タンク容量[m³]　　H_{N20} ：N_2O のヘンリー定数[-]
S_{N20} ：D-N_2O 濃度[g/m³]　　$K_{L,N20}a$ ：総括 N_2O 移動容量係数[1/d]

2.3 N_2O の生成・排出を抑制できる送風条件の検討

シミュレーション計算により、N_2O の生成・排出抑制を可能とする送風条件を検討した。

水温条件は 20℃とし、排出抑制前の状態として、水量一定の条件で SRT もしくは HRT の設定値を変えて N_2O 排出量が異なる状況を表 1 に示す 3 ケース設定した。その上で、SRT もしくは HRT の設定値は変えずに、回路ごとの DO を変えてシミュレーションを行い、N_2O 生成・排出を抑制できる送風条件を合計で 5 条件検討した。シミュレーションは水量変動がない条件で連続 2 週間実施した。シミュレーションのイメージを図 5 に示す。

表 1 送風条件の検討ケース 政令値：0.16gN_2O/m^3

ケース	排出係数[g/m^3]	DO_1[mg/L]	DO_2[mg/L]	備 考
1	＜ 0.16	ケース 1-1	ケース 1-2	政令値よりも低い場合
2	≒ 0.16	ケース 2-1	ケース 2-2	政令値程度の場合
3	0.16 ＜	ケース 3-1	ケース 3-2	政令値よりも高い場合

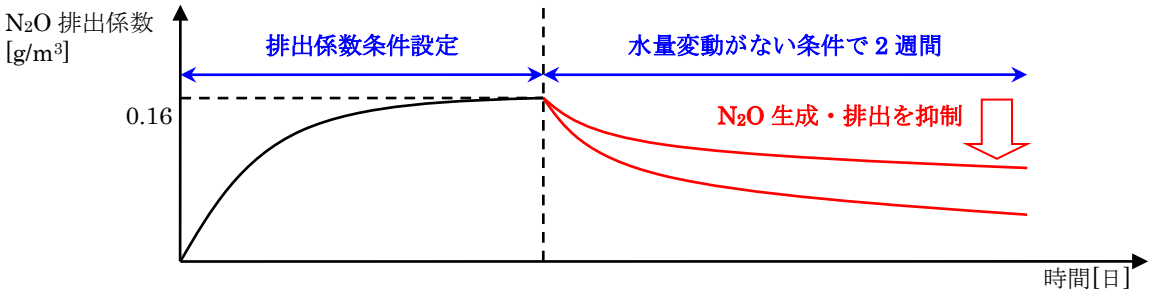


図 5 シミュレーションのイメージ（例：排出係数≒0.16）

2.4 水量変動および水温変更による N_2O 生成・排出への影響の検討

前項で N_2O 排出量を抑制できた条件のうち、ケース 2 DO2 の条件に関して水量変動および水温を 15℃に変更した計算を実施した。計算条件は以下の 4 ケースである。DO 変更条件で 14 日、水量変動条件で 14 日の計算を実施した。

表 2 送風条件の検討ケース

ケース	水温[℃]	流量変動 Q_1	流量変動 Q_2	備 考
4	20	ケース 4-1	ケース 4-2	
5	15	ケース 5-1	ケース 5-2	

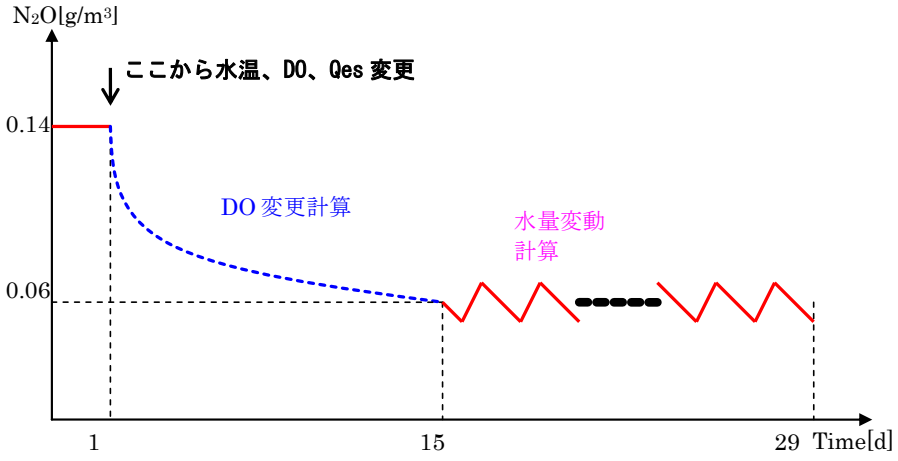


図 6 シミュレーションのイメージ

3. N_2O の生成・排出抑制シミュレーションの結果

3.1 N_2O の生成・排出モデルの構築

硝化反応での N_2O の生成を再現するため、アンモニア酸化細菌（AOB）による N_2O 生成モデルを構築した。また、生成した N_2O が曝気により気相と液相へ分配される現象を再現するため、N_2O に関する気液移行モデルを構築した。構築したモデルの反応速度式を以下に示す。

【N_2O 生成モデル】

○X_{AOB} の好気条件下での増殖による NO_2-N の生成

$$\mu_{AOB} \cdot \frac{S_{O2}}{K_{O2,AOB} + S_{O2}} \cdot \frac{S_{NH4}}{K_{NH4} + S_{NH4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AOB} \cdot CF \qquad (式\ 1_1)$$

○X_{AOB} の好気条件下での増殖による N_2O-N の生成

$$\mu_{AOB} \cdot \frac{S_{O2}}{K_{O2,AOB} + S_{O2}} \cdot \frac{S_{NH4}}{K_{NH4} + S_{NH4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AOB} \cdot (1 - CF) \qquad (式\ 1_2)$$

ここで、CF（Correlation function）は NO_2-N 生成量と N_2O-N 生成量の比を決定付ける値であり、S_{N02} が高いと S_{N20} 生成量が大きくなる数式となっている。

$$CF = \frac{1}{1 + \exp\left(slope \cdot \left(\frac{S_{NO2}}{K_{NO2,AOB} + S_{NO2}} - K\right)\right)}$$

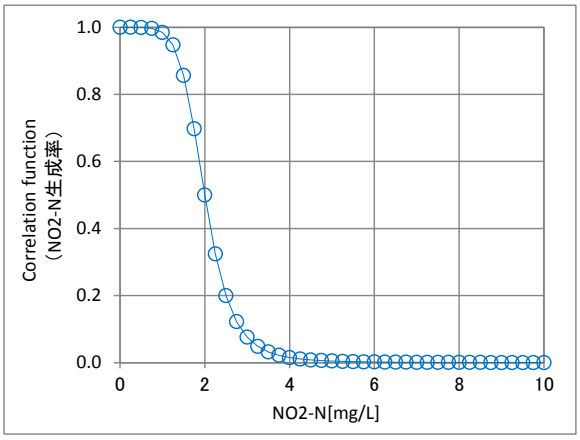


図 7 S_{N02} と CF の関係

○X_{NOB} の好気条件下での増殖による NO_3-N の生成

$$\mu_{NOB} \cdot \frac{S_{O2}}{K_{O2,NOB} + S_{O2}} \cdot \frac{S_{NO2}}{K_{NO2,NOB} + S_{NO2}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{NOB} \qquad (式\ 1_3)$$

【気液移行モデル】

$$r_{N2O} = C_{g,N2O} \cdot \frac{Q_g}{V_l} = H_{N2O} \cdot S_{N2O} \left(1 - \exp\left(- \frac{K_{L,N2O}a}{H_{N2O}} \cdot \frac{V_l}{Q_g} \right) \right) \cdot \frac{Q_g}{V_l}$$

r_{N20} ：S_{N20}が気体として放出される速度[g/(m³・s)]
$C_{g,N20}$ ：G-N_2O 濃度[g/m³]
Q_g ：送風量[m³/s]
V_1 ：反応タンク容量[m³]
H_{N20} ：N_2O のヘンリー定数[-]
S_{N20} ：液体中の N_2O 濃度[g/m³]
$K_{L,N20}a$ ：総括 N_2O 移動容量係数[/s]

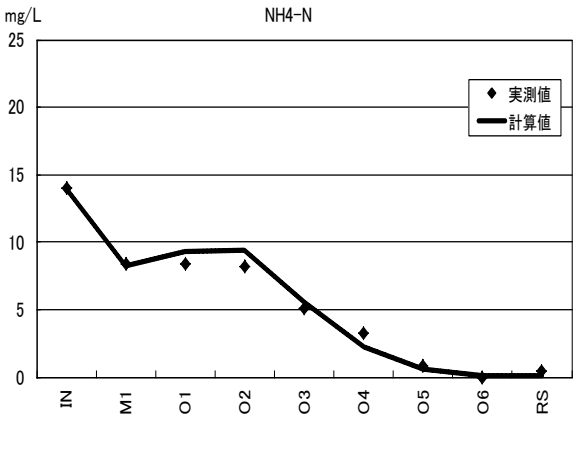
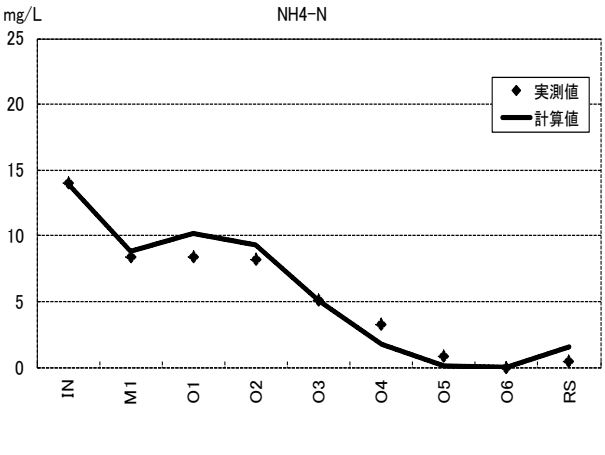
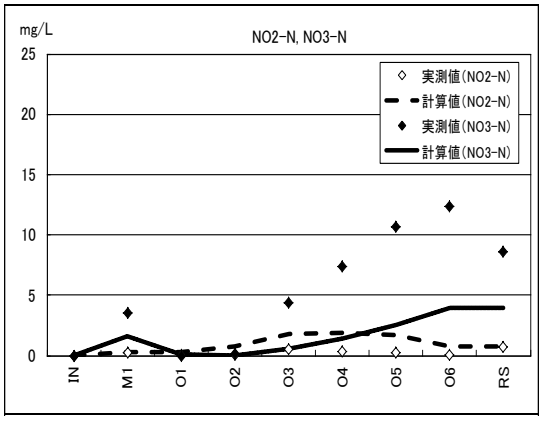
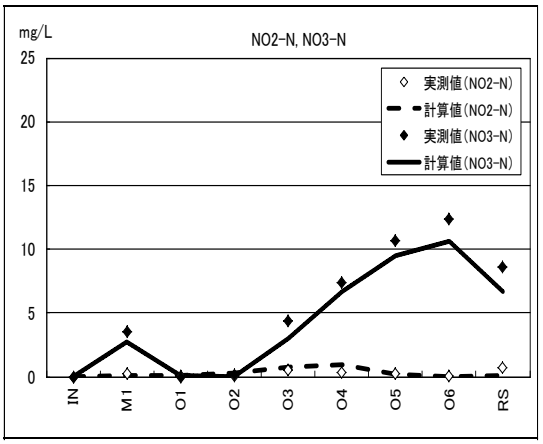
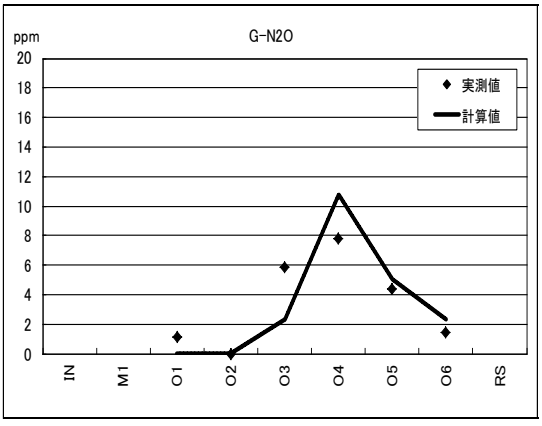
3.2 キャリブレーション計算の実施

下水道技術研究開発センターの水処理実験プラント標準法系列において、N_2O 排出係数が 0.07 gN_2O/m^3 の日の運転・水質・N_2O 排出データを用いてキャリブレーション計算を実施した。

「汚泥固形物濃度」、「汚泥の窒素含有率」、「硝化・脱窒反応」、「N_2O 生成量」、「N_2O 気液移行モデル」に関するキャリブレーション計算を実施して、実測値を再現した（図 8)。

表 3 キャリブレーションパラメータ

ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ項目	変更理由	変更したﾊﾟﾗﾒｰﾀ		ﾃﾞﾌｫﾙﾄ	ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ	単位
汚泥固形物濃度	MLSS が実測よりも高い	流入水有機物分画	X_S	74.8	108.9	gCOD/m³
			X_I	43.8	9.8	gCOD/m³
		生物自己分解における X_I 生成率	f_{XI}	0.10	0.05	gCOD/gCOD
		X_H の比自己分解速度	b_H	0.4	0.8	d^{-1}
		X_{PAO} の最大比増殖速度	μ_{PAO}	1.0	0	d^{-1}
汚泥の窒素含有率	汚泥窒素含有率が実測よりも低い	X_I の窒素含有率	i_{NXI}	0.02	0.036	gN/gCOD
		X_s の窒素含有率	i_{NXS}	0.04	0.072	gN/gCOD
		X_H、X_{AOB}、X_{NOB}、X_{PAO} の窒素含有率	i_{NBM}	0.07	0.0126	gN/gCOD
硝化・脱窒反応	・NH_4-N 濃度が実測より高く亜硝酸酸化の進行が遅い ・返送汚泥の脱窒を表現できていない	X_{AOB} の最大比増殖速度	μ_{AOB}	0.9	0.8	d^{-1}
		X_{NOB} の最大比増殖速度	μ_{NOB}	0.7	0.9	d^{-1}
		X_{AOB} 増殖における NH_4-N の飽和定数	$K_{NH4,AOB}$	0.945	0.10	gN/m³
		X_{NOB} 増殖における NO_2-N の飽和定数	$K_{NO2,NOB}$	0.588	0.12	gN/m³
		X_H 増殖・加水分解における DO 飽和定数	K_{O2}	0.2	0.05	gO_2/m^3
N_2O 生成量	N_2O 生成量整合	N_2O 生成率に関するパラメータ	Slope	25	28.9	-
N_2O 気液移行ﾓﾃﾞﾙ	気液分配が実測と不適合	20℃におけるヘンリー定数	H_{20}	1.6	1.6	-
		N_2O の総括物質移動容量係数	KLa	-	100	d^{-1}

デフォルト	キャリブレーション結果
	
	
気液移行モデルはデフォルトでの計算なし	

（IN：反応タンク流入水　M：混和タンク（反応タンク流入水と返送汚泥の混和ﾀﾝｸ）、01～06：好気タンク第1回路～第6回路、RS：返送汚泥）

図8　ﾃﾞﾌｫﾙﾄﾊﾟﾗﾒｰﾀとｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝﾊﾟﾗﾒｰﾀでの反応槽内の水質ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ結果

3.3 N_2O の生成・排出を抑制できる送風条件の検討

3.3.1 N_2O 排出係数が異なる 3 条件の設定

キャリブレーションの排出係数を 0.057gN_2O/m^3 と政令値より低い場合（ケース 1）と位置づけて、排出係数が政令値程度の条件（ケース 2）および排出係数が政令値より高い条件（ケース 3）を HRT もしくは SRT をキャリブレーション条件から変更することで設定した。

各パラメータの設定方法を表 4 に示した。MLSS 濃度を一定に調整しながら流入水量 Qin をキャリブレーション時の 1.5 倍、1.7 倍とした場合に、表 5 のとおり N_2O 排出係数が政令値程度の条件（ケース 2)、政令値より高い条件（ケース 3）となった。図 10 より SRT が 10 日程度を下回ると急激に N_2O 排出係数が増加した（ケース 3 では A-SRT が硝化に必要な値を下回っていた)。

表 4 N_2O 排出係数が異なる 3 条件の設定方法

No.	項目	設定方法	備　考
1	流入水量 Qin	**可変**	ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ時よりも増加させた
2	返送率	一定	ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ時と同じ
3	余剰汚泥引抜量 Qes	**可変**	MLSS が一定となるように調整した
4	MLSS 濃度	一定に調整	Qes の変更により一定に調整
5	DO	一定	ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ時と同じ
6	Qair	**可変**	計算条件により ASM 酸素供給量が変化するため Qair も変化する

表 5 N_2O 排出係数が異なる 3 条件の設定

排出係数	Qin [L/d]	Qin （倍率）	Qes [L/d]	返送率 [-]	MLSS [mg/L]	RSSS [mg/L]	SRT [d]	A-SRT [d]	必要 A-SRT [d]	必要 A-SRT比 [-]
ケース1（低）	1,641.6	1.0	12.7	0.706	1,971	4,763	15.6	13.0	5.8	2.27
ケース2（中）	2,462.4	1.5	24.0	0.706	1,993	4,816	8.3	6.9	5.8	1.20
ケース3（高）	2,790.7	1.7	30.0	0.706	1,975	4,773	6.6	5.5	5.8	0.96

排出係数	N2O 排出係数 [gN2O/m3]	X_AOB （末端） [mg/L]	X_NOB （末端） [mg/L]	X_AOB -X_NOB [mg/L]	X_AOB /X_NOB [-]
ケース1（低）	0.057	48.8	34.6	14.2	1.41
ケース2（中）	0.140	53.9	36.4	17.5	1.48
ケース3（高）	0.501	52.9	33.5	19.3	1.58

※A-SRTは第1回路を除いた部分が好気であるとして求めた（5/6=83%）。
※必要A-SRTは下水道施設計画・設計指針の式により求めた
→20.65×exp(-0.639×T)、水温T=20℃
※必要A-SRT比＝A-SRT／必要A-SRT

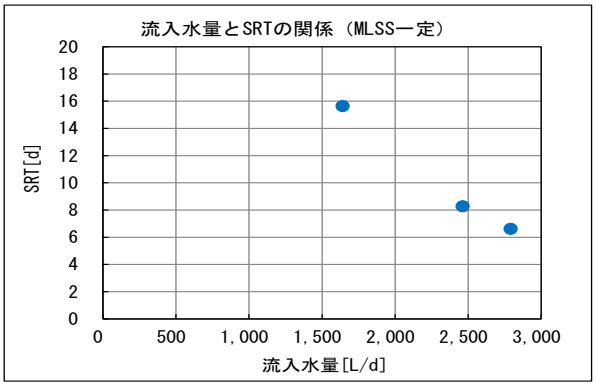


図 9 N_2O 排出係数が異なる 3 条件の流入水量と N_2O 排出係数の関係

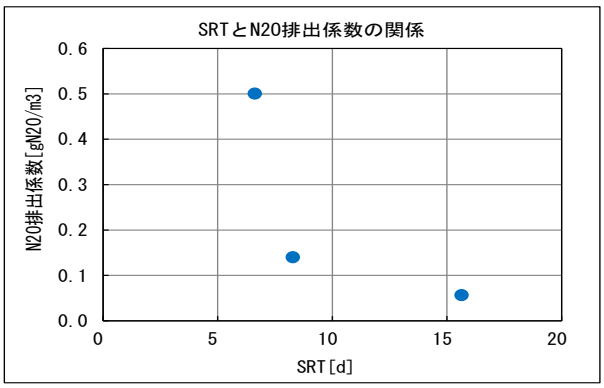


図 10 N_2O 排出係数が異なる 3 条件の SRT と N_2O 排出係数の関係

各ケースについて回路ごとの NO_2-N 濃度および N_2O 濃度を図 11～13 に示す。

ケース 1（低）とケース 2（中）では末端で NO_2-N がほとんど蓄積していないが、ケース 3（高）では AOB に対して NOB が少なく末端での NO_2-N 濃度が高く返送による NO_2-N の戻りが生じていた。

各ケースに対して、NO_2-N が蓄積すると回路毎の D-N_2O 濃度も G-N_2O 濃度も高くなった。ケース 3 はいずれの回路においても NO_2-N 濃度が高いため、N_2O 濃度も各回路で他 2 ケースを上回った。

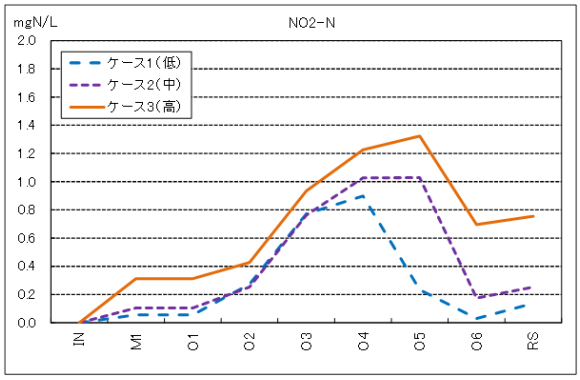


図 11　排出係数 3 ケースの回路別 NO_2-N 濃度

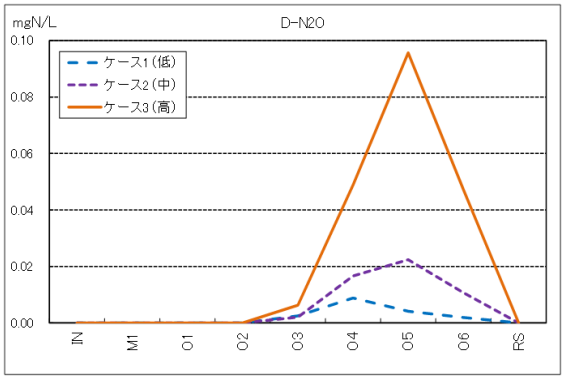


図 12　排出係数 3 ケースの回路別 D-N_2O 濃度

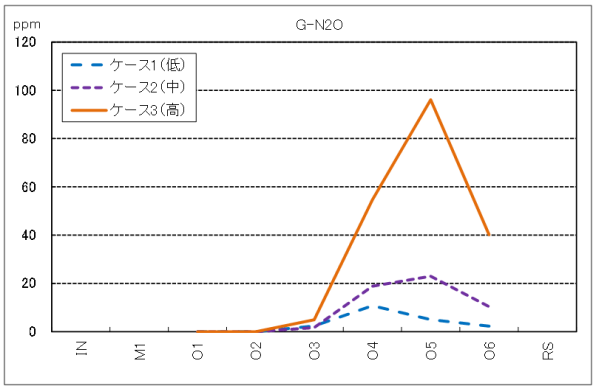


図 13　排出係数 3 ケースの回路別 G-N_2O 濃度

3.3.2　N_2O の生成・排出を抑制できる送風条件の検討

上記 3 ケースの排出係数に対して DO をそれぞれ表 6 のように設定して 2 週間の計算を行ったところ、表 7 および図 14 に示すように回路内の NO_2-N 蓄積量が減少することで、ケース 2、ケース 3 の DO_1 では N_2O 排出係数が 90%程度、DO_2 では N_2O 排出係数が 50%程度減少する結果が得られた。

表 6　DO 条件の設定結果

○回路ごとのDO設定値　　[mg/L]

DO条件	1回路	2回路	3回路	4回路	5回路	6回路
キャリブレーション	0.00	0.03	0.50	0.65	0.77	2.00
DO1	0.00	0.03	2.00	1.00	0.50	2.00
DO2	0.00	0.03	1.00	0.75	0.50	2.00

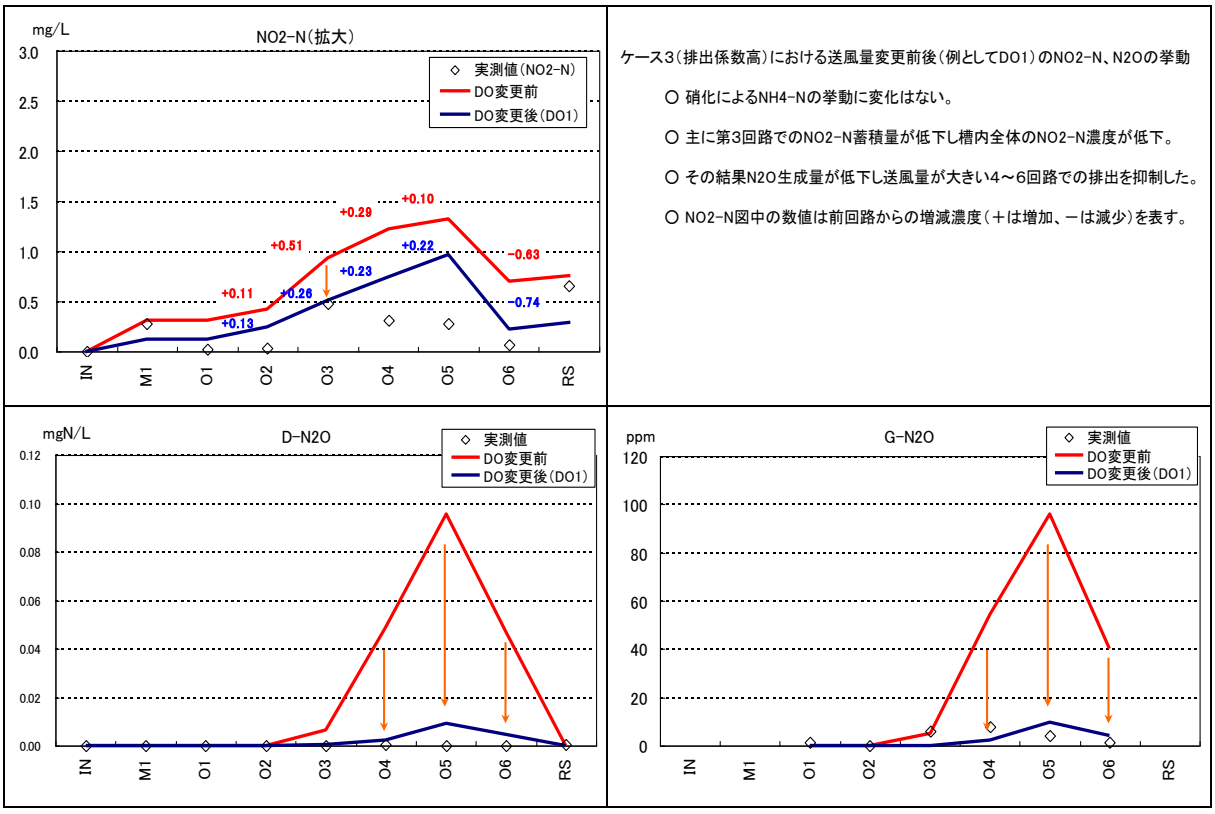
※赤字はキャリブレーションからの変更箇所

表 7 DO条件を変更した計算結果

排出係数条件		ケース3(高:0.501gN2O/m3)			ケース2(中:0.140gN2O/m3)			ケース1(低:0.057gN2O/m3)		
DO条件		DO変更前	DO1	DO2	DO変更前	DO1	DO2	DO変更前	DO1	DO2
Qin	[L/d]	2,790.7	2,790.7	2,790.7	2,462.4	2,462.4	2,462.4	1,641.6	1,641.6	1,641.6
SRT	[d]	6.6	6.6	6.6	8.3	8.3	8.3	15.6	15.6	15.6
A-SRT	[d]	5.5	5.5	5.5	6.9	6.9	6.9	13.0	13.0	13.0
必要A-SRT	[d]	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
必要A-SRT比	[-]	0.96	0.96	0.96	1.20	1.20	1.20	2.27	2.27	2.27
送風量	[L/d]	27,260	28,913	27,692	25,185	26,730	25,583	19,300	20,663	19,676
DO変更前からの増減		-	+6%	+2%	-	+6%	+2%	-	+7%	+2%
N2O排出係数	[gN2O/m3]	0.501	0.039	0.190	0.140	0.010	0.059	0.057	0.002	0.009
DO変更前からの増減		-	-92%	-62%	-	-93%	-58%	-	-96%	-84%
末端NH4-N濃度	[mg/L]	0.3	0.1	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0

※DO変更前:キャリブレーション時のDO条件

※キャリブDOからの増減＝「DO1およびDO2における送風量・N2O排出係数」÷「キャリブDOにおける送風量／N2O排出係数」－1



※グラフ中の「実測値」はキャリブレーション時の実測値を表している。

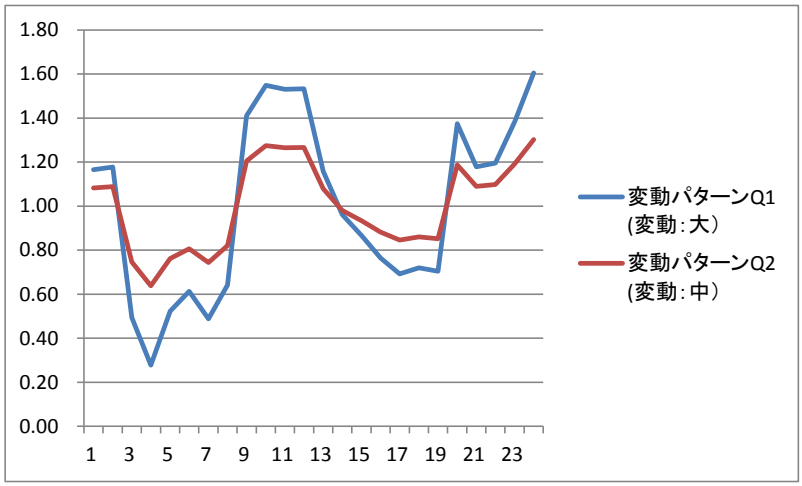
図 14 送風量の変更前後での NO_2-N、N_2O の挙動（例：排出係数ケース 3 DO_1）

3.4 水量変動および水温変更による N_2O 生成・排出への影響の検討

3.4.1 水量変動の影響

排出係数ケース 2（政令値程度の条件）の DO_2 条件に対して、2 パターンの水量変動を与えて 2 週間の計算を行った。水量変動パターンは、図 15 に示すように、区部センターの最大水量変動幅とその半分で設定した。いずれも日平均水量が水量変動前の値と変わらないように流入水量を設定した。日平均水量が変わらないため余剰汚泥引抜量は一定、返送汚泥は返送率一定とした。

その結果、水量変動が大きいパターン（Q_1）では水量変動前（0.059 gN_2O/m^3）に比べて N_2O 排出係数が増加した（0.092 gN_2O/m^3）。Q_1 よりも水量変動幅が少ない条件（Q_2）では N_2O 排出係数の増加幅はこれよりも低い値であった（0.062 gN_2O/m^3）。A-SRT は硝化に必要とされる値を満たしており、水量変動を与えても硝化処理が大きく悪化することはなかった。



※変動パターン Q_2（変動：中）は変動パターン Q_1（変動：大）の 1/2 の変動幅

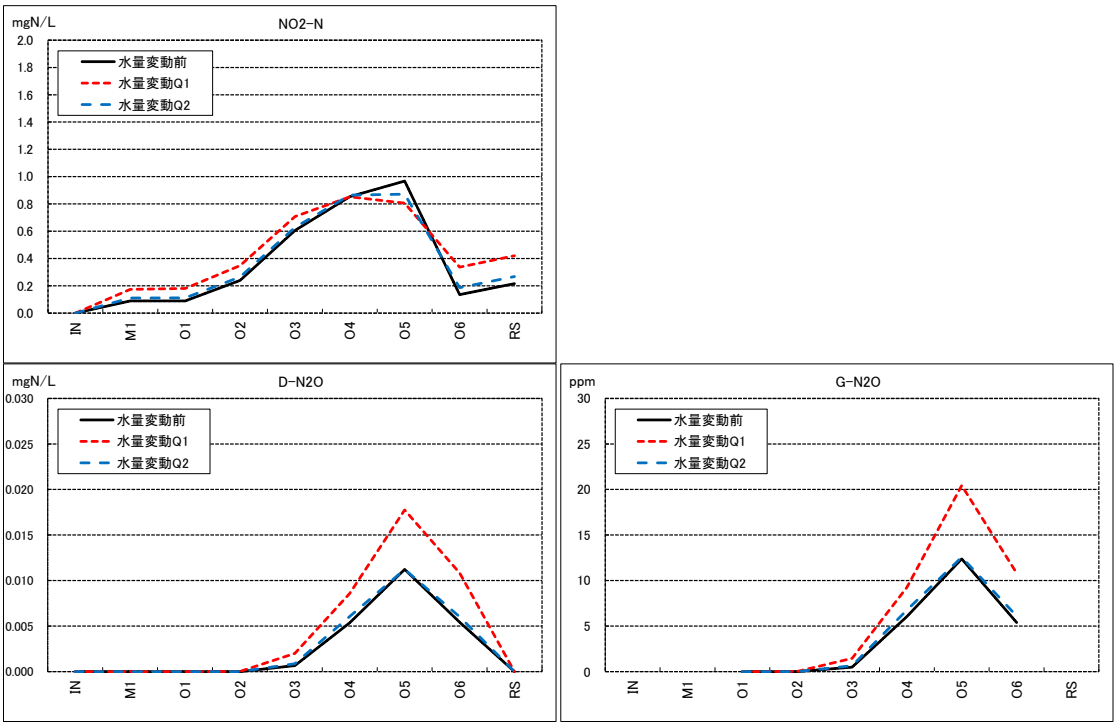
図 15 水量変動パターン

表 8 水量変更時の計算結果

○水量変動計算(20℃)

条件				DO変更前	DO変更後	水量変動後	
						Q1(変動:大)	Q2(変動:中)
時間				1日目最終時刻	15日目最終時刻	29日目日平均	29日目日平均
計算結果	送風量		L/d	25,185	25,583	25,606	25,603
	MLSS濃度		mg/L	1,993	1,992	1,991	1,991
	末端濃度	NH4-N	mg/L	0.08	0.06	0.26	0.09
		NO2-N	mg/L	0.18	0.14	0.34	0.19
		N2O-N	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01
	G-N2O(6回路)		ppm	10.4	5.4	10.8	6.1
	N2O排出係数※1		gN2O/m3	0.140	0.059	0.092	0.062
SRT計算	余剰汚泥引抜量		L/d	24	24	24	24
	返送率		–	0.706	0.706	0.706	0.706
	水温		℃	20	20	20	20
	RSSS濃度		mg/L	4,816	4,813	4,812	4,810
	SRT		日	8.3	8.3	8.3	8.3
	A-SRT※2		日	6.9	6.9	6.9	6.9
	必要A-SRT※3		日	5.8	5.8	5.8	5.8
	必要A-SRT比※4		–	1.20	1.20	1.20	1.20
						槽容量 [L]	480
						好気槽比率 [–]	83%

※1:排出係数は1日目、15日目、29日目の日平均値
※2:1回路を除いた箇所(83%)を好気槽としてA-SRTを計算した
※3:必要A-SRTの計算:20.65×exp(-0.0639×T)（下水道施設計画・設計指針 2009年版、δ =1とした）
※4:必要A-SRT比＝A-SRT／必要A-SRT



※水量変動前：15 日目最終時刻（DO 変更後）、水量変動 Q_1、Q_2：最終日＝29 日目平均値

図 16 NO_2-N および N_2O の槽内図

3.4.2 水温変動の影響

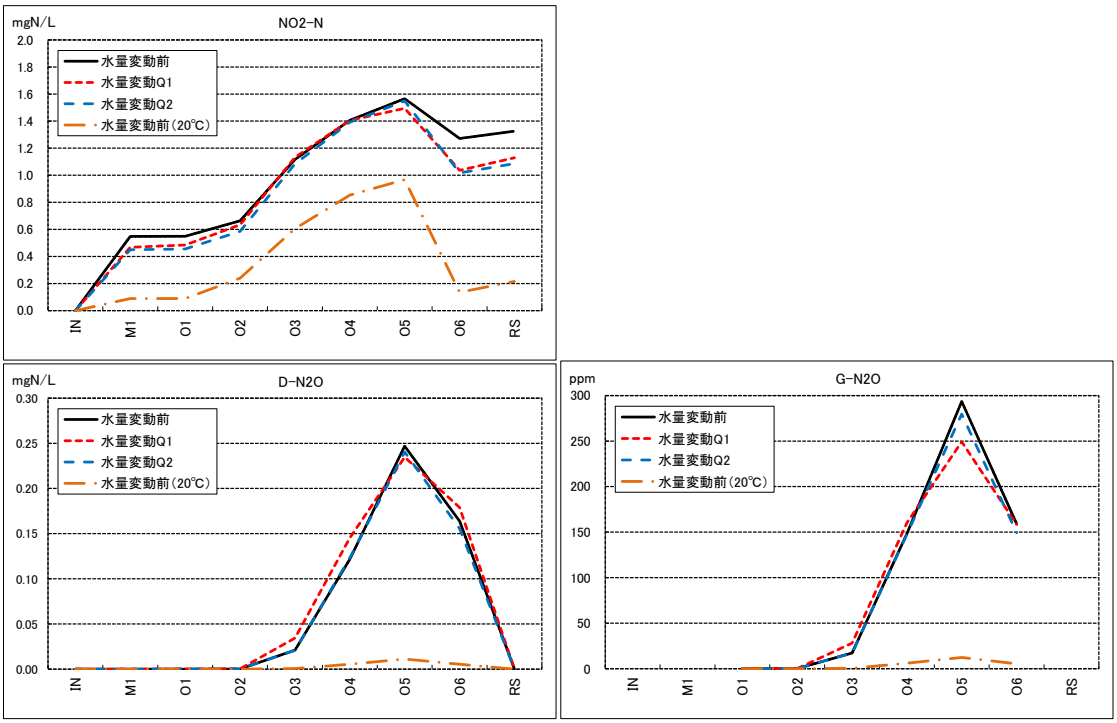
A-SRT が必要値を満たす条件で水温 15℃（1～29 日）による計算を行ったところ、水量変動を開始する前（15 日目）に水温の低下と SRT の上昇により AOB と NOB の差が拡大して NO_2-N が蓄積し、N_2O 排出係数が 10 倍程度に増加した。また、SRT の増加により MLSS 濃度が 2,400mg/L 程度まで増加した。水温変動後は水量変動 Q_1 で末端 NH_4-N 濃度が高くなったが、N_2O 排出係数はいずれの水温条件でも大きく変わらなかった。

表 9 水温変更時の計算結果

○水温変更計算（15℃）+2日目以降は必要A-SRT比=1.0

条件				DOおよび水温変更前	DOおよび水温変更後	水量変動後	
						Q1（変動：大）	Q2（変動：中）
時間				1日目最終時刻	15日目最終時刻	29日目日平均	29日目日平均
計算結果	送風量		L/d	25,185	22,688	22,410	22,632
	MLSS濃度		mg/L	1,993	2,410	2,437	2,441
	末端濃度	NH4-N	mg/L	0.08	0.47	1.06	0.48
		NO2-N	mg/L	0.18	1.27	1.04	1.02
		N2O-N	mg/L	0.01	0.16	0.18	0.16
	G-N2O（6回路）		ppm	10.4	159.0	158.3	149.4
	N2O排出係数※1		gN2O/m3	0.140	1.338	1.359	1.289
SRT計算	余剰汚泥引抜量		L/d	24.0	20.9	20.9	20.9
	返送率		–	0.706	0.706	0.706	0.706
	水温		℃	20	15	15	15
	RSSS濃度		mg/L	4,816	5,824	5,889	5,898
	SRT		日	8.3	9.5	9.5	9.5
	A-SRT※2		日	6.9	7.9	7.9	7.9
	必要A-SRT※3		日	5.8	7.9	7.9	7.9
	必要A-SRT比※4		–	1.20	1.00	1.00	1.00
						槽容量 [L]	480
						好気槽比率 [–]	83%

※1：排出係数は1日目、15日目、29日目の日平均値
※2：1回路を除いた箇所（83%）を好気槽としてA-SRTを計算した
※3：必要A-SRTの計算：20.65×exp(-0.0639×T)（下水道施設計画・設計指針 2009年版、δ =1とした）
※4：必要A-SRT比＝A-SRT／必要A-SRT



※水量変動前：15 日目最終時刻（DO 変更後）、水量変動 Q_1、Q_2：最終日＝29 日目平均値

図 17　NO_2-N および N_2O の槽内図

4. まとめ

活性汚泥モデル（ASM）に N_2O 生成＋気体への移行モデルを組み込んだモデルを用いて、反応槽中の NO_2-N 濃度が 0.6 mg/L を超えないように好気槽各回路への送風量を制御することにより、N_2O 排出量を抑制できることが明らかとなった。

また、今後反応槽中の NO_2-N の N_2O-N への転換率が DO 条件によって異なる（DO が高いほど N_2O への転換率が小さい）現象についてもモデルに組み込むことで、モデルの精度をさらに高めることができると考えられる。

参考文献

1) Ni, Bing-Jie, et al. "Evaluating Four Mathematical Models for Nitrous Oxide Production by Autotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria" Biotechnology and Bioengineering", Vol. 110, No. 1, pp.153-163,1996 January, 2013

2) Houweling, Dwight, et al. "N_2O emissions: modeling the effect of process configuration and diurnal loading patterns." Water Environment Research 83.12 (2011): 2131-2139.

3) R. v. Schulthess, et al. "RELEASE OF NITROUS OXIDE (N_2O) FROM DENITRIFYING ACTIVATED SLUDGE: VERIFICATION AND APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL", Wat. Res. Vol. 30, No. 3, pp. 521-530, 1996

2-4-3 森ヶ崎水再生センター太陽光発電設備工事の設計について

建設部 設備設計課 根岸 雄一郎

1. はじめに

東京都の下水道事業は、汚水の処理による生活環境の改善、浸水の防除及び公共用水域の水質保全等、非常に重要な役割を担っている。一方、下水を処理する過程で大量の温室効果ガスを排出しており、その量は都庁の事業活動で排出される温室効果ガスの約 38%（2012 年度実績）を占め、東京都下水道局（以下、「当局」という。）は温室効果ガス排出量の削減に対する大きな責務を負っている。

当局は、温室効果ガス排出量の削減を「アースプラン 2010」、「経営計画 2013」に基づき実施している。さらに、2014（平成 26）年 6 月に策定したエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」においても、「総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合を 2024（平成 36）年度までに 20%以上にすること」を目指しており、温室効果ガス排出量削減に加え、省エネルギー、創エネルギーの取組をさらに加速、進化させている。

本稿では、これら取組に位置付けられた未利用・再生可能エネルギー活用の一環である太陽光発電の導入として、森ヶ崎水再生センター（以下、「当センター」という。）で施工中であるメガワット級（1,000kW）太陽光発電設備の概要及び機器構成の検討等について報告する。

2. 施設概要

当センターは、大田区の全部及び世田谷・品川・目黒各区の大部並びに渋谷・杉並区の一部等の地域から流集する下水を処理して東京湾に放流する施設である。

処理施設は平和島運河を挟み東西に分かれており、それぞれ“東処理施設”、“西処理施設”と呼んでいる。

3. 森ヶ崎水再生センター太陽光発電設備

(1) 特徴及び配置計画

太陽光発電は、温室効果ガスの発生がゼロであることと、稼働部分を必要とせず維持管理面で有利であり、一般家庭も含めて導入が比較的容易な再生可能エネルギーであるが、大規模の太陽光発電設備を構築するためには、エネルギーの特性上、規模に応じた設置面積を確保することが前提であり、用地買収等の課題が大きい。

当局では、下水処理に係る広大な敷地面積に着目し、上部空間の有効利用を図る方法として、処理施設における臭気対策用の蓋（以下、「覆蓋」という。）に太陽光発電設備を構築することを計画した（図 1）。また、当センターの東処理施設における反応槽 4 系統のうち、1・2 系反応槽については全体的に施設の老朽化が進んでおり、特に反応槽の覆蓋について更新時期を迎えていたため、覆蓋の更新と合せて太陽光発電設備を施工することとした。

通常、太陽電池モジュールについては、固定用の専用の架台が必要となり、設置箇所の制約条件となっている。そこで、老朽化した覆蓋の更新に併せ、太陽電池モジュール架台と覆蓋機能を兼ねた架台を採用し上部空間の有効利用を行った（図 2）。また、太陽電池モジュールを覆蓋上部に配置することにより、FRP 製である覆蓋の紫外線による劣化を防ぎ、補修塗装にかかる費用削減も期待できる。

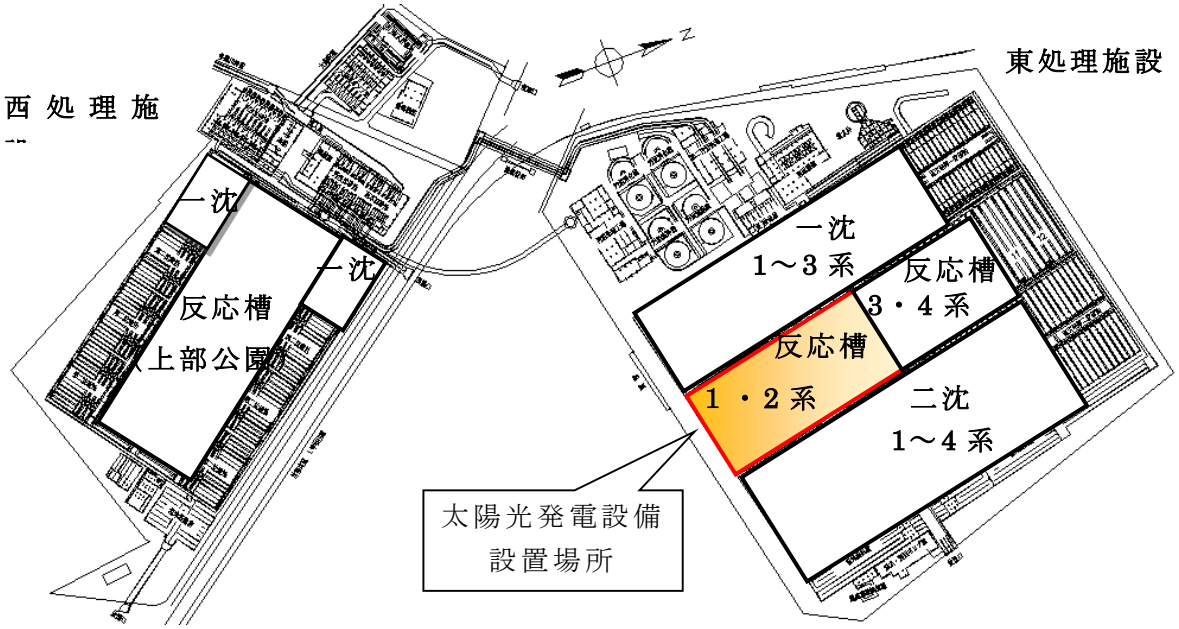


図 1　太陽光発電設備設置場所

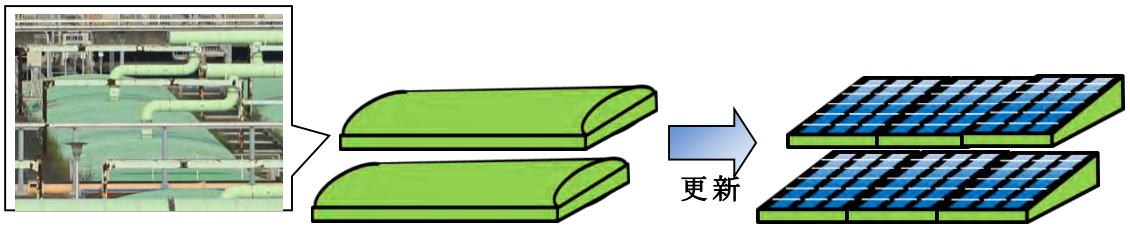


図 2　太陽電池モジュール架台兼用覆蓋イメージ

(2) 太陽光発電設備の構成及び発注仕様

今回導入する太陽光発電設備の構成を図 3 に、発注仕様を表 1、表 2 に示す。

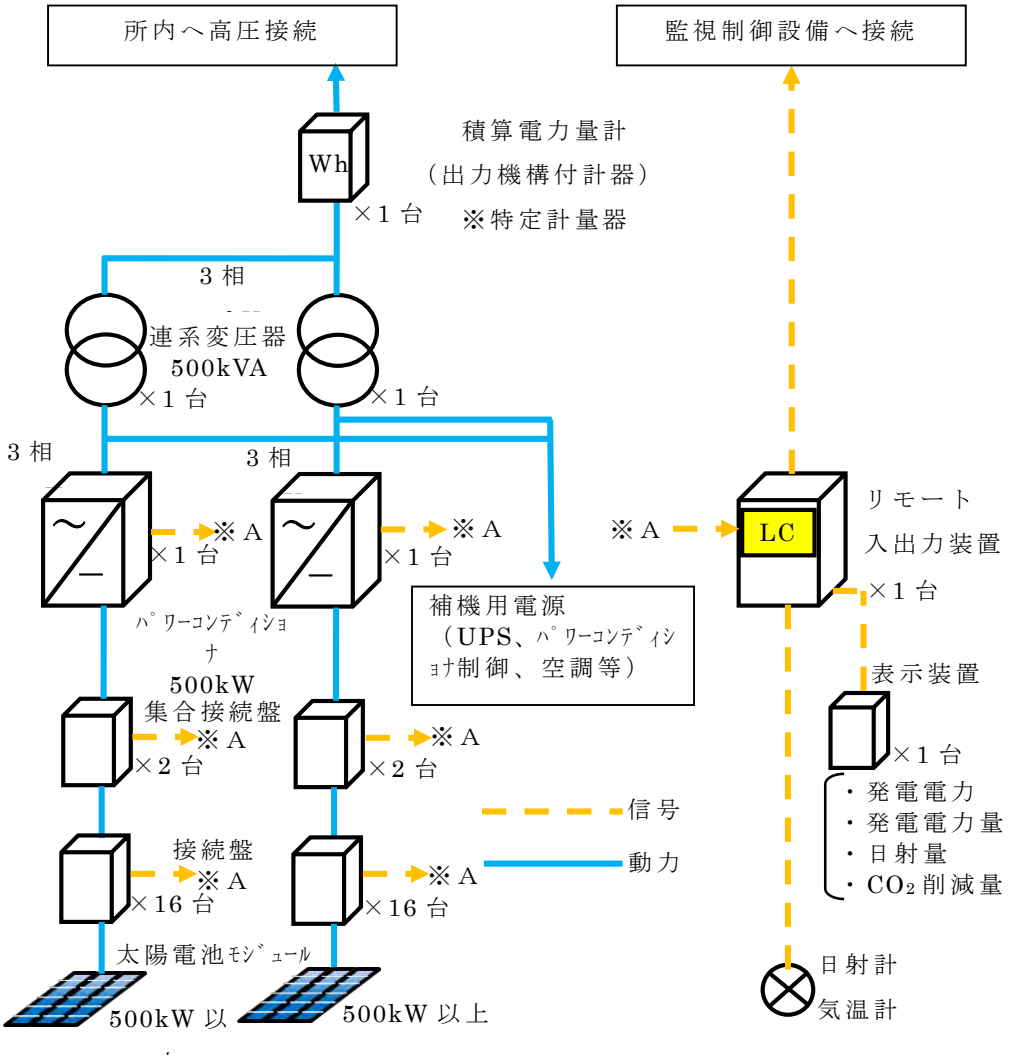


図 3　太陽光発電設備の構成

表 1　太陽電池モジュールの発注仕様

	仕　様
公称最大出力	1,000kW 以上
備　考	架台…ガラス繊維強化プラスチック製 （反応槽覆蓋機能を兼ねる）

表 2　交直変換装置（パワーコンディショナ）の発注仕様

	仕　様
定格容量及び台数	500kW×2 台
総合効率	95%以上

(3) 主要機器の検討内容

太陽光発電設備における主要機器の主な検討内容は、次のとおりである。

ア　交直変換装置（以下、「パワーコンディショナ」という。）

太陽電池モジュールにて発電した電気は直流であるため、パワーコンディショナで交流に変換する。今回導入するパワーコンディショナについては、500kW×2 台構成（計1,000kW）とした。これは、経済性及び機器故障や保守等に伴う停止の影響等を、総合的に評価したものである（表 3)。

表 3　パワーコンディショナ構成比較

容量及び台数	250kW×4 台	500kW×2 台	1,000kW×1 台
イニシャルコスト	○	◎	△
冗長性	パワーコンディショナ(1 台)故障時に 250kW 出力低下 ○	パワーコンディショナ(1 台) 故障時に 500kW 出力低下 △	パワーコンディショナ (全 1 台)故障時に 1,000kW 出力低下 ×
設置スペース	5.76 ㎡ （1.2m×1.2m×4 台） △	2.66 ㎡ （1.9m×0.7m×2 台） ○	5 ㎡ （5.0m×1.0m×1 台） △
総合評価	△	○	×

イ　所内連系設備

パワーコンディショナで変換された電気については、太陽光発電専用の変電設備（高圧変圧器等）をパワーコンディショナ直近に新設し、所内へ高圧連系を行うこととした。

太陽電池モジュールの発電出力は低圧であるため、高圧と比較して電圧降下等の損失が大きく、特に 1 系統あたり 500kW と大容量なのでケーブルサイズが大きくなる。また、付近の電気室における配線スペース等に余裕がなく、大容量の低圧ケーブルの布設は困難であった。このため、パワーコンディショナ及び変電設備を太陽電池モジュールの直近に設置することで、低圧ケーブルを最短距離とし、以降、所内への接続点までで配線は高圧ケーブルを採用した。

ウ　情報収集装置及び計測器

エネルギー管理を目的とした情報収集のため、発電した電力量と相関性のあるデータである日射強度及び外気温度について計測器を導入した。さらに、太陽光発電設備の状態、故障及び計測信号を当センターの既設監視制御設備に接続するため、リモート入出力装置（情報変換装置）を導入した。なお、リモート入出力装置は、太陽電池モジュール数千枚

規模にわたる故障箇所及び状態判別等を現場で容易に行うため、専用の液晶表示装置を内蔵するものとした。

エ　太陽電池モジュールの傾斜角度

太陽電池モジュールについては発電効率を高めるために適度な傾斜角度が必要であるが、太陽電池モジュールの傾斜角度を増加させた場合は、その端部の高さも増加する。その場合、影の影響により後方の太陽電池モジュールに十分な太陽光が照射されなくなることを防ぐため、前後の設置間隔を広げる必要がある。今回、既設覆蓋と同位置で、太陽電池モジュール付覆蓋に置き換えるため、太陽電池モジュールの前後間隔を調整することができない。このため、影による影響と発電電力量を考慮して、太陽電池モジュールの傾斜角度を 10° とした。

4. 環境価値の利用方法

(1) 総量削減義務と排出量取引制度の概要及び環境価値利用のための対応

当センターは、都民の健康と安全を確保する環境に関する条例（環境確保条例）に基づく総量削減義務と排出量取引制度（以下「本制度」という。）における対象事業所として東京都環境局より指定を受けている。本制度の対象となる事業所は、都内におけるエネルギー消費量の特に多い事業所に限定され、都内に約 1400 事業所が存在する。当センターについても対象事業所としての指定を受けており、温室効果ガス排出量は当局で最も大きい。

本制度対象事業所では、年度ごとに温室効果ガス排出量を算定し、過去の温室効果ガス排出量から算定される基準排出量と比較して、2010 年度以降の各計画期間内に一定割合以上の温室効果ガス削減義務が課せられる。また、義務不履行の場合の罰則も規定されている。

温室効果ガス排出量削減のためには、省エネ化の推進や排出量取引による削減量の調達等の手段が存在するほか、本制度では再生可能エネルギーの導入を推進しており、再生可能エネルギーにより発電した電気については、付加価値と合せて 1.5 倍分の温室効果ガス削減量が認められる。

本制度において、計量した電力量が環境価値として認められるためには、次の点に注意が必要である。

ア　発電電力を計測するための積算電力量計は、計量法に基づく特定計量器とする必要がある。

なお、変成器付計器の場合は、変成器等についても合わせて検定を受ける必要がある。

イ　計測した電力量の情報を目視等により直接管理せず、監視制御設備における帳票データ等を根拠にする場合で、積算電力量計に発信装置付計器（パルス方式）を採用する場合は、監視制御設備を含めて特定計量器としての検定を受ける必要がある。なお、積算電力量計について出力機構付計器（電文方式）を採用する場合は、監視制御設備の検定は不要である。

ウ　発電補機（UPS、パワーコンディショナ制御、空調等）及び送電補機（昇圧用の変圧器）により消費した電力については、環境価値として認められないため、個別計測によ

り全発電電力から差し引くか、これらの補機類があらかじめ控除された地点による計量が必要である。

(2) 今回の太陽光発電設備における対応

計量方法について東京都環境局と事前協議を行い、発電電力量を算定するための積算電力量計を1台設置することとした（図3)。設置時の検討内容については、次のとおりである。

ア　積算電力量計は特定計量器とした。また、容量が大きく、変成器付計器を採用したため、電力量の計測に必要な接地形計器用変圧器及び変流器と併せて検定を受けるものとした。

イ　当センターは設備規模が大きく、目視等による個別の計測では対応が煩雑となるため、監視制御設備における帳票データ等を根拠にすることとした。このため、積算電力量計単体で検定を受けることができる出力機構付計器（電文方式）を採用した。

ウ　積算電力量計を連系変圧器一次側に設置することで、発電補機及び送電補機により消費した電力を控除した電力量が直接計測できるため、積算電力量計は1台とした。

5. 導入効果（想定）

(1) 年間発電電力量

今回の太陽光発電における年間発電電力量は約 112 万 kWh である。この値は、当センターで 1 年間に使用する電力量の約 1%程度であり、発電した電力は当センター内で全て自家消費される。なお、年間発電電力量は「太陽光発電システムの発電電力量推定方法（JISC8907:2005)」に基づき算定した。

(2) 温室効果ガスの年間削減量

前項で算定した年間発電電力量に、単位電力量あたりの温室効果ガス排出係数（※1）を乗じることによって算定される、温室効果ガス削減量は約 428tCO_2 である。これは、森林面積換算（※2）で約 119ha 程度である（代々木公園の約 2 倍相当。)。

（※1）第一計画期間(2010～2014 年度)の排出係数（0.382 tCO_2/千 kWh）を採用。

（※2）森林面積換算値は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)資料による。

6. 周辺環境に及ぼす影響

太陽光発電については、太陽電池モジュールによる光の反射に伴う「光害」の影響が懸念される。今回は次の点について検討及び調査し、防眩対策は行わないものとした。

(1)近隣住民に対する影響

太陽電池モジュールの方向は海側であり、当センター東処理施設の周囲には、隣接する住宅及び高層建築物等がなく影響はない。

(2)航空機に対する影響

当センターは東京国際空港に近接しており、付近上空は離発着する航空機が通過する頻度が高い。このため、国土交通省東京航空局東京航空事務所に航空法等の規制について確認したところ、太陽電池モジュールの反射光に対する規制はなく、灯火にも該当しないため、問題ないことが確認できた。

7. おわりに

当局では、葛西水再生センターにて 490kW の太陽光発電の導入実績があるが、メガワット級の太陽光発電の導入は初である。

今回導入する太陽光発電設備では、老朽化した覆蓋の更新タイミングを利用したことで、施工の合理化及び上部空間の有効利用を同時に実現できた。

なお、覆蓋の更新は 1・2 系反応槽の全てに対して行うが、太陽電池モジュールは、採用する製品の効率・形状等により覆蓋全てを覆い尽くせない。太陽電池モジュールで覆えない箇所は紫外線による劣化が懸念されるため、設置箇所と同様に紫外線対策が必要である。これについては、保守性に優れ、景観に調和した方法を前提として、詳細仕様を決定していく必要がある。

以上の検討も含め、引き続き関係者との調整を密に行うことで、太陽光発電設備としての全体品質の向上に貢献していく。

2-4-4 汚泥焼却炉の計画的管理による温室効果ガスの削減

流域下水道本部 技術部 施設管理課 北島 秀彦

1. はじめに

東京都の下水道事業では、都民に安全で快適な生活環境を提供するため、区部、流域合わせて約 540 万 m³/日（平成 25 年度）の下水を処理している。この過程において、多くのエネルギーを使用するため、大量の温室効果ガスを排出している。

そこで、東京都下水道局は地球温暖化防止に貢献するため、「アースプラン 2010」計画を策定し、2020 年度までに下水道事業から排出される温室効果ガスを 2000 年度比で 25%以上削減することを目標として、温室効果ガス削減の取組を実施している。

下水処理は、主に汚水の処理とその過程で発生する汚泥の処理に分類できるが、本稿は、汚泥処理の中でも特に温室効果ガスの排出量が多い、汚泥焼却処理での削減について、流域下水道本部で取り組んでいる焼却炉の計画的管理と、それによる温室効果ガス削減効果について報告するものである。

2. 焼却炉の概要と温室効果ガスの排出状況

流域下水道本部には、東京都の多摩地区に 7 つの水再生センターがあり、平成 25 年度の実績では、1 日当たり 92 万 m³ の下水を処理し、発生する 709t の脱水汚泥を全量焼却処理した。

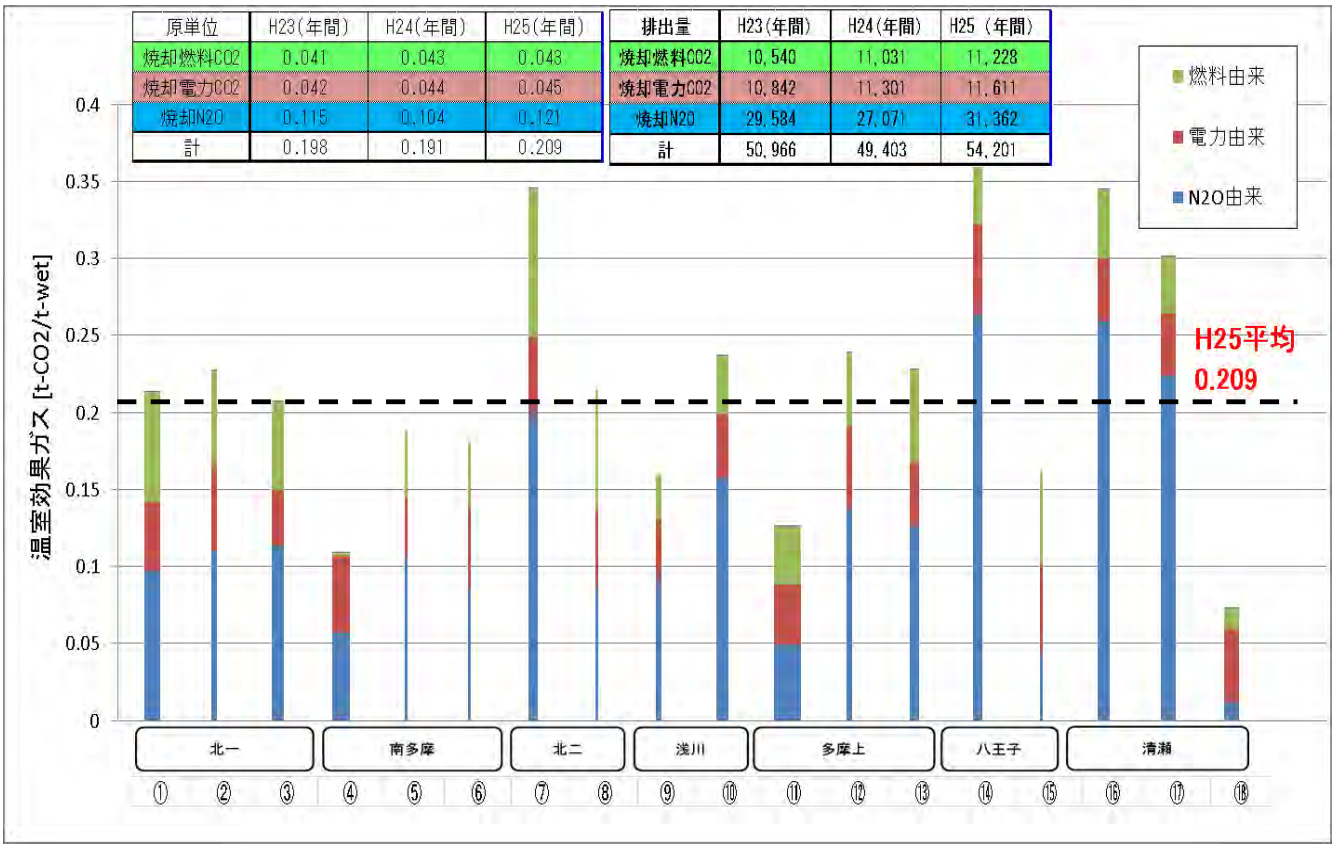


図 1 汚泥焼却炉温室効果ガス排出管理図（平成 25 年度実績）

汚泥焼却炉は各センターに 2～3 炉あり、計 18 炉体制で脱水汚泥を処理している。その中で常時稼働している焼却炉は、センターごとに 1～2 炉であり、それぞれの焼却能力は、処理区別の発生汚泥量等により、1 日当たり 40t～130t と、様々な規模の炉が配置されている。

これらの炉からの温室効果ガスの排出状況について、ここでは汚泥処理にかかわる主に 3 つのガスの推移を示す。図 1 中の表は、下段から焼却由来 N_2O、電力由来 CO_2、燃料由来 CO_2 の排出量を示し、平成 23 年度から 25 年度の 3 か年で、5.1 万 t　4.9 万 t　5.4 万 t と安定していないことがわかる。

図 1 のグラフは、下水道局で活用している温室効果ガス排出量管理図である。これは、各焼却炉の排出量の原単位を表したもので、棒の高さ（縦軸）は、各指標を積み上げたもので、下段から N_2O 由来、電力量由来、燃料由来の各 CO_2 となっている。また、棒の幅は、年間の汚泥処理量を表しており、広いほど年間の処理量が多いことになる。

破線は、年間の平均原単位で、平成 25 年度は 0.209 となっており、この線より高さが低く、かつ棒の幅が広い炉が、性能が良い炉と判定でき、このような炉を安定的に長い時間連続運転させることが、温室効果ガスの削減に貢献できることが推定できる。

3. 計画的な焼却炉の運転管理計画

平成 25 年度までの実施結果と平成 26 年度からの新規稼働予定をもとに、平成 26 年度の焼却炉運転計画を作成した。各水再生センターは、従来型の焼却炉のほか、性能の良い第二世代焼却炉（多層型流動炉（以下、多層炉）・ガス化炉・ターボ型流動炉（以下、ターボ炉））を保有しており、センターごとに設定方針は異なるが、作成のポイントは、以下のとおりである。

（1）平成 26 年度から稼働する性能が良い炉（多層炉⑧⑮：40t/日、100t/日）の安定連続運転の実施。

（2）平成 24 年度稼働の性能が良い炉（ターボ炉⑨：60t/日）の安定連続運転の実施。

（3）上述 3 炉の 2 年間連続運転の実施（従来は、年に 1 回は、点検・工事等で数週間停止していた）。

図 2 に変更イメージを示す。これにより、炉立ち上げ時の補助燃料使用量の削減及び温度低下に伴う焼却由来の N_2O の削減が見込まれる。

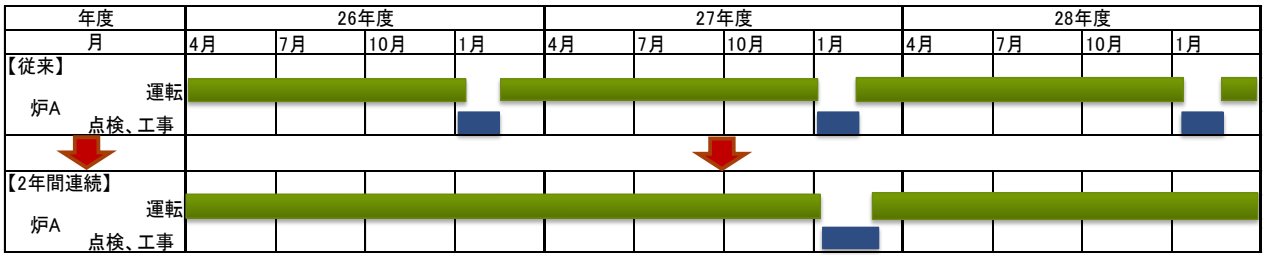


図 2　2 年間連続運転への変更イメージ

（4）年間をとおし自燃する炉（④）は、燃料を使わず高温焼却できるため、安定運転を目指す。

（5）原単位グラフの性能の良い炉（⑪、⑱）は、温度管理に注意し安定運転を目指す。

（6）その他の炉は、比較的水処理が安定している上半期に高温運転を行い、焼却由来

N_2O を削減し、下半期は運転温度を下げて、補助燃料の使用量を減らすことを目指す。

4. 平成 26 年度の実績と平成 27 年度の運転管理計画

上記の計画を基に、年間及び四半期ごとの目標排出量を定め、温室効果ガス削減に向けた取組を行った。平成 26 年度の実績は以下の通りである。

図 3 より、CO_2 排出量は、4.9 万 t　原単位は 0.191 となり、平成 25 年度と比較して、温室効果ガスの削減を達成することができた。

図 3　汚泥焼却炉温室効果ガス排出管理図(平成 26 年度実績)

これは、性能が良い多層炉（40 t/日、100 t/日）及びターボ炉が稼働したことにより、焼却燃料と焼却 N_2O が削減できたことによる。ただし、これらの炉は安定連続運転を目標としていたが、故障のための掛け替え運転や、立ち上げ時の調整運転に伴う低温運転などの N_2O 増加要因があった。これに対応するため、焼却温度を上昇させることで、補助燃料使用量が増加し、結果的に燃料由来の CO_2 が増加した。

このため、下半期には、燃料由来の CO_2 を削減するために、一部の炉において、焼却炉の焼却温度・ガス使用量と CO_2 排出量の関係を定量化した性能カーブ等を作成し、各炉の特性に応じた焼却温度設定により、補助燃料の削減運転を試行的に実施した。

さらに、年間及び四半期毎に定めた目標排出量の達成について毎月進行管理を行い、排出量の増加等の問題が発生した場合の早期のリカバリー対応を組織的に実施した。さらに、各センターの良好な取組事例は、他のセンターの炉へ水平展開を行い、目標排出量の達成に向けて管理を徹底した。

平成 26 年度に実施したこれらの取組を踏まえ、平成 27 年度は、以下の運転管理計画に

基づき、さらなる温室効果ガスの削減に取り組む予定である。

（1）性能の良い炉及び自燃する炉は、年間を通して高温焼却を行い、炉の安定運転を目指す。

（2）その他の炉は、各炉の補助燃料コストや性能カーブ等をもとに、4月から11月を高温焼却運転、12月から3月を補助燃料削減運転（焼却温度を約10度下げて運転）を行う。

（3）含水率の管理に注目し、高分子凝集剤の注入率を夏と冬で変更し、薬品の使用量を削減する。

（4）各センターにおいてメインとなる焼却炉の運転管理の最適化を検討する。

また、進行管理については、平成26年度と同様、焼却炉の不具合等については、組織的かつ早期にリカバリー対策を実施していくとともに、PDCAサイクルに基づいた、組織のスパイラルアップを図っていく予定である。

5. おわりに

平成26年度の取組を通じて、計画的な運転管理を実施するうえで、汚泥焼却炉の性能評価や原単位の分析、点検・工事に伴う停止時期の調整、焼却温度と補助燃料の使用量の関係など､様々な要素を考慮しながら運転計画を作成することの重要性を痛感した｡また、進行管理を行ううえで、センターとの調整や資料作成に多くの時間を要した。平成27年度はこれらの経験を踏まえ、より円滑に焼却炉の計画的管理を実施したいと考えている。

今後、温室効果ガスの削減においては、環境を守る視点から、2020年のオリンピック・パラリンピック開催に向けて、東京都としても重点的に取り組んでいく施策である。

流域下水道本部では、新しい技術を活用して温室効果ガス削減効果の大きい焼却炉を各水再生センターに再構築時などに導入し、汚泥処理における温室効果ガス削減の取組を更に進め、アースプラン2010の取組を不断に継続し、地球温暖化対策を積極的に推進していく所存である。

2-4-5 二軸管理手法を用いた水質改善と省エネルギー化の両立の取り組みの拡大について

流域下水道本部 技術部 施設管理課
○伊藤喜代志 島田誠一
古澤佳世子 青木陽平
藤井杏夕子

1. はじめに

東日本大震災以降電力使用量の削減が求められる中、東京都下水道局では3ヵ年の事業計画「経営計画2013」を策定し、水質改善と電力使用量削減の両立による地球温暖化対策のさらなる推進を目指すこととなった。その中で各水再生センター（以下、センター）における水処理施設の運転を最適化するため、電力削減と水質改善を両輪とする「二軸管理図」による管理手法を新たに導入し、平成25年度より維持管理への活用をスタートした。本報告は流域下水道本部における平成26年度の二軸管理の取り組みについて紹介する。

2. 二軸管理図による管理方法

図1に二軸管理図を示す。横軸はセンターの送風電力量を処理水量で除した送風電力量原単位、縦軸は放流水の全窒素濃度を示す。

放流水中の全窒素濃度は反応槽内における硝化状況と密接に関連し、加えて反応槽内の送風は窒素の処理を基本に行われている。また、下水処理における送風電力量は水再生センターで使用する電力量の5割近くを占めており、このトレードオフ関係を最適化するために放流水の全窒素濃度と送風電力量を二軸管理の指標とした。

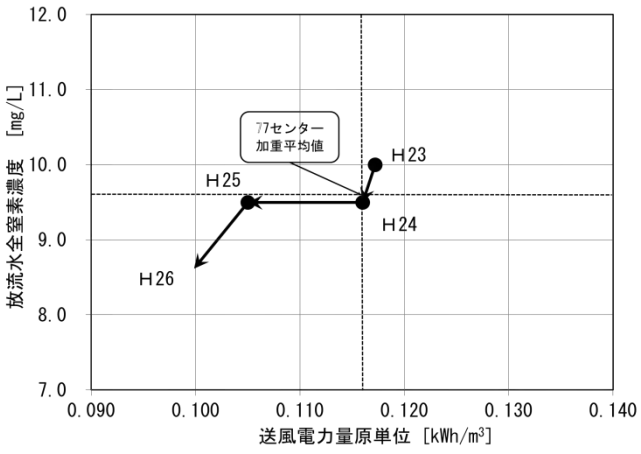


図1 二軸管理図

二軸管理の管理方法は、図2に示すとおり、送風電力量の削減と水質改善によってベクトルが二重マルの左下方向に向かうよう運転の工夫やハード面での省エネルギー対策を進めていく「ベクトル管理」と、図3に示すとおり、7センターの加重平均値に対する相対的エリアで、評価を行う「エリア管理」がある。

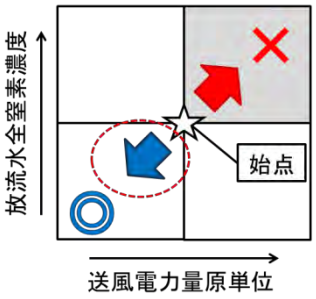


図2 ベクトル管理図

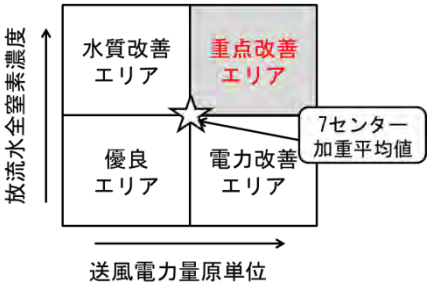


図3 エリア管理図

エリア管理では、右上の重点改善エリアに位置したセンターについては、運転管理の工夫以外の水処理施設や設備等について十分な検討を行って問題点を洗い出し、必要に応じて改良工事等も含めた対策による改善に向けて検討が必要と判断する。

3. 平成 26 年度二軸管理目標値の設定の考え方

図 4 に二軸管理の目標設定のイメージを示す。平成 26 年度の目標値の設定は、平成 25 年度の実績電力量から平成 26 年度の取り組みによる電力削減見込み量（送風機の台数削減、貯留池や幹線貯留による水量平準化等の対策）を差し引くこととした。

一方、流域下水道本部内の 7 つの水再生センターでは、図 5 に示すとおり、高度処理の割合が 5 割を超えている。このため、平成 26 年度からは、送風電力量に攪拌機と硝化液循環ポンプ等の沈殿池機械電力量を加えた水処理電力量の原単位（図 6 参照）による進行管理にも取り組むこととした。

また、平成 25 年度の夏季の電力ピーク調整時（13 時から 16 時）の電力削減に重点を置いた取り組みから、平成 26 年度は年間を通した取り組みと活性汚泥の活動が活発な夏季と活動が落ちる冬季を考慮した目標設定とした。

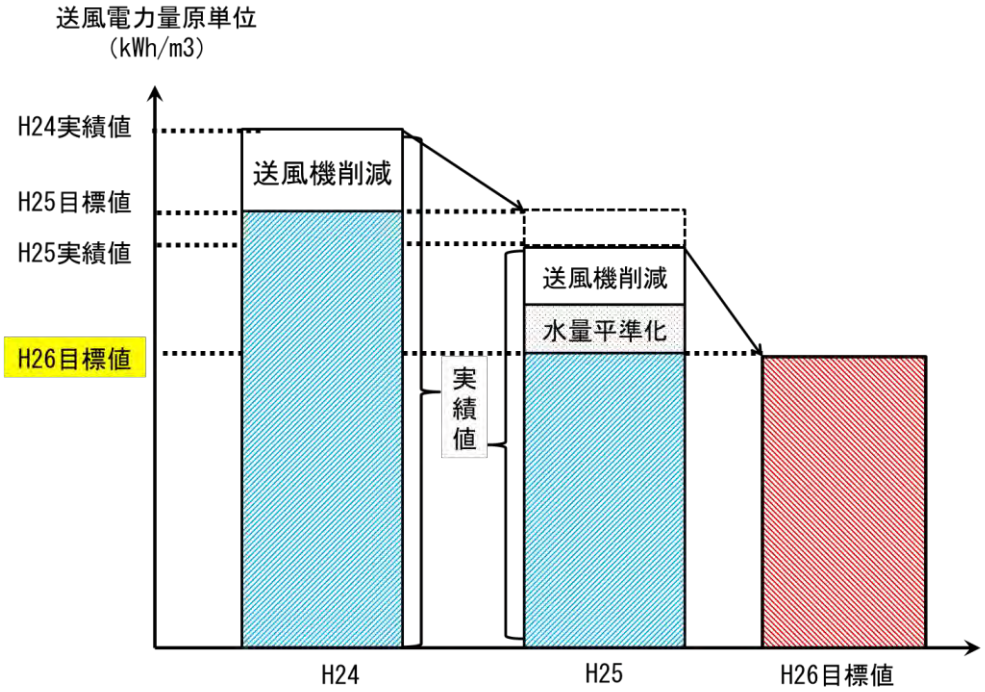


図４　目標設定のイメージ

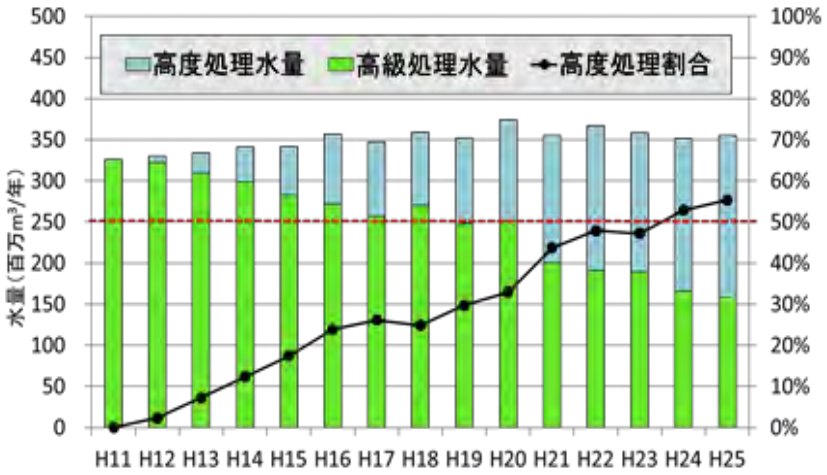


図 5　流域下水道本部内 7 センターにおける高度処理の割合

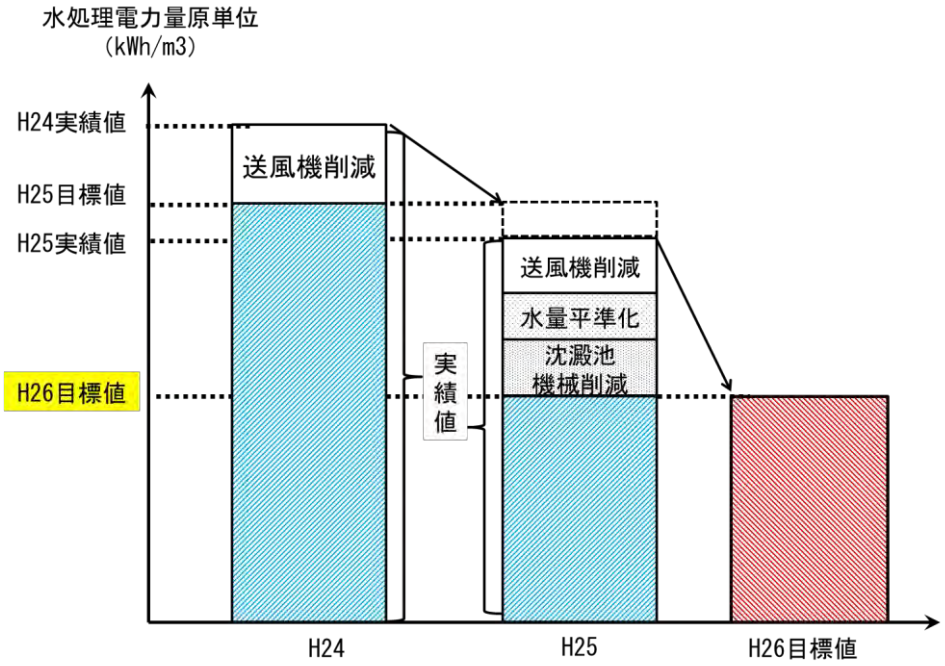


図 6　水処理電力量原単位による目標設定

平成 26 年度の電力量原単位目標設定の特徴は以下の 3 点である。

① 平成 25 年度実績を基準とする。

② 送風電力に循環ポンプ及び攪拌機、掻き寄せ機等の電力を加えた水処理電力による管理を追加

③ 時季別、時間別（夏季 13 時から 16 時の管理から夏季 13 時から 16 時以外、夏季以外を追加）の電力削減目標量の設定

一方、平成 26 年度の水質目標値については、流域別下水道整備総合計画の完了年度の全窒素濃度 10mg/L を基準として各センターの目標放流水質を設定した。なお、具体的には電力削減対策（送風機、循環ポンプの運転状況、工事に伴う水質影響）の取り組みから、年間目標値、上半期、下半期の全窒素濃度を試算した。

4.　平成 26 年度二軸管理目標値

4.1　平成 26 年度送風電力量原単位目標値

平成 26 年度送風電力量原単位目標値を表 1 に示す。７センター加重平均値で、上半期 0.119 kWh/m^3、下半期 0.127 kWh/m^3、年間目標値を 0.123kWh/m^3（平成 25 年度実績 0.124 kWh/m^3 から 1%削減）とした。新たな取り組みによる送風機の電力量削減方法等について各センターと検討を行った結果、各センターの主な増減理由は、次のとおりであった。なお、表 1 の H26 年間予測値（送風電力量）は、H25 年実績値から H25 調整電力量と H26 送風機削減電力量予測を差し引いて求めた。さらに、H26 年間予測値をもとに年間、上期・下期の各目標送風電力量原単位を試算した。

【電力削減要因】

・４月～11 月の土曜、日曜の送風機の台数削減運転

・夏季 13 時～16 時以外の電力削減運転の時間延長

・夏季以外の可能な限りの電力削減運転の延長

・散気装置の更新による送風機の電力削減

【電力増加要因】

・他センターからの送水による水量増・工事に伴う効率の悪い系列への水量増

表 1　平成 26 年度送風電力量原単位目標値の設定

	H26目標送風電力量原単位 [kWh/m3]			H26年間予測値		H25実績値	H25調整電力量	H26送風機削減電力量予測 [対25年度実績:kWh/年]				
	年間	上期	下期	水量 [m3/年]	送風電力量 [kWh/年]			13時～16時	13時～16時以外	夏季以外	その他	
											削減分	増加分
北一	0.104	0.100	0.109	74,958,550	7,825,194	7,938,090	－	－	-20,580	-92,316	－	－
南多摩	0.127	0.123	0.131	44,066,540	5,576,884	5,432,110	－	－	－	－	－	144,774
北二	0.115	0.106	0.128	17,770,490	2,036,730	2,107,290	－	－	－	-70,560	－	－
浅川	0.128	0.125	0.132	29,872,280	3,835,928	3,794,180	－	－	18,032	23,716	－	－
多摩上	0.136	0.131	0.142	64,402,130	8,765,040	8,962,500	-125,020	－	-68,320	-51,240	－	47,120
八王子	0.123	0.121	0.125	40,098,580	4,939,036	4,975,100	－	－	-36,064	－	－	－
清瀬	0.127	0.123	0.130	85,269,370	10,786,985	10,998,630	-126,280	－	－	－	-85,365	－
加重平均	0.123	0.119	0.127	356,437,940	43,765,797	44,207,900	-251,300	－	-106,932	-190,400	-85,365	191,894

4.2　平成 26 年度水処理電力量原単位目標値

平成 26 年度水処理電力量原単位目標値を表 2 に示す。7 センター加重平均値で、上半期 0.178 kWh/m^3 、下半期 0.192kWh/m^3、年間目標値を 0.185 kWh/m^3 とした。

水処理電力量の削減についても送風機の電力削減と同様に、各センターと検討を行い、水質への影響等を考慮した機器の停止等により削減電力量を試算した。

表 2　平成 26 年度水処理電力量原単位目標値の設定

	H26水処理電力量原単位 [kWh/m3]			H26年間予測値		H25実績値	送風機、攪拌機、循環ポンプ等削減電力量		
	年間	上期	下期	水量 [m3/年]	水処理電力量 [kWh/年]		年　間 【kwh】	上半期 【kwh】	下半期 【kwh】
北一	0.178	0.169	0.188	74,958,550	13,328,118	13,448,710	-120,592	-110,008	-10,584
南多摩	0.184	0.180	0.189	44,066,540	8,115,987	8,129,510	-13,523	62,031	-75,554
北二	0.164	0.152	0.179	17,770,490	2,921,146	3,046,660	-125,514	-92,021	-33,493
浅川	0.162	0.158	0.167	29,872,280	4,851,484	4,897,650	-46,166	-69,518	23,352
多摩上	0.206	0.199	0.213	64,402,130	13,246,852	13,468,130	-221,278	-142,868	-78,410
八王子	0.193	0.189	0.197	40,098,580	7,750,943	7,808,860	-57,917	-57,917	－
清瀬	0.184	0.178	0.190	85,269,370	15,694,955	16,633,650	-938,695	-397,416	-541,279
加重平均	0.185	0.178	0.192	356,437,940	65,909,485	67,433,170	-1,523,685	-807,717	-715,968

4.3　平成 26 年度水質目標

平成 26 年度の水質目標値（放流水全窒素濃度）は表 3 に示すとおり、7 センター加重平均値は、上半期 9.8mg/L、下半期 11.3mg/L、年間目標値を 10.5mg/L とした。

表 3　水質目標値（放流水全窒素濃度）

	放流水全窒素濃度 [mg/L]			影響要因	
	年間	上期	下期	①工事等	②機器の停止等
北一	9.5	9.1	10.0	－	－
南多摩	11.0	10.7	11.3	・改良工事に伴う処理施設停止 ・工事に伴う受水量増	・硝化液循環ポンプの停止
北二	10.5	10.0	11.1	－	・硝化液循環ポンプの停止 ・送風機1台削減運転時間延長（56時間/週で年間）
浅川	12.2	11.6	12.8	－	－
多摩上	10.6	10.2	11.0	－	・送風機1台削減（4台→3台）運転時間延長 （10月～11月）
八王子	11.9	11.4	12.4	－	・効率の悪い3-1系を6月以降9月まで停止 ・10月以降硝化に影響が無いまで停止を継続
清瀬	10.0	9.6	10.4	－	・送風機大1、小2運転時間延長の取組み
加重平均	10.5	9.8	11.3	－	－

5.　平成 26 年度二軸管理実績値

5.1　ベクトル管理

平成 24 年度から平成 26 年度までの送風電力量原単位と放流水全窒素濃度の実績を図 7 に、水処理電力量原単位と放流水全窒素濃度の実績を図 8 に示した。流域下水道本部内 7 センターは二軸管理の目標達成に向け、送風機台数削減運転の取り組み時間の延長、水温低下による活性汚泥の状況や放流水質を確認しながら可能な限り年間を通した送風機の台数削減運転に取り組んだ。その結果、図 7 中の破線（7 センター加重平均値）の交点☆から実線（7 センター加重平均値）の交点☆に引いた破線矢印へと変化し、送風電力量原単位は目標値 0.123 kWh/m³ に対して実績 0.116 kWh/m³ と約 6 %の削減となった。

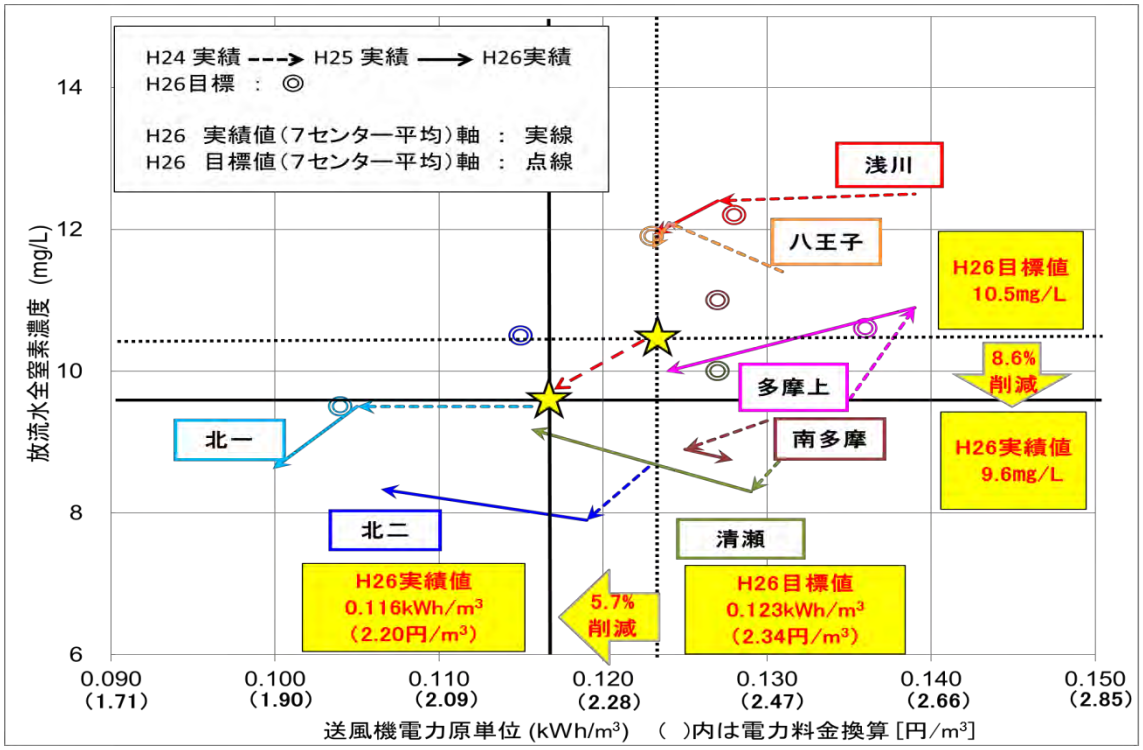


図 7　平成 26 年度二軸管理実績
（送風電力量原単位）

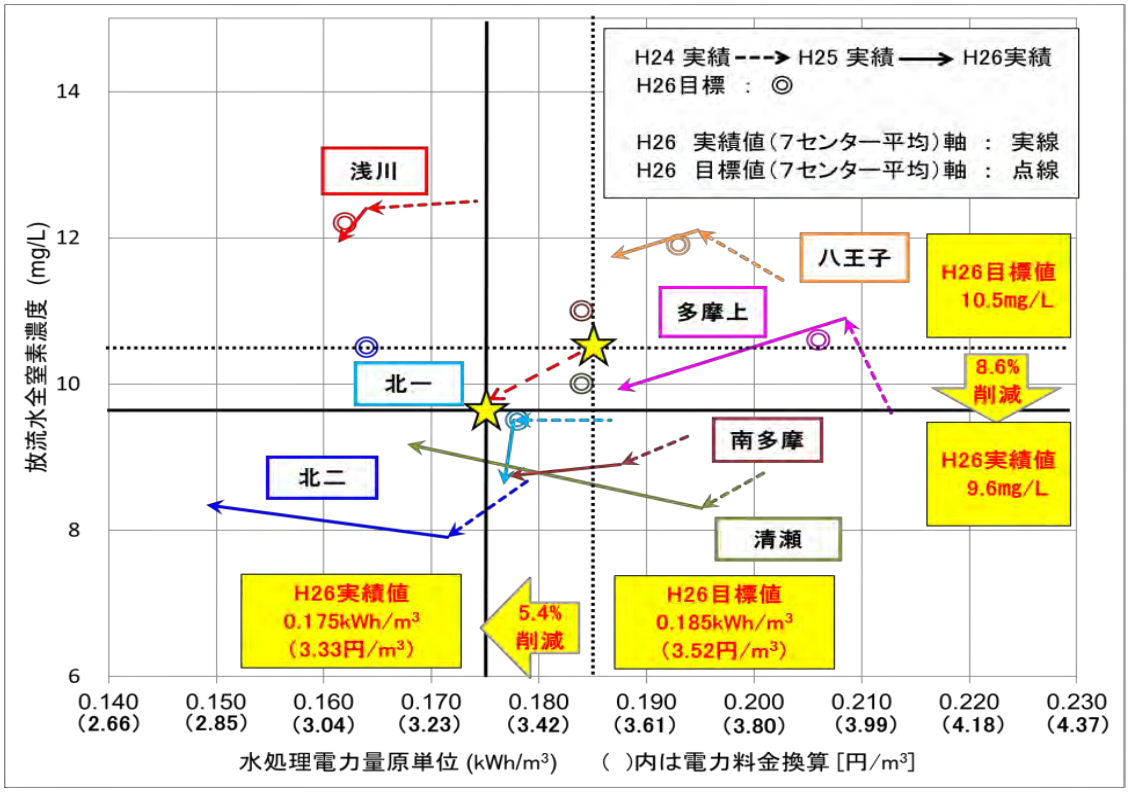


図 8 平成 26 年度二軸管理実績
（水処理電力量原単位）

また、平成 26 年度から新たに取り組んだ水処理電力については、高度処理施設の嫌気槽、無酸素槽の撹拌機について槽内のスカム堆積によるりん濃度の状況を確認しつつ可能な限り停止した。さらに、硝酸性窒素の脱窒のための硝化液循環ポンプについては、各反応槽内や放流水中のアンモニア濃度や全窒素濃度を確認するなど可能な限り 10 月以降も取り組みを継続してきた。こうした取り組みの結果、送風電力量原単位と同様に目標値 0.185 kWh/m³ に対して実績値 0.175 kWh/m³ と約 5%の削減（図 8 参照）となっており、水質についても目標水質 10.5mg/L に対して 9.6mg/L と目標を達成できた。なお、参考として、横軸に電力料金換算（1m³ を処理するために使われる電力料金）を併記した。このことで原単位の低下が電力費の低下につながることを「見える化」でき、職員のコスト意識を高めている。

5.2 エリア管理

平成 26 年度の各センターの二軸管理実績が、全センターの加重平均値を中心に置いたグラフ上でどのエリアに属するかを明らかにしたエリア管理図で評価することにより、センター間の比較、必要な改善策及び優先順位などが明確になった。具体的には、送風電力量原単位及び水処理電力量原単位のエリア管理図（図 9、10 参照）において、重点改善エリアに属する多摩川上流水再生センターは、電力原単位が高く、八王子水再生センターについては、原単位と全窒素濃度どちらも平均を上回っている。また、送風電力量原単位におけるエリア管理図で、重点改善エリアに属する浅川水再生センターは、全窒素濃度が高く、平均を上回っている。

これらの 3 センターについては、計画的に改善策を進めていく予定である。多摩川上流水再生センターは、原単位削減のため、高効率の散気設備と送風機の小型化などを図る予定である。八王子水再生センターには、DO 制御に替わる送風制御システムとしてアンモニア計を活用したアンモニア制御を導入し、水質と電力の両面で改善を図る。浅川水再生センターでは、一つの槽内で硝化と脱窒を同時に行う処理法である「新たな高度処理」の導入を進めている。

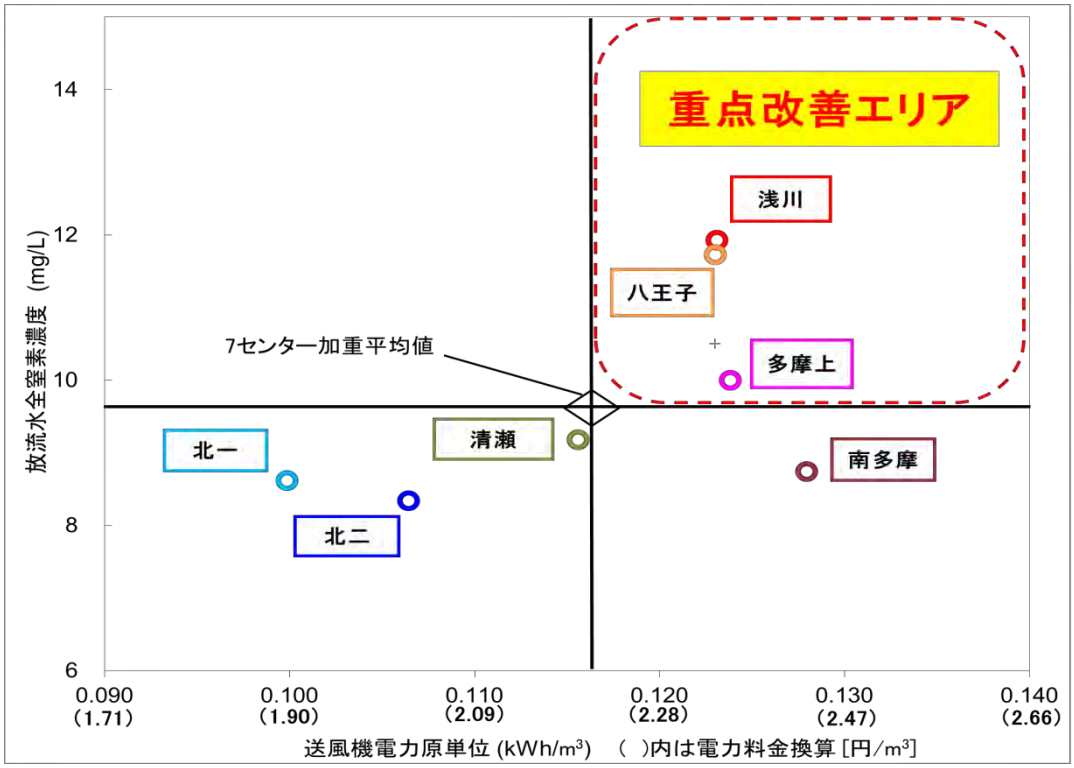


図 9 平成 26 年度二軸管理実績
（送風電力量原単位 エリア管理図）

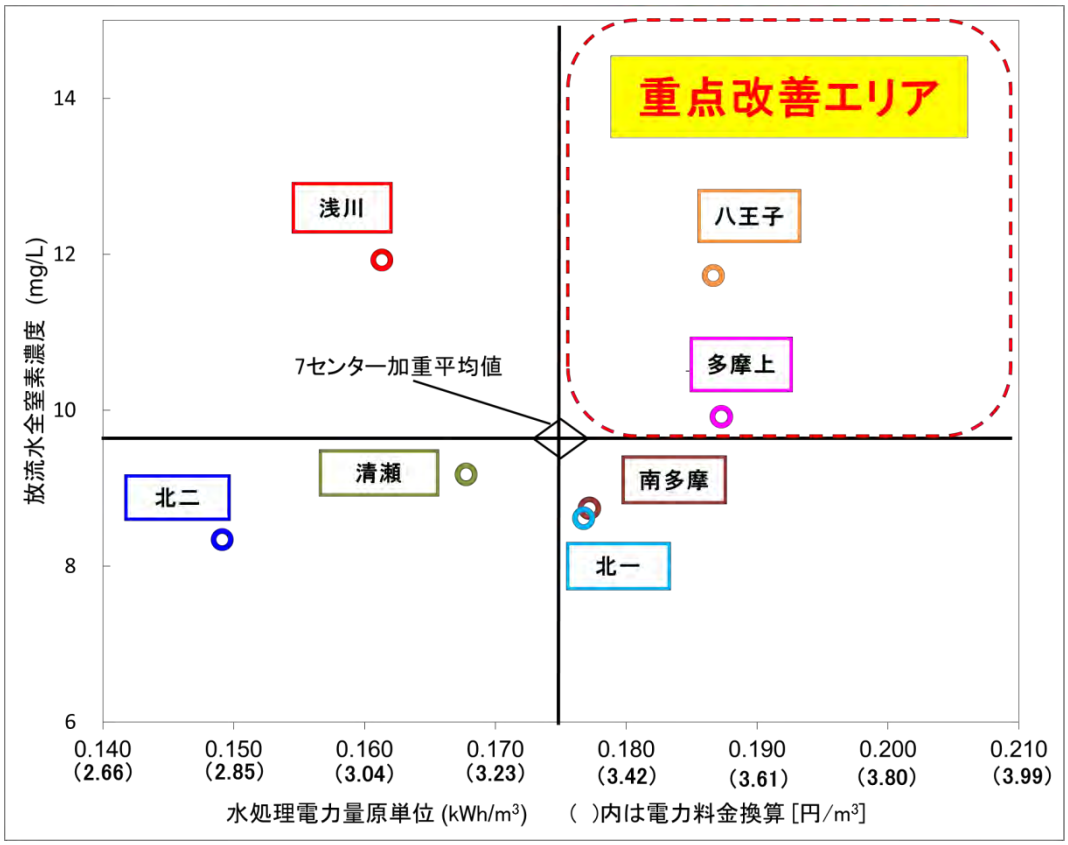


図 10 平成 26 年度二軸管理実績
（水処理電力量原単位 エリア管理図）

6. まとめ

流域下水道本部では、平成 26 年度からチャレンジとして新たに水処理電力量原単位による二軸管理に取り組んだ結果、放流水の水質改善と電力量削減の両立につながる成果を「見える化」できた。

また、全てのセンターをエリア管理図上で比較することで各センターの特性や課題も明確となり、今後の設備導入等の参考となる知見も得られている。以上、流域下水道本部では、今後も、現場の維持管理を効果的に進めるツールとして引き続き二軸管理の活用を図っていく。

2-4-6 ターボ型流動焼却炉導入における温室効果ガス削減効果の検証

東部第二下水道事務所 葛西水再生センター 小川 誠

1. はじめに

東京都下水道局では、下水道事業初のエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を策定し、エネルギー削減に向けた様々な取り組みを推進している。

葛西水再生センターにおいても、省エネ機器の導入を積極的に進めており、平成 26 年度から「ターボ型流動焼却炉（以下、「ターボ炉」という）」と近接設置された低含水率型脱水機を組み合わせた第二世代型焼却システムが運用を開始した。

ターボ炉は従来の流動焼却炉に必要な、電力を大量に消費する送風設備の一部が不要となり、消費電力が大幅に削減されるとともに、加圧高温下にて焼却処理することで N_2O（温室効果ガスの一種）排出量の削減効果が期待できる。

本報告では、平成 26 年 10 月～平成 27 年 2 月のターボ炉と当センターの従来型の焼却炉（以下、「従来炉」という）との運転データの比較を行い、エネルギー削減および温室効果ガスの削減効果について検証を行ったので報告する。

2. 設備概要

当センターで導入したターボ炉は、図 1 に示すように流動焼却炉と過給機を組み合わせた焼却設備である。

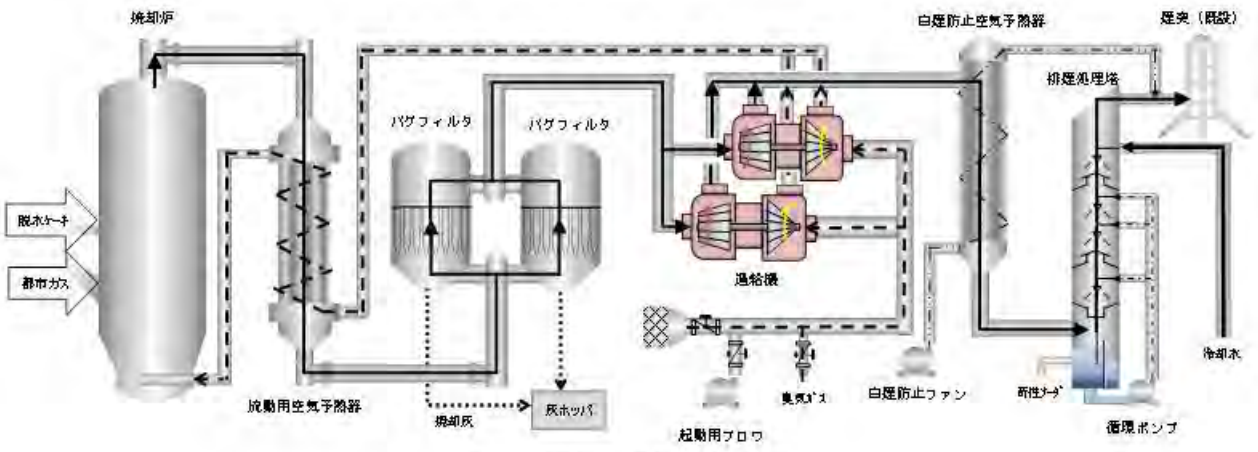


図 1 ターボ型流動焼却炉の概略フロー

ターボ炉では、焼却炉内で脱水ケーキを燃焼して発生した燃焼排ガスを過給機内に送り込み過給機のタービンを駆動し、タービンに直結されたコンプレッサーにより

図 2 過給機

空気を取り込んで圧縮空気を燃焼空気として炉に供給することができる（図 2)。

一方､従来の焼却設備では､図 3 のとおり焼却炉への給気と煙突からの排気をそれぞれ、流動ブロワおよび誘引ファンと呼ばれる大型の送風機で行っており、大量の電力が必要となっている。

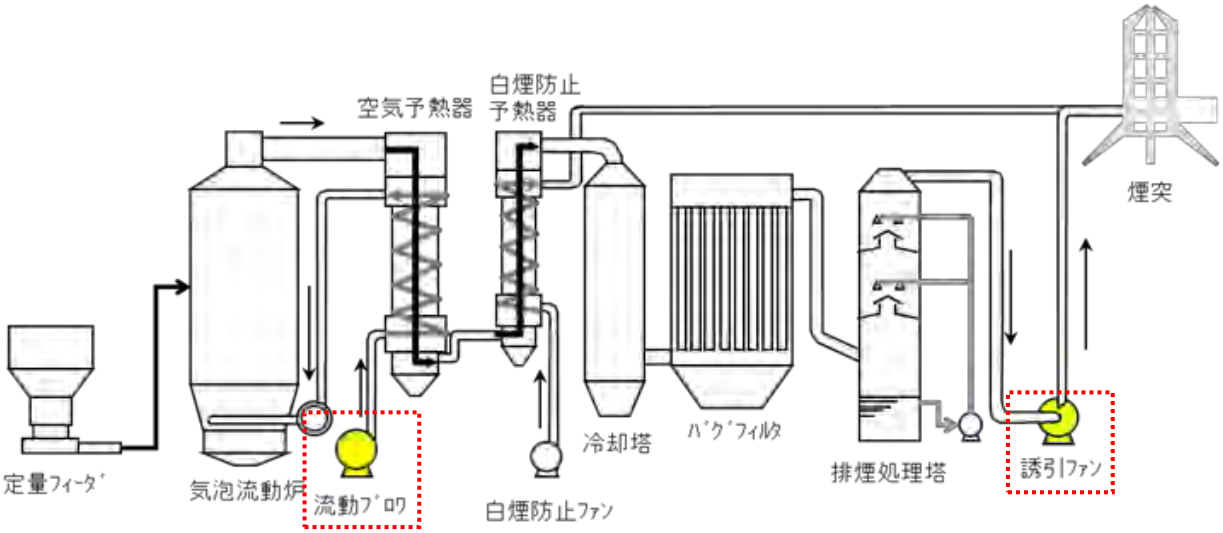


図 3　従来型の流動焼却炉の概略フロー

また、表 1 のとおり、ターボ炉の内径は従来炉と比較して 65%程度と小さく、断面積は約 40%程度となる。ターボ炉は、過給機により大気圧（101.3kPa）の約 2 倍に加圧された状態で焼却するため、焼却炉内部の燃焼ガスの容積が小さくなり、焼却炉から過給機(ダクト含む)までが従来炉と比べてコンパクトにできるといった特徴がある。

表 1　焼却炉仕様の比較

		ターボ炉 （１号炉）	従来炉 （５号炉）
処理能力　t/日		300	300
内径　mm		φ5,400	φ8,200
外径　mm		φ6,100	φ8,900
常用時	炉内圧力 （絶対圧力）	120～130 kPa・G （220～230 kPa）	－0.5 kPa・G （100 kPa）
	炉内最高温度　℃	870～890	850

葛西水再生センターでは、平成 22 年度～25 年度に既設焼却炉の跡地へターボ炉の建設が行われた。ターボ炉の導入に当たっては、稼働当初に排ガス中の焼却灰を集塵するセラミックス製のバグフィルタが熱膨張により折損したり、吸排気管内の圧力損失の増大による過給機の能力不足といった初期不具合が発生したが、それぞれ対策品への交換や調整を行い、平成 26 年 10 月から本格的な運用を開始した。

3. エネルギー削減効果

3.1 消費電力削減

前述のとおり、従来炉には焼却炉で必要な燃焼空気を供給するための流動ブロワと焼却炉で発生する燃焼排ガスを大気に放出するための誘引ファンが必要となる。これらの送風機の電力は、従来炉で使用する電力の約 50%を占めている（図 4）。

一方、ターボ炉は過給機で燃焼空気を加圧し、焼却炉で発生した燃焼排ガスは自らの圧力で煙突まで流れて排気することができ、大量の電気を消費する送風機が不要となる。

図 4 従来炉の流動ブロワと誘引ファンの消費電力

検証期間における脱水ケーキ処理量と焼却炉使用電力量の関係は図 5 のとおりとなった。ここで、焼却炉使用電力量は、脱水ケーキ供給設備、焼却設備、排ガス処理設備およびユーティリティ設備等の使用電力量の合計である。

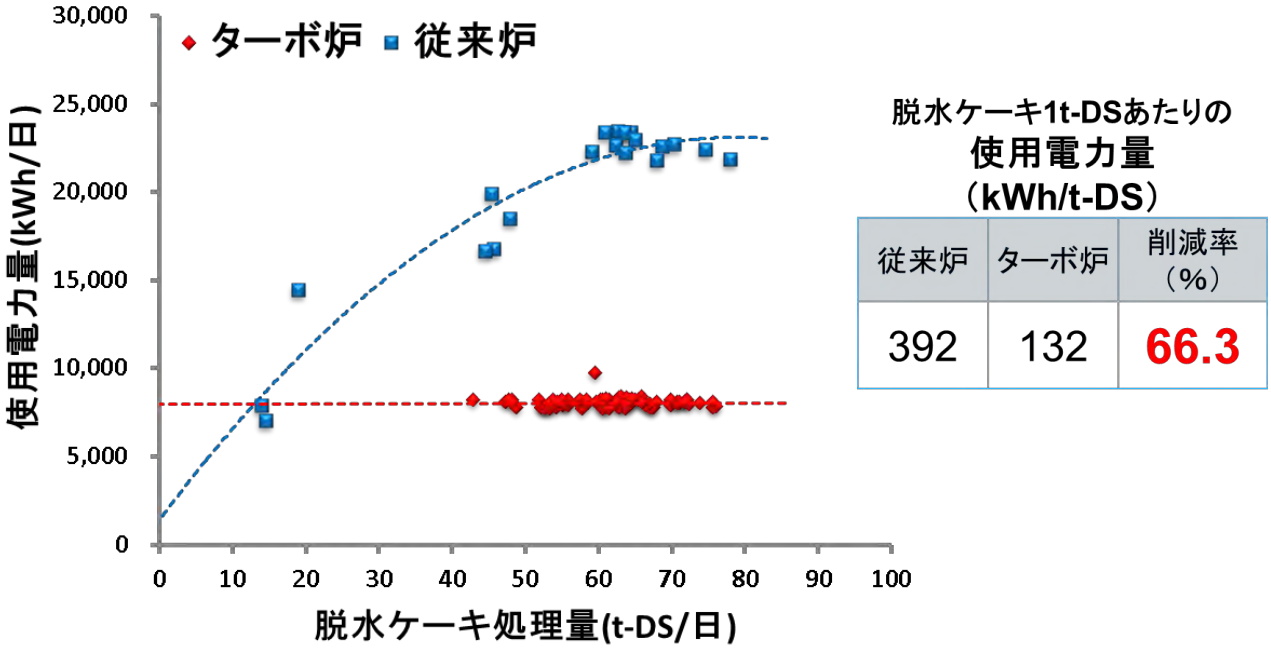


図 5 脱水ケーキ処理量当たりの焼却炉使用電力量

従来炉では、脱水ケーキ処理量が多くなるにつれて電力量が増えるのに対して、ターボ炉はほぼ一定に推移していることがわかる。これは、ケーキ処理量が増えるにつれて、燃焼に必要な空気を焼却炉へ送る必要があり、従来炉ではブロワの風量を上げる分電力が増えるが、過給機を使用しているターボ炉は送風電力が必要ないため変わらないことがわかる。

平均値を比較すると、従来炉は脱水ケーキ 1t-DS 当たり 392kWh に対して、ターボ炉は送風機が不要となるため消費電力は 132kWh となった。ターボ炉における消費電力の削減率は約 66%（当センター比）である。

3.2 補助燃料使用量削減

ターボ炉は、前述の通り従来炉の約 2 倍の圧力下で焼却を行うことでガス容積が小さくなるため、焼却炉内の燃焼排ガスの空塔速度(上昇する速度)を従来炉と変えず、炉径を細くできる（図 6)。

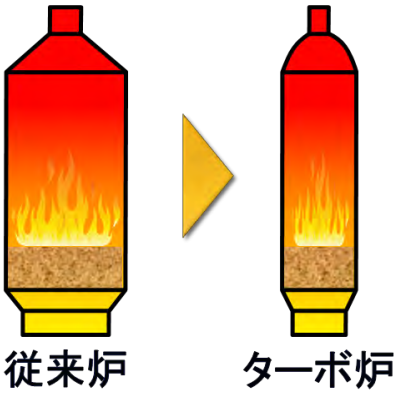
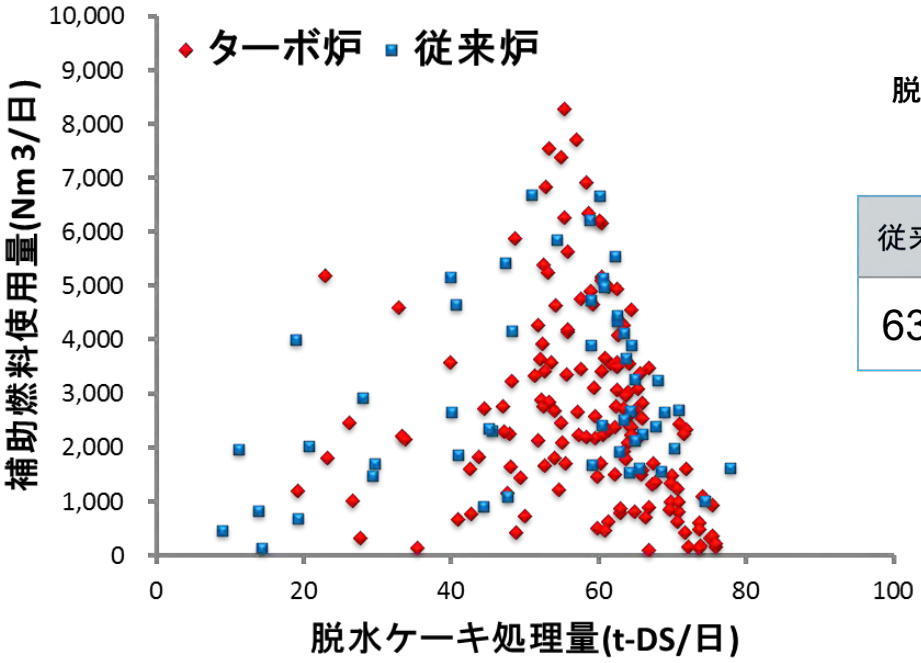


図 6 炉径の比較

このためターボ炉では、焼却炉の表面積が小さくなり放熱量が従来炉に比べて小さくなるため、補助燃料使用量が削減される。

検証期間における脱水ケーキ処理量と補助燃料使用量の関係は図 7 のとおりとなった。補助燃料使用量は、脱水ケーキの含水率により大きく変化することから、脱水ケーキ処理量との関係性は見られなかったが、平均すると、従来炉 63.7Nm^3/t-DS、ターボ炉 48.7Nm^3/t-DS となった。したがって、ターボ炉における都市ガス使用量の削減率は約 24%（当センター比）である。



脱水ケーキ1t-DSあたりの
都市ガス使用量
（Nm³/t-DS）

従来炉	ターボ炉	削減率（%）
63.7	48.7	23.6

図 7 脱水ケーキ処理量当たりの補助燃料電力量

4. 温室効果ガス削減効果

4.1 消費電力由来

消費電力由来の CO_2 排出量は、エネルギー削減効果にて算出した脱水ケーキ 1t-DS 当たりの使用電力量より、電力の CO_2 排出係数 0.382kg-CO_2/kWh を用いて算出することができる。消費電力由来の温室効果ガス排出量は、従来炉の 150kg- CO_2/t-DS に対してターボ炉は 50kg-CO_2/t-DS となった。

4.2 補助燃料由来

補助燃料由来の CO_2 排出量は、エネルギー削減効果にて算出した脱水ケーキ 1t-DS 当たりの補助燃料使用量より、都市ガスの CO2 排出係数 2.277kg-CO2/Nm^3 を用いて算出することができる。補助燃料由来の温室効果ガス排出量は、従来炉の 145kg-CO_2/t-DS に対してターボ炉は 111kg-CO_2/t-DS となった。

4.3 N_2O 由来

N_2O 排出量は排ガス測定による結果から算出した数値を用いて比較を行った。高温焼却を行っている従来炉は脱水ケーキ 1t-DS 当たり 2.3kg-N_2O であったのに対して、ターボ炉は 0.82kg-N_2O となった。ターボ炉における N_2O 排出量の削減率は約 64%（当センター比）である。また、N_2O の地球温暖化係数は CO_2 の 310 倍であることから、それぞれの N_2O 排出量を CO_2 排出量に換算すると、従来炉が 713kg-CO_2/t-DS となるのに対し、ターボ炉は 254kg-CO_2/t-DS となる。

4.4 全体の温室効果ガス削減効果

温室効果ガス排出量の比較を表 2 にまとめた。消費電力、補助燃料および N_2O 由来の温室効果ガス排出量合計は、従来炉が 1,008kg- CO_2/t-DS となるのに対し、ターボ炉は 415kg-CO_2/t-DS であり、ターボ炉における消費電力、補助燃料および N_2O 由来の温室効果ガス排出量合計の削減率は約 59%となった。

表 2 温室効果ガス排出量の比較

	温室効果ガス排出量 (kg-CO_2/t-DS)		削減率 (%)	温室効果ガス排出量削減目標値
	従来炉	ターボ炉		
電力由来	150	50	66.3	40%
補助燃料由来	145	111	23.6	10%
N_2O 由来	713	254	64.4	50%
合計	1,008	415	58.8	－

ここで、表 2 の温室効果ガス排出量削減目標値とは、平成 21、22 年度に当局が実施した

共同研究におけるターボ炉の温室効果ガス排出量の削減率目標値である。消費電力および補助燃料使用量の削減率は、共同研究の目標値である 40%以上および 10%以上を大幅に上回り、エネルギー由来の温室効果ガス排出量削減効果に優れていることが分かる。また、N_2O 排出量削減率は、共同研究の目標値である 50%以上に対して 64%となり、エネルギー由来同様、大幅な削減効果が得られた。

また、年間温室効果ガス排出量推定値の比較を表 3 および図 8 に示す。日処理量 300t/日、年間稼働日数 292 日/年とすると、年間温室効果ガス排出量はそれぞれ従来炉が約 19,426t-CO_2/年に対して、ターボ炉は約 7,998t-CO_2/年となり、年間 11,428t の温室効果ガス排出量を削減することができる。

表 3　年間温室効果ガス排出量の比較（推定）

	温室効果ガス排出量（t-CO_2/年）	
	従来炉	ターボ炉
電力由来	2,891	964
補助燃料由来	2,794	2,139
N_2O 由来	13,741	4,895
合計	19,426	7,998

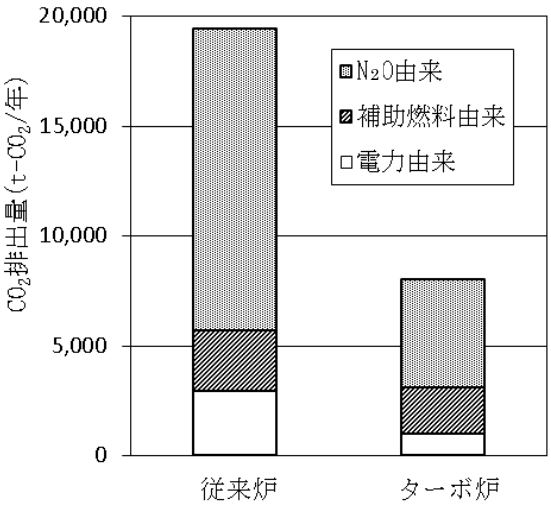


図 8　年間温室効果ガス排出量比較

5. 結論

平成 26 年度から運用を開始したターボ炉と従来炉の比較を行ったところ、本報告の調査期間において、ターボ炉は従来炉と比べエネルギー及び温室効果ガスの削減効果が非常に高いという結果が得られた。しかしながら、導入効果の検証にあたっては、通年を通したデータ比較や運用上の不具合を踏まえた総合的な検証を行っていく必要がある。今後は、維持管理を通して運用データの収集を行い、より効率的な運用方法を確立することで汚泥焼却におけるエネルギー及び温室効果ガスのさらなる削減に努めていきたい。

参考文献

1)清水大輔、山本隆文、折戸敢：過給式流動炉の長期連続運転、第 47 回下水道研究発表会講演集、p852～854(2010)

3-1-1 設備アセットマネジメントの構築に向けた設備保全管理システムの実用化検証

施設管理部 施設保全課 石森 健二

1. はじめに

下水道局経営計画 2013 の「水再生センター、ポンプ所の再構築」において、アセットマネジメント手法を活用して経済的耐用年数で設備を再構築することが示された。さらに「設備再構築基本計画 平成 25 年 3 月(東京都下水道局)」では、下水道局が長年にわたり蓄積してきた、設備の補修履歴や故障履歴などのデータを分析し、主要な 13 種類の設備について、補修や再構築の周期などを示す基本タイムスケジュールを作成し、設備アセットマネジメントの「見える化」を図っている。

一方、下水道業界の動向として、平成 20 年度に国土交通省より「下水道長寿命化支援制度」が創設された。その後も、『下水道長寿命化支援制度に関する手引き(案) 平成 21 年 6 月 (国土交通省)』や『ストックマネジメント手法を踏まえた下水道長寿命化計画策定に関する手引き(案) 平成 25 年 9 月 (国土交通省)』などで、施設情報の管理や点検結果の集約・蓄積を行うことが推奨されている。

現在、下水道局では、下水道設備の維持管理において維持管理情報システム(以下、GMS という)及び保全業務において機器保全データ管理装置(以下、HOMS という)の 2 つのシステムを運用している。設備のアセットマネジメントを運用する上で、これらのシステムの活用を検討したが、入力データ定義の不統一やデータ精度不足及び必要情報不足等から適用困難であることが判明した。そこで、東京都下水道サービス株式会社(以下、TGS という)が開発した下水道設備保全管理システム(以下、エスキューブという)について、既存システムと同等の機能を有しているか、さらには、設備アセットマネジメントを効率的に運用するための基盤システムとして活用できるか、その有効性を実際の機場を使用して検証したので報告する。

2. 現状のシステムについて

現在、下水道局では、GMS と HOMS の 2 つのシステムを運用している。GMS と HOMS の概要を以下に示す。

2.1 GMS

GMS は、図 1 のとおり水再生センター及びポンプ所に設置されている膨大な設備機器の基礎情報を管理するため、主要設備の仕様、工事履歴、故障情報を入力、蓄積することを主たる目的として導入した。こうして蓄積されたデータを使用して、様々な分析や計画策定等業務支援で活用している。

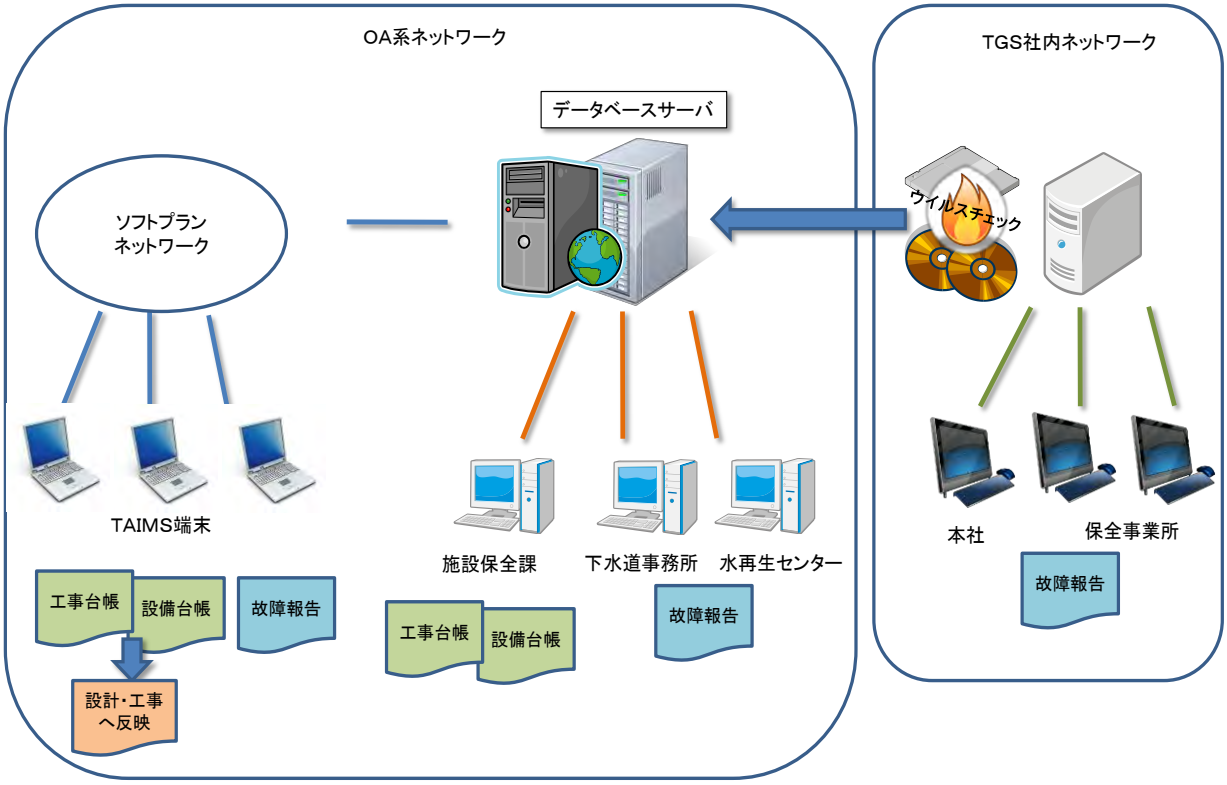


図１　維持管理情報システム（GMS）のデータ

2.2　HOMS

HOMS は、図 2 のとおり水再生センター及びポンプ所に設置されている点検対象の設備、機器の日常点検や定期点検情報等の維持管理情報を入力、蓄積することを主たる目的として導入した。こうして蓄積されたデータを使用して、保全計画の作成支援、月報及び年報の点検報告書(点検回数、機器の整備・清掃回数及び故障回数を総括しグラフ化する等)の作成に活用している。

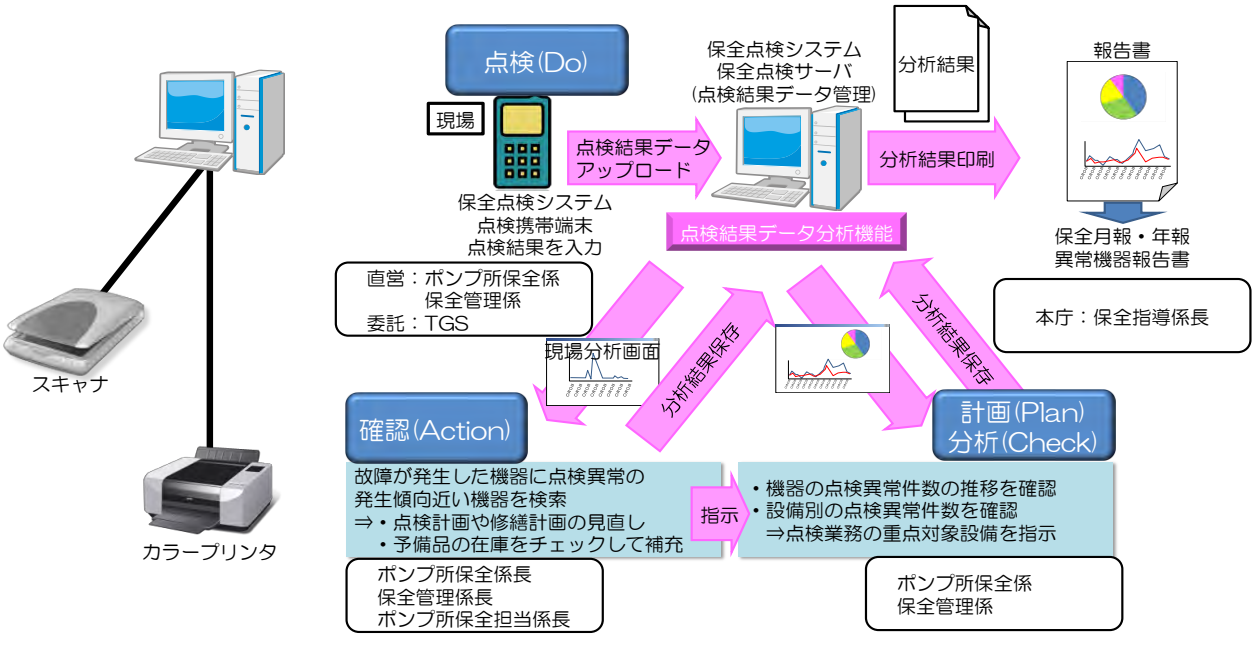


図２　機器保全データ管理装置（HOMS）の機器構成とデータの流れ

2.3 現状システムの問題点

GMS 及び HOMS の 2 つの現状システムは、表 1 に示すような問題点がある。

さらに両システムは稼働から 15 年以上が経過しており、システム自体の老朽化、OS のサポート切れなど陳腐化している。

表 1　現状システムの問題点及び業務遂行上の支障

現状システムの問題点	業務遂行上の支障	支障が生ずる原因
2 つのシステムで使用する設備データの入力内容が統一されていない	データ管理の非効率化	使用する設備データの入力内容(名称、文字数、半角全角、段落設定等)が統一されていないため、手入力によるデータのばらつきや内容の修正が発生する。
設備データの追加削除変更の更新が生じた場合、各システムで設備データを管理しているので、同一データを複数回入力する必要がある	データ更新が煩雑	使用する設備データは、個別に手入力を行っている項目が多く数量も膨大である。各システムで入力フォーマットが異なるので、それに合わせたデータの調整が必要である。
各システムにおいて、新規発生行に対応するための入力項目が足りない	新規発生案件に対応不可	各システムを導入した当初の用途しか想定しておらず、アセットマネジメント等に活用するには、データ量及び内容が不足している。

3. 新システムの検討について

2 で提示した問題点を改善するとともに、下水道設備のライフサイクルコスト （以下、LCC という)の更なる縮減に向けた基本タイムスケジュールの見直しを行っていくため、現在の 2 つのシステムの機能を踏襲しつつ設備のアセットマネジメントに対応した機能を満たす新システムが必要不可欠である。

既製品の活用やシステム開発の要否を検討した結果、TGS が保全業務を効率的に実施するための手段として開発しているエスキューブが新システムとして有力と考えられた。エスキューブは、設備台帳及び工事台帳の作成・管理、保全点検記録の作成及び分析、故障報告書作成及び分析機能を有するシステムである。このため、保全活動の PDCA サイクルを明確化することで、設備アセットマネジメントへの活用が見込まれた。

そこで、エスキューブが既存システムと同等の機能を有しているのか、設備アセットマネジメントを効率的に運用するための基盤システムとして活用できるか、さらにはその有用性について簡易提供型共同研究を通じて、実機データを使用して検証することとした。図 3 にシステム機能イメージ及びワークフローを示す。

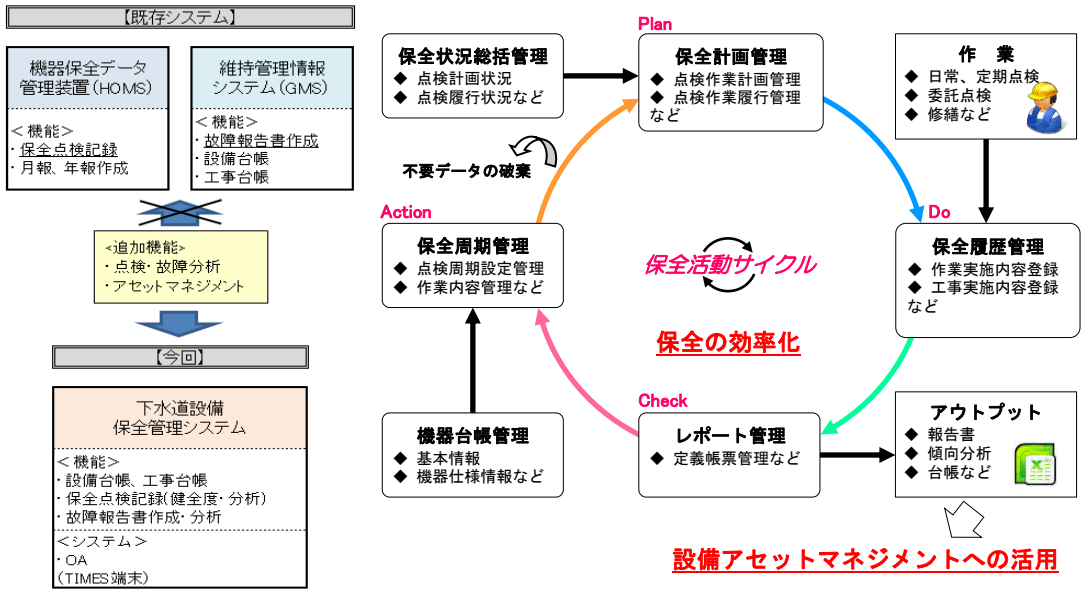


図 3　システム機能イメージ(左)及びワークフロー(右)

3.1　研究目標

検証に際して、以下の 4 つの評価項目を満足することを研究目標とした。

3.1.1　データ入力定義の評価

設備登録・故障情報入力の際に、場所分類や設備分類等に応じて入力できる。またそれらを用いて、台帳の作成や分析を考慮した内容に整理でき、かつ、データが正しく表示できる。

3.1.2　保全活動の評価

点検結果、作業、工事及び故障内容等の入力項目が分析を考慮した内容に整理できる。日報・月報・年報が正しく入力できる。故障内容などの蓄積された情報により、傾向分析ができる。

3.1.3　アセットマネジメントへの提案

設備台帳や工事履歴台帳に整理できる。また LCC を考慮した設備単位のタイムスケジュール分析資料の提案が出来る。長寿命化支援制度の資料作成に際し、定量的な判断が出来る点検結果の一部を抽出し、表やグラフにする等、分析や資料の作成ができる。

3.1.4　経済性の評価

類似のシステムと比較し、経済的で省コストで導入できるかを確認する。

3.2　検証結果

以下に、三河島水再生センターの実機データを用いて実施した検証結果を示す。

3.2.1　データ入力定義の評価

設備の基本情報が階層構造となっており、機器の設置場所や設備の分類等に応じて、容易に入力・分析ができ、正しく表示されることを確認した。

3.2.2　保全活動の評価

点検結果や故障履歴から、設備の劣化傾向を分析し把握することが可能な機能を有していることを確認した。また保全結果における設備の状態を表す健全度と、異常件数、故障

件数、臨時の修繕件数などを総合的に分析し、補修時期の適正化を図るための傾向分析ができることを確認した。(図 4 参照)

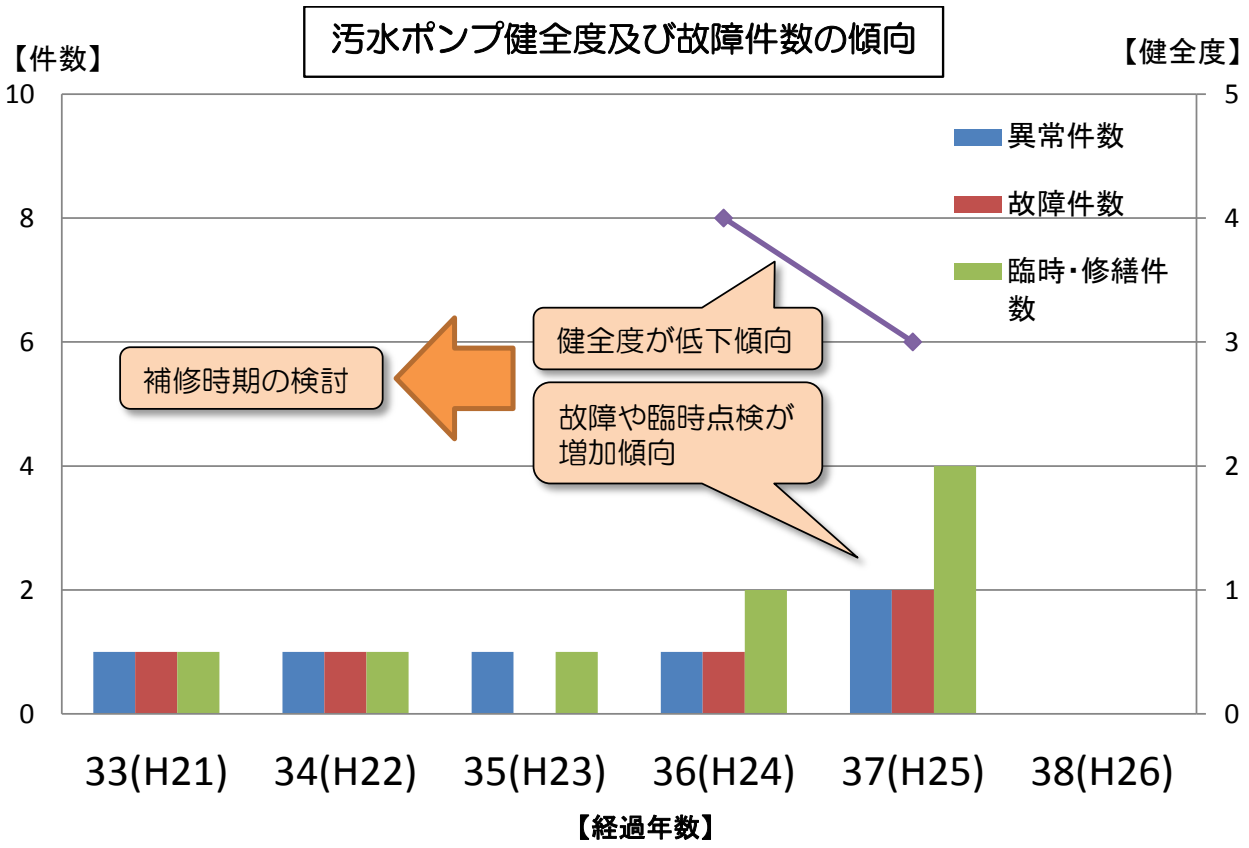


図 4　傾向分析画面の例（参考）

3.2.3　アセットマネジメントへの提案

健全度結果により、補修周期の延伸や短縮を行うことや、更新時期に向けた補修の実施、又は、更新時期の前倒しの検討を行うなど、LCC が最少となるようタイムスケジュールの調整や、事業費の平準化に向けた、年度別の事業費の算出、補修・改良の費用予測が行えることを検証した（図 5 参照）。

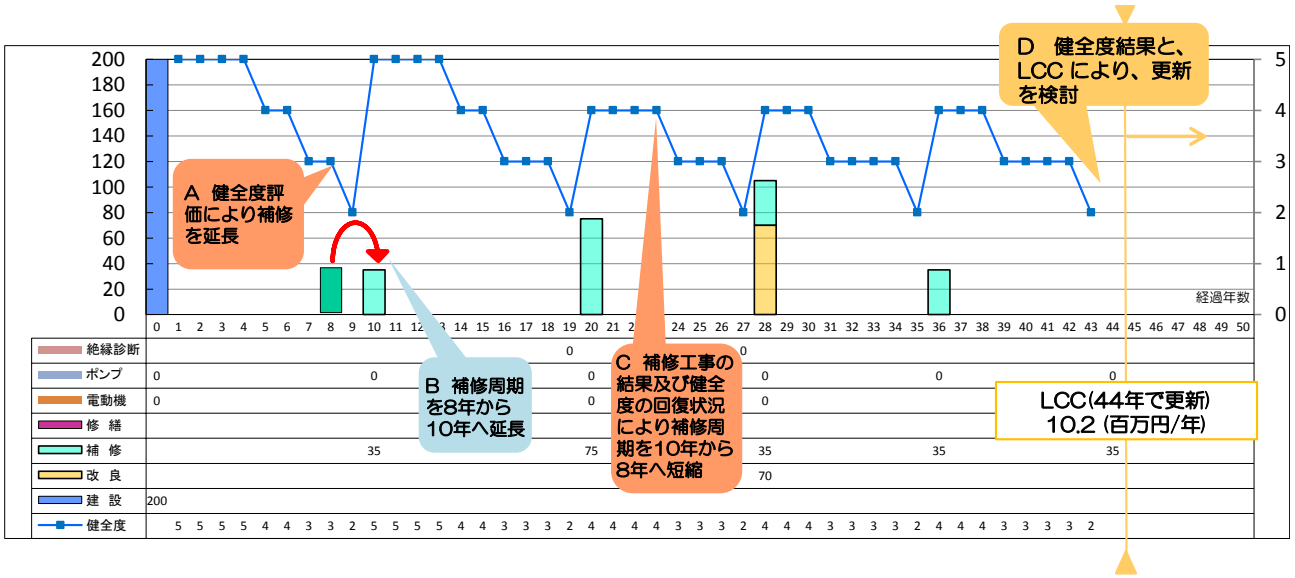


図 5　アセットマネジメント検証画面の例(参考)

3.2.4　経済性の評価

本システムは、類似システムと比較し、導入時におけるカスタマイズが不要で、機能の拡張性及びコスト面から総合的に優位であることを確認した（表 2 参照）。

表 2　類似システム比較

調査先				
会社名		A社	B社	本システム
ソフトウェア				
1	パッケージソフトの用途	石油化学・鉄鋼プラント系	製造工場等汎用	下水道設備専用
2	パッケージシステムのタイプ	クラウド、クライアント・サーバー	クライアント・サーバー	クラウド、クライアント・サーバー
機能				
3	情報管理機能(各種データの・登録・編集・表示・検索)	△※カスタマイズ必要	△※カスタマイズ必要・一部機能無	○
4	帳票出力機能　Microsoft Excel(xls、xlsx)等への出力機能	△※カスタマイズ必要	△※カスタマイズ必要	○
5	ユーザ管理機能　セキュリティ設定等の利用権限管理	○	○	○
6	データ更新業務の有無	有	有	有
7	カスタマイズの可否	可(必須)	可(必須)	可
評価		△	×	○

3.2.5　評価のまとめ

エスキューブは、既存システムと同等の機能を有しており、下水道局及び TGS の保全業務の効率化に寄与できるとともに、設備アセットマネジメントへの活用も可能であると評価した。また、三河島水再生センターのデータを用いて順調に運用できたことから、全ての機場に活用できると考えられる。このことから下水道局技術管理委員会で実用化すべき技術と承認された。

4.　今後に向けて

エスキューブは、点検結果や故障情報等の入力機能に加え、保全業務の効率化のための精度の高い機器の故障分析や、中長期的なアセットマネジメントのさらなる効率化に向け、老朽化の傾向分析等が行える機能を有している。簡易提案型共同研究では、三河島水再生センターの実機場のデータを用いた実証により、システムの効率的な運用が可能であるこ

とが確認できた。

今後は、基本タイムスケジュールの見直しに向けたデータの蓄積方法等を検討していく。

4-1-1 Asset Management Technique and Accelerated Restructuring of Sewerage System

Hayato Mori, Hayato_Mori@member.metro.tokyo.jp

Abstract: Almost a half of sewer pipelines in the Tokyo 23-ward area will exceed its service life of 50 years in 20 years. Under the above situation of limited budget and framework, the Bureau of Sewerage , Tokyo Metropolitan Government adopted an asset management technique in rebuilding sewer pipelines in Tokyo. In this project , the economic service life for the sewer pipelines in the 23-ward area is set to about 80 years, and the cost and work of restructuring project are leveled . Furthermore , the pace of current restructuring project should be accelerated .

Keywords: asset management; rehabilitation; aging

Current sewerage system in the Tokyo 23-wards areas

Total length of sewer pipelines in the Tokyo 23-ward areas extends up to 16,000 km. However, one tenth of the assets, today exceeds their service life of 50 years. In addition, unless the restructuring is made, another 6,500 km of pipelines will join the ranks in 20 years, creating the situation that almost a half of sewer pipelines in the Tokyo 23-ward area exceeds its service life of 50 years.
With such looming renewal requirements for aging pipelines, it is apparent that the current pace of restructuring will not catch up with the times. Delaying renewal means further progressing of aging sewer pipelines and increasing cracks and breakages. Broken sewer pipe will not only disrupt the function of wastewater flowing, but also sink roads and lands , deteriorating the safety and security of Tokyo residents.

Restructuring project using asset management technique

Under the above situation of limited budget and framework, the Bureau of Sewerage adopted an asset management technique in rebuilding Tokyo's sewer pipelines. The asset management referred here is a technique to evaluate facility conditions, control appropriate maintenance, and manage the assets (sewerage system), taking account of life-cycle cost and leveling the cost and work in view of mid- and long-term restructuring project.

Leveling cost and work in restructuring project

(1) Life-cycle cost for sewer pipeline

The total project volume to restructure in the whole 23-ward areas will be quite huge. Therefore, the overall project cost should be curbed anyhow. Under the situation, the scheme is planned to minimize the life-cycle cost. Generally speaking, the total expenses for construction and for operation and maintenance are often economically compared only by its initial cost for construction. However, there are non-negligible expenses of facility operation and maintenance, which increase year by year. The total expenses for construction and for operation and maintenance are minimized at some point in the figure; then, rebuilding the facility becomes economically feasible. Thus, the economical service life and the project period for restructuring are able to be set. The life-cycle cost is the sum of cost for construction and expenses for operation and maintenance. According to the calculation of the cost for construction and expenses for operation and maintenance based on actual results of the investigation, the

economic service life for the sewer pipelines in the 23-ward area is recalculated to about 80 years.
Legal service life for sewer pipelines in Japan is about 50 years. To compensate the gap of 30 years with the above economic service life of 80 years, the efforts to extend the life of existing sewer pipeline are needed in the restructuring project. The Bureau of Sewerage developed new type multi-vision camera to increase efficiency in inspection, especially in shooting and data processing, contributing to well-planned and efficient repairing works. With these efforts, the Bureau of Sewerage will try to extend the service life for additional 30 years.

(2) Accelerating the pace of current restructuring project

In order to undertake the restructuring project effectively based on the economic service life of 80 years, the Bureau of Sewerage has made a plan to group sewer pipelines by year of construction and start rebuilding according to the level of aging deterioration.
The Bureau of Sewerage tries to level the cost and work of restructuring project by prioritizing the rebuilding area , according to the average of economic service life in each area. However, it is apparent that, at the current work pace, the whole sewer pipelines in the 23-ward areas could not be renewed within 80 years. The current pace of restructuring project should be accelerated.
As described at the beginning of this document, due to limited budget and framework, the ongoing restructuring project will focus more on the pipe rehabilitation method, which can reduce the working cost by a half, rather than the conventional open-cut method. So far the restructuring work included the simultaneous improvement of rainwater discharging capacity. However, for the areas with little risk of flooding, remedial measures for aging pipeline should be first implemented and then the reinforced rainwater excluding plan should be gradually added later. By these measures, the Bureau believes it is possible to accelerate the development pace without increasing the restructuring budget.

(3) Visualization of asset management

Because the term "asset management" is relatively new in Japan , the Bureau of Sewerage believes it is important to disclose the details of restructuring policy and progress to the public. Therefore, the Bureau encourages every staff member to speak to customers and partner companies to explain the direction and volume of restructuring project in an easy-to-understand manner. To manage the project, it is essential to visualize the future picture and its required work volume, and find the way to manage manpower, equipment and facilities, and budget.
To our customers, by presenting the visualized asset management, the Bureau of Sewerage promises to provide safe and stable sewerage system forever and ever, maintain the pipelines properly to eliminate any cave-in accidents by aging pipes, and continue the long-term restructuring projects. To our staffs, the Bureau explains the necessity to accelerate the pace of project and provides the motivation to increase their technical skills. To our partner organizations, by presenting the mid- and long-term restructuring business volume, the Bureau encourages their preparations.

Asset management in the future

To address the looming large-scale renewal of aging sewer pipelines all together in the near future, the Bureau of Sewerage formulated the restructuring policy by adopting asset management technique. Hereafter, the Bureau needs to implement the plan, review the results, and revise the plan if necessary, the process so called Plan-Do-Check-and-Action, to refine the effective project ever.

Figure1: Length of sewer pipeline built by year

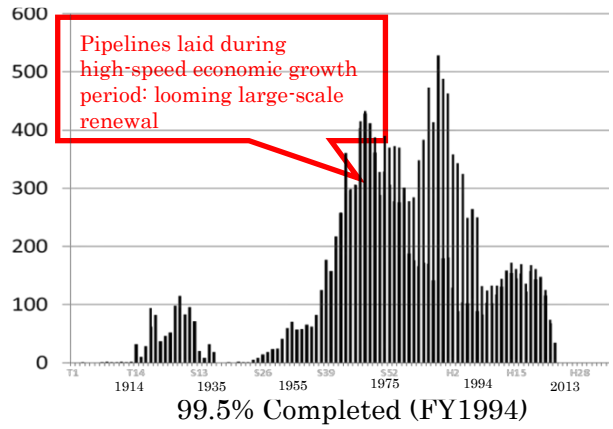


Figure2: Image of leveling

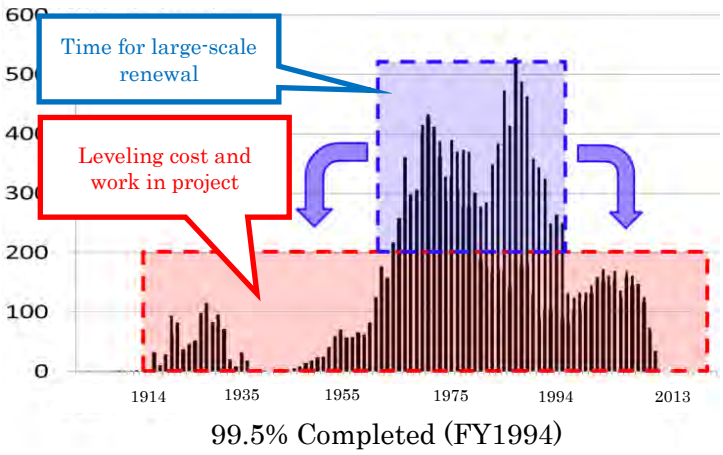


Figure3: Life-cycle cost for sewer pipeline

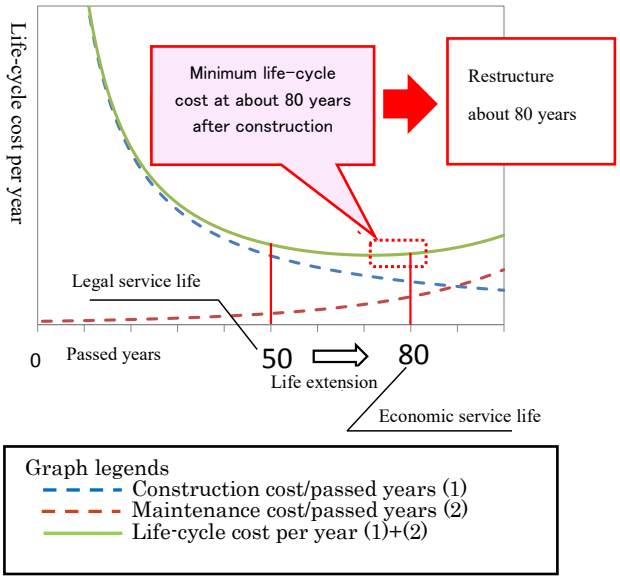
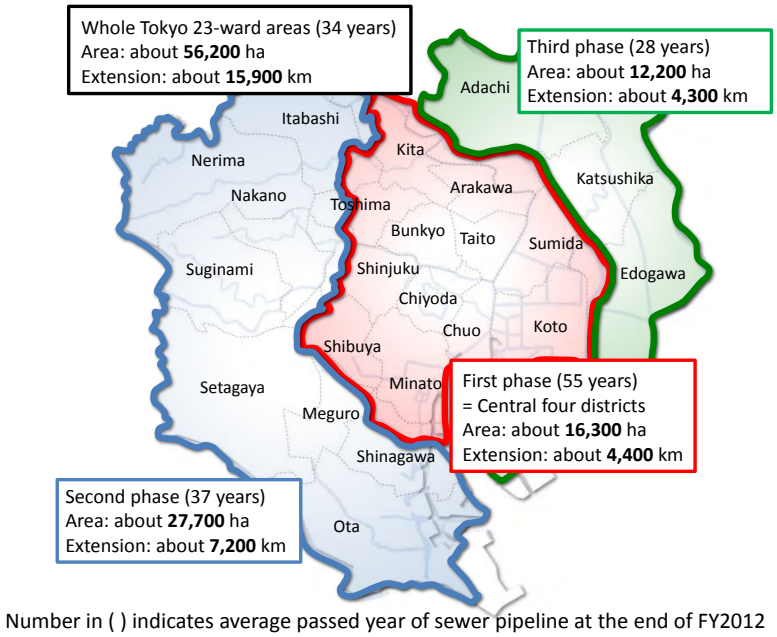
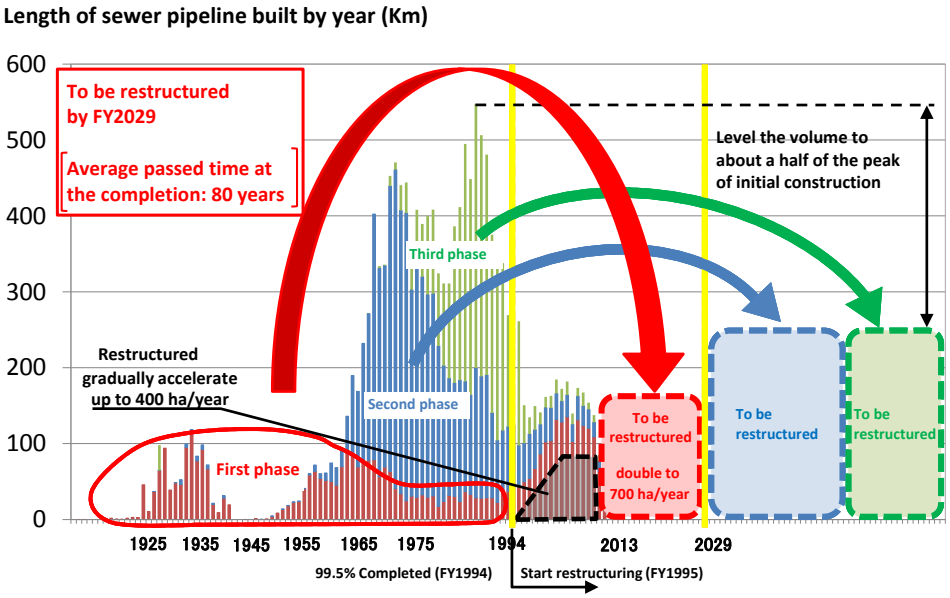


Figure4: Areas need to restructure and average years after construction



Number in ( ) indicates average passed year of sewer pipeline at the end of FY2012

Figure5: Image of asset management



【国際会議発表論文：日本語訳】

4-1-1 アセットマネジメント手法と再構築のスピードアップ

計画調整部 計画課 森 勇人

要旨

東京都23区内にある下水道管は、20年後には約半数の下水道管が耐用年数の50年を超える。限られた財政・体制で再構築を確実に実施するために、アセットマネジメントを採用した事業方針を策定した。この事業方針は、経済的耐用年数を約80年と設定し、事業を平準化したうえで、事業のスピードアップを図るものである。

キーワード：アセットマネジメント、再構築、老朽化

1. 東京都23区の下水道の現状について

東京都23区内にある下水道管は、総延長約16,000kmの膨大なストックを有している。現在、その1割にあたる約1,500kmが耐用年数50年を超えている。このまま再構築を実施しなければ、20年後には、約6,500kmが加わり、区部の約半数の下水道管が 50 年を超えてしまうことになる。

このように膨大な下水道管が老朽化し、大量更新時期に突入していく状況に対して、これまでの再構築の整備ペースでは下水道管の老朽化対策が間に合わない。再構築が遅れることにより、下水道管の老朽化が進行し、破損することになる。そこから土砂が流入することで、道路陥没を引き起こす原因になるとともに下水機能が失われ、都民の安全・安心を守ることができない。

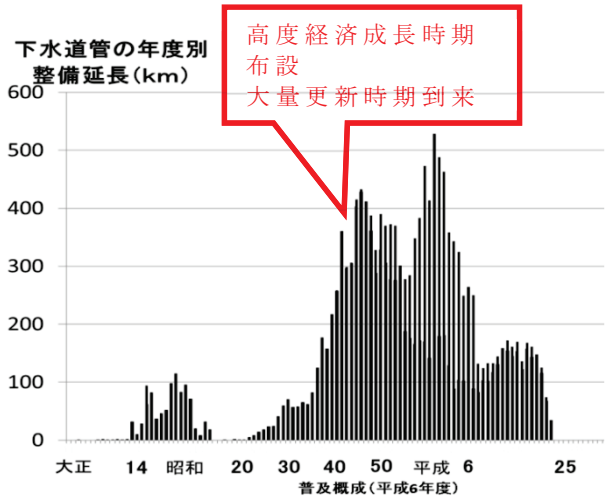


図1 下水道管整備年度別延長

2. アセットマネジメント手法による老朽化対策

このような状況下において、限られた財政・体制で再構築を確実に実施するために、アセットマネジメント手法を採用した。アセットマネジメントとは、施設の状態を評価し、適切な維持管理を行うとともに、ライフサイクルコストや中長期的な再構築事業の平準化などを勘案しつつ、計画的かつ効率的に資産を管理する手法である。ます

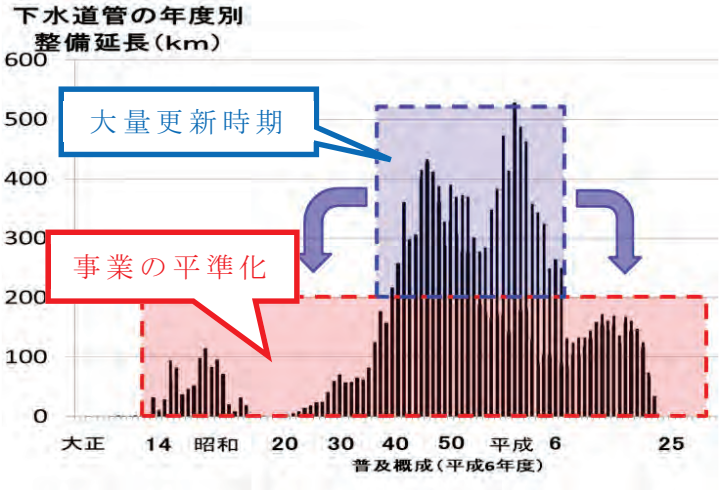


図2 平準化のイメージ

ます老朽化する下水道管への対応戦略を立案した。

3. 再構築事業の平準化

（1） 下水道管のライフサイクルコスト

区部全域を再構築するには事業量は莫大となる。よって、その事業費を抑制する必要がある。

そこで、ライフサイクルコストが最小となるような事業設定を行った。一般に、施設のコストを考えるとき、その建設コストのみを対象として経済比較をしてしまうことが多いが、施設の保全や運用のための維持管理費は使用年数とともに増加することが一般的である。この維持管理費が増大すると、ある時点で施設を新たに設置した方が経済的となる。

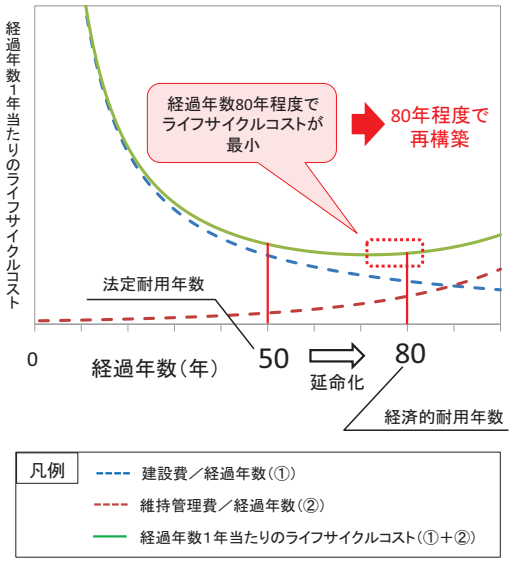


図 3 下水道管のライフサイクルコスト

このような期間を経済的耐用年数とし、再構築事業期間とした。ライフサイクルコストは建設費と維持管理費の合計である。建設費及び維持管理費はこれまでの実績値から算出したもので、区部下水道管の経済的耐用年数は約 80 年となる。

下水道管の法定耐用年数は約 50 年であるが、経済的耐用年数 80 年程度で再構築事業を実施していくためには、30 年間程度、下水道管を延命化することが必要となる。

現在、当局では、管路内調査の効率化を図るため、ミラー方式テレビカメラを開発し、撮影方法やデータ処理をスピードアップさせ、計画的で効率的な補修工事を実施することを可能とした。よって、このような取組により、下水道管きょの老朽化および損傷している箇所を早期に発見し、対策をとることで健全な状態を保つことができ、30 年間程度の延命化を図っていく。

（2） 再構築のスピードアップ

区部全域を経済的耐用年数 80 年で再構築事業を効果的に進めていくため、下水道管を布設年度で区分し、老朽化が著しい箇所から再構築を実施していく計画を立案した。

下水道管の地域別経済的耐用年数に基づき、再構築を優先的に実施すべき地域ごとに順位を設定し、再構築事業の年間事業量の平準化を図った。しかし、これまでの再構築の整備スピードでは、区部全域を 80 年間で完了することができない。そこで、再構築事業のスピードアップを図る必要がある。

冒頭に述べたとおり、限られた財政・体制で再構築事業を実施していくため、都市部で

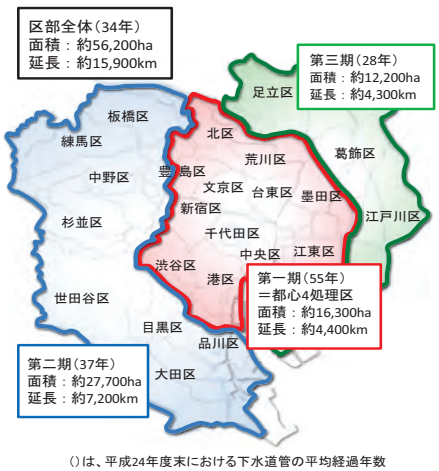


図 4 再構築エリアと平均経過年数

は、地下埋設物の支障移設や舗装復旧を伴う開削工法より工事コストを約半分に縮減できる更生工法をより一層活用していく。

また、これまでの再構築は、老朽化対策にあわせて雨水排除能力の増強などを図ることを基本としているが、浸水の危険性が少ない流域では、老朽化対策を先行し、雨水排除能力の確保は将来的に実施する、段階的に再構築することとした。

これらの取組により、再構築事業費を増やすことなく整備ペースのスピードアップを確実に図っていく。

（３）アセットマネジメントの見える化

アセットマネジメントは、言葉だけが先行するので、東京下水道の対応の仕方をより具体的、かつ詳細に示すことが重要と考える。そこで、職員一人ひとりがお客さまや関連企業に対し、東京下水道が進めていこうとする再構築の方向性や事業量を見える形で示すこととした。将来の事業量を見せることで、人、もの、金をどのようにマネジメントしていくべきか、経営面の検討をすすめていかなければならない。

アセットマネジメントを見える形で示すことで、お客さまに対して、下水道機能を未来永劫確保でき、さらには、老朽化して道路陥没を起こさないよう適切に管路を維持管理し再構築することを約束することになる。

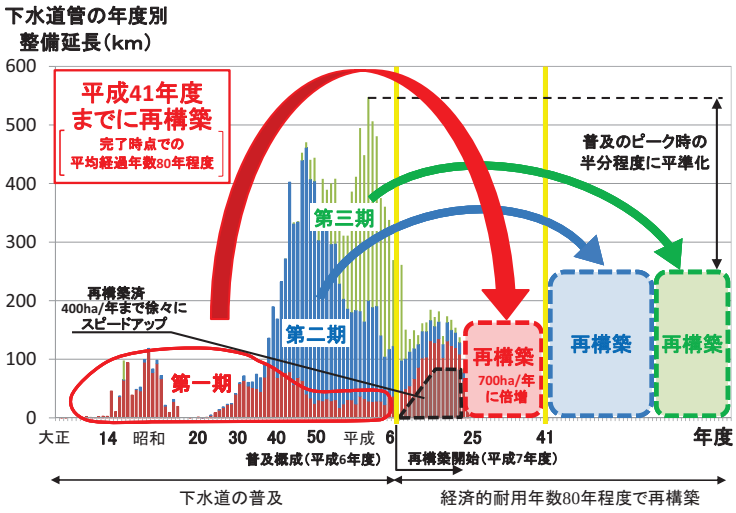


図５　アセットマネジメントのイメージ

職員に対しては、これまでの事業よりスピードアップをしなければならない理由を説明するとともに、技術力向上の動機づけにする。また、関連団体に対しては、再構築事業量を中長期にわたり指し示すことによりそれに対する準備を進めていくように発信する意味を持つものである。

4. これからのアセットマネジメント

一斉に迎える下水道管の膨大な老朽化への対策として、アセットマネジメント手法を採用し、再構築事業の方針を策定したが、今後は、計画を履行し成果を分析評価することで、計画の見直しに取り組む、いわゆる PDCA サイクルを実行し、より実効性の高い計画へのブラッシュアップが求められる。

4-1-2 Preservation and Restoration Project for Important Cultural Properties in Japan Mikawashima Sewage Disposal Plant and Pumping Station Facilities, National Important Cultural Assets

Tatsuya Watanabe Tatsuya_Watanabe@member.metro.tokyo.jp

Abstract: The former Mikawashima Sewage Disposal Plant, the precursor of current Mikawashima Water Reclamation Center in Arakawa, Tokyo, is "the birthplace of modern sewerage system in Japan." The still standing pumping facilities are historically valued as the representative structures of the first modern sewerage plant in Japan. A series of former facilities including pump house and grit chamber are well-preserved with its original conditions. Historical value of the site was recognized and designated as national important cultural asset in 2007.Our preservation and restoration project was undertaken with the purpose to open the facilities to the public, under strict legal restrictions prohibiting undue modifications to assets by the Cultural Assets Preservation Act.

Keywords: important cultural asset, modern sewerage system, open to the public

1.Overview of former Mikawashima Sewage Disposal Plant and Pump Station Facilities

The construction of plant was approved by the cabinet order "Tokyo Sewerage Design" in 1908. Incorporating state-of-the-art technologies in the West at that time, such as activated sludge process, the plant started its operation in 1922 as the first modern sewage disposal plant in Japan. Before the Mikawashima plant, urban sewage in Tokyo was directly discharged to rivers without any treatment. After the plant completion, wastewater was collected to and treated at the disposal facilities before discharging to rivers. The completion of plant, therefore, marked the beginning of modern wastewater treatment in Tokyo, the prerequisite to grow as modern metropolis. The former Mikawashima plant operated for 77 years until 1999. Thereafter, the historical and academic values of the plant were recognized; the former plant was designated to be preserved as historical building. In 2008, under the instruction from the Cultural Affairs Agency, the preservation and public service plan was formulated. The plant was maintained and restored to open to the public from fiscal 2013.

2.Preservation and restoration works

The preservation and restoration works incorporated traditional techniques such as Japanese cement plastering and stony surface treatment, in order to retain its original cultural value.

(a) Removal of top cover over grit chamber

Grit chamber is the facility to sink and remove solid substance in wastewater. Our restoration work removed the aging and deteriorated top cover over grit chamber, in order to restore to its near-original design. The two grit chambers, east and west, were restored differently to exhibit the timeline. East chamber was restored to show its

original state of construction by removing inner facilities, while west chamber was remained as the state of ceasing operation by leaving those used facilities there.

(b) Screening machine house
This building was used to house steel-made screen to filtrate wastewater and debris collector to scoop floating waste continuously. The roof truss of the building has a carved seal of Yahata Steel Works, one of the leading steel works in Japan then, evidencing its origin and authenticity of its age. During the restoration, repair painting was added to the roof truss and facility surfaces.

(c) Inclined railway
Inclined railway was used to winch truck to transport grit and debris screened from wastewater. Railway was laid in an inclined concrete slope to winch flat-top truck up to the road in the plant. Former concrete slope and part of railway were excavated, block was laid at the surrounding space, and the slope was roofed over for convenience of visitors.

(d) Winch house
This building was used to house an electric winch to draw truck on railway. The winch was removed together with the inclined facility in 1962. Thereafter, the building was used as a warehouse with its floor covered with wood. In our restoration, however, the wooden floor was removed, in order to expose the underneath winch foundation on the bare concrete at the time of operation.

(e) Pump pit and underground conduit connected to the pit
Wastewater to the former Mikawashima plant branched off two ways, went through grit chambers, and joined together in front of pump house again to pass through connecting underground conduit to pumping pit. The cross section of underground conduit was in the shape of horseshoe. It was made of reinforced concrete and the floor was covered with ceramic tiles resistant to abrasion. During our restoration, a staircase leading to the basement was installed, together with ventilation and illumination to help visitors to see the sight of underground structures.

(f) Pump house
The building was used to house pumps that lifted wastewater in preparation of starting full-scale treatment. Outer wall of the building, covered with elegant, classic red brick tile, is attractive to visitors. During our restoration, part of damaged brick tiles was replaced with new ones. To reproduce original taste as much as possible, a detailed research was made to clarify the original tile used there. In addition to the above, part of pumping facilities were restored and repaired to maintain the existing conditions.

3.Future outlook

We would like to continue our due preservation and maintenance on the facilities to pass its historical value to the next generation. In the meantime, we would like to encourage people's deeper understanding of importance and role of sewerage, by opening the facility to the public and explaining its history and significance.

Figure 1 The former Mikawashima Sewage Disposal Plant

Figure2 Inside of the pump house of the former Mikawashima Sewage Disposal Plant

4-2-1 A New O&M Approach for both Improvement of Water Quality and Reduction of Greenhouse Gas Emissions in Wastewater Treatment Plants

Takumi Morikawa[1*], Norihisa Kashihara[1], Kenichi Umeda[1]

1 Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government, Japan
*** Email: Takumi_Morikawa@member.metro.tokyo.jp**

ABSTRACT

Since approximately 1% of power consumption of the Tokyo metropolitan area is consumed for the sewage treatment, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government has been putting its efforts into reducing the power consumption to reduce greenhouse gas emissions. Furthermore, further power reductions are required because of the significant increases of electricity rates due to the shut down of nuclear power plants and increase in the cost of the fuel for thermal power generation after the Great East Japan Earthquake. However, an excessive power reduction may lead to the deterioration of the water quality. Thus, the bureau of sewerage has devised and implemented the "Two Axis Management Method" as a tool to achieve both the water quality improvement and power consumption reduction which are in trade-off relationship.

KEYWORDS: operation, total nitrogen concentration, electric power concentration

INTRODUCTION

Since nitrogen is one of the prime causes of eutrophication of closed public water, nitrogen concentration in the effluent water from the wastewater treatment plant (hereinafter referred to as "WWTP") should be reduced actively. In order to remove the nitrogen biologically, the nitrification of ammonia to nitric acid in sewage system is necessary and this process requires a large amount of air. The blower operations for the nitrification require a large amount of power consumption and this leads to a large amount of greenhouse gas emissions. The electricity consumption of the Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government amounts to approximately 1% of power usage of the metropolitan area (approximately 980 million kWh/year)(Bureau of Sewerage, TMG, 2014a), a reduction of the power consumption (i.e., greenhouse gas emissions) together with the water quality improvement shall be promoted strategically. In addition, the significant increases of electricity rates by the shut down of nuclear power plants and increase in the cost of the fuel for thermal power generation after the

Great East Japan Earthquake, a further power reduction is required.

Each WWTPs have been taking measures for water quality improvement and energy saving by introduction of energy saving equipment, optimum operation management, and introduction of advanced treatment. By advancement of both improvements, the concerns of the deterioration of effluent quality are expressed when energy conservation measures have been excessively promoted. A delicate management technique is required to balance between the water quality improvement and energy savings. The “two axis management method” is implemented to address the difficult issue of achieving further reduction in power consumption for air flow volume while securing a certain level of water quality and to correspond to various volume and load of inflow water (Bureau of Sewerage, TMG, 2013). Here we report, the operation method and outcomes of the two axis management method.

OUTLINE AND UTILIZATION OF THE TWO AXIS MANAGEMENT METHODS

Overview of two axis management method

The two axis management method uses the graph with plotting effluent quality and power consumption of the treatment plant along the vertical and horizontal axis respectively (Seiichi *et al*, 2014b). This graph visualizes the results of operating improvements and upgrading facilities. As a representative of effluent quality and power usage from the treatment plant, total nitrogen concentration of discharged water (regulation items) and specific power consumption of blowers were used for the two axis management method. In this method, vector is drawn by plotting the actual value for previous year (or previous month) as the starting point and the actual value for the current year (or current month) as the end point. Both the introduction of energy-saving equipment and the improvement of operation management are monitored so that vector points to the bottom left.

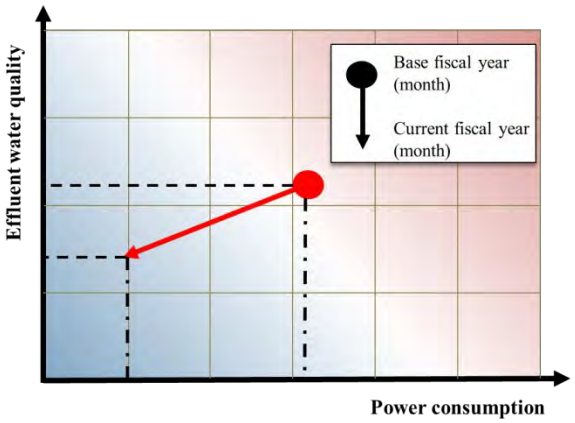


Figure 1. Image of two axis management graph

Operation and evaluation of two axis management

The PDCA cycle was incorporated to develop improvement measures and take into consideration of the current state of WWTPs and the results of both the water quality improvement and energy saving. In particular, continuous operation improvements,

improvements of equipment and spiral up of the both have been pursed in accordance with the flow chart shown in Figure 2.

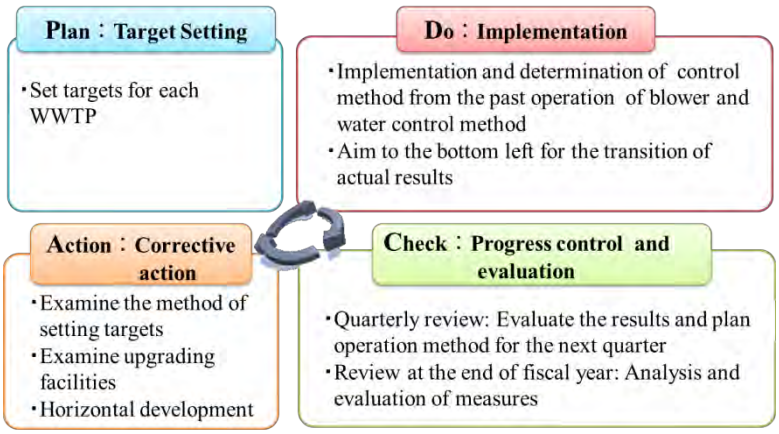


Figure 2. Procedure of two axis management

In order to maximize the update effect and operation improvement of each WWTP, set a goal of specific power consumption of blowers and total nitrogen concentration was set at the start of each fiscal year. In each WWTP, both total nitrogen concentration and specific power consumption of blowers were planned to reduce so that the vector in the graph points to the bottom left. The results were analyzed, evaluated and counter measures were improved. For evaluation, the length and direction of the vector of each WWTP was focused and the effects such as weather conditions, seasonal variation, improvements, and upgraded facilities and the operations at each plant was examined. The deviation between the target value and actual value were calculated as a percentage and used for modification of the measures.

Preparation of two axis graph

The efforts at 13 WWTPs in the Tokyo wards area are reported. Monthly total, 6 months total and yearly total of effluent total nitrogen concentration from each outlet and specific power consumption of blowers for the entire treatment are aggregated and the weighted average of total nitrogen concentration of the entire treatment plant and power consumption per volume of treated water are calculated. Calculated total nitrogen concentration and changes in specific power consumption of blowers are connected by vectors and the length and direction of the vector of each treatment plant are evaluated. Also, data for all treatment plants are integrated into one sheet of paper and evaluated for their positional relationship.

SETTING TARGET VALUES AND EFFORTS TO ACHIEVE THE TARGETS

Set of target values

In order to maximize the effects of operational improvements and upgrading of equipment for each WWTP, targets for specific power consumption of blowers and total nitrogen concentration was set at the start of each fiscal year. For example, deteriorations by special circumstances during the fiscal year of 2013 such as construction works, equipment failure which affects (improvement) of the total nitrogen concentration and specific power consumption of blowers were quantified and adjusted for setting the goal of the fiscal year of

2014. In addition, improvement of total nitrogen concentration and specific power consumption of blowers by the operational improvement and upgrading of equipment and deterioration due to construction works that are expected in the fiscal year of 2014 are reflected to set the specific target value.

Example of target setting is shown in Table 1. In this WWTP, there was suspension of reaction tanks by construction works in the fiscal year of 2013 and total nitrogen and specific power consumption of blowers were worsen by 0.1mg/L and 0.004kWh/m3 respectively. As the construction works were completed during the fiscal 2013, adverse effects due to the construction work is no longer required to take into account in the target setting of the fiscal year of 2014. Target values are established based on the actual annual values of the fiscal 2013 (total nitrogen 10.6 mg/L and specific power consumption of blowers 0.111 kWh/m3) with the deduction for the above (i.e. total nitrogen 10.6 - 0.1 mg/L and specific power consumption of blowers 0.111 - 0.004kWh/m3). In addition, the aeration equipment of the reaction tank in this WWTP is upgraded to the energy-saving type of fine bubble diffuser in 2013. In the fiscal 2014, it was estimated that deduction of 0.001 kWh/m3 specific power consumption of blowers from that of the fiscal 2013 is possible by this upgrading. As such, the target values are further subtracted with the calculated value of the above (specific power consumption of blowers 0.107 - 0.001 kWh/m3). On the other hand, the total nitrogen concentration is expected to be reduced 0.5 mg/L by promoting denitrification by controlling the air volume of a part of the aerobic tanks, but the increase of 0.2mg/L due to the suspension of reaction tanks for reconstruction works was also expected. As such, the target value is set by taking into account of these adjustments (total nitrogen is 10.5 - 0.5 + 0.2 mg/L).

Table 1. Example of Setting Target

Item			Effect and Results	
			specific power consumption of blowers (kWh/m^3)	Total nitrogen (mg/L)
Fiscal year 2013	Average		0.111	10.6
	Factor such as constraction works and breakdown of equipment that affect the results	Suspension of reaction tank due to construction works	-0.004	-0.1
	alues excluding special circumstances		0.107	10.5
Fiscal year 2014	Upgrade to energy saving equipment	Introduction of micro bubble diffusion device	-0.001	
	New operational management	Limited partial aeration of aerobic tank		-0.5
	Construction works and breakdown of equipment that are considered for target setting	Suspension of reaction tank due to construction works		+0.2
Target value			0.106	10.2

Application results of two axis management method

In order to achieve the target values, a two axis management graphs were prepared for each month at each treatment plant and these were used for the evaluation of efforts made. The change history of operating conditions of each treatment plant and the content of efforts made are summarized on a quarterly basis and these are used as a reference for evaluation of vectors. Based on this, vector directions are evaluated and the causes are reviewed.

Analysis of efforts made in each treatment plant

In order to grasp the management status (results) for the current fiscal year, each values was compared with the past average value, and if the positions of vector of the fiscal 2014 are significantly different, it was presumed that there were special processing conditions and effects. Distinctive examples are shown in Figure 3 to 5. Red portions represent the actual value of the total nitrogen concentration and the blower power consumption for each month of the fiscal 2014, and blue portions represent the average value of the previous five fiscal years (from 2009 to 2013) and the dotted line shows the year-end target value.

Figure 3 shows an example which is considered to be influenced by rainfall. The red portions show results from April to June in 2014 and blue portions show the past five-year average from April to June. The trend of the past five years shows that the total nitrogen concentration from April to June decreased and that the specific power consumption of blowers (blue arrow) didn't change significantly. On the other hand, as the blower power consumption from May to June in 2014 is reduced significantly, the vector points to the bottom left and both direction and length of vectors are significantly different from the average of past years (red arrow). This shows that the changes are due to the rainfall in June 2014 which is equivalent to 3.8 times of average rainfall. Combined sewer system is mainly adopted in the Tokyo ward area and a large volume of rainwater flows into the treatment plant at the time of rainfall. It was confirmed that the specific power consumption of blowers was significantly reduced by this effect.

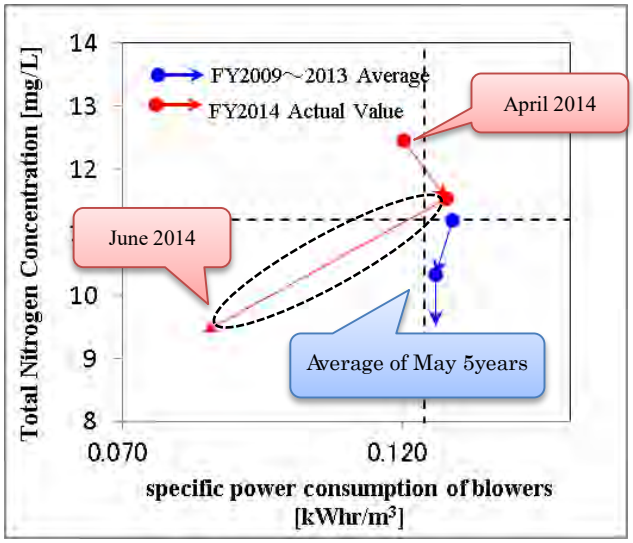


Figure3. The example which is considered to be influenced by rainfall

Figure 4 shows the case that the effect of denitrification promoting operation was clearly visible. The red portions show results from October to December in 2014 and blue portions show the past five-year average from October to December. The trend of the past five years shows that specific power consumption of blowers and total nitrogen concentration from October to December increased and the vector moved top right corner (blue arrow). In the fiscal 2014, the total nitrogen concentration was reduced and the overall vectors located comparatively low (red arrow). In this treatment plant, the air volume to the certain part of aerobic tanks was limited to enhance denitrification. As a result, the total nitrogen concentration is reduced. This example of good practice has been deployed to other treatment plants.

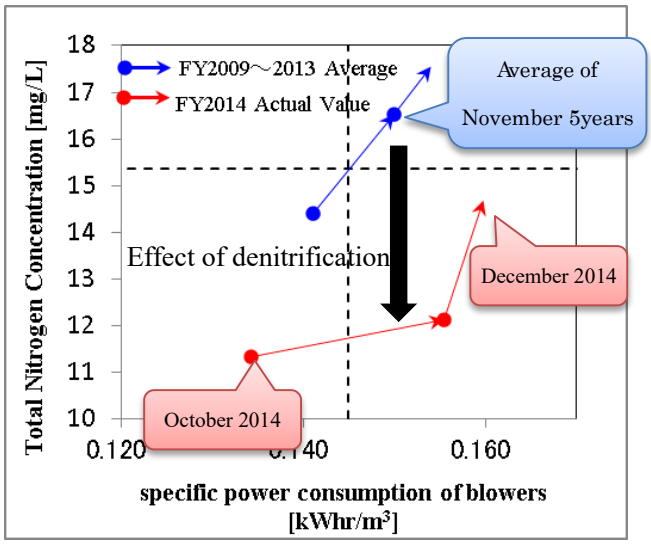


Figure 4. The example which was affected by the effect of denitrification

Figure 5 is an example which is considered to have influenced by construction works. The red portions show results from October to December in 2014 and blue portions show the past five-year average from October to December. The trend of the past five years shows that the increases of specific power consumption of blowers and total nitrogen concentration from October to December and the vector moved top right corner (blue arrow). On the other hand, the comparison of results of the fiscal 2014 with the results of usual years shows significant differences in the length, direction, and positions of the vectors. In particular, total nitrogen concentration from November to December in the fiscal 2014 was significantly increased (red arrow). The capacity of this treatment plant was dropped and nitrification was stagnant due to reduction of the treatment ability because of construction works. Therefore, although the stagnation of nitrification reduced the blower power consumption compared with the results of the previous years, the water quality deteriorated

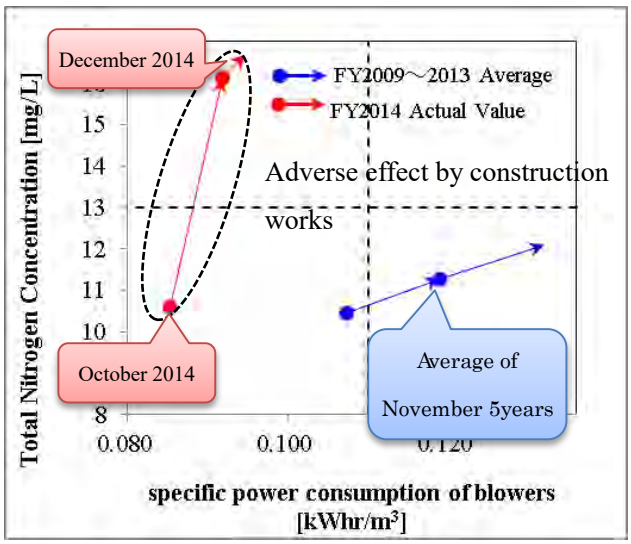


Figure 5. The example which was affected a by construction works

significantly. As a result of this, it could be analyzed that the orientation of vector tuned upward sharply.

Figure 6 is the case that the improvement is clearly seen as a result of upgrading facilities. The red portions show results from October to December in 2014 and blue portions show the past five-year average from October to December. Both the total nitrogen concentration and specific power consumption of blowers from October to December are increased and the tendency that the vector moves toward the top right direction has not changed in the fiscal 2014 as well as past five-year average (blue and red arrows). When comparing the results of the same month of the previous five-year average to the results of the fiscal 2014, the results of fiscal 2014 show the reduction of specific power consumption of blowers and shifting of vector position to the left direction. The aeration equipment of this treatment plant had been changed sequentially to energy-saving type equipment from the spring of this fiscal year. Two reaction tanks out of four were re-commissioned from late August and one more tank was re-commissioned from November. It was concluded that the improvement was achieved by the upgrading of facilities. This effect made the reduction of specific power consumption of blowers by 0.007kWh/m^3.

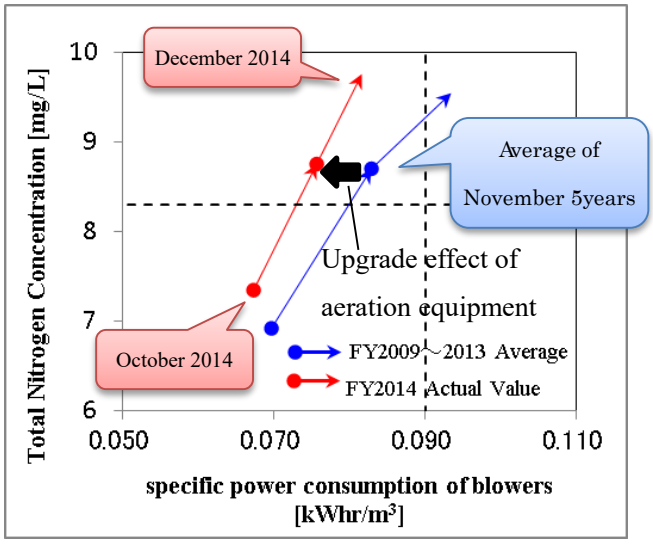


Figure 6. The example that upgrading facilities improved performance

Results of efforts toward target values

The operational improvements have been progressed in each treatment plant by observing the movement of the two axis management graph and checking the target values. Figure 7 to 11 show the deviations in percentage between the target values and cumulated values of total nitrogen and specific power consumption of blowers, plotting the target values to the point of origin. Figure 7 shows the deviation from the target values at the end of the fiscal 2013. Although the treatment plant "A" shown in the Figure was able to reduce 4.0% of specific power consumption of blowers from the target value at the end of the fiscal year, the total nitrogen becomes 17% higher than the target at the same time. Thus the plant was not able to maintain the balance between the water quality improvement and the power reduction. From this, the target of further improvement of the water quality was set for the fiscal 2014 and operational improvements were implemented. Deviations between the target values and the

cumulated values as of the end of April 2014, September 2014, and March 2015 are shown in Figure 8, Figure 9, and Figure 10 respectively. Although both data at the end of April and September 2014 show relatively high specific power consumption of blowers, it was able to minimize the increase of blower power usage per unit and maintaining nitrification and denitrification appropriately, by the reduction of DO set values and setting MLSS higher than usual. As a result, 3.8% of total nitrogen and 4.0% of blower energy were able to reduce compared with the target values and the balance between the water quality improvement and energy-saving were achieved at the end of the fiscal year (Figure 8 to 10).

By visualizing the deviations from the target values, it was clarified whether to focus on either water quality improvement or reduction blower power consumption. Thus, the motivation for the simultaneous achievement of water quality improvement and energy savings is easily promoted.

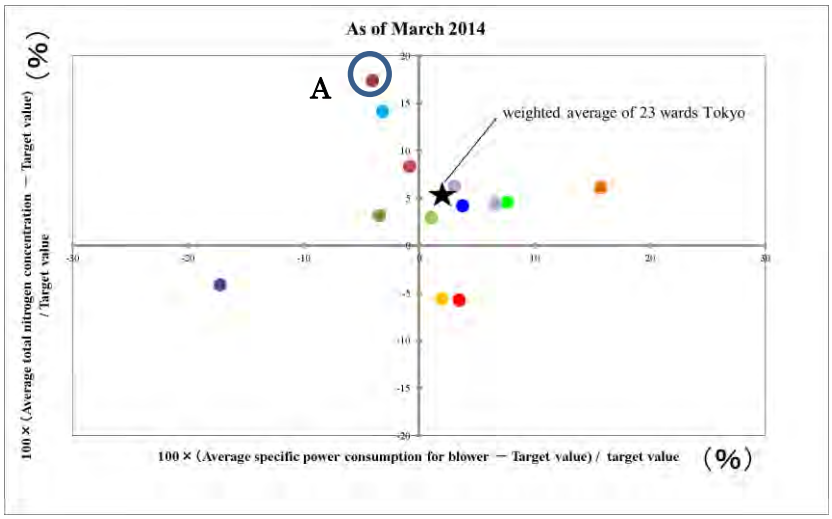


Figure 7. Deviation from the target value as of March 2014

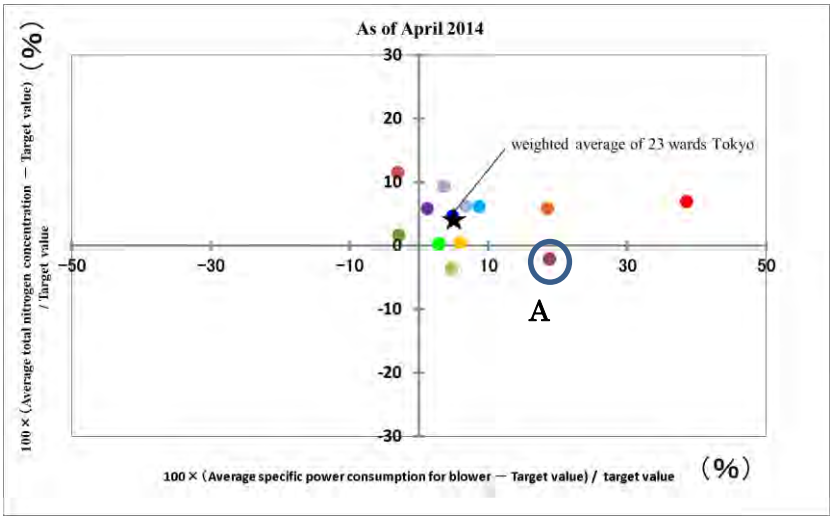


Figure 8. Deviation from the target value as of April 2014

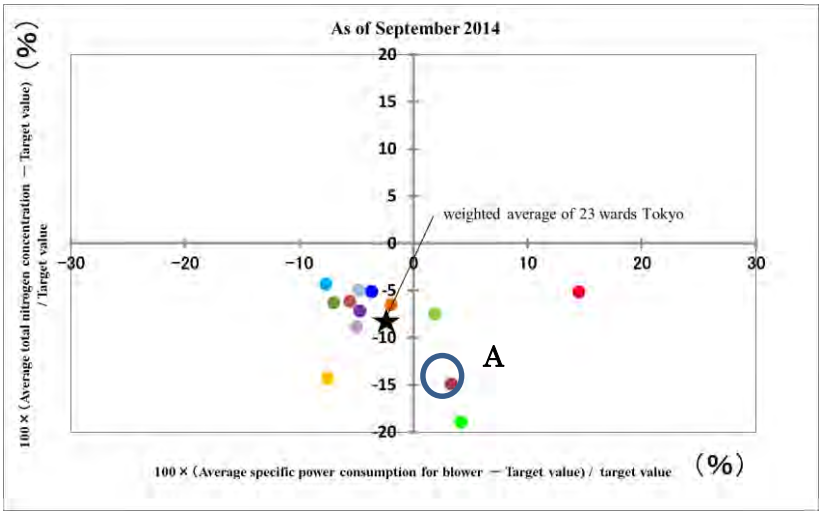


Figure 9. Deviation from the target value as of September 2014

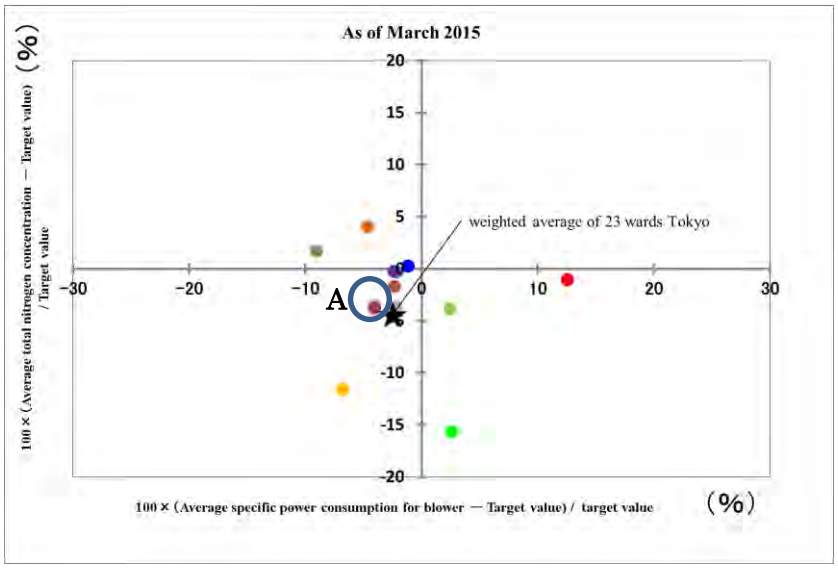


Figure 10. Deviation from the target value as of March 2015

Comparison between treatment plants

A list of the results of each treatment plant for the fiscal 2014 was prepared and comparison using this list was carried out. In Figure 11, the result of the total nitrogen concentrations and the specific power consumption of blowers are shown by plotting the results of the fiscal 2013 as the starting points and the results of the fiscal year of 2014 as the end points. Starting point varies in each WWTP which indicates the distinctive features of each treatment plant. The differences in these positions are considered to reflect differences in the scale, the inflow water quality, the structure and equipment, and reaction time of each treatment plant. The yearly efforts resulted in the reduction in specific power consumption of blowers from 0.117 kWh/m3 to 0.109 kWh/m3 and the improvement of total nitrogen concentration from 11.9 mg/L to 11.3 mg/L in the weighted average of the 23 wards of Tokyo. Reviewing the results of treatment plants individually, it should be noted that vectors are directed in various directions. For example, "A" in Figure 5 shows the good example of software measure that the water quality

was improved by facilitating denitrification by avoiding excessive nitrification which was achieved by the improvement of operational management. Also, "B" is the case of hardware measure that the specific power consumption of blowers are improved by replacement of the air diffuser plates.

Although the individual ratings of treatment plant "A" show the improvement, when compared with the other treatment plants, both the total nitrogen concentration and blower power consumption exceeds the weighted averages of all WWTP. Therefore, both hard and soft measures should be aggressively promoted.

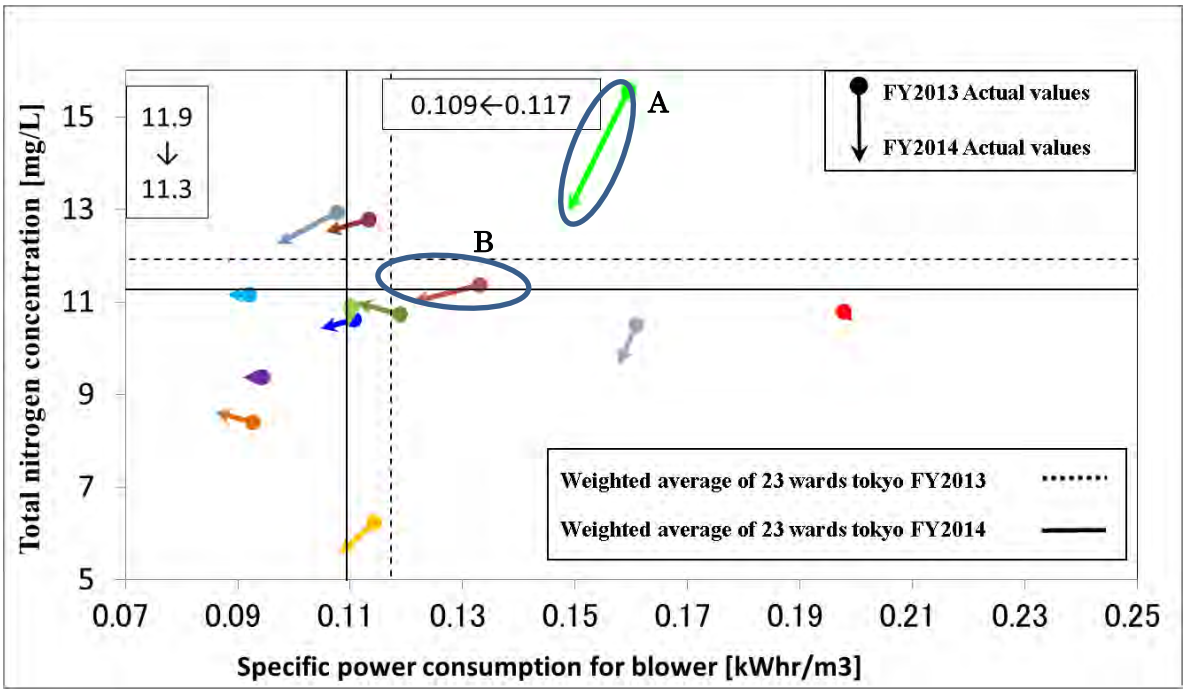


Figure 11. Comparison of the fiscal year of 2013 and 2014

CONCLUSION

As described above, it was possible to clearly grasp the effects of facilities upgrading and operational improvements by visualizing the trend of total nitrogen concentration and the specific power consumption of blowers with vectors. In addition, by setting a target value for each treatment plant and making appropriate changes in operating conditions, motivation to achieve both water quality improvement and energy saving was promoted and it became easy to tackle the issue

.

In Bureau of Sewerage TMG, will further improve and develop the two axis management methods in order to continue the contribution to the realization of good water quality with less

environment impacts by both water quality improvement and power saving which is simultaneous pursuit of water quality and reduction of green gas emissions.

REFERENCES

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (2014a) *Smart Plan 2014*
Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (2013) *2013 Management Plan*
Seiichi, S; Teru, Y; Youhei, A; Mayuko, T (2014b); New O&M approach for reduction of the power consumption by two axis management. *The 51th Annual Technical Conference on Sewerage*, 604-606 (in Japanese)

【国際会議発表論文：日本語訳】

4-2-1 温室効果ガスの削減と水質改善を両立するための新たな下水処理施設の維持管理の取組

施設管理部　環境管理課　森川　拓未
（現　計画調整部　計画課）

要約

東京都下水道局は、汚水の浄化のため東京都内の年間電力使用量の約１％を消費していることから、これまでも温室効果ガス削減のために電力削減に努めてきた。更に、東日本大震災後の原子力発電所の停止と火力発電の燃料高騰による大幅な電力料金の値上げ等により、更なる電力削減が求められることとなった。しかしながら、過度の電力削減は水質を悪化させてしまう。そこで当局では、このようなトレードオフの関係にある水質改善と電力削減を両立させるためのツールとして「二軸管理」手法を考案・導入し、運用している。

キーワード
operation, total nitrogen concentration, electric power concentration

1. 取組の背景

窒素は閉鎖性公共用水域の富栄養化要因の一つであるため、下水処理場からの放流水中の窒素濃度は積極的に低減していく必要がある。生物学的窒素除去を行うためには、下水中のアンモニアを硝酸まで硝化する必要があり、このプロセスには大量の送風を必要とする。そのため、硝化を行うと送風機の電力消費により大量の温室効果ガスの排出につながってしまう。東京都下水道局の使用電力量は都内の全使用電力の約 1%（約 9.8 億 kWh/年）を占めており、水質改善と共に電力使用量の削減すなわち温室効果ガス削減を計画的に進めていく必要がある。さらに、2011 年 3 月に発生した東日本大震災後の原子力発電所の停止と火力発電の燃料高騰による大幅な電力料金の値上げ等に対応するため、エネルギー使用量の更なる削減が求められている。

各下水処理場（以下「処理場」という）においては、省エネ機器の導入、運転管理の工夫や高度処理の導入など従来から処理水質の改善（以下「水質改善」という）と省エネルギー（以下「省エネ」という）に取り組んでいた。両者の改善が進んだことで、省エネ対策を過度に進めると、放流水質が悪化する懸念が生じるようになった。そのため、より細やかな管理が必要になり、水質改善と省エネをバランスよく管理する手法が求められるようになってきた。変動する流入水量や流入負荷量に適切に対応した運転を行い、常に一定以上の水質を確保するとともに更なる送風電力量削減を達成するという困難な課題に取り組むための現状把握ツールとして、二軸管理手法を導入した。本論文では、二軸管理手法の運用方法とその結果について報告する。

2. 二軸管理手法の概要と活用方法

2.1 二軸管理手法の概要

二軸管理手法は、処理場からの放流水質と電力使用量をそれぞれ縦軸、横軸に取ったグラフを作成することにより、運転改善や設備更新の成果を視覚化し、その成果を評価する手法である。処理場からの放流水質と電力使用量の代表として、放流水中の全窒素濃度（規制項目）と送風電力量原単位の２項目を管理に適用した。前年度又は前月の実績値を始点、当該年度又は当月の実績値を終点とするベクトルを描き、そのベクトルが左下を向くよう運転管理の工夫や省エネ設備導入の選定を行うことで、水質改善と省エネの両立を図った。

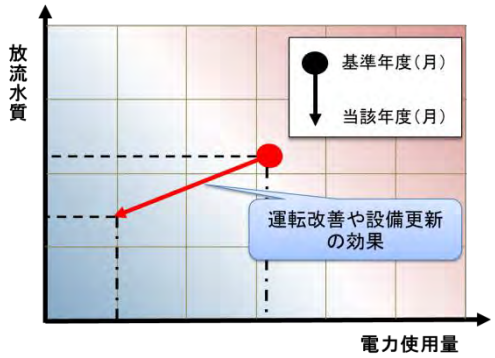


図１　二軸管理グラフのイメージ

2.2 二軸管理の運用と評価

我々は、水質改善と省エネの両立に向けた取組みの結果やセンターの置かれた状況を確認し改善策を考えていく手順に、PDCA サイクルを取り入れた。具体的には、図２で示した流れで管理することで、運転改善や設備改善を継続して行い、両立のスパイラルアップを進めている。

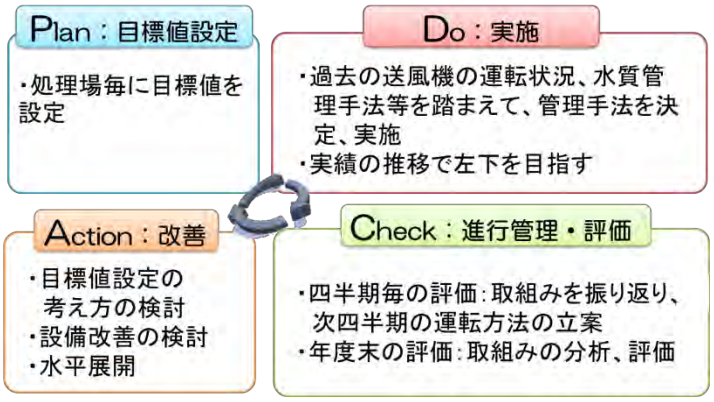


図２　二軸管理の進め方

処理場毎に機器の更新効果や運転改善効果を最大限引き出すため、年度当初に全窒素濃度と送風電力量原単位に目標を設定、取り組むこととした。各処理場においては、全窒素濃度、送風電力量原単位の両者がともに改善する方向である左下に向くよう取組み、定期的に作成したグラフを基に、その実績を分析、評価し、取組みを改善した。評価の際には、各処理場のベクトルの長さと方向に着目し、気象条件や季節変動のほか、各処理場で行う運転の工夫や設備更新効果等、どの要因や運転手法が影響を与えたのかを検討した。また、目標値とのずれを百分率で計算し、適宜取り組み内容を修正した。

2.3 二軸管理グラフの作成方法

今回は、東京区部エリアの処理場 13 か所を対象にした取り組みを報告する。処理場の各放流口からの放流水全窒素濃度およびセンター全体の送風機電力量の月合計値、６か月合計値、年合計値を集計し、それぞれについて処理場全体の加重平均全窒素濃度および単位処理水量当たりの原単位を算出した。計算した全窒素濃度、送風電力量原単位の変化をベクトルで結び、各処理場のベクトルの長さと方向について評価した。また、すべての処理場のデータを一枚に集約し、その位置関係を評価した。

3. 目標値の設定と目標達成に向けた取り組みについて

3.1 目標値の設定

二軸管理は、処理場毎に機器の更新効果や運転改善効果を最大限引き出すため、全窒素濃度と送風電力量原単位に目標を設定し、取り組んでいる。例えば 2014 年度の目標設定の際には、2013 年度中に行われた工事や機器故障等、特別な事情による全窒素濃度や送風電力量原単位の悪化分（上昇分）を定量化し、その影響を 2013 年度実績から差し引いた。これに、2014 年度に見込まれる機器の更新や運転改善による全窒素濃度や送風電力量原単位の向上分（減少分）と、予定されている工事による悪化分（上昇分）をリストアップし、これらを反映させて具体的な目標値を設定した。

表 1 に目標設定の具体例を示す。このセンターでは、2013 年度に工事による反応槽の停止があり、その影響で全窒素が 0.1mg/L、送風電力量原単位が 0.004kWh/m^3 悪化（上昇）した。この工事は 2013 年度中に完了しており、2014 年度にはこの悪影響はなくなる。そこで目標値設定の際には、2013 年度の年間実績値（全窒素 10.6mg/L、送風電力量原単位 0.111kWh/m^3）からこの値（全窒素 0.1mg/L、送風電力量原単位 0.004kWh/m^3）をそれぞれ差し引いた（全窒素 10.6－0.1mg/L、送風電力量原単位 0.111－0.004kWh/m^3）。また、このセンターでは 2013 年度中に反応槽散気設備が省エネ型の微細気泡散気装置に更新され、2014 年度はこの効果により 2013 年度実績と比べて送風電力量原単位 0.001 kWh/m^3 の低減が可能であると判断できた。そこで、目標値設定の際にはさらにこの数字を上記の計算値から差し引いた（全窒素送風電力量原単位 0.107－0.001kWh/m^3）。一方、全窒素濃度については、好気槽一部の送風量を制限し、脱窒を促すことで全窒素濃度が 0.5mg/L 低減できるが、2014 年度に予定されている再構築工事に伴う反応槽の停止により全窒素濃度が 0.2mg/L 悪化すると判断し、以上の項目を足し合わせ、目標値を設定した（全窒素 10.5－0.5＋0.2mg/L）。

表 1　目標設定の一例

項目			効果・影響	
			送風電力量原単位 (kWh/m^3)	全窒素(mg/L)
2013 年度	年度平均値		0.111	10.6
	実績に影響を与えた工事、機器故障	工事による反応槽停止	−0.004	−0.1
	特別な事情を除いた値		0.107	10.5
2014 年度	省エネ機器への更新	微細気泡散気装置の導入	−0.001	
	新たな運転の工夫	好気槽一部制限曝気		−0.5
	目標設定に当たって考慮する工事、機器故障	工事による反応槽停止		+0.2
目標値			0.106	10.2

3.2 二軸管理の運用結果

目標値を達成するため、各処理場では二軸管理グラフを月ごとに作成し、取り組み成果を評価した。また、各処理場の運転条件の変更履歴や取り組み内容を四半期ごとに集計し、

ベクトルの評価の参考とした。これを基に、ベクトルの方向性を評価し、その原因が何であるかを評価した。

3.2.1 各処理場の取り組み成果の解析結果

当該年度の管理状況（結果）を把握するため過去の平均値と比較し、2014 年度のベクトルの位置、方向や長さが大きく異なる場合には、特殊な処理条件や影響があったと推察した。図３～５に、特徴的であった例を示す。図中の赤は 2014 年度各月の全窒素濃度および送風電力量原単位の実績値を、青は過去５ヵ年（2009 年度から 2013 年度）の月別平均値を、破線は年度末目標値を示している。

図３は降雨の影響を受けたと考えられる例である。図中赤は 2014 年４月から６月の結果を、青は４月から６月の過去５ヵ年平均値を示している。過去５ヵ年の傾向では、４月から６月にかけて全窒素濃度が低下していくが、送風電力量原単位は大きく変化していない（青矢印）。一方、2014 年度の結果は、５月から６月にかけて送風電力量原単位が大きく低下することでベクトルが大きく左下に向いており、過去平均値と比較して方向と長さが大きく異なっている（赤矢印）。これは６月に例年の 3.8 倍の降雨量があり、その影響を受けたと分析できた。東京区部では合流式下水道である場合が多く、降雨時に雨水が大量にセンターに流入する。この影響により送風電力量原単位が大きく低減することが確認できた。

図４は、脱窒促進運転の効果が出たと考えられる事例である。図中赤は 2014 年 10 月から 12 月の結果を、青は 10 月から 12 月の過去５ヵ年平均値を示している。この例の過去５ヵ年の傾向では、10 月から 12 月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに増加することでベクトルが右上に移行する（青矢印）。2014 年度では、全窒素濃度が低下することでベクトルが全体的に下に位置していた（赤矢印）。この処理場では、好気槽一部の送風量を制限し、脱窒を促進する運転を試みた。その結果、全窒素濃度が低下したと考えられた。この好事例は、次年度以降の対象槽拡大や他処理場への水平展開を進めている。

図５は、工事の影響を受けたと考えられる例である。図中赤は 2014 年 10 月から 12 月の結果を、青は 10 月から 12 月の過去５ヵ年平均値を示している。過去５ヵ年の傾向では、10 月から 12 月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに増加することでベクトルは右上方向に推移している（青矢印）。一方、例年の結果と比較すると、2014 年度の結果ではベクトルの長さ、方向および位置が大きく異なっていた。特に、2014 年度では 11 月から 12 月にかけて全窒素濃度が大きく増加した（赤矢印）。この事例の処理場では、11 月以降、工事に伴う施設停止により処理能力が低下し、硝化が停滞した。そのため、硝化の停滞により送風電力量は例年と比べ低減したものの、水質に悪影響が出たため、ベクトルが大きく上方向を向いたと分析できた。

図６は、設備更新効果が発現されたと考えられる事例である。図中赤は 2014 年 10 月から 12 月の結果を、青は 10 月から１２月の過去５ヵ年平均値を示している。10 月から 12 月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに上昇し、右上方向に推移する傾向は過去平均値および 2014 年度でも変わらなかった（青、赤矢印）。一方、過去５ヵ年平均値および 2014 年度の同月の結果を比較すると、2014 年度の結果では送風電力量原単位が低下しており、ベクトルの位置が左方向にスライドしている。この処理場では今年度春から順次散気設備を省エネ型に更新しており、８月下旬に当該反応槽４槽中２槽、11 月からは４槽中３槽で運用を開始した。この設備更新の効果をいかんなく発揮したことが原因で

あると分析できた。また、この効果により、送風電力量原単位は年間で 0.007kWh/低下した。

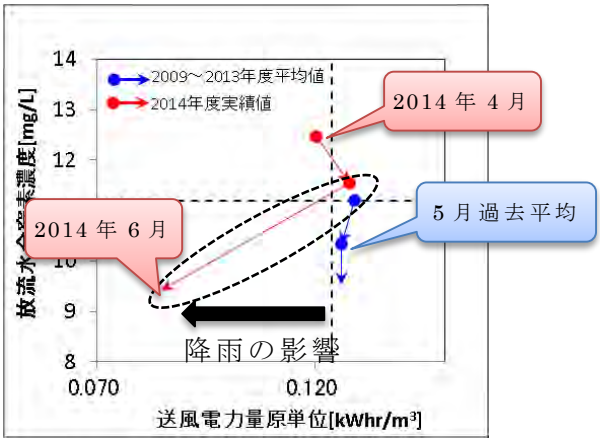


図 3　降雨の影響を受けた例

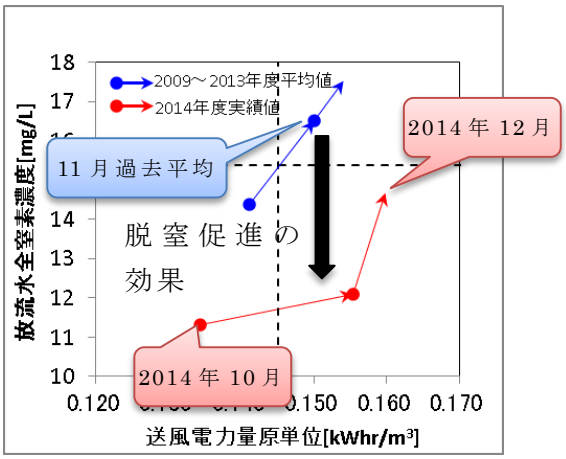


図 4　脱窒促進の効果が出た例

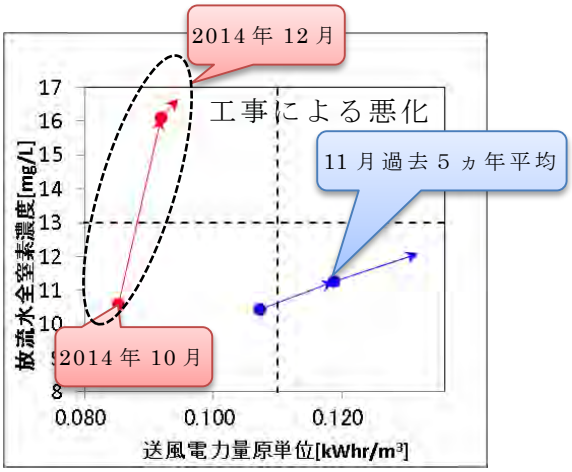


図 5　工事の影響を受けた例

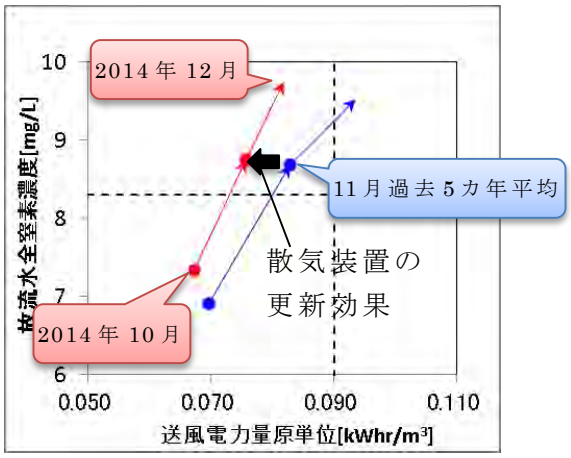


図 6　設備更新効果が発揮された例

3.2.3　目標値達成に向けた取り組み結果

各処理場では、定期的に二軸管理グラフの動きや目標値とのずれを確認し、適宜運転改善を進めている。図 7 から 11 は、各センターの目標値を原点に取り、各時点における全窒素と送風電力量原単位の累積値と目標値とのずれを百分率で示したものである。図 7 は 2013 年度末時点での目標値とのずれを示したものである。図中 A 処理場では、年度末には目標値よりも送風電力量原単位を 4.0%多く低減することに成功したものの、全窒素は年度末時点で目標よりも 17%高くなり、水質改善と電力削減のバランスを取ることができなかった。その反省から、2014 年度は水質をより改善する目標を掲げ、運転改善を行った。図 8 は 2014 年 4 月末時点、図 9 は 2014 年 9 月時点、図 10 は 2015 年 3 月時点の累積値と目標値とのずれを示したものである。2014 年 4 月、9 月末時点では送風電力量原単位が高い傾向にあったものの、DO 設定値を低下させつつ MLSS を例年より高めにすることで、送風電力量原単位の上昇を最小限に抑えながら適宜硝化と脱窒を維持した。その結果、年

度末には全窒素 3.8%、送風電力量 4.0%目標よりも多く低減することができ、水質改善と省エネの両立を図ることができた（図 8～10）。

目標値とのずれを視覚化することで、水質改善と送風電力量原単位の低減のどちらに重点を置いて取り組めばよいのかが明確化し、水質改善と省エネの両立についての動機づけを図ることが容易になった。

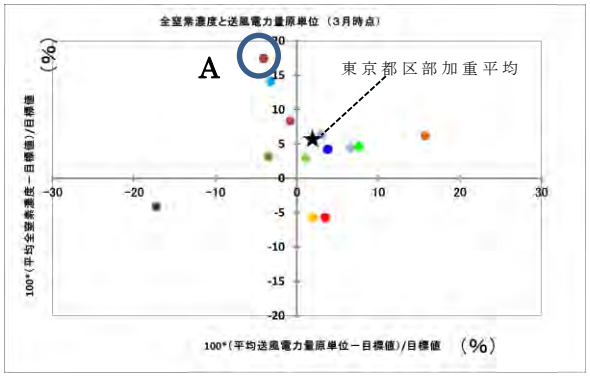


図 7　2014 年 3 月時点での目標値とのずれ

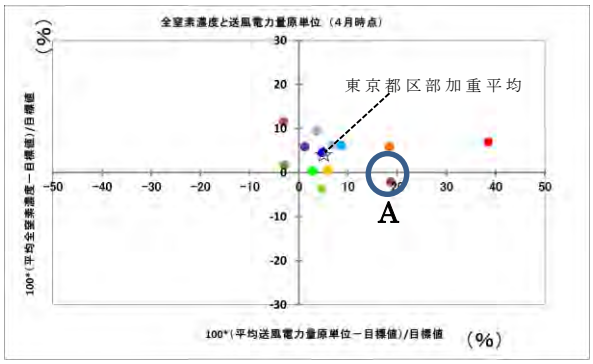


図 8　2014 年 4 月時点での目標値とのずれ

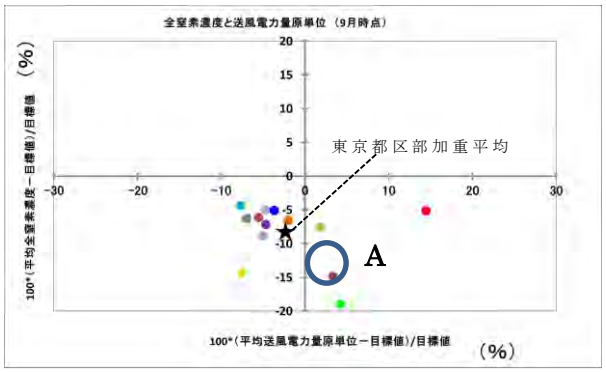


図 9　2014 年 9 月時点での目標値とのずれ

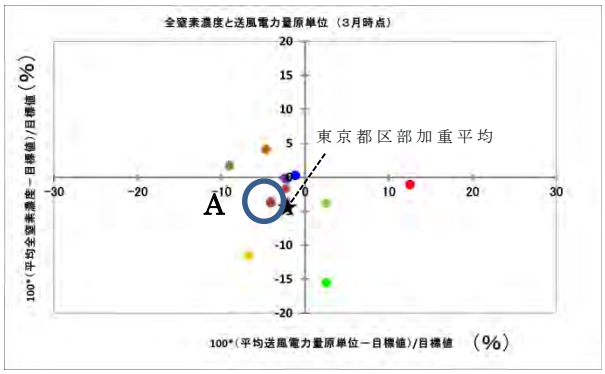


図 10　2015 年 3 月時点での目標値とのずれ

3.2.4　処理場間の比較

次に各処理場の 2014 年度年間実績を一覧にし、比較を行った。図 11 に、2013 年度実績を始点、2014 年度実績を終点とした全窒素濃度と送風電力量原単位の結果を示す。各処理場のベクトルを見ると、始点の位置は様々であり処理場独特の特色があることがわかる。これらの位置の違いは各処理場の規模や流入水質、設備構造や反応時間の違い等を反映していると考えられた。年間の取組みの結果、東京都区部の加重平均で送風電力量原単位は 0.117kWh/m³ から 0.109kWh/m³ に、全窒素濃度は 11.9mg/L から 11.3mg/L に改善した。処理場個別に見ると、ベクトルは様々な方向を向いている。例えば、図中の A は、運転管理の工夫というソフト対策により、過度な硝化を進めず脱窒を促すことで水質改善できたと評価される好事例である。また、B はハード対策である設備改善として散気板更新を行った効果をいかんなく発揮し、送風電力量原単位を改善した事例である。

処理場個別の評価では A は改善されているが、処理場間のベクトルの位置を比較すると、相対的に全窒素濃度、送風電力量原単位共に区部加重平均を上回っている。そこで今後、積極的にハード、ソフト対策を進めていくこととした。

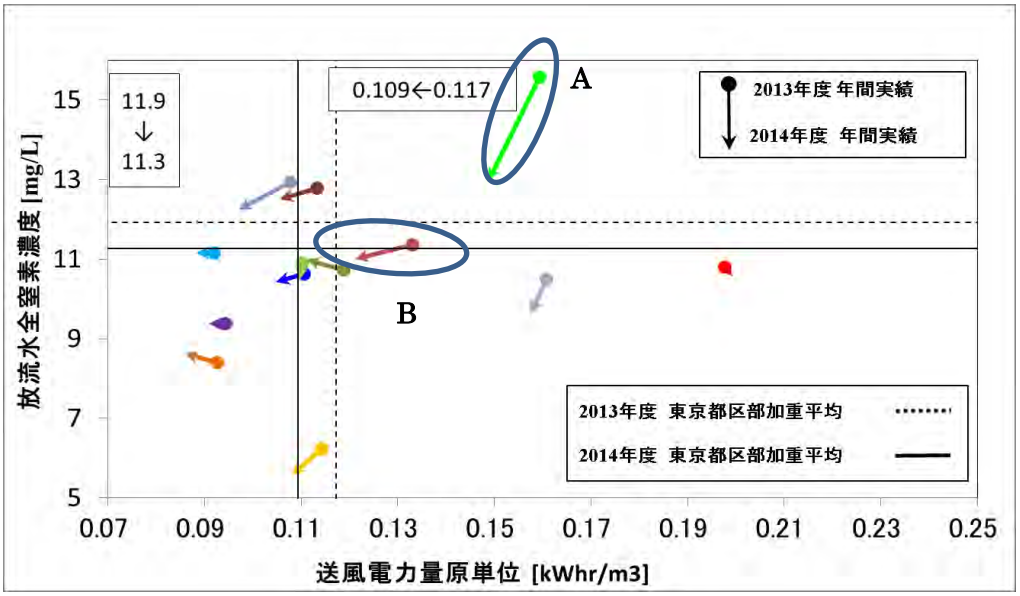


図 11　2013 年度と 2014 年度の比較

4. 結論

以上のように、全窒素濃度と送風電力量原単位の推移を視覚化したベクトルを描くことで、設備改善や運転改善の工夫の効果が明確に把握できるようになった。また、処理場毎に目標値を設定し、目標設定に向けて適宜運転条件の変更を行っていくことで、水質改善と省エネの両立への意識づけが図られたことにより、取り組みが進みやすくなった。

東京都下水道局では、良好な水環境と環境負荷の少ない都市の実現に貢献していくため、今後もこの二軸管理手法を更に改良、発展させながら、水質改善と電力削減、ひいては水質改善と温室効果ガス削減の両立に向けた取組みを進めていく。

4－2－2 Basic Energy Plan "Smart Plan 2014" for sewerage system

Shuhei Taketani,
Planning and Coordination Department,
Bureau of Sewerage,
Tokyo Metropolitan Government

1. Introduction

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (hereinafter referred to as the "Bureau") has continuously been operating large numbers of facilities such as approximately 16,000 km long sewer pipe line, 20 water reclamation centers, and 87 pumping stations 24 hours a day year-round. These services are contributing to safe, secured, and comfortable urban development of Tokyo by preventing flooding, improvement of water quality, and preservation of public waters and living environment.

The Bureau has been using a large amount of energy to provide high quality sewerage services. The annual power consumption is approximately 980 million kWh which is equivalent to 1% of total annual consumption of the Tokyo metropolitan area (approximately 86,000 million kWh). On top of power consumption, the fuel equivalent to approximately 20 million m^3 of city gas consumed. The Bureau is the largest consumer of fuel in the Tokyo metropolitan area. Also, the implementation of projects such as the improvement of combined sewers and the enhancement of flood prevention measures may further increase the energy consumption in the future. The Bureau is responsible for the reduction of power consumption as a major power consumer.

Further, power plants suffered serious damages by the Great East Japan Earthquake which occurred on March 11, 2011, the energy-saving measures such as rolling blackouts, and the restriction on electricity use in summer were implemented. The stagnant fuel supply due to the confusion in distribution networks caused disruptions of emergency power supplies. Thereafter, electricity prices were significantly increased by the suspension of nuclear power plants, and this had a significant impact on the management of sewerage system. Faced with these difficulties, the Bureau was forced to make a major shift in the energy supply system.

Japan's first basic energy-saving plan for sewerage system, "Smart Plan 2014" was established in June of 2014 for the optimum control of the energy for the sewerage system, and providing stable and sustainable sewerage services.

(1) Status of energy usage at the time of the development of the plan

Annually, the Bureau performs the pumping of approx. 2.8 billion m^3 of rain and sewage at pumping stations and the incineration of approx. 80 million m^3 of sludge and approx. 2 billion m^3 of sewage at water reclamation centers. Annual energy usage of electricity and fuel such as city gas for these pumping and processing is amount to 4,620 TJ (tera joules) on a calorie basis. A proportion of 76% of total energy is electricity and 24% is fuel (Figure - 1). Total energy would be reduced by focusing on both electricity and fuel.

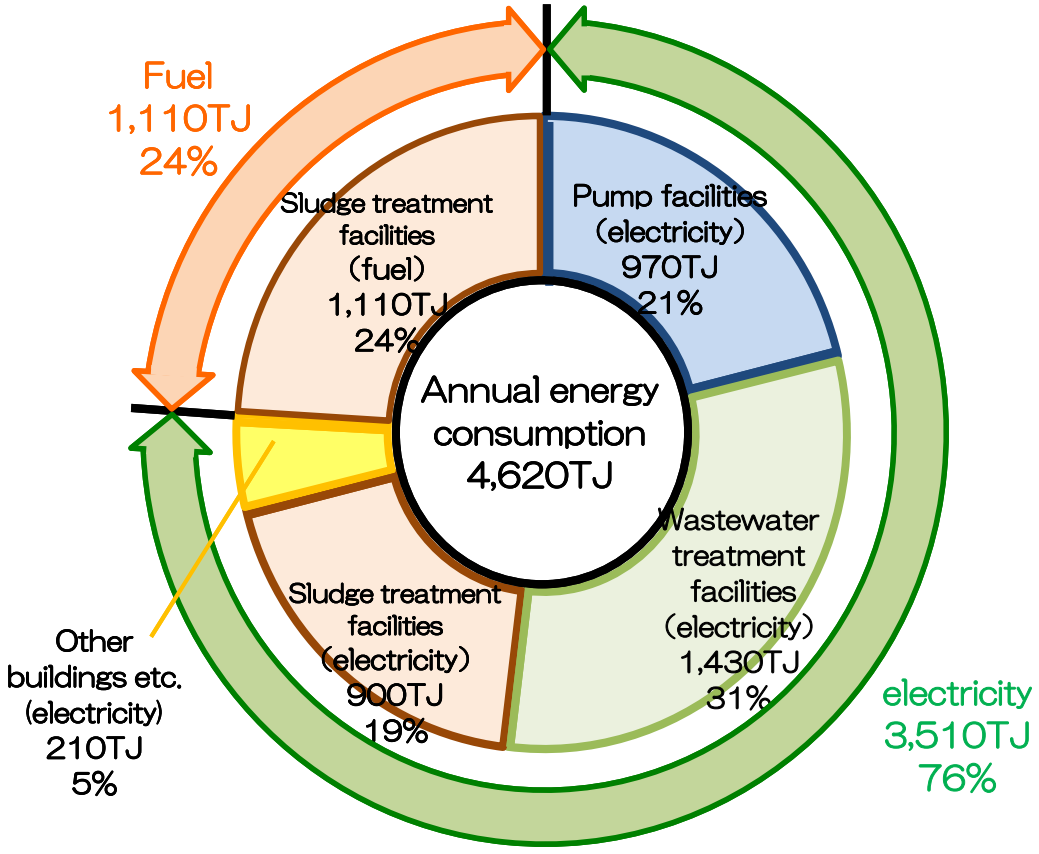


Figure -1 Proportion of energy usage by the Bureau(The fiscal year of 2013)

(2) Various problems relating to energy

Ⅰ） Projected increase in future energy usage

Along with the efforts to improve the sewerage services, further reduction of energy consumption would be implemented in order to cope with the increase of the energy consumption for the prevention of flood and the improvement of combined sewer. The both tasks increase the power consumption due to the increases in the volume of pumping during rain, the increase in the volume of contaminated rain water collected at the beginning of rain that is to be treated at water reclamation centers. Taking these increases into consideration, further reduction in energy consumption is required.

ⅱ） Impacts on the sewerage services by the Great East Japan Earthquake

As mentioned above, immediately after the Great East Japan Earthquake, the Bureau was forced to respond to the rolling blackouts while maintaining minimum functions such as wastewater treatment and rainwater discharge. Although, water reclamation centers and pump stations have been promoting the preparation of emergency power generation facility in order to maintain the sewerage function during a power outage, the completed number of facilities having the total planned capacity is approx. 70% in the end of the fiscal year of 2013. In addition, due to confusion of distribution system after the earthquake, the fuel supply to emergency power generation facilities was extremely difficult. As such, sewage was temporarily stored as much as possible in sewer pipe lines at the time of rolling blackouts, so that the number of pumps that are require to operate was minimized. Thus, the fuel of emergency power generation was reduced.

Bear in mind the aforementioned, in order to maintain continuous operation of sewerage system under any circumstances in the future, it is imperative to secure the expansion of emergency power generation facilities and emergency power sources as well as appropriate fuel supplies. Also, a reduction in external energy dependence by aggressive introduction of distributed power source and efforts to secure stable energy supply are required.

ⅲ） Impacts on the management of sewerage system

After the earthquake, electricity prices increased significantly due to the increase in the proportion of thermal power generation by the suspension of nuclear power plant and soaring fuel procurement price by the fluctuations of foreign exchange rates. Therefore, the Bureau made various efforts of power consumption reduction and the annual power purchase was reduced from approx. 1,010 million kWh

before the earthquake to approx. 950 million kWh in FY2011 and 2012 after the earthquake. The reduction per year is approx. 60 million kWh. However, despite these efforts of reduction, electricity charges increased 3 billion yen during the fiscal year of 2012. In order to provide continuous stable sewerage services in the future, efforts to further reduction of purchased energy would be continued to implement so that the impact of electricity rates rise can be minimized.

2. Summary of Smart Plan 2014

The summary of the Smart Plan 2014 that aims to solve the various problems relating to energy and stably supply and continuous development of sewerage system are as follows:

(1) Targets, planning period, and concept of energy reduction

○ Targets

Increase the proportion of renewable energy and energy saved to 20% or more of the total energy consumption before the end of the fiscal year of 2024.

○ Planning period

From the fiscal year of 2014 to 2024

○ Method of energy reduction

The total energy consumption is defined as the sum of the energy purchased plus renewable energy and energy saved.

As shown in Figure - 2, the energy purchased (external procured energy) would be reduced by increasing the proportion of renewable energy (renewable energy + energy saved) of the total energy consumption.

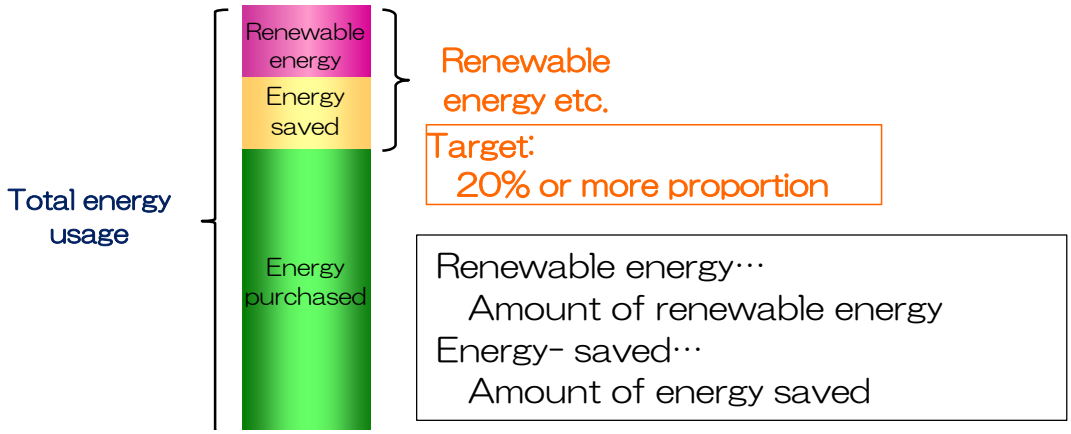


Figure -2 Image of proportion of renewable energy

(2) Projected future energy purchase amount

The purchase amount of energy is estimated to increase from 4,390TJ in the fiscal year of 2013 to 4,930 TJ in the fiscal year 2024 as shown in Figure 3 assuming the sewerage service improvements would be implemented as planned without taking countermeasures for the energy reduction. Therefore, further expansion of renewable energy utilization and further energy saving efforts are required so that the proportion of renewable energy and energy saved would be increased to 20% or more of the total energy usage and the energy purchase would be reduced to 4,060TJ or less before the end of the fiscal year of 2024.

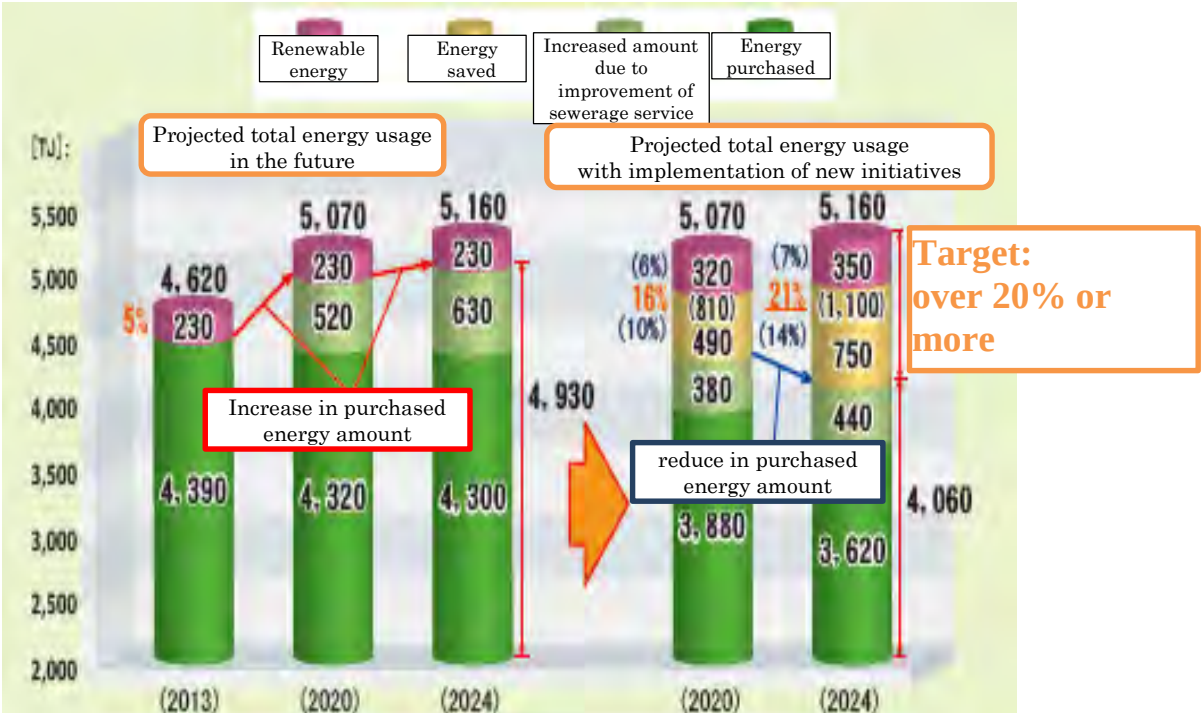


Figure -3 Projected total energy usage in the future and projected total energy usage with implementation of new initiatives

(3) Four policies

Based on the four policies of the Smart Plan 2014 plans, major efforts would be implemented in order to increase the proportion of renewable energy to 20% or more.

○ Policy 1 - Expansion of renewable energy utilization

To secure own energy for sewerage services, renewable energy such as new solar power generation and new power generation utilizing the unused low-temperature of waste heat from sludge incineration would be used as much as possible.

○Policy 2 - Further promotion of energy saving

By advancing the development and introduction of novel advanced wastewater treatment method and an energy self-contained incineration system, the energy conservation would be promoted further and the energy consumption should be reduced.

○ Policy 3 - Introduction of smart management of energy

On top of the conventional energy conservation measures at individual facilities and equipment in a series of facilities, the "Energy Smart Management" which consists of the optimization of energy through the process of the entire facility from wastewater treatment to sludge treatment and the improvement of the efficiency of the operation management across multiple facilities from broad perspective is to be introduced for the smarter energy use.

○ Policy 4 - Strengthening of energy crisis management

In order to maintain the sewerage services under any circumstances, strengthening the countermeasures for energy crisis such as the expansion of emergency power generation and the introduction of distributed power sources as well as sharing the fuel required for the emergency power generation between facilities, would be implemented.

3. Specific efforts of the Smart Plan 2014 for the realization of the proportion of renewable energy and energy saved to more than 20%

The examples of concrete efforts for each of the four policies are described below:

(1) Policy 1 - Expansion of renewable energy utilization

ⅰ） Expand the introduction of solar power generation

The Bureau has a very small space available in wastewater treatment facilities, because they are located in urban areas.

As such, ingenuity such as the installation of solar panel onto the cover for odor prevention over reaction tanks in treatment plants for the utilization of space as well as the reduction of installation costs (Figure - 4) and the distributed instillation of small-scale solar panels to pumping stations would be exercised.

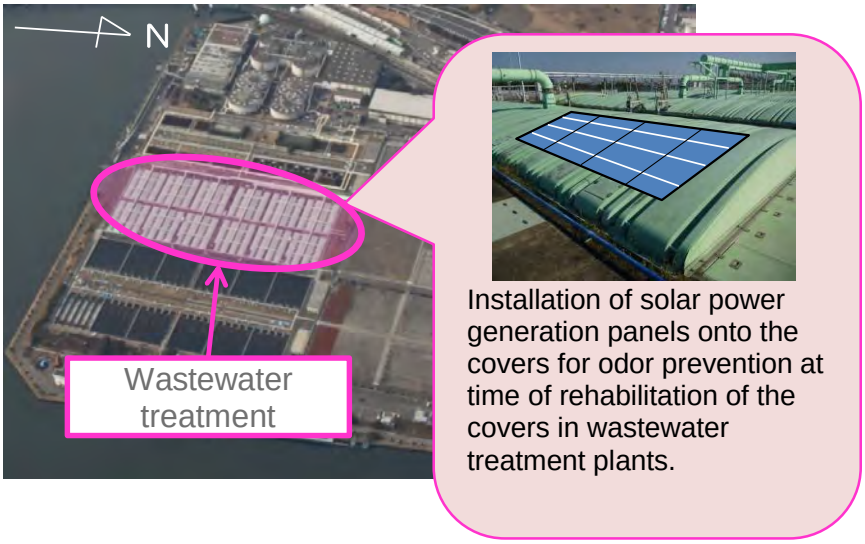


Figure -4 Image of introduction of solar panels to Morigasaki water reclamation center

ⅱ） New power generation utilizing the waste heat of sludge incineration

The Bureau, for the purpose of extending the life of final waste disposal sites, must make the maxim reduction and the stabilization of sludge. For this purpose, all the sludge is incinerated.

As described previously, a large amount of energy is used for sludge treatment. A power generation technology utilizing incineration waste heat of the low-temperature that has not been used at the moment due to technical reasons should be developed and introduced (Figure -5).

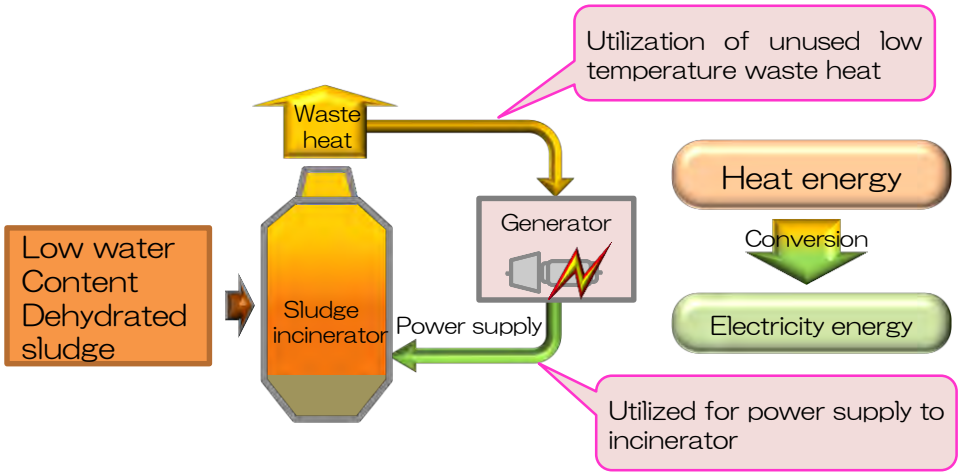


Figure -5 New power generation utilizing wasted heat of sludge incineration

(2) Policy 2 - Further promotion of energy saving

ⅰ） Development and introduction of "Self contained incineration system"

The Bureau, with the aim of expanding the renewable energy utilization and further energy saving, would develop and introduce a "Self contained incineration system" that is the combination of the ultra-low moisture content type dehydrator that can further reduce water content and the self-contained incinerator that can generate the power from the waste heat of sludge incineration for itself (Figure - 6).

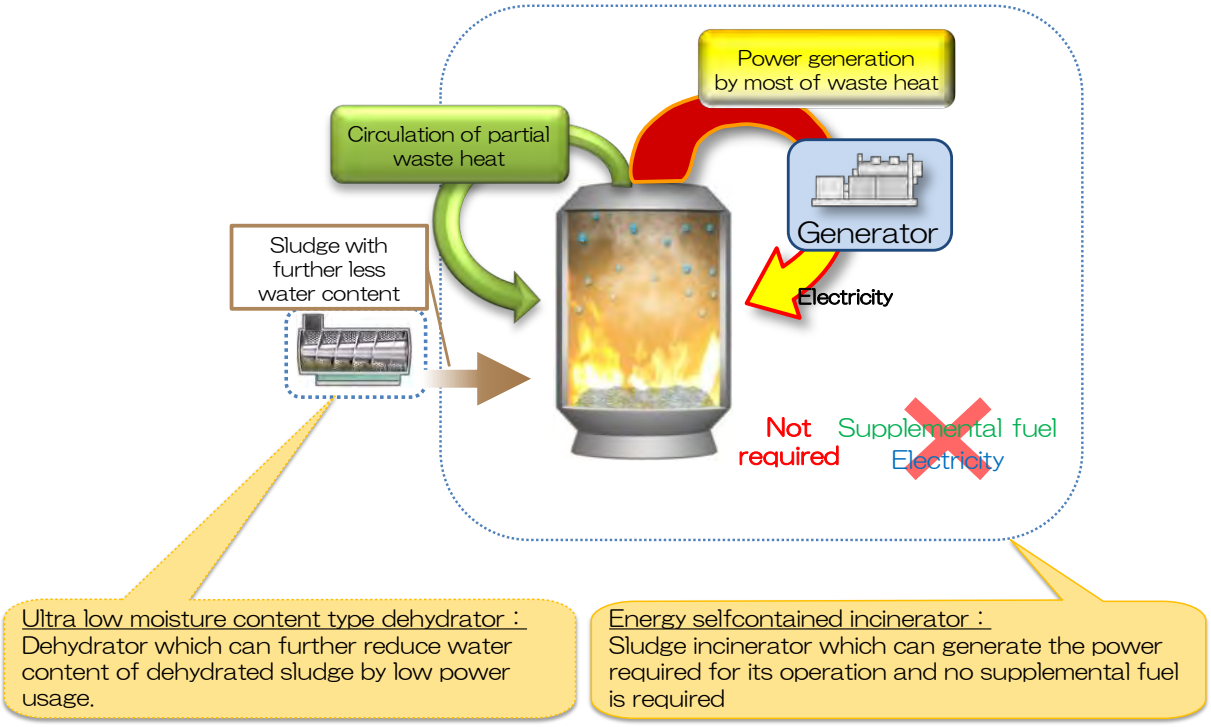


Figure -6 Energy selfcontained incinerator system

ii） Introduction of "Novel advanced wastewater treatment method"

In order to prevent red tide in a closed water area of the Tokyo bay, the Bureau has been introducing the advanced wastewater treatment method to reduce nitrogen and phosphorus in effluent, which is one of the generation factors of red tide, utilizing the opportunities of the rebuilding and expansion of facilities.

"Novel advanced wastewater treatment method " which can achieve more than 20% power reduction compared to ordinary advanced wastewater treatment method, while maintaining equivalent water quality of effluent, would be introduced (Figure -7).

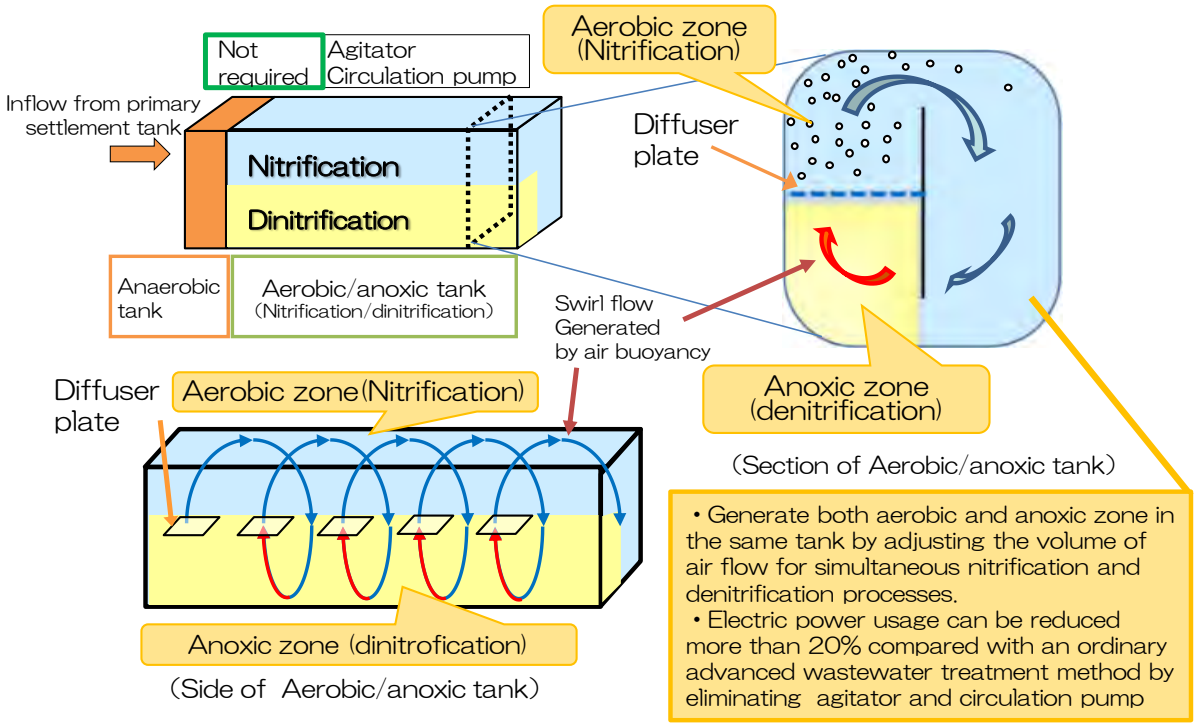


Figure -7 Introduction of “Novel advanced wastewater treatment method”

(3) Policy 3 - Introduction of Energy Smart Management

ｉ） Energy management of the entire facility of water reclamation center

Optimization of the energy usage in a series of systems from wastewater treatment to sludge treatment would be promoted. For example, optimization is pursued with considering the total balance of the power, chemicals, and fuel consumption for water treatment facilities, concentration and dewatering equipment, and incinerators (Figure -8).

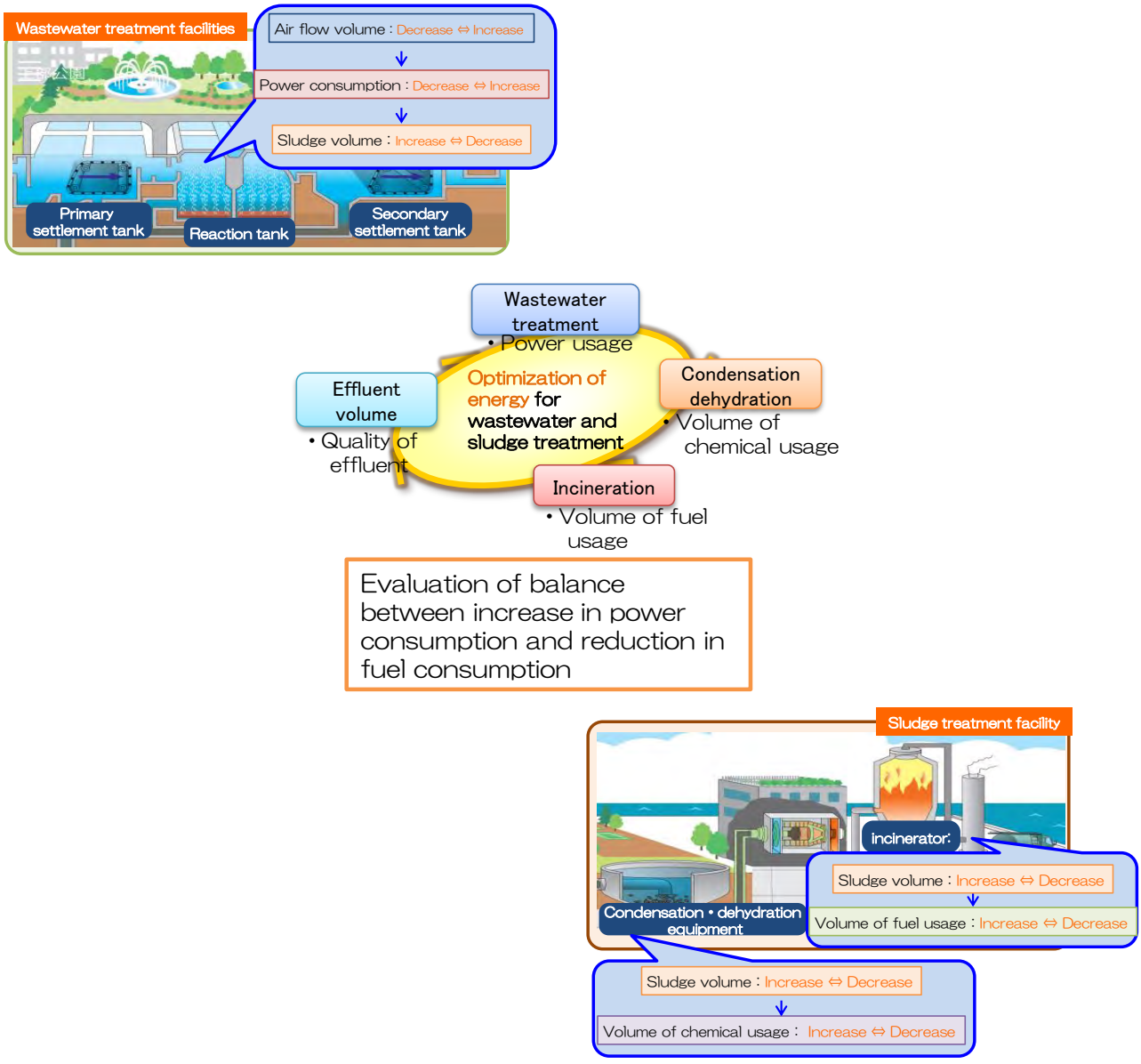


Figure -8 Image of energy optimization for water and sludge treatment

(4) Policy 4 - Strengthening of energy crisis management

ｉ） Introduction of distributed power sources

Distributed power sources such as solar power and power storage equipment (NaS battery) are to be installed in water reclamation centers and pumping stations as a diversified power source (Figure - 9).

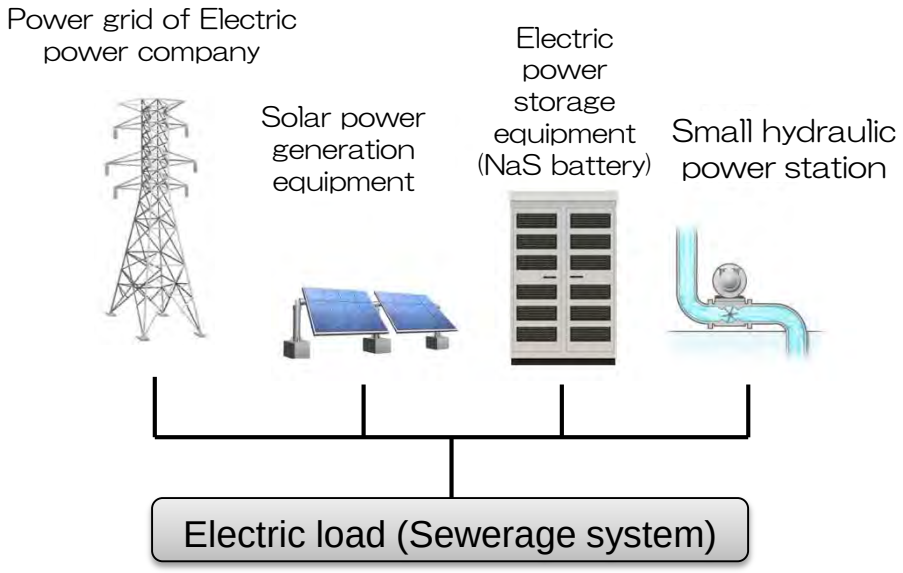


Figure -9 Image of distributed power sources

5. Summary

The role of sewerage system started with basic features such as the improvement of living environment, flood prevention, and water quality preservation of public waters. Along with progressive development of cities, aiming to the realization of more secured and safe cities and comfortable water environment, the role of sewerage system is diversified and advanced to flood measures, disaster countermeasures, advanced treatment of wastewater, and the improvement of combined sewer.

In addition to the counter measures for energy and greenhouse gases, the measures to secure energy stably are indispensable from the perspective of making a sustainable city.

The Bureau has been putting in efforts for the reduction of greenhouse gas, conservation of energy, and utilization of renewable energy. The Smart Plan is introduced to advance and accelerate these efforts in order to achieve the upgrading, improvement of efficiency, and stabilization of energy usage.

※ The energy consumption for the fiscal year of 2013 is an estimated value.

【国際会議発表論文：日本語訳】

4-2-2 下水道事業におけるエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」について

計画調整部 計画課 竹谷 修平

1. はじめに

東京都下水道局（以下「当局」という。）は、約 1 万 6 千 km の下水道管、20 か所の水再生センターや 87 か所のポンプ所など膨大な施設を 24 時間 365 日休むことなく稼働させている。これによって生活環境の改善や浸水の防除、公共用水域の水質保全を図り、安全・安心で快適な東京の都市づくりに貢献している。

当局は、こうした質の高い下水道サービスを提供する事業の実施に大量のエネルギーを使用している。その量は、東京都内における年間電力使用量（約 860 億 kWh）の 1%強にあたる約 9.8 億 kWh の電力に加えて都市ガス換算で約 0.2 億㎥の燃料になり、当局は都内最大級のエネルギー消費者となっている。さらに今後も、浸水対策の充実強化や合流式下水道の改善などの事業実施に伴い、エネルギー使用量の増加が見込まれている。エネルギーの大消費者である当局は、その使用量削減に大きな責務を負っている。

また、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により発電所が被災し、電力不足による計画停電、夏季の電気使用制限が実施されるとともに、流通網の混乱により燃料の供給が停滞し、非常時の電力確保に支障をきたした。さらにその後、原子力発電所の停止により電気料金が大幅に上昇し、下水道経営にも大きな影響を及ぼしている。このような困難な事態に直面し、当局はエネルギー対策の大きな転換を迫られている。

こうしたことから下水道事業におけるエネルギーを最適に管理し、下水道サービスを安定的かつ持続的に提供していくために、日本国の下水道事業初となるエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を平成 26 年 6 月に策定した。

（1）プラン策定時のエネルギー使用の状況

当局では、1 年間で約 28 億 m3 の汚水や雨水をポンプ施設で揚水し、水再生センターにおいて約 20 億 m3 の汚水及び約 0.8 億 m3 の汚泥を焼却処理している。これら揚水や処理に要する電気と都市ガスなどの燃料をあわせた 1 年間のエネルギー使用量は、熱量換算で 4,620TJ（テラジュール。割合は、電気 76%、燃料 24%）である（図 1）。これら電気と燃料の双方に着目してエネルギー全体を削減していかねばならない。

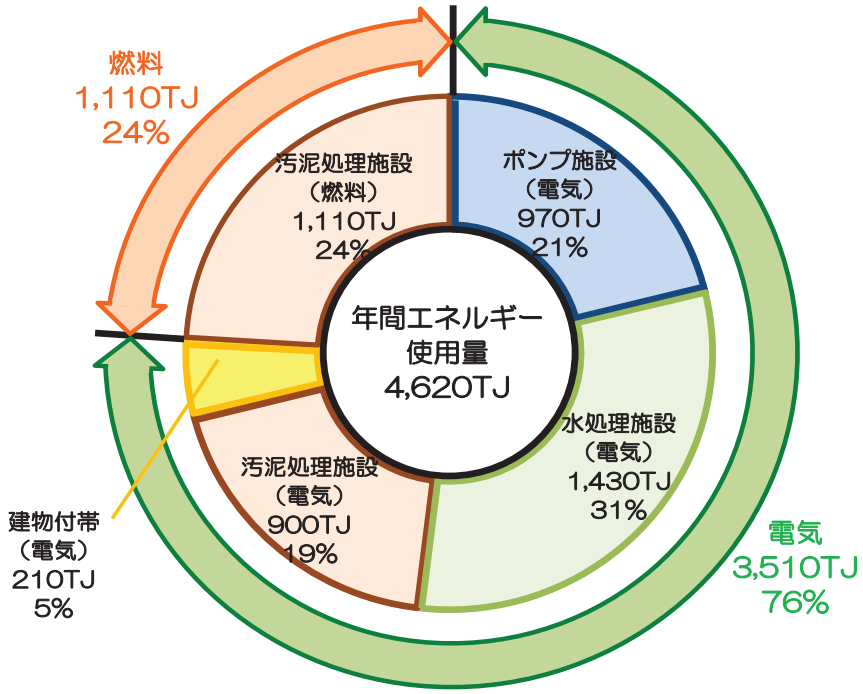


図１　当局のエネルギー使用量の割合
（平成 25 年度※）

（２）エネルギーに係る様々な課題

①今後のエネルギー使用量の増加見込み

今後も浸水対策や合流式下水道の改善など下水道サービスの向上を図っていくことに伴い、雨天時のポンプ揚水量や、しゃ集によって降雨初期の汚れた雨水を水再生センターで処理する水量が増加することにより、当然エネルギー使用量は増加する。こうした増加分を考慮したうえで、更なるエネルギー使用量削減対策が必要である。

②東日本大震災における下水道事業への影響

前述のように、東日本大震災の直後、当局は汚水処理や雨水排除など最小限の機能を維持したうえで計画停電などへの対応を迫られた。水再生センター及びポンプ所は、停電時でも下水道機能を維持するために非常用発電設備の整備を進めているが、計画容量を確保している施設は平成 25 年度末で全体の約 7 割程度である。また、大震災後の流通の混乱により、非常用発電設備へ補給する燃料の確保が困難となり、計画停電時に可能な限り汚水を下水道管内に貯留してポンプ設備の運転台数を抑制し、燃料の消費を抑えた。

こうしたことを踏まえ、今後いかなる場合においても下水道機能を維持し続けるためには、非常用発電設備の拡充を図り、非常時の電力を確保するとともに、燃料の確保を的確に行うことが不可欠である。さらに、分散型電源の積極的な導入によりエネルギーの外部依存度を低下させ、エネルギーを安定的に確保する取組などが必要である。

③下水道経営への影響

大震災後、原子力発電の停止による火力発電比率の増加や、為替の影響に伴う燃料調達価格の高騰によって電気料金が大幅に上昇した。そのため当局は、様々な電力使用量削減努力を行い、年間電力購入量を、大震災前の約 10.1 億 kWh から、大震災後の平成 23、24 年度には約 9.5 億 kWh まで、約 0.6 億 kWh を削減した。しかし、こうした削減努力にもかかわらず、電気料金は平成 23 年度から 24 年度の 1 年間で約 30 億円もの増加となった。今後も将来に向け、下水道サービスを安定的に提供していくためには、更なるエネルギー購入量の削減に努め、電気料金上昇の影響を可能な限り小さくしていかねばならない。

2．スマートプラン 2014 の概略

上記の、エネルギーに係る様々な課題を解決し、下水道の機能を安定的かつ永続的に発展させる「スマートプラン 2014」の概略は、以下のとおりである。

（1）目標、計画期間、エネルギー削減の考え方

○目標

総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合を 2024（平成 36）年度までに 20%以上とすることを目指す・

○計画期間

2014（平成 26）年度から 2024（平成 36）年度

○エネルギー削減の考え方

エネルギー購入量に再生可能エネルギー量と省エネルギー量を加えたものを総エネルギー使用量とする。

図 2 に示すように、総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等（再生可能エネルギー量＋省エネルギー量）の割合を高めていくことで、エネルギー購入量（外部調達エネルギー量）を削減させていく。

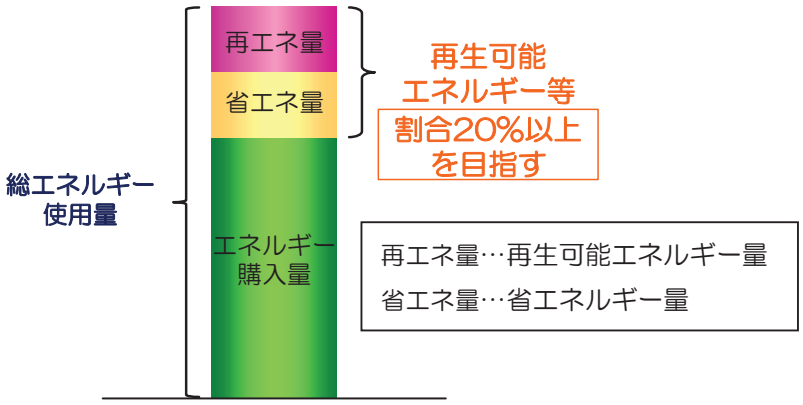


図 2 再生可能エネルギー等の割合イメージ

（２）今後のエネルギー購入量の見込み

下水道サービス向上を進めると、図３のように、平成25年を基準年として、このまま何も削減の対策を施さない場合、エネルギー購入量は平成25年度の4,390TJから36年度の4,930TJまで増加する見込みである。そこで、再生可能エネルギー活用の拡大や省エネルギーの更なる推進に取り組み、平成36年度において、総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合20%以上を実現し、同年のエネルギー購入量を4,060TJまで削減させる。

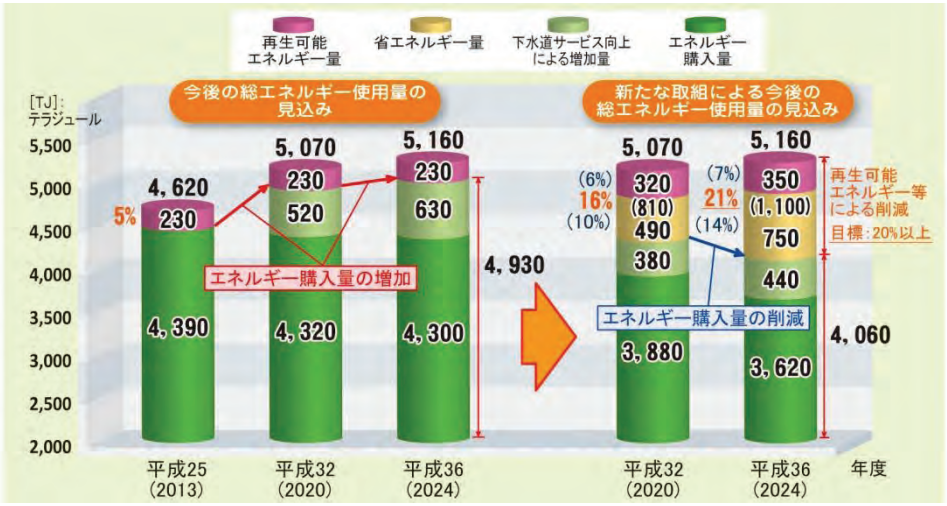


図３　今後の総エネルギー使用量の見込みと新たな取組による今後の総エネルギー使用量の見込み

（３）４つの取組方針

再生可能エネルギー等の割合20%以上を実現するため、スマートプランでは、4つの取組方針を掲げ、それぞれの方針に基づく主な取組を示した。

○取組方針１　再生可能エネルギー活用の拡大

太陽光発電や未利用の汚泥焼却時の低温域廃熱を活用した新たな発電など、再生可能エネルギーをより一層活用し、下水道事業において可能な限り自らエネルギーを確保する。

○取組方針２　省エネルギーの更なる推進

新たな高度処理技術やエネルギー自立型の焼却システムの開発・導入などを進めることで、省エネルギーをさらに推進し、エネルギー使用量を削減する。

○取組方針３　エネルギースマートマネジメントの導入

水処理から汚泥処理に至る一連のシステムの中でこれまでの個別の施設や設備での省エネルギー対策にとどまらず、水処理から汚泥処理までの施設全体での処理工程を通したエネルギーの最適化や、より広域的な視点から複数の施設間で運

転管理の効率化などを図る「エネルギースマートマネジメント」を導入し、エネルギー利用のスマート化を図る。

○取組方針４　エネルギー危機管理対応の強化

非常用発電設備の拡充や分散型電源の導入、非常用発電設備の運転に必要な燃料の施設間融通などにより、エネルギー危機管理対応の強化を図り、いかなる時でも下水道機能を維持する。

３．再生可能エネルギー等の割合 20%以上実現に向けたスマートプラン 2014 の具体的な取組内容

４つの取組方針それぞれについて、具体的な取組の一部を紹介する。

（１）取組方針１　再生可能エネルギー活用の拡大

①太陽光発電の拡大導入

東京都の下水処理施設は、都市部に位置しているため、施設空間に余裕がない。

そこで、太陽光発電導入にあたっては、水処理施設における反応槽の臭気対策用の蓋に太陽光パネルを貼り付けるなど空間の有効利用の工夫を行うことに加え、設置コストを踏まえた導入を実施する（図 4）。また、小規模の太陽光発電をポンプ所などへ分散して導入する。

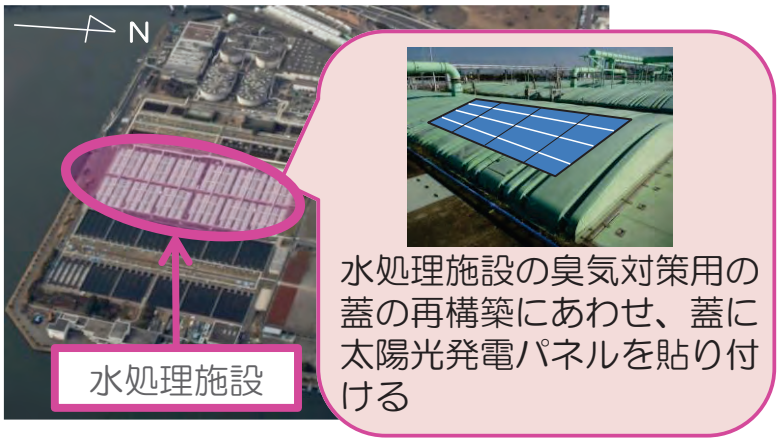


図４　森ヶ崎水再生センターへの導入イメージ

②汚泥焼却時の廃熱を活用した新たな発電

東京都は、廃棄物の最終処分場の延命化を目的として、汚泥の減量化・安定化を最大限に図らなければならない。そのため、汚泥を全量焼却処理している。

前述の通り、汚泥処理では大量のエネルギーを使用している。汚泥焼却でのエネルギーを利用する新たな技術開発により、これまで技術的に未利用であった焼却炉における低温域の焼却廃熱を活用した発電を導入する（図 5）。

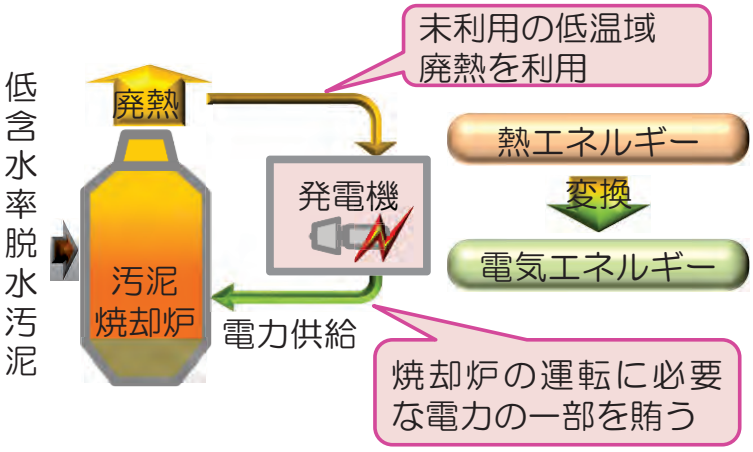


図５　汚泥焼却時の廃熱を活用した新たな発電

（２）取組方針２　省エネルギーの更なる推進

①「エネルギー自立型の焼却システム」の開発・導入

東京都は、汚泥処理過程において、さらなる省エネと再生可能エネルギー活用の拡大を目指し、水分量を一層削減する「超低含水率型脱水機」と、焼却廃熱により自ら必要な電力を発電できる「エネルギー自立型焼却炉」を組み合わせたエネルギー自立型焼却システムを開発・導入する（図６）。

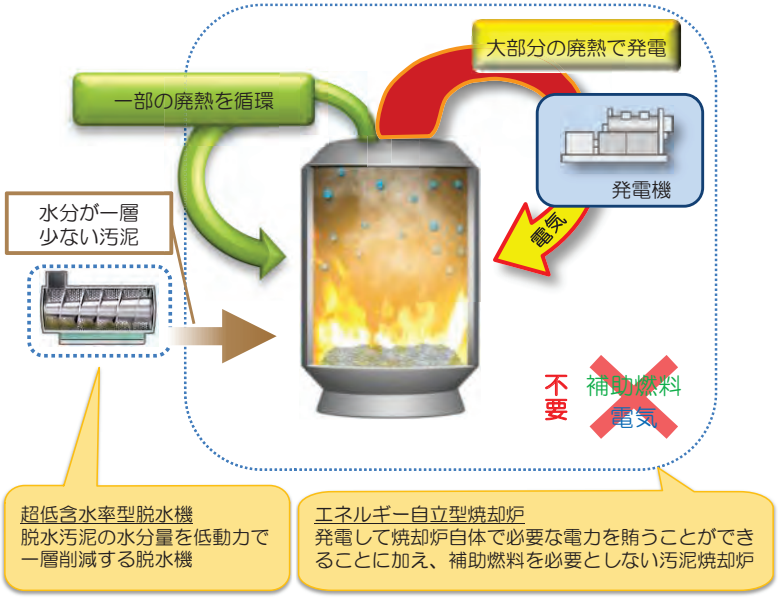


図６　エネルギー自立型焼却システム

②「新たな高度処理技術」の導入

東京都は、閉鎖性水域である東京湾の赤潮の防止を図るため、その発生要因の一つであるちっ素及びりんを下水放流水から削減する高度処理を、施設の再構築や増設に合わせて順次導入している。

これまでの高度処理と比べ、同等の水質と2割以上の電力削減が可能な「新たな高度処理技術」を導入する（図7）。

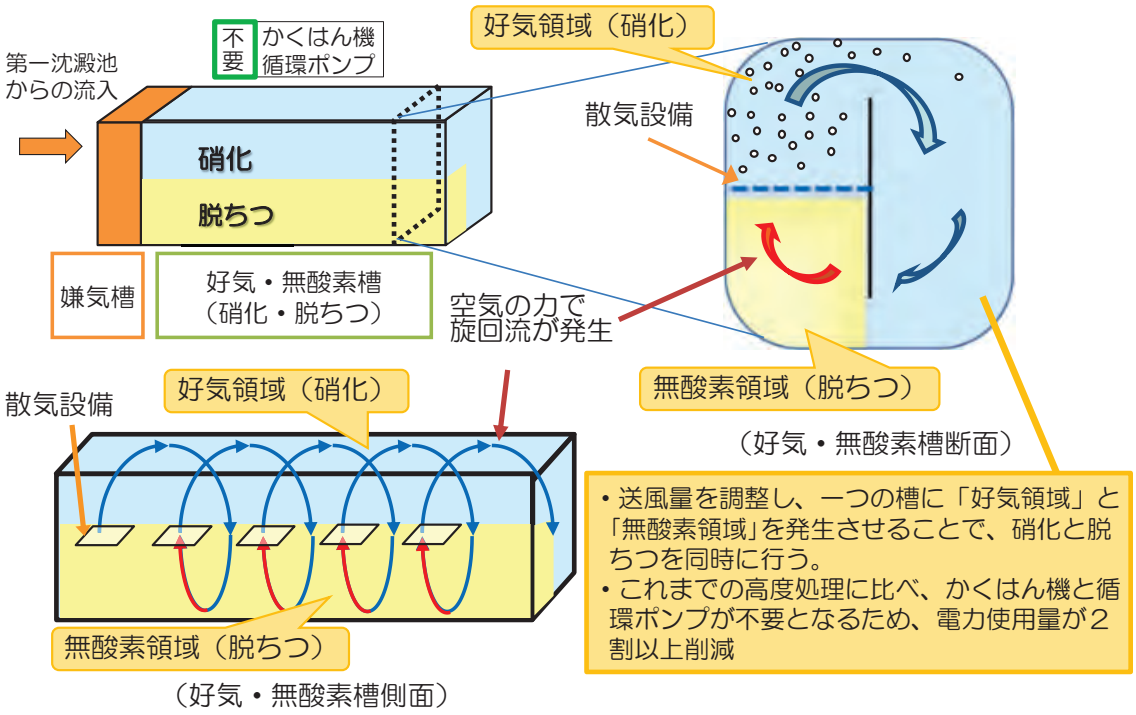


図7 「新たな高度処理技術」の導入

（3）取組方針3 エネルギースマートマネジメントの導入

①水再生センターにおける施設全体でのエネルギー管理

水処理から汚泥処理に至る一連のシステムの中で、エネルギーを最適化していく。例として水処理施設、濃縮・脱水設備、焼却炉の電力、薬品、燃料使用量の全体バランスを総合的に判断し、フィードバックすることで最適化する（図8）。

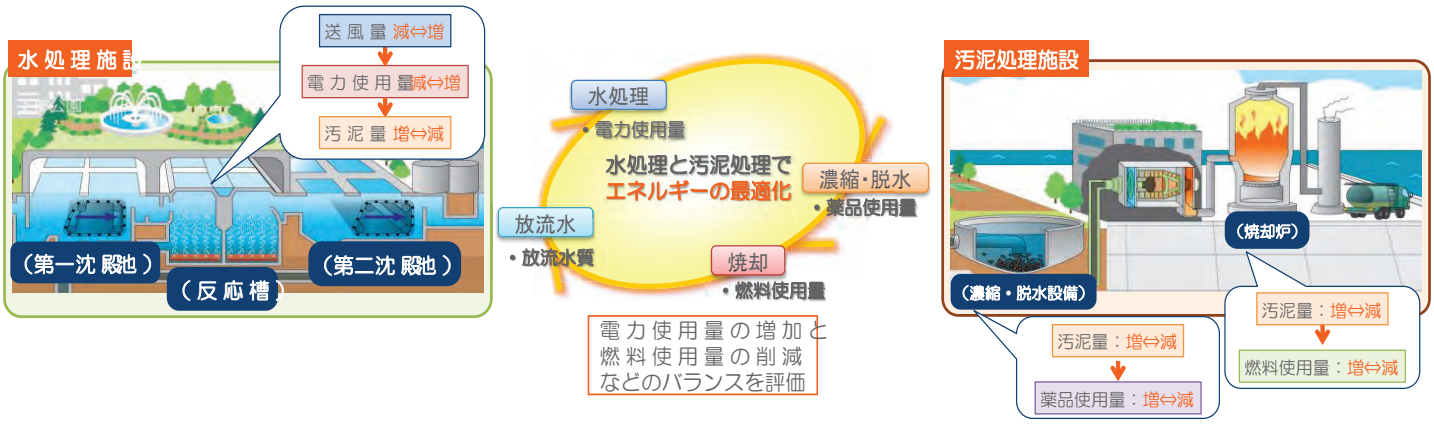


図 8　水処理と汚泥処理でのエネルギーの最適化の取組イメージ

（４）取組方針４　エネルギー危機管理対応の強化

①分散型電源の導入

分散型電源として、太陽光発電や電力貯蔵設備（NaS電池）などの設備を、水再生センターやポンプ所に設置することにより電源の多様化を図る（図 9）。

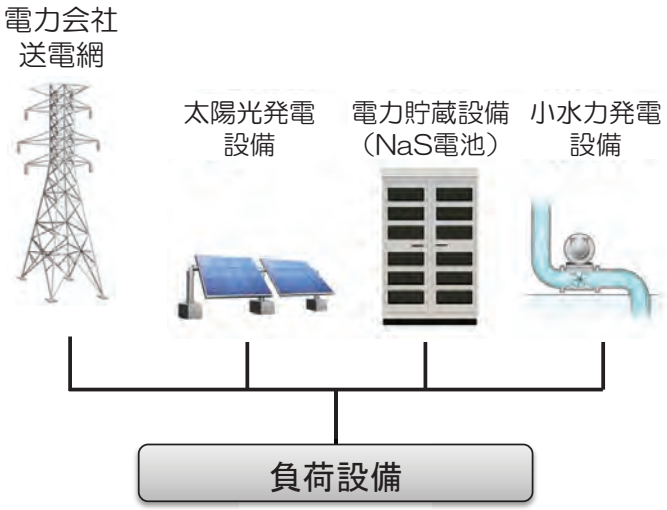


図 9　分散型電源イメージ

5．まとめ

下水道の役割は、生活環境の改善、浸水防除、公共用水域の水質保全という基本的なものから出発し、都市が発展を続けることに伴い、より安全、安心な都市や快適な水環境の実現を目指して、浸水対策や震災対策、下水道の高度処理や合

流式下水道の改善など、より多様化、高度化している。

なかでも、持続可能な都市をつくる視点から見ると、エネルギーや温室効果ガス対策に加えてエネルギーの安全確保は必要不可欠となっている。

当局では、かねてから温室効果ガス削減のため、徹底した省エネルギーや再生可能エネルギーの活用などに取り組んできているが、スマートプランにより、今後の取組をさらに加速し、進化させることでエネルギーの高度化、効率化、安定化などを着実に推進していく。

※平成25年度のエネルギー使用量は見込値である。

4-2-3 Development of Simultaneous Nitrification and Denitrification Process in Aerobic Tank of Suspended Growth Treatment Process using Ammonia and Nitrate Sensors

Megumi Yuda[1*], Tomo Oikawa[1], Kouji Kassai[1]

[1] Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government, Japan
* Email: Megumi_Yuda@member.metro.tokyo.jp

ABSTRACT

Nitrogen removal of suspended growth treatment is generally carried out through separate processes, an aerobic process for nitrification and an anoxic process for denitrification. In recent years, it was found that nitrification and denitrification could proceed simultaneously in a single reactor, known as simultaneous nitrification and denitrification (SND). However, there is little application of SND to the conventional activated sludge process that is widely in use for municipal wastewater treatment. In this study, applicability of SND to the conventional activated sludge process, which has spiral flow aeration, was investigated in order to improve nitrogen removal and energy efficiency. SND with high nitrogen removal efficiency was achieved by controlling air flow rate using ammonia and nitrate sensors. Moreover, since this new system enables nitrification and denitrification in a single aerobic tank, a nitrified liquid circulation pump becomes unnecessary and anoxic tank volume can be reduced.

KEYWORDS: Simultaneous nitrification and denitrification, air flow rate control, NH_4-N sensor, NO_x-N sensor

INTRODUCTION

In improvement of effluent quality of wastewater treatment plants, which use suspended growth treatment, the introduction of advanced treatment system is essential for removal of nitrogen and phosphorus. The advanced treatment generally consists of separate processes, an aerobic process for nitrification and an anoxic process for denitrification. However, upgrading of the existing conventional activated sludge facility to an advanced treatment facility may result in reduction in the treatment capacity per reaction tank volume and increase in the power consumption. In recent years, it has been found that nitrification and denitrification take place simultaneously in one reaction tank. This phenomenon is called “simultaneous nitrification and denitrification (SND)” and this utilizes the nitrification and denitrification processes by creating the status of alternately high and low concentration of the dissolved oxygen (DO) in the reaction tank (Münch *et al.* 1996, Pochana and Keller 1999, Zeng *et al.* 2004). While this SND is able to reduce the air flow rate by making treatment processes efficient, SND, in practical use, is based on primarily batch sequential reactor or oxidation ditch process (Barnard *et al*. 2013), and there is little application of SND to the conventional activated sludge method which is widely used in municipal wastewater treatment plants (WWTPs).

Accordingly, focused on this SND, a new technology of stable treatment based on conventional activated sludge facility, which has an aerobic tank with one direction spiral flow by aeration, was examined in order to establish a new method with large treatment capacity and low power consumption as compared with the present advanced treatment. A control method using an ammonia nitrogen (NH_4-N) sensor and a nitrite and nitrate nitrogen (NOx-N) sensor was considered in order to achieve a stable nitrogen removal was also examined.

CONFIRMATION OF THE PRINCIPLES OF DENITRIFICATION IN AEROBIC TANK

Shibaura Water Reclamation Center is one of the largest WWTPs of combined sewer system in Tokyo. It locates in the center of Tokyo, and the large portion of the treatment area of the facility is a downtown business district. The experiments were conducted at one of the treatment systems in the facility. Specifications and operational parameters of the treatment system used in the experiment are shown in Table 1. The reaction tank is designed as a deep-tank with the effective water depth of 10.2 m and an anaerobic/oxic (A/O) process is applied to the reaction tank. Diffusers of the tank are at 4.0 m depth and a single sided spiral flow of water is made by the aeration.

Denitrification in the aerobic tank had been seen in the system and rarely seen in the other system which has shallow depth tanks. Also, denitrification progressed relatively on weekend when nitrogen loading was low and almost no progress of denitrification on weekdays when the nitrogen loading is high. The situation with relatively large denitrification is shown in Figure 1. In the first part of the aerobic tank, denitrification was observed and total nitrogen (T-N) decreased with decreasing NH_4-N.

To facilitate denitrification, DO in the reaction tank should be decreased and anoxic region should also be established. Figure 2 shows cross-sectional distribution of DO in the aerobic tank. DO at the bottom of the aerobic tank was lower than 0.5 mg/L and decreased to 0.1 mg/L below the diffuser plates, so that denitrification could occur at those area. From these observations, it was considered that nitrification and denitrification mechanism of the deep aerobic tank with spiral flow was consist of (i) nitrification above the diffusers, (ii) progress of denitrification below the diffusers,

Table 1. Specifications and operational parameters of the treatment system used in the experiment
(Annual performance results in 2015)

Specification of Reaction tank	Treatment method	A/O process
	Effective depth / diffusion depth (m)	10.2 /4.0
	Width/ Length (m) x No. of stream	9.1/91 x 2
	Volume (m^3)	16,800
Annual Average	Average HRT (hour)	9.3
	Return sludge ratio	0.59
	MLSS (mg/L)	1630

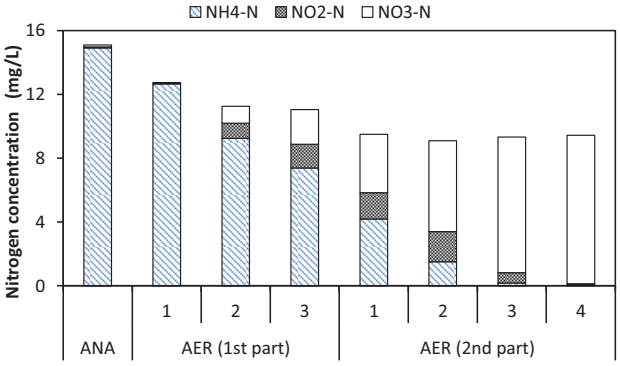


Figure 1. Example of denitrification in an aerobic tank of the system used in the experiment (ANA: anaerobic, AER: Aerobic)

and (iii) repetition of (i) and (ii) along the reaction tank.

DEVELOPMENT OF AIR FLOW CONTROL SYSTEM

In order to keep SND stable in the deep aerobic tank with a single sided spiral flow, air flow rate control system was studied. It is necessary to form low DO (anoxic) regions continuously for denitrification in an aerobic tank. On the other hand, nitrification should always be completed in the reaction tank. In order to satisfy these different conditions, it was concluded that the reaction tank should be split into two parts, because denitrification tends to occur in the first part of the aerobic tank where organic matter concentrations are high, and denitrification unlikely occur in the second part due to low organic matter concentration. In addition, it was decided to control the air flow rate separately. The first part was defined as the zone where denitrification is facilitated by suppressing air flow rate and keeping the balance of nitrification and denitrification, and the second part was defined as the zone where nitrification is securely completed.

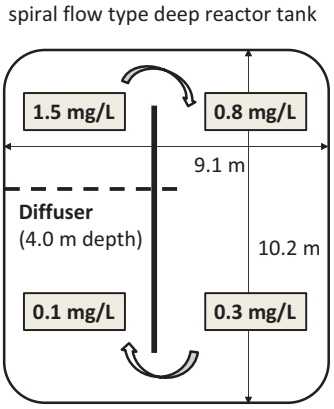


Figure 2. Cross-sectional distribution of DO in the aerobic tank

In the first part, nitrification progresses and NO_x-N increases in the upper area of the reaction tank, then denitrification of NO_x-N progresses in the lower area of the reaction tank. Therefore, if the air flow rate is excessive, NO_x-N will be gradually accumulated and its concentration will increase. On the other hand, if the air flow rate isn't enough, sufficient NO_x-N will not be detected. Thus, it was considered that the air flow rate control by NO_x-N concentration is the best method and it was decided to use a NO_x-N sensor (which measures the total concentration of NO_2-N and NO_3-N). In addition, the installation position of the NO_x-N sensor shall be the vicinity of the outlet of the first part and close to the water surface in order to obtain the amount of nitrification (Figure 3). The target value of the NO_x-N sensor shall be set in order to promote denitrification by suppressing excess nitrification. Therefore, the set value is lower than NO_x-N concentration at the time of DO control. The actual set value would vary depending on the load of ammonia in the in-flow. For setting, the following two points must be noted: (i) remained NH_4-N may be exceed the capacity of nitrification of the second part when nitrification is excessively suppressed at the first part, (ii) setting to zero makes it difficult to confirm the nitrification progress.

At the second part of the aerobic tank, air flow rate should be controlled as the minimum to ensure complete nitrification. Therefore, it was concluded that NH_4-N sensor should be used for a continuous measurement of nitrification progress in the second part. To complete nitrification and

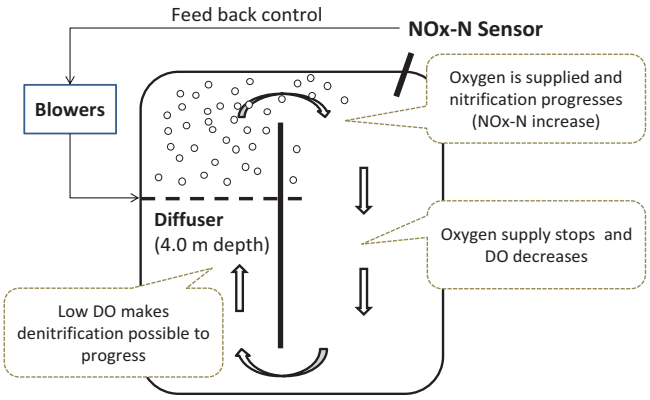


Figure 3. Process of nitrification and denitrification by the spiral flow in the first part of an aerobic tank

avoid excess air injection, minimum residual NH_4-N should be maintained at the end of the aerobic tank (approximately 0.5~1 mg/L of NH_4-N). In terms of measurement accuracy, it is desirable that NH_4-N sensor is placed in a position where NH_4-N concentration is approximately 2~3 mg/L and the set value in its installed position should be approximately 2~3 mg/L.

EXAMINATION AND VALIDATION IN AN ACTUAL FACILITY

Based on the results of the development studies, NO_x-N and NH_4-N sensors were installed to a deep reaction tank (Figure 4). Then, an actual air flow rate control was carried out in order to verify the performance of nitrogen removal in continuous operation from June to September 2013. In this facility, the differences between weekday and weekend in the loading of organic matter and nitrogen are considerably significant. Therefore, a wide range data in loading conditions were collected as much as possible by measuring the quality of the combined sample of each 24-hour from Wednesday to Thursday as high weekday loading, and from Sunday to Monday as low weekend loading. The treatment status during the examination is shown in Table 2. The set value of the NO_x-N sensor was 1.5 mg/L for both weekday and weekend. And the set values of NH_4-N sensor were 2 mg/L and 4~5 mg/L for weekend and weekday respectively.

Table 2. Treatment status during the examination period

	Weekday	Weekend
Treatment volume (m^3/day)	141,000	97,000
T-N of inflow (mg/L)	35	27
HRT (hour)	7.4	8.0
SRT (day)	7.2	8.0

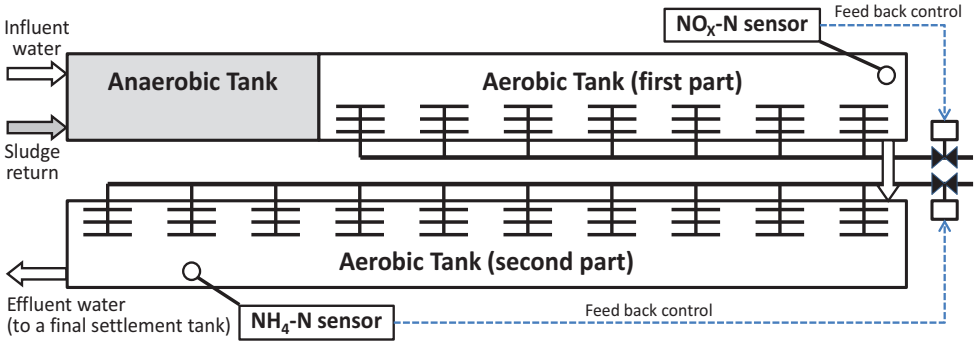


Figure 4. Division of the reaction tank and the air flow control system with NOx-N and NH_4-N sensors

Relationship between volumetric nitrogen loading and nitrogen removal rate is shown in Figure 5. The nitrogen removal decreased when the nitrogen loading became higher, excluding the data during rainfall. Nitrogen removal was lowered during rainfall due to hindrance of denitrification by increase of DO in the whole aerobic tank. On the other hand, it was considered that the nitrogen removal increased in condition of low nitrogen loading due to expansion of the denitrification zone, and the expansion was achieved by overall reduction of DO in the reaction tank, and it was enabled by the air flow rate control with the NO_x-N and NH_4-N sensors. In addition, in case of same nitrogen loading, nitrogen removal was higher than A^2/O process at the other facility (Figure 5). Consequently, it was suggested that this system can be operated at higher loading conditions compared to the A^2/O facility with the same nitrogen removal and has the possibility of the same nitrogen removal with more compact facility.

In an A^2/O process, power consumption per treated water volume generally becomes 30% higher than a conventional activated sludge process (Kasai *et al*. 2010) due to the addition of a mixer and nitrified liquor recirculation equipment. In this technique, power consumption can be successfully reduced by eliminating such equipment. Also, it is possible to reduce air flow rate by the reduction of organic matter during denitrification. In the experiment, the amount of air flow was reduced approximately 10% in the average compared with the DO controlled systems and about 25% improvement of nitrogen removal was achieved in case of low nitrogen loading in the weekend.

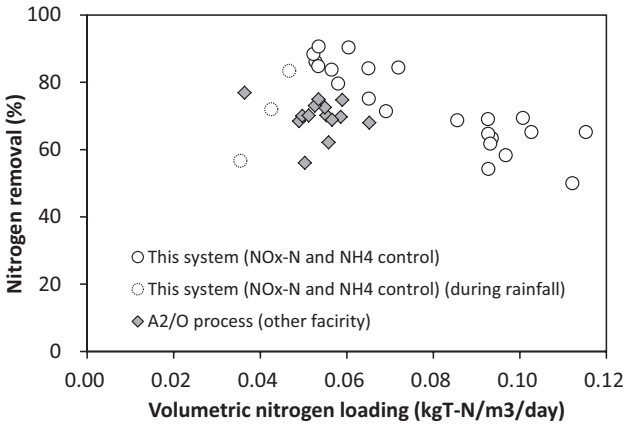


Figure 5 Relationship between volumetric nitrogen loading and nitrogen removal rate

SUMMARY AND CONCLUSION

Simultaneous nitrification and denitrification (SND) with high nitrogen removal efficiency was achieved by individual control by NO_x-N and NH_4-N sensors for the first and second parts of the deep aerobic tank of conventional activated sludge process. Higher nitrogen removal is obtained compared with A^2/O process under below the certain level of nitrogen loading. Moreover, since this new technology enables nitrification and denitrification in a single aerobic tank, a nitrified liquid circulation pump becomes unnecessary and anoxic tank volume can be reduced. Therefore, it is possible to reduce power consumption more than that of A^2/O process or conventional activated sludge treatment process of nitrification (DO controlled). In the future, it is planned to introduce this system to other three of the existing WWTPs and verification of performance will be carried out by long-term continuous operation in the different influent quality.

REFERENCES

Barnard, J.L.; Dunlap, P.; Steichen, M. (2013) Utilizing simultaneous nitrification and denitrification in BNR plants to the maximum effect. WEFTEC *proceedings*, 3763-3780

Kasai, K.; Ikeda, H.; Watase, S.; Matsushita, S. (2010). *Comparison of water quality improvement and treatment costs by limited aeration A^2/O process. Technology Research Annual Report of Tokyo Bureau of Sewerage*, 139-150 (in Japanese)

Münch, E.v.; Lant, P.A.; Keller, J. (1996). *Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. Wat. Res*., **30**(2), 277-284

Pochana, K.; Keller, J. (1999). *Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). Wat. Sci. Tec.*, **39**(6), 61-68

Zebg, R.J.; Lemaire, R.; Yuan, Z.; Keller, J. (2004). *A novel wastewater treatment process: simultaneous nitrification, denitrification and phosphorous removal. Wat. Sci. Tec.*, **50**(10), 163-170

平成28年3月発行

東京都下水道局
技術調査年報
－２０１５－

平成２７年度
印刷物規格表第5類
登録第６２号

編集・発行　東京都下水道局 計画調整部 技術開発課
所在地　東京都新宿区西新宿二丁目８番１号
電話　03（5320）6606　（内）51-781
印刷　株式会社 ミック

R100
古紙配合率100％再生紙を使用しています
石油系溶剤を含まないインキを使用しています