東 京 都 下 水 道 局

技 術 調 査 年 報

-2017-

Vol.41

Annual Report on Technical Research & Development

Bureau of Sewerage , Tokyo Metropolitan Government

平成 30 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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ **29**

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	既設汚水ますの非開削更生工法の開発	中部下水道事務所 再構築推進課	宮垣　敬一郎	3	29
2	1-1-2	洗足池幹線調査に伴うレーダー空洞調査について	南部下水道事務所　建設課	福田　拓海	4	36
3	1-1-3	急傾斜地区域を含む再構築工事	東京都下水道サービス株式会社	半田　祐也	5	41
	1-2　浸水対策技術					
4	1-2-1	流体解析を用いた分水人孔構造の検討	西部第二下水道事務所 施設課	大塚　雅貴	6	48
	1-3　震災対策技術					
5	1-3-1	震災時の安定的な電源確保 ～灯油・都市ガス併用型非常用発電設備の導入～	建設部　設備設計課	畑中　律人	7	55
	2　水環境向上、環境負荷低減					
	2-1　水処理技術					
6	2-1-1	亜硝酸蓄積型硝化の発生原因と対策	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	葛西　孝司	8	59
7	2-1-2	東京都流域下水道における高度処理施設の実態調査による最適な運転条件の考察	流域下水道本部技術部 施設管理課	和光一紀	9	67
8	2-1-3	トータルコスト削減に向けた運転の効果検証	流域下水道本部技術部 北多摩二号水再生センター	市川　博明	10	79
9	2-1-4	最終沈澱池での脱窒促進運転について	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	葛西　孝司	11	87
10	2-1-5	落合水再生センターにおける冬期水質悪化に対する取り組みについて	西部第一下水道事務所 落合水再生センター	松下　勝一	12	97
11	2-1-6	みやぎ水再生センターにおける制限曝気運転による窒素削減の取組について	西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター	玉井　奈生子	13	101
	2-2　汚泥処理技術					
12	2-2-1	「分離処理システム」による焼却炉の資源化技術の開発	計画調整部　技術開発課	池田　光	14	105
13	2-2-2	DS発生量増加要因の検証及び東プラ汚泥集約化の効果	東京都下水道サービス株式会社	吉野　竜平	15	110
	3　維持管理向上、事業効率化他					
	3-1　維持管理向上技術					
14	3-1-1	送泥管の洗浄・調査技術に関するフィールド試験	計画調整部　技術開発課	堀口　陽子	16	114
15	3-1-2	優先度評価を踏まえた効果的な管路施設の調査計画について	施設管理部　管路管理課	木村　裕太	17	124

No.		タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
16	3-1-3	耐硫酸性能を有したコンクリートへの下水汚泥焼却灰の添加利用に関する報告	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	武元　貴裕 ○　林　悦朗	18	129
17	3-1-4	熊の木ポンプ所ガスタービン発電設備に関する低周波音振動への対策について～サイドブランチの有効性について～	東部第二下水道事務所 中川水再生センター	大村　一輝	19	145
18	3-1-5	スカム処理設備フローコンベヤ自動洗浄装置について	東京都下水道サービス株式会社	小堀　和男	20	152

3-2　事業の効率化技術、その他

19	3-2-1	「技術開発推進計画2016」の策定における技術経営手法の活用について	計画調整部　技術開発課	池田　潤考	21	162
20	3-2-2	有明水再生センターにおける異常流入への対応	東部第一下水道事務所 お客さまサービス課	栗原　寛幸	22	170
21	3-2-3	公ます用自動採水器の水質規制業務以外への活用方法	南部下水道事務所 お客さまサービス課	杉本　太郎	23	176

4　国際会議発表論文

4-1　第89回WEF（米国水環境連盟）年次総会・研究発表会　-2016.9.24～9.28　アメリカ合衆国・ニューオリンズ-

22	4-1-1	東京都下水道局における下水汚泥焼却炉温室効果ガス排出量削減技術の開発 Development strategy of environmentally friendly sewerage sludge incineration technologies in Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government	流域下水道本部技術部 計画課	中島　俊彦		
		英語論文			(181)	181
		日本語（訳）			24	192
23	4-1-2	降雨情報システム「東京アメッシュ」の観測精度の向上について Improvement of Observation Accuracy of Rainfall Information System: Tokyo Amesh	施設管理部施設管理課	藤田　悠樹		
		英語論文			(201)	201
		日本語（訳）			25	214

4-2　第9回IWA（国際水協会）世界会議　-2016.10.9～10.13　オーストラリア・ブリズベン-

24	4-2-1	東京の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」 The basic energy plan for sewerage works of Tokyo “Smart plan 2014”	計画調整部　エネルギー・温暖化推進担当	山田　欣司		
		英語論文			(222)	222
		日本語（訳）			26	229
25	4-2-2	千住関屋ポンプ所におけるケーソン工事についてケーソン二函同時沈設 Caisson Work at the Senjusekiya Pumping Station Simultaneous Installation of Two Caissons	建設部土木設計課	岡嵜　諒太		
		英語論文			(236)	236
		日本語（訳）			27	240
26	4-2-3	水質改善と省エネルギーの両立を目的とした活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御 Aeration control by real time nitrification control using activated sludge model	施設管理部環境管理課	西谷内　光春		
		英語論文			-	244
		日本語（訳）			28	252

Copyright©(2018) 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、東京都の下水道技術に関する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、技術力の維持向上を図ることを目的として発行しています。

具体的には以下を目指して作成、発行するものです。

①東京都の下水道技術に関する技術情報を網羅し、共有することによって、東京都ひいては下水道界全体の技術力の維持向上と技術の継承及び技術的課題の解決の糸口となること

②東京都の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、東京都の事業運営の効率化に寄与すること

◆本書の構成

本書は、下水道技術に関する調査・研究・計画・設計・工事について概ね過去一年以内に局内外で発表、実施した成果をとりまとめたものです。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・・・・・・・・・・・・・ 5 編
２　水環境向上、環境負荷低減・・・・・・・・・・・ 8 編
３　維持管理向上、事業効率化他・・・・・・・・・・ 8 編
４　国際会議発表論文・・・・・・・・・・・・・・・ 5 編
計 26 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、2017 年版は 41 刊目にあたります。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したが、2017 年版から都庁内、研究機関、大学、政令指定都市等に CD－ROM として再配布することといたしました。

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も掲載しています。
(http://www.gesui.metro.tokyo.jp/business/technology-statistics/gn/index.html)

◆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 28 年度末現在の登録件数は合計 104 件にのぼります。

下表以外で出願中の産業財産権が平成 28 年度末現在 14 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 118 件になります。

産業財産権　登録件数一覧（平成 29 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	１６	1	2	0	１９
	雨水対策	2	0	0	0	2
管きょ技術計		**１８**	**1**	**2**	**0**	**２１**
維持管理	維持管理	１０	0	0	0	１０
	設備	１９	0	0	0	１９
	計測	7	1	0	2	１０
	環境	5	0	0	0	5
維持管理計		**４１**	**1**	**0**	**2**	**４４**
水処理技術	水処理技術	２５	0	0	0	２５
水処理技術計		**２５**	**0**	**0**	**0**	**２５**
汚泥処理技術	汚泥処理技術	１２	0	0	0	１２
汚泥処理技術計		**１２**	**0**	**0**	**0**	**１２**
有効利用	光ファイバー	0	0	0	0	0
	汚泥の資源化	1	0	0	1	2
	熱利用	0	0	0	0	0
有効利用計		**1**	**0**	**0**	**1**	**2**
合計		**９７**	**2**	**2**	**3**	**１０４**

番号	1-1-1	表題	既設汚水ますの非開削更生工法の開発

内　容	都市化が進展しているエリアでは、再構築工事や改良工事において路上障害物や埋設物輻そうなど、開削工法による施工が困難な場所が多く存在する。これまで、下水道管きょについては、ＳＰＲ工法などの非開削工法を開発し、実用化しているが、汚水ますについては確立した非開削工法がなく、開削が困難な箇所では、対応に苦慮することも少なくなかった。こうした状況を鑑み、開削困難な汚水ますの更新を実現するため、民間企業との共同研究により非開削による既設汚水ます更生工法を開発した。 本工法は、FRP 更生材（ビニルエステル樹脂を耐酸ガラス繊維材に含浸したもの）を専用のます更生機に巻き付け、既設汚水ます内に設置後、空気圧により拡径して圧着させた状態で熱硬化させるものである。内面被覆材を一体化施工できる更生機と内面被覆材単独で所定の強度を有する FPR 更生材の開発により、新設汚水ますと同等の性能を有する更生ますが施工可能となった。 本工法の開発により、中部下水道事務所管内をはじめとした開削困難箇所等で本技術を段階的に導入し、汚水ますの老朽化対策を着実に推進していく。

キーワード	汚水ます　非開削　更生工法　都心区			
処理区名			位置区分	ます取付管
職種区分	土木		施策区分	再構築　維持管理向上
状態区分	調査　研究		新規性	
実施年度	平成 23 年度から平成 26 年度		全体期間	平成 23 年度から平成 26 年度
担当部署	中部下水道事務所　再構築推進課			
発　表 履　歴	局内	平成 28 年度　設計・工事事例発表会		
	局外	日本下水道新聞　平成 29 年 5 月 24 日		
調査方法	簡易提供型共同研究			
関連情報				

番号	1-1-2	表題	洗足池幹線調査に伴うレーダー空洞調査について

内　容	洗足池幹線は昭和 46 年度～昭和 51 年度に布設した馬蹄型の下水道管きょ(内径 1800×1800、2400×2400)である。上流から 650m付近において平成 19 年度の幹線調査時に管きょの天端覆工コンクリートの一部が崩落し、空洞があることが判明した。この管きょは、崩落箇所を含めた上流約 1000m区間において、布設深さが硬質な土丹層内であったことから山岳トンネル工法の矢板工法を用いて施工している。 矢板工法は裏込め材の施工状況を目視出来ないことから、充填不足により天端付近に空洞が出来やすく、施工の留意点として挙げられている。つまり崩落箇所以外にも矢板工法と採用している区間には空洞が残存している可能性が考えられた。そこで本委託では長距離を連続的に調査することや非破壊での調査を行えることから、レーダー空洞調査を採用した。 この調査により管きょ背面に空洞の存在を明らかにした。また併せて管きょを穿孔し、空洞の高さを実測することで調査精度が高いことを示し、空洞を充填する裏込め材量の算定を可能にした。
キーワード	

処理区名	呑川上処理分区	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上
状態区分	維持管理	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	南部下水道事務所　建設課　建設工事担当　福田拓海		
発 表 履 歴	局内	平成 28 年度　設計・工事事例発表会	
	局外		
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	1-1-3	表題	急傾斜地区域を含む再構築工事

内　容	新宿区矢来町地区は急傾斜地であり、多くのお客さまは公共下水道への接続ができないことから、宅地下に場当たり的に敷設された排水設備を利用して公共下水道へ接続していたため、維持管理が困難な状況であった。また、その排水設備が老朽化していることや坂下の袋小路で浸水の不安を訴える声がお客さまから挙がっていた。 その矢来町を施工範囲に含む「新宿区赤城下町、矢来町付近再構築工事」が契約された際に新宿区役所から、お客さまからの要望に対応するよう要請があった。 坂下のお客さま宅からの排水を受けるためには、土被り 6m の下水道管を敷設する必要がある。また、早期の浸水対策及び連続工事による地先の負担軽減のため、当再構築工事に推進工事を追加して対応することとなった。本稿ではお客様へ快適で安全な生活を提供するために当工事で行われた施工検討、内容について報告する。			
キーワード	急傾斜地、再構築、推進工法、浸水対策			
処理区名	芝浦処理区		位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	再構築、周辺環境対策
状態区分	工事		新規性	
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	東京都下水道サービス株式会社　管路部　施工管理第一課　西部第一施工管理事務所			
発 表 履 歴	局内	平成 28 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	流体解析を用いた分水人孔構造の検討

内　容	新河岸処理区のポンプ排水区である志村ポンプ所流域に設置された分水人孔では構造が複雑なため、分水量と計画水量が乖離しており、志村ポンプ所への越流量が小さく、赤羽幹線および旧坂下幹線への遮集量が大きくなり、浮間水再生センターの水処理に負荷を与えていた。 上記問題を解決するため、流体解析を用いて分水人孔内の水の流れの挙動の検証を行うと共に改善策の検討を行った。 熱流体解析プログラムを用いて、現状の分水人孔の流入部に計画流量を与えて、VOF（Volume of fluid）による非定常の流体解析を実施し、流れの挙動を把握したうえで、対策案の立案とその効果の検証を行った。 流体解析とは、気体や液体の流れに伴う流速や圧力、温度などの変化に関して数値計算を行い、可視化する手法である。 まず当該分水人孔を完了図および実地測量を基にモデル化し、キャリブレーション（準備作業）として実測の降雨量に基づく流量を分水人孔の流入部に与えて、分水人孔の各流出量を求め、該当人孔に設置した流量計等の実測値と比較し、解析モデルの妥当性を確認した。 この解析モデルを用いて現有施設の越流堰の改造をした場合の流出量を算定し、改善方策案を立案した。 解析の結果、越流堰の改造を行うことで計画水量に近い分水を行えることが分かった。 また、複雑な人孔構造の改修方法の検討に流体解析を導入することで、短期間で実際に即した対策が可能になると考えられる。

キーワード	分水人孔　流体解析		
処理区名	新河岸処理区	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	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 28 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 28 年度
担当部署	西部第二下水道事務所施設課　事業調査担当		
発　表 履　歴	局内	平成 29 年度 設計・工事事例発表会	
	局外	平成 29 年度 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	震災時の安定的な電源確保 ～灯油・都市ガス併用型非常用発電設備の導入～

内　容	平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災では、福島第一原子力発電所の事故等が発生し、電力需給逼迫に伴う計画停電が実施されたことに伴い、当局施設においても非常用発電機による対応を強いられた。 この時の震災の影響として、東日本の製油所の操業停止、発電機燃料（灯油）の輸送手段であるタンクローリーの不足が発生し、燃料が安定的に確保できない事態が生じた。灯油の供給が安定するまでに約 20 日間を要した一方、都市ガスは継続的に供給されていた。 このような経験から、当局では震災などの不測の事態に備えるため、「経営計画 2013」（設計時）、「経営計画 2016」（発表時）並びに「スマートプラン 2014」に基づき、灯油と都市ガスを燃料として扱うことができる“灯油・都市ガス併用型非常用発電設備（デュアルフューエル非常用発電設備）”を導入し、非常用発電設備の燃料の多様化を推進している。 本論文では、この取組の第 1 弾として、平成 28 年 9 月に中川水再生センターに導入した灯油・都市ガス併用型非常用ガスタービン発電設備について、その特徴や設置における留意点について報告する。
キーワード	灯油・都市ガス併用型、非常用ガスタービン発電設備、燃料の多様化、都市ガス、灯油、震災

処理区名	中川処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	設備	施策区分	震災対策
状態区分	設計	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 28 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 28 年度
担当部署	建設部設備設計課電気設計担当		

発表履歴	局内	平成 28 年度　設計・工事事例発表会
	局外	平成 25 年度　設備研究発表会 平成 26 年度　第 51 回下水道研究発表会 平成 26 年度　下水道新技術 平成 29 年度　国際水協会（IWA）世界会議・展示会
調査方法		
関連情報	経営計画 2013、経営計画 2016、スマートプラン 2014	

番号	2-1-1	表題	亜硝酸蓄積型硝化の発生原因と対策

内　容	芝浦水再生センターでは、反応タンクへの BOD および窒素の負荷量が高いため、低水温期には、処理水の亜硝酸濃度が高くなる亜硝酸蓄積型硝化がしばしば発生する。亜硝酸蓄積型硝化は、ひとたび発生すると正常な硝化に回復させるまでに期間を要し、N_2O 発生量の増大や水質の悪化が著しい。また、ここ数年は、放線菌の異常増殖による発泡の原因ともなっている。亜硝酸の蓄積の予防には硝化に必要な ASRT を確保することが重要とされているが不明な点も少なくない。 亜硝酸蓄積型硝化の発現に対して、ASRT や風量などとの因果関係について整理し、水量と風量の時間変動が少ないほうが亜硝酸蓄積型硝化が発現しにくいこと、正常な硝化に回復させるためには ASRT を延ばすだけでは不十分な場合があることを確認した。これらの事例について紹介する。

キーワード	亜硝酸の蓄積、硝化、ASRT		
処理区名	芝浦処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 28 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 28 年度
担当部署	中部下水道事務所　芝浦水再生センター　水質管理担当		
発　表 履　歴	局内		
	局外	第 54 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-1-2	表題	東京都流域下水道における高度処理施設の実態調査による最適な運転条件の考察

内　容

流域下水道本部では多摩川等での良好な水環境の創出のために高度処理の導入を進めており、平成 27 年度末における準高度と高度処理の割合は、施設能力に対して 59%を占めている。しかしながら、高度処理導入には多額の工事費や維持管理費がかかり、期待された効果が得られているかどうかの検証が重要である。そこで流域下水道 7 水再生センターの運転データを整理し、高度処理の導入効果の事後検証と処理性能を最大限発揮できる運転の検討を行った。

その結果、7 センターのほとんどの高度処理施設で窒素除去率 60%以上、りん除去率 80%以上を安定的に達成しており、特に A_2O 法施設ではりん処理性能が、ステップ A_2O 法施設では窒素処理性能が特に優れていることが確認できた。

また、一定の性能を発揮した高度処理施設でも、個別に運転方法を見直した結果、窒素およびりん除去率を改善できることが明らかになったので、報告する。

キーワード	高度処理　多摩川　窒素・りん除去率　A_2O 法　ステップ A_2O 法			
処理区名			位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査		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 28 年度		全体期間	平成 24 年度～平成 28 年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　施設管理課　水質保全担当			
発 表 履 歴	局内	平成 28 年度　水質技術研究発表会		
	局外	第 54 回　下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-1-3	表題	トータルコスト削減に向けた運転の効果検証

内　容	北多摩二号水再生センターは、平成 27 年から水質改善とトータルコスト（水処理＋汚泥処理コスト）低減を目的とした余剰汚泥削減運転を実施している。この運転では、反応槽に多くの空気を供給するため水処理コストは増加する。一方、多量の空気は微生物の自己酸化による活性汚泥の分解を促し、余剰汚泥発生量を削減する。その結果、高分子凝集剤や焼却補助燃料など汚泥処理コストの低減が可能となる。 本運転の結果、平成 27 年度は平成 26 年度比で送風量は 12%増加（水処理コスト 19%増加）したが、余剰汚泥発生量は 9%減少（汚泥処理コスト 12%減少）し、試算値でトータルコストは 3%低減した。

キーワード	余剰汚泥削減　トータルコスト　エネルギー管理			
処理区名	北多摩二号処理区		位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査		施策区分	効率化、温室効果ガス削減対策
状態区分	調査　研究		新規性	新規知見あり
実施年度	平成 27 年度		全体期間	平成 27 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　水質管理担当			
発　表 履　歴	局内	水質技術研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報	アースプラン 2017			

番号	2-1-4	表題	最終沈殿池での脱窒促進運転について

内　容

平成27年度に実施した東系施設のNOx-N計とアンモニア計を用いた風量制御による新たな高度処理技術の性能調査において、最終沈殿池での脱窒量が比較的大きく、窒素除去率の向上への寄与が大きいことがわかった。

最終沈殿池での脱窒については、以前から確認されているが、これまでに詳細な調査は行われていない。最終沈殿池での脱窒量を増大できれば窒素除去率の向上が望めることから、他の系列においても最終沈殿池での脱窒状況を確認するとともに、窒素除去率向上に向けた運転方法について検討した。

その結果、反応タンク出口の NH_4-N 濃度が最終沈殿池での脱窒量との相関が比較的高く、処理水の BOD として許容できるレベルまで NH_4-N を残留させることで窒素除去の向上が望めることが分かった。反応タンク出口の NH_4-N 濃度が高くなるほど好気タンク内での有機物の分解量が少なくなるため、活性汚泥が保有する有機物量が多くなり、結果として、最終沈殿池での脱窒が増すと考えられる。

キーワード	脱窒、窒素除去、最終沈殿池、		
処理区名	芝浦処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 28 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 28 年度
担当部署	中部下水道事務所　芝浦水再生センター　水質管理担当		
発　表	局内	水質技術研究発表会	
履　歴	局外		
調査方法	直営調査		
関連情報			

2-1-5	表題	落合水再生センターにおける冬期水質悪化に対する取り組みについて

内　容	落合水再生センターの放流水は、放流先の河川に占める割合が高く、放流先河川の水質改善のため、昭和 59 年より全量を砂ろ過して放流している。 一方、水処理施設・設備の老朽化や都市の中心部に建設された処理場であるため、処理能力に余裕がなく冬期に水質が悪化する傾向にあり、工事での施設停止による水質悪化が大きな課題である。そこで、当センターでは、平成 25 年度より、工事による冬期の施設停止を最小限にするとともに、稼働から 30 年以上経過した砂ろ過施設の更新を行うことで、放流水質の改善を図ってきたので、その取組内容と放流水質の改善効果について報告する。

キーワード	標準活性汚泥法　砂ろ過　硝化　水質改善		
処理区名	落合処理区	位置区分	水再生センター、処理水　放流水
職種区分	環境検査	施策区分	再構築、高度処理、処理水再利用
状態区分	調査　研究、計画、設計、工事	新規性	
実施年度	平成 25 年度～平成 28 年度	全体期間	平成 20 年度～平成 28 年度
担当部署	西部第一下水道事務所　落合水再生センター　水質管理担当		
発 表 履 歴	局内		
	局外	平成 29 年度　第 54 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査、委託調査		
関連情報			

番号	2-1-6	表題	みやぎ水再生センターにおける制限曝気運転による窒素削減の取組について

内　容	みやぎ水再生センターには西系（標準法）と東系（嫌気好気法）の 2 つの水処理系列があり、西系は有効水深 4.2m、全面ばっ気方式の浅槽反応槽、東系は有効水深 12m、片側旋回流方式の深槽反応槽である。 これらの施設において、窒素除去の向上を目的として好気部の一部を制限曝気に変更した。 制限曝気の位置や空気量等の条件を検討した結果、放流水の全窒素濃度を西系では約 1 割、東系では約 2 割、それぞれ低減できることが確認できた。

キーワード	浅槽式反応槽 制限曝気 脱窒速度 ライザ弁		
処理区名	区部全処理区	位置区分	処理場 水再生センター
職種区分	環境検査	施策区分	準高度処理 温室効果ガス削減
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成 28 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 28 年度
担当部署	西部第二下水道事務所　みやぎ水再生センター		
発 表 履 歴	局内		
	局外	第 54 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 2016		

<table>
<tr><td>番号</td><td>2-2-1</td><td>表題</td><td colspan="3">「分離処理システム」による焼却炉の資源化技術の開発</td></tr>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">近年、高度処理の普及率が高い東京都の水再生センターにおいて、焼却炉のダクトの閉塞やけい砂の流動不良により、焼却炉が停止するケースが発生した。調査の結果、汚泥中のりんに対して鉄などの金属類の比率が低くなると、焼却炉の不具合を生じさせることが解明されている。現在、焼却炉の安定稼働を図るため、金属を含有する薬剤を脱水汚泥に添加して対応している。
焼却炉の不具合は、高度処理の推進により余剰汚泥（第二沈殿池の汚泥）のりん濃度が増加したことが原因である。一方で余剰汚泥にはりん鉱石と同程度のりんが含まれていることから、生汚泥（第一沈殿池の汚泥）と余剰汚泥を分離して脱水、焼却することで、逆に余剰汚泥のりん資源化を図るという発想のもと、「分離処理システム」の開発に着手した。その結果、焼却炉の安定稼働や焼却灰のりん資源化、水処理の安定化などの効果がある「分離処理システム」を開発した。</td></tr>
<tr><td>キーワード</td><td colspan="5">焼却炉の安定稼働、高度処理の推進、余剰汚泥、りん資源化、水処理の安定化</td></tr>
<tr><td>処理区名</td><td colspan="2"></td><td>位置区分</td><td colspan="2">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">高度処理、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、維持管理向上</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 28 年度</td><td>全体期間</td><td colspan="2">平成 28 年度</td></tr>
<tr><td>担当部署</td><td colspan="5">計画調整部　技術開発課　設備技術担当</td></tr>
<tr><td rowspan="2">発 表
履 歴</td><td>局内</td><td colspan="4">平成 29 年度下水道設備研究発表会、平成 29 年度設計・工事事例発表会</td></tr>
<tr><td>局外</td><td colspan="4">第 54 回下水道研究発表会、第 5 回早稲田大学リンアトラス研究所セミナー</td></tr>
<tr><td>調査方法</td><td colspan="5">開発技術の導入を前提とした共同研究</td></tr>
<tr><td>関連情報</td><td colspan="5">経営計画 2016、技術開発推進計画 2016</td></tr>
</table>

番号	2-2-2	表題	DS 発生量増加要因の検証及び東プラ汚泥集約化の効果

内　容	東部スラッジプラント（以下「東プラ」という）の汚泥処理は、調整槽・濃縮槽、ベルト濃縮機、炭化 5 号炉の稼働と設備の更新に伴い、砂町汚泥処理工場に分配処理していた汚泥を東プラへ集約処理している。その結果、汚泥処理状況が大きく変化した。その一つとして、総受泥量が減少傾向であるのに対し脱水ケーキ生産量は増加の傾向を示している。 近年における各汚泥処理主要設備の分離液浮遊物質濃度の変化を調査し、汚泥回収状況を明確にすることで、東プラへの汚泥集約処理に伴う効果を検証する。

キーワード	DS 発生量、汚泥集約処理、分離液 SS 濃度、汚泥回収状況			
処理区名	砂町処理区		位置区分	水再生センター、汚泥
職種区分	設備		施策区分	汚泥処分 汚泥資源化、維持管理向上
状態区分	調査 研究、維持管理		新規性	
実施年度	平成 27 年度		全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度
担当部署	東京都下水道サービス㈱　施設管理部東部スラッジセンター運転管理担当			
発 表 履 歴	局内	平成 28 年度下水道設備研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-1	表題	送泥管の洗浄・調査技術に関するフィールド試験

内　容

当局では、水処理施設で発生する汚泥をポンプ圧送にて汚泥処理施設に送っており、送泥管の総延長は 200km を超える。施設の集約化の進展により送泥施設の重要性が高まる中で、初期に整備した送泥管は既に 50 年以上経過しており、経年劣化の進行が懸念されている。

送泥管の劣化状況の把握には、送泥管特有の条件に対応できる調査方法、とりわけ管内面調査技術及び調査に先がけて行う洗浄技術の実用化が課題となっている。そこで、送泥管への適用性が高いと考えられる既存の洗浄技術（ピグ洗浄工法、アイスピグ洗浄工法、気水混合衝撃波洗浄工法）及び管内面調査技術（カメラピグ工法）を用いて、区部水再生センター内の送泥管でフィールド試験を実施した。

実施した洗浄技術については、いずれも洗浄効果が認められた。ただ、管内面をカメラを用いて調査するには、管壁に堆積している 10㎜ 程度の汚泥を除去する必要があり、そのため、かなり強力に洗浄する必要がある。管内面調査技術（カメラピグ工法）を用いた送泥管の調査には多くの課題が認められた。最適なピグの選定、適切な画角、十分な光量、前面の汚水除去機構などの検討が必要であり、今後更なる技術開発が必要である。また、いずれの洗浄工法、管内面調査工法とも仮設作業を伴い、大量の水を使用することから、事前に十分な現場踏査や調整が必要なことがわかった。

キーワード	送泥管　維持管理　洗浄技術　ピグ　管内面調査技術		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	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 28 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 30 年度
担当部署	計画調整部技術開発課		
発表履歴	局内		
	局外	平成 29 年度　第 54 回下水道研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報	技術開発推進計画 2016		

番号	3-1-2	表題	優先度評価を踏まえた効果的な管路施設の調査計画について

内　容

東京都区部の下水道事業は、明治 17 年の神田下水の建設以来、110 余年の歳月を費やし、平成６年度に 100 %普及概成し、平成 28 年度末現在のストックは管きょ延長約 16,000km、人孔約 48 万個に達している。このうち、法定耐用年数の 50 年を超えた管きょの延長は、全延長の約１割にあたる約 1,800km に達している。さらに、今後 20 年で法定耐用年数を超える管きょ延長が約 8,900km に達するなど、急速に管きょの更新時期を迎えることから、管きょの老朽化対策が喫緊の課題となっている。

当局は、これまでも計画的に管路内調査を行い、継続的に管きょの状態監視に努めてきた。これまでの管路内調査では、布設年代が古い地域等を優先し、調査を実施してきた。

管きょの老朽化が急速に進行する中において、下水道法施行令の改正に対応するとともに、より一層、予防保全を重視した計画的な管路施設の点検が必要となっている。今後、腐食するおそれのある下水道管の調査頻度を高め、平成 28 年度より区部全体で従前より調査延長を約２割アップさせるなど、管きょの維持管理の充実に取り組んでいる。

本報告では、管路内調査における優先度評価の方法とそのことを踏まえた調査方針について紹介する。

キーワード	管路内調査　老朽化対策　維持管理　優先度評価		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上
状態区分	計画、維持管理	新規性	
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 28 年度～平成 32 年度
担当部署	施設管理部　管路管理課　調整担当		
発表履歴	局内	平成 28 年度　設計・工事事例発表会	
	局外	平成 28 年度　第 53 回下水道研究発表会 平成 29 年度　下水道協会誌（12 月号）P8～10	
調査方法	直営調査		
関連情報	経営計画 2016		

番号	3-1-3	表題	耐硫酸性能を有したコンクリートへの下水汚泥焼却灰の添加利用に関する報告

内　容

下水道では、水処理、汚泥処理等の基本的な役割に加え、下水熱をエネルギー源として活用するなど、より積極的な社会貢献が期待されている.

この下水処理の過程で発生する下水汚泥焼却灰についてもセメント原料化に加え、土木工事用資材としての利用など様々な活用法が検討されているところではあるが、さらなる利活用が求められている。

そこで、耐硫酸性能を有するコンクリート（以下、「耐硫酸コンクリート」という。）に、この下水汚泥焼却灰添加して下水道施設に適用できれば有望な活用法のひとつとなるとして、実際の機場による暴露試験を簡易型共同研究（以下、「本共同研究」という。）により芝浦水再生センターにおいて行ったので、その結果を報告する。

本共同研究では、耐硫酸コンクリートに下水汚泥焼却灰を添加した場合の材料性状、補修材としての施工性、稼働中の下水処理施設における耐久性の 3 点に着目した。

試験実施場所であるある芝浦水再生センター東施設第一沈殿池は, 1 年を通じて測定した平均の H_2S 濃度が 40mg/l 程度（夏場では 400mg/l 以上を計測）であり、曝露 3 年間で比較用のコンクリート（普通コンクリート）の粗骨材が露出するまでに表層の脆弱化が進むような比較的激しい腐食環境であることが確認されている。

このような腐食環境においても、耐硫酸コンクリートは、優れた防食性能を有し，優れた表面保護工法になり得ることが検証された。

本共同研究の結果から得られた知見として、

① 耐硫酸コンクリートに下水汚泥焼却灰（現場施工ではセメント比 5、10%）を添加しても材料性状に問題点は見当たらず、腐食環境における防食工法としての活用が見込める。

② 施工性については、狭隘部充てんや自己充てん（現場施工では設計厚さ 35㎜）を満足するフレッシュ性状を有し、一般的な手法で施工できることの検証ができた。

③ 耐硫酸コンクリートが長期間の施設稼働に耐えることが可能な優れた防食性能を有し、優れた表面保護工法になり得る。

これらのことから、本技術は、構造物の耐用年数を向上させることが可能な技術であり、下水汚泥焼却灰の有効活用も可能であると考える。

キーワード	耐硫酸コンクリート、下水汚泥焼却灰、簡易型共同研究		
処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター
職種区分	土木	施策区分	腐食対策　防食対策
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 26～28 年度	全体期間	平成 26～28 年度
担当部署	中部下水道事務所　芝浦水再生センター		
発表履歴	局内		
	局外	平成 29 年度　下水道研究発表会	
調査方法	簡易型共同研究		
関連情報			

番号	3-1-4	表題	熊の木ポンプ所ガスタービン発電設備に関する低周波音振動への対策について ～サイドブランチの有効性について～

内　容	下水道局を取り巻く問題として振動問題がある。代表的な振動の原因として工事の際の振動が挙げられるが、近年は下水道設備を稼働する際の振動もお客様からの苦情として目立つようになってきている。特に、本調査で取り扱う低周波音は音としては感知できないが、周辺の建造物等に大きな振動を発生することもあり、有効な対策をすることが重要である。 熊の木ポンプ所のガスタービン非常用発電機（定格 16800kW）は 50%定格の 8400kW 負荷運転で周辺家屋に低周波音に起因する振動を発生する問題があった。 本調査では低周波音による振動対策として消音器の一種であるサイドブランチの設置を提案し、その効果を実験及び実際に設備に取り付けて検証した。 本調査で用いたサイドブランチとは特定の周波数帯を干渉させることで、音のエネルギーを低減し、その周波数帯に起因する振動を低減する効果を持つものである。本調査では模型実験を行って効果の検証を行い、一定以上の有効性が期待できると判断した後、実際に設備に取り付け実効果を検証した。 検証の結果、サイドブランチを設置した後音圧レベルを計測したところ、振動の原因であった 16Hz 帯の音圧レベルが低減され、低周波音による振動が許容値内に収まることを確認した。また、振動が低減されたことで詳細な調査が可能となり、燃料制御系統が低周波の発生の一要因と判明した。そしてそのパラメータを変更することでさらに低周波音の音圧レベルの低減を図ることが可能になった。これらにより、周辺住民に振動による負担をかけることなく、ポンプ所の揚水機能の確保が図ることができた。

キーワード	振動問題、ガスタービン発電機、低周波音による振動、消音器、サイドブランチ		
処理区名	中川処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	設備	施策区分	騒音振動対策
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成 26 年度～平成 27 年度	全体期間	平成 21 年度～平成 27 年度
担当部署	東部第二下水道事務所　中川水再生センター　設備整備担当		
発 表 履 歴	局内	平成 28 年度　下水道設備研究発表会	
	局外		
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	3-1-5	表題	スカム処理設備フローコンベヤ自動洗浄装置について

内　容	当保全事業所ではスカム処理設備の洗浄作業と故障対応に多くの時間と労力を費やしている。今回の取り組みではフローコンベヤの改良により作業時間の短縮、故障の削減と作業環境の改善を図った。 改良前はフローコンベヤのフライトが取りこぼしたスカムによりフローコンベヤ底部に 1 か所ある排水スリットの詰まりが頻繁に発生していた。排水スリットが詰まると余剰水で柔らかくなったスカムがコンベヤ内部に付着、堆積しコンベヤ内部が著しく汚れる。また、コンベヤ内部のスカムの堆積は故障に発展することもある。そのため、コンベヤ内部の洗浄作業は週に 1 回以上、降雨時はその都度行っていた。高圧洗浄機を用いる洗浄作業は作業者に水が跳ね返り不衛生であった。 今回の改良ではスカムの取りこぼし、排水スリットの詰まり、それに伴う洗浄作業・故障の削減に効果があったので報告する。

キーワード	フローコンベヤ　自動洗浄　排水スリット		
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	設備	施策区分	維持管理向上、効率化
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 27 年度	全体期間	
担当部署	東京都下水道サービス株式会社　施設管理部　西部保全センター　落合保全事業所		
発　表 履　歴	局内	平成 28 年度下水道設備研究発表会	
	局外		
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	3-2-1	表題	「技術開発推進計画 2016」の策定における技術経営手法の活用について

内　容	当局では、事業が直面する課題や将来を見据えて解決すべき課題について計画的に技術開発に取り組むことで下水道サービスの維持・向上を図るため、平成 28 年度から平成 32 年度までの技術開発の基本計画である「技術開発推進計画 2016」（以下「本計画」という。）を平成 28 年 12 月に策定した。本計画では、技術開発における開発テーマの設定から事業化までの流れをＰＤＣＡイクルで総合的にマネジメントしていくため、技術経営（ＭＯＴ） 手法を新たに活用することとしている。ここでは、本計画の開発テーマの設定において、技術経営（ＭＯＴ）を活用した手法と、技術開発の推進に向けた取組について報告する。		
キーワード	技術開発、技術経営（ＭＯＴ）手法		
処理区名		位置区分	
職種区分		施策区分	
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度		全体期間	平成 28 年度～平成 32 年度
担当部署	計画調整部技術開発課企画調整担当		
発 表	局内		
履 歴	局外	第 54 回下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報	技術開発推進計画 2016		

番号	3-2-2	表題	有明水再生センターにおける異常流入への対応

内　容	有明水再生センターでは、平成 28 年 3 月中旬頃から、無機分の多い不明水の流入により活性汚泥の有機分率が低下する現象が生じ、処理水質が悪化した。その原因究明のため、有明処理区の 9 ポンプ所の流入水の調査を実施し、原因の存在する地域を絞り込んだ。 その地域の調査を入念に行い、原因の工事現場を特定した。地盤改良工事で発生した泥水を適正に処理していなかったため、指導を行い、問題の解決に至った。 悪質かつ解決が困難な事例として、発見から解決までの一連の経過を報告する。

キーワード	有明水再生センター　不明水　水質規制　地盤改良工事		
処理区名	有明処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	環境検査	施策区分	流入水質規制
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	平成 27～28 年度	全体期間	平成 27～28 年度
担当部署	東部第一下水道事務所　お客さまサービス課　水質規制担当		
発 表	局内	平成 28 年度　水質技術研究発表会	
履 歴	局外	平成 29 年度　第 54 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	3-2-3	表題	公ます用自動採水器の水質規制業務以外への活用方法

内　容	水質規制業務では、自動採水器を用いることで、一時的な排水や夜間の排水を監視し、効率的かつ効果的な事業場指導を行っている。事業場指導にあたっては、公共汚水ますなどの狭隘かつ作業環境の悪い場所に設置する必要があるため、特殊な小型自動採水器を使用している。 今回、お客さまサービス課業務担当で課題となっている、一時使用に係る汚水排出量の認定を適正に行うために、自動採水器による連続監視を行った。

キーワード	自動採水器　一時使用　水量算定　水質規制			
処理区名			位置区分	ます　取付管
職種区分	環境検査		施策区分	流入水質規制
状態区分	維持管理		新規性	
実施年度	平成 27 年度		全体期間	平成 27 年度～平成 28 年度
担当部署	南部下水道事務所　お客さまサービス課　水質規制担当			
発　表	局内	平成 28 年度 水質技術研究発表会		
履　歴	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	4-1-1	表題	東京都下水道局における下水汚泥焼却炉温室効果ガス排出量削減技術の開発 Development strategy of environmentally friendly sewerage sludge incineration technologies in Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Governent

内　容	下水道事業から排出される温室効果ガスの 50%以上は、汚泥焼却工程から排出されていた。このため東京都では、段階的に汚泥焼却工程での温室効果ガス排出量を削減するための技術革新を進め、これまでに汚泥焼却に伴う一酸化二窒素（N_2O）と補助燃料由来の CO_2 を削減する焼却炉を開発してきた。 東京都が初めて導入し、平成 25 年度に稼働したターボ型流動焼却炉は、N_2O、補助燃料由来の CO_2 のみならず、従来は困難であった電気使用量の削減を可能とするものであり、従来の焼却炉と比較して大幅な温室効果ガス排出量の削減が可能な技術である。 本論文は、導入したターボ型流動焼却炉で実証された導入効果と、この成果をもとに温室効果ガスの一層の削減を目指す焼却炉の開発状況について報告するものである。		
キーワード	汚泥焼却炉、温室効果ガス、ターボチャージャー		
処理区名		位置区分	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、 エネルギー　熱利用
状態区分	計画、設計、工事	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 25 年度	全体期間	平成 22～25 年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　計画課		
発 表 履 歴	局内		
	局外	平成25年度 第６回循環のみち下水道賞 2016年 第89回WEF（米国水環境連盟）年次総会 アメリカ合衆国・ニューオリンズ	
調査方法	簡易提供型共同研究		
関連情報	経営計画 2016 アースプラン 2017 スマートプラン 2014		

番号	4-1-2	表題	降雨情報システム「東京アメッシュ」の観測精度向上について Improvement of Observation Accuracy of Rainfall Information System: Tokyo Amesh

内　容	東京都下水道局では、局地的な雷雨や豪雨などの気象情報を迅速に把握し、ポンプ所や水再生センターでポンプの運転管理に活用することを目的に、気象レーダーを使用した降雨情報システム（東京アメッシュ）を導入している。降雨情報システム（東京アメッシュ）は、稼働から 10 年以上が経過し、気象レーダーや中央処理装置等の主要機器が老朽化していたため、平成 24 年度から平成 27 年度末までに再構築を行った。 この再構築にあわせて、従来の気象レーダーより、多くの観測情報が得られる新型の気象レーダーを採用することにより、信頼性を確保した。具体的には、水平方向と垂直方向、2 つの偏波での観測が可能なＸバンドＭＰレーダーを導入する等、観測精度の向上に取り組んだ。また、今後の取組みとして、ブライトバンド対策を検討するなど、継続的な観測精度の向上に努めていく。
キーワード	東京アメッシュ、気象レーダー、ＸバンドＭＰレーダー、地上雨量計

処理区名		位置区分	水再生センター、ポンプ所
職種区分	設備	施策区分	浸水対策、
状態区分	工事	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 24 年度から平成 27 年度	全体期間	平成 24 年度から平成 27 年度
担当部署	施設管理部　施設管理課　調整担当		

発 表 履 歴	局内	
	局外	第 89 回ＷＥＦ年次総会展示会　口頭発表
調査方法		
関連情報	経営計画 2016	

番号	4-2-1	表題	東京の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」

内　容	当局では、安全で快適な生活環境の確保や良好な水環境を創出する一方で、都内における年間電力使用量の１%強にあたる約 9.8 億 kWh の電力や、都市ガス換算で約 0.2 億 m^3 の燃料など、大量のエネルギーを使用している。 今後も下水道サービス向上の取り組みによるエネルギー使用量の増加が見込まれることから、質の高い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、平成 26 年 6 月に下水道事業初のエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を策定した。 本プランでは次の 4 つの取り組み方針を示した。 ①再生可能エネルギーの活用拡大 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 これらの方針に基づいた目標や計画期間、エネルギー削減の考え方について明確にするとともに、下水道事業におけるエネルギー活用の高度化やエネルギー管理の最適化を図ることとしたので、その具体的な内容について紹介する。
キーワード	再生可能エネルギー、省エネルギー、エネルギー自立型焼却システム

処理区名		位置区分	ポンプ所、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、エネルギー熱利用
状態区分	計画	新規性	
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 36 年度
担当部署	計画調整部　エネルギー・温暖化対策推進担当		

発　表 履　歴	局内	
	局外	IWA2016-ブリスベン
調査方法	直営調査	
関連情報	スマートプラン 2014	

番号	4-2-2	表題	千住関屋ポンプ所におけるケーソン工事について ケーソン二函同時沈設

内　容	下水道局は、これまでも都民の生命・財産を守るため、浸水被害の軽減に取り組んできた。しかし、近年の地球温暖化に伴う気候変動などを背景に、時間 50 ミリを超える集中豪雨が増加しており、東京都内でも時間 100 ミリを超える豪雨により浸水被害が発生している。このため、下水道局では、都市化の進展に伴う下水道への雨水流入量の増加に伴い、時間 50 ミリの降雨に対応する下水道幹線やポンプ所等の基幹施設の整備を早急に進めている。その一環として、東京都足立区千住地区流域の雨水排除能力の増大に対応する雨水ポンプ所「千住関屋ポンプ所」を築造する。 延平面積約 4,900 ㎡、深さ約 50ｍの規模を要する雨水ポンプ所の施工方法は、「ニューマチックケーソン工法」であり、将来的に一体となる地下土木構造物を二函に分割し施工する。早期に事業効果を発現するため、二函同時沈設するという高度な技術を要する。（374 文字）			
キーワード	千住関屋　浸水対策　合流改善　ケーソン　二函同時沈設			
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	設計、工事		新規性	新規知見あり
実施年度	平成 22～29 年度		全体期間	平成 22 年度～平成 33 年度
担当部署	建設部　土木設計課　設計担当・第一			
発表履歴	局内			
	局外	平成 26 年度　下水道研究発表会 第 10 回国際水協会（ＩＷＡ）世界会議　ポスターセッション		
調査方法	委託調査			
関連情報	経営計画 2016			

番号	4-2-3	表題	水質改善と省エネルギーの両立を目的とした活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御

内　容

下水中の有機物除去やアンモニア性窒素の硝化などの生物処理には、一定の送風が必要であり、多くの電力を消費している。そのため、東京都下水道局では、水質改善と電力使用量削減の両立を目的とした新しい風量制御技術の開発を進めている。

本開発技術は、電極式アンモニア測定装置で流入水中のアンモニア性窒素をリアルタイムに測定して、その処理に必要な反応槽末端の溶存酸素濃度（DO）を活性汚泥モデル※を利用して求め、フィードフォワード的に風量制御を行うものである。

冬季における実施設での最大 76 時間の連続運転において、晴天時は DO 一定制御に比べて送気倍率が約 10%低減され、雨天時の初期降雨による流入水質や水温の変動に対しても目標水質を安定して達成できた。この結果、水質改善と省エネルギーを両立できる有用な技術であることが確認できた。

※活性汚泥モデルとは、国際水協会（IWA）が提唱したもので、生物反応プロセスとそれにともなう物質収支（有機物、窒素、りん等）による水質変化を表現する数学的モデルであり、処理水質、必要酸素量、余剰汚泥発生量等の推定が可能である。

キーワード	活性汚泥モデル、送風制御、生物処理、フィードフォワード的制御		
処理区名	砂町処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理、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 26 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 30 年度
担当部署	施設管理部環境管理課		
発表履歴	局内：平成 27 年度　水質技術研究発表会		
	局外：平成 28 年度　第 10 回 IWA（国際水協会）世界会議 平成 28 年度　第 53 回下水道研究発表会 2016/Vol.53 No.643 下水道協会誌 p111～p120		
調査方法	委託調査		
関連情報	技術開発推進計画 2016		

1-1-1　既設汚水ますの非開削更生工法の開発

中部下水道事務所再構築推進課　宮垣　敬一郎

1. 開発の背景

当局では、下水道管きょの再構築工事に併せ、劣化もしくは損傷した汚水ますを開削工法により、小型ますに入れ替える対策を基本としている。

一方、都心区など、都市化が進展しているエリアでは、再構築工事において路上障害物や埋設物輻そうなど、開削工法による施工が困難な場所が多く存在する。これまで、下水道管きょについてはＳＰＲ工法などの非開削工法を開発し、実用化しているが、汚水ますについては、確立した非開削工法がなく、開削工法や軽微な補修で対応せざるを得ない状況となっており、対応に苦慮することも少なくなかった。

また、中部下水道事務所管内には商業地域等が集積しており、ビルピット排水の影響を考慮する必要のある路線など、維持管理上、小型ます化が不適切な場所が多い。このため当事務所では、都市計画用途地域における商業地域では汚水ますの小型化を行わず、内径50cm 等の汚水ますを用いることとする独自のルールを平成 22 年４月に定め、運用している。

こうした状況から、非開削で既設汚水ますを更生する技術のニーズが生まれ、中部下水道事務所技術検討委員会のもと平成 23 年度より民間企業との共同研究を開始した。

2. 工法の特徴

本工法は、図-1 の汚水ます用耐酸ガラス補強繊維材にビニルエステル樹脂を含浸し、図-2 に示す専用のます更生機にその更生材を巻き付け、既設汚水ます内に設置後、空気圧により更生機を拡径して既設汚水ますに圧着させた状態で熱硬化させ、強固な FRP 製の更生汚水ますを形成するものである。

本章では本工法の特徴について述べる。

図-1　補強繊維材

図-2　ます更生機

2.1　FRP 内面補修工法の応用

本工法は、取付管内面被覆工法や本管の部分補修工法等で採用されている FRP 内面補修工法の技術を、既設汚水ますに応用することを基本として開発されたものである。

施工に際しては、本工法用に形状や深さ等を改良した専用のます更生機を使用することで、汚水ます底部インバート部、取付管口部、側塊部の一体化施工を可能にした。また、取付管口部の位置を正確に位置合わせできるように、更生機に TV カメラを内蔵している。

2.2　適用可能な汚水ますの形状

本工法の開発にあたり、対象とする汚水ますの形状は、図-3 に示す通り、商業地域に多く設置されている旧都型汚水ます（内径 50cm、深さ 80cm、取付管内径 150mm）とした。この形状の汚水ますは、区道部や歩道部に多く設置されていることから、耐荷重は T-8（48 kN）以下を想定している。

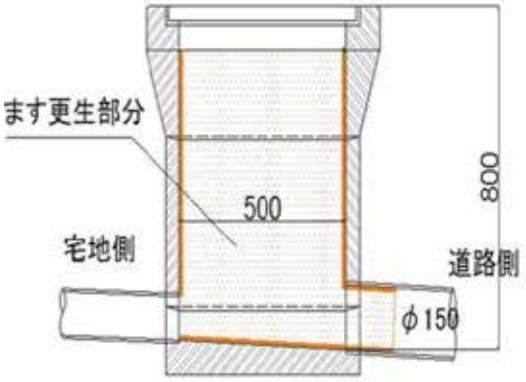


図-3　適用可能な汚水ますの形状

3.　主な研究目標と評価

本工法の開発にあたり、非開削により更生した既設汚水ますが、強度や耐久性等において新設の汚水ますと同等以上の性能を有することを目標とし、検証に向けていくつかの試験を実施した。また室内や現場において試験施工を行い、施工性についても検証を行った。

本章では代表的な試験とその評価について述べる。

3.1　FRP 更生材の強度試験

既設汚水ますの残存強度が一律に設定出来ないため、更生材単独で所定の強度を持たせることを条件とし、更生材単独で耐荷重が T-8 以上を有することを目標とした。

この検証では、図-4 に示すように、硬化させた FRP 更生材に対する鉛直方向載荷試験を実施し、載荷速度 1.2kN/min にて 57kN まで荷重を加えた後、ひび・割れがないか目視で確認する。さらに、確認後、除荷せずに 60kN まで荷重を加え、再度ひび・割れがないか目視にて確認する。

試験の結果を表-1 に示す。T-8 の 48kN に安全率（1.2）を考慮した 57kN でひび・割れが無く、更生材単独で所定の強度を有することが確認された。

図-4　載荷試験状況

表-1　載荷試験結果

供試体	荷重	結果
1	57ｋN	ひび・割れなし
	60ｋN	ひび・割れなし
2	57ｋN	ひび・割れなし
	60ｋN	ひび・割れなし

3.2 FRP 更生材の耐久性の確認

更生ますが新設汚水ますと同様に、耐用年数 50 年を有する必要があるものとして、硬化した更生材の耐久性が、硬質塩化ビニル管と同等以上の性能を有することを目標に定め、3.2.1 耐薬品性、3.2.2 耐摩耗性、3.3.3 耐ストレインコロージョン性、3.3.4 水密性について検証した。

これらの性能については、以下のとおり公的機関による各種試験を実施し、いずれの項目も目標を満足する結果が得られた。これらの結果より、更生材は硬質塩化ビニル管と同等以上の耐久性能を有することを確認した。

3.2.1 耐薬品性試験

「下水道用強化プラスチック複合管（JSWAS K-2)」に準じ、公的試験機関において薬品浸せき試験を実施し、耐薬品性を評価した。

試験方法は、FRP 更生材で作成した試験体を各試薬に 60℃±2℃で 5 時間浸せきした後、流水中で 5 秒間洗浄し、乾いた布で水分を拭き取って質量をはかり、浸せき前後の質量変化を算出する。

試験の結果を表-2 に示す。質量変化率はいずれも JSWAS K-2 規格値以内であることから、耐薬品性を有することを確認した。

表-2　耐薬品性試験結果

浸せき液	質量変化率(%)	JSWAS K-2 規格
蒸留水	+0.13	±0.3%以内
塩化ナトリウム水溶液(10w/w%)	+0.12	
硫酸(30w/w%)	+0.08	
硝酸(40w/w%)	+0.13	
水酸化ナトリウム水溶液(40w/w%)	-0.03	

3.2.2 耐摩耗性試験

「JIS A 1452　建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（落砂法)」に準じ、公的試験機関において試験を行い、耐摩耗性を評価した。

試験方法は、FRP 更生材と硬質塩化ビニルで作成した試験体に、落差法により砂を接触させることで摩耗させ、摩耗質量を比較する。

試験の結果を表-3 に示す。比較用塩化ビニル板より平均摩耗質量が小さく、更生材料が下水道用硬質塩化ビニルと同等以上の耐摩耗性を有することを確認した。

表-3　摩耗性試験結果

		平均磨耗質量(mg)
塩化ビニル板	比較用	0.1
ます更生材料	FRP 材	0.0

3.2.3　長期ストレインコロージョン性試験

「JIS K 7034 プラスチック-配管系-ガラス強化熱硬化性プラスチック(GRP)管及び継手-偏平下における管内面の耐薬品性の求め方」に準じ、公的試験機関において試験を行い、耐ストレインコロージョン性を評価した。

試験方法は、下部を所定の溶液に浸せきさせたリング状の試験体をたわませて、応力ひずみ腐食が発生するまでの時間を記録した後、これらの発生時間をもとに、最小二乗法により、時間に対するひずみを回帰し、50 年後の値を推定する。

試験の結果を表-4 に示す。「① ＜ ②」　であることから、耐ストレインコロージョン性を有することを確認した。

表-4　長期ストレインコロージョン性試験結果

① 試験体の固有寸法から算出された JSWAS K-2 による基準値	②50 年を外挿した時の推定ひずみ
0.481%	0.610%

3.2.4　水密性試験

図-5 に示す通り、FRP 更生後のますの内部を満水にして、時間経過による水漏れの有無を水位の変動及び目視により確認する。

3、10、30 分経過後に水位計測した結果、水漏れがないことにより水密性を確認した。

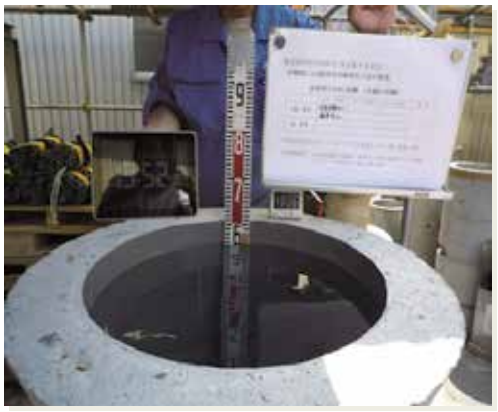


図-5　水密性試験状況

3.3　施工性について

施工性や施工時間を確認するために､現場での試験施工を実施した｡試験施工の場所は、当事務所の再構築工事現場より抽出した。施工フロー及び試験施工状況をそれぞれ図-6、図-7 に示す。

3.3.1　施工フロー

施工は、(1) 事前調査、(2) 準備工、(3) 更生材準備工、(4) 内面被覆工、(5) 管口処理工、(6) 後処理工の施工手順で行った。

(1) 事前準備

・目視調査により、前処理工の必要事項を確認して事前に施工する。

(2) 準備工

・ます内部、インバート部を十分に洗浄し、更生工前には換気して湿気を取り除く。

・止水栓をする場合は、必ず使用者と協議して施工する。必要に応じて、民地側のますから水替えを行う。

(3) 更生材準備工

・樹脂、硬化剤、促進剤、硬化補助剤を調合・攪拌したものを補強繊維材に含浸させ、更生機に巻き付けて、ます内部に挿入する。

(4) 内面被覆工

・浮上がり防止のため、ウエイトを設置する。その後、徐々にエアーを注入し、拡径圧が 0.050MPa 以上になったら、ヒーターを稼働させ、硬化温度がピーク時より約 10%下降した時点で停止し、その後約 10 分養生する。

(5) 管口処理工

・更生機撤去後は、速やかに流入管口の穿孔を行う。

(6) 後処理工

・管口及び上部端部の仕上げを急結モルタルで行う。

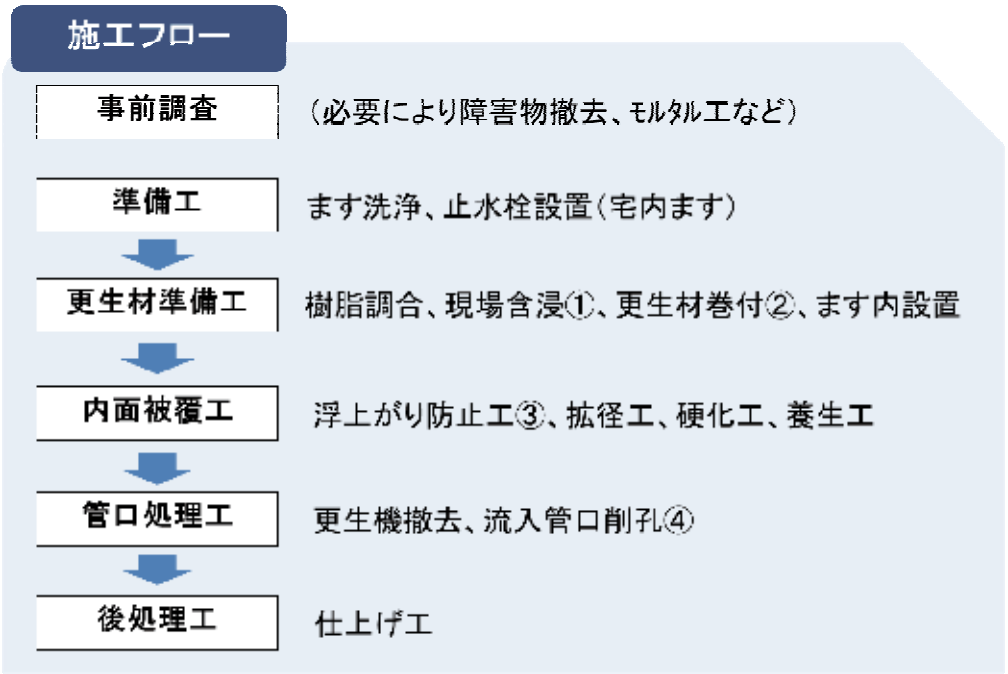


図-6　施工フロー

図-7　試験施工状況

3.3.2　施工実施状況

施工前と施工後のます内部の状況をそれぞれ図-8、図-9 に示す。一箇所当たりの施工時間は約 3 時間であった。専用のます更生機を使用することで、インバート部、取付管口部、側塊部を一体化して施工することができ、仕上がりも良好であった。当該ますについては、施工後の追跡調査でも良好な状態を保っている。

図-8　汚水ます更生工施工前の状況

図-9　汚水ます更生工施工後の状況

4. 本工法の留意点

開削による入替工法とは単純に比較することはできないが、採用するにあたり以下のような留意点がある。

1 点目はコストについてである。一箇所あたりの直接工事費について、開削による入替えが 10 万円程度であるのに対し、非開削更生工法は現時点で約 19 万円となっている。

2 点目は施工に要する時間についてである。一日当たりの施工可能箇所数を比較すると、開削による入替えが 3 箇所程度であるのに対し、非開削更生工法については 2 箇所程度である。

このように、現段階ではコストや施工時間については開削工法が有利となっているが、開削ができない箇所での汚水ますの更新を行う上では有効な工法であると考える。

5. まとめ

平成 23 年度より共同研究により開発を進めてきた本技術は、各種性能試験や試験施工を行うことで、更生した汚水ますが新設汚水ますと同等の性能を有することを確認し、開削による施工が困難な箇所で汚水ますの更新を推進するために非常に有効な技術であることが認められた。

今後は中部下水道事務所管内をはじめとした開削困難箇所等で本技術を段階的に導入しつつ、汚水ますの老朽化対策を着実に推進していきたい。

1-1-2　洗足池幹線調査に伴うレーダー空洞調査について

南部下水道事務所　建設課
建設工事担当　福田拓海

1.　はじめに

洗足池幹線上流部は矢板工法にて施工された馬蹄渠であり、平成 19 年度の幹線調査により天端覆工コンクリートの崩落が発見された。地山との間には空洞が確認され、覆工コンクリートの変形や地山の緩み等が懸念された。また、崩落個所以外においても、同矢板工法にて施工された箇所（延長約 1,000m）には空洞の存在が懸念された。そこで、本調査委託では通常の幹線調査に加えて、覆工コンクリート背面の状況を連続的に把握するためレーダーによる空洞調査を実施した。本論文ではレーダー空洞調査の原理及び手法、測定値とその検証結果を報告する。

2.　調査背景・目的

平成 19 年度に実施した幹線調査では、洗足池幹線最上流部から 650m 付近で天端崩落が発見されている（**図 1**）。崩落径は約 1.0m 四方、奥行きは 0.6m におよび、地山が露出している状況であった。地山は硬質な土丹層であるため掘削表面の崩壊等は確認されなかったが、長期的には土圧が均等に作用せず覆工コンクリートの変形やさらなる崩壊、地山の緩み等が懸念される。そこで南部下水道事務所では、洗足池幹線上流部の老朽化対策を行うため、平成 25 年度から調査委託を行った。

図 1 洗足池幹線天端の崩落写真

2.1　幹線概要

洗足池幹線は大田区北千束一丁目から仲池上一丁目付近に位置しており、下流で呑川幹線に接続する合流幹線である（**図 2**）。全延長は約 3,500m、管断面は円形・矩形・馬蹄で構成され、昭和 46 年～51 年に施工された。

図 2 洗足池幹線位置図

上流約 1,000m は硬質な土丹層であることから、山岳トンネル工法の１つである矢板工法により施工されている。

2.2　山岳トンネル工法（矢板工法）

矢板工法とは、掘削した地山に対して H 鋼材を馬蹄形に組立て、その背面に矢板を宛てがい、地山を受けながらトンネルを構築していく工法である（**図 3**）。一方、施工上の欠点として、組立てた支保材に対してコンクリート覆工を

行った後、覆工背面に裏込めモルタルを充填する必要がある。この際に施工状況を目視しながら注入が出来ない為、裏込め材の注入量の把握が困難である。つまり覆工と地山との間隙に対して裏込め材の完全な充填が難しく、結果として天端部分に空隙が生じやすい。このことは、トンネル標準示方書[山岳工法編] [1)] にも留意点として記載されている。

以上を踏まえると、崩落箇所以外にも洗足池幹線背面に空洞が残存する可能性があり、調査を行う必要がある。そして空洞が存在した場合、空洞の大きさや状況、地山の状況などを調査し、明らかにする必要がある。そこで本調査委託では、通常の幹線調査に加えて覆工コンクリート背面の状況を連続的に把握するため、鉄道や道路トンネルの背面状況の調査に一般的に用いられているレーダーによる空洞調査を行った。

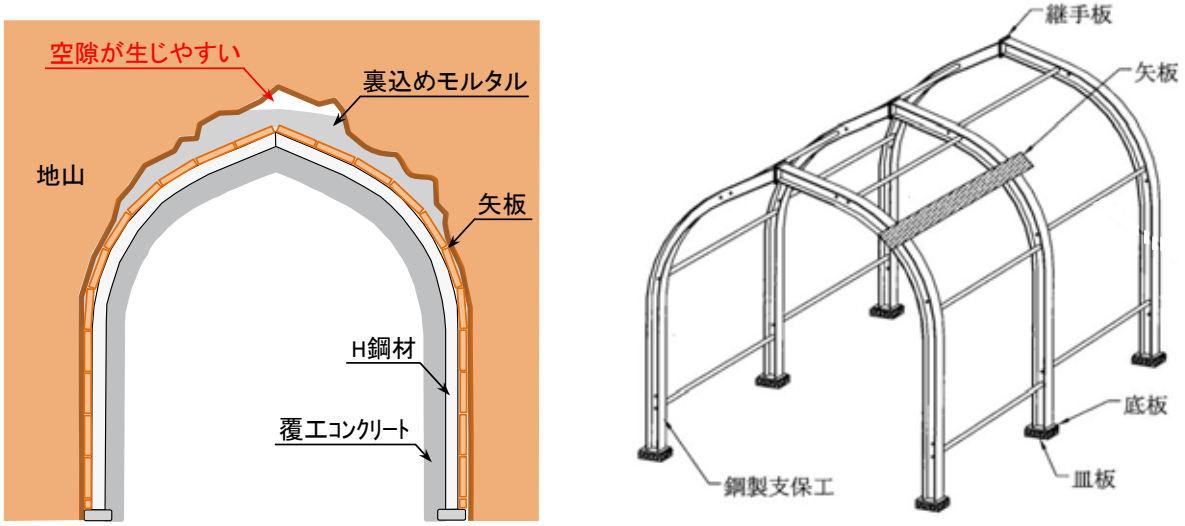


図 3 矢板工法の施工断面図および構成部材

3. 幹線背面の空洞調査概要

調査箇所は崩落部と同一の矢板工法で施工された管径 1,800×1,800 と管径 2,400×2,400 の馬蹄渠路線であり、幹線最上流部 3 路線の約 1,000m である。

トンネル背面の空洞調査は、調査範囲により手法が分けられる。局所的な空洞調査であれば、覆工コンクリートに調査孔をあけて小型カメラを挿入して内部の調査を行う。一方、全域的な空洞調査を行う場合は、上記の調査を行うと削孔箇所が増える為、コスト増加と覆工コンクリート自体の強度低下が懸念されることから、連続的な調査が可能な電磁波探査手法が有効とされている [2)]。今回の調査ケースは、調査延長が 1,000m と長距離であり、かつ対象路線全域に対して調査を行う為、電磁場探査の 1 つであるレーダー空洞調査を採用した。

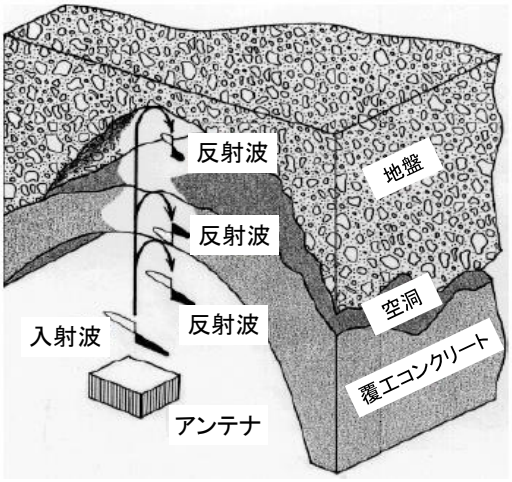


図 4 レーダー空洞調査の概念図

3.1　レーダー空洞調査の原理と手法

レーダー空洞調査とは、比誘電率の違う物質との境界層で反射・透過する性質を持つレーダー（電磁波）によって、調査対象の位置や層厚などを測定する手法である。本調査の調査方法は洗足池幹線内部から鉛直上向きにレーダーを送信し、各層の境界で発生する反射波を受信することで、空洞の有無や空洞の厚み、構造計算時に使用する覆工厚を測定している（**図 4**）。また空洞が生じやすい幹線の天端に加えて左右 45° 線上の計 3 箇所を縦断方向へ連続的に測定しており、用いた測定機器は管路内を移動しながら測定できる装置を使用した（**図 5**）。

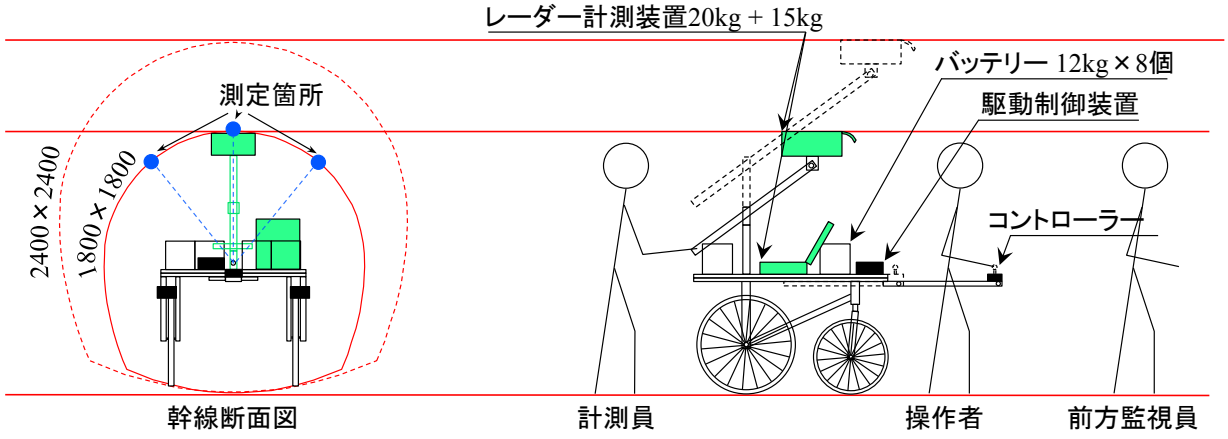


図 5 洗足池幹線調査時に使用したレーダー調査測定機器

3.2　調査結果

レーダー空洞調査の結果について、各層の厚さと線路延長でまとめたものを（**図 6**）に示す。また、左右 45° 線上の測定結果は類似していたため、上流を背に右側のみ表示することとし、調査した全路線の一部を抜粋して表示する。

結果を見ると懸念していた通り、調査路線の背面全域に空洞が残存していることが分かった。空洞は天端部分に集中しており、空洞厚は平均 20.0cm であった。一方、左右 45° 線上には空洞がほとんど見られず、矢板工法の留意点通りの結果となった。これらの測定結果を合わせると空洞断面積の概算が分かり、裏込めの充填量を把握することが出来た。

同様に覆工コンクリート厚も測定しており、設計覆工厚 30.0cm に対し、平均 34.0cm で

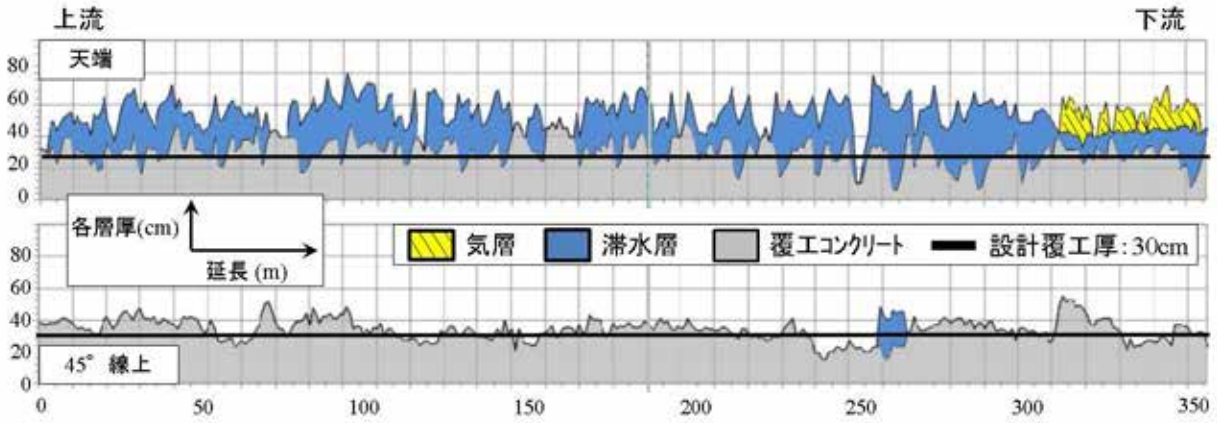


図 6 レーダー空洞調査結果の抜粋

あった。また覆工厚 30.0cm 以下を示した延長割合は約 3 割であった。そしてレーダー調査による最小覆工厚は 3.0cm であったが、表面上の目立った損傷が確認出来なかったため、レーダー空洞調査の結果検証を兼ねて覆工コンクリートを穿孔し、実測による各層厚の測定を行った。

3.3 穿孔による実測調査

レーダー調査結果の検証では、安全性に充分配慮して地下水の流出による地山の影響を最小限に抑える方法とした。測定方法は、覆工コンクリートにφ2.0cm～3.0cm の小さな穴を空けて、指矩を用いて測定を行った（**図 7**）。測定箇所は、a)レーダー調査で最小覆工厚 3.0cm を示した箇所 に加えて、空洞厚の結果検証を行うため、b)覆工背面の空洞内部が水で満ちている箇所 と c)空気で満ちている箇所 の条件を変えた 2 箇所で合計 3 箇所の測定を行った。なお、小型カメラを用いた空洞の内部調査も予定していたが、前日の降雨により全ての箇所から出水があったため、撮影は断念した。

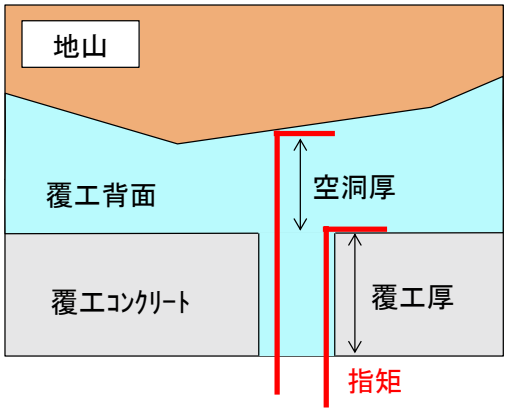


図 7 実測調査の概念図

3.4 結果の比較と考察

レーダー空洞調査と実測調査の測定結果（**表 1**）に示す。結果を比較すると、まず空洞厚に関して調査箇所 a)、b)、c)は、両調査手法の結果に差が見られた。これはレーダー空洞調査が測定器を設置した箇所の真上を測定するのに対して、実測調査は空洞の最深部を探るように測定していたことが誤差の原因と推測できる。つまり、地山表面の凹凸が激しいほど調査手法の測定結果に差が出る可能性がある。一方、覆工厚に関して a)最小覆工厚は、実測では 31.0cm であった。これは実測調査時に穿孔部からジャンカ出てきたため、覆工コンクリート内のジャンカによる微小な間隙を境界層と判定し、反射波が発生したものと考えられた。一方、レーダー空洞調査の測定精度を評価すると、覆工コンクリートが健全だった a)と c)は設計覆工厚 30.0cm に近い値であり、損傷等が見られた b)についても実測調査通りの結果が出ているため、調査精度は良いことが分かった。

表 1 レーダー空洞調査と実測調査の比較

調査箇所	覆工厚(cm)		空洞厚(cm)	
	レーダー調査値	実測値	レーダー調査値	実測値
a)最小覆工厚	3.0	31.0	0.0	7.0
b)背面滞水層	7.0	7.0	35.0	56.0
c)背面気層	33.0	32.0	37.0	35.0

4. まとめ

今回のレーダー空洞調査により、洗足池幹線の背面空洞の分布状況を全延長にわたりに捉えることが出来た。該当区間の覆工コンクリート背面の天端部には、ほぼ全域にわたり空洞が分布しており、空洞内部の大半は地下水により滞水していた。これは実測による検証を行った際の穿孔部から地下水が出水されたことからも裏づけられる。

また測定値に関しては、空洞厚平均 20.0cm、覆工厚平均 34.0cm であった。この結果は実測検証を踏まえると、空洞厚については地山表面の凹凸状況次第で測定値より大きな空洞が存在する可能性がある。また覆工厚については実際の値に近い結果であることが分かった。しかし留意点として、設計覆工厚と著しく乖離した値が出た場合は、目視調査等の幹線調査結果を参考に総合的に判断し、覆工コンクリートを穿孔により背面状況を実測することでレーダー調査結果の精度評価を行うことが望ましいと言える。

今後の課題は、洗足池幹線上流部の背面全域に空洞があり、また滞水している状況であるため、裏込め材の材料選定と施工方法に関して精査する必要がある。

参考文献

1) 土木学会 トンネル工学委員会:2006 年度制定トンネル標準示方書 山岳工法・同解説、社団法人 土木工学会、2006.8、pp.293-300

2) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社:矢板工法トンネルの背面空洞注入工　設計・施工要領、(株)高速道路総合技術研究所、2006.10、pp.5-10

1-1-3　急傾斜地区域を含む再構築工事

～新宿区赤城下町、矢来町付近再構築工事～

東京都下水道サービス株式会社　管路部　施工管理第一課　半田裕也

1.　はじめに

新宿区赤城下町、矢来町付近再構築工事は、新宿区北東部の早稲田通り沿いを南北に延びる地域を老朽化対策先行工事(段階方式)にて再構築をするものである。当再構築工事範囲内には公道との高低差が要因の一つとなり、宅地の下に設置された排水管で漏水やつまり等が頻発(以下、排水不良とする)している区域があった。工事発注前より当該区域のお客さまから、新宿区役所へ排水不良の解決を依頼する陳情があり、当工事の道路占用許可申請時に、新宿区役所は当該土地の排水不良の解決を下水道局に要請した。新宿区役所、地域のお客さまと連携を図り、当再構築工事にて排水不良を解決したことについて今回報告する。

2.　現場概要

再構築範囲内全体及び排水不良区域（矢来町地区）を図１に示す。施工範囲は東から西にゆるく、北から南に激しく下っている坂地であった。

矢来町地区では図２のように前面の公道から私道を下った先に家屋が多数あり、前面の公道との高低差が約 3m、北側の公道に布設されている公共下水道の土被りが 1.2～1.5m であるため自然勾配による排水が困難な状況であった。また南側は高低差が非常に激しく擁壁が設置されており南側へ排水すると配管が露出してしまう。このような状況から矢来町地区の住民は近隣住民の宅地の下を通って西に流す排水系統となっていた。排水管が宅地の下に布設されているため維持管理が困難であること、私有地内であるため場当たり的に排水設備を布設していることが排水不良の原因となっていた。また、降雨時には下り坂と

図１　再構築箇所案内図

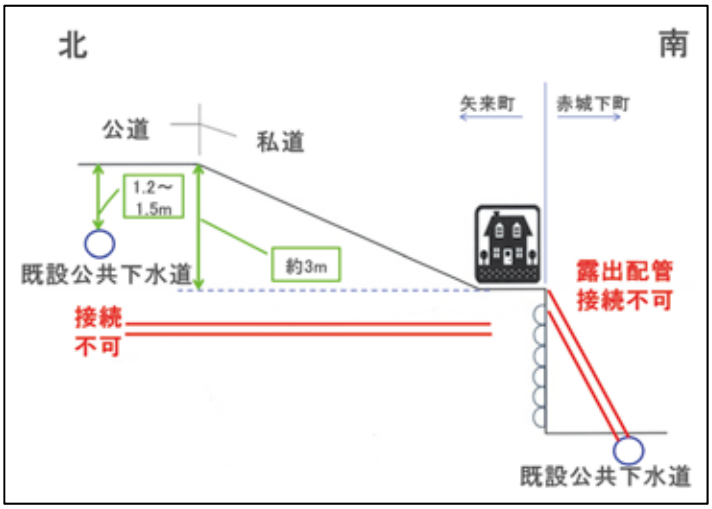


図２ 排水不良概要図

なっている私道に排水設備がないことから突き当りにある家屋に雨水が押し寄せることや、排水設備が宅地の下で破損しており、擁壁から下水が漏れることなど問題が多数発生していた。

3. 排水不良対策工事着手まで

3.1 経緯

現場概要で述べた排水不良に関して以前より地域住民が新宿区に対し、陳情を行っていたが前面の下水道管との位置関係から私道助成制度で私道排水設備を整備しても接続できないため、新宿区単独での対応ができかねる状況であった。そのような状況の中、当工事の道路占用許可申請の際（平成２３年度）に新宿区より対応するよう要請があった。

新宿区を交えて排水不良の解決方法の協議を行った結果、①下水道局は前面道路の低地からの汚水を受けられる深さに公共下水道を布設する。②お客さまは新宿区の私道助成制度を利用して私道排水設備を布設し、宅地内の排水を新設私道管に切り替えを行う。③私道排水設備の整備に際し、私道排水管が大深度なこと、整備範囲が広いことから、高コストとなるのが予想されるため、新宿区は私道助成金の予算を通常より多く確保することとした。この施工をするにあたって課題を二点、次に示す。

3.2 課題

課題 1: 前面公道の迅速な工事着手が困難

再構築工事中は工事の新規着手ができないこと。また、再構築工事完了後すぐに工事着手しようとすると近隣のお客さまの負担が大きいので、排水不良対策工事の着手には期間をあける必要がある。

課題 2: 6m 近くの土被りになる私道排水設備工事には高い技術が必要

新宿区の私道助成制度は私道排水設備の工事にあたり新宿区が算定した額の８割を助成する制度であるが、土被りが６ｍ近くになる私道管きょの算定のノウハウを新宿区が持っていないこと、また、私道部分の整備については排水設備業者が行う必要があるが、今回のケースのような土被りの非常に大きな排水設備については、設計・施工ともに高い技術を必要とし、一般的排水設備事業者では対応が困難であった。

3.3 課題解決策

解決策 1: 工期短縮

再構築工事の追加工事として排水不良対策を追加することにより施工時期を早めることである。ただし、原設計には一切、低地部に関することは含まれていないので、低地部からの排水を受けられる下水道管に関して、私有地内から位置関係を調査し、最適な方法を検討したうえで、設計・施工を行っていく必要がある。受注者が設計コンサルタントを下請けに入れ、設計検討段階で施工上の問題点を同時に解決するなどスピードアップの策を講じた。

解決策 2: 高度技術の確保

(1)設計時における解決策

追加工事分の設計時に、受注者は私有地内から調査を行う。その際に民地内の設計も同時に行い、その設計内容を新宿区・お客さまに提案することで新宿区役所・一般的排水設備事業者では対応困難な設計課題を解決した。

(2)施工時における解決策

公道部の施工業者が私道部についても施工を請け負うことを提案し、土被りの大きい箇所の技術的課題についても解決した。

3.4 施工方針決定まで

平成24年3月には公共下水道及び私道排水設備の設計案が受注者より提出され、局内で施工方法が固まった。同年4月に民地内も含めた設計内容について新宿区と協議を行い、了解を得た。お客さまへの説明は、新宿区と共同で同年24年6月に住民説明会を開催(図3)し、各々の事業範囲や追加工事に関する説明を行った。ここでは、お客さまからも既設管撤去、施工中の通行及び工事費用などについての質問があり丁寧に説明した。また、説明会に参加できなかったお客さまや他の町会等に対しては、下水道局が個別訪問して説明を実施した。関係者への説明を丁寧に実施した結果、私道部分の施工も含めたお客さまの了承が得られたことで、施工方針が決定された。

図3 合同住民説明会状況

4. 施工に関して

4.1 工法検討内容

新設管の施工方法について表1に示す。新設管の土被りが最大約6.5m平均約6.0m以上になることが見込まれるため周辺地盤への影響、全体費用及び工期を考慮し、推進工法を基本として検討を行い、施工性、将来の維持管理等を考慮して検討案4を採用することにした。この案では、最下流部の路線を除き推進工法で既設管きょの下を新設管が通り、最下流路線は新設管の管きょの土被りに対応し、既設管と新設管を合算した水量を流下可能にするため開削にて布設替えを行うこととした。さらに、最上流路線の整備を省略し最下流部の整備延長を短くすることで、費用の削減を図った。

表１　施工検討

案	施工図	施工延長	立坑	流下方法	施工性	
1		推進2スパン L=204.7m （泥水） L= 20.7m （圧入二工程）	発進立坑 ・鋼製ケーシング　φ2,500mm　1基 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 到達立坑 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基	マンホールポンプ	○	施工延長は最短である。 マンホールポンプの維持管理が生じてくる。
2		推進4スパン L=122.7m （泥水） L= 44.7m （泥水） L= 47.1m （圧入二工程） L= 20.7m （圧入二工程） 開削1スパン L= 35.2m	発進立坑 ・鋼製ケーシング　φ2,500mm　1基 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 ・ライナープレート　φ2,500mm　1基 到達立坑 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 ・鋼製ケーシング　φ1,200mm　1基	自然流下	×	南北に延びる箇所は公園の出入り口で狭くなっており立坑設置が困難。
3		推進3スパン L=120.0m （泥水） L= 80.0m （泥水） L= 20.7m （圧入二工程） 開削1スパン L=35.2m	発進立坑 ・鋼製ケーシング　φ2,500mm　1基 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 発進到達立坑 ・鋼製ケーシング　φ2,500mm　1基 到達立坑 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　2基	自然流下	×	南北に延びる路線の上部には架空線が輻輳しており立坑設置が困難
4		推進5スパン L=204.7m （泥水） L= 13.5m （圧入二工程） L= 43.4m （圧入二工程） L= 19.7m （圧入二工程） L= 20.7m （圧入二工程） 開削1スパン L= 30.0m	発進立坑 ・鋼製ケーシング　φ2,500mm　1基 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 ・ライナープレート　φ1,500mm　1基 到達立坑 ・鋼製ケーシング　φ1,500mm　1基 ・ライナープレート　φ1,500mm　2基	自然流下	○	施工延長は長くなるものの施工性、維持管理において問題点が少ない。

4.2　新設管きょ整備方法

新設管の路線図及び諸元を上流部から①～④として表 2 に示す。①は土被り約 6m、延長 200m 超となるが、その中間には既設下水道施設、他埋設物等が支障となり公道上に人孔を設置することが困難であった。維持管理について出張所、管路施設係の担当者と協議した結果、私有地承諾を取得したうえで民地に人孔ますを設置すること、維持管理についても人孔ますから行うこととした。

表 2　施工方法詳細

路線図		管径 (mm)	延長(m)	勾配(‰)	土被り(m) 上流	土被り(m) 下流	管種	工法
	①	300	204.7	8.0	6.88	5.38	塩化ビニル	推進工法
	②	300	13.5	4.5	5.45	4.35	塩化ビニル	推進工法
	③	300	45.0	4.5	4.40	3.10	塩化ビニル	推進工法
	④	700	26.6	14.5	2.72	1.42	強化プラスチック	開削工法

4.3　お客さまとの良好な関係の構築

この工事では人孔ますの私有地内設置等、多くのお客さまの協力により完了できた。お客さまの陳情が発端となった工事であるため、お客さまは協力的であったがより強力な協力関係を引き出すために、前述のように整備案の提案、区・局・TGS の共同での工事説明会の他、私道排水設備の整備に関してもアドバイスや許可の取り付けに助力するなど親身な対応を行った。しかし、追加工事の範囲が排水不良範囲外に及ぶため、排水不良範囲外のお客さまからは営業の邪魔になっている等の苦情があった。このお客さまには複数回、話し合いを重ね店舗の案内看板を作業帯外(図 4)に新たに設置するなど、協力関係を築き円滑な施工を進めることができた。

図 4　店舗案内看板設置状況

4.4　工期について

追加工事に関する打合せ、施工を含めた実施工程表を表 3 に示す。当初契約工期内に追加工事も含めて完了する

表 3　実施工程表

	平成23年 8	9	10	11	12	平成24年 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平成25年 1	2	3	4	5	6	7	8
契約工期 [H23.8.26～H25.8.9]																									
コンサル(打合せ)		26						15 中間報告				最終報告 方針決定 区確認													
コンサル(調査・検討)																							施工開始		
追加部分工期			事前準備等																						
備考	9月9日依頼 文書受領					5月22日推進追加審議会 7月15日住民説明会																			

ことができた。工事量が増大しても当初工期で完了できたのは、前述の通りお客さまと良好な関係を築いたことの他、下水道局、受注者が、お客さま負担軽減のため早期完了に努めたからと考える。実施工程表の通り、平成 23 年 9 月 9 日に新宿区より排水不良解決の依頼文書を受け、2 週間後の 9 月 26 日までには受注者が下請けに入るコンサルタントと契約し、設計方針に関する打合せ等を迅速に行った。コンサルタントが調査・設計を実施している間に当該箇所以外の施工を進めるなど、受注者が追加工事に注力しやすい体制を整えたことで、工期内の完了を達成することができた。

5. まとめ

前面道路に土被りの大きい公共下水道が布設されたことで、低地部の住宅からの排水及び私道部の雨水も新設私道排水設備を通しての排水が可能となり、浸水への不安を解消した。（図 5 参照）。また、施工前後の排水不良区域の排水設備の設置状況の比較を表 4 に記す。

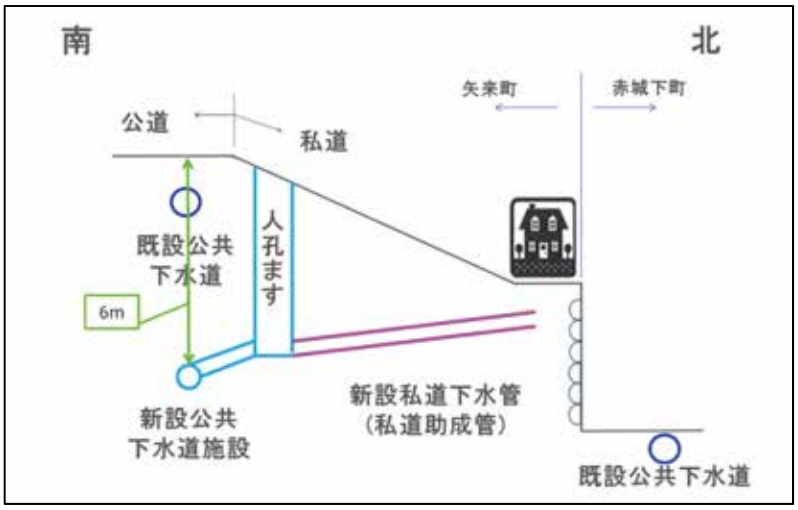
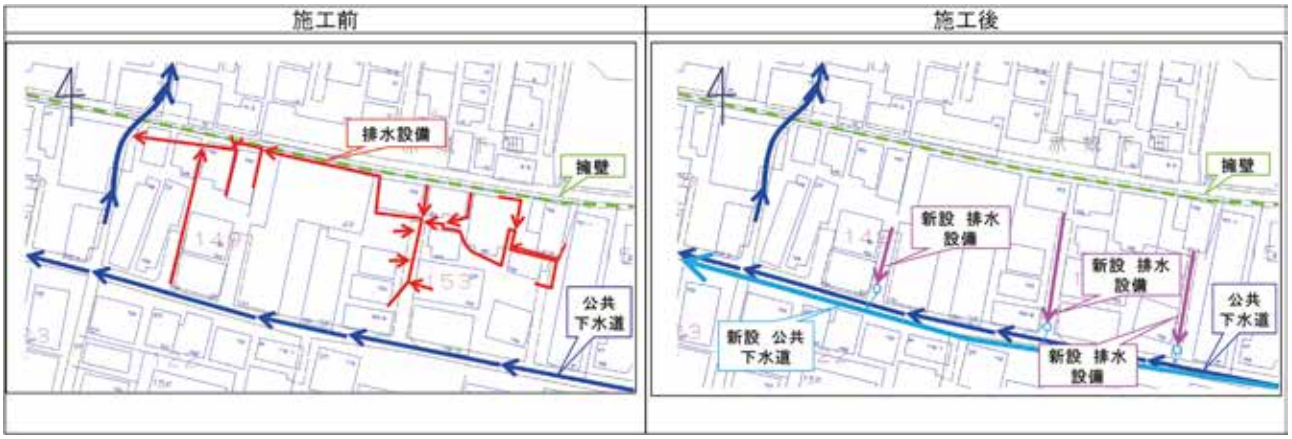


図 5　低地部排水状況イメージ図

表 4　当初排水状況



今回排水不良の解決にあたって、関係者の役割を整理すると以下の通りとなる。

① 下水道局は、新設公共下水道に関係すること及び私道排水の設置に関する排水ルートの提案等、課題解決全般。

② お客さまは、私道排水設備設置や宅地内の排水設備切り替えの費用負担、お客さまの土地である私道内への人孔ますの設置承諾。

③ 新宿区は通常よりも多分の予算の確保。

このように三者ができる役割を最大限に果たすとともに、お互いに協力・連携をすることで迅速に工事を完了することができたと考える。

今回の再構築工事の竣工後、わずか三年で排水不良範囲内にあった約 25 件の中で 4 件もの家屋が新築・改築されていたことから公共事業が地域に与える影響の大きさについて強

く実感した。強い影響力を持つ公共事業にかかわる人間として、今後は、住民負担の軽減や住みやすい環境づくりへの貢献などを常に意識して業務に取り組んでいく。

1-2-1　流体解析を用いた分水人孔構造の検討

西部第二下水道事務所　　施設課　大塚　雅貴
赤木　洋介（現　第二基幹施設再構築事務所　設計課）

1. はじめに

1.1　背　景

新河岸処理区のポンプ排水区である志村ポンプ所流域は、志村ポンプ所手前の分水人孔に赤羽北幹線と志村坂下幹線（合流管）が流入し、汚水は赤羽幹線（遮集管）から浮間水再生センターへ、雨水は志村ポンプ所を経由して新河岸川へ放流している（図 1 参照）。

これまで赤羽幹線への遮集量が計画量を上回り、志村ポンプ所への分水後の雨水流入量が計画量を下回っており、図 2 に示す分水人孔の人孔構造の検証が必要となったため、流体解析を用いた改善策の検討を行った。まず当該分水人孔をモデル化し、実際に計測した分水人孔に流出入する流量のデータから解析モデルの妥当性を評価したうえで、解析結果から現有施設の能力評価を踏まえ、改善策案を立案した。

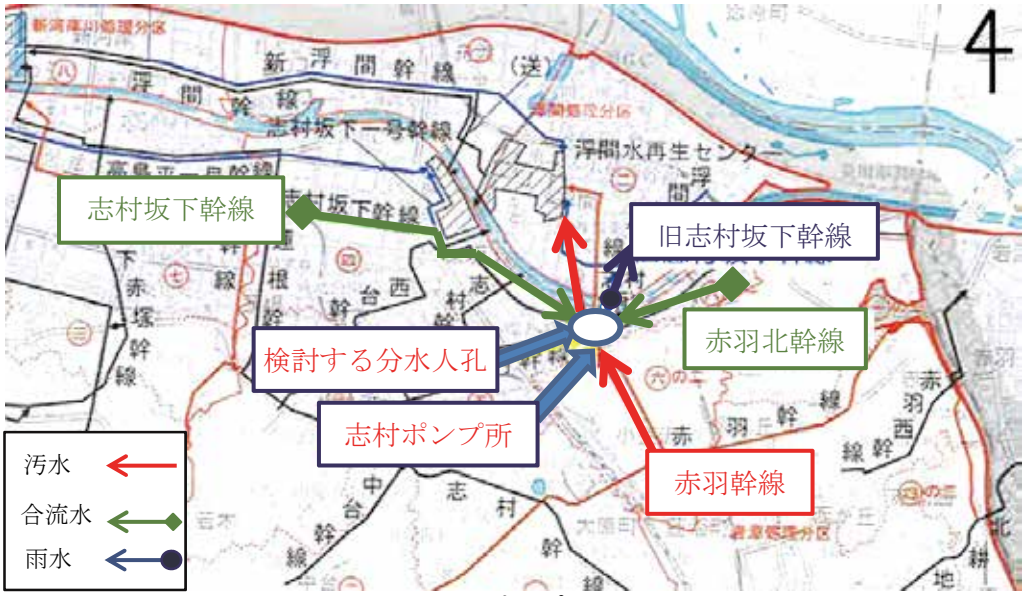


図 1　志村ポンプ所流域図

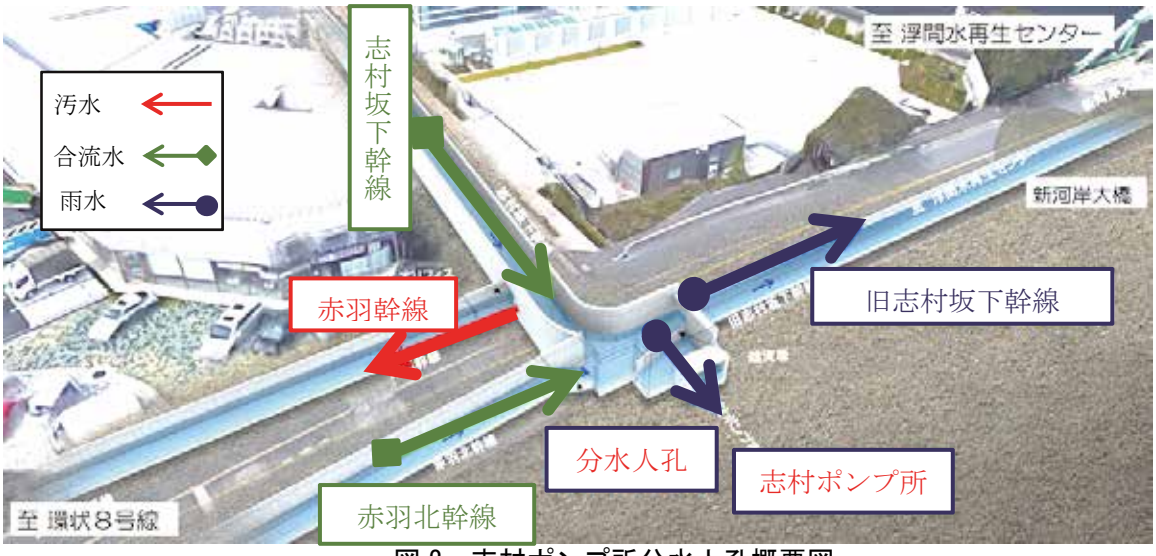


図 2　志村ポンプ所分水人孔概要図

2. 調査・研究方法

2.1 手　法

本研究では多方向から水の流出入がある複雑な構造の人孔を対象とするため、改修方法の検討にあたり多くのパターンでの検証を必要とする。このため短期間で複数案の検討を行うことのできる流体解析を採用した。流体解析とは、気体や液体の流れに伴う流速や圧力、温度などの変化に関して数値計算を行い、可視化する手法である。この手法は製造業や建設業に広く用いられており、下水道では貯留管の水理解析等に用いられた例がある[1)]。今回は熱流体解析プログラム(STAR‐CCM+)を用いて、VOF(Volume of fluid)による非定常の流体解析を行った。検討手順を図3に示す。実測の降雨量に基づく流量調査を行うと共に、分水人孔の構造図、現地調査結果から解析モデルを作成し、志村ポンプ所分水人孔の各地点の流量を求めて実測と比較し、キャリブレーションを行い解析モデルの妥当性を評価する。

次に現状の分水人孔の流入部に計画流量を与えて、流れの挙動を把握したうえで、分水構造を変更する対策案の立案とその効果の検証を行った。

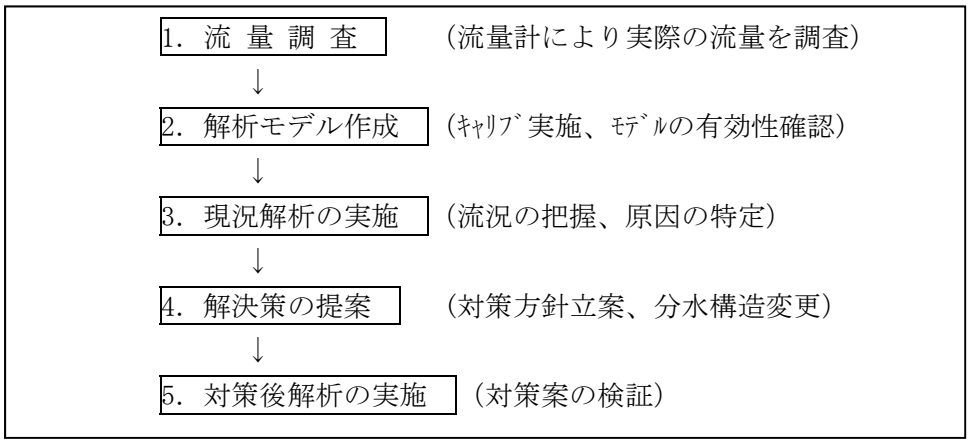


図3　検討手順

2.2 解析条件

分水人孔の構造、モデル形状、境界条件および水の流れを図4,5に示す。モデルとしては、流量の流入面1と2に対して、それぞれ志村坂下幹線、赤羽北幹線に流入する規定の流量を与え、大気開放の流出面1から3を大気圧を基準とするゲージ圧0[Pa]とする。

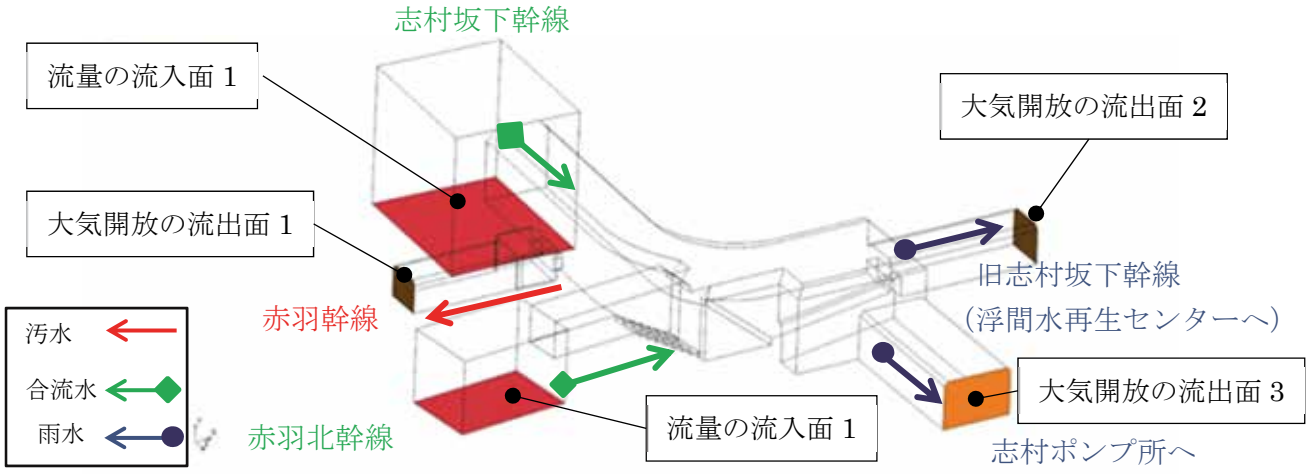


図4　流体解析モデル及び境界条件

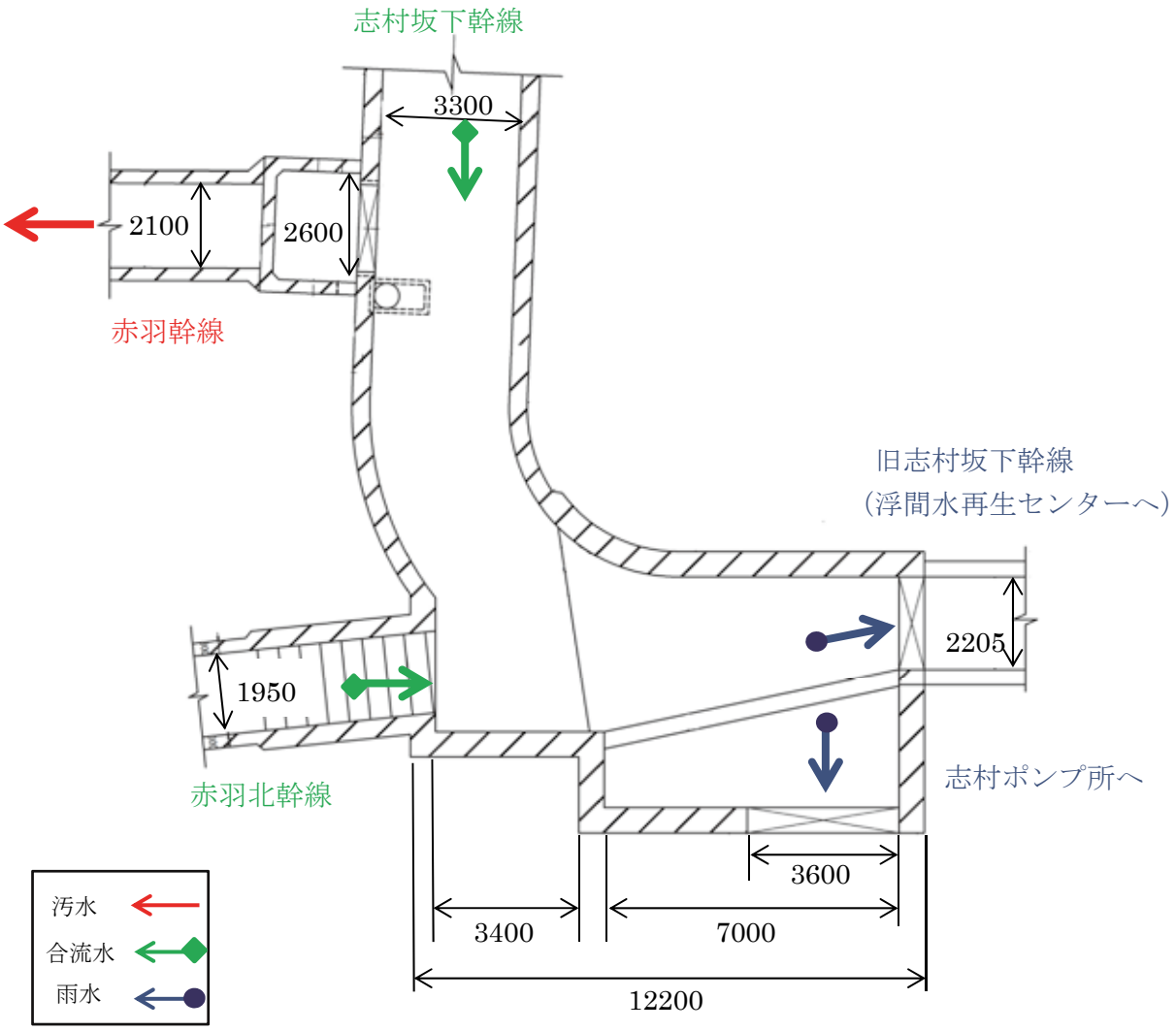


図 5　人孔内部寸法（mm）および水の流れ

3.　モデルの有効性

3.1　キャリブレーション

本研究では人孔内の各流出入部に設置した流量計から降雨時の流量データを 3 ケース収集し、1 日あたりの総流入量の大きさにより流量大、中、小に分類した。

モデルは分水人孔の完了図と現地での測量結果を基にモデルを作成し、モデルの有効性を確認するため、収集した流入量データを用いて流体解析を実施し、流出量データの実測値と解析値の比較を行った。

3.2　キャリブレーション結果

3 ケースの各流量データで流出解析を行い、流出する流量が最大となる時間および流量が安定する時間の 2 つの時間帯での解析結果と収集した実際の流量データとの比較を表 1 に示す。

流量大のケースにおいて赤羽幹線への流出量の誤差が－18%とやや大きな値を示していたが、これは志村ポンプ場に流入させる排水ポンプが一定の水位を感知すると始動することが原因と考えられた。

他のケースでの精度は高く、作成したモデルは本検討に充分使用可能と判断された。

以上より解析モデルの有効性が確認された。

表 1　流量計での実測値と流体解析結果との比較

測定点		流量大		流量中		流量小	
		最大	安定	最大	安定	最大	安定
赤羽幹線	実測値(m³/h)	9207	5235	6991	1351	5543	1254
	解析値(m³/h)	11454	5125	7439	1322	5441	1232
	誤差	−18%	2%	−6%	0%	0%	0%
旧志村坂下幹線	実測値(m³/h)	790	0	446	0	20	0
	解析値(m³/h)	415	16	52	4	33	3
	誤差	3%	0%	5%	0%	−1%	0%
志村ポンプ所	実測値(m³/h)	2443	0	309	0	3	0
	解析値(m³/h)	600	66	231	7	94	6
	誤差	15%	−1%	1%	0%	−2%	0%

4.　結果および考察

4.1　シミュレーションケース

当流域では平成 29 年度から貯留施設として赤羽北幹線暫定貯留管の運用を行う予定であり、平成 40 年には赤羽北幹線を流下管として運用を開始する予定である。本研究の検討は両ケースで行っているが、本論文では分水人孔に流れ込む流量が大きい赤羽北幹線暫定貯留管運用時でのケースについて記載する。また現在浮間水再生センターに流入している旧志村坂下幹線は、今後時間 50 ㎜の降雨において流入させないように改修する予定である。そこで分水人孔の改修を行うに当たり、合わせて旧志村坂下幹線の構造を改善するものとして改修案の検討を行った。

4.2　シミュレーション結果

(1) 現況施設の解析

図 6 に示すとおり、赤羽幹線、旧志村坂下幹線の流量が計画値より多くなっており、志村ポンプ所への流量が少なくなっている。このため赤羽幹線および旧志村坂下幹線への流入量を減らすことが分水量の適正化につながると考えられた。このことから図 7 の赤羽幹線及び旧志村坂下幹線開口部の断面積を縮小した場合でのシミュレーションを行った。

(2) 旧志村坂下幹線開口部の閉塞及び人孔構造改修後の施設

赤羽幹線への断面縮小及び旧志村坂下幹線への断面閉塞を行った結果、表 2 に示すとおり計画流入量に対して測点概ね計画値通りの分水量となる。図 8 に、時間 50 ㎜の降雨における施設改修前と施設改修後の流量速度状況を示す。

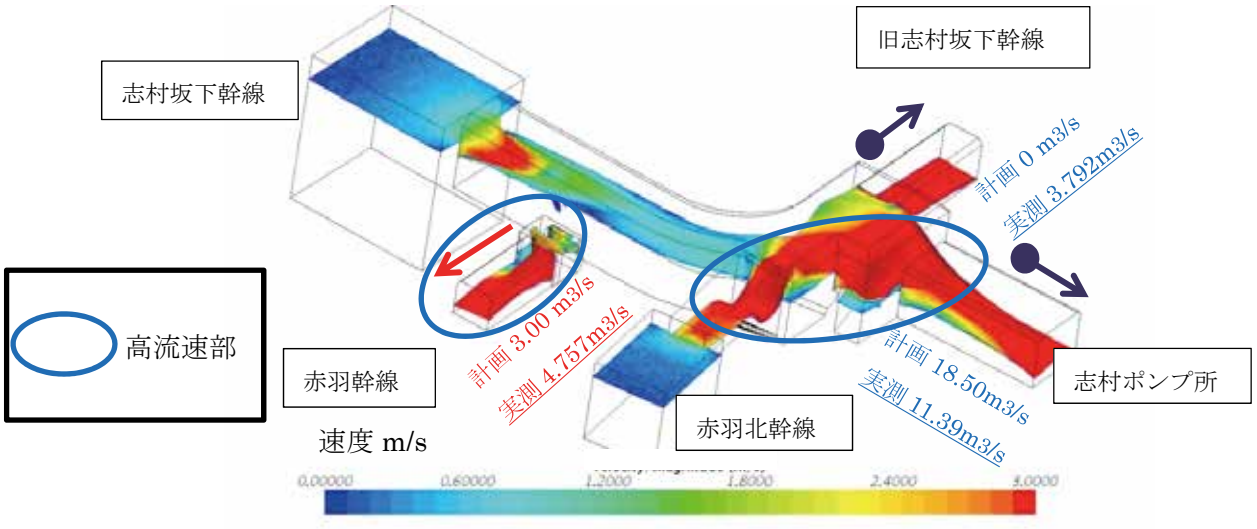


図 6　現況の施設の流量速度状況

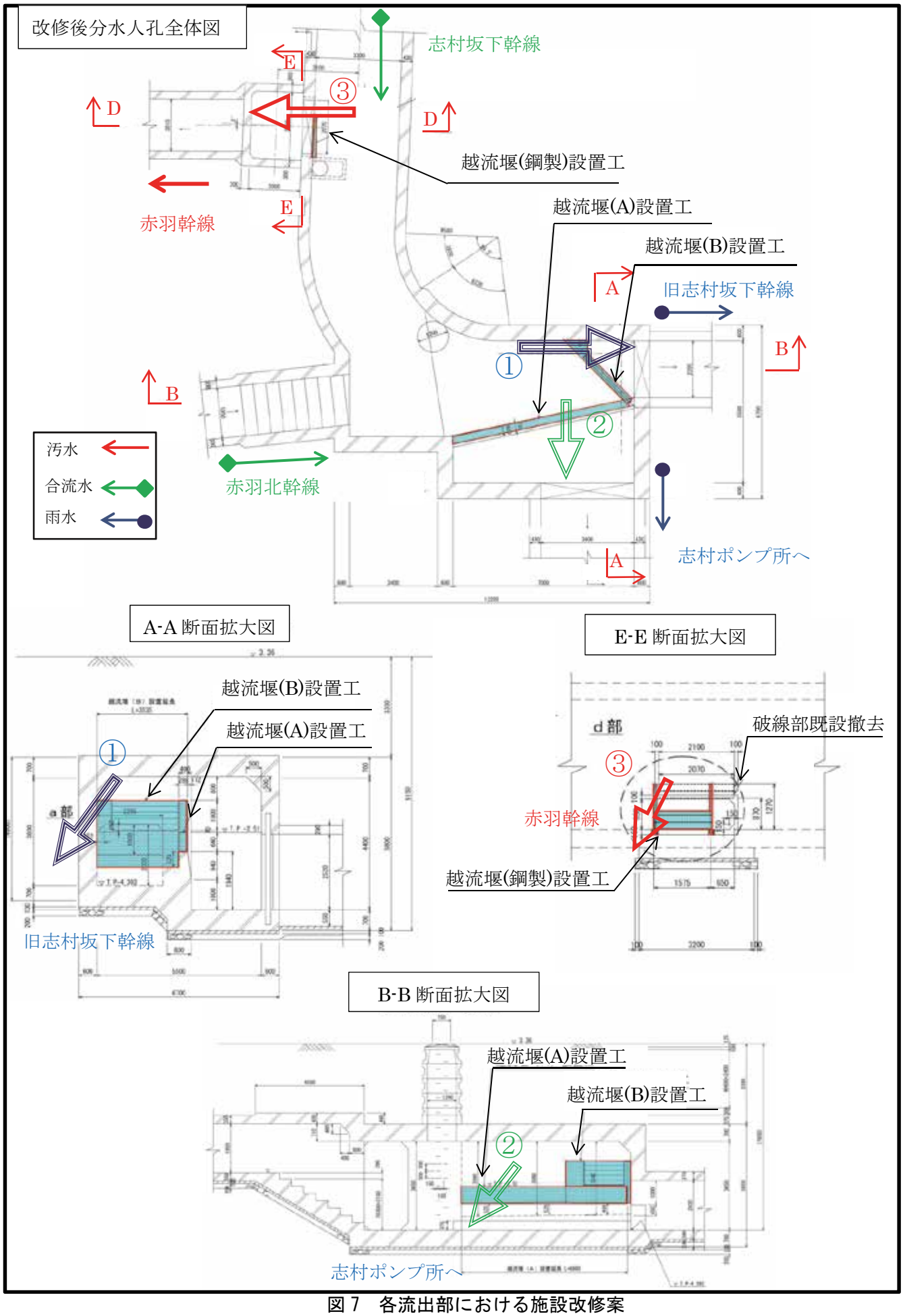


図 7　各流出部における施設改修案

表 2　各測点の流入量・流出量の解析結果（単位：m^3/s）

	施設条件	施設現況（対策前）		施設改修（対策後）	
		計画値	解析値	計画値	解析値
流入	赤羽北幹線	3.752	3.752	3.752	3.751
	志村坂下幹線	16.183	16.179	16.183	16.183
流出	赤羽幹線	3.00	4.757 *(159%)※1*	3.00	2.875 *(96%)*
	旧志村坂下幹線	—	3.792※1	—	—
	志村ポンプ所	18.50	11.390 *(62%)※2*	18.50	17.062 *(92%)*

※1 流出抑制対策必要
※2 流出増量対策必要

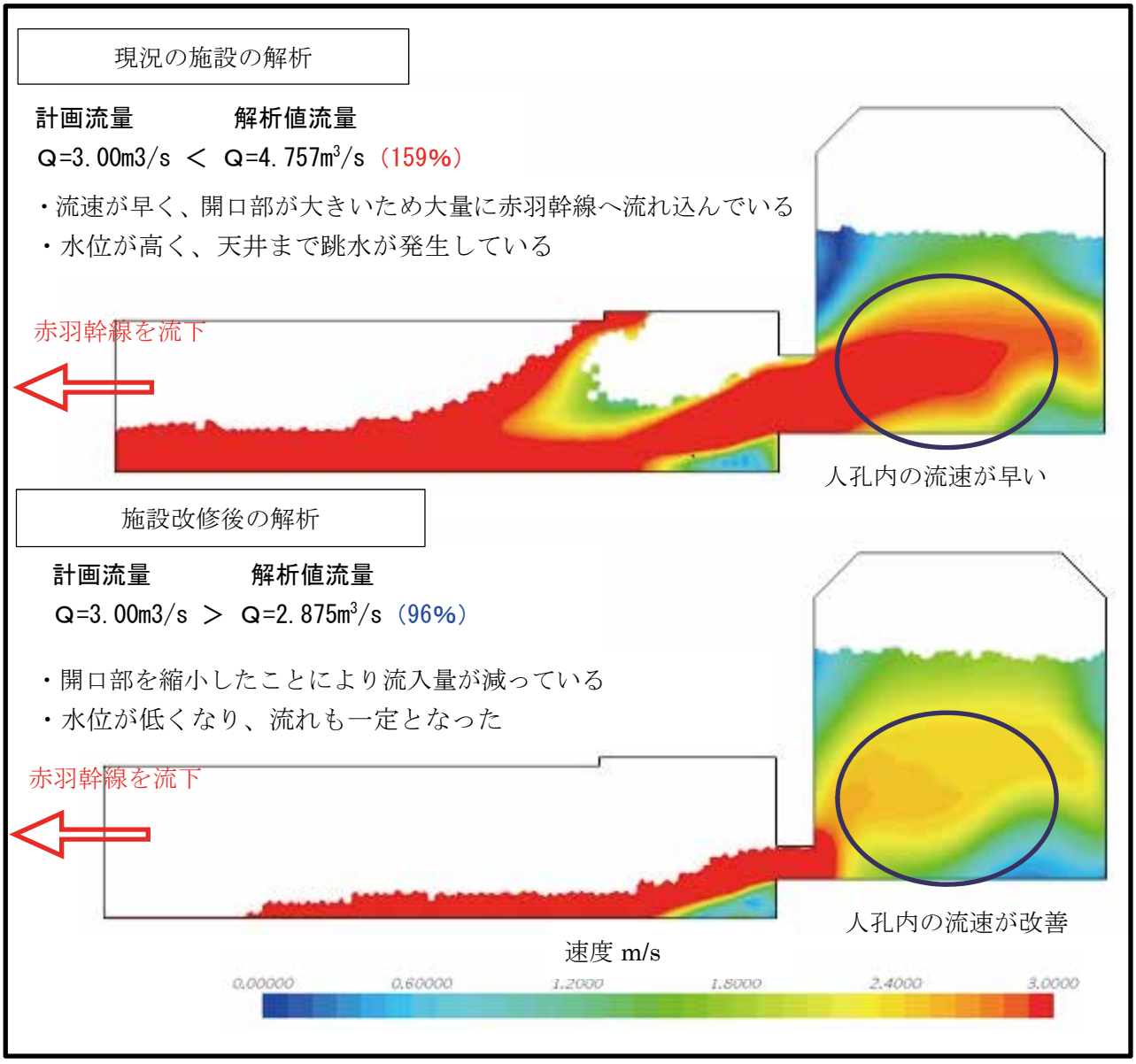


図 8　施設改修前後の解析比較（赤羽幹線開口部　図 7 D—D 断面）

4.3 考察

図 6 や図 8 に示す通りに、現況の施設状況のシミュレーションから、赤羽幹線に大量の水が水位の高い状態で高速で流れ込んでいることが分かった。また旧志村坂下幹線の開口が大きく開いているため、時間 50 ㎜の降雨では本来流下しない旧志村坂下幹線に多くの水が流れ込んでいた。

この結果から赤羽幹線開口部の断面積の縮小、旧志村坂下幹線の閉塞を行うことにより赤羽幹線への流入量が減少し、志村ポンプ所への流入量が増加することが推測された。この考えを基に図 7 の改修後のシミュレーションを行った結果、表 2 に示したとおり対策後に適正な水量が赤羽幹線および志村ポンプ所に流れることが分かった。

また図8に示したとおり、現況の赤羽幹線流入部で発生していた跳水も分水人孔の改修によって解決し、よりスムーズな流れとなることが確認できた。

5. 結　論（おわりに）

複雑な分水構造となっている分水人孔に対し、流体解析を行い、以下の結果が得られた。

① 赤羽幹線の越流部の断面積の縮小および旧志村坂下幹線の開口部の縮小を行うことにより、赤羽幹線の遮集量が計画流量を超過することを改善すると共に、雨水は旧志村坂下幹線ではなく、志村ポンプ所へ全量流下する構造となることを流体解析を用いて確認した。

② 今回流体解析を利用することにより、複雑な構造を持つ分水人孔の現況把握を短期間に行うことができ、また解析の結果考えられた改修案の検討やシミュレーションも低予算かつ短期間に行うことができた。この結果から今後複雑な人孔構造の改修方法の検討に流体解析を導入することにより短期間で実際に即した対策が可能になるものと考えらえる。

参考文献

1)（公財）日本下水道新技術機構：数値流体力学を用いた貯留管の水理解析手法に関する調査研究（横浜市）　平成 24 年

1-3-1　震災時の安定的な電源確保

～灯油・都市ガス併用型非常用発電設備の導入～

建設部設備設計課　畑中　律人

１．はじめに

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災では、福島第一原子力発電所の事故等が発生し、電力需給逼迫に伴う計画停電が実施されたことに伴い、当局施設においても非常用発電機による対応を強いられた。

この時の震災の影響として、東日本の製油所の操業停止、発電機燃料（灯油）の輸送手段であるタンクローリーの不足が発生し、燃料が安定的に確保できない事態が生じた。灯油の供給が安定するまでに約 20 日間を要した一方､都市ガスは継続的に供給されていた。

このような経験から、当局では震災などの不測の事態に備えるため､「経営計画 2013」（設計時)､「経営計画 2016」（発表時）並びに「スマートプラン 2014」に基づき、灯油と都市ガスを燃料として扱うことができる“灯油・都市ガス併用型非常用発電設備（デュアルフューエル非常用発電設備）”を導入し、非常用発電設備の燃料の多様化を推進している。

本論文では、この取組の第 1 弾として、平成 28 年 9 月に中川水再生センターに導入した灯油・都市ガス併用型非常用ガスタービン発電設備について、その特徴や設置における留意点について報告する。

２．灯油・都市ガス併用型非常用ガスタービン発電設備の特徴

灯油・都市ガス併用型は、灯油等（液体燃料）とは別に、都市ガス（気体燃料）を燃料制御弁で切替えて使用することで、1 台のガスタービンを共用して運転できる方式の発電機である｡図 1 に基本構成を示す｡1 台のガスタービンで 2 種類の燃料を扱えることから、デュアルフューエル（直訳：2 つの燃料）発電機とも呼ばれる。

取扱いが容易で長期備蓄ができる灯油と、安定供給が可能な都市ガスを選択できるようになったことで、運用の柔軟性と信頼性の向上を図ることができる。

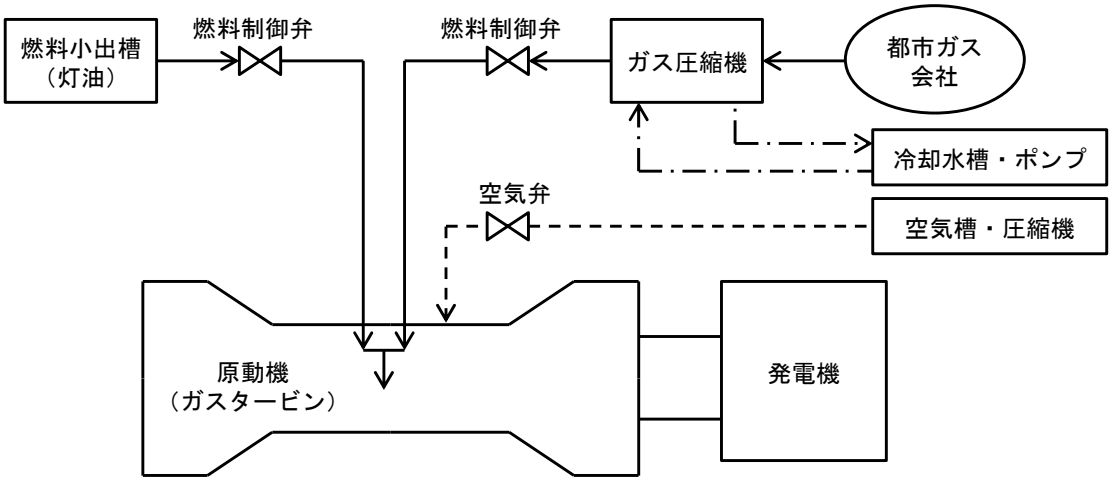


図 1　灯油・都市ガス併用型発電機基本構成

３．灯油・都市ガス併用型非常用発電設備の設置における留意点

灯油・都市ガス併用型を設置するにあたって、下記の 6 項目について留意する必要がある。本論文では、(1)、(3)、(6)について、中川水再生センターに設置した際の事例を紹介する。

(1)ガス会社との協議
(2)ガスに関する部分の所轄消防署との協議
(3)ガス圧縮機を設置するための条件整備
(4)ガス起動する際の電源の検討
(5)燃料切替時の制御の検討
(6)建設費用・運転費用についての検討

３．１　ガス会社との協議

都市ガスは、ガス会社の製造工場から、高圧ガス（1MPa 以上）導管及び、中圧ガス A（0.3MPa 以上）導管、中圧ガス B(0.1MPa 以上)導管、低圧ガス（0.1MPa 未満）導管という流れで徐々に圧力を下げながら各家庭に供給している。

本発電機は、都市ガスの中圧ガス A 導管を敷地内に引き込める環境にないと設置できない。中圧ガス A 導管は、都市ガス会社が管理し、幹線道路に埋設されているケースが多いため、中圧ガス A 導管の引込には制約があり、設計段階で引込経路や施工区分等について、ガス会社と協議を行う必要がある。

図 2 に中川水再生センターの発電機棟周りのガス管引込概略図を示す。施工区分は、表 1 の通りである。局工事内で対応する部分については、ガス会社の基準を満たすように設計・施工する必要がある。東京ガス株式会社の場合、「ガス設備とその設計」という手引きが存在し、ガス管を布設する際の基準が記載されている。

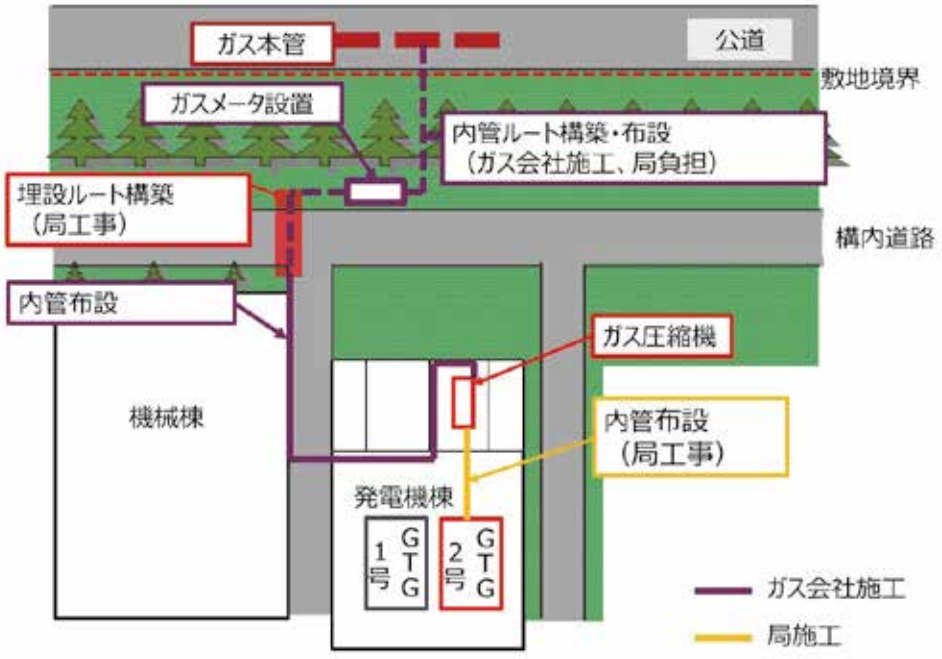


図 2　中川水再生センター発電機棟周り　ガス管引込概略図

表 1　ガス工事施工区分

	ガス会社	局
区間	ガス本管～ガスメータ ガスメータ～ガス圧縮機 ガスメータ設置	ガス圧縮機～発電機 一部の配管ルートの構築

３．２　ガス圧縮機を設置するための条件整備

灯油・都市ガス併用型ガスタービン発電機では、従来当局に導入している灯油型と比較すると、ガス配管、ガス圧縮機、ガス用制御弁、ガス圧縮機冷却設備等の設置が加えて必要となる。この中でガス圧縮機や冷却設備は、設置に当たって機器の大きさや騒音等、考慮する点がいくつかあり、条件整備が必要となる。

図 3 にガス圧縮機の外観を示す。ガス圧縮機は大型（中川の場合は、高さ 3.15m、幅 2.7m、奥行 6.3m）であり、運転時の騒音も大きい。ガス圧縮機の設置場所と敷地境界までの距離に十分余裕があれば、防音箱に納め、屋外に設置することも可能である。しかし、住宅地に隣接し、建物内に設置しなければいけない場合は、設置スペースや搬入経路の確保、騒音対策の検討を行う必要がある。

図 3　ガス圧縮機　外観

また、都市ガスを圧縮した際に発生する発熱量が大きいため、ガス圧縮機の容量が大きい場合は冷却用の水冷設備を設置しなければならない。

上記の留意点に対して、本件では次のように対応した。

図 4 に発電機棟周辺の概略平面図を示す。まず、設置スペースについては、もともと純水装置室として計画されていたが、法改正により装置の設置が不要となった部屋が発電機棟内に存在したため、これを活用しガス圧縮機用の部屋とした。

搬入については、外壁が着脱可能な耐水壁になっているため、これを取り外すことで搬入経路を確保した。

騒音については、ガス圧縮機を専用の部屋に設置したことで、部屋のコンクリート壁がガス圧縮機から発生する騒音を吸収するため、問題ない範囲に収めることができた。

冷却設備については、センターの既設発電機が旧式の水冷方式の発電機であったため、発電機棟内に冷却水槽が用意されていた。今回はこの水槽を活用し、水冷設備を設置することで解決した。

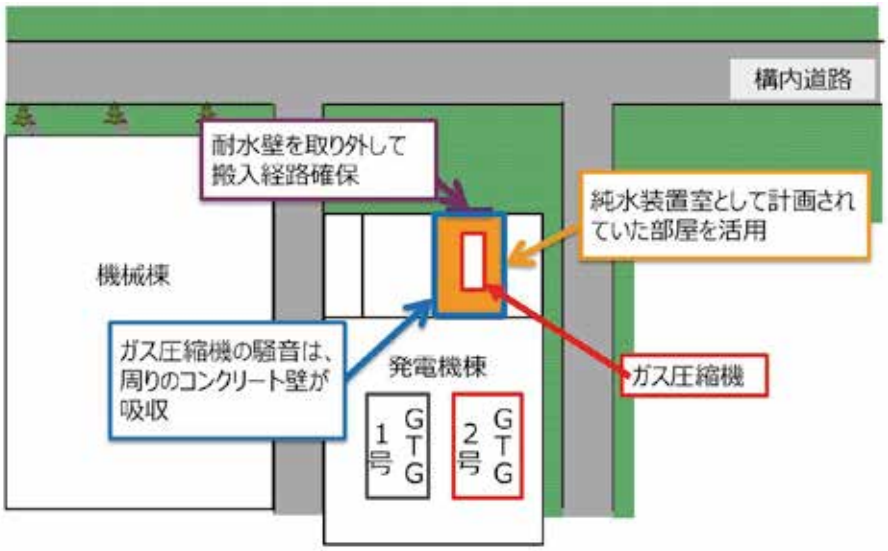


図 4　発電機棟周辺　概略平面図

３．３　建設費用・運転費用についての検討

表 2 に、建設費用と運転費用について、従来当局に導入している灯油型との比較表を示す。灯油型にはないガス圧縮機等機器が増え、灯油・都市ガス併用型の建設費用は従来の灯油型より 20%程度増加する。

運転費用については、都市ガスで運転した方が、灯油のみで運転した場合よりコスト増になる。これは、燃料費や燃料消費率について、灯油の方が有利なためである。今回設置した発電機では、1kW 当たりの燃料単価は、灯油が 21.4 円/kW であるのに対し、都市ガスは 35.8 円/kW と、灯油の約 1.6 倍程度の単価となった。

設置の目的が非常時における燃料の多様化であるため、本件では、通常は灯油運用とし、燃料の供給が不安定になるなどの緊急時のみガスで運用すると整理した。

表 2　建設費用・運転費用の比較

	灯油型	灯油・都市ガス併用型
建設費用	1	1.2
運転費用	1 （灯油 120 分運転）	1.6 （灯油 30 分+ガス 90 分運転）

（※運転費用は 2016 年 12 月現在の小売価格で比較）

４．まとめ

灯油・都市ガス併用型非常用発電設備は、従来方式の発電機と比較し、灯油に加えて都市ガスでの運用が可能となり、災害時における電源確保の信頼性が向上する。

東京都下水道局初となる灯油・都市ガス併用型非常用発電機は、平成 28 年 9 月から中川水再生センターで稼働している。

今後は、平成 30 年度に中野水再生センター、葛西水再生センターで導入を予定している。

2-1-1　亜硝酸蓄積型硝化の発生原因と対策

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

1　はじめに

芝浦水再生センター（以下、当センター）では、反応タンクへの BOD および窒素の負荷量が高いため、低水温期には、処理水の亜硝酸濃度が上昇する亜硝酸蓄積型硝化がしばしば発生する。亜硝酸蓄積型硝化は、ひとたび発生すると正常な硝化に回復させるまでに期間を要し、N_2O 発生量の増大や処理水質の悪化が著しくなる。また、当センターでは、放線菌による異常発泡の原因ともなっている*1。亜硝酸蓄積型硝化の予防には硝化に必要な ASRT を確保することが重要であるが、発生を確認したときから正常な硝化に回復させるまでの最適な運転方法については不明な点も少なくない。

本報では、当センターでの最近の発生事例から発生の原因を推定するとともに、その対応について紹介する。

2　亜硝酸蓄積型硝化の特徴

亜硝酸蓄積型硝化には長所と短所が知られている。その主なものを表 1 にまとめた。

表 1　亜硝酸蓄積型硝化の長所と短所

長　　所	窒素除去が向上
	ばっ気風量が減少
短　　所	処理水質が悪化（ＣＯＤ，りん、濁度）
	N_2Oの発生が急増
	放線菌による異常発泡

NO_2-N は比較的脱窒しやすい成分であることから、亜硝酸蓄積型硝化では、蓄積した NO_2-N の一部が反応タンクおよび最終沈殿池で脱窒して窒素除去率の向上やばっ気風量の減少が認められる。このため、処理水窒素濃度の改善と省エネルギーの両立が可能であるが、一方で、NO_2-N に起因する COD の上昇やりん吸収速度の低下に伴う処理水りん濃度の上昇など水質の悪化が著しくなり、かつ、N_2O の発生が極端に増大するなど短所の方が大きい。また、当センターでは、低水温期に放線菌の増殖による異常発泡が問題となっているが、NO_2-N が蓄積し始めると放線菌の増殖が活発になる傾向があることから亜硝酸蓄積型硝化の発生を防ぐこと、発生した場合には早期に回復させることが重要である。

3　調査施設の概要

当センターは合流式下水道で、処理区内の多くがオフィス街で占められているので、休日に比べて平日には流入水量が増大し、かつ、流入水の窒素濃度も高くなる。このため、反応タンクへの窒素の負荷量は休日に比べて平日は 4 割程度多くなる。当センターの水処理施設は 5 系列に分かれそれぞれ運転条件が異なる。各系列の状況を表 2 にまとめた。

表 2　各系列の概要と平成 27 年度の運転実績（年度平均値）

	深槽東系	深槽西系	浅槽系	西系	東系
処理方式	AO法	AO法	疑似AO法	疑似AO法	AO法
水量変動	変動あり	変動あり	ほぼ一定	ほぼ一定	変動あり
反応タンクの形状（長さ、幅、水深:m） 回路数	91×9.1×10.2×2	91×9.1×10.2×2	80×6.7×4.1×4	65×13.5×10×1	65×9×11.2×2
有効容積 （m^3） 池数	16,890　３池	16,890　３池	8,790　６池	11,260　２池	13,100　３池
散気設備	散気板	散気板	散気筒	散気板	メンブレン
風量制御方式 注	前半：DO制御 後半：DO制御	前半：DO制御 後半：DO制御	前半：一定、 後半：DO制御	DO制御	前半：NOx-N計 後半：アンモニア計
散気水深 （m）	4.0	4.0	3.6	4.0	5.5
反応槽滞留時間 （h）	7.6	8.6	9.5	9.1	9.4
BOD容積負荷（kg/m^3/日）	0.48	0.42	0.38	0.37	0.33
窒素容積負荷（kg/m^3/日）	0.13	0.11	0.10	0.12	0.11
MLSS （mg/L）	2,410	2,550	2,210	2,350	2,610
ASRT （日）	6.5	7.0	9.3	6.7	7.3
処理水1m^3当たりの風量（Nm^3/m^3）	7.6	8.4	9.6	9.0	4.9
汚泥返送比	0.40	0.47	0.45	0.53	0.50

注：西系以外は反応タンク前半と後半で送風量を別々に制御。

反応タンクへの負荷が高いため、各系列ともに高めの MLSS で ASRT を長くした運転を行っている。しかし、低水温期には硝化に必要な ASRT が 5 日程度（1.35×11.0exp(-0.0525T)で計算）*2であるのに対して、一時的にはこれを下回ることもある。特に、深槽東系および深槽西系は比較的負荷が高いうえに水量変動も大きいため NO_2-N が蓄積しやすい。

4　最近の発生事例

4.1　深槽西系（平成 28 年 3 月発生）の場合の原因と対応

表 2 に示したように深槽西系と深槽東系は反応タンクの構造が同じであり、処理状況も概ね同一である。深槽西系での亜硝酸蓄積型硝化の発生前後の期間について反応タンク出口の形態別窒素濃度、ASRT の推移を図 1 に示す。比較として同時期の深槽西系の状況を図 2 に示す。なお、ASRT の計算には、両系列にそれぞれ設置されている MLSS 計と返送汚泥濃度計の日平均値を用いた。

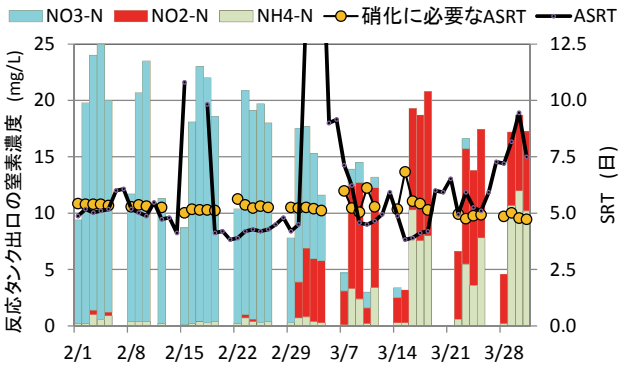


図 1　亜硝酸蓄積型硝化の発生状況（深槽西系）

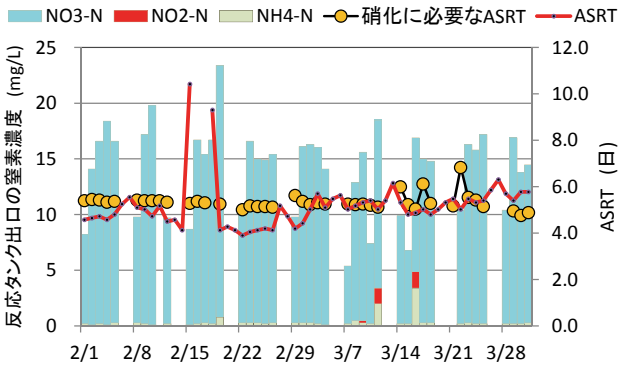


図 2　発生しなかった系列の状況（深槽東系）

2 月中旬に余剰汚泥配管の改良工事のため 78 時間ほど両系列の余剰汚泥の引抜が停止となった。工事終了後に貯まった活性汚泥を系外に排除するため余剰汚泥引抜量を増大させたことから 10 日間ほど硝化に必要な ASRT よりも短い ASRT となった。これが深槽西系での亜硝酸蓄積型硝化の発現の原因と考えられるが、同様の運転を行っていた深槽東系では正常な硝化を維持できていたことから、わずかな運転条件の差が亜硝酸蓄積型硝化の発現を左右したと考えられる。

深槽西系において NO_2-N の蓄積を確認（3 月 1 日）してから余剰汚泥引抜を停止し、硝化細菌の減少を防ぐ措置を行ったが NO_2-N の蓄積を抑えることができなかった。このことから、NO_2-N の蓄積を確認してからの余剰汚泥量の調整では手遅れといえる。

それ以降は高い MLSS で風量を抑える運転により NO_2-N の蓄積を抑えつつ水温の上昇による NO_3-N の生成を待ったが、水温が 25℃にまで上昇したにかかわらず正常な硝化に回復しなかったので、浅槽系の正常な余剰汚泥の一部を転送して正常化を図った。この時の汚泥転送による固形物投入量は、系内の汚泥量に対して 1 日当たり 5%程度であった。浅槽系からの汚泥転送を開始してからの反応タンク出口の形態別窒素濃度の推移および深槽西系からの余剰汚泥量の推移を図 3 に示す。

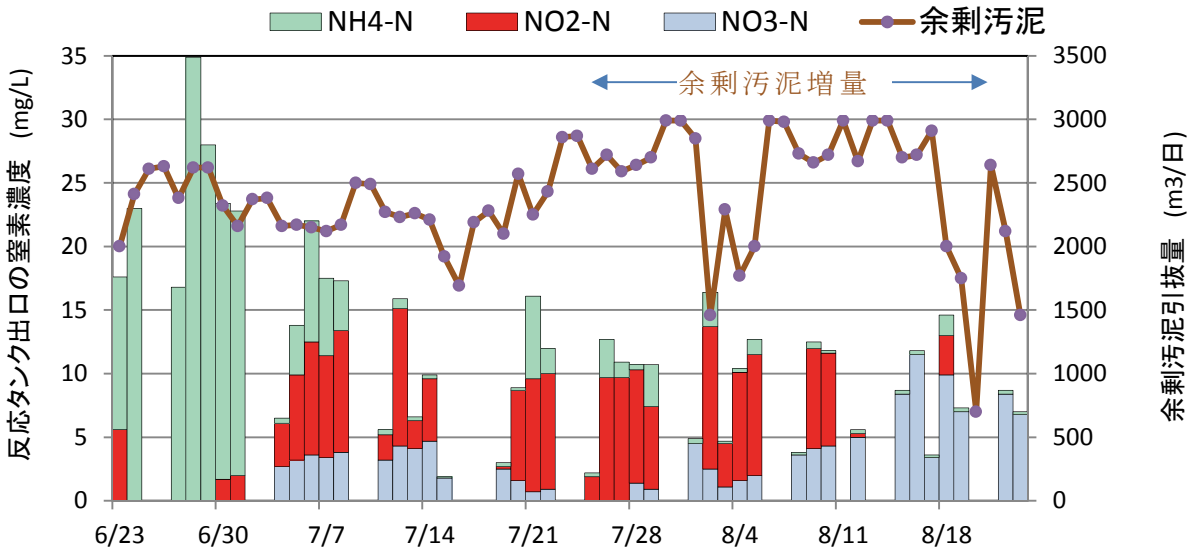


図 3　余剰汚泥引抜量と反応タンク出口の窒素の挙動（回復期）

汚泥の転送効果により 7 月上旬に反応タンク出口の NO_3-N 濃度が 5mg/L 近くまで一端は上昇したが、その後は NO_3-N が消滅していった。このときの水温は 27～28℃で硝化細菌の増殖には十分な水温と ASRT であったことから、亜硝酸酸化細菌（以下 NOB）の増殖に何らかの障害があると考えられた。そこで、原因の確認のため好気タンク内での窒素の挙動を 27 年度の同月と比較した（図 4 および図 5）。

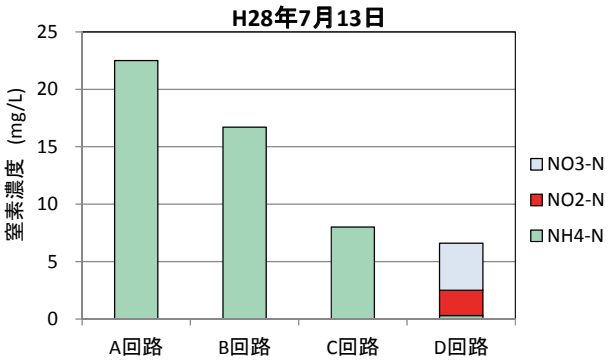


図 4　反応タンク内の窒素の挙動
（亜硝酸蓄積型）

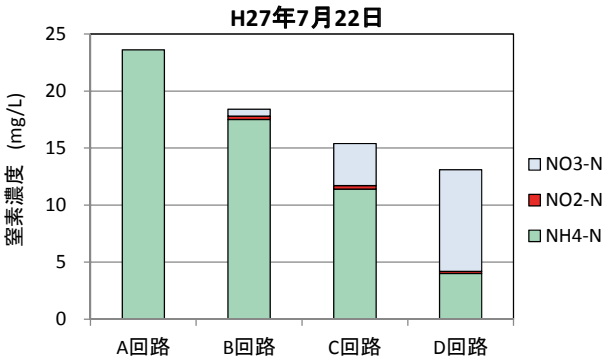


図 5　反応タンク内の窒素の挙動
（正常な硝化）

正常な硝化のとき（図 5）は B 回路から NO_2-N および NO_3-N が検出されはじめ下流にかけて NO_3-N が増加している。これに対して、亜硝酸蓄積型硝化のとき（図 4）は C 回路まで NO_2-N および NO_3-N が検出されていないが窒素濃度の低下が著しい。反応タンク半ばで NOB の活動に不可欠な NO_2-N が検出されなかったことが、NOB の活動を妨げていたと考えられる。このころは MLSS 濃度を 2,500mg/L 程度と比較的高くし、NO_2-N の蓄積を抑えるため少し風量を少なくしていたのが原因で、反応タンク半ばでは発生した NO_2-N が速やかに脱窒されて NOB が活動できる状況でなかったと考えられる。そこで、余剰汚泥引抜量を増大させ好気タンク内の脱窒を抑えるようにしたところ、MLSS 濃度が 2,000mg/L 程度にまで低下した 8 月上旬にようやく正常な硝化に回復していった。高水温期において NO_3-N の生成がほとんどない場合には、MLSS や好気タンクの前半と後半の風量の調節により、好気タンク前半から NO_2-N が検出される状況を作り出すことが有効と考えられる。

4.2　深槽東系（平成 28 年 12 月発生）の場合の原因と対応

深槽東系は図 2 で示したように 27 年度には亜硝酸蓄積型硝化が発生しなかったが、28 年 12 月下旬から NO_2-N の蓄積が見られるようになった（図 6）。水温は 21℃程度とまだ少し高い時期で ASRT は 6 日で硝化に必要な 5 日以上を維持していた。ここでの発生原因は、好気タンク内での脱窒促進のため少し風量を少なくしていたことと考えられる。一方、風量の不足により NH_4-N が通年残留している状況で NO_2-N の蓄積が発生しない施設もある。その例を図 7 に示す。

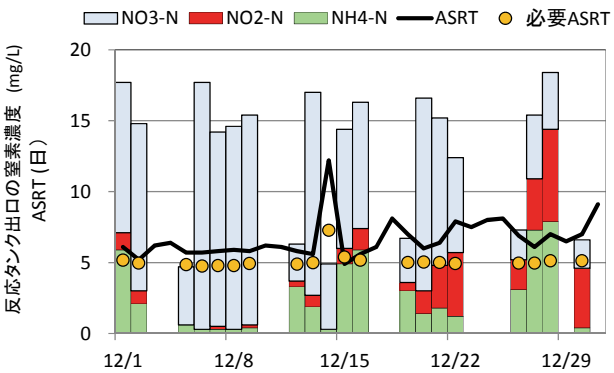


図 6　亜硝酸蓄積型硝化の発生状況（深槽東系）

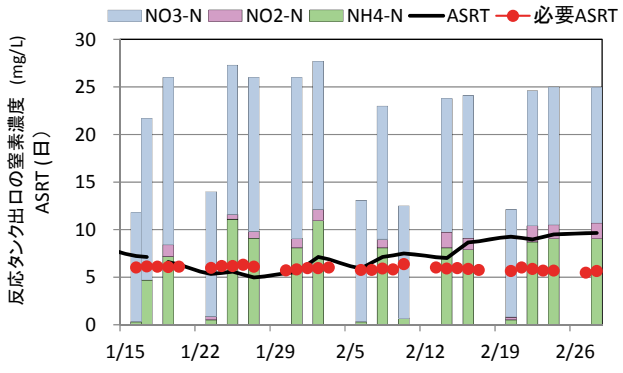


図 7　発生しなかった系列の状況（西系）

西系は、水量一定での DO 制御による運転であるが、風量の上限が必要風量よりも少ないため、負荷が高い平日には NH_4-N が常に残留している。しかし、低水温期においても NO_2-N が 2mg/L を超えることはほとんどなく、かつ、NO_3-N 濃度は 15mg/L 程度を維持している。図 7 から 1 月下旬に ASRT が一週間ほど硝化に必要な ASRT を下回っているが亜硝酸の蓄積は見られない。両系列での亜硝酸蓄積の差は、風量の時間変動の有無が原因と考えられる。硝化が安定した系列においても風量を増加させると一時的に好気タンク上流部で NO_2-N が検出されることがある。これは、風量の増大によって NOB に比べてアンモニア酸化細菌（以下 AOB）の方が先に活性が高まるためと考えられる。負荷が高く、硝化を完了させることが難しい施設では、亜硝酸蓄積の予防策として、水量・風量の一定運転がある程度有効であると考えられる。ただし、深槽東系において NO_2-N が蓄積し始めてから風量の変動幅を抑えた運転に切り替えても回復は見られなかった。これについては、後でまた触れるが、先に述べた ASRT 管理の場合と同様、風量などの運転条件についても予防的な措置が重要といえる。

深槽東系で NO_2-N の蓄積が確認されたので、正常な硝化に回復させる方法を検討した。運転変更として風量や余剰汚泥の引抜量の調整などを実施し、運転変更による硝化細菌の活性の変化を確認した。ここで、硝化細菌の活性については、嫌気タンクから活性汚泥混合液を採取し、1～6 時間ばっ気して NO_2-N および NO_3-N 濃度の上昇から AOB と NOB それぞれの活性の変化を把握した。その結果を図 8 に、また、この期間の運転変更の内容とその時の硝化細菌の活性の変化を表 3 にまとめた。

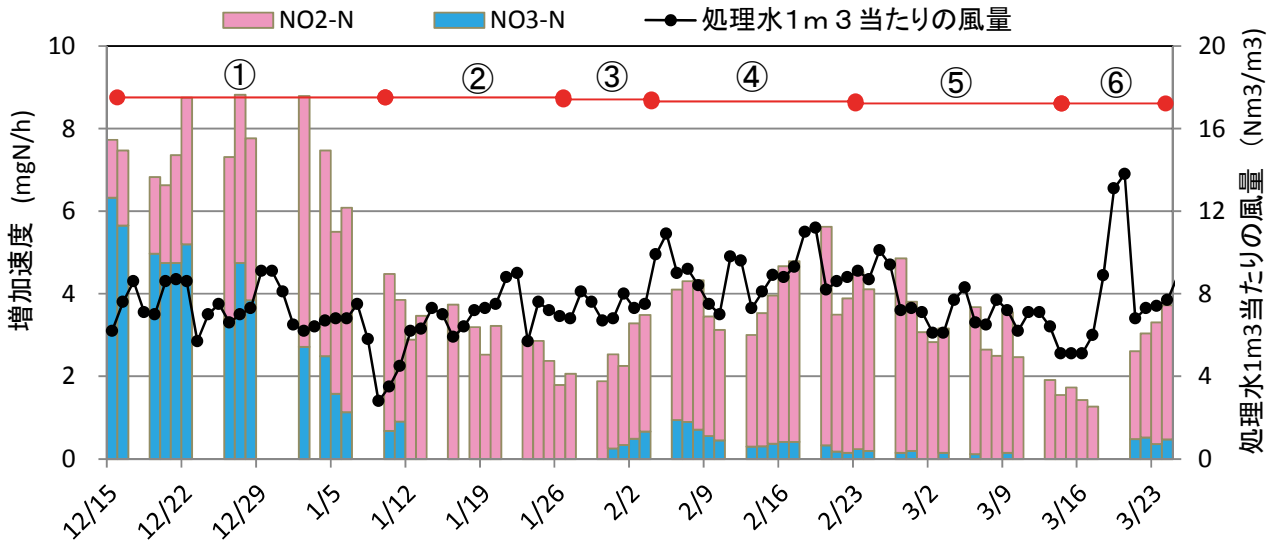


図 8　処理水１ｍ^{3}当たりの風量と NO_2-N および NO_3-N 増加速度の推移

表 3　運転変更と硝化細菌の活性

	期　間	運転変更の目的と内容	硝化細菌の活性
①	12 月中旬～ 1 月中旬	風量の変動幅を縮小 風量の上限値を下げる	NOB の活性：低下 AOB の活性：変わらず
②	1 月中旬～ 1 月下旬	汚泥転送準備（MLSS 低下） ＤＯ設定値を上げる 余剰汚泥量を増大	NOB の活性：ゼロ AOB の活性：低下
③	1 月下旬～ 2 月上旬	硝化細菌の増殖促進 汚泥転送、汚泥引抜抑制 DO 設定値を上げる	NOB、AOB：ともに上昇 ただし、 MLSS の上昇により 7 日間程度が限界
④	2 月上旬～ 2 月中旬	風量を増減させて状況を確認 汚泥転送停止 風量を段階的に増減	風量低下時 NOB と AOB の活性：低下 風量上昇時 NOB の活性：変化ない AOB の活性：上昇
⑤	2 月中旬～ 3 月中旬	汚泥転送の準備（再度） 余剰汚泥量を増大 風量を少しずつ低下	NOB の活性：ゼロ AOB の活性：低下
⑥	3 月中旬～ 3 月下旬	硝化細菌の増殖促進（再度） 汚泥転送、汚泥引抜抑制 DO 設定値上昇	NOB の活性：変わらず AOB の活性：上昇

12 月中旬に反応タンク出口の NO_2-N が 1mg/L を超えたので風量の上限値を下げて風量の振れ幅を小さくして硝化細菌の活性の推移を確認した。これまでの経験から、亜硝酸蓄積型硝化の初期に風量を増大させると NO_2-N が急速に上昇し、水質の悪化が著しくなるので、ここでは風量をやや少なくして様子を見ることとした。この間、NO_3-N の増加速度が少しずつ低下してその分 NO_2-N の増加速度が上昇し、両者の合計では大きな変化がないことから、AOB の活性に大きな変化はなく、NOB の活性が低下していったと判断される。

1 月下旬から一週間ほど正常な硝化に回復させるため汚泥転送を行い、余剰汚泥引抜量を少量とした。NO_3-N の増加速度は少しずつ上昇し 1mg/L/h に達したが、MLSS の上昇により汚泥転送を中断して余剰汚泥量を通常量に戻すと NO_3-N 増加速度は低下していった。この結果から、水温が最も低くなるこの時期には系内での NOB の増殖が弱く、処理水量を削減するなどにより反応タンクへの負荷量を下げない限り正常な硝化への回復は難しいと判断される。

2 月の中旬から下旬にかけては、汚泥転送なしで、風量の増減に対する NOB と AOB への影響を確認した。その結果、風量を下げると NOB と AOB ともに活性が低下し、風量を上げると AOB の活性だけが上昇する傾向が見られた。

つづいて、水温が少し上昇する 3 月中旬に、再度、汚泥転送による回復を試みた。今度は前回に比べて風量を少し多めにして NOB の活性を高めるようにしたが、NOB の活性に変化はなく AOB の活性のみが上昇した。この結果の理由を調べるために、亜硝酸蓄積型硝化の活性汚泥混合液を採取して、ばっ気時間に対する形態別窒素の挙動を調べるとともに、反応タンク内での窒素の挙動を確認した。その結果を図 9 および図 10 に示す。

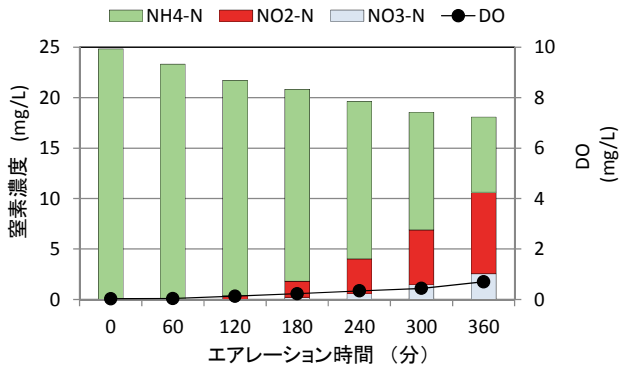


図 9　亜硝酸蓄積型硝化汚泥をばっ気

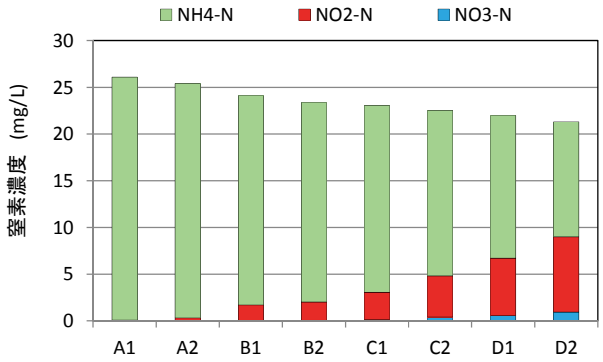


図 10　反応タンク内の窒素の挙動

活性汚泥混合液をばっ気すると少しずつであるが NO_3-N の増加がみられる。図 9 では示していないが、翌日までばっ気を続けると NO_3-N が 9mg/L まで上昇していたことから、好気処理を長く続ければ NOB の活性は上がってくると考えられる。ばっ気時間によって少しずつ NO_3-N が増える傾向は図 10 の反応タンク内での窒素の挙動とも一致している。しかしながら、3 月中旬から 3 月下旬にかけてはこれを意識して汚泥転送に加えて、DO 設定値を少し高めにしてこれまでよりも多めに空気が入るようにした結果、図 8 および表 3 に示したように AOB の活性は上がったが、NOB の活性は変わらなかった。図 9 および図 10 でばっ気によって少しずつであるが NO_3-N が上昇していくことが示されたにもかかわらず、AOB の活性だけが上がった理由として、両者の増殖速度の差が考えられるが、そのほかに、増殖した硝化細菌の一部が処理水の濁り成分とともに排出されているためと推察される。処理水に硝化細菌が含まれていることは広く知られている。これは処理水の NH4-N 濃度が高くなると硝化に伴う酸素消費によって BOD が高くなることからも確認できる。ここで、処理水の NBOD と NH_4-N 濃度および SS 濃度の関係を図 11 に示す。

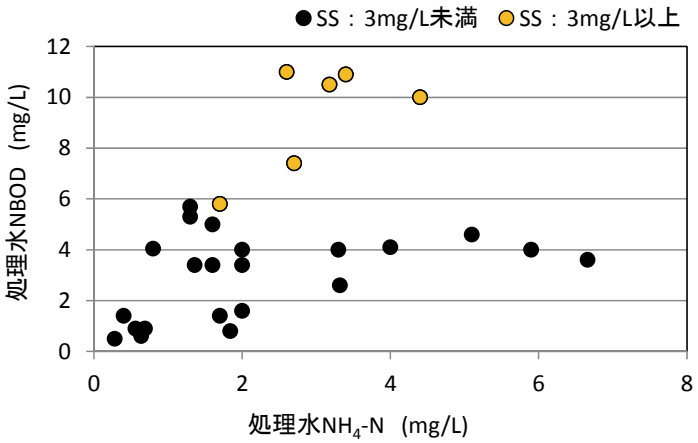


図 11　処理水の NH_4-N と NBOD の関係

図 11 では、処理水の NH4-N 濃度が高くなると NBOD が高くなっている様子がうかがえる。処理水の SS が 3mg/L 未満の時とそれ以上の時で分類すると、NH_4-N が同レベルの濃度のとき SS が高い処理水の NBOD が高くなっている傾向がみられる。このことから硝化細菌が SS とともに処理水に含まれ排出されているといえる。亜硝酸蓄積型硝化の状態では、風量を増やすと NO_2-N 濃度が高くなるとともに処理水の濁りもやや高くなる傾向があることから、反応タンク内で増殖した硝化細菌（特に、NOB）が SS 成分に付着した状態で処理水とともに流出してしまうため系内の NOB の活性が上がらなかったのではと考えられる。水温の上昇により NOB の増殖速度が高まり、流出量を上回る速度で NOB が増殖し始めると正常な硝化に回復すると考えられる。

５　まとめ

亜硝酸蓄積型硝化の抑制には、ASRT と風量の管理が重要であるが、負荷が高く NH_4-N が残留する施設でも水量と風量の一定運転により亜硝酸の蓄積が少しは抑制できることが示唆された。また、亜硝酸の蓄積を確認してから ASRT の延長や風量の調節を行っても回復させることは難しく、予防策が重要である。

正常な硝化に回復させるには、ASRT を延ばすことが有効と考えられるが、BOD 負荷が高い施設では、好気槽内での脱窒により生成した NO_2-N が速やかに脱窒して、高水温期でも NOB の活性が上がらないこともある。この場合は、余剰汚泥の引抜量を増大させ好気槽内での脱窒を抑制することで正常な硝化に回復させることができた。

低水温期に、正常な硝化に回復させようと風量を増大させると AOB の活性のみが上昇して、NOB の活性が上がらなかった。風量を増大させると処理水の濁りが増すことから、増殖した NOB の一部が SS に含まれて流出して NOB の活性が上がらなかったと推察される。

参考文献

＊１　葛西ら　「放線菌による異常発泡抑制策」　東京都下水道局技術調査年報 2016
＊２　「下水道施設計画・設計指針と解説（2009 年版)」

2-1-2　東京都流域下水道における高度処理施設の実態調査による最適な運転条件の考察

流域下水道本部技術部　施設管理課　和光　一紀（現　水道局長沢浄水場）
伊藤喜代志　森谷　典子　藤井杏夕子（現　水道局多摩水道改革推進本部）福田　宗昭

1　はじめに

流域下水道本部では、多摩川等での良好な水環境の創出を目的に、各水再生センターへ高度処理の導入を進めており、平成 27 年度末における準高度処理と高度処理を合わせた処理能力の割合は 59%まで上昇している。ここで、高度処理の導入には、工事に際しての多額の費用の発生や、電力使用量の増加に伴う維持管理費の増大等の課題があることから、期待された効果が得られていることの事後検証を行うことが重要となる。しかしながら、流域下水道本部では、これまでにステップ A_2O 法（以下、S-A_2O 法）の性能評価等、一部について実施してきた経緯があるものの、高度処理施設全体を対象とした総括的な実態調査は実施していない。

そこで、多摩地区の 7 水再生センターにおける A_2O 法及び S-A_2O 法施設について、運転条件や処理水質の実態を調査することで、主に窒素・りんの処理性の観点から高度処理の導入効果を明確化することを試みた。

2　調査概要

2.1　調査対象施設

表 1 に示す施設を対象として調査を実施した。なお、改築工事等により運転実績が無いなどの理由で、一部施設については調査対象外としている。

表 1　調査対象施設　　※平成 25 年 10 月時点

センター	系列	処理法※	センター	系列	処理法※	センター	系列	処理法※
北多摩一号（北一）	3 系	標準法	北多摩二号（北二）	1 系	S-A_2O 法	八王子	1 系	標準法
	4-1 系	A_2O 法		3 系	(準)A_2O 法		2 系	標準法
	4-2 系	A_2O 法	浅川	1 系	標準法		3 系	A_2O 法
	5 系	S-A_2O 法		2 系	標準法		4 系	S-A_2O 法
南多摩	3 系	S-A_2O 法		3 系	A_2O 法	清瀬	1-1 系	A_2O 法
	4 系	標準法	多摩川上流（多摩上）	1 系	S-A_2O 法		1-2 系	S-A_2O 法
	5 系	A_2O 法		2 系	標準法		3 系	標準法
	6 系	S-A_2O 法		4 系	A_2O 法		4-2 系	S-A_2O 法

2.2 調査内容

2.2.1　高度処理施設の実態調査

処理状況に関する過去 3 か年のデータを検証したところ、平成 24 年 11 月から平成 25 年 10 月にかけてが、水質面・エネルギー面で良好と考えられた。このため、当該期間における表 1 の高度処理・標準法施設について、MLSS や HRT 等の運転条件を明確化した上で、窒素・りんの処理性能を検証した。具体的な調査項目を

表 2 調査項目

運転条件	MLSS(mg/L)、汚泥返送比(%)、硝化液循環比(%)、A-HRT(時間)、A-SRT(日)、BOD-SS 負荷(kg/kg-SS/日)、前段ステップ流入比
流入水質特性	BOD/T-N 比、BOD/T-P 比
処理性能	T-N、T-P 除去率(%)、送風量(Nm^3/m^3)

表 2 に示す。ここで、反応槽流入水等の T-N、T-P、BOD 濃度は、毎月の通日試験日における 24 時間コンポジットサンプルを測定した結果、MLSS 等の運転条件に関する項目や送風量は月報上の月平均値である。なお、表 1 の標準法施設は、りんの処理性向上のため、好気槽上流部を、送風量の調節により疑似嫌気槽として運転している（疑似嫌気好気法）。

2.2.2　高度処理施設の改善状況調査

2.2.1 において、処理性能が十分でないと評価した高度処理施設について、平成 27 年 11 月～平成 28 年 8 月の運転条件や処理性能を調査し、その後の改善状況を検証することで、処理性能に影響を与える因子を明確化することを試みた。

2.2.3　S-A_2O 法施設への更新による水質改善効果の検証

北一 3 系水処理施設を、平成 27 年度末に S-A_2O 法に更新した。そこで、当該施設における平成 28 年度の運転条件と処理性能を平成 25 年度と比較し、高度処理導入の効果を検証した。

3 結果と考察

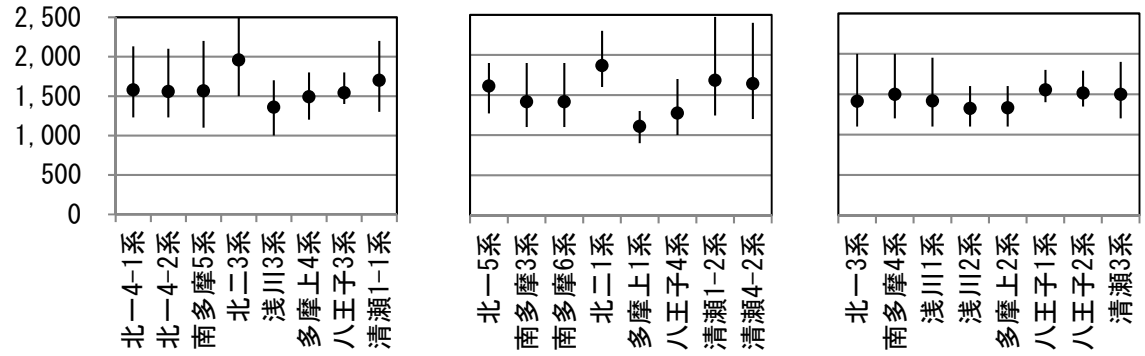
3.1　高度処理施設の実態調査

3.1.1　各施設の運転条件

図 1～図 6 に、MLSS、汚泥返送比 、硝化液循環比、A-HRT、A-SRT、BOD-SS 負荷について、A_2O 法、S-A_2O 法、標準法の順に並べて示す。また、図 7 に、S-A_2O 法施設の処理水量に対する嫌気槽流入水量比率(以下、前段ステップ流入比)を示す。なお、図中の黒丸は期間平均値、上下に伸びる線は期間最大値と期間最小値を示す。

【MLSS(図 1)】

A_2O 法と標準法は､施設ごとのばらつきが小さく､北二 3 系で 2,000mg/L と高かったのを除いて、約 1,500mg/L であった。一方 S-A_2O 法は北二 1 系で約 1,900mg/L と高く、多摩上 1 系で 1,100mg/L と低かった。それらを除くと、A_2O 法等と同様に約 1,500mg/L だった。各処理方法で、最大と最小に幅があったが、これは水温等の外因にあわせて MLSS を変動させているためである。なお、維持管理指針等[(1),(2)]では、標準的な MLSS について、標準法では 1,500～2,000mg/L、A_2O 法及び S-A_2O 法では 2,000～3,000mg/L としており、各水再生センターの MLSS は標準よりも低めとなっていた。



【A_2O 法】　　【S-A_2O 法】　　【標準法】

図 1　各施設の MLSS(mg/L)

【汚泥返送比（図 2)】

A_2O 法では、八王子 3 系で約 20%と低く、北二 3 系と清瀬 1-1 系で約 40%と比較的高かった。その他の施設は約 30%であった。S-A_2O 法は、北一 5 系、南多摩 6 系、八王子 4 系で約 20%と低く、

南多摩 3 系、清瀬 1-2 及び 4-2 系で 40%と比較的高かった。標準法は他の処理法に比べて汚泥返送比が全体的に高く、北一 3 系、南多摩 4 系、浅川 1・2 系で 30%、清瀬 3 系で 40%、その他で 50%だった。汚泥返送比を低くすることでりん処理が安定化するとの知見があり、維持管理指針[(2)]においても、りん処理を考慮した場合、汚泥返送比は 30%～50%とするのが望ましいとしている。各施設の汚泥返送比はおおむねこの範囲内だった。

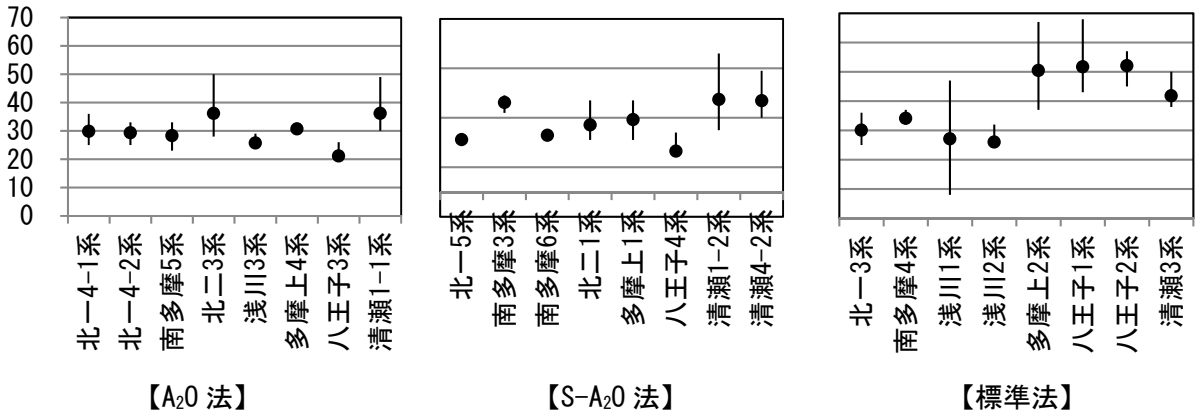


図 2　各施設の汚泥返送比(%)

【硝化液循環比(図 3)】

A_2O 法施設は北二 3 系で約 60%、南多摩 5 系と浅川 3 系で約 80%と高かったが、その他では、硝化液循環を実施しない月があり、循環比の期間平均値は 10～25%と低かった。S-A_2O 法施設では北二で硝化液循環を常時実施していたが、循環比は低く約 10%だった。また、北一 5 系や多摩上 1 系では硝化液循環をほとんど実施していなかった。その他の施設では、循環比の期間平均値は 10%～30%だった。

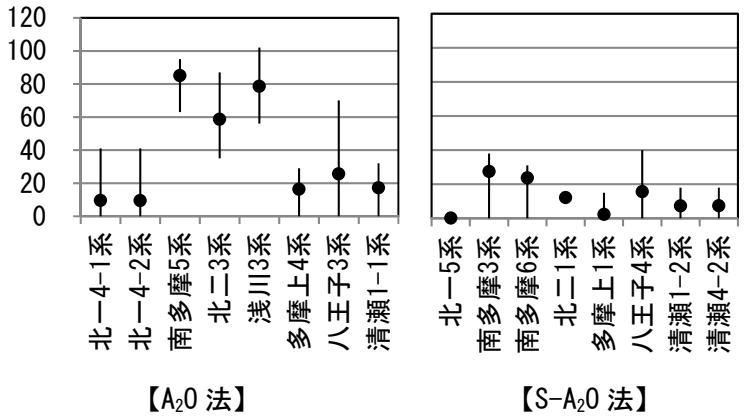


図 3　高度処理施設の硝化液循環比(%)

【A-HRT(図 4)】

A_2O 法では、多摩上 4 系で期間最小値が約 3 時間と短い場合があったが、平均値は各施設で 6～

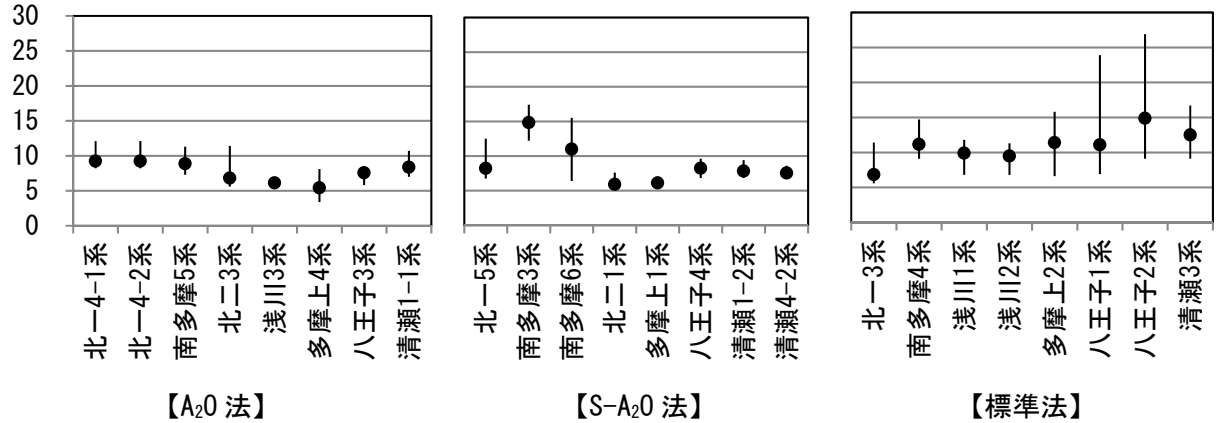


図 4　各施設の A-HRT(時間)

10 時間程度となっていた。S-A_2O 法では南多摩 3 系が約 15 時間、同 6 系が約 11 時間と長かったのを除くと、平均値は A_2O 法と同様、6～10 時間となっていた。標準法は高度処理に比べて全体的に長く、北一 3 系で約 7 時間だったのを除いて、平均値は 10～15 時間だった。

A-HRT については、維持管理指針等[(1),(2)]で、A_2O 法は 4～9 時間、S-A_2O 法は A_2O 法の 85%程度、標準法は 6～8 時間が標準的とされる。各施設の A-HRT は、高度処理では標準的なものが多く、標準法では標準よりも長いものが多かった。また、標準法施設は、高度処理施設に比べて A-HRT の最大と最小の差が大きいものが多く、処理水量の変動が大きいことがうかがえた。各水再生センターでは、高度処理施設を最大限活用するとともに、水量変動時に標準法施設の処理水量を変動させて対応していると考えられた。

【A-SRT(図 5)】

A_2O 法では、浅川 3 系が約 4 日とやや短かったが、それを除いた施設では、平均値が 6～10 日だった。S-A_2O 法では清瀬 1-2 系及び 4-2 系で平均値が約 9 日と比較的長く、逆に多摩上 1 系では平均値が 4 日と短かった。それを除いた施設では平均値が約 6 日だった。高度処理施設で A-SRT の短かった浅川 3 系と多摩上 1 系について、硝化状況を確認したところ、好気槽出口でほぼ完全硝化となっていた(日常試験)。標準法は高度処理に比べて全体的に長く、平均値が 10 日以上の施設が多かった。最も低い北一 3 系でも平均値が約 7 日だった。また、SRT の最大と最小の幅が、高度処理と比較して大きく、HRT の変動に応じて汚泥引抜量を変更している様子が見られた。

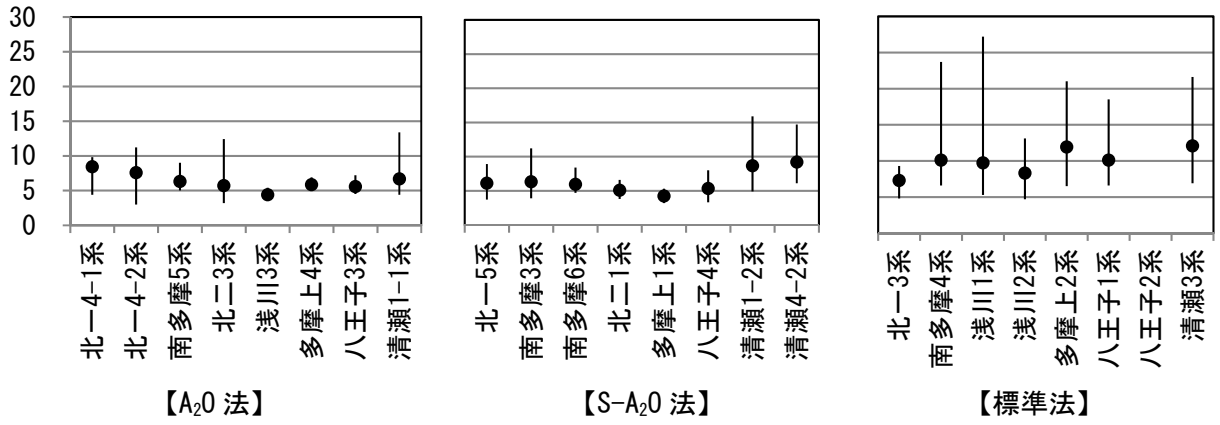


図 5　各施設の A-SRT(日)

【BOD-SS 負荷(図 6)】

A_2O 法では、浅川 3 系で約 0.2(kg/kg-SS/日) だったのを除いて、平均値はおおむね 0.10～0.15(kg/kg-SS/日)であった。S-A_2O 法では、北一 5 系及び多摩上 1 系で 0.20(kg/kg-SS/日)以上だった

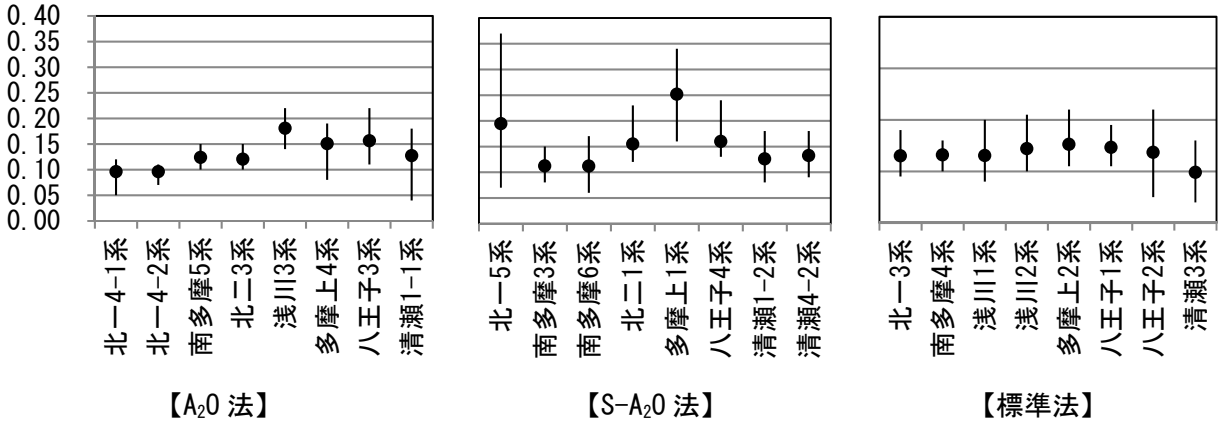


図 6　各施設の BOD-SS 負荷(kg/kg-SS/日)

のを除いて、A_2O 法と同様に平均値はおおむね 0.10～0.15(kg/kg-SS/日)であった。標準法は施設ごとの差が小さく、高度処理と同様に平均値が 0.10～0.15(kg/kg-SS/日)であった。維持管理指針等[1),(2)]には、良好なりん処理性が得られている施設の BOD-SS 負荷は、0.1～0.4(kg/kg-SS/日)であることが多いとあるが、各施設の BOD-SS 負荷はおおむねこの範囲に収まっていた。

【前段ステップ流入比(図 7)】

ステップ A_2O 法では、前段ステップ流入比が窒素やりんの処理性に影響を与える[3)]。図 7 にステップ A_2O 法施設の前段ステップ流入比をまとめた。多くの施設では 0.5～0.6 だったが、北二 1 系、多摩上 1 系及び八王子 4 系では平均で 0.7 程度と高めで運転されていた。

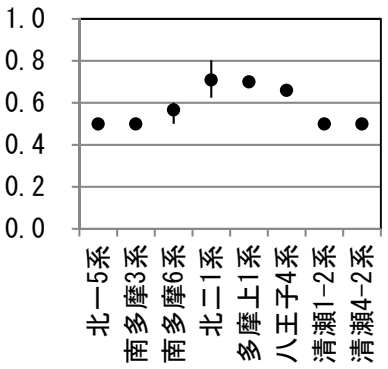


図 7　S-A_2O 法前段ステップ流入比

3.1.2　流入水質特性

窒素やりんの処理性には、反応槽流入水の BOD 濃度と T-N 濃度の比(BOD/T-N 比)と、BOD 濃度と T-P 濃度の比(BOD/T-P 比)が強く影響することが知られている。各水再生センター反応槽流入水の BOD/T-N 比、BOD/T-P 比を図 8 に示す。BOD/T-N 比の平均値は、多摩上が 4.5 と最も高く、北二、清瀬でも 4.0 以上と他と比べて高かった。その他のセンターは、3.5 程度となっていた。BOD/T-P 比の平均値は、清瀬が 37 と最も高く、その他のセンターはすべて 30 前後であった。維持管理指針等[1),(2)]では、良好な窒素・りん処理の条件として、BOD/T-N 比 3.0 以上、BOD/T-P 比 20 以上としている。各センターの反応槽流入水質は、この条件を満たしていた。

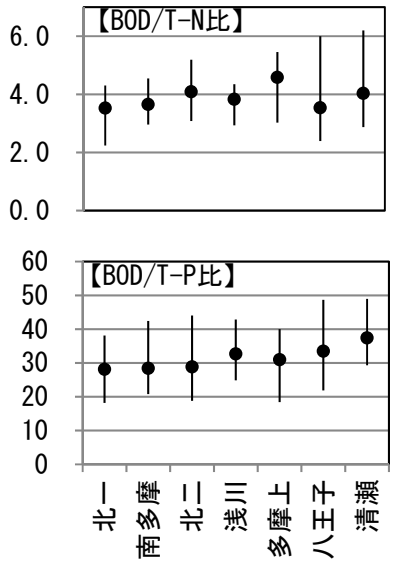


図 8　各センターの流入水質特性

3.1.3　窒素・りんの処理性

反応槽流入水の T-N 濃度に対する除去率を横軸に、同 T-P 濃度に対する除去率を縦軸にとったグラフを、A_2O 法、S-A_2O、標準法の順に、図 9～11 に示す。なお、維持管理指針等[1),(2)]を参考に、高度処理施設に求める除去率を、T-N について 60%以上、T-P については 80%以上とした。また、各施設の処理性の良否を明確にするため、同除去率の交差する点を中心に、グラフを 4 分割した。これにより、グラフ右上の領域に位置するものは T-N、T-P ともに除去率が良好な施設、左下の領域に位置するものは T-N、T-P ともに求める除去率が得られていない施設であることが明確になる。

(1)　A_2O 法の処理性能(図 9)

T-N 除去率については、北一 4 系や八王子 3 系で 60%を下回り、期待される除去率が得られていなかった。これら施設で除去率が低かったのは、硝化液循環を少量かつ間欠で実施していたことが要因である。特に北一では硝化液循環をほとんど実施しておらず、平均循環比は 10%程度だった。また、同反応槽へは、平成 24 年 11 月～平成 25 年 2 月に、りん処理安定化の目的で

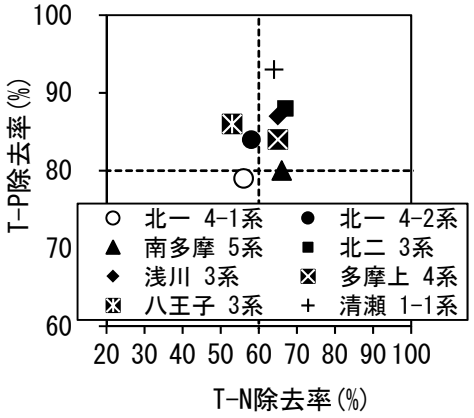


図 9 A_2O 法施設の T-N 及び T-P 除去率

重力濃縮汚泥を連続投入しており(投入量は最大で流入水量の 1%程度)、これが窒素の処理性に影響を与えていた可能性もある。一方、流入水の BOD/T-N が 4 以上と高かった多摩上 4 系や清瀬 1-1 系では、硝化液循環比が 20%と低かったものの、60%以上の T-N 除去率が得られていた。

T-P 除去率については、BOD-SS 負荷が低かった北一 4 系で 79%と 80%をわずかに下回ったものの、その他の施設では 80%以上となっており、おおむね良好だった。特に、BOD/TP 比が 37 と高かった清瀬 1-1 系では、除去率が 90%を上回った。なお、上述のとおり、北一 4 系では、重力濃縮汚泥の連続投入を行っていたが、りんの処理性への影響は図 9 からは判断できない。

(2) S-A_2O 法の処理性能(図 10)

S-A_2O 法では、全体的に硝化液循環比が低かったものの、すべての施設で 70%以上の T-N 除去率が得られていた。当処理法は、第一好気槽で硝化した NOx を、第二無酸素槽で脱窒することが主な窒素処理過程であることから、A-HRT や A-SRT を適正に保ち、良好な硝化状況を維持すれば、硝化液循環に依らず高い T-N 除去率が得られる。この点が、各施設で T-N 除去率が高かった要因と考える。

T-P 除去率については、前段ステップ流入比が高い北二 1 系と BOD/T-P 比の高い清瀬 1-2 系で 90%以上だった。一方で、南多摩 3 系、6 系及び多摩上 1 系では、80%を明確に下回った。南多摩の 3 系及び 6 系では、A-HRT が 10 時間以上と長く、BOD-SS 負荷が他の施設と比べて低かった。また、南多摩 3 系では、汚泥返送比が 40%と比較的高い一方で、前段ステップ流入比が 0.5 と低かった。これらが両施設において T-P 除去率が低かった要因と考える。

一方、多摩上 1 系は、運転条件からは T-P 除去率が低下する明確な理由が見つからなかったことから、センターにヒアリングを実施した。それによると、調査期間中、第二沈殿池の構造的な問題から微小フロックの巻き上がりが定常的に起こっており、反応槽の処理状況とは無関係に処理水の T-P 濃度が高くなっていたとのことであった。また、その後、第二沈殿池の工事を行い、平成 28 年度には改善しているとのことであった。

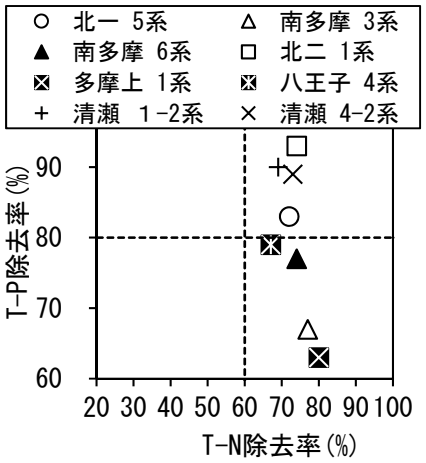


図 10　S-A_2O 法施設の T-N 及び T-P 除去率

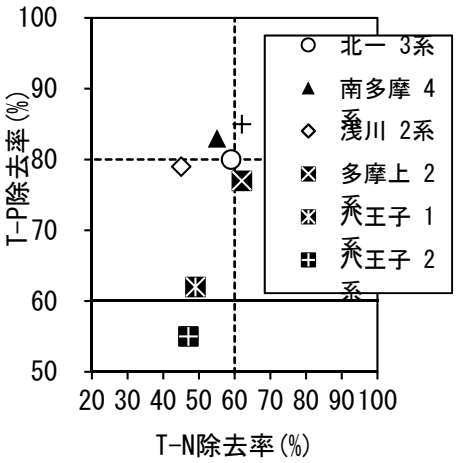


図 11　標準法施設の T-N 及び T-P 除去率

(3) 標準法の処理性能(図 11)

標準法施設(疑似嫌気好気法として運転)では、T-N 除去率が 50～60%の施設が多く、明確に 60%を上回ったのは流入水 BOD/T-N 比が 4 以上の多摩上 2 系と清瀬 3 系のみであった。他自治体の調査報告でも、流入水 BOD/T-N 比が 4 以上の疑似嫌気好気法施設について 60%以上の T-N 除去率が得られており[(4)]、本結果と一致する。

一方、T-P 除去率は、好気槽上流部を疑似嫌気状態として運転していたことから比較的良好で、北一 3 系、南多摩 4 系、清瀬 3 系の 3 施設で除去率 80%以上となっていたほか、浅川 2 系、多摩上 2 系でも 80%近い除去率が得られていた。

なお、八王子 1・2 系では、T-N・T-P ともに除去率が低かった。この原因について、汚泥返送比が高い等の理由で、疑似嫌気槽の嫌気性が弱まっていたことが考えられるが、同槽の送風実態や硝酸性窒素及び PO_4-P 濃度、ORP 等が不明のため、詳細はわからない。

3.1.4　送風量の比較

高度処理では、窒素処理のために硝化液循環を行うことから、循環ポンプの電力分、使用電力が増加する。一方で、高度処理への更新に伴って散気設備が高性能なものに更新されることから、処理に必要な送風量は減少すると考えられる。また、硝化液循環の実施によって送風量が低減されるという報告[5]もある。このように、標準法施設を高度処理に改良する場合、従来よりも送風電力量が低下する可能性がある。

図 12 に、各施設の処理水量 1m^3 あたりの送風量(Nm^3/m^3)を示す。なお、図中の年号は散気設備の設置年度である。A_2O 法では、多摩上 4 系で 3.9Nm^3/m^3 と低かったが、その他の施設では平均値が 5.0～6.0Nm^3/m^3 だった。S-A_2O 法は、北一 5 系、北二 1 系、八王子 4 系で約 4.0Nm^3/m^3 と低く、そのほかの施設では A_2O 法と同様、平均値が 5.0～6.0Nm^3/m^3 程度だった。標準法は高度処理に比べて全体的に高く、多摩上 2 系や清瀬 3 系では約 8.0Nm^3/m^3 と特に高かった。その他の施設では平均値が 6.0～7.0Nm^3/m^3 だった。散気設備は、高度処理系列では、気孔径 300μm 以下の散気板が主で、多摩上 1 系等の一部にメンブレンが導入されている。一方、標準法施設の散気設備は、気孔径 300μm 以上の散気板または散気筒となっていた。特に送風量の多かった多摩上 2 系、清瀬 3 系では、気孔径 450μm の散気筒が使用されていた。

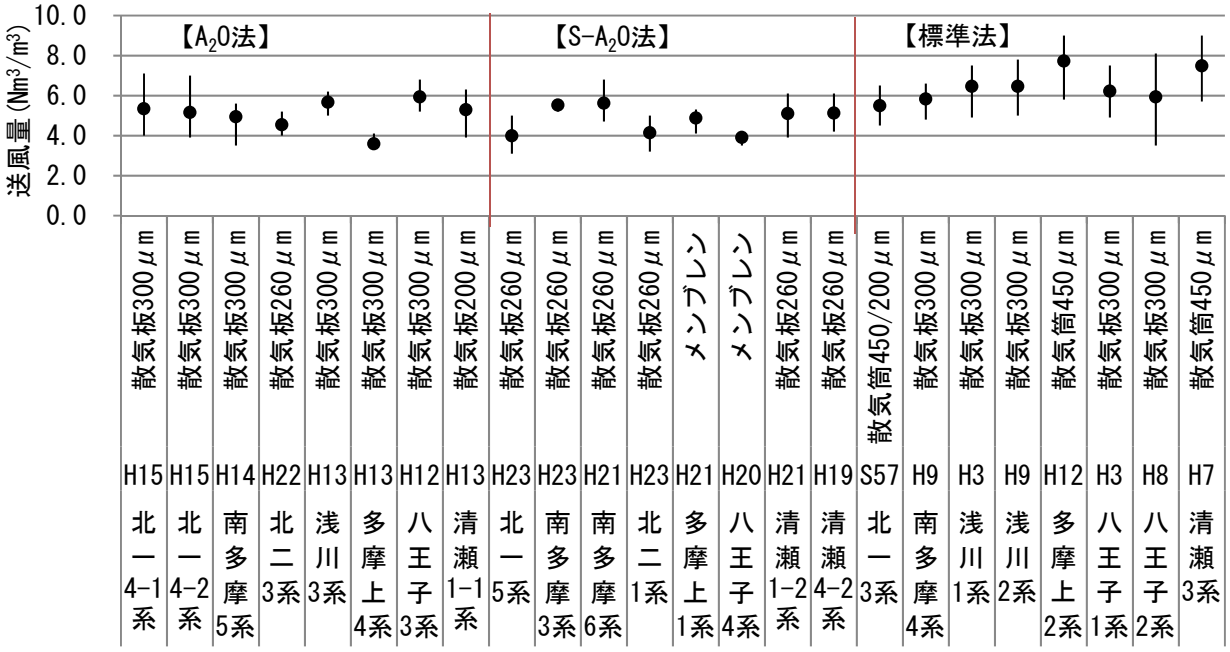


図 12　各施設の散気設備と送風量

図 13 に、散気設備(メンブレンを除く)の気孔径と送風量の関係を示す。図より散気設備の気孔径と送風量には弱い正の相関が認められる。すなわち、散気設備の気孔径が小さくなると、必要な送風量は低下する。また、同図に、標準法における気孔径と送風量についての近似直線を引くと、高度処理の送風量は近似直線よりも下側に分布する。このことは、気孔径同一の条件で、高度処理は標準法に比べて必要な送風量が少ないことを示す。この要因については、HRT の長短や T-N

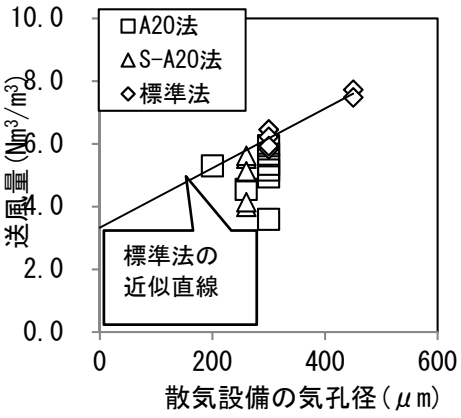


図 13　散気設備の気孔径と送風量

除去率の高低(結合酸素の活用の有無)、散気設備の設置年度等が考えられる。

次に、硝化液循環比と送風量の関係について検証した。図 14、15 に、A_2O 法施設の硝化液循環比と送風量の相関を示す。なお、S-A_2O 法施設については、硝化液循環を実施していないか、実施していても循環比が低いことから、解析を行っていない。

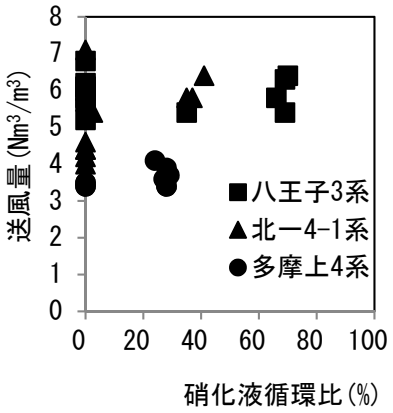


図 14　硝化液循環比と送風量(間欠運転)

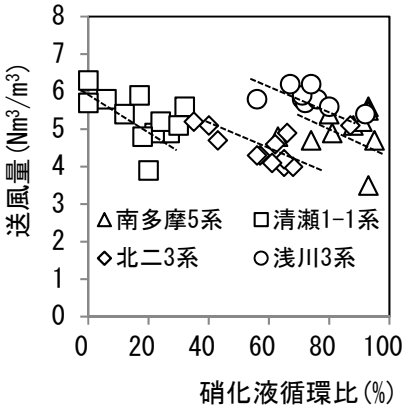


図 15　硝化液循環比と送風量(常時運転)

図 14 は硝化液循環を間欠実施していた施設、図 15 はほぼ常時運転していた施設である。間欠運転していた施設では、送風量と硝化液循環比の相関が不明確であった一方、常時運転していた施設では、循環比の増加に伴い送風量が低下する傾向がみられた。

上述のように、散気板の更新や硝化液循環の実施により、散気効率の向上や結合酸素の活用等の効果が発揮され、必要送風量が低下する実態が分かった。送風量の低下により送風電力量が削減されると考えられるが、その程度は各施設によってまちまちである。このため、硝化液循環ポンプによる電力量増加と、送風量の低減による送風電力量の低減について精査し、電力量を最適化できるような運転方法を、各施設において模索していくことが重要と考える。

3.2　高度処理施設の改善状況調査

3.1 において、A_2O 法施設は T-N 除去率に、S-A_2O 法施設は T-P 除去率に課題のある施設があった。表 3 に、調査対象とした施設を示す。調査した運転条件や処理性能は、A_2O 法では窒素の処理性、S-A_2O 法ではりんの処理性に関する項目を、表 2 から選択した。なお、平成 24～25 年度と平成 27～28 年度で調査月に整合を図ったこと、平成 28 年度は 8 月までしかデータがないこと、施設によっては、平成 27 年 11 月以降、点検等によって運転を停止している期間があることから、期間①は 3.1 で示した期間と異なっている。

表 3　対象施設及び調査期間

処理方法	センター	系列	期間①	期間②
A_2O 法	北一	4-1 系	H24.11～12，H25.5～8	H27.11～12，H28.5～8
	八王子	3 系	H25.2～8	H28.2～8
S-A_2O 法	南多摩	3 系	H25.1～8	H28.1～8
	南多摩	6 系	H24.11～H25.8	H27.11～H28.8
	多摩上	1 系	H24.11～H25.8	H27.11～H28.8

3.2.1　A_2O 法施設の改善状況

(1)運転条件及び流入水質特性

図 16、17 に、北一 4-1 系及び八王子 3 系についての、表 3 の期間①及び②における各施設の運転条件を示す。

図 16 より、北一 4-1 系は、期間①から②にかけて、硝化液循環比が約 40%上昇する一方、汚泥返送比が約 8%低下した。一方、A-HRT は 2 時間ほど延長して約 12 時間となった。これは、流域下水道水再生センターの A_2O 法施設としてはかなり長い値である。また、反応槽流入水の BOD/T-N 比は 2.8 と低下し、3.0 を下回った。

図 17 より、八王子 3 系では、期間①から②にかけて、硝化液循環比が 15%上昇して 38%に、汚泥返送比は 7%上昇して 27%になった。その他の運転条件には大きな変化がなかった。また、反応槽流入水の BOD/T-N 比にも、大きな変化はなかった。

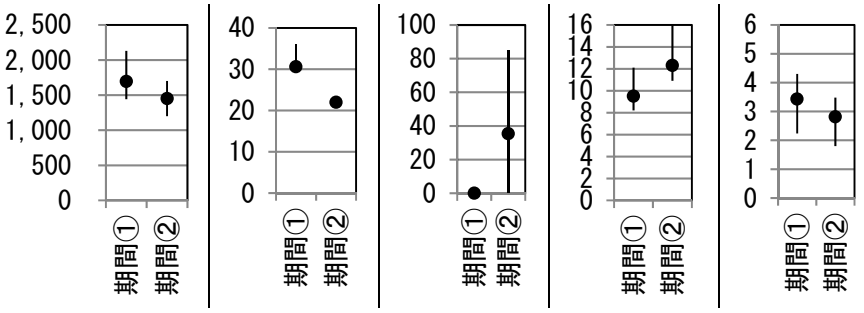


図 16 北一 4-1 系の運転条件及び流入水質特性

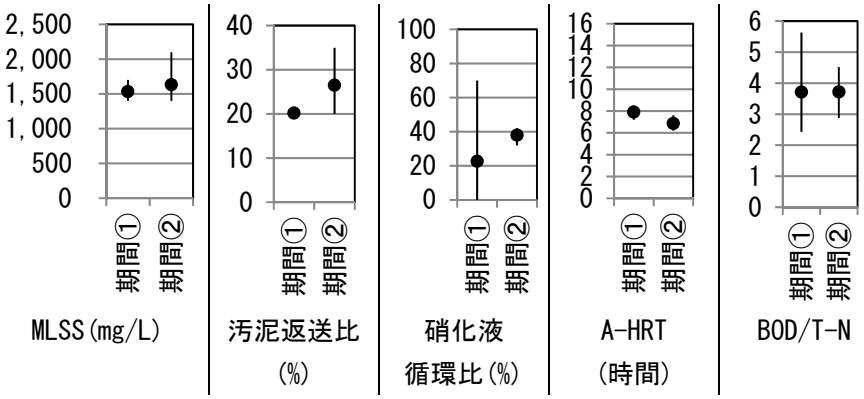


図 17 八王子 3 系の運転条件及び流入水質特性

(2)窒素処理性及び送風量の検証

図 18 に北一 4-1 系及び八王子 3 系の期間①・②における T-N 除去率の平均値を横軸に、T-P 除去率の平均値を縦軸にとった散布図を示す。なお、北一 4-1 系については、平成 27 年 11、12 月及び平成 28 年 7、8 月にも、重力濃縮汚泥の継続的な投入を行っている(投入量は最大で流入水量の 1%程度)。同図に示すように、両施設ともに、期間①から②にかけて T-N 除去率が向上し、おおむね 60%以上となった。また、図 19 に示すように、両施設とも期間①から②にかけて送風量が 10%以上低下した。

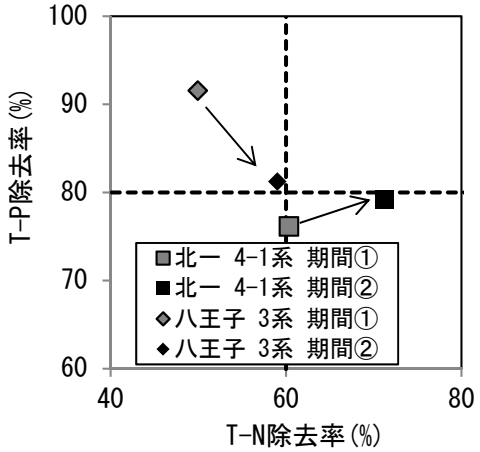


図 18 A_2O 法施設の T-N・T-P 除去率

T-N 除去率が上昇したのは、北一 4-1 系、八王子 3 系とも、硝化液循環比が上昇したことが主要因と考える。特に、北一 4-1 系では、硝化液循環比の平均値が 0%から 35%に上昇した結果、反応槽流入水の BOD/T-N 比が 3.0 を下回る条件でも、約 70%の T-N 除去率が得られるようになった。使用電力量増加の課題があるものの、A_2O 法における硝化液循環の重要性を再確認できた。また、図 19 に見られた送風量の低下については、二軸管理の推進による運転工夫等によるものに加えて、硝化液循環比の向上による効果も含まれると考える。

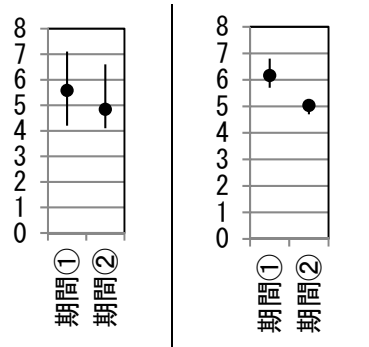


図 19 北一 4-1 系及び八王子 3 系送風量(Nm^3/m^3)

3.2.2 S-A_2O 法施設の改善状況

(1)運転条件及び流入水質特性

前項(1)と同様に、表 3 に示す S-A_2O 法施設の運転条件等を、同表の期間①と②で比較した。図 20～22 に、南多摩 3 系、6 系、多摩上 1 系の運転条件を示す。

南多摩 3 系は、期間①から期間②にかけて、A-HRT が 5 時間程度延長して約 20 時間と極端に長くなり、BOD-SS 負荷

0.1(kg/kg-SS/日)を下回った。一方、その他の運転条件、反応槽流入水の BOD/T-P 比は大きく変わっていなかった。南多摩 6 系では、期間①から期間②にかけて、MLSS が 300mg/L 程度低下して約 1,200mg/L と、流域下水道水再生センターの S-A_2O 法施設としてはやや低い値となった。一方、前段ステップ比は 0.6 から 0.75 に上昇していた。また、その他の運転条件は大きく変わっていなかった。多摩上 1 系では、期間①から期間②にかけて、MLSS が 400mg/L 程度上昇して約 1,500mg/L となり、汚泥返送比は 20%程度上昇して約 50%と高めとなった。また、A-HRT は 2 時間程度延長して約 9 時間となった。一方、BOD-SS 負荷は 0.28 から 0.12 に大きく低下し、BOD/T-P 比も、35 から 28 に低下した。

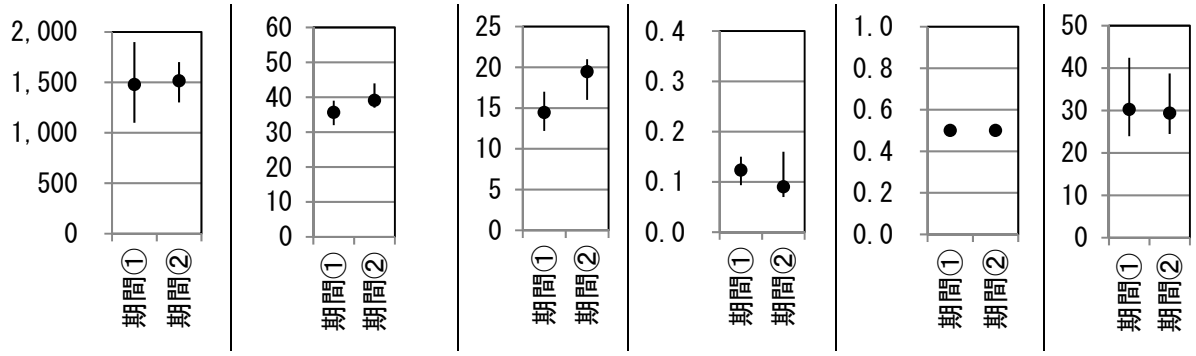


図 20 南多摩 3 系の運転条件及び流入水質特性

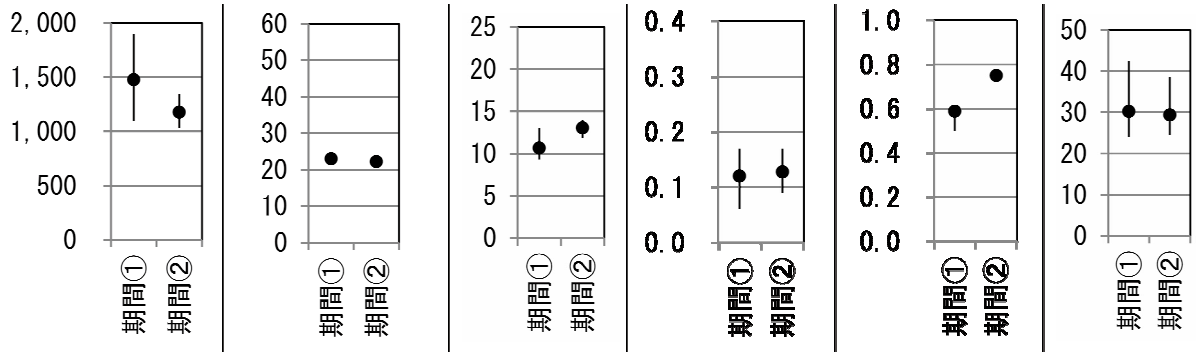


図 21 南多摩 6 系の運転条件及び流入水質特性

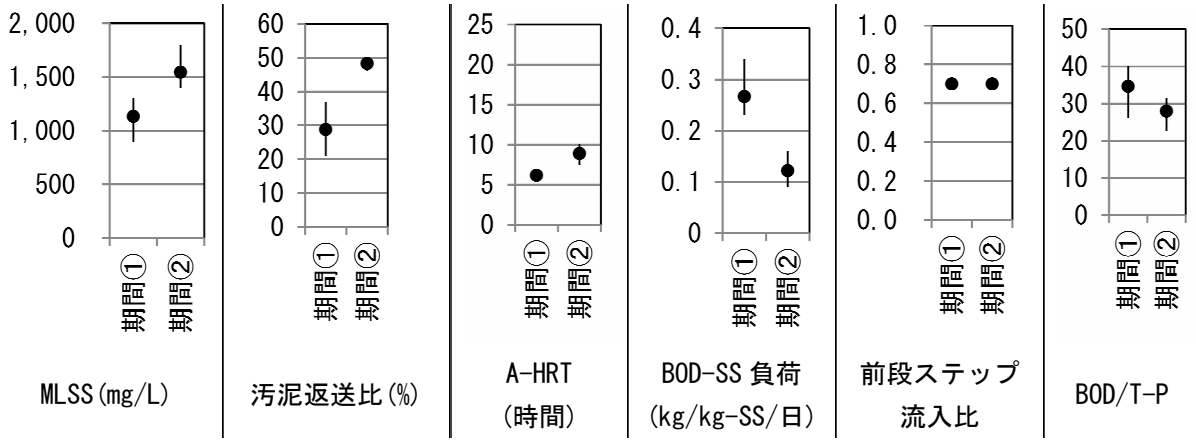


図 22 多摩上 1 系の運転条件及び流入水質特性

(2) りん処理性の検証

前項(2)と同様に、T-N 除去率と T-P 除去率に関する散布図を図 23 に示す。同図に示すように、南多摩 6 系、多摩上 1 系では、期間①から②にかけて T-P 除去率が向上し、両施設とも 80%をおおむね満足した。一方、南多摩 3 系については、T-P 除去率がさらに低下した。

南多摩 6 系で T-P 除去率が向上したのは、前段ステップ流入比の上昇が主要因と考える。多摩上 1 系

については、汚泥返送比の上昇や、BOD-SS 負荷及び BOD/T-P 比の低下等、りん処理に不利と考えられる運転条件の変化が見られたものの、T-P 除去率は向上した。これは、前述の第二沈殿池の課題が工事によって解消し、反応槽本来の処理性能が除去率に表れるようになったためと考える。

南多摩 3 系の T-P 除去率が悪化したのは、A-HRT が 20hr と極端に長くなり、BOD-SS 負荷が 0.1(kg/kg-SS 日)を下回ったことが主要因と考えられる。同施設においてりんの処理性を向上させるには、汚泥返送比の縮小や前段ステップ流入比の向上に加え、より多くの下水を処理するような運転変更が望ましいと考える。

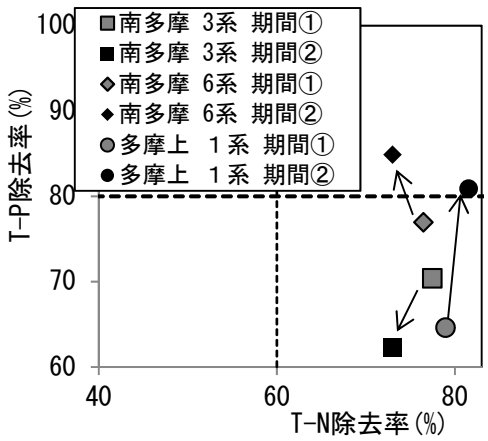


図 23 S-A_2O 法施設の T-N・T-P の除去率

3.3 S-A_2O 法施設への更新の効果

北一では 3 系反応槽を 3-1 系と 3-2 系に分割し、3-1 系を S-A_2O 法に更新した(平成 28 年度より本格稼働)。これを受け、現在の 3-1 系の処理状況を、平成 25 年度の 3 系のものと比較することで、S-A_2O 法の導入による処理性及び送風量等の改善効果を検証した。図 24 に平成 25 年 4 月～8 月と平成 28 年 4 月～8 月における 3 系(3-1 系)の T-N、T-P の除去率、送風量、A-HRT、MLSS 及び処理水量を示す。

処理性、送風量について、更新によって、T-N 除去率は約 15%、T-P 除去率は約 10%向上した。また、処理水量 1m^3 あたりの送風量(Nm^3/m^3)は約 20%低下した。送風量の低下は、散気設備の更新(気孔径 260 μm の散気板に更新)によるところが大きいと考えるが、硝化液循環を実施している(期間平均約 50%)ことから、その効果も含まれると考える。運転条件については、A-HRT が 2 時間程度延長し 8 時間程度、MLSS が 200mg/L 程度上昇して 1,500mg/L 程度となった。これは、流域下水道水再生センターの他の S-A_2O 法施設と比較すると、標準的な値である。

また、高度処理への更新に伴う課題の一つに、処理水量の低下が挙げられる。当施設についても更新によって処理水量は約 20%低下した。しかしながら、A-HRT が 6 時間程度の S-A_2O 法施設もあり(3.1、北二 1 系、多摩上 1 系)、当該施設についても処理性能を維持しつつ A-HRT を短縮できる可能性がある。この点について検討することで、高度処理への更新によるメリット、デメリットをより明確化できるものと考える。

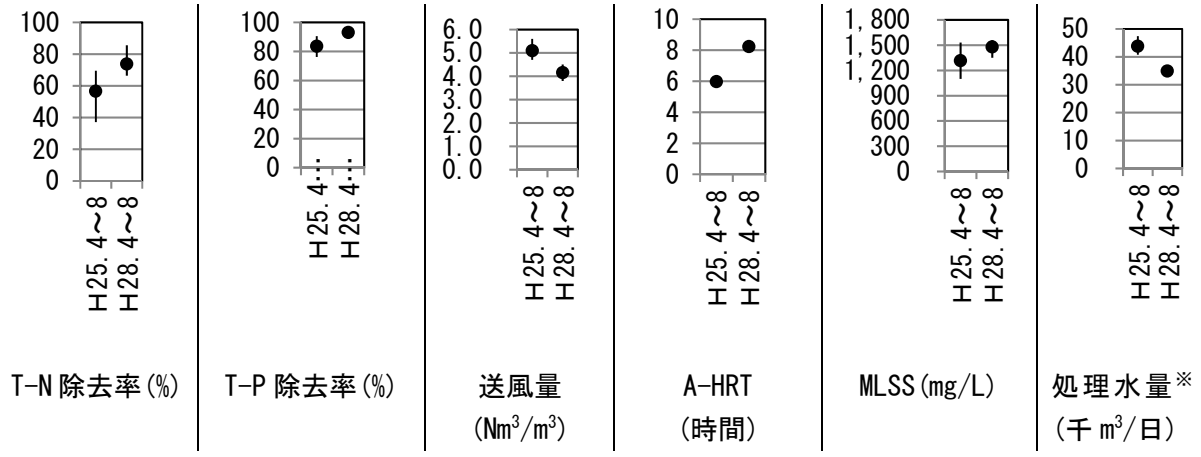


図 24 北一 3 系 (3-1 系)の窒素・りん除去率及び運転条件

※3 系処理水量の 1/2 と 3-1 系処理水量との比較

4　まとめ

流域下水道各水再生センターの高度処理施設を中心とした実態調査を行った。その結果明らかになった点について、以下にまとめる。

・A_2O 法は、BOD/T-N 比が 4 を超える施設では、低い硝化液循環比でも 60%以上の T-N 除去率が得られていた。また、BOD/T-N 比が 4 を下回る施設では、汚泥返送比 20%以上、硝化液循環比 40%以上の条件で T-N 除去率が 60%以上となった。T-P 除去率については、すべての施設でおおむね 80%以上となっていた。

・S-A_2O 法は、硝化液循環を実施していない施設を含むすべての施設で、70%以上の T-N 除去率が得られていた。また、T-P 除去率についても、A-HRT が極端に長く、BOD-SS 負荷が 0.1(kg/kg-SS)を下回った南多摩 3 系を除いて、おおむね 80%以上となっていた。

・流入水の BOD/T-P 比の高い清瀬では、標準法(疑似嫌気好気法)でも 85%程度の T-P 除去率が得られていた。

・硝化液循環を常時実施している A_2O 法施設では、循環比と送風量に負の相関が認められた。

・散気設備の気孔径と処理水量 $1m^3$ あたりの送風量に弱い正の相関が認められた。

・高度処理施設の送風量は、標準法施設に比べて明確に少なかった。

・北一 3 系では、S-A_2O 法に更新したことにより、T-N 除去率、T-P 除去率ともに向上し、それぞれ 75%、93%となった。また、散気設備の更新もあり処理水量 $1m^3$ あたりの送風量は 20%程度低下した。

5　おわりに

流域下水道本部では、各水再生センターがそれぞれの施設特性を考慮しながら、水質改善と省エネルギーの両立に向けた取組を実施している。今後、流域下水道本部全体の技術力向上を図りつつ、本取組を推し進めていくには、各センターの取組の内容と成果を共有することが重要と考える。

本調査では、各施設の運転条件と、その結果得られる処理性能の明確化を試みた。高度処理施設では、おおむねすべてにおいて処理性能が求める水準に達していたものの、運転条件等は施設によってばらつきがあった。これは、各センターで、施設の特性等に合わせて運転の工夫に取り組んでいることを示すものと考える。今後、各センターにおいて、本結果を共有し、施設の運転改善に取り組むことで、水質改善と省エネルギーの両立に関する取組が加速し、より良い成果が得られていくものと考える。

多摩川等での良好な水辺環境創出のため、流域下水道本部では今後も高度処理施設の導入を進めていく予定である。各施設におけるより一層の適正な運転管理を進めるとともに、新たに導入する高度処理施設においても、水質及びエネルギーの両面で性能を十分に発揮できるよう、流域下水道本部全体で取り組んでいく。

参考文献

1) 日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説　後編、2009 年度
2) 日本下水道協会、下水道維持管理指針　実務編、2014 年度
3) 計画調整部、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
4) 浅野卓哉ほか、疑似嫌気好気法の導入効果の検証と評価、下水道協会 vol.49、 No.600、 pp.115-123、2012
5) 有野貴ほか, 東陽Ⅲ系における硝化液循環ポンプの運用について、 平成 26 年度水質技術研究発表会

2-1-3　トータルコスト削減に向けた運転の効果検証

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担当
市川博明（現 同技術部多摩川上流水再生センター水質管理担当）
佐藤麻貴　丸島亮太　山下博史
塩見浩（計画調整部技術開発課）
森谷典子（現 流域下水道本部技術部施設管理課）
小泉僚平（現 施設管理部環境管理課）

1　はじめに

省動力での良好な水質維持の重要性が高まる中、当センターは平成 26 年度にアンモニア制御による送風制御を行い、送風エネルギーを抑えつつ良好な水処理を維持する運転を実施した。しかしながら、送風を抑制する運転は水処理性が悪化する潜在的なリスクがあり、本来、汚水処理の主役である微生物にとって必要十分な送風を行うことで良好な処理水質を安定的に得る運転が望ましい。空気を必要十分に送風する運転では、当然ながら送風エネルギーが増加し、トータルコスト（水処理コスト＋汚泥処理コスト）の増加に繋がる。一方、更に多量の送風を行うことで余剰汚泥発生量が減少する結果、高分子凝集剤や焼却補助燃料など汚泥処理コストの低減が示唆されるという報告[1)]がある（以下、このような運転を「余剰汚泥削減運転」という）。

そこで、当センターにおいても良好な処理水質の安定的な確保とトータルコスト低減の両立を目指し、平成 27 年度 6 月から余剰汚泥削減運転を実施し、その効果を検証した。

2　処理概要

2.1　水処理

2.1.1　処理水量（H27 実績）

約 53,000m^3/日（1、2 系で概ね同量処理）

2.1.2　処理方式

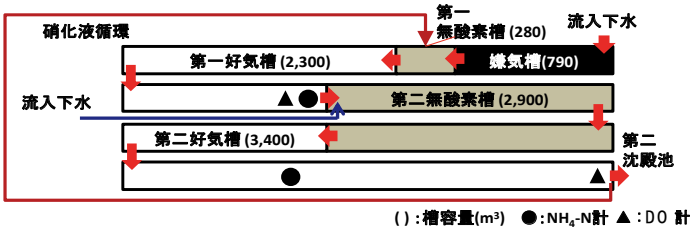


図 1　処理フローと制御計器位置

当センターの水処理施設は、1、2 系がステップ A_2O 方式であり、3 系は疑似 A_2O 方式である。平成 26 年 10 月までは 1、3 系が稼働し、以降は 1、2 系が稼働している。なお、1 系と 2 系の施設構造は同じであり、3 系についても好気槽容量は 1、2 系と概ね同じである。

2.1.3　送風制御方式

1、2 系について DO 計および NH_4-N 計が図 1 の示す位置に設置されている。3 系は D 回路入口（好気槽の中央やや後段寄り）に NH_4-N 計と DO 計が、また D 回路末端（好気槽末端）に DO 計が設置されており、いずれも各計器による送風制御が可能である。

2.2 汚泥処理

当センターの汚泥処理は、余剰汚泥と一沈濃縮汚泥をそれぞれ遠心濃縮および重力濃縮により分離濃縮したものを、混合汚泥にしてベルトプレスにより脱水するフローとなっている。これを流動床である 1 号炉、

表 1　焼却炉の仕様

	1号炉	2号炉
処理方式	流動床	多層燃焼
処理能力	40t/日	40t/日
使用電力(実績)	190kWh	200kWh
補助燃料	重油	都市ガス

もしくは多層燃焼炉である 2 号炉で焼却して焼却灰として場外に搬出する。各焼却炉の仕様を表 1 に示す。1 号炉と 2 号炉は使用電力や補助燃料、焼却目標温度が異なり、稼働時にかかるコストは大きく異なる。そのため、年度間のコストを比較する際は同一炉（2 号炉）で運転した期間のみを抽出した。なお、平成 26 年度以降の焼却炉の稼働状況は図 2 のとおりである。

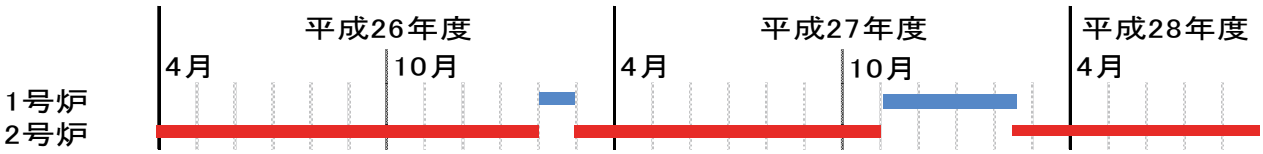


図 2　焼却炉の稼働状況

3 余剰汚泥削減運転

余剰汚泥削減運転とは、反応槽に通常よりも空気を多く送風するとともに MLSS を高く保つことで余剰汚泥発生量を減らし、汚泥処理コストの低減を図る運転のことである。当センターにおいて平成 27 年度 6 月から余剰汚泥削減運転を実施したところ、送風倍率及び MLSS の上昇が確認された（表 2）。また、本運転は高 MLSS 運転に加え、余剰汚泥発生量の減少に伴い余剰汚泥引抜量を減らすことから A-SRT が長くなった。

表 2 運転状況（年平均値）

年度	送風倍率（倍）	MLSS (mg/L)	A-SRT（日）
H26	3.8	2000	6.3
H27	4.4	2200	7.5
H28	4.9	2400	7.9

4 調査内容

本調査では、余剰汚泥削減運転を実施するなかで送風量が余剰汚泥発生量に与える影響を確認するとともに、コストに優れた運転制御条件を検討することを目的とした。本調査にあたり、より多くの送風が容易な DO 制御系列を調査系列とし、送風の抑制に適した NH_4-N 制御系列を対象系列とした。

平成 26 年度から平成 28 年度までの主な運転制御方式を表 3 に示す。平成 26 年度は、1、2 系および 3 系について NH_4-N 計を制御に用いた送風抑制運転を実施した。平成 27 年度は片系列（1 系）について、水処理状況が安定した 6 月より DO 制御による余剰汚泥削減運転を実施した。平成 28 年度は両系列について DO 制御として余剰汚泥削減運転を実施した。なお、平成 27 年度の NH_4-N 制御では平成 26 年度と比べて制御値を低く設定し、処理水の NH_4-N 濃度を確実に低く保つ運転を実施した。

表 3 水処理制御方式

	1系		2系（H26.10～）		3系（～H26.10）	
	第一好気槽	第二好気槽	第一好気槽	第二好気槽	3/4地点	反応槽末端
平成26年度（6月～3月）	NH_4-N制御		NH_4-N制御		NH_4-N・DO制御	
	1.3	1.9	1.1	1.6	0.9	1.6
平成27年度（6月～3月）	DO制御（余剰汚泥削減運転）		NH_4-N制御		---	
	2.2	2.3	1.0	2.5	---	
平成28年度（4月～8月）	DO制御（余剰汚泥削減運転）		DO制御（余剰汚泥削減運転）		---	
	1.7	2.0	1.5	1.8	---	

※数値は、各好気槽DO計器の連続測定平均値

各年度、各系列の運転結果（水処理性及びトータルコスト）の比較検証を行った。具体的には、平成 26 年度から平成 27 年度までの運転結果について①平成 26 年度と平成 27 年度の比較、②余剰汚泥削減運転と送風抑制運転の比較（H27 年度内の系列比較）により余剰汚泥削減運転のコスト優位性を確認し、続いて平成 28 年度の運転結果について③余剰汚泥削減運転における制御条件の比較（H28 年度内の系列比較）を行うことで余剰汚泥削減を効果的に進める運転条件を検証した。なお、トータルコストは、水処理コストとして送風機電力及び PAC 使用量、汚泥処理コストとして汚泥処理電力（重力濃縮電力、遠心濃縮電力、脱水電力、焼却電力）、高分子凝集剤及び補助燃料（都市ガス、重油）の使用量とした。送風の多少に影響を受けない揚水電力等についてはコスト比較の対象から除外した。各動力を金額換算する際には、近年の実績に基づき電力 1 kwh=13 円、都市ガス 1Nm_3=73 円、重油 1L=38 円、PAC 1kg=25 円、高分子凝集剤 1kg=540 円とした。

5　調査結果

5.1 平成 26 年度と平成 27 年度の比較

5.1.1　送風量と余剰汚泥 DS 量、コストの比較

余剰汚泥削減運転の開始時期及び焼却炉の稼働状況を考慮し、比較対象期間を 6 月から 10 月までの 5 ヶ月間とした。平成 27 年度は、平成 26 年度と比べて送風量が 12%増加したが、余剰汚泥 DS 量は 9%減少した（図 3）。また、水処理コストは 19%増加したが、汚泥処理コストは 12%減少し、トータルコストは 3%減少した（図 4）。なお、汚泥処理コストのうち汚泥処理電力は 9%減少、高分子凝集剤は 11%減少、補助燃料は 16%減少しており、各々が汚泥処理コストの減少に寄与することが分かった。この要因として余剰汚泥 DS 量の低減に伴う汚泥処理量の減少と汚泥脱水性の向上によるものと推定する。

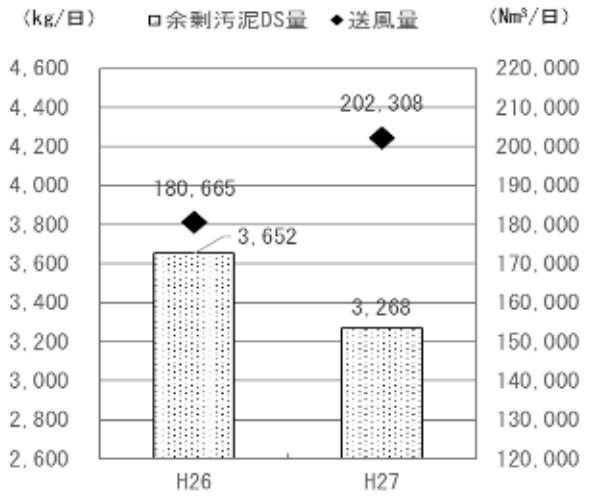


図 3 送風量と余剰汚泥 DS 量

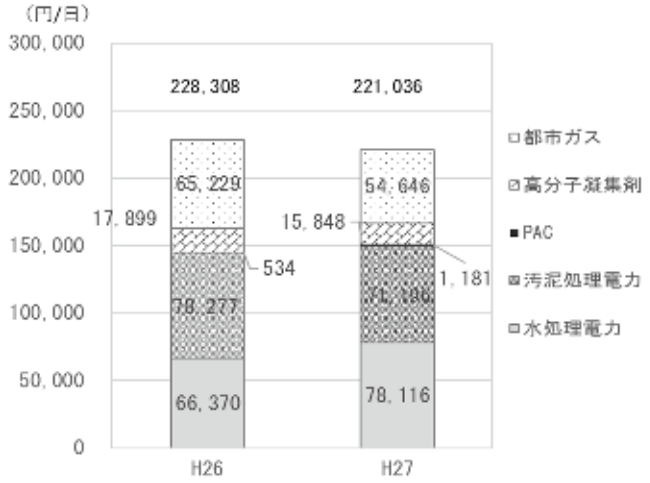


図 4　トータルコスト

5.1.2　放流水質の比較

表 4 は平成 26 年度と平成 27 年度の放流水質を比較したものである。平成 27 年度は平成 26 年度に比べて窒素処理は改善したがりん処理は悪化した。降雨後などりん処理が悪化した際は PAC 注入により対応した。運転状況は表 2 のとおりである。

表 4　放流水質

	COD	T－N	T－P	NH_4-N
H26	7.8	8.5	0.6	2.0
H27	7.2	6.3	1.0	0.2

(mg/L)

5.1.3　余剰汚泥削減要因の検証

「下水道施設計画　設計指針と解説」に記載されている余剰汚泥発生量の計算式は、以下の式１のとおりである。これをもとに、余剰汚泥削減運転において余剰汚泥発生量が削減できた要因を検証した。本検証を進めるにあたり平成 26 年度と平成 27 年度の処理水量や処理水質等は同一と仮定した。すなわち、式 1 において、流入水量、溶解性 BOD、SS、係数 a，b は一定とした。なお、本検証では焼却炉稼働状況を考慮する必要がなく、また、比較期間が長い方が上記の仮定を用いやすいため比較対象期間を6月から3月までとした。H26 余剰汚泥発生量－H27 余剰汚泥発生量＝余剰汚泥削減量とし、余剰汚泥削減量を左辺にとると式 1 より式 2 が得られる。

余剰汚泥発生量＝流入水量×〔ａ×溶解性 BOD+ ｂ×SS〕－ｃ×MLSS×好気槽容量

・・・（式 1）

a　：　溶解性 BOD の汚泥転換率（0.4～0.6）
b　：　SS に対する汚泥転換率（0.9～1）
c　：　汚泥の自己分解による減少係数（0.03～0.05）

余剰汚泥削減量＝c(H27)×MLSS(H27)×好気槽容量－c(H26)×MLSS(H26)×好気槽容量

・・・(式 2)

式2から余剰汚泥削減の影響因子は、MLSS 増加と係数ｃ上昇の２つであることが分かる。ここで、式 2 において MLSS(H27)、MLSS(H26)及び好気槽容量は既知である。また、式 1 より係数ｃは 0.03 から 0.05 までの値をとる。そこで、式 2 について c(H26)＝0.03 と仮定した場合の c(H27)を求め、MLSS 増加と係数ｃ上昇によって削減された余剰汚泥発生量を算出し、余剰汚泥削減に対する MLSS 増加と係数ｃ上昇の寄与率を求めた。

結果は以下のとおりである。

（ c(H26)＝0.03 と仮定した場合の c(H27)≒0.04
　余剰汚泥削減に対する MLSS 増加の寄与率＝27%、係数ｃ上昇の寄与率＝73% ）

同様に、c(H27) ＝0.05 と仮定した場合の c(H26)を求め、各寄与率を求めた。

（ c(H27)＝0.05 と仮定した場合の c(H26)≒0.04
　余剰汚泥削減に対する MLSS 増加の寄与率＝38%、係数ｃ上昇の寄与率＝62% ）

その結果、いずれも c(H27)＞c(H26)となったことから、内生呼吸域を拡大することよって活性汚泥の自己分解が促進されたと推測する。また、余剰汚泥削減に対する係数ｃ上昇の寄与率が大きいことから、余剰汚泥削減を進めるには MLSS 増加だけでなく、多量送風が重要であることが示唆された。ただし、本検証では前提条件として水質等を一定としており、また、各年度の稼働系列の違いによる影響など未確認な事項が存在しているため、引き続きデータを蓄積する必要がある。

5.2　余剰汚泥削減運転の条件検証

5.2.1　余剰汚泥削減運転と送風抑制運転の比較（H27 年度内の系列比較）

(1)　送風量と余剰汚泥 DS 量、コストの比較

続いて余剰汚泥削減運転（1 系）と送風抑制運転（2 系）の比較を行った。同一年度内の系列比較では、各焼却炉の稼働状況がコスト比較に影響しないため、比較対象期間は平成

27 年 6 月から平成 28 年 3 月までとした。比較にあたり系列ごとの処理負荷量を同一とするため、各比較項目を系列処理水量で割り返した値を用いた。また、系列ごとの実動力は分からないため、水処理動力については各系列の送風量に応じて比例配分、汚泥処理動力については汚泥 DS 量に応じて比例配分した値を各系列の動力とした。その結果、余剰汚泥削減運転は送風抑制運転と比べて送風量は 6%多かったが、余剰汚泥 DS 量は 11%少なかった（図 5)。また、余剰汚泥削減運転の水処理コストは 6%多かったが、汚泥処理コストは 9%少なく、トータルコストは 4%少なかった（図 6）

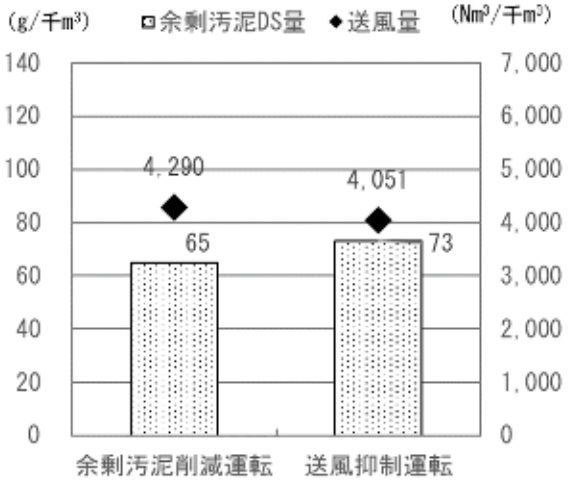


図 5 送風量と余剰汚泥

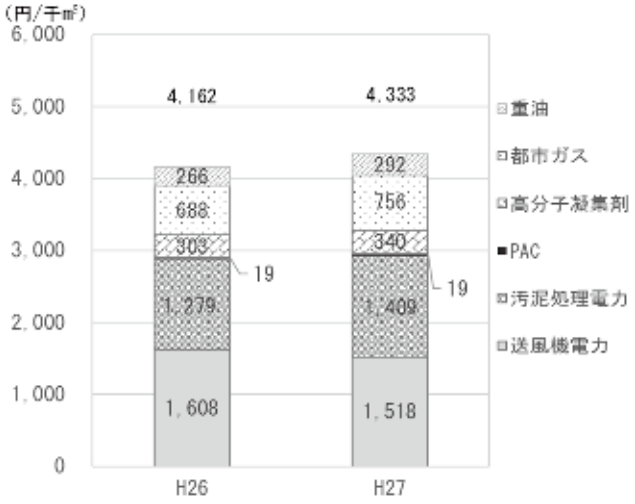


図 6 トータルコスト

(2) 処理水質と運転状況

表 5 は余剰汚泥削減運転と送風抑制運転の処理水質と運転状況を比較したものである。余剰汚泥削減運転では送風抑制運転に比べて T-N が低かったが T-P、NH_4-N は同程度であり、処理水質等に大きな違いはなかった。なお、処理水の COD は測定していない。また、余剰汚泥削減運転では送風抑制運転に比べて送風倍率が高く、MLSS 及び A-SRT は同程度であった。

表 5 処理水質と運転状況

	T−N	T−P	NH_4-N
余剰汚泥削減運転	5.6	1.1	0.2
送風抑制運転	7.1	1.0	0.2

(mg/L)

	処理水量 (m^3/日)	送風倍率 (倍)	MLSS (mg/L)	A-SRT (日)
余剰汚泥削減運転	27203	4.3	2200	7.4
送風抑制運転	25746	4.1	2300	7.5

5.2.2 余剰汚泥削減運転における制御条件の比較（H28 年度内の系列比較）

平成 28 年度は平成 27 年度までの運転結果を踏まえ、両系列 DO 制御により更に余剰汚泥削減を進める運転を実施した。その際、1 系と 2 系とで運転条件を適宜変更し系列比較することで、余剰汚泥削減を効果的に進める運転条件について調査を行った。

5.2.2.1 同一運転条件での比較（5/26～6/5）

(1) 送風量と余剰汚泥 DS 量、コストの比較

1 系と 2 系は同じ施設構造であるが設備影響等によって余剰汚泥削減効果に違いがあるか確認するため両系列の運転条件を同一として比較を行った。その結果、送風量、余剰汚泥 DS 量、トータルコストに違いはなく、同一運転条件では同程度の余剰汚泥削減効果であった（図 7、8)。

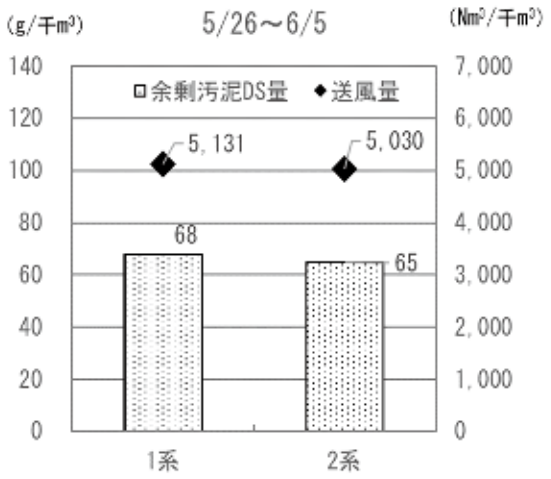


図 7 送風量と余剰汚泥 DS 量

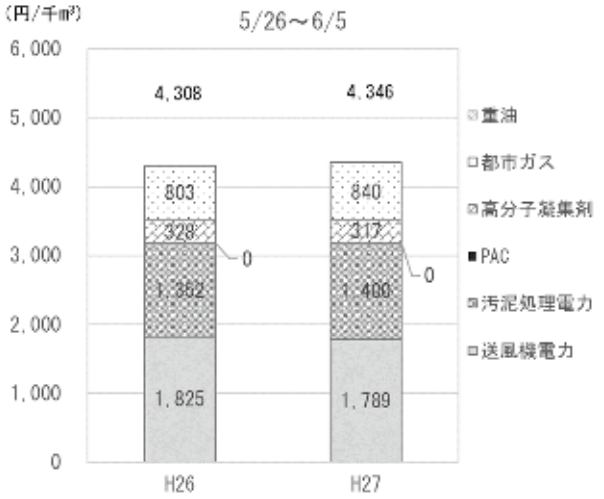


図 8　トータルコスト

(2)　処理水質と運転状況

表 6 は、1 系と 2 系の処理水質と運転状況を比較したものである。2 系は 1 系に比べて T-P、MLSS が低かったが T-N、NH_4-N やその他の運転状況は同程度であり、処理水質等に大きな違いはなかった。

表 6　処理水質と運転状況

	T−N	T−P	NH_4-N
	(mg/L)		
1系	4.7	0.9	<0.1
2系	4.3	0.5	<0.1

	処理水量 (m^3/日)	送風倍率 (倍)	MLSS (mg/L)	A-SRT (日)	DO制御値 1好／2好	ステップ 流入比
1系	27110	5.1	2500	7.9	1.5/1.5	8:2
2系	24511	5.0	2300	8.2	1.5/1.5	8:2

5.2.2.2　ステップ流入比のみ異なる運転条件での比較（4/12～4/19）

(1)　送風量と余剰汚泥 DS 量、コストの比較

続いて、1 系のステップ流入比を 10:0、2 系のステップ流入比を 8:2 とし、ステップ流入比のみ異なる場合の余剰汚泥削減効果を調査した。ここで、ステップ流入比とは嫌気槽と第二無酸素槽への流入水量比のことである（図 1 参照）。その結果、送風量は同程度であったが余剰汚泥 DS 量は 1 系の方が 17%少なかった（図 9）。また、トータルコストは 10%少

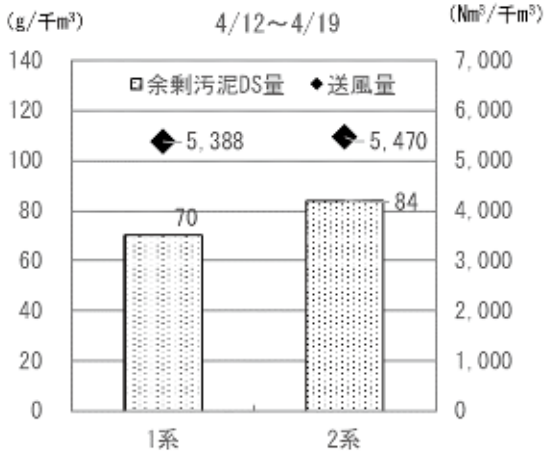


図 9 送風量と余剰汚泥 DS 量

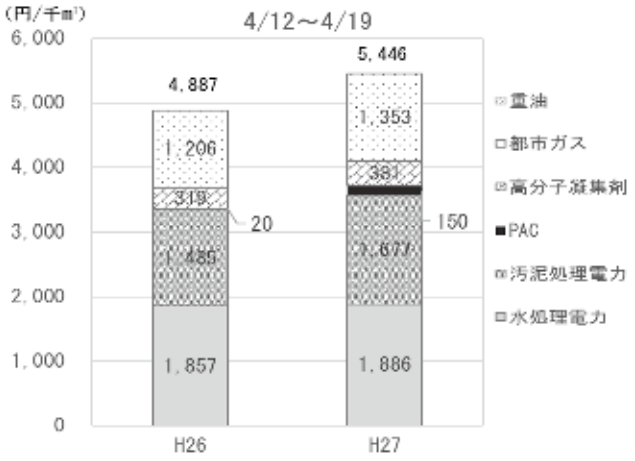


図 10　トータルコスト

なかった（図 10)。

(2)　処理水質等と運転状況

表 7 は、1 系と 2 系の処理水質等を比較したものである。1 系は 2 系に比べて T-N が低かったが T-P、NH_4-N は同程度であった。ステップ流入比以外の運転条件については概ね同程度であった。

表 7　処理水質と運転状況

	T−N	T−P	NH_4-N
1系	5.0	1.4	<0.1
2系	6.1	1.3	<0.1

(mg/L)

	処理水量 (m^3/日)	送風倍率 (倍)	MLSS (mg/L)	A-SRT (日)	DO制御値 1好／2好	ステップ 流入比
1系	25,253	5.4	2,500	7.1	2.0/2.0	10:0
2系	23,644	5.5	2,400	7.2	2.0/2.0	8:2

5.2.2.3　第二好気槽の DO 制御値のみ異なる運転条件での比較（5/10～5/23）

(1)　送風量と余剰汚泥 DS 量、コストの比較

次に、1 系第二好気槽の DO 制御値を 2.0、2 系第二好気槽の DO 制御値を 1.0 とし、DO 制御値のみ異なる場合の余剰汚泥削減効果を確認した。その結果、1 系の方が送風量は 8%多かったが、余剰汚泥 DS 量は 7%少なかった（図 11)。また、トータルコストは 3%少なかった（図 12)。

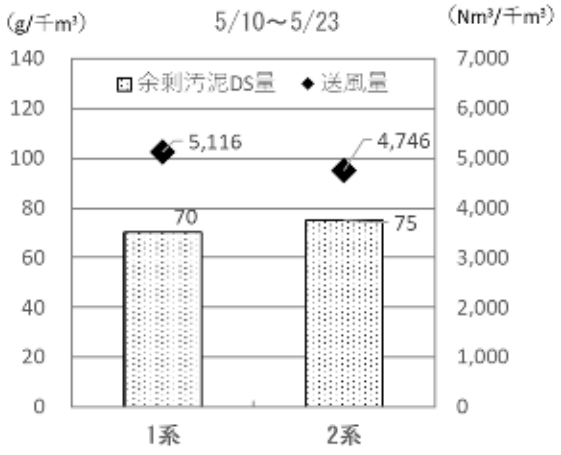


図 11 送風量と余剰汚泥 DS 量

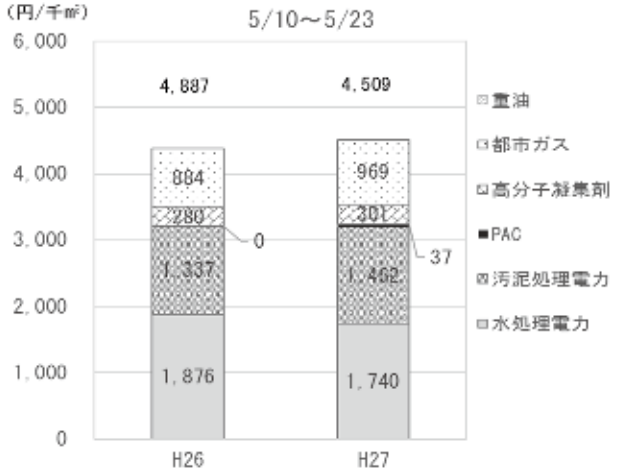


図 12　トータルコスト

(2) 処理水質と運転状況

表 8 は、1 系と 2 系の処理水質等を比較したものである。調査期間中のステップ流入比及び第一好気槽における処理状況は同程度であり、処理水質は概ね同等となった。1 系は 2 系と比べて第二好気槽の DO 制御値を高く設定したことから送風倍率が高かった。5.2.2 の結果から余剰汚泥削減運転を進めるためには、嫌気槽への流入比を高くし、各好気槽の DO 制御値を高く保つことが効果的であると示唆された。特に、ステップ流入比を 10:0 とする運転は、送風量が増加

表 8　処理水質と運転状況

	T−N	T−P	NH_4-N
1系	4.7	0.9	<0.1
2系	4.6	0.8	<0.1

(mg/L)

	処理水量 (m^3/日)	送風倍率 (倍)	MLSS (mg/L)	A-SRT (日)	DO制御値 1好／2好	ステップ 流入比
1系	26,675	5.1	2,500	7.9	1.5/2.0	8:2
2系	24,067	4.7	2,300	7.3	1.5/1.0	8:2

する等のデメリットがなく余剰汚泥削減効果も高いことが分かった。ただし、余剰汚泥削減運転系列では送風抑制運転系列と比較して嫌気槽への流入比を低く運転することが多かったため、ステップ流入比の違いによる効果を正しく見積もったうえで再度評価をする。

6 まとめ

(1)平成 27 年度は平成 26 年度比で、送風量は 12%増加、余剰汚泥発生量は 9%減少、トータルコストは 3%低減した。放流水質について、窒素処理は改善したが、りん処理は悪化した。

(2)トータルコストの内訳について、平成 27 年度は平成 26 年度比で水処理コストは 19%増加、汚泥処理コストは 12%減少した。汚泥処理コストのうち汚泥処理電力は 9%減少、高分子凝集剤は 11%減少、補助燃料は 16%減少し、各々が汚泥処理コストの減少に寄与した。

(3)余剰汚泥発生量の理論式を用いて、余剰汚泥削減に係る因子を MLSS 増加と汚泥減少係数ｃ上昇とし、寄与率を推定したところ順に約 35%、65%であった。汚泥減少係数ｃ上昇の寄与が大きいことから、内生呼吸域を拡大させることにより大きな削減効果を得る可能性が示唆された。

(4)平成 27 年度内の系列比較により、余剰汚泥削減運転は送風抑制運転と比較して効果的に余剰汚泥削減を進められることが分かった。ただし、ステップ流入比の差による影響を受けている可能性があるため今後検証する。

(5)平成 28 年度は DO 制御で余剰汚泥削減をより効率的に進める運転条件を調査した。ステップ流入比を高くし、第二好気槽の DO 制御値を高く保つことが効果的であることが分かった。

7 今後の調査

ステップ流入比を同一として、DO 制御値を高くすることによる余剰汚泥発生の抑制効果を再評価する。さらに、余剰汚泥発生量と送風条件や処理状況との関係性をより明らかにするため、アンモニア制御の設定値を変えて、余剰汚泥発生量を調査する。

参考文献

1) 伊藤ほか：余剰汚泥の削減がコスト及び動力に及ぼす影響の評価、技術調査年報 2013

2-1-4　最終沈殿池での脱窒促進運転について

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

1　はじめに

芝浦水再生センター（以下、当センター）において平成 27 年度に実施した東系施設の NOx-N 計とアンモニア計を用いた風量制御による新たな高度処理技術の性能調査において、最終沈殿池での脱窒量が比較的大きく、窒素除去率の向上への寄与が大きいことがわかった。最終沈殿池での脱窒については、過去にある程度存在が確認されていたが、その量は多くないと考えられていたことから、これまでに詳細な調査は行われていない。しかし、運転管理によって最終沈殿池での脱窒量を増大できれば返送汚泥や硝化液循環などの循環量の増大によらず比較的簡単に窒素除去率の向上が望めることから、東系以外の他の系列についても最終沈殿池での脱窒状況の実態を確認するとともに、窒素除去率向上に向けた運転方法について検討した。本報では、その結果についてまとめた。

2　処理施設の概要

当センターは、水処理施設が 5 系列に分かれる。各系列の反応タンク、最終沈殿池の形状および平成 27 年度の運転実績値を表 1 にまとめた。

表 1　各系列の反応タンク、最終沈殿池の形状と平成 27 年度の運転実績

		深槽東系	深槽西系	浅槽系	西系	東系
反応タンク形状	有効容積 （m^3）	16,890	16,890	8,790	11,260	13,100
	回路数	2	2	4	1	2
	散気水深 （m）	4.0	4.0	3.6	4.0	5.5
	池数	3	3	6	2	3
最終沈殿池形状	有効容積 （m^3）	6,410	6,410	2,880	7,430	7,260
	水面積 （m^3）	1,460	1,460	800	2,200	2,300
	池数	6	6	7	2	3
運転実績（27年度）	処理方式	（A0法）	（A0法）	疑似A0法	疑似A0法	（A0法）
	処理水量 （m^3）	160,530	141,530	133,240	59,350	77,300
	反応タンク滞留時間 （h）	7.6	8.6	9.5	9.1	9.4
	BOD容積負荷（kg/m^3/日）	0.48	0.42	0.38	0.37	0.33
	MLSS （mg/L）	2,410	2,550	2,210	2,350	2,610
	最終沈殿池滞留時間 （h）	5.7	6.2	3.6	6.0	6.8
	汚泥返送比	0.40	0.47	0.45	0.53	0.50
	水面積負荷（m^3/m^2/日）	18.3	17.0	23.8	13.5	11.2

（A0法）： かくはんを停止して微ばっ気運転

各系列ともに BOD 容積負荷が比較的高いので、りん除去は安定している。一方、反応タンク流入水の NH_4-N 濃度が高いため、高水温期においても処理水に高濃度の NH_4-N が残留していることもあり、低水温期には硝化が不安定になることが多い。このため、年間を通じて、高い MLSS で運転している。

3　NOx-N計とアンモニア計による風量制御時の最終沈殿池での脱窒状況（東系）

東系では、滞留時間の差を考慮しても好気タンク出口と処理水で NOx-N 濃度に優位な差が見られたので詳細な調査を行った。具体的には、最終沈殿池の流入水と流出水について自動採水器を用いて 2 時間間隔でそれぞれ 24 本採取し、NH_4-N、NO_2-N、NO_3-N 濃度の変動を比較することで脱窒の状況を確認した。このとき、好気タンク出口の自動採水器にはあらかじめろ布をセットしておき、ボトルには 1＋16 塩酸を 1mL ずつ加えておき、試料採取と同時に活性汚泥との分離と試料の酸固定ができるようにした。調査結果を図 1 に、また、このデータについて NOx-N 濃度のピークの位置を合わせるため最終沈殿池流出水のデータを 4 時間前に移動させた結果を図 2 に示す（平成 27 年 11 月 11～13 日）。

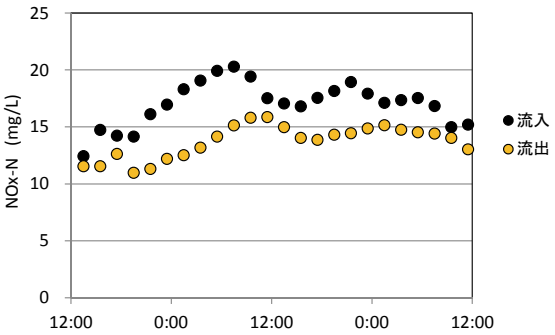


図 1　最終沈殿池 NOx-N の変化（東系）

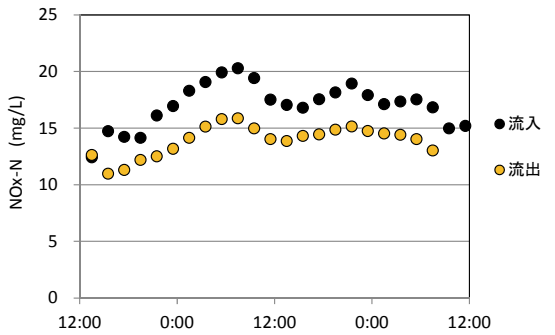


図 2　ピークを合わせたグラフ（東系）

図2より、各時間帯の濃度差から最終沈殿池でのNOx-Nの低下濃度（脱窒濃度）を求めることができる。これ以降、脱窒濃度は、図2のように各時間帯のNOx-N濃度の差を求め、グラフを重ね合わせた時間（42～44時間）の平均値を用いることとした。

最終沈殿池での脱窒には、活性汚泥混合液の脱窒速度、最終沈殿池の構造、水面積負荷、活性汚泥の沈降性（SVI）などが影響していると予想される。中でも、好気タンク出口の活性汚泥混合液の脱窒速度は運転条件によって調整できることから運転管理上重要な因子といえる。そこで、好気タンク出口の活性汚泥混合液の脱窒速度がどのような要因によって変化するかを確認するため、まず、東系反応タンク 1 号と2号について反応タンクの上流から下流にかけて脱窒速度と形態別窒素濃度の挙動を確認した。東系では各反応タンクからの流出水が合流してから最終沈殿池に流入し、返送汚泥は各反応タンク分配されていることから嫌気タンク出口までは、各反応タンクほぼ同じ状況である。一方、好気タンクの運転では、調査時に2号に比べて1号において前半部の風量の下限値を高くしていたため、負荷の低い時間帯には過剰な送風により、2号槽に比べて、1号側では好気タンク前半で硝化が急速に進んでいた。この状態での1号と2号の測定結果を図3～5に示す。

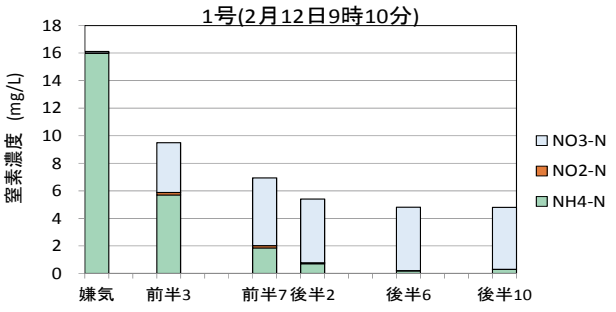


図 3　反応タンク内窒素の挙動（東系 1 号）

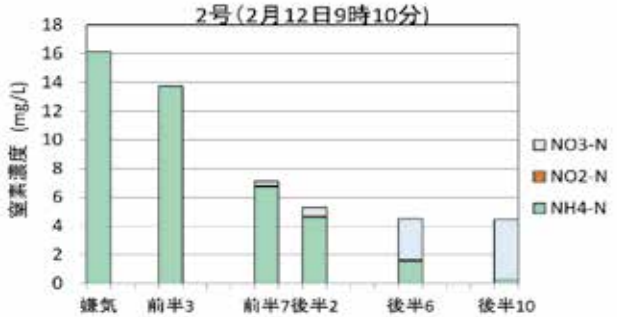


図 4　反応タンク内窒素の挙動（東系 2 号）

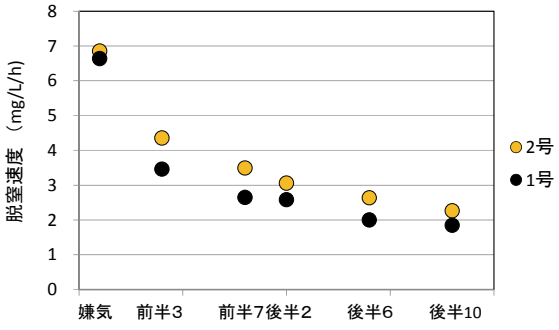


図 5　反応タンク内の脱窒速度の変化

1 号側では好気タンク前半で急速に硝化が進行しているのに対して、2 号側では後半までゆっくりと硝化が進んでいる。このときの脱窒速度の変化を図 5 により比較すると、前半の風量が多かった 1 号に比べて 2 号の方が脱窒速度が高く推移しており、硝化の進行による NH_4-N 濃度の低下と脱窒速度の低下にはある程度相関があると想定される。そこで、東系 2 号好気タンク出口の活性汚泥混合液を採取しその時の NH_4-N 濃度を測定するとともに回分による脱窒速度を測定した（試料採取期間：平成 27 年 8 月～28 年 2 月）。得られたデータについて、試料採取時の NH_4-N 濃度との相関を図 6 に示した。また、平均的な NH_4-N 濃度と比較するため、好気タンク後半の風量制御に使用しているアンモニア計の指示値とも比較した（図 7）。平均的な NH_4-N 濃度として、ここでは脱窒速度測定のため試料を採取した時刻から 24 時間前までの指示値の平均との相関を確認した。

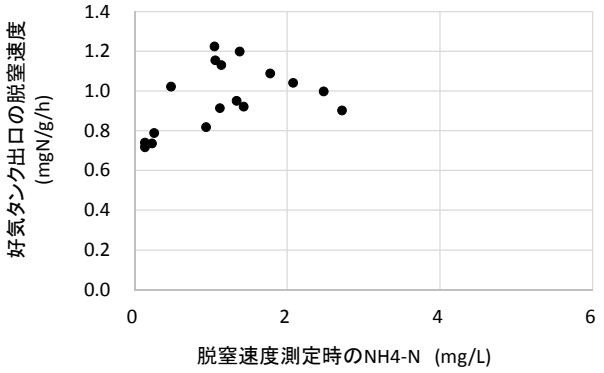


図 6　NH_4-N 濃度と脱窒速度の関係

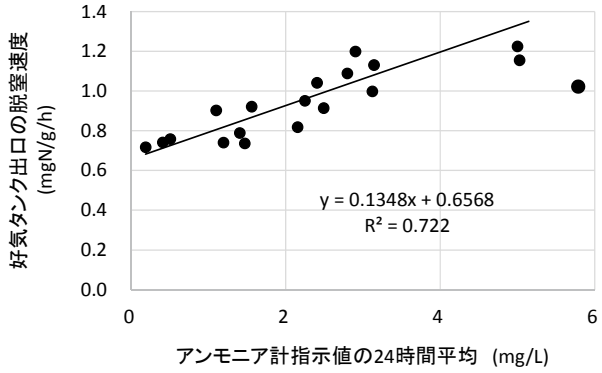


図 7　アンモニア計平均値と脱窒速度の関係

好気タンク出口の活性汚泥混合液の脱窒速度は NH_4-N 濃度が高くなるほど大きくなる傾向がみられる。図 6 と図 7 を比べると NH_4-N 濃度との相関は瞬時値よりも過去 24 時間の平均値との相関が高いことがわかる。この結果から、脱窒速度の変化は NH_4-N 濃度の変化に対して比較的ゆっくりと応答していると考えられる。また、NH_4-N 濃度が低くなるほど、脱窒速度が低いことは、硝化の進行と並行して活性汚泥混合液が保有している有機物の分解が進み脱窒速度が低下していくためと考えられる。図 7 より、アンモニア計の指示値（反応タンク出口付近の NH_4-N の 24 時間の平均値）から好気タンク出口の活性汚泥混合液の脱窒速度が推定できる。NH4-N 濃度と脱窒速度が正の相関を示すことは次のような理由からと考えられる。反応タンク流入水の BOD と NH_4-N は概ね正の相関があり、反応タンク流入水の NH_4-N 濃度が高い流入水を処理するときは風量が増して反応タンク内での有機物の分解量も多くなるが、流入水の BOD も高いことから硝化が完了する時点で残留する有機物量は流入水質の変化にかかわらず概ね一定になると考えられる。ここで、NH_4-N の残留濃度が高くなるほど残留する有機物濃度も多くなり、結果として、図 7 のように NH_4-N 残留濃度と活性汚泥の脱窒速度で相関が高くなっていると考えられる。この場合、反応タンク流入水の組成が異なる施設では、図 7 の近似式も異なるが、同じ施設で

は反応タンク流入水の組成は年間を通してほぼ同じと考えられることから、多くの施設で傾向としては同じと考えられる。

図 1 および図 2 で示したものと同様の調査を合計 4 回実施（平成 27 年 10 月～11 月）し、好気タンク出口の脱窒速度と最終沈殿池での脱窒濃度との関係を確認した。ここで、好気タンク出口の脱窒速度は、次のようにして計算した。試料採取時間帯のアンモニア計の指示値の 46 時間（流入部と流出部の NOx-N のピークを合わせた時間帯）の平均値から図 7 で得られた近似式を用いて活性汚泥 1 g 当たりの脱窒速度を求める。これに MLSS 濃度をかけて混合液の脱窒速度を算出する。この時の MLSS 濃度は試料採取期間中の日常試験（平日の 9 時 30 分測定）の平均値を用いた。4 回の測定で得られたデータについて好気タンク出口の脱窒速度の計算値と最終沈殿池での脱窒濃度の関係を図 8 に、アンモニア計指示値の 46 時間平均値と最終沈殿池での脱窒濃度との関係を図 9 示す。

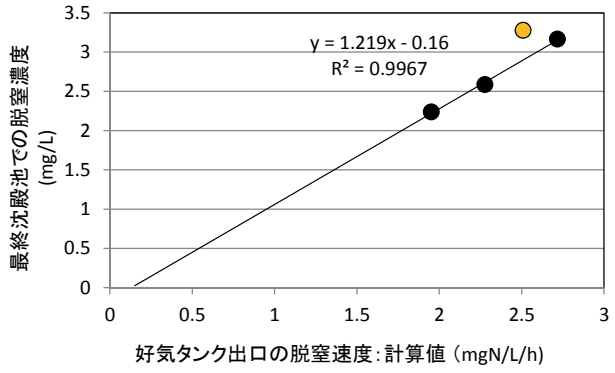


図 8　好気タンク出口の脱窒速度（計算値）と脱窒濃度との関係

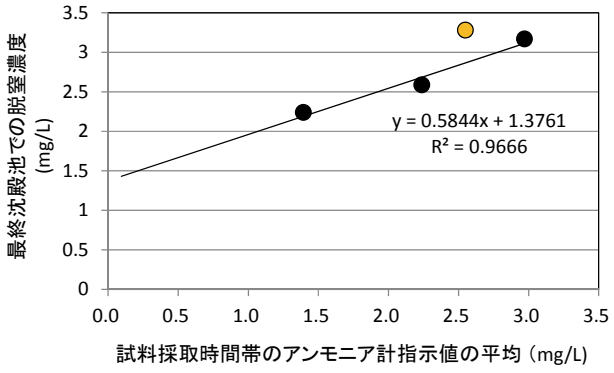


図 9　NH_4-N の 46 時間平均値と脱窒濃度との関係

好気タンク出口の脱窒速度（計算値）およびアンモニア計指示値の46時間平均値のどちらも最終沈殿池での脱窒濃度との間に相関が認められた。特に、脱窒速度との相関（図8）では、近似線が原点付近を通ることから、最終沈殿池での脱窒濃度は概ね好気タンク出口の脱窒速度に比例すると考えられる。好気タンク出口の脱窒速度は、図7からNH_4-N濃度およびMLSS濃度を上げることで高めることができる。好気タンク後半の風量をアンモニア計で制御している東系では、DO制御に比べて好気タンク出口のNH_4-N濃度を調節しやすいため脱窒促進運転に向いている。また、図8および図9の●は、反応タンクへの粒子状BODの流入量を少し増大させる目的で、日中の時間帯のみ（9～17時）3池ある最初沈殿池のうち2池の流入扉を閉めて1池運用とした時のデータである（平成27年11月11～13日）。この結果から、流入水のBOD濃度の低い施設では、最初沈殿池の一部を停止することで反応タンクへの粒子状BODの流入量が少し増し、好気タンク内で分解されずに残留したものが最終沈殿池において脱窒の有機物源として働くことで脱窒が促進されると考えられる。これを確認するために以下のような実験を行った。

テーブル実験での試料について脱窒速度の変化を調べることはかなりの労力を要するので、その代用としてATU添加酸素利用速度を用いることを検討した。まず、両者の関係を確認するため東系の嫌気タンク出口から好気タンク内の各ライザーバルブ設置地点から活性汚泥混合液を採取し、好気タンク内での混合液の脱窒速度およびATU添加酸素利用速度の変化を確認した。その結果を図10に示す。また、脱窒速度とATU添加酸素利用速度の関係を図11に示す。

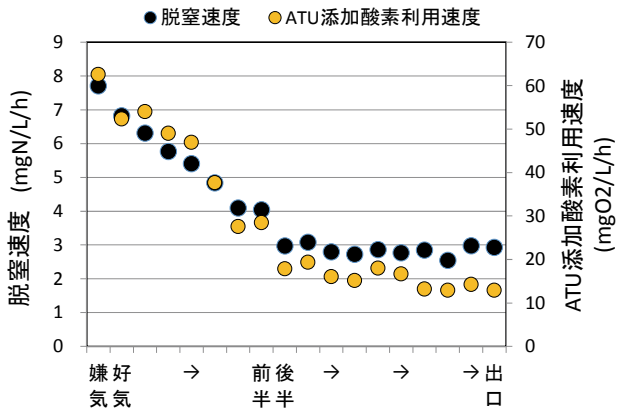


図 10　反応タンク内での脱窒速度と ATU 添加酸素利用速度の挙動

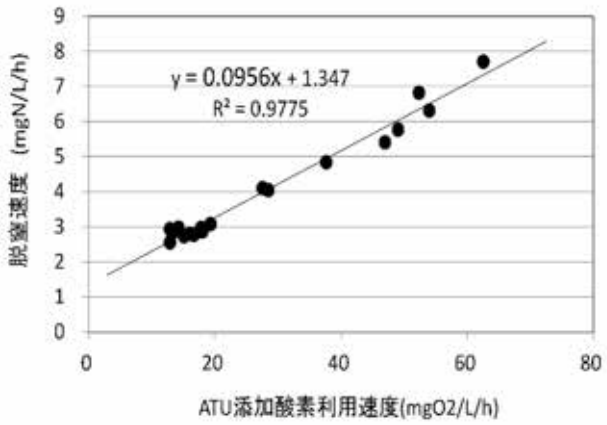


図 11　ATU 添加酸素利用速度と脱窒速度との関係

反応タンク内では、好気処理に伴い脱窒速度とATU添加酸素利用速度がともに低下している。両者の挙動はよく一致しており、図11から好気処理による脱窒速度の挙動の確認としてATU添加酸素利用速度が利用できることが示された。

つづいて、好気処理時間に対するATU添加酸素利用速度の変化を実験的に確認した。実験の手順は以下のとおりである。

① 反応タンク流入水を採取し、そのうちの2Lを0.45μmメンブレンフィルターでろ過する。

② 3Lビーカー3個に返送汚泥1Lを入れ、(ア)反応タンク流入水、(イ)反応タンク流入水のろ液、(ウ)反応タンク流入水＋ろ過操作でSS分を捕集したメンブレンフィルターをそれぞれ入れて1時間かくはんする。なお、条件を同じにするため(ア)と(イ)のビーカーにも(ウ)と同じ枚数の未使用のメンブレンフィルターを加えておく。

③ 1時間かくはんして嫌気処理した後、それぞれのビーカーにATUを加えて、ばっ気を開始し、混合液の一部をDOビンに採取して酸素利用速度を測定する。

④ 酸素利用速度測定後の混合液はもとのビーカーに戻して、再び、混合液をDOビンに採取し酸素利用速度を測定する。

⑤ これを酸素利用速度の低下が落ち着くまで繰り返す。

実験結果を図12に示す。

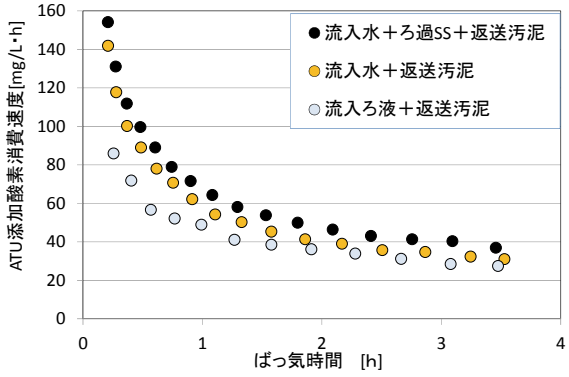


図 12　好気処理による ATU 添加酸素利用速度の変化

ばっ気開始直後はATU添加酸素利用速度が急速に低下し、その後の低下は緩やかである。この動きは図10の反応タンク内の挙動と類似している。ただし、ビーカー内では酸素の供給が十分な状態であるため1時間程度でATU添加酸素利用速度の低下が落ち着いてきているが、反応タンク内では酸素の供給が律速となってATU添加酸素利用速度の低下はゆっくりである。図12でばっ気時間が同じところではATU添加酸素利用速度は　(ウ)　＞　(ア)　＞　(イ)　の順でSSの流入が多くなるほど大きく、実験終了時までこの傾向が変わらないことから、BOD負荷が低い施設では、最初沈殿池の縮小や汚泥を

少量投入することなどにより、反応タンクへのSS分の流入を増やせば最終沈殿池での脱窒が促進されることが実験的に確認できた。

4　他の系列の最終沈殿池での脱窒の状況

平成 28 年度には、窒素除去率の向上を目的に DO 制御で運転している他の系列の最終沈殿池について脱窒状況を確認した。表 1 に示したように当センターには、東系を含めて 5 系列の施設がある。このうち深槽東系と深槽西系は、最終沈殿池の形状が同じであることから、センター内には 4 種類の最終沈殿池がある。浅槽系はサイホン式の沈殿池で、西系および深槽東西系は二階層沈殿池である。これらの最終沈殿池について脱窒状況を確認した（図 13～図 18）。

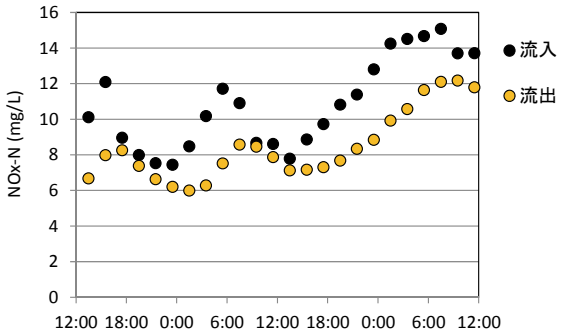


図 13　最終沈殿池 NOx-N の変化（西系）

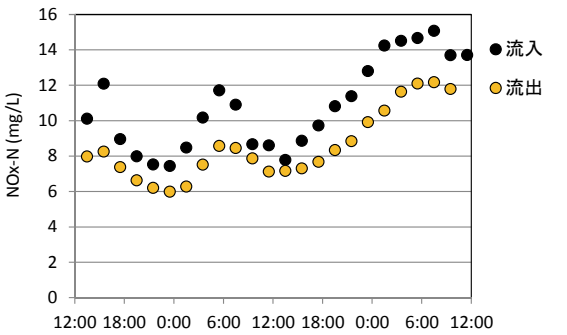


図 14　ピークを合わせたグラフ（西系）

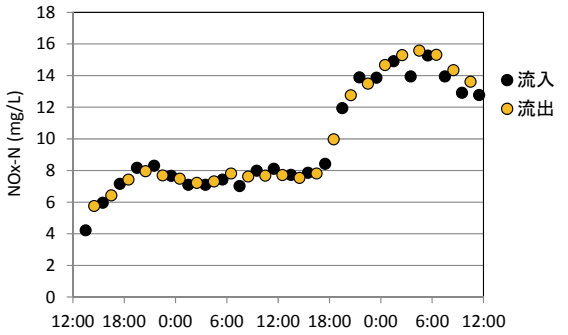


図 15　最終沈殿池 NOx-N の変化（浅槽系）

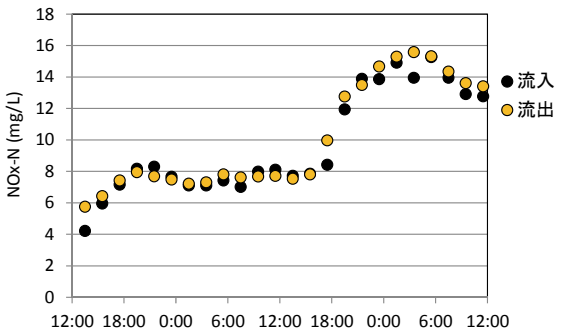


図 16　ピークを合わせたグラフ（浅槽系）

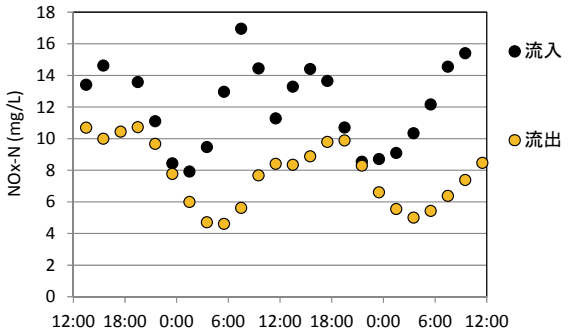


図 17　最終沈殿池 NOx-N の変化（深槽東系）

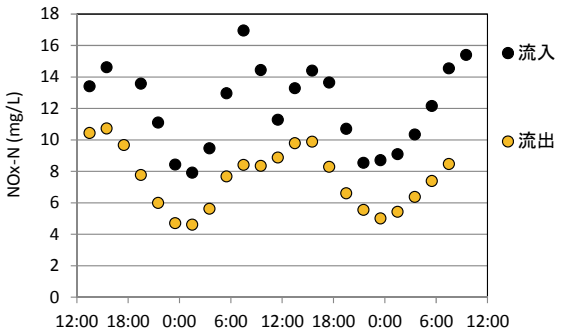


図 18　ピークを合わせたグラフ（深槽東系）

サイホン式沈殿池である浅槽系では脱窒が確認されなかったが、西系および深槽東系では脱窒が確認されており、特に、深槽東系での脱窒が大きかった。浅槽系の最終沈殿池では、上からの目視により流入した混合液の固液分離が速やかに行われていることがわかる。最終沈殿池での脱窒は、活性汚泥粒子が沈降するまでの間に発生すると考えられ、浅槽系

の最終沈殿池では脱窒できる時間が確保できていないと考えられる。一方、西系および深槽東系は、最終沈殿池流入部で乱流が発生して固液分離までに時間があること、また、二階層の沈殿池では上段で掻き寄せられてきた汚泥が落下する箇所で下段への流入水と混ざることなどから、最終沈殿池内部で脱窒できる箇所が存在していると考えられる。

東系の調査では、アンモニア計の指示値の平均値と最終沈殿池での脱窒濃度に相関が認められたが、他の系列にはアンモニア計が設置されていないことから、試料採取時の最終沈殿池流入水 NH_4-N 濃度の平均値を用いて最終沈殿池での脱窒との関係を確認した。比較のため、東系のデータについても加えた（図 19）。

系列ごとまた全体的には、最終沈殿池流入水の NH_4-N 濃度が高くなるほど最終沈殿池での脱窒濃度が大きくなっている。点のばらつきについては MLSS の差や最終沈殿池の構造の違いなどが考えられる。

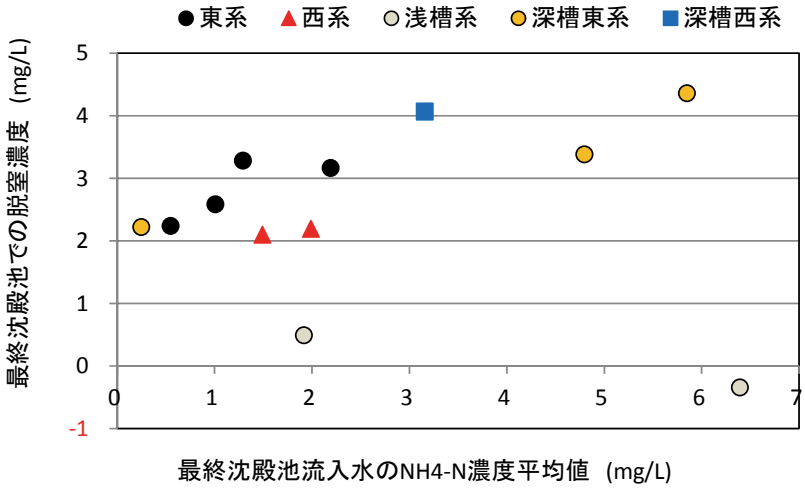


図 19　最終沈殿池流入水 NH_4-N と最終沈殿池での脱窒濃度の関係

浅槽系を除くと最終沈殿池での脱窒濃度は 2～4.5mg/L あった。当センターの反応タンク流入水全窒素濃度は、40mg/L（平成 27 年度通日試験年平均値）であることから、浅槽系以外は、反応タンクに流入した窒素のうち、最終沈殿池において 5～11%程度脱窒しており窒素除去率の向上に寄与していると推定できる。

5　窒素除去率向上に向けた運転方法の検討

5.1　最終沈殿池流入扉の開度調整による脱窒促進（浅槽系）

浅槽系の最終沈殿池では、流入部において固液分離が速やかに行われていることが脱窒していない理由と考えられた。流入扉を閉めていくと開口部を通過する速度が速くなり、流入扉通過後に乱流が発生する。これにより汚泥の沈降が妨げられ、脱窒時間がある程度確保できると予想される。最終沈殿池流入の導水渠の水位を確認しながら浅槽系の 7 池すべての流入扉の開度を調節して、流入部において活性汚泥の巻き上がり（乱流）がわずかに確認できる程度まで流入扉を閉めていった。この状態で最終沈殿池の流入水と流出水の形態別窒素濃度の時間変動を確認した（図 20 および図 21：平成 28 年 8 月 31 日～9 月 2 日）

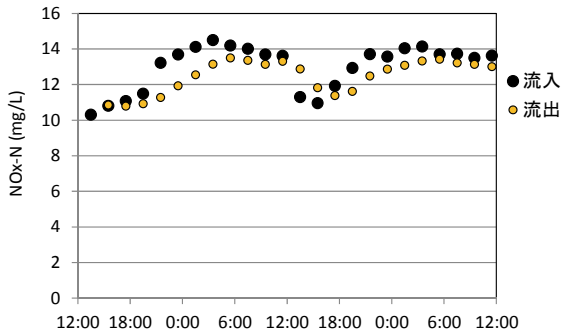


図 30　最終沈殿池 NOx-N の変化（浅槽系）

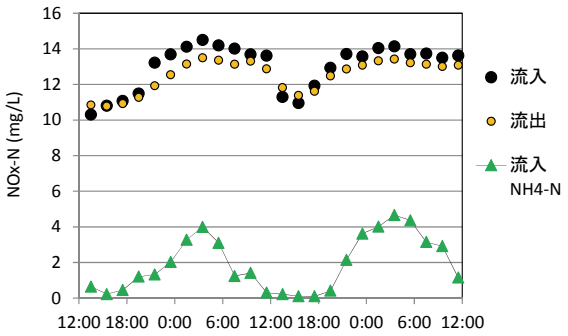


図 21　ピークを合わせたグラフ（浅槽系）

最終沈殿池流入扉の開度調節により、わずかであるが、浅槽系の最終沈殿池でも脱窒が確認できた（平均0.5mg/L）。この流入扉の開度調節によりこれまでできなかった最終沈殿池での脱窒がわずかであるが発生させることができるようになった。また、図21に示したように最終沈殿池での脱窒は、NH_4-N濃度が高い時間帯に限定されており、最終沈殿池流入水のNH_4-N濃度が脱窒に重要な因子であることが再確認できた。

5.2　深槽東系および深槽西系での風量調整による脱窒量の調整

当センターは、反応タンク流入水の BOD、全窒素濃度ともに高く、硝化を維持することが難しいことから、比較的高い MLSS での運転を心掛けている。これまでの調査結果から、最終沈殿池流入水の NH_4-N 濃度が高くなるほど脱窒に有利となるが、硝化の安定化や処理水 BOD の観点から、処理水の NH_4-N を 2～5mg/L 程度の範囲に収めることを目標に風量調節を行うこととした。

浅槽系と西系は、水量一定運転で、他の深槽東系と深槽西系では水量変動運転となっている。このため、深槽東系と深槽西系は反応タンクへの負荷の時間変動が大きく、時間帯によって処理水のNH_4-N濃度が大きく上昇する。その例を図22に示す。

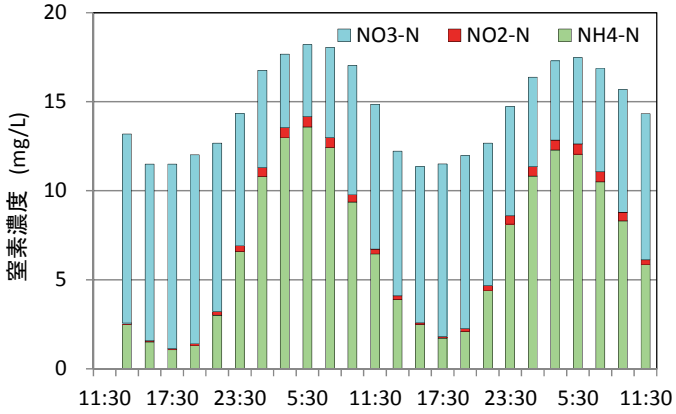
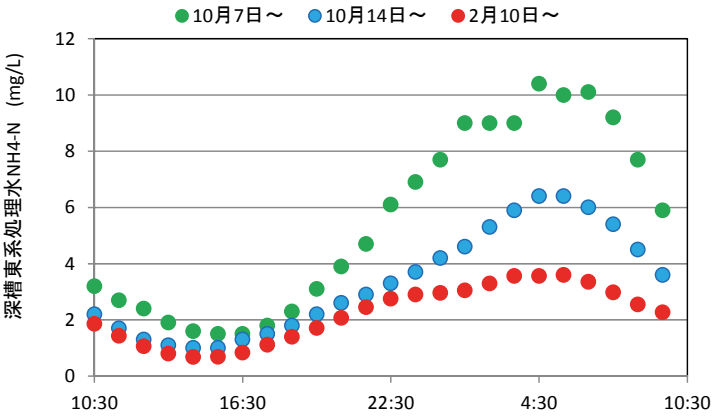


図 22　処理水窒素濃度の時間変動（深槽東系）

日中の NH_4-N 濃度は比較的低いが、早朝には 10mg/L を超えている。このように早朝の NH_4-N 濃度が極端に高い状況のとき、平成 27 年度までは、DO 設定値を上げて全体の NH_4-N 濃度を下げるように風量を調節してきた。DO 設定値の調整とその時の処理水 NH_4-N の 24 時間変動の過程を図 23 に示す。



	処理水1m^{3}当たりの風量 (Nm^3/m^3)
10月7日～	8.1
10月14日～	8.5
2月10日～	9.3

図 23　処理水 NH_4-N の変動パターン（平成 27 年度調査結果より）

10 月 7 日～のデータでは、翌日の早朝に NH_4-N が 10mg/L を超えていたため、DO 設定値を上げて（2.5→3.0mg/L）送風量を増大させた。その結果、10 月 14 日～のデータからわかるように NH_4-N 濃度は全体的に低下して、最も低くなる時間帯には 1mg/L まで下がった。2 月 10 日～のデータでは、翌日の早朝の NH_4-N が 4mg/L 未満となり硝化が順調に進んでいる。しかし、NH_4-N が低下する時間帯には 1mg/L を下回っており、ピーク時間帯の NH_4-N を下げた結果、特に、日中の時間帯の最終沈殿池での脱窒が減少したと推定される。また、処理水 1m^3 当たりの風量は NH_4-N 濃度の低下とともに増加した。

前述したように、NH_4-N の変化に対して脱窒速度の変化は緩やかであることから、処理水の NH_4-N 濃度の変動を抑えて、日平均値で現状並みの NH_4-N 濃度とすることで水質の安定化と省エネルギー化が図れると考えられる。図 23 で示したように DO 制御で単純に DO 設定値を上げて、硝化を進めるだけでは、これが望めないことから、図 24 に示すように、DO 設定値の細分化を段階的に進めていった。

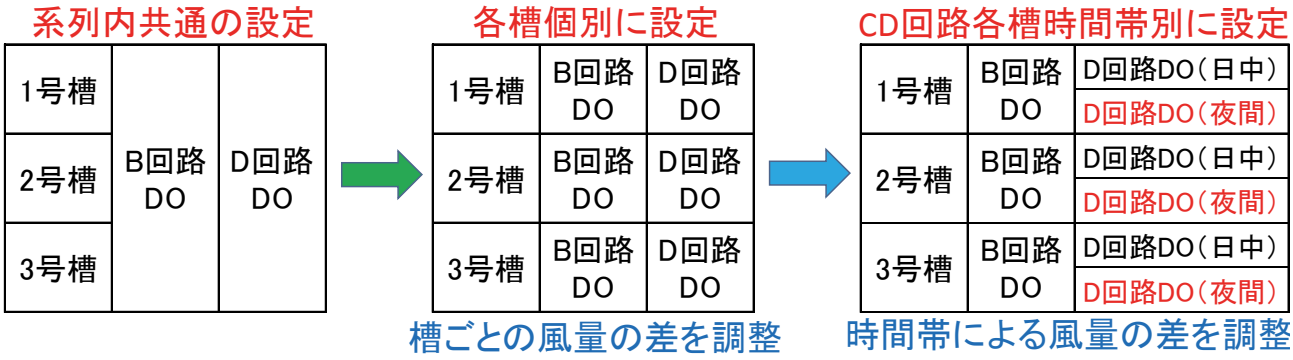


図 24　DO 設定値の細分化（深槽東系および深槽西系）

当該系列は、B 回路と D 回路に DO 計を設置してそれぞれ個別に DO 制御によって風量調整している。これまでは、AB 回路および CD 回路の DO 設定値を 3 池共通の値で調整してきた（図 24 の左）が、各槽で好気タンク出口の NH_4-N 濃度に差がみられるため DO の設定値を槽別に調整するようにした（図 24 の中央）。次の段階では、図 22 に示したように時間帯によって NH_4-N 濃度が大きく変動することから、日中と夜間で DO 設定値を変更することとした（図 24 の右：6 時と 18 時に変更）。ここで、好気タンク前半の風量に

ついては、NOx-N 計で制御している東系の AB 回路での 24 時間の風量変動が比較的小さいことから、これを参考に深槽東系と深槽西系の AB 回路の DO 設定値については時間帯による変更は行わなかった。なお、休日には、流入水の NH_4-N 濃度は他のセンター並みに低くなり、かつ、時間変動もほとんどなくなることから、休日対応運転として CD 回路の設定値を平日の日中よりもさらに低くし、時間帯での DO 設定値の変更は行っていない。時間帯による DO 設定値の変更を実施する前と実施時の処理水 NH_4-N の変動を図 25 に示す。

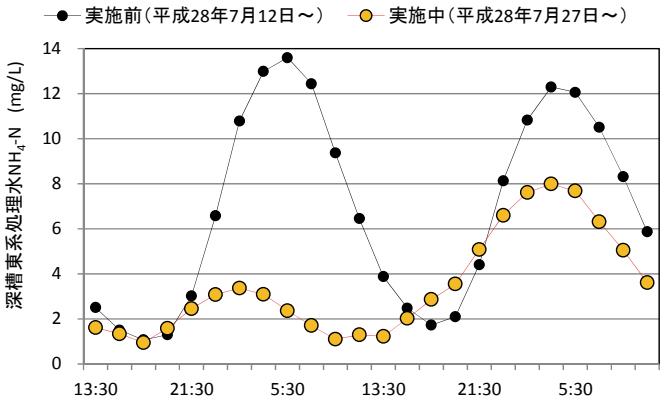


図 25　処理水窒素濃度の時間変動（深槽東系）

時間帯による DO 設定値の変更を実施することで NH_4-N のピークを低くすることができた。ただ、NH_4-N 濃度が低くなる時間帯では 1mg/L 以下になっており、脱窒促進のためには日中の DO 設定値をさらに引き下げるなど、まだ少し設定値の調整が必要である。今後、硝化の状況を見ながら、設定値の微調整により脱窒促進と省エネルギー化を進めていく予定である。

6　まとめ

東系施設での調査において、好気タンク出口のNH_4-N濃度が高くなるほど活性汚泥混合液の脱窒速度が上昇する傾向が見られ、その結果、最終沈殿池での脱窒が促進されることが確認できた。そのほかの系列の最終沈殿池での脱窒状況を確認したところ、固液分離が速やかに行われる浅槽系のサイホン式沈殿池以外で脱窒が確認でき、現状では、反応タンクに流入した窒素の5～11%程度が最終沈殿池で脱窒していると推定された。最終沈殿池での脱窒促進では、MLSSを高くし、処理水のBOD等を考慮しながらNH_4-N濃度の目標値を定めることが重要と考えられる。また、最初沈殿池の運用池数を縮小して反応タンクへの浮遊性有機物を増すことで最終沈殿池での脱窒が促進されることが分かった。

最終沈殿池での脱窒が認められなかった浅槽系では、最終沈殿池流入扉の開度調整により活性汚泥の固液分離を少し抑制することで0.5mg/L程度の脱窒が確認できた。

処理水の NH_4-N 濃度の時間変動が大きい深槽東系と深槽西系では、負荷変動を考慮した時間帯による DO 設定値の変更を実施することで、夏季の高水温により硝化が安定する期間においては省エネルギーに加えて硝化と脱窒の促進運転が可能になると考えられる。

7　今後の展開

最終沈殿池での脱窒促進運転では、好気タンク出口の NH_4-N 濃度の調整が重要である。深槽東系および深槽西系では、硝化が安定している期間で、時間帯による DO 設定値の変更を実施しているが、設定値の管理が煩雑であるので、アンモニア計による風量制御（アンモニア制御）の導入を予定している。アンモニア制御では SVI の上昇による汚泥の越流のリスクがあるが、NH_4-N 濃度が一定になるよう風量が調節できることから負荷変動を考慮した DO 設定値の変更が不要となり、硝化が安定している期間は好気タンクから最終沈殿池での脱窒促進運転の効率化だけでなく、省エネルギー運転も可能となる。

2-1-5　落合水再生センターにおける
冬期水質悪化に対する取り組みについて

西部第一下水道事務所　落合水再生センター
○松下　勝一・吉野　翔吾・渡辺　崇一・大瀬　俊之・関口　郁子
糸川　重五郎・佐藤　浩・阿部　潤
杉本　浩行・星野　亘・大島　日出夫・鈴木　祐司・及川　智

１．　はじめに

落合水再生センター（以下、当センター）は都市の中心部に建設され、昭和 39 年に運転を開始した施設である。当センターの処理水は都心部の中小河川に放流しているが、放流先の河川は上流からの河川水量が少ないため、センターからの放流水質が河川に及ぼす影響が大きい特徴がある。このことから、放流先河川の水質改善のため昭和 62 年より処理水のほぼ全量を砂ろ過して放流している。

当センターは運転開始から 50 年以上経過し、砂ろ過設備においても 30 年近くが経過している。そのため、砂ろ過水質の悪化が生じるなど、施設・設備の老朽化が問題となっている。また、立地条件から拡張用地も無く再構築工事が難しい状況であり、水処理においても計画処理能力の約 7 割を常時使用していることから処理能力に余裕がない。その結果、特に冬期では生物処理における汚泥の活性が低下し、処理水質が悪化しやすい傾向にある。さらに、老朽化した設備の更新工事が重なることで、より深刻な水質悪化を招いていた。

そこで、当センターでは平成 25 年度より、冬期の施設停止を最小限に抑え、砂ろ過設備の更新を進めることで、放流水質の改善を図ってきたので、その取組内容と放流水質の改善効果を報告する。

２．　取組背景

当センターの処理方式は「標準活性汚泥法＋砂ろ過（上向流式）」であり、通常時には最終沈澱池を出た二次処理水の全量を砂ろ過設備に通し放流している。**表１**に当センターの施設形状及び処理条件（平成 27 年度平均値）を示す。当センターからの放流水は、放流先河川への影響が大きいことに加え、再生水としても利用していることから安定した放流水質が強く求められている。しかし、**図１**で示すように平成 23 年度から二次処理水及び砂ろ過水の浮遊物質濃度（以下、SS）の上昇が確認されるようになった。そこで、水質悪化の要因を洗い出し、その改善に向けた取り組みを進めることとした。

表１　反応槽・最終沈殿池・砂ろ過施設形状及び処理条件

			昭和39年稼働		昭和61年稼働
			南側1系	南側2系	北側
施設形状	反応槽	容　量（m^3）	37,370	37,630	13,450
		水　深（m）	4.8	4.8	12.0
		散気水深（m）	4.5	4.5	4.0
		散気方式	※全面曝気	全面曝気	片側旋回
	終沈	沈殿池容量（m^3）	18,150	21,550	7,920
		沈殿池水面積（m^2）	7,100	7,700	2,360
	砂ろ過	ろ過面積（m^2）	2,240		
		使用池数	33		
（平成二十七年度）処理条件	反応槽	処理水量（m^3/日）	131,900	140,690	50,220
		H　R　T（時）	6.9	6.5	7.4
		BOD･SS負荷（kg/kg･日）	0.40	0.43	0.30
		返送汚泥率（%）	47	44	51
		平均MLSS（mg/L）	1,300	1,300	1,280
		S　R　T（日）	7.3	8.0	6.2
	終沈	沈殿時間（時）	3.3	3.2	3.8
		水面積負荷（m^3/m^2･日）	18.6	20.8	21.3
	砂ろ過	処理水量（m^3/日）	277,580		
		ろ過速度（m/日）	128		

※反応槽1系：1/4槽は片側旋回流（H29更新工事予定 ）

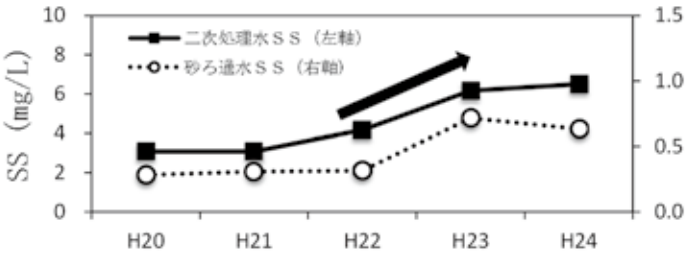


図１　二次処理水及び砂ろ過水ＳＳ（年平均値）

３．　取組内容

(1) 二次処理水質悪化の原因の検討

二次処理水の処理状況について、図２に示す。12月から4月にかけての低水温期では処理状況が不安定となる傾向があり、特に平成23年度からは著しく状態が悪化し、SSが急激に上昇したことがわかる。このことから、平成23年度以降の処理状況悪化の要因と改善策について検討した。

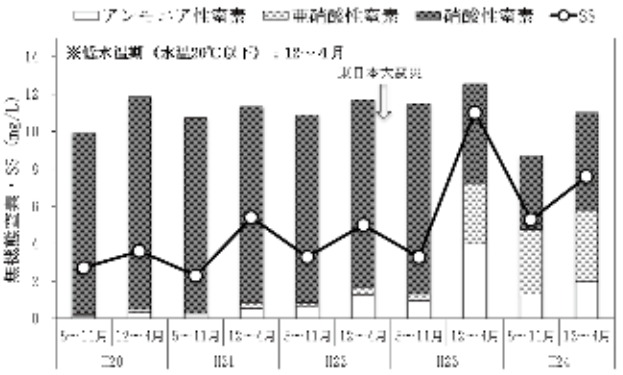


図２　二次処理水処理状況（上・下半期平均）

(2) 砂ろ過水質悪化の原因の検討

砂ろ過設備においては、ろ材の追加など設備補修を行っていたものの、場所によって損失水頭の増大に伴う洗浄回数の増加や洗浄工程後のろ過水で濁りが確認されるなどの不具合が発生し、再生水水質への影響が懸念される状況であった。そこで砂層の更新工事に踏み切り、砂ろ過設備内部を確認することとした。

４．　取組結果

(1)二次処理水質悪化要因と改善対応

処理状況と施設・設備停止の関係を図３に示す。複数個所での工事（耐震補強工事含む）による施設停止が低水温期に重なった平成23年度から24年度にかけて、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素の残存が高まり、長期間にかけ継続した。

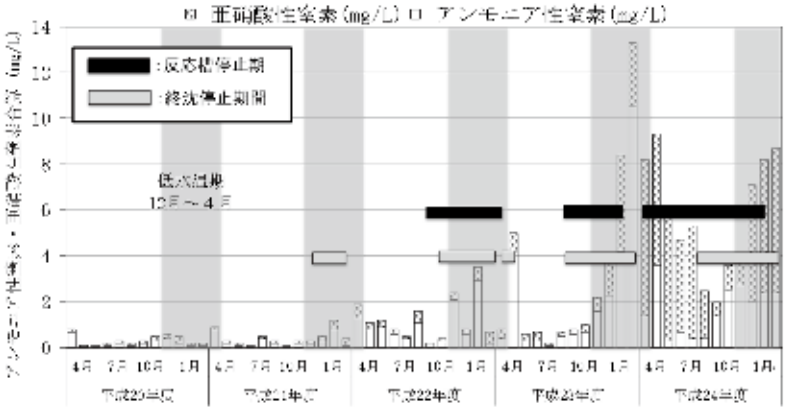


図３　処理状況と施設・設備停止状況（Ｈ20～24）

平成23年度は10月から3月にかけ、南側1系の反応槽4槽中1槽、最終沈殿池5池中2池が停止していたため、水量調整などにより各槽ごとのバランスが崩れるとともに、他系列への水量負荷が増大し、全体として処理状況が悪化していた。また、平成24年度には9月から3月にかけ南側1系の最終沈殿池5池中1池、2系の反応槽4槽中1槽が停止し、冬期の水質悪化が長期化した。平成20～24年度のSRTを比較して表２に示す。平成23、24年度は施設停止の影響でSRTが低下した状況が継続していた。当センターは処理能力に余裕がなく、最終沈殿池での滞留時間が3時間前後であり、汚泥越流の危険性からMLSS濃度を高く維持できない。加えて、工事による施設停止からSRT低下が長期間継続し、低水温期に入って以降もその状態が続いたことで硝化促進の維持ができなくなり、二次処理水のSSも悪化したものと考えられた。

表２　南1,2系施設におけるＳＲＴ（日、期間平均値）

	平成20年度		平成２１年度		平成22年度		平成23年度		平成24年度	
	5月～11月	12月～４月	5月～11月	12月～４月	5月～11月	12月～４月	5月～11月	12月～４月	5月～11月	12月～４月
南１系	7.3	7.7	6.7	6.3	6.2	6.9	5.3	4.9	7.4	9.9
南２系	5.1	4.7	4.6	5.0	4.6	4.7	3.6	4.3	3.8	3.8

(2) 砂ろ過水質悪化原因と改善対応

砂ろ過設備の老朽化による破損状況を図４に示す。砂ろ過設備の底部コンクリートが剥離し、送水管内に砂礫が堆積した状況であった。砂ろ過設備では洗浄時にも送水管を使用しているため、送水管から池内に入る枝管が砂礫で閉塞し、洗浄工程が正常に行われず、ろ過水の水質が悪化した可能性が高いことが分かった。次に、砂ろ過設備更新後の池内状況を図５に示す。底部の剥離を修繕し送水管内の砂礫残渣も除去され、通常状態に戻っている。

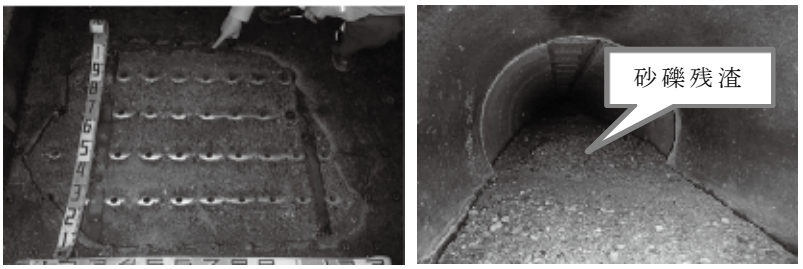


図４　砂ろ過設備底部（左）及び送水管内状況（右）

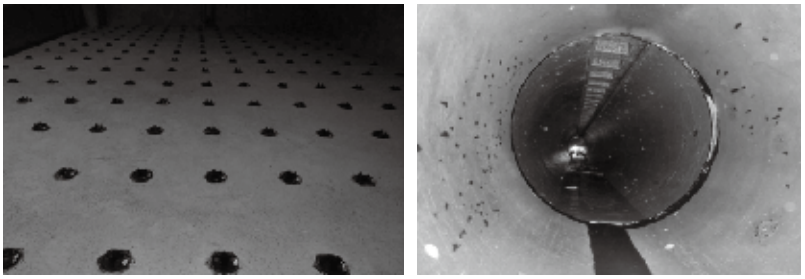


図５　砂ろ過設備底部修復（左）及び送水管更新状況（右）

(3) 改善対応の効果

平成 25 年度以降の処理状況と施設・設備停止の関係を図６に示す。平成 25 年度より低水温期における施設停止を最小限にして、維持すべき処理能力の基準を確保するため、関連部署と協議し、実施時期を変更するなどの対応を行った結果、SRT を維持し硝化促進を図ることができた。ただし、平成 25 年度は表３で示す通り、低水温期に SRT が過大な値に算出されている。これは耐震工事後の最終沈殿池で排水弁門扉に隙間ができて汚泥が流出し、反応槽内 MLSS が 1000mg/L 前後まで減少したため、それを抑えるために余剰汚泥引抜量を最小限まで下げたためであり、実際には SRT は低下していたものと考えられる。

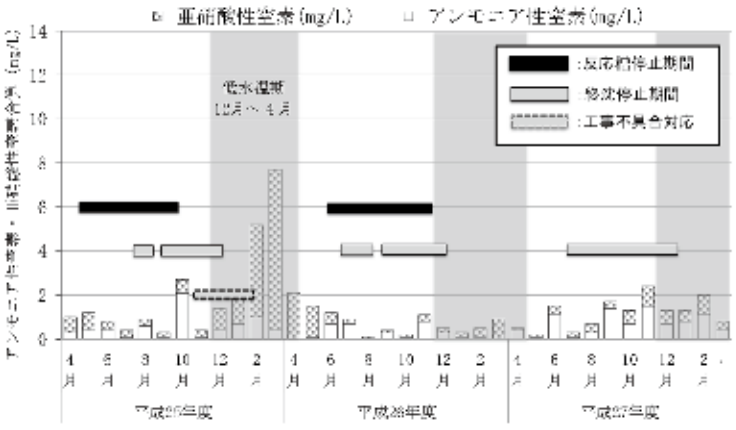


図６　処理状況と施設・設備停止状況（Ｈ25～）

表３　南 1,2 系施設におけるＳＲＴ
（日、期間平均値）（Ｈ25～）

	平成25年度		平成26年度		平成27年度	
	5月～11月	12月～4月	5月～11月	12月～4月	5月～11月	12月～4月
南１系	8.8	19.3	13.7	6.3	7.2	9.4
南２系	4.8	4.9	5.0	5.9	9.1	8.9

砂ろ過設備については、更新工事を平成 25 年度より開始し、その後も継続して順次更新を進めている。砂ろ過水質と更新工事池数の関係を図７に示す。砂ろ過設備更新工事の池数が増加するにつれ、砂ろ過水の SS 濃度も低下傾向にあり、一定の効果が確認された。

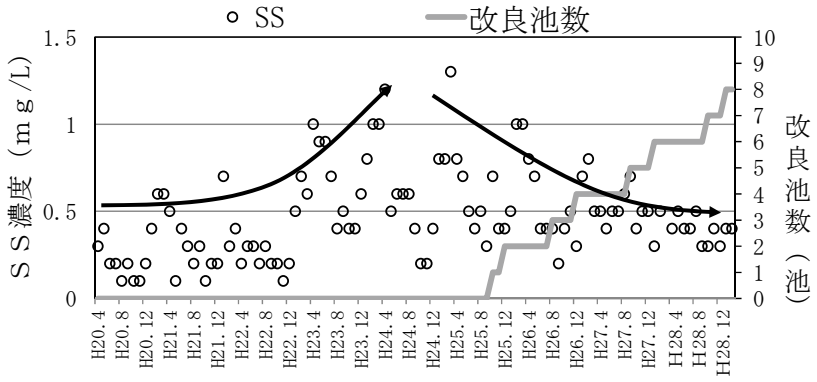


図７　砂ろ過水質（ＳＳ）と砂ろ過池更新工事池数

５．　まとめ

当センターでは、平成 23 年度以降、低水温期に処理状況悪化（二次処理水及び砂ろ過水の SS 上昇）が生じていた。この要因について調査した結果、工事に伴う施設停止により低水温期に SRT 低下の状態が続いて硝化促進の維持が困難となったこと、砂ろ過設備の底部コンクリートの剥離により送水管内に砂礫が堆積し、洗浄工程が正常に行われていなかったことなどが原因と推定された。そこで、平成 25 年度より、工事の実施時期の変更等により SRT を維持し硝化促進を図るとともに、砂ろ過設備の更新工事を開始した。その結果、二次処理水質の安定化と砂ろ過水の水質向上が図れ、放流先河川への汚濁負荷軽減と再生水水質の向上につながった。今後も引き続きこの取組を継続し、放流水質の改善に努めていく。

2-1-6　みやぎ水再生センターにおける
制限曝気運転による窒素削減の取組について

西部第二下水道事務所　みやぎ水再生センター　水質管理担当
玉井奈生子、熊田翔史（現　水道局）
大江学、中村浩一郎、石井健一

1.　はじめに

みやぎ水再生センター（以下、当センター）の水処理施設は、浅槽反応槽の西施設と深槽反応槽の東施設からなり、約 16 万 m^3/日の処理水を隅田川に放流している。赤潮の発生が依然として問題になっている東京湾の水質改善に加え、東日本大震災の発生を機に電力削減の取組も一層求められている。

このため、当局では準高度処理法の導入[1)]や運転管理の工夫などを推進している。運転管理の工夫の１つに反応槽中段で制限曝気により無酸素ゾーンを形成して脱窒を促進させる運転（以下、制限曝気運転）があり、当局の砂町水再生センターなどにおいて制限曝気運転による窒素の削減を報告している[2) 3)]。同運転の特長は、水処理能力に余裕がある場合において施設を改造せず、反応槽の一部の散気装置を絞るのみと非常に簡単な方法で窒素を低減できる点にある。

当センターでは､制限曝気運転による窒素の削減を目的に平成 27 年度から西施設の一部で同運転の調査を実施し一定の効果が得られたことから､平成 28 年度より西施設の全槽で運用を開始している。さらに、深槽の東施設でも平成 28 年度に調査を進め、冬季から全槽で運用している。この間の調査及び運用の結果から得られた窒素削減の効果等について報告する。

2.　調査方法

2.1　西施設の調査概要

当センターの水処理施設の主な仕様を表１に示す。西施設反応槽はＡ～Ｄ回路からなる折り返し構造の浅槽式であり、Ａ回路上流はりん除去のために寸開（17%）としている。制限曝気運転を行う実験槽ではＣ回路上流のライザー弁を絞り、無酸素領域を形成することで脱窒を促進させた。

表１　水処理施設の仕様

	西施設	東施設
反応槽（深さ）	浅槽(4.2m)	深槽(12m)
反応槽容積	7,410 m^3×4 槽	5,800 m^3×4 槽
処理方式	標準活性汚泥法 （疑似嫌気）	AO 法
散気方式	全面曝気	片側旋回流
散気設備	高密度散気板	メンブレン
反応槽滞留時間	7.0h*	6.5h*
MLSS	1,800～2,200 mg/L*	1,500～2,000 mg/L*
風量制御	AB 回路：一定風量 CD 回路:DO 制御	DO 制御
流入水質(T-N)	20～30 mg/L*	20～30 mg/L*

*平成 27 年度実績値

2.1.1　調査

西施設の反応槽 3 号槽を実験槽、2 号槽を対照槽とて、各回路における窒素の挙動とＤ回路の窒素の時間変動について調査した。絞るライザー弁は実験槽のＣ回路上流から 3 か所とした（図 1)。

2.1.2　全槽運用

平成 28 年 4 月から全槽で制限曝気運転を行い、放流水の全窒素について前年度と比較を行った。なお、同年 10 月下旬からは 3 か所としていたライザー弁の絞りを 5 か所に拡大して運用した。

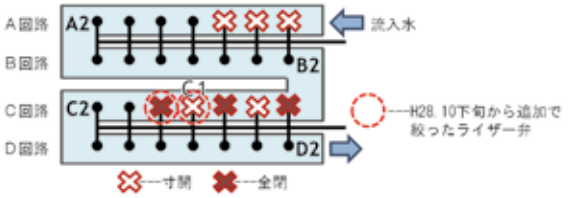


図 1　西施設実験槽のライザー弁操作状況と採水場所

図 2　東施設対照槽・実験槽のライザー弁開度（%）

2.2　東施設の調査概要

東施設反応槽は、隔壁によりＡ～Ｄ回路に分割された深槽式である。図 2 に示したように実験槽のＣ回路ライザー弁開度を 12%として、平成 28 年度から調査を開始した。

RUN①：反応槽 3 号槽を実験槽、1 号槽を対照槽とした期間

RUN②：両槽を対照槽の条件とした期間

RUN③：RUN①の実験槽と対照槽を入れ替えた期間

RUN①～③の期間において、窒素削減効果の検証を行い、併せて送風量の比較も行った。また、西施設と同様に各回路における窒素の挙動についての調査も行った。

3.　調査結果と考察

3.1　西施設

西施設の実験槽と対照槽で、滞留時間を考慮して A 回路から順に採水した際の窒素の挙動を図 3 に示す。採水場所は図 1 に示した通りである。対照槽で窒素は減少していないのに対し、実験槽ではＣ回路上流の無酸素領域の前後で無機性窒素濃度の合計が 1.3 mg/L 減少した。また、別の調査日では、反応槽 D 回路の無機性窒素濃度について 24 時間の変動を 2 時間毎の採水で調べたところ、加重平均で対照槽は 11.0 mg/L、実験槽は 10.0 mg/L であり、窒素は 1 割減少していた。

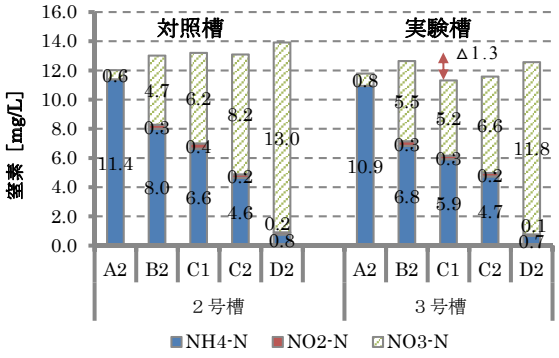


図 3　西施設反応槽における窒素の挙動

平成 28 年 4 月より西施設の全槽で制限曝気運転を運用した際の放流水全窒素の各月平均を図 4 に、平成 27 年度と平成 28 年度（3 月は中旬までの値からの見込み）の放流水全窒素の加重平均について表 2 にまとめた。両年度の流入水質、運転条件はほぼ同等であった。なお、平成 28 年 10 月下旬に 3 か所としていたライザー弁の絞りを 5 か所に拡大したところ、より効果が見られたため、以降はライザー弁を 5 か所絞った条件で全槽運用している。図 4 から、制限曝気を行うことにより通年安定して放流水の全窒素が削減できることがわかった。その効果は表 2 に示すように約 1 割と考えられ、調査の結果と一致していた。これらの結果から、西施設反応槽の制限曝気運転の窒素削減効果を確認できた。

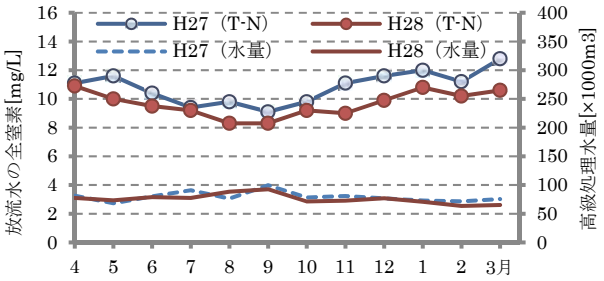


図 4　西施設放流水全窒素の推移

表 2　西施設放流水の年度比較

	放流水全窒素		高級処理水量
	加重平均 (mg/L)	H27 年度比 (%)	H27 年度比 (%)
H27 年度	10.4	100	100
H28 年度	9.3	89.7	96.4

3.2　東施設

RUN①における実験槽、対照槽（図 2）で、滞留時間を考慮して A 回路から順に採水した際の窒素の挙動を図 5 に示す。無機性窒素濃度の合計を見ると、対照槽では B 回路で最も脱窒していたのに対し、実験槽では C 回路でさらに脱窒が進行していた。B 回路末端から C 回路末端にかけて、対照槽では無機性窒素濃度の合計が 1.3 mg/L 減少したのに対し、実験槽では 2.8 mg/L 減少していた。

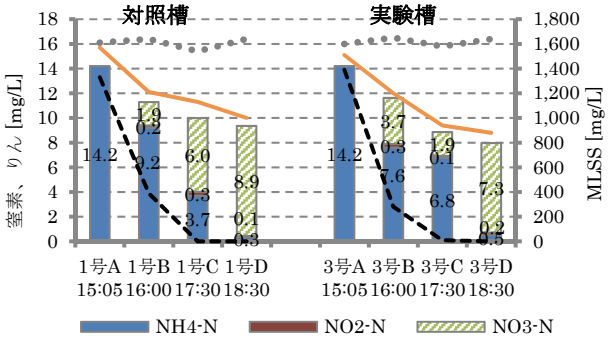


図 5　東施設反応槽における窒素の挙動

反応槽 C 回路の鉛直方向 DO を測定したところ、実験槽では低 DO（0.2 mg/L 以下）の範囲が対照槽のおよそ 3 倍であった。このため、B 回路に加えて C 回路でも脱窒が促進されたと考えられる。

RUN①から RUN③の期間における、各日午前 10 時の反応槽 D 回路における無機性窒素濃度の合計の変化を図 6 に示し、平均値と減少率について表 3 にまとめた。なお、調査を行った 1 号槽と 3 号槽は、処理水量等の条件が同等であることを確認している。実験槽の窒素は対照槽比で約 2 割減少し、実験槽と対照槽を入れ替えた際も同様の結果が得られた。調査期間中における実験槽の送風量は対照槽と比較して同等あるいは減少していた。

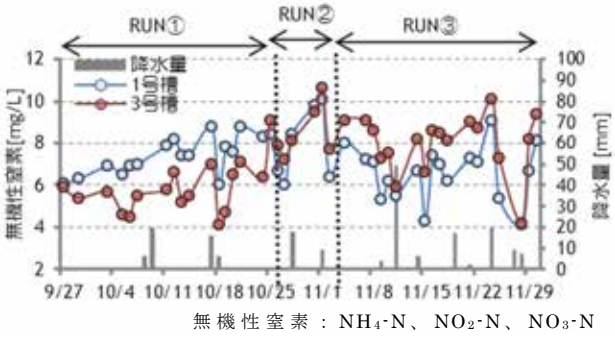


図 6　東施設長期調査における窒素の変化

西、東施設の全槽で制限曝気運転を行った際の放流水のアンモニア性窒素濃度は概ね 1.0 mg/L 以下であり、硝化は良好に進行していた。また、りん処理への悪影響も見られなかった。

表 3　東施設長期調査における窒素の平均値

	調査期間	実験槽	対照槽	D回路窒素		
				1 号	3 号	減少率*
				mg/L		%
ＲＵＮ①	H28.9.27 - 10.24	3 号	1 号	7.4	5.7	23
ＲＵＮ②	10.24 -11.1	通常運転		9.4	9.4	0
ＲＵＮ③	11.1 – 11.30	1 号	3 号	6.6	8.0	18

*（減少率）=｛(対照槽) －（実験槽)｝／（対照槽）×100

4. 結論

浅槽式及び深槽式反応槽における窒素削減の取り組みとして、制限曝気運転の調査を行った結果、以下のような結果を得た。

(1) 浅槽式の西施設での調査において、実験槽の窒素は約 1 割削減された。さらに、平成 28 年度に全槽で運用した結果、放流水全窒素は前年度比で同じく約 1 割削減され、制限曝気運転による窒素削減効果が確認できた。

(2) 深槽式の東施設において、実験槽の窒素は対照槽比で約 2 割削減された。浅槽式反応槽の制限曝気運転については過去に報告されているが、今回の調査で深槽式においても同様に窒素削減効果を確認できた。

参考文献

1) 葛西孝司：準高度処理の早期導入～電力使用量を増やさずに水質改善～、第 50 回下水道研究発表会講演集、2013

2) 佐藤麻貴ほか：浅槽反応槽の窒素削減に向けた新たな取組について、第 52 回下水道研究発表会講演集、2015

3)足立悠介ほか：浅槽式反応槽における無酸素領域形成による好気槽内脱窒の促進について、第 53 回下水道研究発表会講演集、2016

2-2-1　「分離処理システム」による焼却炉の資源化技術の開発

計画調整部　技術開発課　池田　光

1　はじめに

近年、処理水量に対して高度処理水量の割合が高い東京都の水再生センターにおいて、汚泥焼却炉のダクトの閉塞やけい砂の流動不良といった不具合の発生[1)]により（図 1）、焼却炉が停止を余儀なくされるケースが発生した。調査の結果、汚泥中のりんに対して金属類（鉄、アルミニウム、マグネシウム、カルシウム）の比率が低くなることが不具合発生の原因であることが解明[2)]できている。現在は、対策としてポリ鉄（金属含有薬剤）を脱水汚泥に添加し、汚泥中の金属類の比率を高めることで、焼却炉の安定稼働を図っている。

図 1　焼却炉の不具合事象（左：ダクトの閉塞、右：けい砂の粗大化による流動不良）

一方この調査の過程で、第二沈殿池から発生する余剰汚泥には、りんが 40%を超える濃度で含まれていることが判明した。余剰汚泥中の高濃度のりんは焼却炉の不具合事象の原因であるとともに、りんはセメントの強度を低下させる成分であることから、現在東京都が実施している焼却灰のセメント原料化を制約する要因となる。しかしながら、りん鉱石と同程度のりん濃度があるのであれば逆にりん資源として活用できるのではないかとの発想のもと、焼却炉の安定稼働とりんの資源化の両立を図る技術として分離処理システムを開発した。

2　分離処理システムの概要

分離処理システムとは、生汚泥と余剰汚泥を分離し、それぞれ別々の工程で処理することで、生汚泥灰をこれまでのセメント原料として再利用するとともに、余剰汚泥灰のりん資源化を図る技術である。分離処理システムの概要を図 2 に示す。

分離処理システムは、ダクトの閉塞等の不具合の防止とりん資源化への影響が少ない薬剤として消石灰を選定し、焼却炉の安定稼働を図っている。また、余剰汚泥の貯留により、分離液中へのりん再溶出を防止するため、速やかな脱水が可能な脱水機による直接脱水方式を採用した。さらに、通常よりも含水率が高い余剰汚泥を焼却する場合でも、焼却炉の廃熱を活用した乾燥機を使用することで、当局の高温省エネ型焼却炉の省エネルギー基準を達成している。

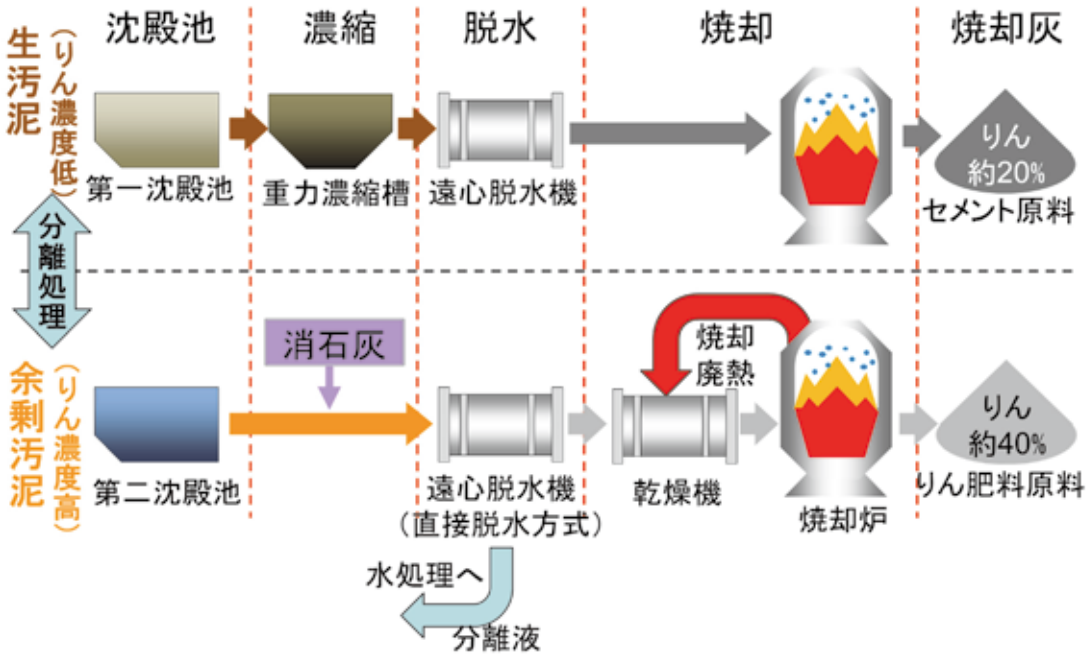


図 2　分離処理システムの概要

3　分離処理システムの開発

3.1　共同研究の概要

分離処理システムは余剰汚泥対応型脱水機及び余剰汚泥対応型焼却炉の 2 つの開発要素から構成されている。これらの開発は、研究目標を達成した技術を導入することを前提に共同研究者を公募する「開発技術の導入を前提とした共同研究」で行った。公募に対して脱水機、焼却炉ともに 3 者から応募があり、審査の結果、応募者全員を共同研究者として採用し、共同研究を開始した。共同研究のフィールドは東京都下水道局の清瀬水再生センターとし、共同研究期間は汚泥の脱水性が最も悪化する夏季に性能評価を実施するため、平成 28 年 4 月から 8 月に設定した。

3.2　余剰汚泥対応型脱水機の開発

余剰汚泥対応型脱水機は、脱水性が悪い余剰汚泥を直接脱水することができる脱水機である。分離処理システムではりん濃度の高い余剰汚泥を処理することから、返流水へのりんの再溶出による水処理の不安定化を防止する必要がある。そこで、りんの再溶出を抑制するため、通常は濃縮、脱水の 2 段階で処理する余剰汚泥を直接脱水することを考え、余剰汚泥対応型脱水機の開発に着手した。安定化余剰汚泥対応型脱水機の対象となる汚泥性状ならびに目標性能を表 1 に示す。

表 1　汚泥性状及び脱水機の目標性能

	種別	余剰汚泥
汚泥性状	汚泥濃度(%)	0.3～1.0
	有機分比(%)	85以下
目標性能	凝集剤注入率(%)	2.0以下
	安定化剤	消石灰
	余剰汚泥含水率(%)	82以下
	固形物回収率(%)	95以下
	消費電力(kWh/m^3)	1.5以下

また、安定化剤としては、以下の理由から消石灰を選定した。

①焼却炉のダクトの閉塞などの不具合事象防止効果がある。

②凝集効果があり、汚泥含水率の低下が期待できる。

③りん資源化に影響しない。（焼却後にりん鉱石の主成分であるりん酸カルシウムとなるため、りん資源化のフローで処理が可能）

④汚泥中のカリウム濃度を減少させる。（りん資源化の残渣は石こう材料として再利用されているが、カリウムには石こうを割れやすくする効果がある）

なお消石灰は過剰に添加すると pH が上昇し、汚泥の凝集性が低下するため、共同研究では pH8 程度を上限に管理して開発を行った。

3.3　余剰汚泥対応型焼却炉の開発

余剰汚泥対応型焼却炉は、通常よりも含水率が高いことから焼却しにくい余剰汚泥を安定して焼却できる焼却炉である。余剰汚泥対応型焼却炉の目標性能は、熱収支計算等により、余剰汚泥の焼却において、東京都下水道局が省エネルギー技術として認定している高温省エネ型焼却炉（第 2.1 世代型焼却炉）の基準を達成できるかを確認した。汚泥性状及び焼却炉の目標性能を表 2 に示す。

表 2　汚泥性状および焼却炉の目標性能

	種別	余剰汚泥
汚泥性状	含水率(%)	80
	可燃分(%-DS)	83
	灰分(%-DS)	17
	高位発熱量(kJ/kg-DS)	19,000
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
	使用補助燃料(Nm^3/t-DS)	40以下

4　共同研究結果

4.1　余剰汚泥対応型脱水機

共同研究では、安定して目標性能を達成できるかを評価するため、3 機種の遠心脱水機について 24 時間連続試験を実施した。1 回目の連続試験は、余剰汚泥のりん濃度を踏まえて、ダクトの閉塞などの不具合を防止するため、消石灰を 300mg/L 添加する条件で実施した。その結果、3 機種の脱水機全てで、含水率 82%以下の脱水汚泥を安定して生産できることを確認した。

また、1 回目の連続試験の結果から、安定化剤の添加量を増加させるなどの工夫により、脱水汚泥含水率をさらに低下できる可能性がみられたことから、更なる脱水汚泥含水率の低下を目標に、2 回目の連続試験を実施した。その結果、3 機種の脱水機全てで含水率 80%以下の脱水汚泥を安定して生産できることを確認した。

4.2　余剰汚泥対応型焼却炉

共同研究では余剰汚泥対応型脱水機で得られる脱水汚泥を乾燥・焼却した場合について、熱収支計算等で実施し、3 機種の焼却炉全てで高温省エネ型焼却炉と同等の省エネ性能が確保できるなど目標性能を全て満足していることを確認した。

4.3　りん資源化についての評価

分離処理システムでは、余剰汚泥の焼却灰をりん資源化することから、余剰汚泥対応型脱水機で生産した脱水汚泥を電気炉で焼却し成分分析を行い、りん資源化の受入基準に適合していることを確認した。また、比較のため脱水機に投入前の余剰汚泥についても同様の成分分析を行った。各焼却灰の成分分析結果および、りん資源化としての受入基準を表 3 に示す。分離処理システムを用いて生産した焼却灰は全ての項目でりん資源化としての受入基準を達成しており、りん資源化に適した焼却灰を生産できることを確認できた。

表 3　焼却灰成分分析結果および受入基準

項目	単位	余剰汚泥		受入基準
		消石灰添加前	消石灰添加後	
りん	%	49.0	38.3	30以上
金属類	%	20.0	14.4	15以下
けい素	%	12.0	8.2	16以下
カリウム	%	7.0	2.3	3以下
鉛	mg/kg	48	33	35以下

消石灰添加前：余剰汚泥をそのまま焼却した焼却灰
消石灰添加後：分離処理システムを用いて生産した焼却灰
受 入 基 準：りん資源化の受入基準　受入基準達成項目

5. おわりに

東京都下水道局は、高濃度のりんを含み脱水性が悪いことから取扱いが難しい余剰汚泥を安定して処理するとともに、りん資源化が可能な焼却灰の生産を可能とする分離処理システムを開発した。なお、分離処理システムは、東京都の清瀬水再生センターで平成 33 年度から稼働する予定となっている。

参考文献

1) 田辺 晃一：2-4-1 高度処理の推進と地球温暖化対策の両立に向けた課題と対応　技術調査年報 2014

2) 中田 友三：2-2-1 下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法及び閉塞防止方法 技術調査年報 2016

2-2-2　DS 発生量増加要因の検証及び東プラ汚泥集約化の効果

東京都下水道サービス株式会社　施設管理部
東部スラッジセンター　運転管理担当　吉野　竜平

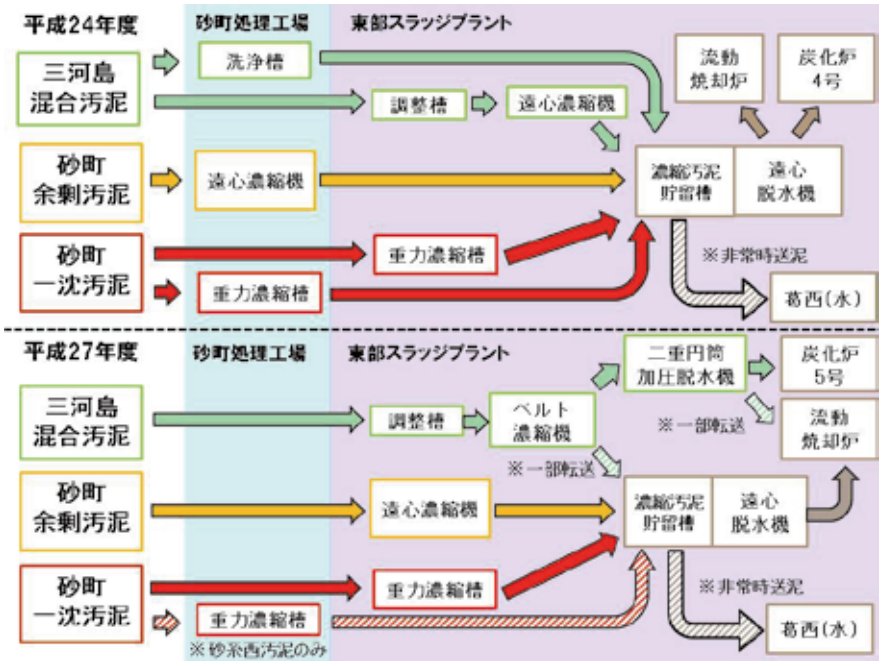
1.　はじめに

東部スラッジプラント（以下「東プラ」という）の汚泥処理は、調整槽・濃縮槽、ベルト濃縮機、炭化 5 号炉の稼働と設備の更新に伴い、砂町汚泥処理工場（以下「砂町」という）に分配処理していた汚泥を東プラへ集約処理している。(図－1 参照)その結果、汚泥処理状況が大きく変化した。その一つとして、総受泥量が減少傾向であるのに対し脱水ケーキ生産量（以下「DS 発生量」という）は増加の傾向を示している。

近年における収支状況の変動要因を調査し、汚泥処理状況を明確にすることで、東プラへの汚泥集約処理に伴う効果を検証する。

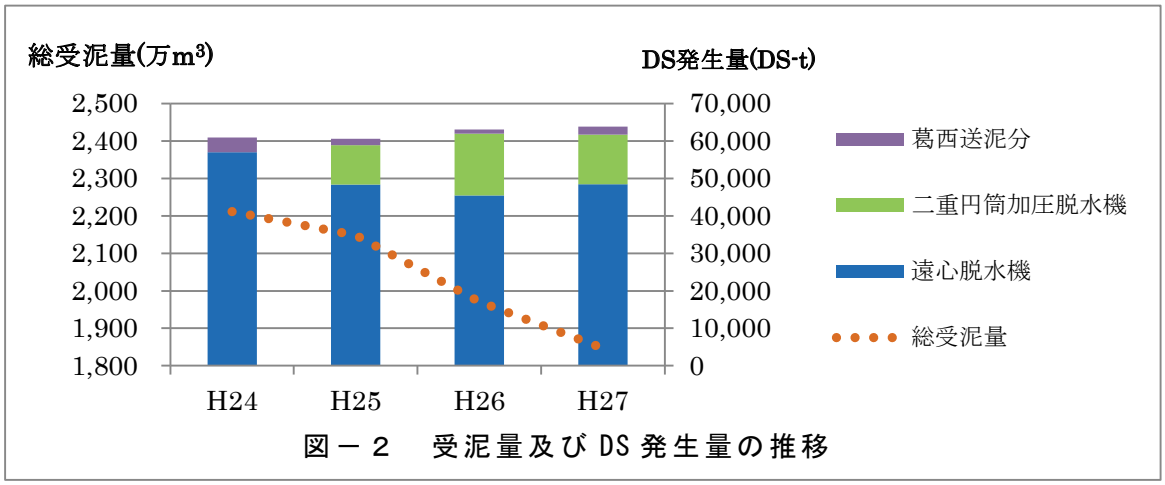
＜集約前＞

＜集約後＞



図－1　集約化による汚泥処理フローの変化

2. 汚泥処理状況の概要



図－２　受泥量及び DS 発生量の推移

図－2 では、DS 発生量(遠心脱水機、二重円筒加圧脱水機)に非常時葛西水再生センターへ送泥している濃縮汚泥 DS 発生量換算値を加えて、DS 発生量及び総受泥の推移を示している。近年総受泥量が減少しているが、それに反し DS 発生量は微増傾向が見られる。特に 26 年度を境に受泥量及び DS 発生量の変化が著しい。

3. 調査項目

総受泥量の減少及び DS 発生量微増の要因として、①各汚泥の受泥状況変化（三河島混合汚泥、砂町一沈汚泥及び余剰汚泥）、②東プラ集約処理に伴う汚泥回収状況の変化、の 2 点に着目し、調査する。

3.1 各汚泥の受泥状況変化

表－1 は三河島混合汚泥（以下「混合汚泥」という）、表－2 は砂町一沈汚泥（以下「一沈汚泥」という）、表－3 は砂町余剰汚泥（以下「余剰汚泥」という）の受泥状況変化について、「受泥量」、「汚泥濃度」、「固形分量」から検証する。汚泥濃度は、平成 25～27 年度「砂町汚泥精密試験」による試験結果の年間平均値である。

表－1　混合汚泥

項目 / 年度	受泥量 (万 m³)	濃度 (%)	固形分量 (DS-t)
H25	1,001.1	0.421	42,147
H26	1,008.6	0.458	46,195
H27	958.9	0.468	44,875

表－2　一沈汚泥

項目 / 年度	受泥量 (万 m3)	濃度 (%)	固形分量 (DS-t)
H25	744.0	0.674	50,176
H26	572.1	0.632	36,140
H27	479.6	0.603	28,930

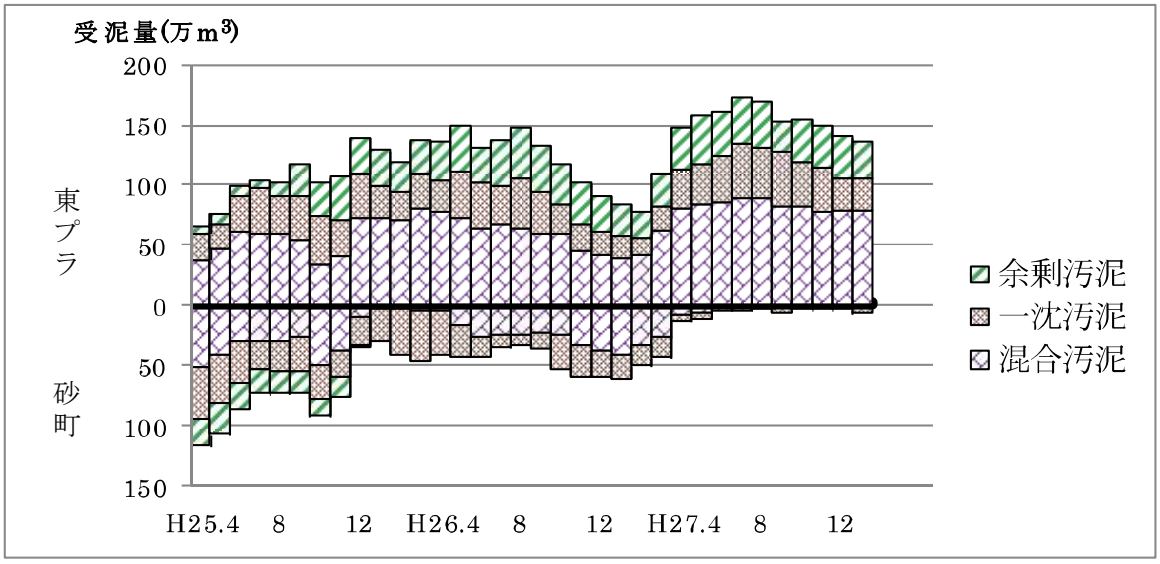
表－3　余剰汚泥

項目 / 年度	受泥量 (万 m³)	濃度 (%)	固形分量 (DS-t)
H25	387.4	0.524	20,294
H26	390.1	0.496	19,334
H27	392.7	0.525	20,633

混合汚泥では受泥量が微減する反面、濃度が微増している。余剰汚泥では受泥量が微増ながら濃度に大きな変化は見られなかった。一方、一沈汚泥は受泥量・濃度ともに減少傾向にある。また固形分量は、混合汚泥及び余剰汚泥では対前年度比±10%程度の変化であったが、一沈汚泥は対前年度比－20～－30%程度の減少となった。

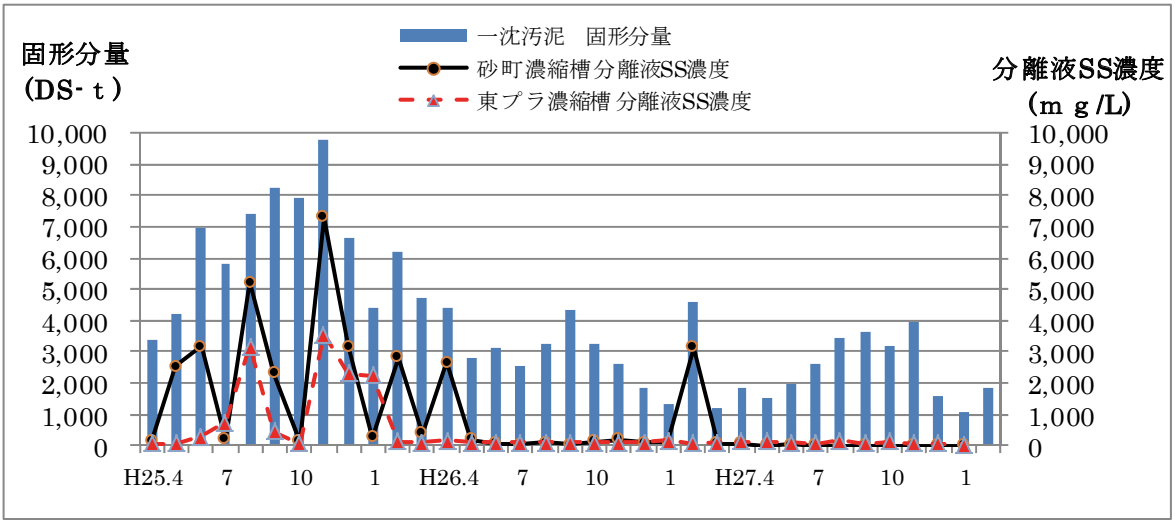
3.2　東プラ汚泥集約処理に伴う汚泥回収状況の変化

余剰汚泥は平成 25 年 12 月より余剰汚泥貯留槽の運用開始により、混合汚泥は平成 26 年度末ベルト濃縮機の増設と平成 27 年度の調整槽 1 槽追加により、一沈汚泥は平成 27 年度の東プラ濃縮槽 1 槽追加により全量(砂系西汚泥除く)を東プラに集約した。



図－３　東プラ及び砂町の受泥量推移

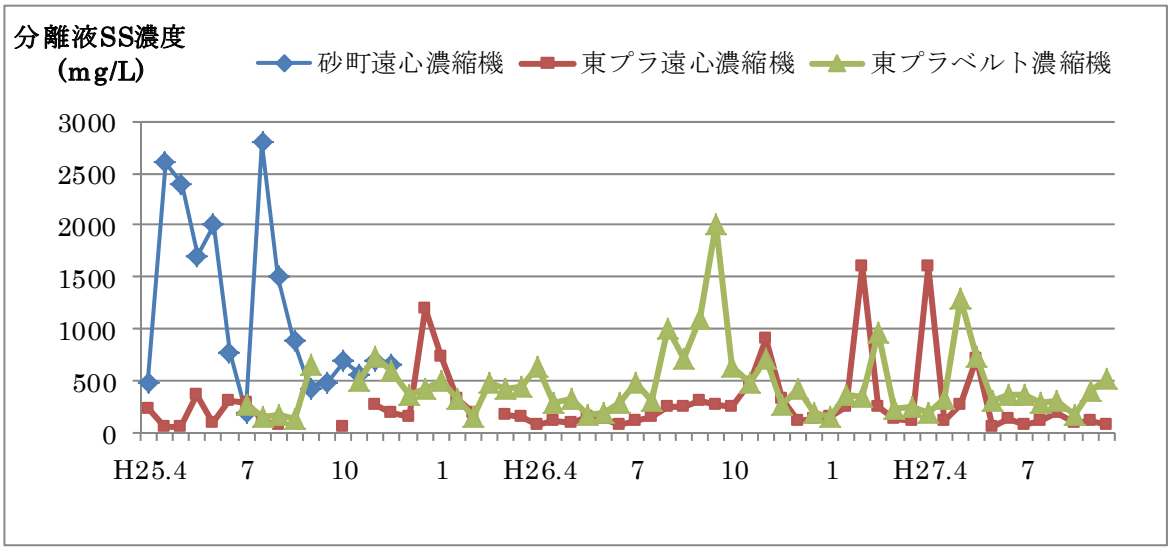
汚泥回収状況を調査するにあたり、各汚泥処理工程で発生する分離液の浮遊物質濃度（以下「SS 濃度」）に着目し、データ整理を行った。特に顕著な変化を示した重力濃縮槽の SS 濃度変化について、図－４にて示す。



図－４　重力濃縮槽における一沈汚泥回収状況の推移

図－４より、平成 26 年度を境に分離液の SS 濃度が急激に減少した。また一沈汚泥の受泥量（固形分量）も減少している。一沈汚泥受泥量減少の要因は、重力濃縮槽の汚泥回収率が飛躍的に向上した事により水処理への汚泥の戻りが減少した事によるものと推測する。

重力濃縮槽以外の設備における汚泥回収状況についても、平成 25 年度まで余剰汚泥を処理していた砂町遠心濃縮機に比べ東プラ遠心濃縮機及びベルト濃縮機は優位性を示した。(図－5 参照)



図－5　各濃縮機における分離液 SS 濃度

以上の結果より、受泥量が減少傾向にある要因は重力濃縮槽による汚泥回収状況が向上した事によるものであり、DS 発生量が微増傾向である要因は重力濃縮槽を主とした汚泥回収状況の向上によるものと推測する。

4.　まとめ

東プラ汚泥集約処理により、通常運用時は汚泥回収率向上の効果があった。一方で雨天対応時に施設容量が不足する課題が残った。この課題解決のため当面は葛西への送泥など他事業所や水処理と連携を密にした汚泥処理管理を行い、さらなる汚泥処理の効率化に取り組んでいく。

3-1-1　送泥管の洗浄・調査技術に関する
フィールド試験

計画調整部　技術開発課　堀口　陽子

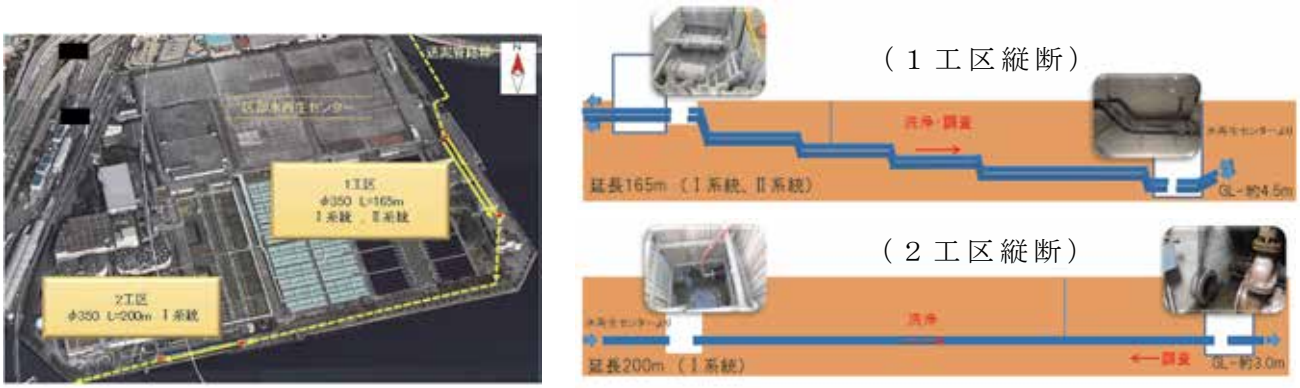
1　はじめに

東京都下水道局では、汚泥を効率的、安定的に処理するため集約処理を行っており、汚泥処理施設に輸送するための送泥管の総延長は 200km を超える。初期に整備した送泥管は既に 50 年以上経過しており、経年劣化の進行が懸念されている。送泥管特有の条件に対応できる劣化状況の調査方法、とりわけ管内面調査技術及び調査に先がけて行う洗浄技術の実用化が課題となっている。本稿では、送泥管への適用性が高いと考えられる海外技術を含む洗浄・調査技術のフィールド試験と、そこで得られた知見や課題について報告する。

2　フィールド試験概要

2.1 フィールド

フィールド試験は、①初期に整備した送泥管の多くが管径 350mm であること、②埋設管の掘削・抜管などが可能なこと、③万が一事故が起きても対処可能であり外部へ影響させないこと等の条件を考慮し、区部水再生センター敷地内に布設されている送泥管(管径 350mm のダクタイル鋳鉄管及び一部 SUS、鋼管)を選定し、試験エリアを 2 つの工区に分けて洗浄・調査技術の試験施工を実施した(**図－1**)。



図－1　フィールド試験エリア概要図

1 工区では、Ⅰ系統でピグ洗浄工法を、Ⅱ系統ではアイスピグ洗浄工法を実施し、洗浄前後で押込みカメラとカメラピグ調査工法により管内状況の確認を行った。２工区ではⅠ系統で気水混合衝撃波洗浄工法を実施し、洗浄前後で自走式テレビカメラにより管内状況の確認を行った（**表－１**）。

表－1　フィールド試験に用いた洗浄・調査工法一覧

工区	系統	管径(mm)	管種/布設年	洗浄工	調査工※	調査期間
1工区	Ⅰ系統（陸側）	φ350	ﾀﾞｸﾀｲﾙ鋳鉄管/昭和46年（一部SUS管、鋼管）	ﾋﾟｸﾞ洗浄工法	押込みｶﾒﾗ ｶﾒﾗﾋﾟｸﾞ	H28/12/5 ～12/9
	Ⅱ系統（海側）	φ350		ｱｲｽﾋﾟｸﾞ洗浄工法	ｶﾒﾗﾋﾟｸﾞ ｶﾒﾗﾋﾟｸﾞ	H28/12/12 ～12/16
2工区	Ⅰ系統（陸側）	φ350		気水混合衝撃波洗浄工法	自走式TVｶﾒﾗ 自走式TVｶﾒﾗ	H28/11/28 ～12/2

※上段は洗浄前、下段は洗浄後

2.2 洗浄技術

フィールド試験を実施した３つの洗浄技術の概要を**表－２**に示す。洗浄技術は、国内の圧力管での洗浄実績がある①ピグ洗浄工法、②アイスピグ洗浄工法、③気水混合衝撃波洗浄工法を選定した。

ピグ洗浄工法は、ポリウレタン製のピグと呼ばれる器具をランチャーと呼ばれる専用の発進口から挿入し、圧力をかけて走行させることで管内面の汚れを除去する工法である。石油化学プラント、工場内のパイプラインや上下水道等で実績がある。ポンプの圧力をコントロールすることで、施工延長に制限なく使用できる一方で、分岐や弁の形状によっては詰まるリスクがある。

アイスピグ洗浄工法は、専用の機械で製造された特殊アイスシャーベットを管内に注入し、管内で「アイスピグ」を形成し、そのアイスピグが管内の水流と水圧によって管内の夾雑物を取り込みながら移動し洗浄する工法である。管内へは空気弁などを利用し、運搬用タンク車に搭載しているポンプにより特殊アイスシャーベットを注入する。使用する特殊アイスシャーベットは水と添加剤（NaCl）を材料としているので環境に優しく、管内で詰まることなく、管路の口径の変化や曲りに追従できる。管径により特殊アイスシャーベットの使用量が決まるため、施工延長に制限がある。

気水混合衝撃波洗浄工法は、管内に所定量の水を通水し、これに旋回圧縮空気流を送気し、管内に気液二層環状流を発生させ、気泡水流の撹拌力と気泡破裂の衝撃波で管内壁面に付着した堆積物を洗浄する工法である。

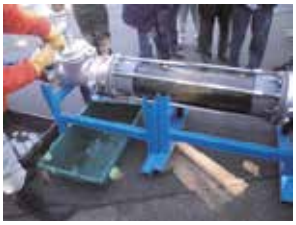
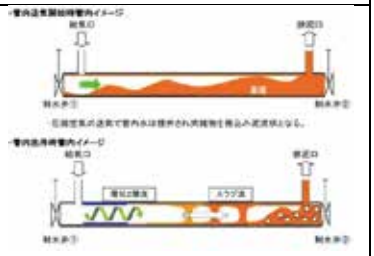
洗浄に使用する材料が空気と水だけで、詰まりリスクがなく、排水処理が容易である。上水道、工業用水での実績が多い工法で、小口径管にしか対応していない。

2.3 調査技術

調査技術には、欧州で開発され運用されているカメラピグ工法（MTA 社製パイプインスペクタ）を選定した。この工法は、バッテリーとカメラを内蔵した調査機をそのまま又はピグにセットして投入し、曲線部を含む管きょを視覚的、音響的に調査する技術である。主に欧州の上水道での実績がある。圧送管用のほか、自然流下管用の調査機がある。

カメラピグ工法と、一般的に下水本管やます・取付管で使用しているテレビカメラ調査技術の概要を**表－３**に示す。

表－２　洗浄技術の概要

	ピグ洗浄工法	アイスピグ洗浄工法	気水混合衝撃波洗浄工法
洗浄方法	 ピグを管内に挿入し、圧力をかけて走行させることで、管内面の汚れを除去する。	 特殊ｱｲｽｼｬｰﾍﾞｯﾄを挿入しポンプ圧力で押すことで管内面の付着物を押し出して除去する。 氷と水しか使用しないため、管内で詰まるリスクが無い。	 圧縮空気と水を混合して連続送気し、撹拌力と衝撃力で管内付着物を洗浄排出させる。 空気と水しか使用しないため、管内で詰まるリスクが無い。
洗浄使用材料	 ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ製ピグ	 ｱｲｽｼｬｰﾍﾞｯﾄ	 圧縮空気と水
適用管径（mm）	φ50～3,000	φ50～500	φ50～350
最大延長（m）	制限なし	2,000（管径による）	1,500（管径による）
仕切弁・曲線対応	仕切弁、分岐箇所での詰まりリスクがある	問題なし	問題なし

表－３　調査技術の概要

	カメラピグ工法	自走式TVカメラ	押込みカメラ
調査方法	 カプセル型ピグに調査機を搭載し、自然流下または水圧・空圧によって管内を撮影しながら進行させる。	 車輪とモーター駆動によって管内を進み、先端のカメラで映像を撮影する。	 ハードケーブルの先端にカメラが設置され、人力で推し進め調査する。カメラが回転し側視可能な機種もある。
適用管径（mm）	φ50～3,000	φ200～2,000	φ50～350程度
最大延長（m）	制限なし	500m	30m程度
仕切弁・曲線等対応	仕切弁、分岐箇所での詰まりリスクがある。曲線部の対応可能。	仕切弁は開状態必要。直線部かつ水平な管路のみ対応可能。	仕切弁は開状態必要。ある程度の曲線部は追従可能。

3　洗浄技術の結果

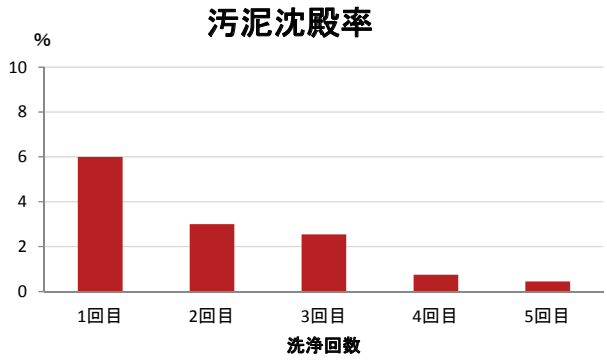
各洗浄技術のフィールド試験結果を以下に述べる。

3.1 ピグ洗浄工法

洗浄に先立ち、発進側、到達側ともに管を一部抜管し、発進側にランチャーを、到達側にレシーバーを設置した（**図－２**）。洗浄は、まず試走用に柔らかいスポンジ状のソフトピグを走行させ、その後洗浄用のハードピグを４回走行させ、合計５回分の排水をサンプル採取した。ピグはソフトピグ、ハードピグともにポンプ車を使用して水圧走行させた。

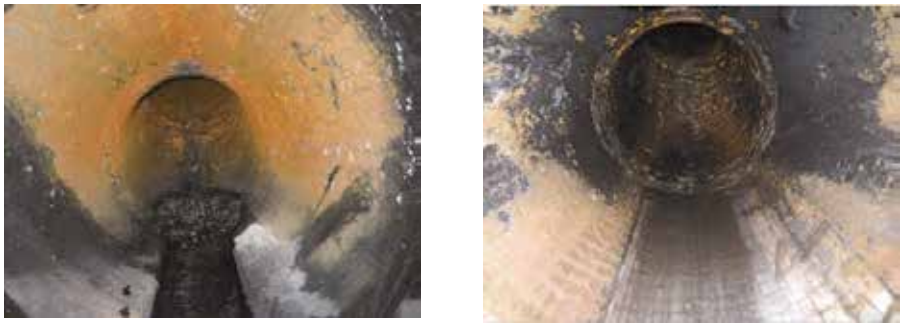
採取した５回分の排水の汚泥沈殿率（静置した後に沈殿した汚泥の割合）を測定したところ、1回目のソフトピグ試走時から徐々に低下していていることを確認した（**図－３**）。

図－２　ランチャー設置の様子



図－３　各回の排水の汚泥沈殿率

また、ピグ洗浄前後の管口の写真を比較すると、管内の沈殿物及び沈着物が除去され、ある程度管壁が露出していることを確認した（**図－４**）。



図－４　ピグ洗浄前（左）と洗浄後（右）の管口状況

3.2 アイスピグ洗浄工法

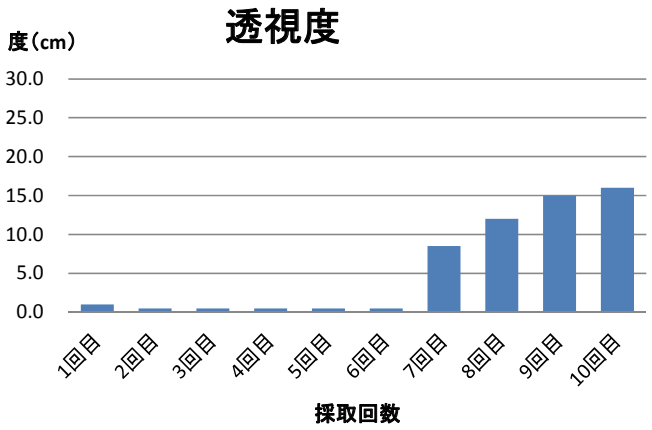
特殊アイスシャーベットを専用の機械で製造し、デリバリーユニットで現場まで輸送した。管内に特殊アイスシャーベットを注入し、アイスピグを形成させ、デリバリーユニットで圧送し回収口に設置した水質監視装置でアイスピグの到達を確認した。

洗浄中にはアクリルパイプを設置し、懸濁したアイスシャーベットの走行状況と、タンク内に排水した夾雑物の混入したアイスシャーベットを目視で確認した（**図－５、**

６）。また、洗浄効果の目安として排水のサンプルを１回の洗浄中に 10 回に分けて採取し、各回の透視度（最も透明度が高い場合が 30 度）を測定した。１～６回分は真っ黒で透視度が低い値が続いたが、７回目以降は徐々に値が高くなり、最後は 16 度であった（**図－７**）。

図－５　目視用アクリルパイプ

図－６　排水後のアイスシャーベット



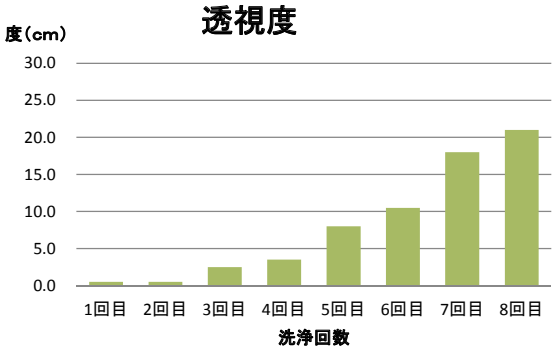
図－７　排水のサンプルと透視度

3.3 気水混合衝撃波洗浄工法

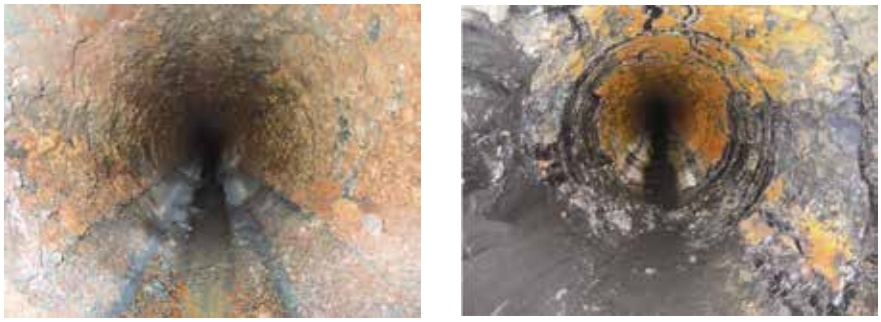
発進側に吹込口を、到達側に排泥口を設置し（**図－８**）、気水混合装置で空気と水を混合し管内に吹き込むことで洗浄した。洗浄効果は、排水を採取し、その都度透視度を計測することにより確認し、効果が得られるまで洗浄を繰り返した。今回は、透視度が 21 度に達した８回まで洗浄を実施した（**図－９**）。

透視度からは十分洗浄が行えたと判断したが、洗浄後の管内状況をテレビカメラで確認したところ、洗浄後の管壁には汚泥スライム層が残留しており、モルタルでコーティングされた管壁の沈着物は一部剥がれていたが、全部露出するには至らなかった（**図－10**）。

図－８　到達側の排泥口設置状況



図－９　１回目から８回目までの排水と透視度



図－10　気水混合衝撃波洗浄前（左）と洗浄後（右）の管内状況

これらの洗浄工法の施工結果を**表―４**にまとめて示す。

表－４　洗浄工法施工結果

	ピグ洗浄工法	アイスピグ洗浄工法	気水混合衝撃波洗浄工法
洗浄結果	各回の排水の沈殿物を測定した結果、汚泥沈殿率は徐々に低下していた。 洗浄後はある程度管壁が露出されていた。	排水したアイスシャーベットより洗浄状況を確認した。 洗浄中 10 回に分けて排水の透視度を確認し、10 回目では 16 度であった。	排水の透視度で洗浄効果を管理しており、8 回で 21 度となり十分透視度が確保できたと判断し、洗浄を終了した。 洗浄後、管壁に汚泥層が残留していた。
主な設置仮設	発進治具（ﾗﾝﾁｬｰ） 到達治具（ﾚｼｰﾊﾞｰ）	投入用片落管 （φ350-150）	吸込口 排泥口
主な使用機材	ポンプ車	デリバリーユニット	コンプレッサー、給水車、気水混合装置
使用水量	試走 1 回、洗浄 4 回で、合計 93 m^3 使用 （管容積の約 5.5 倍）	洗浄 1 回で、34 m^3 使用 （管容積の約 2 倍）	洗浄 8 回で、合計 24m^3 使用 （管容積の約 1.3 倍）
洗浄所要時間 （1 回あたり）	17～18 分/165m	約 20 分/165m	30～40 分/200m

4 カメラピグ工法の調査結果

今回のカメラピグ工法で使用したパイプインスペクタは、オーストリア MTA 社で開発された調査機で、ケーブルの接続がなく、本体に HD カメラ、音響測定装置、圧力・温度センサ、バッテリー、録画装置を内蔵した自立式カメラである。

カメラによる視覚調査だけではなく、音響、圧力、温度を記録することで管内の

異常を効率よく評価できる。従来の有線カメラでは出来なかった長距離の連続的な調査や、曲管部の通過が可能であると期待されることから、今回送泥管への適用性を確認することとした。

調査は管内状況や圧送方法等条件を変えて実施した（**表－５**）。調査機のモデルには、基本的には圧送管用のモデル 125（適用範囲φ200～500）を使用した。ただ、最終日にモデル 125 のカメラの前面カバーが破損しカメラ内部が浸水する事故が起きたため、予備で持参していた自然流下管用のモデル 150（適用範囲φ200～500）も使用した（**図－11**）。

図－11　カメラピグ調査機
（左）圧送管用モデル 125
（右）自然流下管用モデル 150

表－５　調査ケース

ｹｰｽ	対象管	管内状況	圧送方法	使用ピグ※	使用カメラ	備考
1	洗浄後 Ⅰ系	満水	水圧	ソフトピグ 1	モデル 125	濁水のため撮影不可
2		空	水圧	ソフトピグ 1	モデル 125	滞水箇所以外でデータ取得
3	洗浄前 Ⅱ系	空	空圧	ソフトピグ 1	モデル 125	27.2m 地点でピグとカメラが分離
4		空	空圧	ソフトピグ 1	モデル 125	カメラ角度不安定・速度過多
5	洗浄後 Ⅱ系	空	空圧	ハードピグ	モデル 125	カメラ破損データ回収不可
6		空	空圧	ソフトピグ 2	モデル 150	途中まで良好、22.2m 地点から靄発生、50.9m 地点から汚泥付着

※ソフトピグ 1 はパイプインスペクタ専用。ハードピグとソフトピグ 2 は洗浄用を流用（**図-12**）。

（１）水中撮影 vs 気中撮影

図－12　（左）ソフトピグ 1、（中）ハードピグ、（右）ソフトピグ 2

事前のメーカー担当者のヒアリングによると、洗浄後の管きょであれば水中撮影が可能とのことだったので、洗浄後に清水を充填した状態で調査を実施した(ケース１)。調査前の充填水の濁度は６度（最も透明な場合が０度。濁っていると数値が高くなる。）で（**図－13**)、メーカーの調査可能な範囲（０～８度）であることを確認し調査を開始したが、ピグ走行に伴い管壁に残っていた汚泥により充填水が濁り、管内状況は把握できなかった。

そこで、管内の充填水を可能な限り排水させた後、調査を実施した(ケース２)。これにより気中で管内状況が把握できるようになった（**図－14**)。ただし、上下曲り箇所等で汚水が滞水している箇所では管内状況の把握は困難であった。

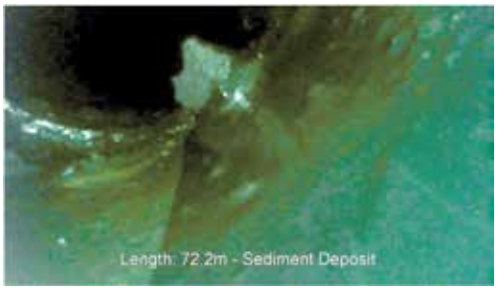
図－13　携帯型濁度計による計測

図－14　ケース２による映像

（２）水圧推進 vs 空圧推進

ケース１，２ではピグの推進に水圧を使用したが、洗浄前の管きょの撮影にはなるべく管壁の汚れを乱さないよう、空圧で推進させ撮影することを試みた（ケース３，４)。

空圧推進では、水圧推進と比べてスピードのコントロールが難しく、途中でカメラとピグが分離してしまう事故が発生した（ケース３)。また、空圧によりソフトピグが歪んでしまいカメラの位置が一定しない状況であった（ケース４)。ただ撮影された画像は鮮明であり、適切なスピードコントロールとピグ硬さを選択できれば、空圧推進も使用できるのではないかとの感触を得た（**図－15**)。



図－15　ケース４による映像

（左）曲り箇所　（右）管継手部

（３）ピグ硬さ

ケース３，４により、空圧推進には圧力による歪みが生じない程度の硬さのピグが必要であることが分かった。そこで、洗浄用に使用したハードピグに調査機が嵌（はま）るよう加工し、調査を実施した（ケース５)。しかしながら、このケースでは走行中の衝撃でカメラとピグを結ぶワイヤーが切断しカメラがピグから外れ、カメラの前面カバーが破損してしまい、データを取得できなかった。

圧送管用モデルの調査機モデル 125 が破損したため、予備で持参していた自然流下管用モデル 150 を使用し、ピグには洗浄の試走時に使用したソフトピグを利用して再度調査を実施した（ケース６）。調査機モデル、ピグともに純正ではなかったものの、途中までは安定した映像を取ることが出来た。しかしながら、途中からピグと管壁から濃い靄のようなものが発生し、視野を遮ることとなった（**図－16**）。また、進むにつれカメラ前方に汚泥が付着し映像にも影響する結果となった。

図－16　ケース６による映像

（左）継手ズレ、腐食 20.2m 地点　（右）靄がかかった様子 28.5m 地点

5 フィールド試験で得られた知見と今後の課題

フィールド試験で使用した送泥管は昭和 46 年の布設から 40 年以上経過した管径 350mm のダクタイル鋳鉄管であり、当局で使用している送泥管としては標準的な管種、管径のものであった。今回調査のために発進や到達口を設置することに伴い、管内面の状況を観察することができた。切り出したダクタイル鋳鉄管にはモルタルライニングが４mm 残っており、管本体には腐食は見られなかった。内側には汚泥が 10mm 程度堆積しており（**図-17**）、管壁の状況を観察するには、洗浄工が必須であることがわかった。

図－17　撤去した送泥管の状況（洗浄前）

今回３つの洗浄工を用いてフィールド試験を実施した。各工法とも洗浄効果は認められたものの、継ぎ手のズレやモルタルの剥がれを目視で確認するためには、かなり

強力な洗浄が必要であることが分かった。また、ピグ洗浄工法のようにピグの発進口、到達口を設置する場合には、弁で前後を仕切る作業に加えて発進口、到達口を設置する必要があり、仮設作業の負担がかなり大きいこともわかった。また、いずれの洗浄工法も大量の水を使用し、水の供給方法とその排水先を確保する必要がある。

調査で送泥管内を撮影する場合は、洗浄実施後でも水中撮影は困難であり、気中撮影にする必要があることが分かった。つまり、不断水調査は難しく、調査実施前に管内の水抜き作業を実施する必要がある。

ケーブルレスの調査機であるパイプインスペクタ（カメラピグ工法）を用いた調査は、国内で初めての試みであった。送泥管内を撮影できることは画期的な技術ではあるが、安定的に撮影するには解決すべき課題がある。まず、カメラが安定して推進できるよう、適切な硬さのピグを選定し、またカメラが管内全周を撮影できるようピグとカメラを接続させておく必要がある。また、送泥管内は自然流下管内と比べ非常に暗いため、十分な光量が必要となる。さらに、気中撮影であっても、部分的に汚泥が滞水している可能性があることから、カメラ前面に付着した汚泥を除去できる機構を備えることが望ましい。

今回得られた課題を踏まえ、今後も引き続き送泥管の適切な維持管理の実施に向け、送泥管調査に適用できる機器の開発や改善に取り組む予定である。

参考文献

1）圧送管設計マニュアル　平成 22 年 6 月　東京都下水道局建設部

2）汚泥処理処分施設計画　平成 22 年 12 月　東京都下水道局計画調整部

3）髙崎暢哉、堀口陽子：国内外の送泥管洗浄・調査技術に関する実証試験、第 54 回下水道研究発表会講演集、P.633-635、平成 29 年 7 月

4）福田直也ほか 3 名：ピグ洗浄による長距離圧送区間の管理状況、第 51 回下水道研究発表会講演集、P.757-759、平成 26 年 7 月

5）結城啓治、姫野修司：アイスピグによる消雪パイプ内洗浄技術の開発、第 52 回下水道研究発表会講演集、P.704-706、平成 27 年 7 月

3-1-2　優先度評価を踏まえた効果的な管路施設の調査計画について

施設管理部管路管理課長　久本　洋二
管路管理課　　木村　裕太

1. はじめに

東京都区部の下水道事業は、明治17年の神田下水の建設以来、110余年の歳月を費やし、平成6年度に100%普及概成し、平成28年度末現在のストックは管きょ延長約16,000㎞、人孔約48万個に達している。このうち、法定耐用年数の50年を超えた管きょの延長は、全延長の約1割にあたる約1,800㎞に達している。さらに、今後20年で法定耐用年数を超える管きょ延長が約8,900㎞に達するなど、急速に管きょの更新時期を迎えることから、管きょの老朽化対策が喫緊の課題となっている。

また、人口や産業が密集している区部では多くの大型車両の走行に伴う荷重、振動や他企業の近接施工の影響を受け、管きょの損傷事故が多く発生し、引いては道路陥没を引き起こしている。区部の下水道施設に起因する道路陥没件数は、平成12年度と比較して平成28年度は、約1/3にまで減少したが、依然として多くの道路陥没が発生している。「東京2020オリンピック・パラリンピック大会」に向けて、国内外の多くのお客さまに安心して東京に訪れてもらうために、道路陥没の未然防止は重要な課題であることから、管きょの再構築や補修を効率的に進めていくためにも、既設管きょの状況を詳しく把握することが必要である。

当局は、これまでも計画的に管路内調査を行い、継続的に管きょの状態監視に努めてきた。これまでの管路内調査では、布設年代が古い地域等を優先し、調査を実施してきた。

管きょの老朽化が急速に進行する中において、下水道法施行令の改正に対応するとともに、より一層、予防保全を重視した計画的な管路施設の点検が必要となっている。

今後、腐食するおそれのある下水道管の調査頻度を高め、平成28年度より区部全体で従前より調査延長を約2割アップさせるなど、管きょの維持管理の充実に取り組んでいる。

2. 優先度評価の検討

(1) 評価の方法

管きょの不具合の起こりやすさについては、管きょの構造や布設状況毎に経過年数に応じた劣化の進行度合いの相関を調査した。調査項目は、管きょの劣化の進行に影響を与える可能性のある「①管きょの経過年数」「②管きょの管種」、「③地盤の区分(地盤の硬軟)」、「④管きょの土被り」、「⑤腐食のおそれの大きい箇所(布設環境)」とした。この項目と合わせて、不具合が発生した場合に考えられる社会的な影響の度合いを加味して優先度の評価を行った。

項目の情報の抽出は、当局の下水道台帳システム、通称SEMIS(Sewerage Mapping and Information System)及び業務履歴検索システムを活用した。SEMIS(セミス)とは、膨大な下水道管等を効率的に維持管理するため、下水道管に関するさまざまな情報「下水道管のビッグデータ」を集約したシステムである。具体的には、①布設年度等の基礎情報、②下水道管の管種、④土被りに加え、管路内調査によって得られる損傷個所のデータ等がSEMISに登録されている。これらの情報を活用して、管きょの現状を正確に把握し、実態に則した維持管理計画の策定を行っている。また、一部の情報は当局HPで一般公開している。

業務履歴検索システムは、管路維持管理業務の効率化・高度化を目的として開発したイントラネット上で動作するシステムであり、管路維持管理業務の履歴をデータベース化し、データの検索や集計を行うことによって、維持管理月報、執行調書の作成や、過去の業務履歴を容易に検索することができるシステムである。⑤腐食のおそれの大きい箇所(布設環境)については、同環境に限定した管路内調査の劣化診断結果のデータを記録していないことから定量的な評価はできないため、これまでの業務履歴検索システムを活用し維持管理履歴を整理した。

(2) 評価の条件

①劣化度の判定については、損傷項目の対象を「破損」、「クラック」、「継目ズレ」、「腐食」、「たるみ・蛇行」、「侵入水」とし、管路内調査の結果において、特に進行している損傷の個数を計上し、評価した。②管種は、区部で主に布設されている割合が大きい「鉄筋コンクリート管」、「陶管」を対象とした。

③地盤の区分(地盤の硬軟)は、区部東部の低地部が沖積層に、区部西部の台地部が洪積層に概ね区分されることから、「区部低地部」と「区部台地部」に区分し調査した。

④土被りについては、区部の管路施設は概ね5m未満に布設されているため、「0.8m～2.5m未満」と「2.5m～5.0m未満」に区分し調査した。なお、0.8m～2.5m未満の管路施設には、衝撃に弱い陶管が多く含まれることから、土被りの影響を確認するため、鉄筋コンクリート管のみに限定して調査を行った。

(3) 管路施設の不具合の起こりやすさの検討結果(表－1)

各項目において、管路施設の経過年数と損傷個数の相関をみると、多くの大型車両の走行に伴う荷重、振動や他企業の近接施工の影響を受けることや、ビルピット排水に伴い発生する硫酸の影響により、経過年数が約30年以降から管路施設の損傷の進行度合いが大きくなっていることが確認できた(図-1)。

管種別では、陶管は鉄筋コンクリート管に比べ損傷の発生個数が多いことが確認できた。また、陶管の損傷は、破損及びクラックが約9割を占めており、衝撃に弱い構造であることが損傷の発生に影響していると考えられる。

地盤区分の比較では、損傷の発生個数、損傷の進行度合いは、ともに同程度であり、地盤の硬軟による影響は低いことが確認できた。

土被りにおいては、0.8m～2.5m未満は2.5m～5.0m未満と比べ損傷の発生個数が若干多く発生することが確認できたが、これは土被りが浅い方が大型車両による荷重、振動等の影響を受けやすいことが要因として考えられる。

図-1　50～60 年を基準値とした経過年数別 1km あたりの損傷割合

	検討項目	考　察
管路施設の不具合の起こりやすさ	経過年数	概ね布設後30年頃から損傷度合いが進行
	管種	陶管は、損傷発生数及び損傷の進行度合いともに大きい
	地盤区分	管路施設へ与える損傷リスクの程度は低い
	土被り	管路施設へ与える損傷リスクの程度は低い
	腐食のおそれの大きい箇所（布設環境）	状況により管路施設への与えるリスクの程度は高い

表-1　管路施設の不具合の起こりやすさ（損傷リスク）の考察

腐食のおそれの大きい箇所では、落差のある人孔や伏越部、圧力管の吐出し先での腐食が多く発生していることを確認できた。

(4) 不具合が発生した場合の影響の度合いの検討

管路施設の不具合のうち管路施設の損傷に伴う道路陥没の発生は、道路交通の機能不全や第三者被害を招く可能性が高く社会的な影響が大きい。一般的に交通量が多い道路（国道、都道）や軌道下に敷設されている管路施設が損傷した場合には、甚大な被害の発生が懸念される。

	検討項目	考　察
被害が発生した場合の影響度合い	道路区分等（国道・都道・軌道）	道路交通機能や第三者への影響大

表-2　管路施設の被害が発生した場合の影響度（影響リスク）の考察

3. 優先度評価を踏まえた調査

管路施設の調査の考え方としては、「管きょの不具合の起こりやすさ」や「被害が発生した場合の影響度合い」による優先度評価を踏まえ、調査の頻度を高める等の視点で検討した。

2の(3)の結果から、管種や布設条件に関わらず、経過年数が 30 年を超えると管路施設の損傷度合いが進行することが確認できた。このことから、標準的な管路施設の調査頻度は、これを踏まえて調査を行う。

陶管については、他の管種に比べ衝撃に弱く損傷のリスクが大きいことから、優先度を上げた対策が必要である。このため、陶管は状態を把握し、損傷度合いにより優先順位をつけて、全て取替える(更生含む)ことで検討を進めていく。

地盤の区分や土被りについては、管路施設へ与える損傷のリスクは小さいため、調査の優先度を上げない。

腐食のおそれの大きい箇所では、硫化水素の濃度によっては、法定耐用年数未満の管路施設であっても、重大な腐食による損傷事故を引き起こすことがある。このため、伏越部や段差箇所、圧力管の吐出し先等については、優先度を上げて調査を実施することが必要であると判断した。調査頻度としては、下水道法施行令の改正を踏まえて 5 年に 1 回の頻度で調査を実施することとした。

国道、都道、軌道下に敷設された管路施設については、損傷による事故発生時の社会的な影響が大きいことを踏まえ、優先度を上げた調査が必要である。このため、下水道法施行令の対象個所以外においても優先順位を定めて調査を実施することとした(表－2)。

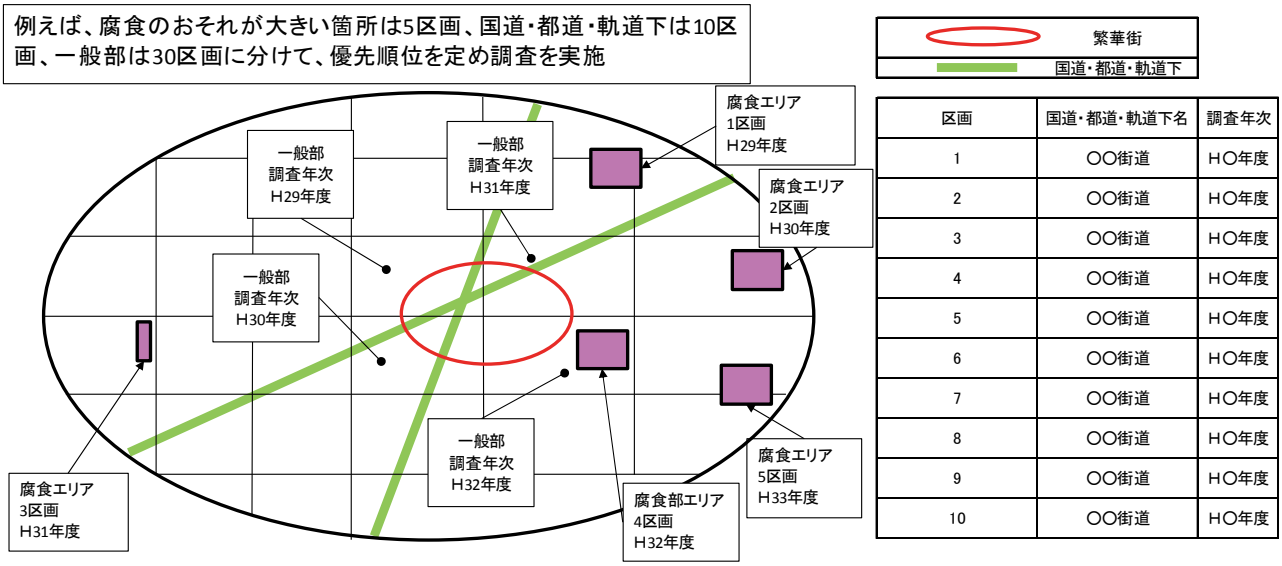
4. 調査の考え方

上記の検討結果から、管路施設の調査の考え方を整理した。

この考え方に基づき、管路施設の調査の年次計画(図-1)のイメージを作成した。作成にあたり、始めに図－1 のとおり特別区毎に「一般部」、「国道、都道、軌道下」、「腐食のおそれの大きい箇所」に区分をした。「一般部」の区画としては、調査の実績の有無をわかりやすく管理できるように当局の下水道施設台帳図を用いて区画割を行うこととした。

「国道、都道、軌道下」については、調査実施の有無をわかりやすくするため、路線別に分けて調査を実施していくこととした。「腐食のおそれの大きい箇所」については、これまでの維持管理履歴をふまえ、対象エリアを選定し、5 区画に区分し調査を実施していくこととした。

次に、上記の結果より分けた区画の調査年次の設定にあたっては、布設年度が古い地域や不具合が多い箇所、「東京 2020 オリンピック・パラリンピック大会」競技会場周辺地区等、重点的な対策が必要な地域を、優先度の高い地区として設定した。



区画	国道・都道・軌道下名	調査年次
1	○○街道	H○年度
2	○○街道	H○年度
3	○○街道	H○年度
4	○○街道	H○年度
5	○○街道	H○年度
6	○○街道	H○年度
7	○○街道	H○年度
8	○○街道	H○年度
9	○○街道	H○年度
10	○○街道	H○年度

図-1　管路施設の調査の年次計画イメージ

5.　おわりに

これまで蓄積してきた維持管理データから優先度評価による効果的な管路施設の調査の考え方を整理し、これまで以上に予防保全を重視した維持管理へと強化を図っている。これにより、「東京2020 オリンピック・パラリンピック大会」の成功に向け、下水道機能の確保とお客さまの安全・安心を支えていく。

また、今後も管路施設の構造や環境の変化が見込まれることから、引き続き、日々の維持管理データを蓄積し、リスクの変化に応じた計画の見直しを行っていく。

3-1-3　耐硫酸性能を有したコンクリートへの下水汚泥焼却灰の添加利用に関する報告

中部下水道事務所　芝浦水再生センター　武元　貴裕
（現　施設管理部施設保全課）

1.　はじめに

1.1　背景

下水道施設のコンクリート構造物は、微生物が生産する硫酸によって早期に劣化することがあり、対応が示されている[例えば 1)]。また、耐硫酸性能を有するコンクリート（以下、「**耐硫酸コンクリート**」という。）も開発されており、普及、展開が待たれている[2)]。他方、下水道では、水処理、汚泥処理等の基本的な役割に加え、下水熱や汚泥をエネルギー源として活用するなど、より積極的な社会貢献が期待されている。この下水処理の過程で発生する下水汚泥焼却灰についてもセメント原料化に加え、土木工事用資材としての利用など様々な活用法が検討されているところではあるが、さらなる利活用が求められており、先の耐硫酸コンクリートに添加して下水道施設に適用できれば有望な活用法のひとつとなる。そこで、室内による試験及び芝浦水再生センターにおいて暴露試験を**簡易型共同研究**（以下、「本共同研究」という。）により行った（平成 25 年 1 月 15 日～平成 28 年 9 月 30 日）。

ここでは、耐硫酸コンクリートに下水汚泥焼却灰を添加した場合の材料性状、補修材としての施工性、稼働中の下水処理施設における耐久性の 3 点に着目して評価した結果を報告する。

1.2　研究目的

本共同研究では、下水汚泥焼却灰の有効利用を図り、下水汚泥焼却灰を添加した耐硫酸コンクリートに防食技術を開発するため、以下の 3 点を目的とした。

① 耐硫酸コンクリートに下水汚泥焼却灰を添加した場合のフレッシュ性状と付着強度の検証による**材料性状**を確認すること。
② 補修材としての施行手順や自己充てん性能による**施工性**を確認すること。
③ 稼働中の下水処理施設における**耐久性（防食性能）**を確認すること。

1.3　研究実施体制

東京都下水道サービス株式会社：下水汚泥焼却灰の提供並びにその利用に関する技術指導
宇部興産株式会社：供試体調査、硫酸浸漬試験
大成建設株式会社：研究全体の統括、供試体作成・設置、計画書・報告書作成
東京都下水道局　：芝浦水再生センター東系第一沈澱池の提供

本共同研究の実施場所を図 1.1 に示す。

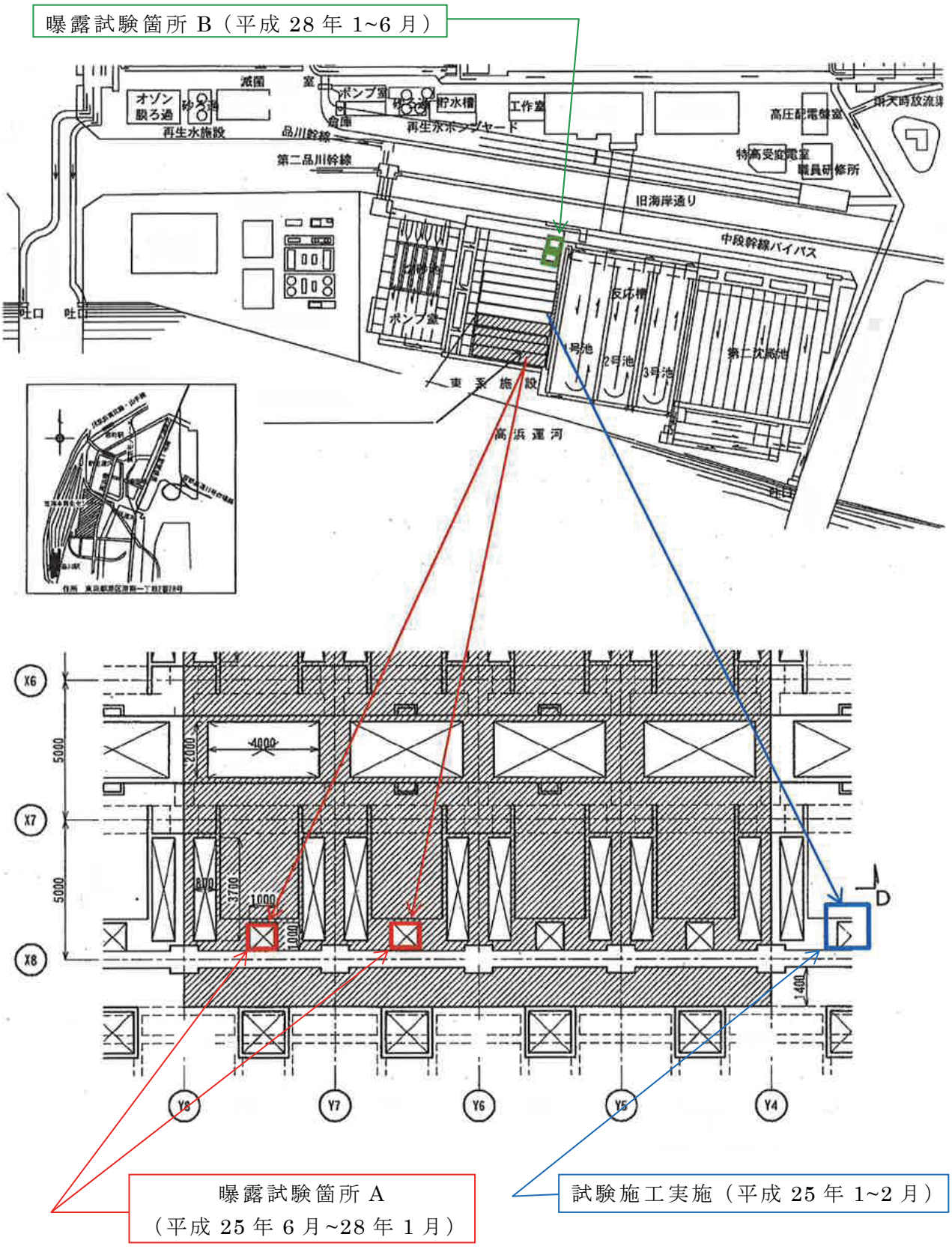


図 1.1　本共同研究実施個所：芝浦水再生センター東系第一沈澱池

1.4 研究内容

研究内容を図 1.2 にまとめる。

耐硫酸コンクリートに関して、室内では硫酸浸漬試験、芝浦水再生センターでは試験施工及び、曝露試験を実施した。各試験で検証する項目と目的を以下に示す。

① 硫酸浸漬試験

・ 下水汚泥焼却灰添加時の重金属溶出特性と防食性能の検証

② 試験施工-配合検討

・ 下水汚泥焼却灰添加時の現場打ちコンクリートのフレッシュ性状と付着強度の検証

③ 試験施工-施工性の検証

・ 施行手順の確認、充てん性能、出来高（防食被覆層厚）の確認

④ 曝露試験

・ 下水汚泥焼却灰添加時の下水環境での防食瀬能の検証

下水汚泥焼却灰は 63μm のふるい通過率が 90%以上になるように分級、粉砕し、土木工事用資材として物理特性を改善した**粒度調整灰**を用いた。母材のコンクリートは、耐硫酸性と自己充てん性を有し、耐硫酸性付与剤（高分子界面活性剤）と石灰石微粉末、石灰石骨材を使用する[2)]。粒度調整灰の配合では、セメントに対して内割置換で 0、5、10%添加した。また、狭隘部への施工を検討することから、粗骨材の最大粒径を 10mm とした。

粒度調整灰を添加した耐硫酸コンクリートと比較するため設計基準強度が 27、40、60N/mm² の普通コンクリート（比較-27、-40、-60）と性能比較を行った。なお、骨材は山砂、砂岩砕石とし、AE 減水剤を用いた。

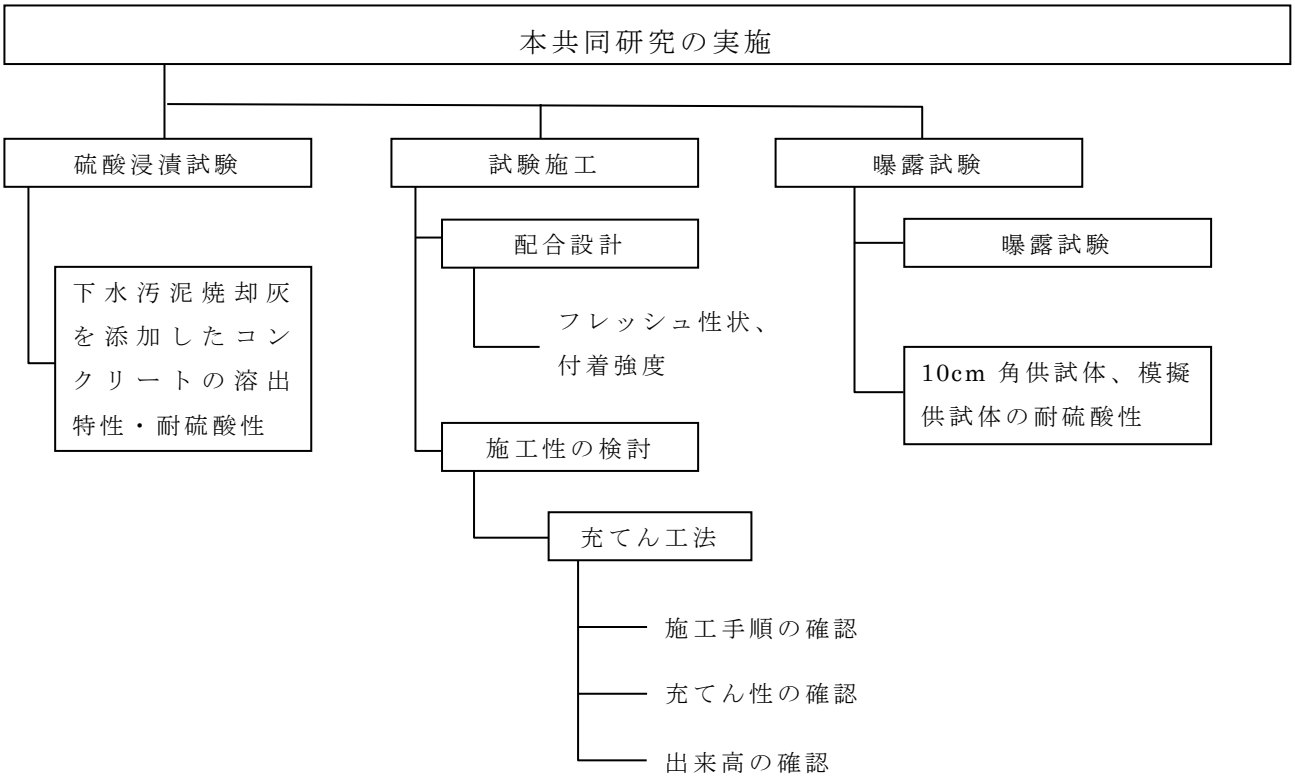


図 1.2 研究内容

2.　粒度調整灰を用いたコンクリートの特徴

2.1　概要

耐硫酸コンクリートに粒度調整灰を添加した配合を 5、10%硫酸に浸漬して、下水汚泥焼却灰を添加したことによる耐硫酸性への影響について検討した。得られた試験結果に基づき、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル、平成 24 年 4 月、日本下水道事業団」（以下、「防食技術マニュアル」という。）のシートライニング工法や耐硫酸モルタル防食工法の品質規格を参考にして、耐硫酸コンクリートが防食性能を有するかを検証した。

2.2　下水道汚泥焼却灰を用いたコンクリートの検討

2.2.1　試験方法

使用材料は、配合及びフレッシュ性状の目標値を表 2.1～表 2.3 に示す。充てん工法として実用化していくためには、現場打ちできるように、ポンプ圧送が可能なフレッシュ性状を確保していることが求められる。本共同研究では、粒度調整灰の添加率を 0、5、10%とした。試験項目及び試験方法を表 2.4 に示す。

養生後の供試体を 2mm のふるいに全通するまで粉砕し、環境庁告示第 46 号に準拠して溶出試験を実施し、検液を得た。検液の測定対象は、環境庁告示第 59 号の付表 1 及び JIS K 0102 に準拠して濃度を測定した。

硫酸浸漬試験においては、10×10×10cm の供試体を養生後、側面 1 面（曝露面）を除く 5 面を樹脂被覆し、曝露面を鉛直にして、5%及び 10%硫酸に浸漬した。硫酸浸漬試験の状況を図 2.1 に示す。

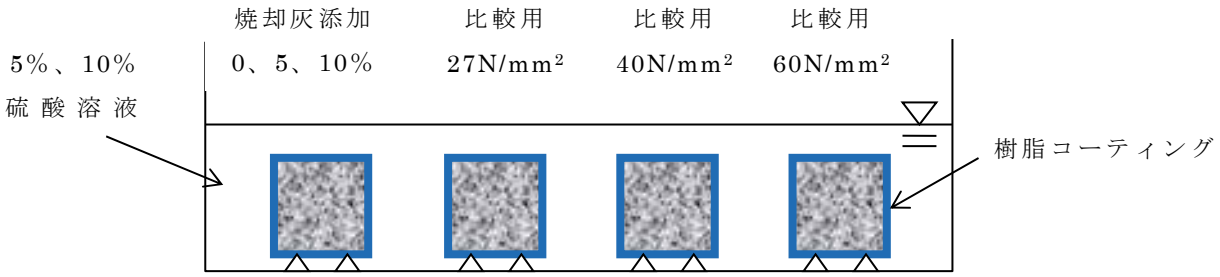


図 2.1　硫酸浸漬試験の概要

表 2.1　使用材料

種　　類	記号	備　　考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16kg/cm³　比表面積 3,290cm³/g
混和剤	Lsp	石灰石微粉末 密度 2.70kg/cm³　比表面積 4,190cm³/g
細骨材	S1	石灰石砕砂　表乾密度 2.62g/cm³
	S2	山砂　表乾密度 2.64g/cm³
粗骨材	G1	石灰砕石 1005　Gmax：10mm　表乾密度 2.70g/cm³
	G2	硬質砂岩砕石 2005　Gmax：20mm　表乾密度 2.69g/cm³

混和剤	A	AE 減水剤（有機酸系）
		高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸塩系）
特殊化学混和剤		耐硫酸性付与剤（紛体系）
下水汚泥焼却灰	SA	粒度調整灰（スーパーアッシュ） 63μm ふるい 90%通過
繊維	PP	ポリプロピレン繊維　径 0.37μm×20mm
膨張材	EX	石灰系

表 2.2　室内試験配合

工法	配合	焼却灰添加率 (C×%)	PP (vol%)	EX*1 (kg/m³)	単位量(kg/m³)						
					W	C	Lsp	SA	S1/S2	G1/G2	A
耐硫酸コンクリート	0%	0%	0.15	30	175	320	352	0	873	581	13
	5%	5%					306	16	917		
	10%	10%					262	32	961		
普通コンクリート	比較-27	—	—	—	163	297	—	—	799	1,057	—
	比較-40				174	420			645	1,085	
	比較-60				170	517			811	888	

*1：C 内割置換

表 2.3　フレッシュコンクリートの目標値

配合	スランプ (cm)	スランプフロー(cm)	50cm フロー到達時間(秒)	空気量 (%)
耐硫酸コンクリート	—	75.0±5	5～20	4.5±1.5
比較-27、40	12±2.5	—	—	4.5±1.5
比較-60	—	55.0±10	—	3.0±1.5

表 2.4　試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」
スランプフロー	JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」
空気量	JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気質圧力方法」
コンクリート/モルタル温度	JIS K 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」
溶出試験	環境庁告示第 46 号に準拠して、2mm 以下に粉砕したコンクリートの試料にて測定。 対象：カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀、

	セレン、フッ素、ホウ素
硫酸浸漬試験	JIS 原案「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法(案)」を基に試験を実施。10×10×10cm の供試体(n=2)を 5%、10%の硫酸溶液に浸漬した後、所定の期間で供試体を取り出し、切断して浸食深さ及び中性化深さを 5 点ずつ測定。

2.2.2 使用したコンクリートの品質

作製した耐硫酸コンクリートのフレッシュ性状の目標値は、高流動コンクリート施工指針を参考にして、設計厚を 35mm とした際にも十分な自己充てん性を確保できるように定めた。粒度調整灰を無添加の耐硫酸コンクリート、添加した耐硫酸コンクリート、比較用の普通コンクリートのいずれの配合についてもフレッシュ性状の目標値を満たした。

20℃の水中にて材齢 7 日、28 日まで養生後の圧縮強度を表 2.5 に示す。圧縮強度は、設計基準強度が 27N/mm² の比較用の普通コンクリートに相当し、耐硫酸モルタルの規格（材齢 28 日：24N/mm² 以上）[1)]に合致した。

表 2.5 圧縮強度試験結果

配合名	設計基準強度 (N/mm²)	焼却灰添加率 (%)	材齢 7 日強度 (N/mm²)	材齢 28 日強度 (N/mm²)
0%	—	0	33.1	41.5
5%		5	34.5	44.3
10%		10	37.2	48.8
比較-27	27	—	38.1	41.8
比較-40	40		49.8	55.9
比較-60	60		81.3	87.0

2.2.3 重金属の溶出試験結果

粒度調整灰に下水汚泥由来の重金属が含まれないことを確認するため、硬化した後に溶出試験を行い、重金属の溶出量を測定した。

耐硫酸コンクリートからの重金属の溶出量を表 2.6 に示す。粒度調整灰の有無によらず重金属の溶出量は、環境庁告示第 46 号に定められた環境基準未満であった。

表 2.6 溶出試験結果

添加率 (%)	溶出量(mg/l)							
	カドミウム	鉛	六価クロム	ヒ素	水銀	セレン	フッ素	ホウ素
0	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	<0.0001	<0.001	0.15	<0.1
5	<0.001	0.001	0.014	<0.001	<0.0001	<0.001	0.19	<0.1
10	<0.001	0.001	0.015	<0.001	<0.0001	<0.001	0.17	<0.1
環境基準	0.01	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01	0.8	1.0

2.2.4　硫酸浸漬試験結果

5%、10%硫酸浸漬試験時の浸食深さの測定結果を表 2.7 に示す。

所定の期間で欠損深さとフェノールフタレインによる中性化深さを測定し、合算したものを硫酸浸漬深さとした。試験体形は異なるが、耐硫酸モルタルの規格 [1)] を参酌すると、耐硫酸コンクリートは、腐食環境Ⅱ類（顕著な劣化：年間平均 H_2S 濃度 10～50ppm 程度）やⅢ類（明らかな劣化：同 10ppm 未満）において B 種または C 種の規格値（6.0mm 以下）に対して 1/5 程度である。また、硫酸濃度を 10%に高めても浸透深さがこれを超えないことから、耐硫酸モルタルより優れた耐硫酸性を有し、耐硫酸モルタルの使用が規定されない、より厳しいⅠ類環境（劣悪な腐食：同 50ppm 以上）での防食も期待できる。比較用の普通コンクリートでは、設計基準強度が大きくなるにつれ、浸食深さが大きくなった。

表 2.7　硫酸浸食試験における浸食深さ

配合名	硫酸浸漬深さ（mm）		
	硫酸濃度		
	5%		10%
目標値	B 種 [1)] 10.5 以下	C 種 [1)] 6.0 以下	―
0%	1.1		2.5
5%	1.5		5.0
10%	1.7		7.4
比較-27	12.5		18.7
比較-40	15.1		22.7
比較-60	17.4		28.5

2.3　まとめ

① 耐硫酸コンクリートは、溶出試験で重金属は検出されなかった。

② 粒度調整灰を添加した耐硫酸コンクリートでは、粒度調整灰の添加量が増加するのに伴い、若干耐硫酸性が低下した。特に 10%硫酸浸漬時に、耐硫酸性が低下する傾向にあった。10%硫酸に浸漬後の浸食深さは、粒度調整灰 0%で 2.5mm、10%で 7.4mm と 3 倍あった。

3.　下水処理場での試験施工による施工性評価

3.1　概要

「→沈砂池→第一沈殿池→反応槽→第二沈殿池→塩素接触槽→」の構成で運転中の下水処理施設の第一沈殿池において試験施工を実施した。この施設の 2013 年度の下水処理量は 60 万 m^3/日、流入水の平均 COD は 110mg/L、pH は 7.1～7.8、平均水温は 23.5℃であった。この第一沈殿池は階層式で、有効水深は下段側が 4.0m、上段側が 3.7m である。

粒度調整灰を添加した配合についての検討、耐硫酸コンクリートのフレッシュ性状(自己充てん性)と付着強度、施工手順及び出来高確認について確認した。

3.2　配合検討

3.2.1　試験方法

耐硫酸コンクリートに粒度調整灰を添加した配合にて試験練りを行い、フレッシュ性状を測定した後、φ10×20cm の円柱供試体を作製し、圧縮強度試験を行った。また、模擬供試体を JSCE-K-561（土木学会：構造物の断面修復材の試験方法(案)）に準拠して実施した付着強度試験を表 3.1 に、施工区画及び付着強度試験実施位置を図 3.1 に、付着強度試験方法を図 3.2 に示す。

表 3.1　試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1101「コンクリートの圧縮強度試験方法」
付着強度試験	JSCE K 561「構造物の断面修復材の試験方法(案)」 建研式接着力試験機

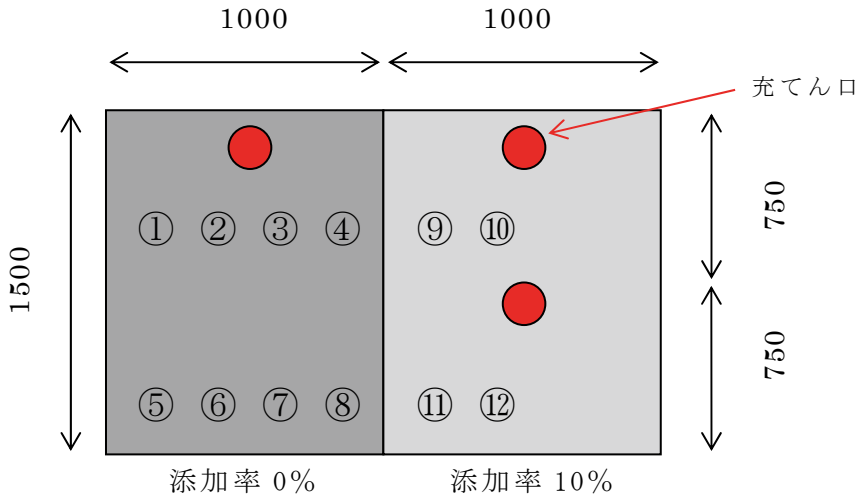


図 3.1　耐硫酸コンクリート施工区画

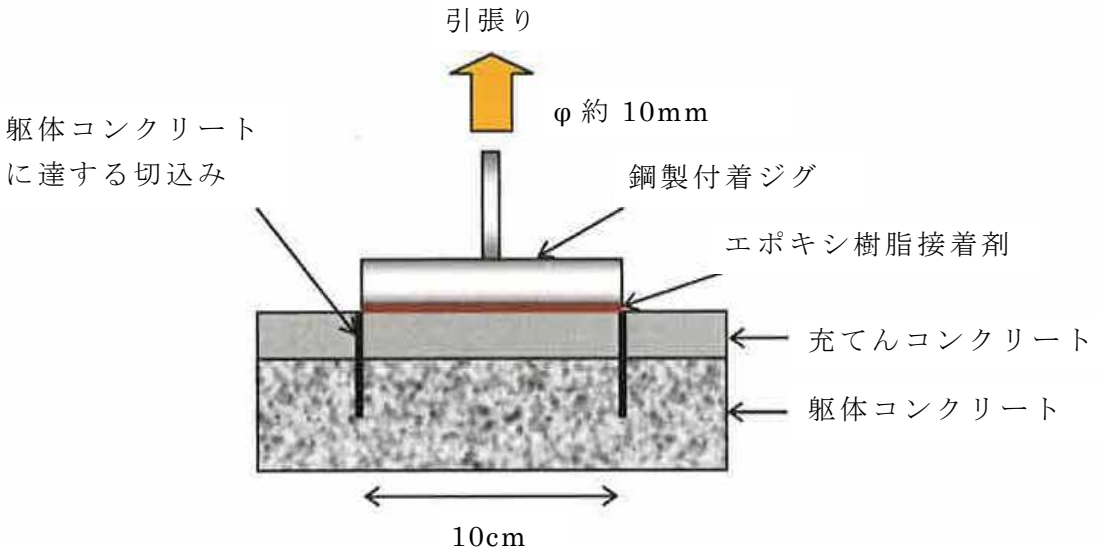


図 3.2 付着試験方法

3.2.2 検討結果（フレッシュ性状及び接着力試験）

耐硫酸コンクリートのフレッシュ性状及び強度試験結果を表 3.2 に示す。強度試験は、打設現場にて封かん養生 1 日→養生室（室温 20℃、湿度 60%）→運搬 1 日→水中養生 3 日の養生を行った後に実施した。粒度調整灰を添加してもフレッシュ性状及び強度の目標値を十分に満足した。

付着強度試験結果を表 3.3 に示す。すべての試験箇所で 1.5N/mm² を上回る付着強度が得られた。防食マニュアルによると、防食被覆層に用いる耐硫酸モルタルは、材齢 28 日における圧縮強度が 24N/mm² 以上、付着強度が 1.5N/mm² 以上である必要がある。試験した耐硫酸コンクリートはこれらの規格を満たしていた。

表 3.2　フレッシュ性状及び強度試験結果

配合	スランプフロー (cm)	50cm フロー 達成時間(秒)	空気量 (%)	温度 (℃)	材齢 7 日強度 (N/mm2)
0%	80.5	6.3	4.0	13.1	31.0
5%	78.5	6.5	3.8	15.0	34.1
10%	75.0	7.3	—	—	34.5
参考：目標値	75±5	5～20	—	4.5±1.5	—

表 3.3　付着試験結果

配合	測定位置	付着強度（N/mm²）		破断箇所
		個別データ	平均値	
0%	①	3.9	3.3	耐硫酸コンクリートそのものが破断
	②	2.5		
	③	3.3		
	④	4.1		
	⑤	3.1		
	⑥	2.3		
	⑦	3.9		
	⑧	4.2		
10%	⑨	3.2		
	⑩	2.9		
	⑪	2.8		
	⑫	2.9		

3.3　施工性の検討

3.3.1　施工手順

充てん工法では劣化部に型枠を設置し､耐硫酸コンクリートを施工して断面を修復する。開口部付近の壁面と天井に適用し、薄肉の断面が適切な品質で修復できるか検証した。

劣化部を除去し、プライマーを塗布して設計厚さ 35mm の位置に透明型枠を設置した。

耐硫酸コンクリート（0%、5%、10%）をパン型強制練りミキサー（100L）で製造した。モルタルポンプにより吐出圧 0.2～0.5MPa、速度 0.6～0.7m³/h で充てんした。

施行手順を図 3.4 に示す。

① 墨出し、アンカー設置、プライマー塗布

② 型枠設置工（試験施工ではアクリル板を用いて、充てん状況を確認できるようにした。）

③ 耐硫酸コンクリートを充てん、打設（厚さ 35mm）

④ 7 日程度の養生後に脱型、目地及びアンカー部をエポキシ樹脂系の耐硫酸性目地でシーリング

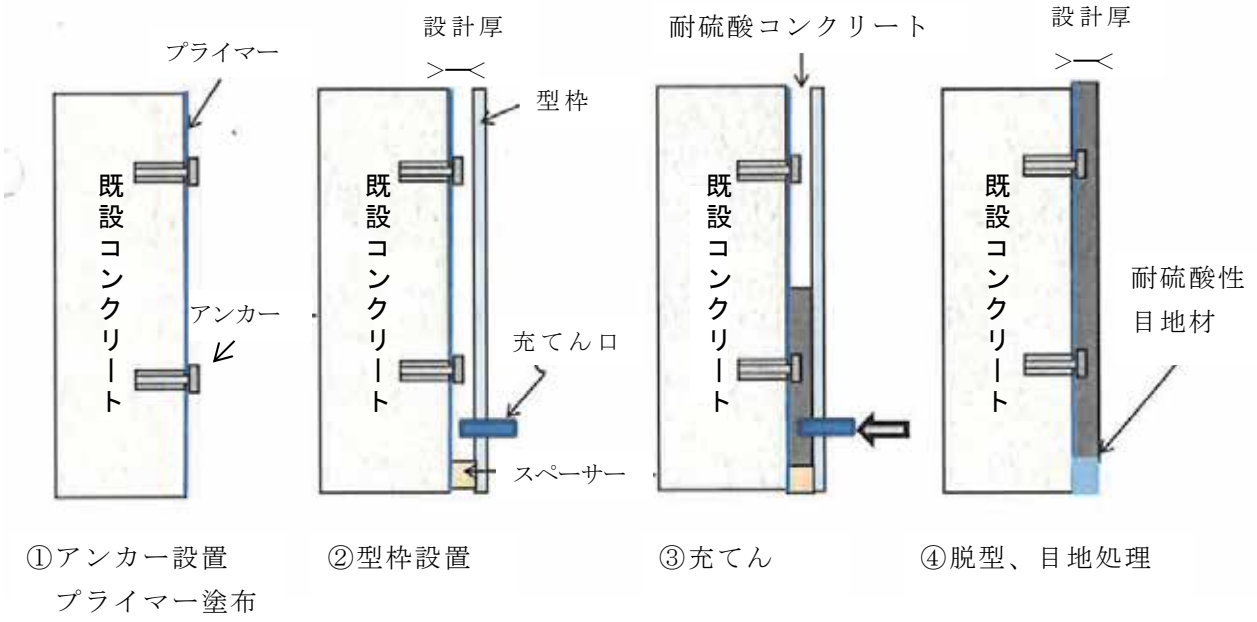


図 3.4　耐硫酸コンクリート打設の施行手順

厚さ 35mm の狭隘部でも、締固めせずに良好に自己充てんできた。透明型枠を介して目視したが、木槌による打音でも充てんが確認できた。脱型後にも未充てんや顕著な気泡は目視されず、打音検査により空洞がないと判定した。運転中の施設の改修工事においても密実な防食層が得られた。

3.3.2　使用材料及び配合

試験施工に使用した材料、配合については、表 2.1、表 2.2 と同様である。

3.3.3　コンクリートの品質確認結果

(1)フレッシュコンクリートの品質

施行する配合について、フレッシュ性状及び圧縮強度を測定した。フレッシュ性状試験結果を表 3.4 に示す。

耐硫酸コンクリートは材料分離などを生じることなく、高流動コンクリート施工指針を参考に定められたスランプフロー、フロー50cm 到達時間及び空気量の目標値を満足して

おり、自己充てん性を有していた。練りあがったコンクリートを目視視察したところ、粒度調整灰を 10%添加した配合では、他と比較して粘性が増加していた。

表 3.4　フレッシュ試験結果

配合	スランプフロー (mm)	フロー 50cm 到達時間(秒)	フロー停止時間(秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	外気温 (℃)
0%	765×736	7.0	189.2	4.2	11.4	5.1
5%	750×737	7.5	143.8	4.5	14.6	—
10%	745×720	8.1	158.1	4.5	14.8	10.6
参考:目標値	750±50	5～20	—	4.5±1.5	—	—

(2)硬化コンクリートの品質

圧縮強度試験結果を表 3.5 に示す。

現地での 7 日間の封減（密封）養生後の強度は 28.8～31.5N/mm2 であり、短期間でも十分に強度が発現し、工期に合わせた適用ができる。また、耐硫酸コンクリートの材齢 28 日圧縮強度は 40N/mm² 以上であった。防食技術マニュアルに記載される耐硫酸モルタルの基準値（材齢 28 日における圧縮強度が 24N/mm² 以上）を十分に満足していた。

表 3.5　試験施工時の強度試験結果

配合	養生方法	材齢 7 日強度 (N/mm²)	材齢 28 日強度 (N/mm²)
0%	現場養生 7 日 ⇒水中養生 21 日	31.5	45.3
	現場養生 7 日 ⇒封かん養生 21 日	—	45.3
5%	現場養生 7 日 ⇒水中養生 21 日	28.8	46.5
	現場養生 7 日 ⇒封かん養生 21 日	—	48.0
10%	現場養生 7 日 ⇒水中養生 21 日	29.7	50.8
	現場養生 7 日 ⇒封かん養生 21 日	—	51.3

3.3.3　コンクリートの品質確認結果

(1)着手前の状況

当該施設の躯体の一部が、鉄筋位置まで劣化が進行していた。

写真 3.1　着手前の試験施工箇所の状況

(2)施工完了

施工完了の状況を写真 3.2 に示す

a)壁部-1　　b)壁部-2

写真 3.2　施工完了状況

3.3.4　下水処理施設での耐硫酸性の検証

施工 3 年 4 ヶ月後の表面を観察した。壁面と天井面に白色の析出物があり、天井では、長さ数ミリメートルの“つらら”を形成したが、剥落などは見られなかった。後述の模擬試験体析出物は、粉末 X 線回析法によればセッコウであった。耐硫酸コンクリートは表面の緻密なセッコウ層により内部を保護するため [3]、析出物は劣化生成物ではなく、良好な耐久性を示した。

3.4　まとめ

① 耐硫酸コンクリートは、粒度調整灰を添加した場合でも、事前の配合検討において材齢 7 日の圧縮強度が 24N/mm² 以上、付着強度が 1.5N/mm² 以上であり、防食技術マニュアルに記載されている耐硫酸モルタルの品質規格を満足することを確認

した。

② 耐硫酸コンクリートは、自己充てん性として要求されるフレッシュ性状の目標値を満足し、一般的なミキサーやポンプで製造、施工が可能であることを確認した。

③ 試験施工では、耐硫酸コンクリートが厚さ 35mm の狭隘な空間で十分充てんされること、また、硬化後に防食被覆層の厚さが設計厚さ以上確保されていることを確認した。

4. 曝露試験

4.1 概要

耐硫酸コンクリートに粒度調整灰を添加した配合で製作した供試体を、芝浦水再生センター東系第一沈殿池の一画に曝露させ、実環境下での耐硫酸性を検証した。

4.2 曝露試験方法

実環境下における年間平均 H_2S 濃度と劣化速度の関係について検討するため第一沈澱池の気相部に鉛直の 1 面を曝露した壁面模擬試験体（10×10×10cm）と、下面を曝露した天井模擬試験体（20×25×5cm）を作製し曝露させた。なお、使用した材料、配合、養生条件、フレッシュ性状及び強度は 2 章で使用したものと同様である。また、曝露地点近くに硫化水素濃度測定器を設置し、現地の温度及び H_2S 濃度を測定した。

4.3 曝露環境及び観察経過

4.3.1 硫化水素濃度測定結果

曝露地点の H_2S 濃度を通年で測定した結果を図 4.1 に示す。測定期間中における H_2S 濃度の最大値は 422ppm、平均値は 40ppm であった。防食技術マニュアルの腐食環境分類においてはⅡ類に相当する厳しい腐食環境である。

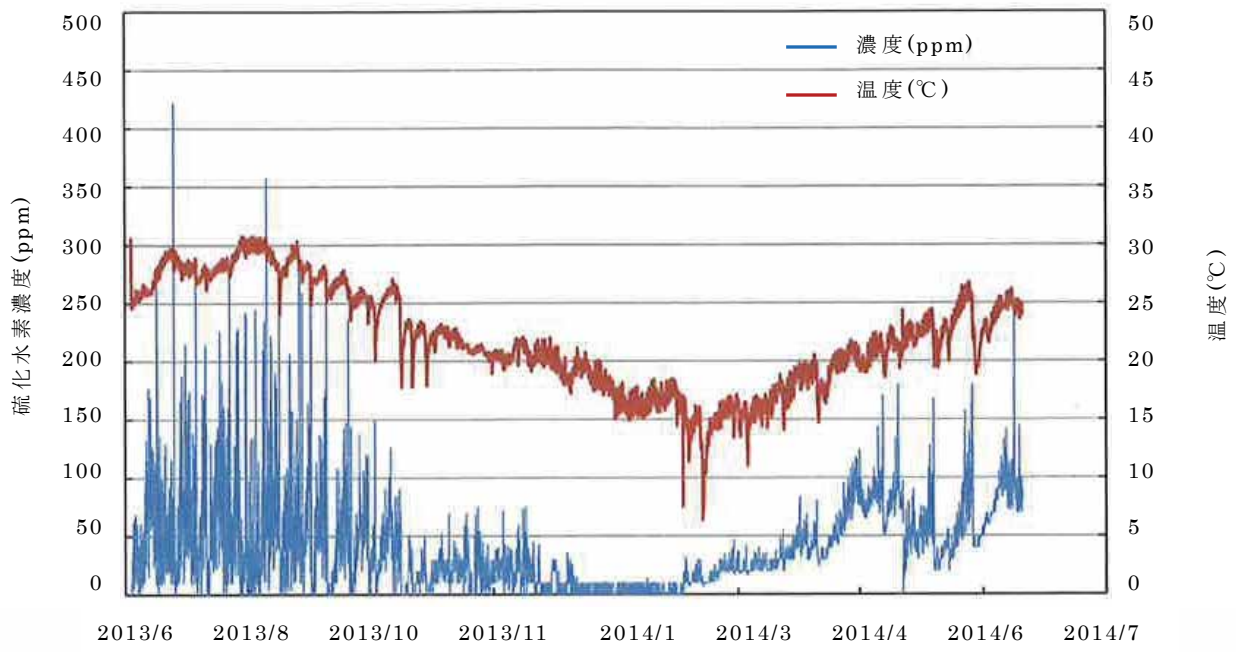


図 4.1 硫化水素濃度測定結果

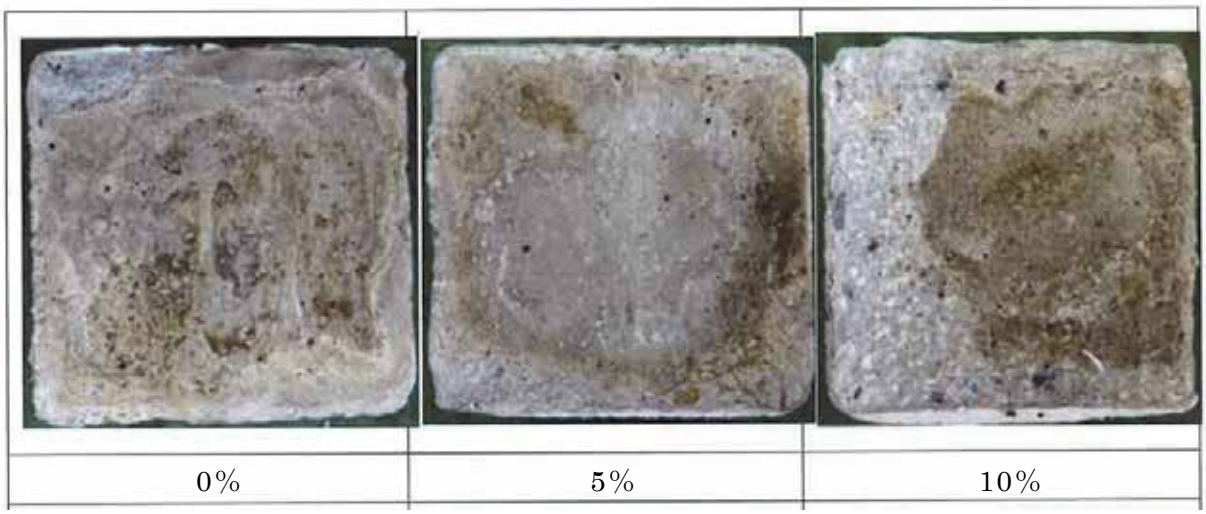
4.3.2 小型供試体の状況

曝露期間 3 年の供試体については、供試体を洗浄する前後の質量変化を記録した。その結果を表 4.1 に示す。比較用の普通コンクリートの一部の供試体において、3%以上の顕著な質量の減少が生じていた。腐食して剥落が生じた結果であると考えられる。

表 4.1 曝露期間 3 年における洗浄前後の供試体の質量変化

配合		質量(g)		質量減少率 (%)
		洗浄前	洗浄後	
小型供試体	0%	2,273.1	2,265.7	0.3
		2,322.8	2,312.4	0.4
	5%	2,281.8	2,271.1	0.5
		2,327.6	2,318.9	0.4
	10%	2,431.8	2,420.0	0.5
		2,462.7	2,432.9	1.2
	比較-27	2,345.7	2,310.4	1.5
		2,302.3	2,262.9	1.7
	比較-40	2,404.8	2,271.1	5.6
		2,331.4	2,255.7	3.2
	比較-60	2,406.7	2,335.7	3.0
		2,389.7	2,325.4	2.7

曝露期間 3 年における洗浄後の写真を写真 4.1 に示す。耐硫酸コンクリートは、白色の層（セッコウ層）が形成されていた。一方、比較用コンクリートでは、端部の腐食が激しく、粗骨材が露出している箇所が広範であった。



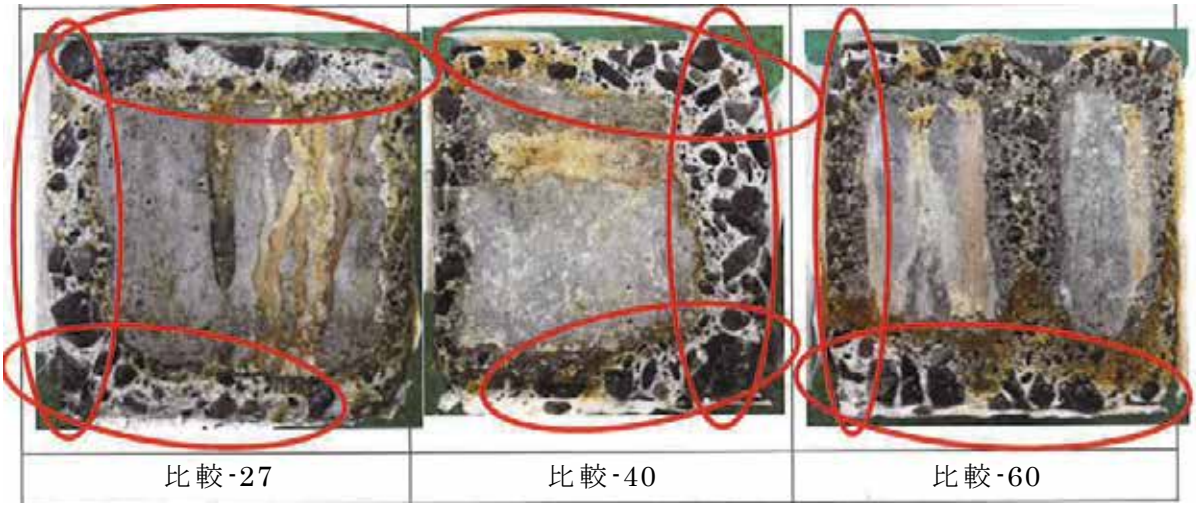


写真 4.1　曝露 3 年後の耐硫酸コンクリート・普通コンクリート

4.4　まとめ

① 芝浦水再生センター東系第一沈澱池の H_2S 濃度平均値は 40ppm、最大値は 442ppm であった。腐食環境Ⅱ類に分類される激しい環境であった。

② 通年の連続的な計測を行わずに年間平均 H_2S 濃度を求める手法を検討し、年 4 回、1 週間ずつ連続計測することで、通年で測定した場合との誤差の小さい、良好な結果が得られると判断された。年 4 回の計測が困難である場合は、夏季に 1 週間連続計測することで裕度を持って腐食環境を評価できると判断された。

③ 曝露期間 3 年で耐硫酸コンクリート（0%、5%、10%）と比較用の普通コンクリートでは、質量減少率の差が顕著になる。周縁部は結露水の集積や角欠けにより劣化が進行しやすいが、耐硫酸コンクリートの浸漬深さは曝露面の中央部と周縁部で相違なく、また比較用の普通コンクリートの 1/3 程度であり、下水環境において耐硫酸性に優れることを確認した。

4.　おわりに

本共同研究では、耐硫酸コンクリートを用いた防食技術が優れた防食性能を有することの検証及び耐硫酸コンクリートに粒度調整灰を添加した際の影響について検証を行った。得られた知見を以下に示す。

① 耐硫酸性の検証

粒度調整灰（下水汚泥焼却灰）を用いて、耐硫酸性能を有するコンクリートを開発した。既存の耐硫酸モルタルの規格を上回る耐硫酸性が期待できる。

② 施工性の検証

運転中の下水処理施設において、現場打ちの耐硫酸コンクリート（粒度調整灰 5%、10%添加）を厚さ 35mm の狭隘部へ充填した。耐硫酸コンクリートの圧縮強度や付着強度、フレッシュ性状（自己充てん性）は目標値を満足し、薄肉の断面修復が可能であることを確認した。また、施工は一般的な設備で実施可能であり、硬化後に防食被覆層の設計厚さを確保でき、表面に欠陥がないこと、防食被覆層として耐久性を有することを実証した。

③　粒度調整灰の影響の検証

粒度調整灰を添加した配合は耐硫酸性や施工性の要求性能を満たしていた。ただし、添加率が増加するにつれて高濃度の硫酸に対する耐硫酸性が低下し、粘性は増加する傾向にあった。

曝露試験において、小型供試体の欠損深さは粒度調整灰の添加率によらず一定であった。下水汚泥焼却灰の重要な活用法のひとつとして期待できる。

④　今後の課題

耐硫酸モルタルのD種相当の品質規格については防食技術マニュアル及び当局コンクリート改修技術マニュアルには記載がない。また、B種、C種の品質規格の試験項目すべてを本共同研究では、行い切れていない。規格内容等の整理、その補完方法については、今後の検討課題である。

参考文献

1）日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食マニュアル、下水道事業支援センター（2012）

2）大脇英司:耐硫酸コンクリートを活用した下水道施設の整備と再生､コンクリート工学、Vol154、No.12、pp.1169-1177（2016）

3) 小西和夫ほか：下水道施設用コンクリートの耐硫酸性に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.57，pp.315-320 (2003).

3-1-4　熊の木ポンプ所ガスタービン発電設備に関する低周波音振動への対策について ～サイドブランチの有効性について～

東部第二下水道事務所　中川水再生センター　大村　一輝

1　はじめに

中川水再生センターは、現在３か所のポンプ所（熊の木ポンプ所、東金町ポンプ所、加平ポンプ所）を遠方制御している。この３か所のポンプ所はいずれも雨水ポンプ所であり、この中でも熊の木ポンプ所は規模が大きいポンプ所である。

近年大雨で熊の木ポンプ所のガスタービン非常用発電機（以下「GTG」という。）が稼働した際、周辺家屋に振動が発生し、苦情が寄せられるようになった。

この振動の原因の一つに人の耳では感知できない低周波音というものがあり、この低周波音が周辺の建造物等に振動を発生させていることが分かった。

本発表では、この低周波音振動対策として、消音器の一種であるサイドブランチの設置を提案し、その効果を実験及び実際に設備に取り付けて検証したので報告する。

2　熊の木ポンプ所 GTG の振動問題の背景

2.1　熊の木ポンプ所 GTG における振動問題の経緯について

図－1 に熊の木ポンプ所及び周辺の平面図を示し、表－1 に熊の木ポンプ所 GTG の概要を示す。

図－1　熊の木ポンプ所及び周辺平面図

表－1　熊の木ポンプ所 GTG 概要

ガスタービン機関	形式	単純開放サイクル2軸式空気始動式
	出　力	16,800kW
	回転数	3,000rpm
	燃　料	灯油
発電機	形式	三相交流同期式
	容　量	21,000kVA
	力　率	80%
	電　圧	3,000V
	回転数	3,000rpm

熊の木ポンプ所の GTG は設置以降 21 年が経過し、排気系統の経年劣化が原因と考えられる騒音・振動が発生しており、そのほとんどが大雨対応において GTG を高負荷運転した時であった。

このため、平成 22 年に設置メーカによる現地調査を行った。調査の結果、定格 16,800kW である GTG の 50%定格の 8,400kW 付近の負荷運転で低周波音（16Hz、31.5Hz、50Hz）にピークが存在することがわかり、特に 16Hz の低周波音が周辺建造物に振動を発生させていることが判明した。また、低周波音の発生要因は GTG 排気消音器の劣化進行によるものと推測され、本格的に対応を検討することになった。

2.2　低周波音発生の原因について

平成 22 年の調査によって振動の発生原因は低周波音であることが判明したがその低周

波音の発生場所が不明であったので、平成 25 年 8 月 6 日に発生場所を特定するため GTG 排気消音器を中心に各箇所に低周波音計及び振動計を設置し、およそ 2 か月間調査を行った。

調査の結果、低周波音の発生場所が GTG 排気ダクト出口であることが分り、排気消音器及び排気ダクトの劣化によりダクト内の通過流速が特定の流速に達すると低周波音が生じると推測され、排気消音器の更新改良によって振動問題は解消されると結論付けた。

3　低周波音及びそれによる振動発生の仕組み

3.1　音が持つエネルギーについて

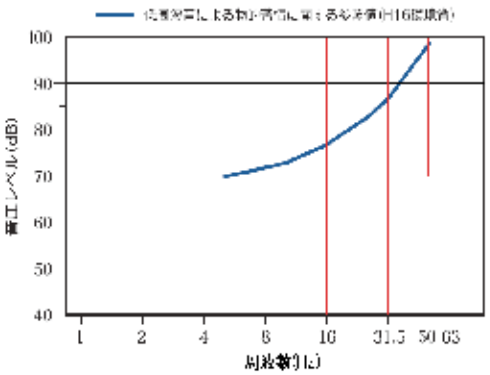
音が持つエネルギーは一般に音圧レベルであらわされ、その単位は dB(デシベル)となる。人間が音を聞いた時にその音のいずれかの周波数で音圧レベルが大きいと、その音を大きいと感じる。従って、騒音の評価や騒音の原因を調査する場合、どの周波数の音圧レベルが高いのかを調査することが一般的である。

3.2　低周波音及び低周波振動について

低周波音とは周波数が 100Hz 未満の音の事を指し、特に 20Hz 未満の周波数の音は人の耳では音として感知することができない。しかし、建造物は 20Hz 未満の周波数で共振をおこし振動する場合がある。この振動を低周波振動と呼ぶ。

図－2 に環境省により示された、物的苦情が寄せられた際、その苦情が低周波音によるものか否かを判断する目安となる各周波数の音圧レベルを示す[1)]。

図－2 により、16Hz の低周波音が苦情となる目安の音圧レベルは 77dB であり、31.5Hz では 87dB であることが分る。また、同一の音源が 2 つある場合、その音圧レベルは音源の音圧レベルに 3dB 足される。従って、将来建設予定の GTG2 号を考慮して、騒音を低減する際の目標は 16Hz で 74dB、31.5Hz で 84dB となる。



図－2　低周波音による物的苦情に関する参照値

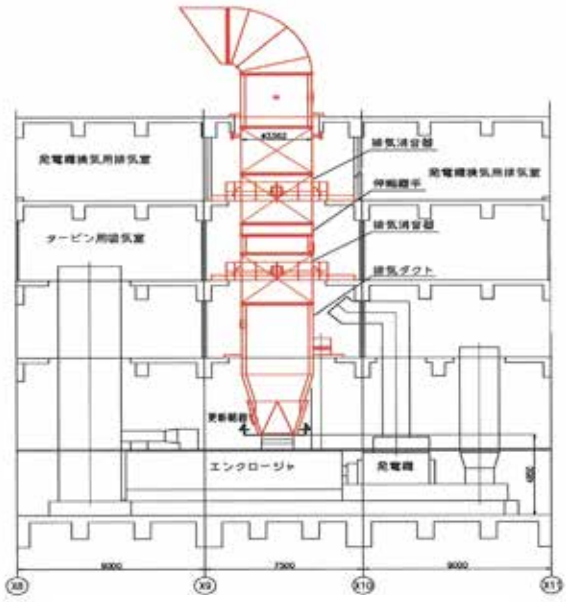
4　熊の木ポンプ所ガスタービン発電設備改良工事

4.1　工事概要

平成 25 年の調査を元に、GTG の排気消音器及び排気ダクトを改良した。工事期間は平成 26 年 6 月 2 日～平成 27 年 3 月 12 日までであった。図－3 に工事によって更新した GTG の断面図を示す。

4.2　施工後の試運転結果について

施工後試運転を行った結果、50%（8,400ｋW）負荷運転中に周辺建造物に振動が発生し試運転を中止した。振動発生時の各周波数の音圧



図－3　GTG 断面図

レベルは、改良前の平成 25 年 8 月 6 日の値よりも高くなり、改良後の方が低周波数振動の性質がより顕著に出てしまう結果となった。

4.3　試運転結果後の対応

改良前のメーカの見解では､劣化した排気消音器及び排気ダクトの更新で改善されるはずだったが症状は悪化した。この原因を調査したところ、低周波音は劣化した排気消音器及び排気ダクトから直接発生していたのではなく、GTG 本体から発生した低周波音が排気ガスによって排気ダクトと気柱共鳴し増幅していた可能性が高いことが判明した｡従って、熊の木ポンプ所の低周波振動現象は「空気を吹き込んで特定の音を発生する」フルートに代表される木管楽器の発音原理とほぼ同様の原理で発生していたと結論付けた。

この結論により､更新した排気消音器及び排気ダクトに更なる改造を検討し施工する必要が生じたので、工期を平成 28 年 3 月 25 日(延長日数 379 日)まで延長するとともに、工期延長期間中の停電対応として仮設発電機（6,720kW）を設置した。

5　改造内容の検討について

5.1　改造案について

低周波振動の原因が気柱共鳴であるため、ダクトに低周波振動抑制に実績があり、形状が比較的シンプルな構造である共鳴型サイレンサと呼ばれる消音器を取り付ける事で解決する可能性が高いと判断した。

5.2　消音器の選定について

検討する消音器の種類は以下の２つとした。

(1)　レゾネータ

共鳴型サイレンサと呼ばれる消音器の一種で、ダクトの表面にあけた孔と、背後空間とで共鳴器を形成したものであり、特定の周波数に効果がある。

低周波音に効果をもたせるためには､背後空間の容積を大きくしなければならないので、大型のものとなる。小型の真空ポンプ、コンプレッサ等比較的ダクト径の小さいものに使用されることが多く､また､ダクト内の流速を速くすると気流による笛吹き現象が発生し、本件のような径が大きく且つ排気ガスの流速が早いダクトには適さないと考えられた。

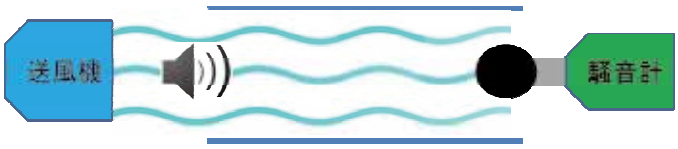
(2)　サイドブランチ

共鳴型サイレンサと呼ばれる消音器の一種で､主ダクトに干渉用の枝管を取り付けるだけで効果があるため、低周波音低減用に多く実用化されている。ただし、サイドブランチは取り付ける位置やサイドブランチの長さによって減音量が大きく異なるので､詳細に検証する必要がある。また、一般にサイドブランチは取り付ける本数が増えるほど減音性能が高くなる。

6　模型実験について

6.1　模型概要

図－4 に模型の概要を示す。レゾネータ及びサイドブランチの効果の検証と形状の検討を行うために、塩化ビニル管にて模型を制作した。排気ダクトを模した主管内に送風機で風を流し、主管入口からスピーカーによって出された音の出口での減音量にて評価した。

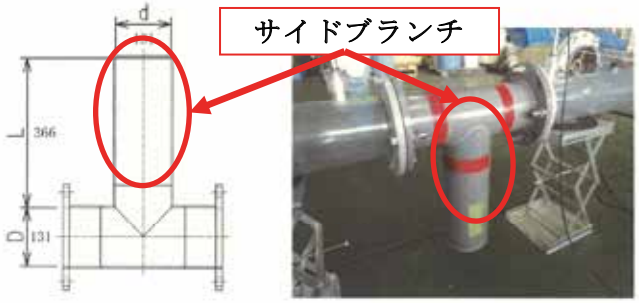


図－4　模型概要

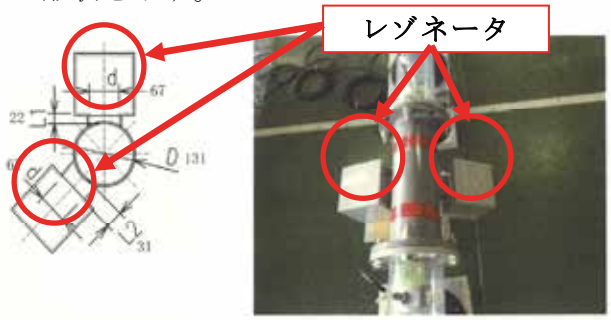
主管の内径は実機φ3000mm を模型ではφ131mm とし、スケールは 1/22.9 である。実機で発生している周波数は 16.7Hz で流体と温度の違いより音速は 66.2%になることから、目標とする周波数は 16.7×22.9×0.662≒253Hz を目標に試験を行った。まず各消音器の減音特性を要素試験にて検証し、続いて実機形状減音特性試験を行った。

6.2　要素試験

要素試験は主管内の流速をパラメータとして試験を行った。流速は表に示す。図－5 にサイドブランチの形状、図－6 にレゾネータの形状を示す。

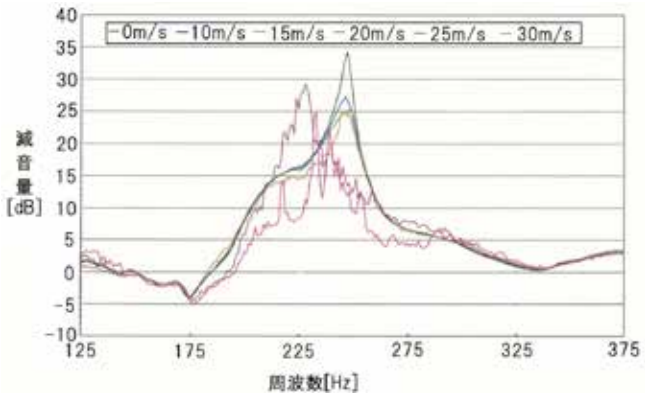


図－5　サイドブランチの形状

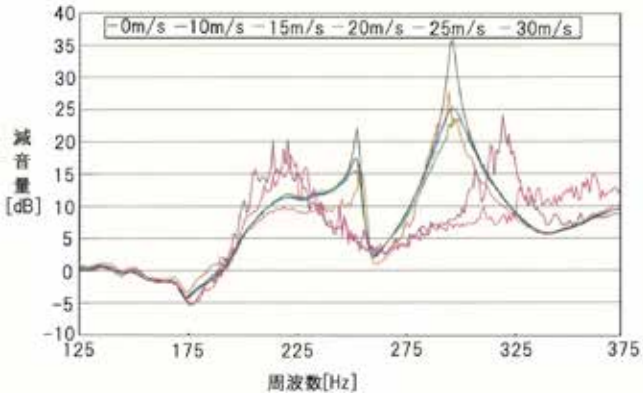


図－6　レゾネータの形状

サイドブランチの要素試験結果を図－7 に示し、レゾネータの要素試験結果を図－8 に示す。



図－7　サイドブランチの要素試験結果



図－8　レゾネータの要素試験結果

図－7 からサイドブランチは、ある一定の幅を持った周波数帯に減音性能があることが読み取れる。また、減音特性は主管内の流速にあまり影響を受けていないことも読み取れる。従って、排気ダクトに取り付けることで効果が十分に期待できると考えられる。

図－8 からレゾネータは特定の狭い周波数帯で効果があること分かる。減音量の山が 2 つあるのは、寸法の異なる 2 つのレゾネータのそれぞれで減音効果があったと考えられる。しかしながら、レゾネータについては主管内の流速が速くなるにつれて大幅に減音性能が低下することが図から読み取れる。このため、レゾネータ単体では GTG において減音効果が十分得られないと推測できる。

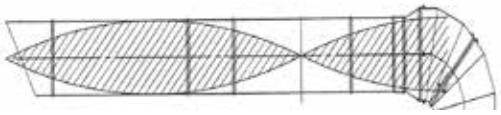
以上の結果より、実機模擬試験ではサイドブランチを中心に効果を検証する運びとなっ

た。

6.3 実機模擬試験

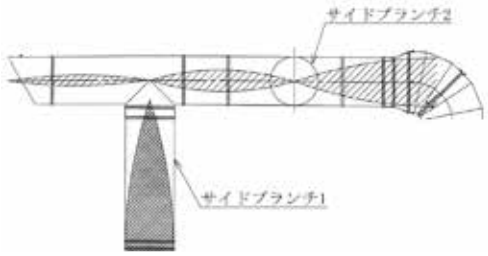
要素試験の結果を受けて実機模擬試験を行った。より減音性能を高めるためサイドブランチを 2 本主管に取り付ける。

一般に気柱共鳴が起きている管内には図－9 のような定常波ができる。



図—9：気柱共鳴時の定常波

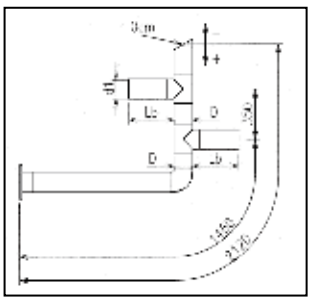
図－10 にサイドブランチを 2 本取り付けた後の定常波のイメージを示す。サイドブランチは、波長の 1/4 の長さに当たる定常波の腹の部分に付けると減音効果が高い。サイドブランチを取り付けた後の定常波は取り付けた位置を波の節として新たに形成される。従って 2 本目のサイドブランチは、この新たに形成された定常波の腹の位置、即ち、最初の定常波の波長の 1/2 の長さに当たる位置に取り付ければ、効果の上乗せが期待できる。



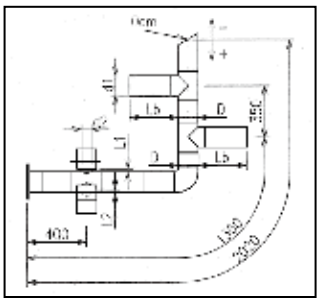
図—10　サイドブランチ取付け時の定常波

実機模擬試験の前に行った熊の木ポンプ所の GTG の実測により、低周波音は 16.7Hz、排気ダクト内の音速はおよそ 535m/s であったので、低周波振動が起こっている際の排気ダクト内の定常波の波長は 32m である。従って、1/4 波長の長さが 8m、1/2 波長の長さが 16m になり、その位置にサイドブランチを取り付けると想定し実機模擬試験を行った。また、レゾネータについては単体ではあまり効果はないが、サイドブランチと組み合わせることで効果がある可能性があったので併せて検証した。

図－11 にサイドブランチを 2 本取り付けた模型の概略図及び実写真を示し、図－12 にサイドブランチ 2 本及びレゾネータを取り付けた模型の概略図及び実写真を示す。

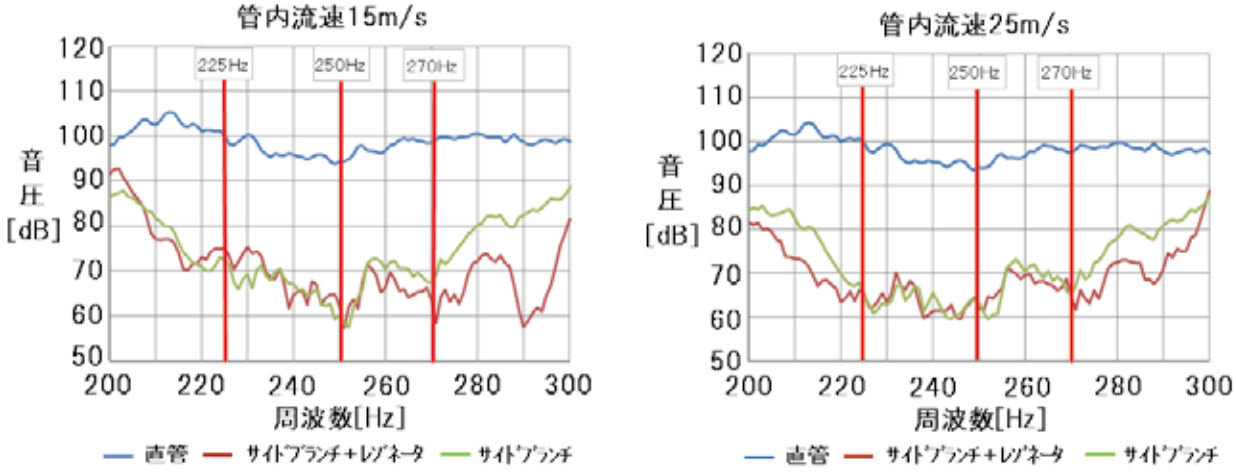


図－11　サイドブランチを 2 本取り付けた模型の概略図及び実写真



図－12　サイドブランチ 2 本及びレゾネータを取り付けた模型の概略図及び実写真

図－13 に管内流速 15m/s、25m/s における実機模擬試験の結果を示す。



図－13　実機模擬試験結果

図－13 のサイドブランチのグラフにおいて目標としていた 250Hz 帯での減音効果がある事が読み取れる。また、管内流速が上昇しても、減音効果の低減は顕著ではなかった。

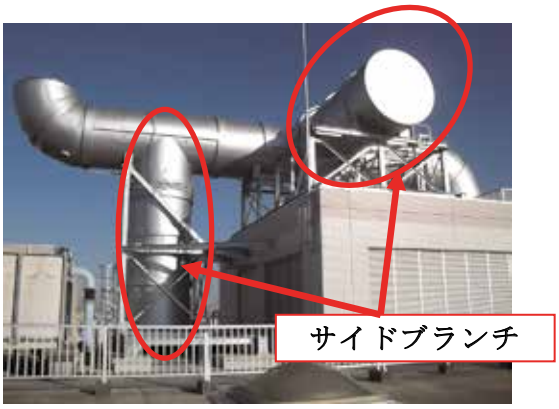
サイドブランチとレゾネータを組み合わせた場合はサイドブランチのみの時に比べて、減音する周波数帯の範囲は増えるがほとんど両者の差は見受けられない。

以上の結果より、サイドブランチの位置を開口部から 8m と 16m の位置に取り付けることで 16.7Hz 帯の低周波音の減音効果が期待できる見通しがついた。

7　サイドブランチ増設工事

7.1　サイドブランチ設置

現状の排気ダクトの開口端から 8m と 16m の位置は建物の中になるため、サイドブランチを取り付けるスペースがなかった。そこで排気ダクトを十分な長さに延長してサイドブランチを取り付けることにした。図－14 に実際に取り付けたサイドブランチの外観を示す。

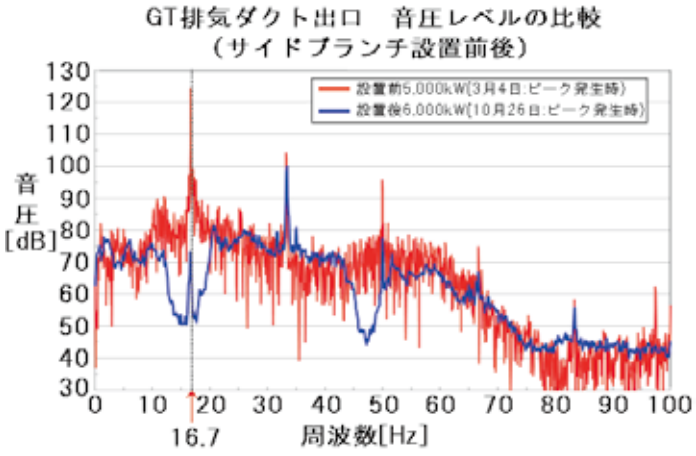


図－14　サイドブランチ外観

7.2　実機確認運転

実機での確認運転では、負荷投入後 1,000kW ずつ負荷を上昇させてデータの計測を行った。その結果 6,000kW 到達時点で排気ダクト出口付近において、16.7Hz の音圧レベルが増大したのを確認した。図－15 にサイドブランチの設置前後の各周波数帯の音圧レベルのグラフを示す。

サイドブランチの設置により、問題であった 16.7Hz の周波数の音圧レベ

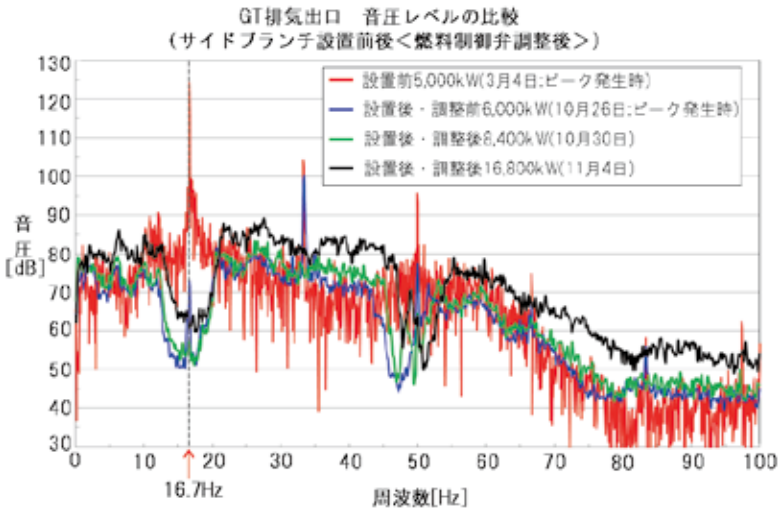


図－15　サイドブランチ設置後の音圧レベル

ルが低減されていることが図から読み取れる。しかしながら、依然音圧レベルのピークが発生しており、このピークを抑えることで低周波振動をさらに抑制することができると考えられる。

今回の確認運転において排気ダクトの低周波振動時、周辺建造物の窓枠のガタツキ等はなかったため、実機運転状態での GTG の調査が可能であると判断し、サイドブランチ設置後の調査を行った。

調査の結果、燃料制御弁開度、燃料圧力、圧縮機出口圧力共に約 16Hz の周波数で変動していることがわかり、燃料制御系統の共鳴が低周波振動の一要因であることが判明した。この結果を受け、低周波振動を発生させた状態で燃料制御パラメータの調整を行い、燃料制御系統が共鳴しないようにパラメータを変更した。図－16 に調整前後の各周波数の音圧レベルの比較結果を示す。



図－16　制御パラメータ調整前後の音圧レベルの比較結

制御パラメータの変更によって低周波振動そのものを消失させることはできなかったが、16H z 帯の音圧レベルは 100%負荷運転においても急激なピークが発生しないレベルまで低下した。また、100%負荷運転においても周辺建造物の窓枠のガタツキ等はなかった。

この結果により熊の木ポンプ所の GTG は低周波振動の制限を受けることなく運用することが可能となった。

8　おわりに

熊の木ポンプ所において長期に渡り問題であった GTG 運用時の低周波振動の低減対策として、サイドブランチの設置及び燃料制御系パラメータの変更を行った。対策の効果としてサイドブランチの設置では、16Hz 帯の音圧レベルを大きく低減し、周辺建造物の窓枠のガタツキ等を解消した。併せて行った燃料制御系パラメータの変更では、低周波の急激なピークを抑制した。また、最大負荷時のヒートラン運転中に敷地境界にて騒音計測を行ったが、問題ない数値であり有効性が確認できた。また、平成 28 年度に入り大雨の際 GTG を稼働させているが問題ないことを確認している。

今後は、当センター及びポンプ所の維持管理を万全にし、お客様の安全を守り、安心で快適な生活の創出に貢献していく。

参考文献

1）環境省　水・大気環境局大気生活環境室：よくわかる低周波音，pp. 18(2007)

3-1-5　スカム処理設備フローコンベヤ自動洗浄装置について

東京都下水道サービス株式会社　施設管理部　西部保全センター　落合保全事業所
小堀　和夫、米山　大介、原口　項邦、池谷　省三、斎藤　友之、池田　一夫

1. はじめに

落合水再生センターは、南系 380,000 ㎥/日、北系 70,000 ㎥/日の合計 450,000 ㎥/日の処理能力を有し、処理区域は中野区の大部分と新宿・世田谷・渋谷・杉並・豊島・練馬区の一部で、処理面積は 3,506ha となっている。

当センターの特徴としては、二沈処理水全量を砂ろ過し一部を西新宿や中野坂上地区のビルのトイレ用水として供給している他、城南三河川の清流復活事業に活用している。

落合保全事業所では、水処理で発生するスカムの処理設備について、洗浄作業やスカムの詰りによる故障対応などに多くの時間と労力を費やしている。今回の取り組みは、その中でもスカムをホッパまで搬送するフローコンベヤの改良により、洗浄作業時間の短縮、故障の削減および作業環境の改善を目的とした。

2. 設備概要

今回の改良対象設備である、北系のスカムフローコンベヤ１号は、スカム分離機により固水分離されたスカムを、スカムホッパまで搬送する設備である。

スカムフローコンベヤ１号の仕様は表１のとおりである。

表１　スカムフローコンベヤ１号仕様

型　　式	SDS-Z 型スネコン
チェン速度・型式	8m/min・No302
電　動　機	4P×1.5kW×400V×50Hz
搬　送　物	スカム(見掛比重 0.8～0.9)
搬　送　量	0.1t/h

設備の模式図を図１に示す。

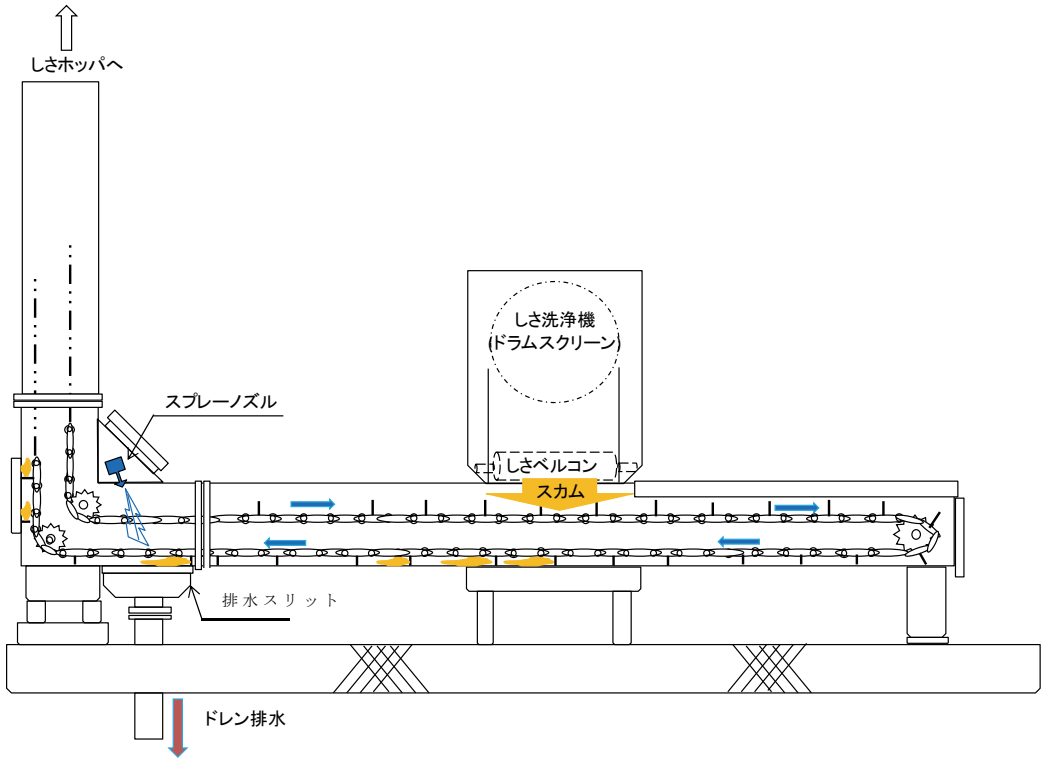


図１　スカムフローコンベヤ構成図

3.　現状と問題点

スカムフローコンベヤ１号の現状は次のとおりである。(図 2～5 参照)

・スカムの取りこぼしがある
・コンベア内部にスカムが付着、堆積し不衛生
・排水スリットが目詰まりしてコンベヤ底部に水が滞留する
・コンベヤ底部に水が滞留するので排水スリット上部にある手動洗浄装置のスプレーが水面を叩く状態になり、スリットの洗浄効効果が低い
・ビニール片や紐類が可動部に絡みつき故障を発生させている
・高圧洗浄機を用いるコンベヤ内部の洗浄作業は、作業者に水が跳ね返り非常に不衛生である

設備として次のような問題がある。

・スカム掻き取り用フライトとコンベヤ底板との間に間隙がある
・排水スリットの上面はコンベア底面より２ｍｍほど低く凹んでいる
・排水スリットが目詰まりする
・洗浄装置が排水スリット上部の１か所にしかなく手動式である

コンベヤ内部の汚れ状態

図 2　スカムによる閉塞（部分）

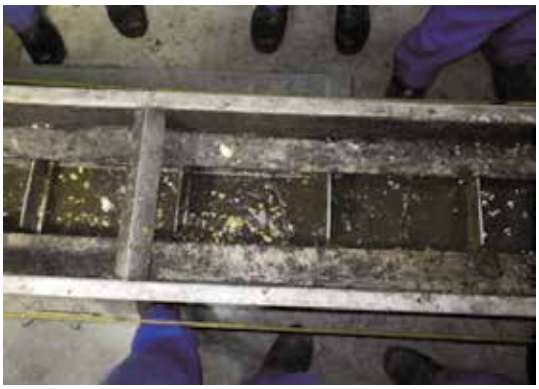


図 3　スカムによる閉塞（全体）

排水スリット清掃状況

図 4　竹棒による清掃

図 5　高圧スプレーによる清掃

4.　取組み

4.1　設備改良概要

問題点の解消、軽減を図るため下記の改良を実施した。

4.1.1　洗浄用スプレー配管およびノズルの増設

既設の洗浄装置は排水スリット上部に 1 か所あり洗浄ノズルが 2 個設置されている。手動操作のため日常・定期点検時のみ人が操作しているため、十分な洗浄ができず排水スリットの目詰まりに繋がっている。今回は洗浄配管を延長しコンベヤ中部およびテール部にも洗浄ノズルを設置することで、コンベヤ内部全体を洗浄できるよう改良を行った。

4.1.2　洗浄を自動化するシステムの構築

現状の手動洗浄では洗浄回数が不足しているため、プログラマブルコントローラを使用し電磁弁を制御することにより洗浄を自動化した。このコントローラは、パソコン上で作成したプログラムを転送することで洗浄時間、洗浄回数などを任意に設定することができる。この機能を利用し、最適な設定を実機試験により検証した。

4.1.3　スカム掻き取り用フライトの改善方針

スカムの取りこぼしを少なくするために、既存のフライトを改造し掻き取り及び搬送能力を改善する。試作品を 4 点作成し最も効果と耐久性のあるものを、実機試験により検証した。

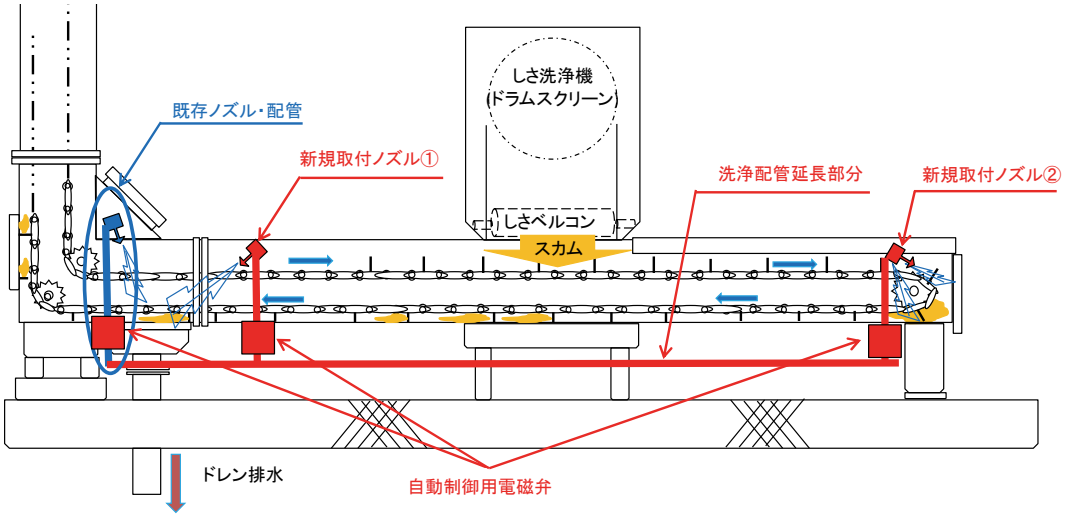


図 6　今回新設したノズルおよび延長した配管一式

4.2　自動洗浄装置の構築

4.2.1　洗浄用スプレー配管およびノズルの増設

新規取付ノズル①(図 7)および既設ノズル(図 9)については、回転してくるフライトの洗浄効果と排水スリットの洗浄・詰り除去を狙っている。新規取付ノズル②(図 8)は、コンベヤテール部に滞留するスカムの除去とフライトの洗浄効果を狙った。

それぞれ取付角度の調整とスプレーパターンの角度調整を繰り返し行い最適な調整を行った。ノズルのスプレーパターンは扇形を採用した。

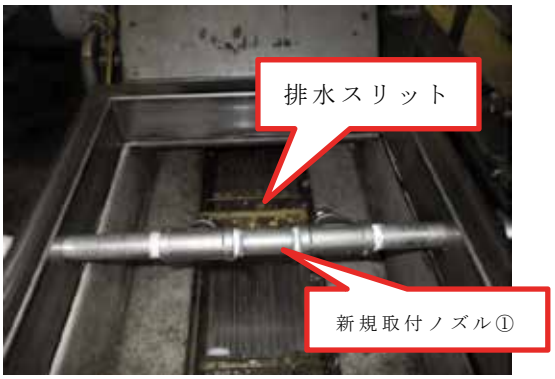


図 7　新規取付ノズル①

図 8　新規取付ノズル②

図 9　既設ノズル

4.2.2　洗浄を自動化するシステムの構築

図 6 の延長した洗浄配管に取り付けた電磁弁を、プログラマブルコントローラ(図 10)により制御を行う。自動制御用ラダーチャートの作成および仮設の現場操作盤の作成取付けと操作盤から電磁弁間等の配線を行った。

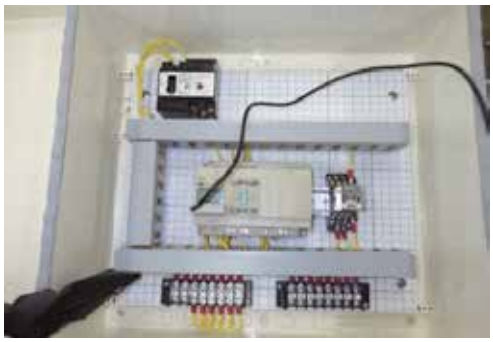


図 10　プログラマブルコントローラ

図 11 に各洗浄スプレーの運転フローを示す。

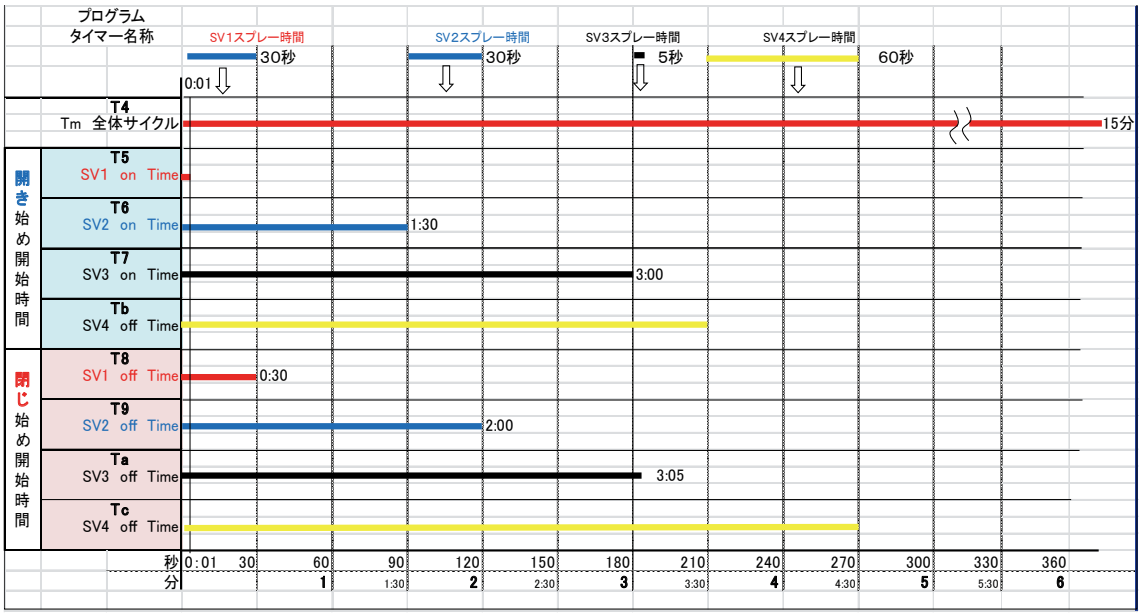


図 11　洗浄スプレー運転フロー

※SV1：既存ノズル用電動弁　SV2:新規取付ノズル電動弁①　SV3：新規取付ノズル電動弁②
SV4:スカムコンベヤ洗浄用電動弁(後述)

4.3　スカム掻き取り用フライトの改善

図 12　フライト実物

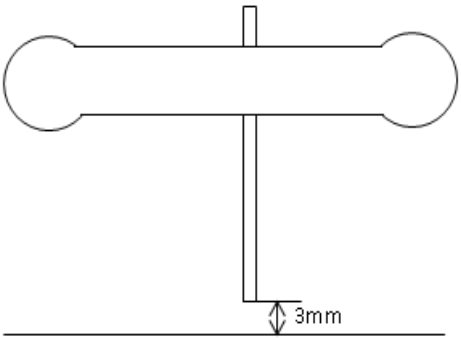


図 13　フライトと底板の位置詳細

スカムの取りこぼしを少なくするためにフライトの改良を行った。現在使用しているフライト(以下標準フライト)は図 4 に示す通りコンベヤ底板との間に３ｍｍ程度の間隙があり、スカムの取りこぼしがある。また、コンベヤの立ち上がり部においては、図 5 に示すように間隙がさらに広がり角に滞留してしまう。

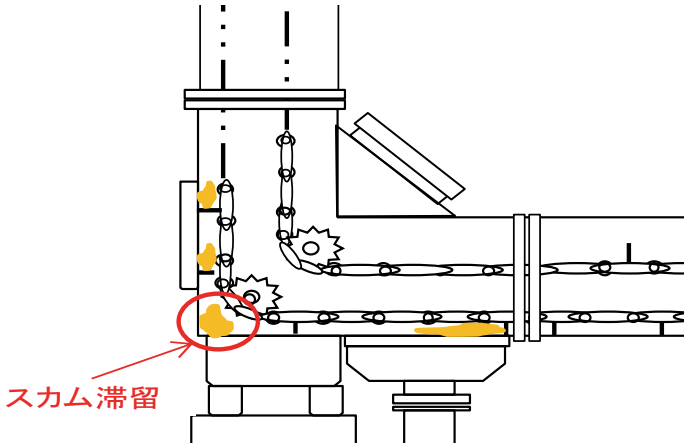


図 14　コンベヤ立ち上がり部のスカム取りこぼし

これらを改善するために標準フライトをスカムの搬送が円滑かつ取りこぼしの無い様に加工を行った。次項に今回試作したフライトを示す。

4.3.1　ゴム板取付け

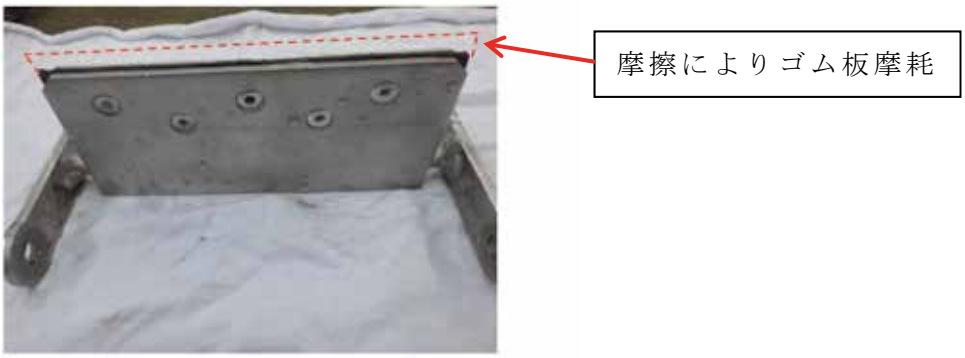


図 15　摩耗したゴム板

フライトの先端部にゴム板をリベット止めしたものであるが、掻き取り効果は良好であった。しかし、約 2 週間ほどでゴム板が摩耗してしまい耐久性に問題があった。

4.3.2　蝶番を取付けフライトに可動性を持たせたもの

図 16　蝶番付フライト①

図 17　蝶番付フライト②

4.3.3　ワイヤブラシ先端部を取付け

図 18　スペアブラシ付フライト

図 19　スペアブラシ付フライト取付状況

掻き取り効果を高めるために、ワイヤブラシ先端部のスペアブラシを溶接した。掻き取り効果は非常に高く取りこぼしは、ほとんど見られなかった。しかし、ブラシ先端部にスカムが絡みつきこれの洗浄に手間がかかってしまった。

4.3.4　ワイヤケーブルを溶接で固定

図 20　ワイヤケーブル付フライト

図 21　ワイヤケーブル付フライト取付状況

前述の 4.3.1～4.3.3 までの結果を踏まえ、掻き取り能力と耐久性および洗浄のしやすさを検討した結果、ワイヤケーブルを標準フライトに溶接する方法を考案した。掻き取り能力も良好であり、ワイヤに絡みついたスカムも洗浄自動化による効果で人の手による清掃作業はほぼ必要がなくなった。しかし、1 か月程度の使用でワイヤケーブルが、取付け部の根元で破断してしまい、耐久性の問題が発生した。

原因として、フライトの回転に伴い曲げ、伸ばしが繰り返されることで取付け部の根元で破断が起きていると推測した。このため、ワイヤケーブルをスカムの取りこぼしの無い、限界まで短くすることで曲げ角度を最小にすることにより、耐久性が向上するか試みた。図 22 を参照。

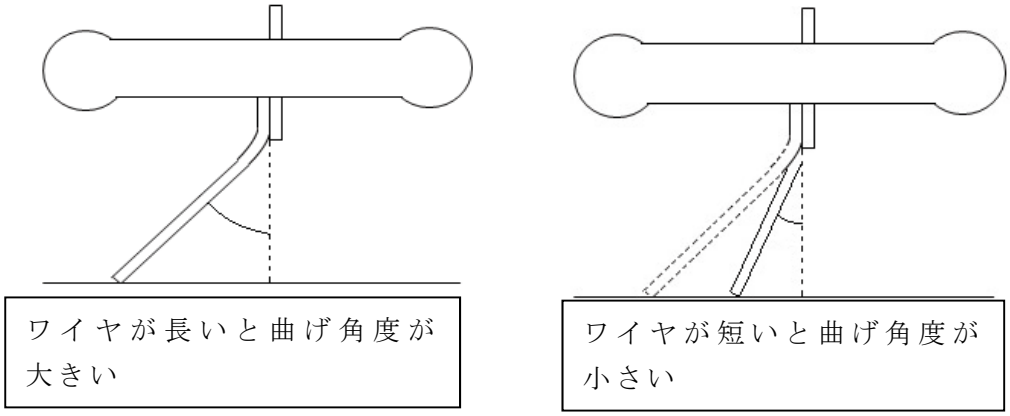


図 22　ワイヤの長さと曲げ角度

改良前は、1か月程度でワイヤの破断が起きていたが、改良後は6か月以上問題なく運用できている。

さらに、ワイヤの破断が起きても補修が容易にできるようにワイヤの取り付け方法をビス止めに変更したものも試作した。ビス先端部などの凹凸部にはスカムの絡み付きを防止するため、金属パテを使用し表面を均している。

図 23　ワイヤ付フライト（変更後）①

図 24　ワイヤ付フライト（変更後）②

5. まとめ

今回の改良内容を整理すると、

1) コンベヤ内部および排水スリットの洗浄用の洗浄スプレーを改良、増設した。
洗浄スプレーの取り付け位置や角度、ノズルの形状を変更した。排水スリットの洗浄に加え、フライトの洗浄やコンベヤテール部分に滞留するスカム除去能力を向上させた。

2) 既設、新規合わせて3か所に取り付けた洗浄スプレーを自動運転化した。
自動化することで、最大流量を最適な場所に必要な時間だけ噴射することができるようになった。最大流量で洗浄するが、洗浄効率が上がることに加え洗浄時間が各ノズル5～30秒と必要最低限の時間に設定できるため、洗浄水の削減にも繋がった。

3) スカムの取りこぼしを少なくするため、スカム搬送用のフライトを改良した。
4種類のフライトの試作を繰り返し、耐久性、掻き寄せ能力や補修の簡便性などを検証した結果、最終的にはワイヤケーブルをビスでフライトに取り付ける方法を採用した。

掻き寄せ能力は他の試作よりやや劣るが、1周あたり4か所取り付けることで全体としては能力を発揮することができた。

3章「現状と問題点」でも述べたが排水スリット、コンベヤ内部洗浄は、高圧洗浄機を用いて行っていたため、洗浄水の跳ね返りが作業員にかかり非常に不衛生な作業であった。

今回の改良により、排水スリットの目詰まりも、週に一回、散水ホースで軽く洗浄する程度で済むまで改善し、高圧洗浄機での洗浄は必要なくなった。

また、コンベヤ内部も洗浄スプレーの効果により改良前に比べ、清浄な状態となった。次に、改良後の運転状態の写真(図25～28)を示す。運転後1か月を経過した時点の写真である。改良前に比べ排水スリットの目詰まりも少なく、フライトやコンベヤ内部全体が正常に保たれていることが確認できた。

図 25　コンベヤ立ち上がり部

図 26　スプレー1 付近

図 27　排水スリット

図 28　テール部

6. 今後の展望

前述のとおり、洗浄スプレーを自動制御化することで、既設の手動洗浄装置による連続散水に比べ効率的に洗浄できることが確認できた。これを受けて隣接するスカムベルトコンベヤのドレンパン洗浄スプレーにも電磁弁を増設した。

これは、今回使用したプログラマブルコントローラの使用していない接点を利用して取り付けた。(図 11 の SV-4)

今後、各所に設置されているコンベヤにも水平展開し、作業時間の短縮でき作業環境が衛生的になることで、他の保全作業の質を向上することが期待できる。

3-2-1　「技術開発推進計画 2016」の策定における技術経営手法の活用について

計画調整部　技術開発課　池田　潤考

1.　「技術開発推進計画 2016」の策定

当局では、事業が直面する課題や将来を見据えて解決すべき課題について計画的に技術開発に取り組むことで下水道サービスの維持・向上を図るため、平成 28 年度から平成 32 年度までの技術開発の基本計画である「技術開発推進計画 2016」（以下「本計画」という。）を平成 28 年 12 月に策定した。本計画では、技術開発における開発テーマの設定から事業化までの流れをＰＤＣＡイクルで総合的にマネジメントしていくため、技術経営（ＭＯＴ）手法を新たに活用することとしている。ここでは、本計画の開発テーマの設定において技術経営（ＭＯＴ）を活用した手法と、技術開発の推進に向けた取組について報告する。

2.　技術開発を進める上での課題

これまで以上に効率的・効果的かつ革新的な技術を開発するために、技術開発を進める上での課題について整理し、次の４つに集約した。

2.1　技術開発のマネジメント力の強化

下水道の普及から維持管理への時代変化や、IoT や AI などの新たな技術の進展など、技術的課題は複雑になっており、効率的に技術開発を進めるためのマネジメント力の強化が求められている。

2.2　従来技術の延長線ではない新しいアイデアの必要性

ICT などの新たな技術が急激に進展しており、こうした技術を活用することで今まで解決が困難であった課題に対しても解決の可能性が生まれている。こうしたことから、下水道の枠に捉われない様々な分野でニーズとシーズをマッチングさせ、新しいアイデアを生み出すことが求められている。

2.3　技術開発を取り巻く環境の一層の改善

厳しい経済状況などにより、民間企業などの開発意欲が低下すると、下水道界の技術開発が滞ってしまうため、共同研究への参画を促進するインセンティブを高める取組を行う必要がある。

2.4　技術力を高める機会の充実

団塊世代の大量退職により技術力の低下が懸念されているが、下水道界の技術力の向上を図るためにも下水道技術の向上を支援する取組が必要である。

3.　技術開発の取組方針

前述の課題を踏まえ、４つの取組方針「技術経営（ＭＯＴ）手法の活用」、「オープンイノベーションの推進」、「共同研究の更なる活性化」、「下水道界の技術力の向上」により技術開発を行う。

3.1 技術経営（ＭＯＴ）手法の活用

3.1.1 局内ニーズの具体的な把握

当局では、平成 11 年度に技術開発推進計画を初めて策定して以来、局内の技術開発ニーズ（以下「局内ニーズ」という。）を適宜把握して技術開発を進めている。今回、本計画の策定に当たって、現場で抱える課題をより具体的に把握するため、局内ニーズに関わる「局内の現状」（施設・施工方法・維持管理等はどこで・どのような状態にあるのか）と「技術的課題」（効果的な開発テーマを導くため、技術的に何が課題かを掘り下げる）をこれまで以上に分析するとともに、社会経済情勢の変化や技術動向などを踏まえ、局内ニーズと技術シーズとのマッチングなどにより開発テーマを抽出した。特に、現場ニーズは、施設の延命化や省エネの推進など抽象的になりやすいことから、より本質的なものとなるように具体的に整理した。

3.1.2 開発テーマの具体化に向けた取組

本計画の開発テーマの設定に当たっては、技術経営（MOT）における分析手法の一つであるポートフォリオ手法を活用して、各開発テーマを指標化し優先度を検討した。また、当局全職員に対して、開発テーマについての意見を求めるとともに、開発テーマ以外に技術開発を必要とする技術的課題はないか、アンケート調査を行った。今回、５年間の計画期間で実施することから、過去の取組状況などを踏まえて最終的に 53 の開発テーマを設定した。なお、アンケート調査の結果は局内に広く周知を行い、現場との情報共有を図った。

3.1.3 ポートフォリオ手法の概要

今回考案したポートフォリオ手法は、「期待成果」と「実行可能性」を踏まえて優先度を評価する手法である。各開発テーマを「期待成果」（10 点満点）と「実行可能性」（３点満点）でそれぞれ評価し、それらを掛け合わせて、点数等の高いものを選定することとした。採点の内訳は次のとおりである。

(1)期待成果：開発した技術の導入・展開がより期待できる次の５項目の合計とした。

1)重要性（３点）：東京都長期ビジョン・当局の経営計画等の上位計画に基づくもの等

2)緊急性（２点）：現場ニーズが高く、速やかな対応が求められるもの等

3)効果性（２点）：従来の技術に比べ、大きな効果が得られるもの等

4)成長性・将来性（２点）：将来ニーズが高く期待できるもの等

5)その他（１点）：特許取得可能性・学問的貢献が期待できるもの等

(2)実行可能性：研究論文数、開発期間、技術水準、特許障壁の確保、製品価格、開発費、これまでの実績（下水道内外）等を踏まえて決定した。

1)実現がほぼ確実　（３点）：他分野で実績が多数ある、既存技術の組合せである等

2)実現可能性が高い（２点）：技術開発等に関する論文等が多数あり、基礎研究が終了しているもの等

3)実現可能性が低い（１点）：技術開発等に関する論文等があるもの等

4)実現可能性がない（０点）：関連論文等もなく、基礎研究成果等も低い等

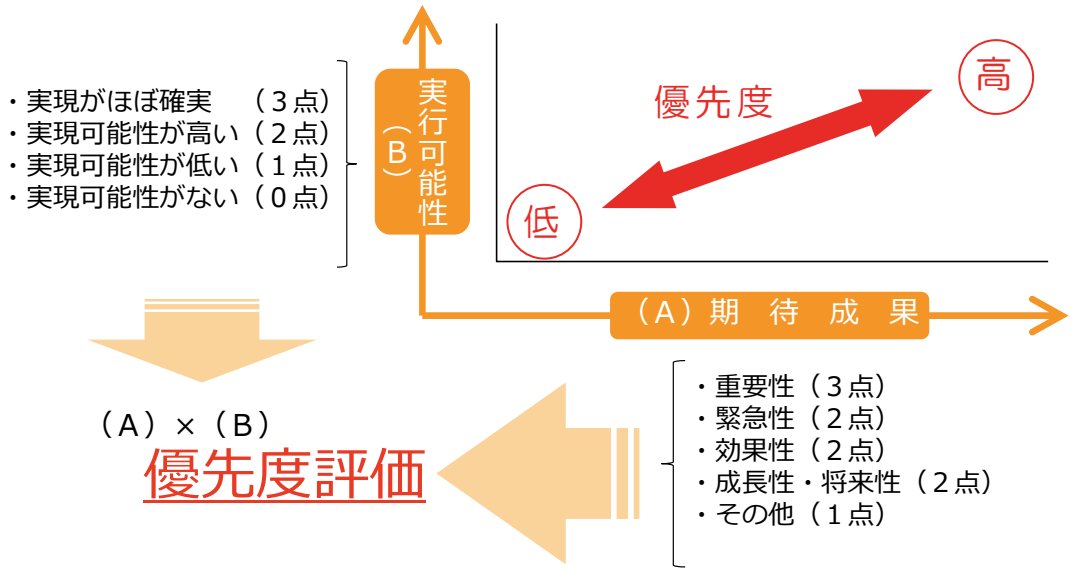


図１　ポートフォリオ手法のイメージ

3.1.4　ポートフォリオ手法の活用例

ポートフォリオ手法の活用について、本計画における震災対策技術の開発テーマである「更生工法による断面縮小を抑えて下水道管の耐震性を向上する技術」を例に具体的に説明する。

(1)局内の現状

当局は、将来にわたって安定的に下水を流す機能などを確保するため、老朽化した下水道管の再構築事業を進めている。都心部の道路下には、下水道管のほかにも電気やガスなど多くのインフラが埋設されており、掘削を伴う工事が困難であることなどから、道路を掘らずに既設の下水道管をリニューアルすることができる更生工法を活用して事業を進めているところである。また、「重要な幹線等」に当たる下水道管については、レベル１地震動に対して設計流下能力を確保するとともに、レベル２地震動に対して流下機能を確保する耐震性能を有するように設計を行っている。しかしながら、蓋かけ幹線（中小河川だった昔の水路に蓋をかけて暗きょ化した幹線）などの無筋構造物は耐力が低く、更生工法（製管工法）により耐震化すると、裏込め材の厚みが大きくなり、下水が流下する断面が縮小されて必要な流下能力が確保できない場合がある。

(2)技術的課題

更生工法（製管工法）は、既設管の耐力を活用した複合管を構築する工法だが、裏込め材（モルタル）による強度向上が主たるものである。また、レベル２地震動に対して流下機能を確保するためには、終局限界状態において、土砂の流入を防ぐとともに、管きょ断面がひび割れを起こしているが破壊しないことを応答変位法等で確認する必要がある。蓋かけ幹線などの無筋構造物は引張耐力が低いため、従来の裏込め材以外に引張応力を負担する技術が必要である。

(3)開発テーマ

更生工法（製管工法）に引張応力を受け持つ補強材を組み合わせて裏込め材による断面縮小を抑えることで、耐震性の向上と流下能力の確保を両立する技術が必要である。

(4)優先度の評価

(1)～(3)の状況から、「期待成果」と「実行可能性」を次のように採点し、53テーマの中でも優先度が高いことを確認した。

1)期待成果（９点／10点満点）

・重要性（３／３点）：経営計画において老朽化した幹線の再構築は主要施策であり、重要である。

・緊急性（２／２点）：首都直下型地震等が懸念されており、速やかな技術開発が求められている。

・効果性（２／２点）：耐震性の向上と流下能力の確保を両立により、再構築の推進に貢献できる。

・成長性・将来性（２点）：今後の再構築事業においても有効な技術である。

・その他（０点／１点）：特になし

2)実行可能性（２点／３点満点）

・実現可能性が高い（２点）：監理団体が検討を進めており、その状況を踏まえると実現可能性が高い。

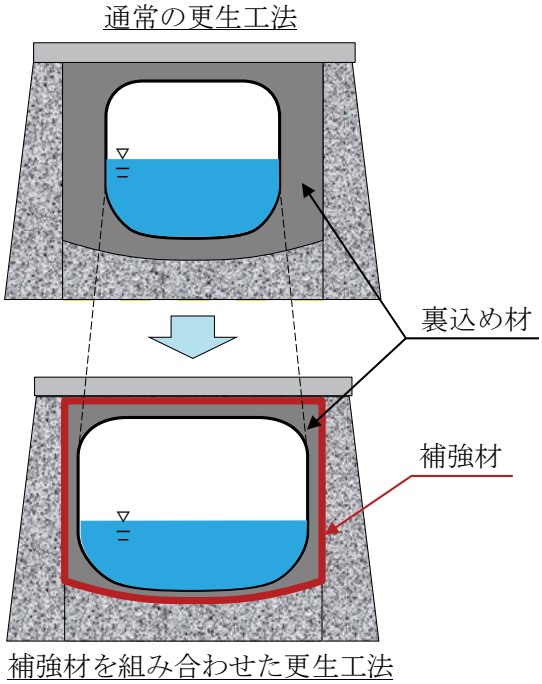


図２　補強材を組み合わせた更生工法

3.2　オープンイノベーションの推進

オープンイノベーションとは、内外のアイデアを融合することで新しい価値を創造することであるが、このオープンイノベーションを一層推進することで、これまでの延長線ではなく、様々な分野の技術と融合を図った、新たな先進的な技術を発掘していく。

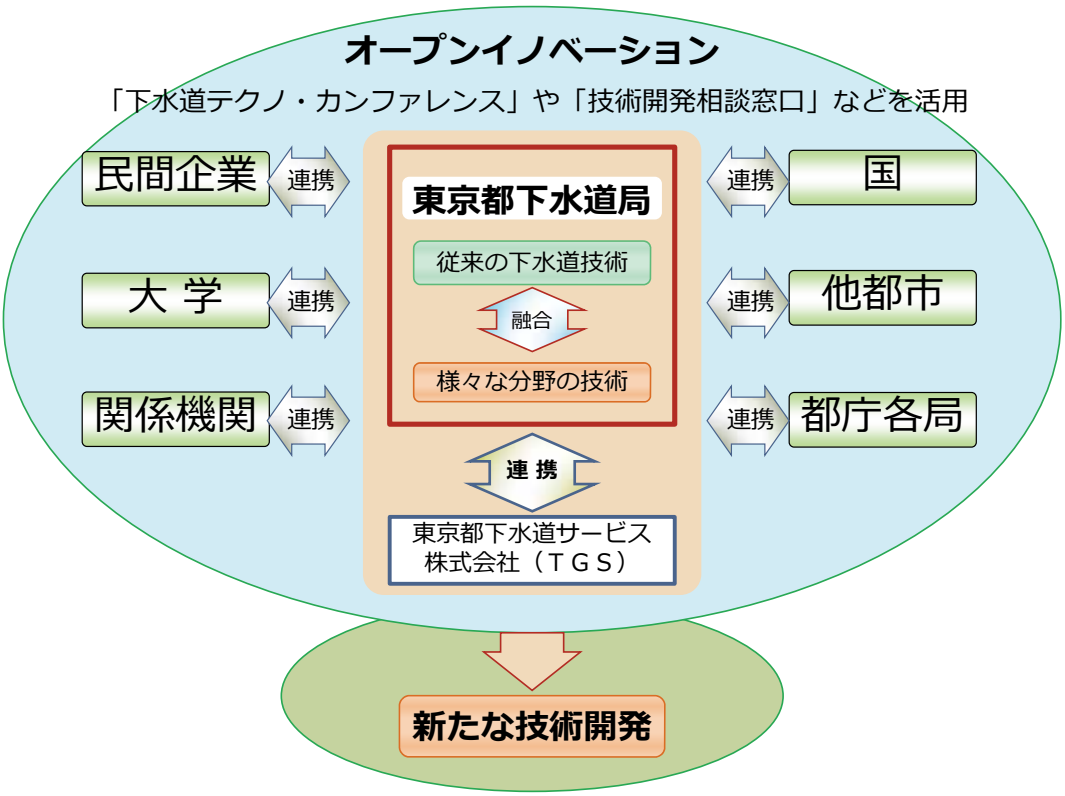


図３　オープンイノベーションのイメージ

3.2.1　「下水道テクノ・カンファレンス」の開催

具体的な取組として、当局のニーズに適合した技術や当局事業に有用な技術を発掘するため、当局職員と民間企業・大学などの技術者・研究者との意見交換の場である「下水道テクノ・カンファレンス」を開催する。下水道テクノ・カンファレンスで得られた内容を基に、実用化や共同研究などの可能性について局内で具体的に検討を行う。

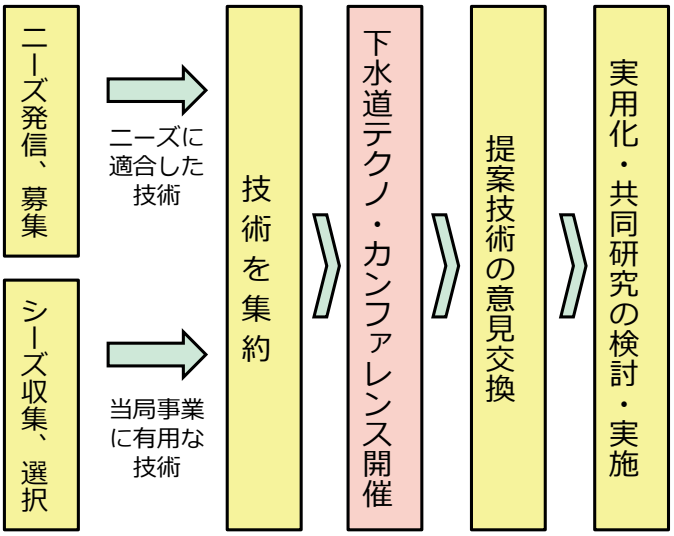


図４　下水道ﾃｸﾉ･ｶﾝﾌｧﾚﾝｽの流れ

図５　下水道ﾃｸﾉ･ｶﾝﾌｧﾚﾝｽの様子

3.2.2　「技術開発相談窓口」の活用

当局ホームページに設置した「技術開発相談窓口」を通じて、技術的なアイデア・ノウハウに関する相談や、下水道事業における各種既存技術の改良・改善の技術提案に関する相談を行っており、有用な技術は共同研究などにつなげていく。

このように、経験豊富なノウハウ等を持つ技術者等と議論を深めることで、下水道事業に活用できる画期的な技術やアイデアを創造していく。

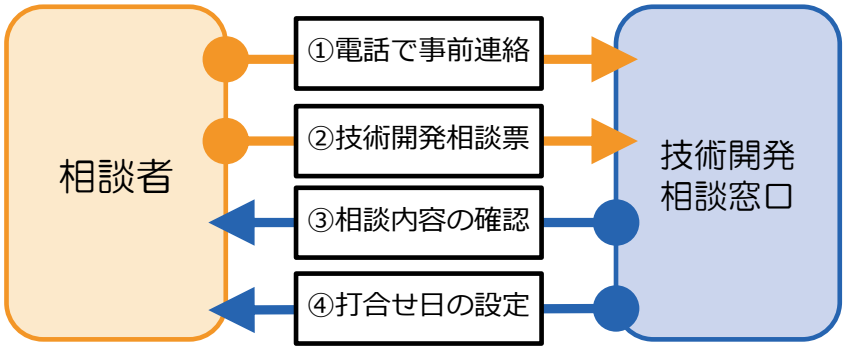


図６　技術相談の流れ

3.3　共同研究の更なる活性化

3.3.1　民間企業などの開発意欲を高める共同研究の推進

当局の技術開発では、テーマに適した技術開発手法を固有研究や共同研究などから選択し実施している。技術開発手法を大別すると、当局が求める技術の要求度合いから、当局ニーズに基づき実施する「ニーズ追求型」と民間企業等の提案で共同研究を実施する「シーズ活用型」に分類される。その中でさらに、テーマの性質に応じて研究手法を分類している。

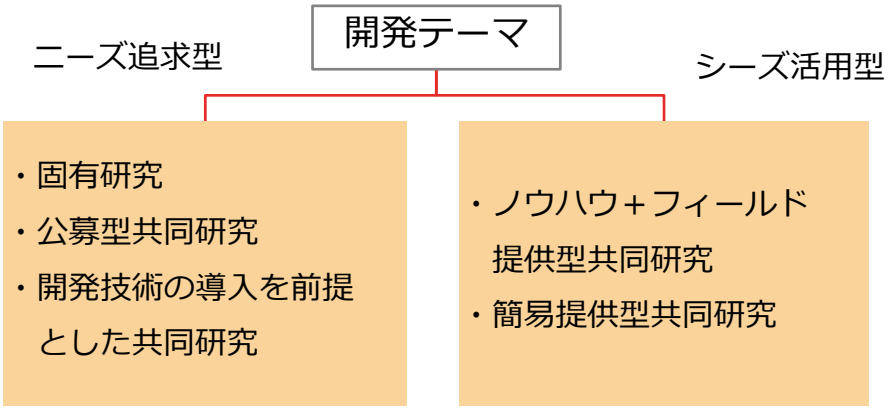


図７　技術開発手法の分類

この中でも、特に、開発インセンティブの向上促進のため、開発した技術を導入する工事の発注が前提となっている「開発技術の導入を前提とした共同研究」や簡易な手続で開始できる「簡易提供型共同研究」を推進している。

3.3.2　東京都下水道サービス株式会社などとの連携強化

さらに監理団体である東京都下水道サービス株式会社（以下「ＴＧＳ」という。）との連携を強化していく。ＴＧＳには汚泥処理や管路維持管理を委託しており、ＴＧＳはこれらの技術やノウハウを持っている。こうしたＴＧＳの持つ技術やノウハウを活用してより良い技術開発を行うため、公募型共同研究（技術連携型）を平成 27 年に導入した。これは、研究目標の設定や進行管理の実施など、企画検討の段階から当局とＴＧＳが一体となって取り組み、開発に必要な技術を民間企業などに公募して行うという特徴がある。

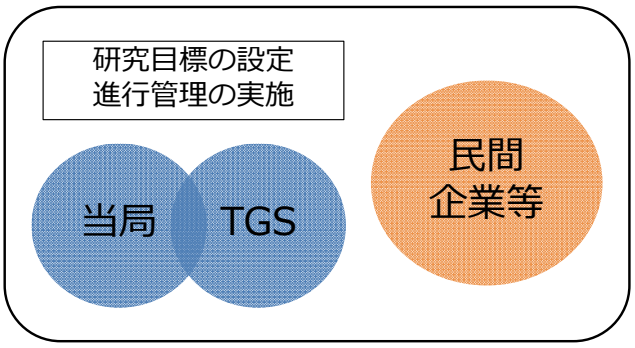


図８　公募型共同研究（技術連携型）のイメージ

3.4　下水道界の技術力の向上

3.4.1　「下水道技術研究開発センター」の活用

当局では、固有研究及び民間企業や大学などとの共同研究において、実際の現場では実施が困難な実験や検証が行えるように、水再生センター内に下水道技術研究開発センターを設置している。

下水道技術研究開発センターには、水処理実験プラント、実験フィールド及び実験棟があり、実際の下水試料を用いた実験を行い、実験棟で分析を行うことができる。

(1)水処理実験プラント

・標準活性汚泥法、A_2O法、ステップ流入式A_2O法などに改造できる３つの系列

・運転や制御のパラメーターを様々に変化させて処理水質などを比較可能

(2)実験フィールド

・実験に用いる流入下水や汚泥などの試料が新鮮なため、精度の高い実験が可能

(3)実験棟

・サンプルをリアルタイムに分析でき、水質分析、汚泥試験、生物試験が可能

3.4.2　局外への情報発信

開発した技術の情報を広く周知することや、当局が求める技術レベルを示すことで、下水道界の技術力の向上に努めていく。

(1)当局のホームページへの掲載

・共同研究の開始や実施結果などの技術情報を当局ホームページに掲載

・ＨＰアドレス：http://www.gesui.metro.tokyo.jp/business/technology_development/technical_information/

(2)技術調査年報の整備

・当局が行っている技術的な調査・研究の成果をまとめた論文集を整備・発信

・ＨＰアドレス：http://www.gesui.metro.tokyo.jp/business/technology-statistics/gn

(3)国内外への技術会議への参加

・国内外の技術会議等（下水道研究発表会、国際水協会（ＩＷＡ）世界会議など）に参加し、開発した技術等を発信

4. 技術開発の推進に向けて

本計画の策定については、技術経営（MOT）で用いられる分析手法を活用したことにより、「選択と集中」の視点をもって、効果的な開発テーマを選定することができた。本計画で選定した 53 の開発テーマについて、効率的・効果的に技術開発を行うため、技術経営（ＭＯＴ）をさらに活用して、オープンイノベーションの推進や共同研究の活性化をより一層推し進めていく。

3-2-2　有明水再生センターにおける異常流入への対応

東部第一下水道事務所　砂町水再生センター
佐々木啓行　伊藤潤子
東部第一下水道事務所　お客さまサービス課
○栗原寛幸　斉藤幸男　佐藤誠一（現施設管理部排水設備課）
湯田恵（現計画調整部技術開発課）池田広数（現北多摩一号水再生センター）
東京都下水道サービス㈱　施設管理部　水質管理課　有明水質事務所
児玉弓枝　神谷宇一朗　黒田茂晴

１　はじめに

有明水再生センター（以下「有セ」という。）は臨海副都心地区に位置し、同地区及びその周辺の地域（分流地域）の下水を9か所のポンプ所を経由し処理を行っている。また、二次処理水を生物膜ろ過、オゾン及び高速繊維ろ過により処理し、再生水として臨海副都心地区へ供給している。

有セにおいて、平成 28 年 3 月中旬頃から、無機分の多い不明水の流入により活性汚泥の有機分率が低下する現象が生じ、処理水質が悪化するとともに、再生水も濁度・色度が上昇し、早急な解決が必要となった。このため、原因調査を実施したが、当初は原因者を特定できなかった。

その後、東京都下水道サービス株式会社（以下「TGS」という。）と協力して有セ所管の各ポンプ所の流入水を採水・分析する調査を実施し、そこから得た情報を基に、不明水の原因者を特定し指導・改善するに至った。

本件は、原因者であった工事業者の除害施設に関する認識不足などもあり、原因特定が非常に困難であったが、局と TGS が協力して対応したことにより問題解決に至った事例である。本発表ではその経緯について報告する。

２　問題発覚から原因者の特定まで

２．１　無機分含有不明水流入の発覚

平成 28 年 3 月中旬頃、定期的に実施する反応槽試験により通常 80%台の活性汚泥の有機分率が 60%台に低下し､通常 100 程度の SVI も 60 程度に低下していることが発覚した。また、有セにおいては常時生汚泥の反応槽への全量投入を行っているが、生汚泥の有機分率も同様に 60%台に低下していた。さらに汚泥の強熱残留物の状態も普段と異なっていた。

これらのことから、無機分の多い不明水が流入していることが推測された。通常時及び有機分率低下時の活性汚泥・生汚泥の強熱残留物の状態を示す（写真 1-1 及び 1-2)。

その後、活性汚泥の有機分率の低下により、処理活性の低下や汚泥の凝集性悪化、処理水の窒素濃度上昇や濁度上昇などの悪化が見られるようになってきた。

このため、有明水質管理担当は水質規制担当に、状況を説明し、有セ所管内の事業場・工事現場からの異常排水の有無についての調査依頼を行った。

3 月下旬、水質規制担当は有明周辺地域において、道路を走行しながらの目視調査及び 7 箇所の事業場・工事現場への立入を行ったが、この時点では、後に違反者であることが発覚するＡ事業場の工事現場は対象にならなかった。この工事現場は電車の車両基地の先にあることから、道路から目視確認できなかったためである。

また、3 月 22 日生汚泥を採取し、元素成分組成を分析した結果を表 1 に示す。アルミニウムの成分組成比が高かったため、アルミニウムの含有量が多い凝集剤であるポリ塩化アルミニウム（PAC）を使用している事業場に対し 3 月 25 日に電話調査を行ったが、有力な情報等は得られなかった。

写真 1-1　正常時の強熱残留物
（左：活性汚泥　右：生汚泥）

写真 1-2　有機分率低下時の強熱残留物
（左：活性汚泥　右：生汚泥）

表 1　生汚泥の元素成分組成比

	酸素	カルシウム	りん	ケイ素	アルミニウム	鉄
生汚泥（有機分低下時）3/22 採取	51.4	5.3	1.9	21.0	9.9	5.7

２．２　ポンプ所流入水調査（４月）

4 月に入っても活性汚泥及び生汚泥の有機分率が通常より低い状態が続いたため、有明水質管理担当は TGS 有明事業所・有明水質事務所と協力して、4 月 11 日に有セに流入する 9 ポンプ所の流入水を採水・分析した。（TGS 有明事業所ポンプ所保全班が採水し、有明水質管理担当と TGS 有明水質事務所が水質分析、元素成分組成比を測定した。）

水質分析結果を表 2 に、各ポンプ所流入水中 SS の元素成分組成比を表 3 に示す。9 ポンプ所のうち、P5 ポンプ所（有明南その 1 ポンプ所）だけが流入水中の SS 濃度が高く、SS の有機分率も顕著に低かった（66%）ことから、P5 ポンプ所に無機分を多く含んだ排水が流入している可能性が考えられた。さらに、P5 ポンプ所流入水の SS の元素成分組成比と有機分率低下時の生汚泥の組成比が類似していたことから、不明水が P5 ポンプ所流域からの排水である可能性が高いと判断した。

この結果から、4 月 14 日に水質規制担当は P5 ポンプ所に流入する全ての事業場（6 ヶ所）に立入検査を実施した。しかし、いずれの事業場・工事現場からも大量の排水はないとの回答があった。後に原因者であったＡ事業場の工事現場の調査でも「多少の湧水はあるがそこまでの量はない」との回答があり、この時点では原因事業場の特定には至らなかった。

表 2　有明処理区の各ポンプ所流入水質の分析結果（H28 年 4 月 11 日採水）

ポンプ所	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10
	台場その1	台場その2	青海その1	青海その2	有明南その1	有明南その2	有明北その1	有明北その2	有明
採水場所	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管	ポンプ井 汚水ポンプ 採水管
pH	7.9	8.0	7.7	7.4	7.9	8.0	8.4	8.0	7.4
COD(mg/L)	115	158	118	163	188	138	49	90	143
NH_4-N(mg/L)	25	38	28	72	67	33	15	33	36
PO_4-P(mg/L)	2.6	2.9	1.8	5.7	5.2	3.0	1.3	2.6	3.7
T-P(mg/L)	4.7	6.0	4.2	8.5	8.3	6.2	2.0	4.2	6.6
T-N(mg/L)	36	47	35	80	78	41	24	36	54
SS(mg/L)	178	320	211	276	505	267	89	82	188
SS有機分率(%)	94	94	91	94	66	91	81	90	79

※SS 有機分率（%）＝｛SS（mg/L）－強熱残留物（mg/L)｝／SS（mg/L）×100

表 3　有明処理区の各ポンプ所流入水質中 SS の元素成分組成比

	酸素	カルシウム	りん	ケイ素	アルミニウム	鉄
P1	48	19.8	8.0	5.4	2.7	2.2
P2	47.9	20.3	8.4	6.1	3.7	3.1
P3	47.9	22.1	7.0	6.1	3.1	2.5
P4	48.7	22.0	7.9	5.1	2.6	3.0
P5	48.7	5.7	1.8	17.9	9.6	5.0
P6	48.2	19.0	7.3	8.9	4.0	2.5
P7	48.7	14.1	2.4	10.9	5.3	4.9
P8	47.7	15.5	8.8	9.4	4.4	1.5
P10	46.6	9.3	4.2	9.7	4.7	8.5

※P9 ポンプ所は砂町水再生センターに送水されるため対象外としている

2．3　違反事業場の特定と改善

4 月中旬より活性汚泥及び生汚泥の有機分率は徐々に回復傾向が見られ、一旦は 70%台後半まで回復した。このまま終息するかに見えたが、4 月末より再度有機分率が低下し、5 月には再度 60%台となった。このとき有セの流入水は、明らかに色調が異常であることが観測された。ポンプ所の運転データを解析したところ、P4・P5・P6 ポンプ所からの送水であることが判明したことから、5 月 12 日に 3 ポンプ所の流入水の採水・分析を行った（表 4)。その結果 P5 ポンプ所の流入水で COD、SS などに異常があることが確認された。4 月のポンプ所流入水調査と同様に、P5

表 4　有明処理区の各ポンプ所流入水質の分析結果（H28 年 5 月 12 日採水）

ポンプ所	P4	P5	P6
採水場所	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管	ポンプ井 汚水ポンプ 圧力計ドレン管
pH	7.4	7.9	7.8
COD(mg/L)	187	580	160
NH4-N(mg/L)	67	62	40
PO4-P(mg/L)	5.6	5.3	3.6
T-P(mg/L)	8.4	11.4	6.4
T-N(mg/L)	80	122	56
SS(mg/L)	273	3,095	190
SS有機分率(%)	95	16	95

ポンプ所流入水中の SS の有機分率が極端に低い（16%）結果となり、P5 ポンプ所流域からの排水が原因である可能性が一段と高まった。TGS 有明事業所は、このときの P5 ポンプ所流入水を水質規制担当に提供した。水質規制担当は、その性状と色、非常に沈降しやすい砂が多く含まれていたことから P5 ポンプ所に一番近い A 事業場付近からの排水が原因である可能性が高いと推測した。5 月 18 日に A 事業場内の工事現場の排水及び付近の汚水人孔（11 箇所）全箇所を目視により調査した結果、P5 ポンプ所に一番近い人孔から、5 月 12 日の P5 ポンプ所流入水と同質同色の SS の多い灰色の排水が間欠で排出されているのを確認した（写真 2 及び 3)。このため当該人孔に一番近い A 事業場の工事現場にあらためて立入検査を実施した。

事業場の担当者に聞取り調査を行った結果、汚水人孔から採水した排水は A 事業場内の増設工事現場の地盤改良工事からの排水であることを確認した。SS が大幅に違反していることが目視でも確認できる旨担当者と現場代理人に伝え、排水を直ちに停止するよう指導した。

問題発覚以降の有セの活性汚泥・生汚泥の有機分率、活性汚泥の SVI の推移を図 1 に示す。この違反工事現場が特定された 5 月 18 日時点では、活性汚泥の有機分率は 54.9%、生汚泥の有機分率は 53%と最低値となっていたが、A 事業場からの排水が改善された以降有機分率は回復傾向を示し、約 1 ヶ月後には通常の状態に戻った。

処理水量の少ない有セでは、1 事業場の排水でも水処理が不安定となることがあるため、水質規制のもつ役割は大きい。

写真 2　事業場排水

写真 3　A 事業場の人孔

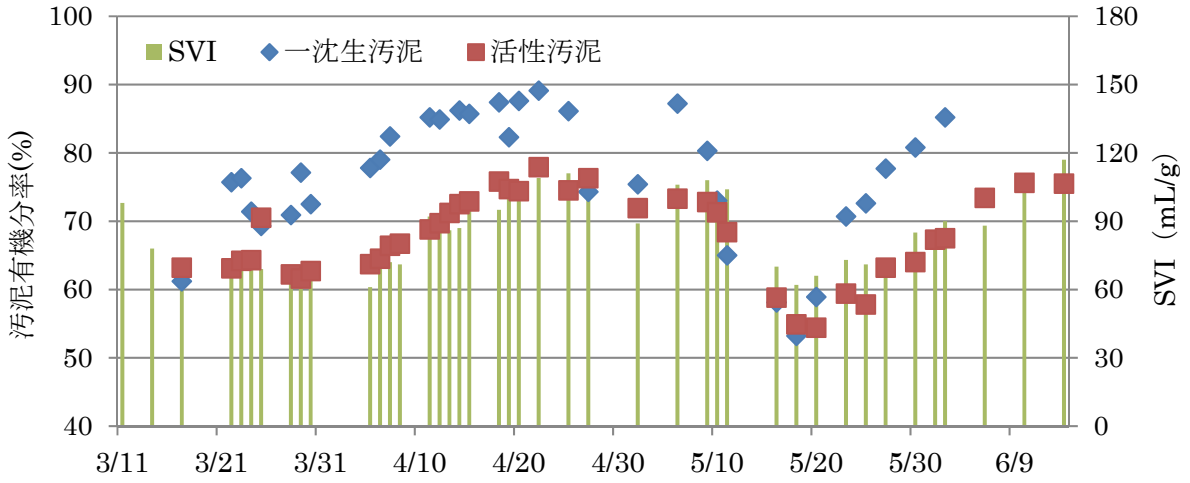


図 1　活性汚泥・生汚泥の有機分率と活性汚泥の SVI の推移

３　違反原因と指導内容

３．１　違反原因

２月時点で東部第一下水道事務所では問題となったＡ事業場工事現場から事前相談を受けていたが、「排水がほとんど出ない」旨の説明であり、下水道局に対し適切な説明を行っていなかった。

また、４月 14 日の立入時点では工事現場で汚泥を沈降させる濁水処理装置（ノッチタンク）が設置されておらず、その後指導により設置されたものの、５月 18 日の立入時は、ノッチタンクでの PAC 注入量や沈殿時間が不足するなど、処理が不十分であった。

さらに、浮遊物質測定を簡易濁度計で代用するなどの誤った対応をしていたことも確認された。現場責任者は簡易濁度計で３、４日毎に排水の濁度が 600 度以下であることを確認していたが、浮遊物質濃度としての換算などを行わず、排水が基準を満たしているとの誤った認識を持っていた。

３．２　指導内容

５月 20 日に、Ａ事業場の工事発注者と工事を担当した現場責任者を東部第一下水道事務所に来所させ、①排水は下水排除基準値内で排出すること、②下水排除基準値内の水質になるよう除害施設を追加設置すること、③処理施設の運転管理を徹底することを指導した。また、簡易濁度計から浮遊物質濃度を換算する方法を説明した。これらの指導に関しては、改善報告書の提出を求めた。

５月 23 日に再度の現場立入を行い、改善措置された除害施設を確認した。改善前後の水質分析結果を表５に示す。改善前は SS が基準を大幅に超過しており、鉛、砒素、亜鉛の重金属も基準を超過していた。改善後の処理水はほぼ透明であり、目視でも適正に処理できていることが確認できた。水質分析結果は全項目が下水排除基準以下であった。

５月 31 日には、警告書を工事発注者に手交し、６月９日に工事発注者から改善報告書が東部第一下水道事務所に提出された。

表５　違反工事現場の改善前後の水質分析結果

項目	改善前　（５月 18 日）	改善後　（５月 23 日）	基準値
SS	45000 mg/L	10 mg/L	600 mg/L 未満
鉛	1.3 mg/L	0.01 mg/L 未満	0.1 mg/L 以下
砒素	0.45 mg/L	0.01 mg/L 未満	0.1 mg/L 以下
亜鉛	4.6 mg/L	0.1 mg/L 未満	2 mg/L 以下
ｐＨ	8.3	7.0	５を超え９未満
銅	2.5 mg/L	0.1 mg/L 未満	3 mg/L 以下
総クロム	1.1 mg/L	0.1 mg/L 未満	2 mg/L 以下
カドミウム	0.016 mg/L	0.003 mg/L 未満	0.03 mg/L 以下
セレン	0.03 mg/L	0.01 mg/L 未満	0.1 mg/L 以下

３．３　改善報告書の内容（６月９日提出）

改善内容は下記の３点であった。

①濁水処理装置（ノッチタンク）を設置した（FPDG－304（S）型）。

②発生する汚泥は委託処分し、マニフェスト伝票を保管する。

③担当者を決め、定期的に濁水処理装置に異常がないかチェックを行う。

改善報告書の内容のとおり、期限内に除害施設が設置され適切に運転管理されていることを確認した。(写真 4 及び 5)

写真 4　濁水処理装置設置状況

写真 5　処理水の様子

4　まとめ

今回の事例は、原因者の「排水がほとんど出ない」という不適切な説明と、工事により発生する排水処理の管理・監督が不十分であったことにより、1 事業場からの排水が水再生センター全体の水処理を悪化させたものであった。

このような事態に水再生センターの水質管理担当と下水道事務所の水質規制担当が連携して対応したことで、短い期間で原因事業場の特定、改善を行うことができた。また、TGS との連携により、更なる機動力の向上が図られたことから、今後とも水質異常等の発生に備えて、各部署間の連携をより強化していくことが重要であると考える。

3-2-3　公ます用自動採水器の水質規制業務以外への活用方法

南部下水道事務所　お客さまサービス課　　杉本　太郎
大橋　智恵美
（現　経理部　業務管理課）
斎藤　慎哉
（現　流域下水道本部　技術部　施設管理課）

1 概要

水質規制業務では自動採水器を事業場指導に活用している。指導のために事業場排水を公共汚水ます（以下、公ます）などで採水する際、一般的には立入検査時に職員が採水を行うが、夜間・早朝の採水が必要な場合は自動採水器を用いることで、効率的かつ効果的な事業場指導を行っている。その際、狭隘かつ作業環境の悪い公ますなどに設置する必要があるため、特殊な小型自動採水器(写真 1, 2)を使用している。

今回は、水質規制業務以外への活用方法として、お客さまサービス課業務担当において懸案となっている、一時使用に係る汚水排出量の認定を適正に行うために、自動採水器による連続監視を行い、一定の成果を得た。

写真 1 標準ます用自動採水器

写真 2 小型ます用自動採水器

2 公ます用自動採水器

2.1 概要

水質規制業務で使用する自動採水器は、公ますに設置することで、事業場等からの排水を採水するものである。この自動採水器は、全体が公ます内に収まるよう小型化されて、かつ汚水の流れを阻害しない構造になっている。自動採水器設置後もます蓋は正常に閉まるので、通行者等への支障は無く、事業場からも自動採水器の存在がわからないようになっている（写真 3)。

2.2 機能

公ます用自動採水器には、水流感知センサーと pH センサーが装備されている。これらのセンサーを併用することによって、一定時間間隔での採水のほか、水流感知時の採水、pH 逸脱時の採水を行うことができる。なお、採水ボトルは 4 本ないし 6 本装備可能な 2 タイプがある。

写真 3 自動採水器設置の様子　左:設置作業　右:設置後

公ます用自動採水器の下部には疑似インバート部(写真 4)があり、これを公ます内のインバート部にセットする。疑似インバート中央部には堰を設け、一定量の水が溜まるようになっており、この部分から排水を採取している。堰の前後には水流センサー(銀色の部分)を装備しており、排水の流れを感知して採水することもできる。また、堰の内側に pH センサー（奥の白い部分）を装備している。

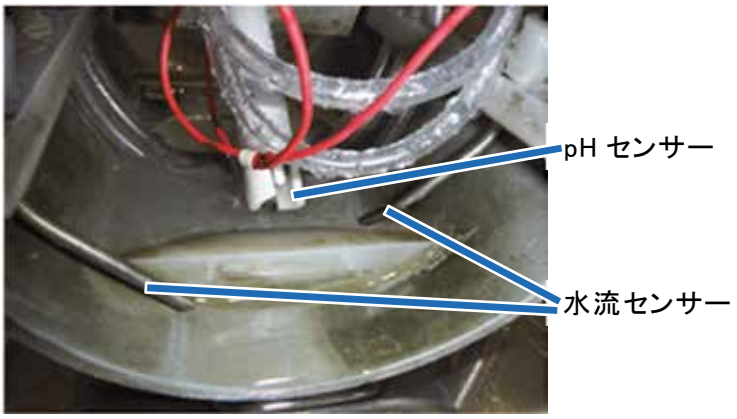


写真 4 自動採水器の疑似インバート部

2.3 使用例

自動採水器を使用する効果は、通常の立入検査では監視を行うことが難しい、連続的な採水や早朝・夜間・休日の採水ができることである。自動採水器では、3 種類のモードで排水を採水することができる(表 1)。これらのモードを用いた事業場指導事例を、以下に紹介する。

表 1 自動採水器の採水モード

定時採水モード	一定時間おきに採水する
水流感知モード	一定時間以上、排水が継続して流れている場合に採水する
pH 監視モード	pH が一定範囲から逸脱した場合に採水する

2.3.1 定時採水モード

事業場によっては、濃厚廃液（薬品の原液など）を処理施設に投入することにより、時間帯によって処理が不十分な場合がある。処理が不十分であれば、規制対象物質が高濃度で残存し、下水排除基準を超過する場合があるため、改善指導が必要である。しかし、通常の立入検査では事業場の排水を長時間連続的に監視・採水することができないため、十分な改善指導ができないことがある。

そこで、自動採水器の定時採水モードを用いることによって、長時間の採水を容易に行うことができる。その試料を分析することで、時間ごとの処理水質の変化を調べることが可能となり、適切な指導を行うことができる。

例えば、自動採水器による採水の結果、夕方から夜にかけて下水排除基準を超過している場合、夕方に行われている作業が基準超過の原因だと推定される。原因を判明することで、事業場に対して具体的な改善方法を指導できるようになる。

2.3.2 水流感知モード

事業場の排水処理施設の構造や設置場所によっては、貯槽の水位計と連動し、ポンプで公共下水道への放流を行っている事業場も存在する。この場合、一定量の排水が溜まった時にだけポンプが作動するため、断続的な放流が行われることになる。水流感知モードを使用することで、このように断続的な排水を採水することができる。

また、事業系排水と生活系排水が一つの公ますに接続されている場合に、生活系排水を避けて採水することもできる。工場の 2 階が住宅になっているような場合には、生活系排水は断続的にしか発生しない。例えば、一般的な風呂釜一杯(200L)の水を排水する場合にかかる時間は約 3 分 20 秒程度である。そこで、水流が 10 分以上継続した場合に採水する、という設定を行うことで、生活系排水を避け、長時間連続して放流される事業系排水だけを採水することができる。

2.3.3 pH 監視モード

pH 監視モードは、pH が設定範囲を逸脱した際に採水を行う。事業場の排水処理・管理に問題がある場合、pH 監視モードで採水を行い、指導を行うことが有効である。表 2 のように夜間に pH が下水排除基準を満たさない排水が放流されている場合、自動採水器による採水結果を事業場に提示し、適切な中和処理を行うよう指導している。

また、金属加工業やめっき業では、pH が基準値を超過している排水の場合に、重金属類も下水排除基準を超過していることが多い。表 3 のように、pH 監視モードによる採水を行うことで、ほかの規制項目についても監視、指導を行うことができる。

表 2 pH 監視モードによる採水結果(食品製造業)

採水日	時刻	pH
1 日目	21:11	*5.3*
〃	22:32	*5.6*
〃	23:51	*5.7*
2 日目	0:51	*4.4*
〃	1:51	*4.2*

表 3 pH 監視モードによる採水結果(めっき業)

採水時刻	pH	T-Cr	Cr^{6+}	Cu	Zn	Pb	CN
10:01	*2.8*	0.7	<0.05	0.2	*20*	<0.01	<0.1
10:34	*5.1*	0.5	0.35	0.2	*6.8*	<0.01	<0.1
10:50	5.8	0.5	0.32	0.2	*5.3*	<0.01	<0.1

pH 以外の項目は(mg/L)　*斜体*:下水排除基準超過

3 水質規制業務以外への活用

3.1 一時使用

工事現場で発生する湧水などを、一時的に公共下水道へ排水する場合には、「公共下水道一時使用届」の提出が必要となり、下水道料金の徴収対象となる。この場合には、上水道の使用量とは関係なく下水道料金が発生するため、お客さまサービス課業務担当が汚水排出量の認定を行い、それを基に下水道料金を徴収している。

一時使用に係る汚水排出量は、流量メーターを設置している現場がほとんどないため、時間当たりの排水量に水中ポンプの運転時間を積算して算定することが多い。時間当たりの排水量は、業務担当の職員が現場に出向き、計量容器とストップウォッチを用いて測定している(写真 5)。水中ポンプの運転時間は使用者の申告によるが、平日昼間のみ 8 時間程度の運転として申告されているポンプが、夜間休日も運転されている場合がある。このような場合、夜間休日の使用状況を監視する必要があるものの、夜間休日に職員を派遣することには限界がある(写真 6)ため、適切な下水道料金徴収ができない場合があった。

写真 5 容器を用いた水量査定のようす

写真 6 夜間監視のようす

3.2 自動採水器を用いた連続監視

上記のような問題点を解決するための一案として、水質規制業務で使用している公ます用自動採水器を用いて、一時使用届の対象現場での連続的な排水監視を試みた。

一時使用を行っている工事現場のうち、工法と作業内容から夜間休日にも排水が生じる可能性の高い現場に、自動採水器を設置し(写真 7)、水流の有無を 5 分間隔で記録する設定とした。

写真 7 小型ます用自動採水器の設置状況

一週間後に自動採水器を回収すると、夜間休日にも水流が連続して検知された記録が残っていた。今回の調査では、夜間休日も絶えることなく排水が継続していたことを示す水流感知データや、試料の採水を確認できた。自動採水器に内蔵されているメモリには、5 分間隔で 1 週間連続測定したデータを保存し、後日、パソコンにデータを取り出すことが可能である。

この水流検知記録を一時使用者に提示し､適正な申告を行うよう指導を行った｡これにより、適正な下水道料金徴収を行うことができた。

4 まとめ

水質規制業務では、公ます用自動採水器を用いることで、事業場排水の監視や、改善指導に役立ててきた。今回は公ます用自動採水器を活用し、一時使用者からの夜間休日排水を連続的に監視した。これにより実際の排水量を把握し、適正な下水道料金徴収につなげることができた。今後も公ます用自動採水器の水質規制業務以外への活用を進めていく。

4-1-1 Development strategy of environmentally friendly sewerage sludge incineration technologies in Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government

Toshihiko Nakajima[1*], Masaki Ishiguro[2], Mitsuhiro Kurozumi[3]

[1]Planning Section, Engineering Division, Regional Sewerage Office
(current affiliation : Facilities Maintenance Section, Facilities Management and Maintenance Division)
[2]Director, Pump Facilities Maintenance Section, Chubu Sewerage Office
(current affiliation : Sunamachi Water Reclamation Center, TobuDaiichi Sewerage Office)
[3]Deputy Director General in Charge of Engineering, Japan Sewage Works Association
(Former Director General Headquarter of Regional Sewerage Office)
[*] Email: Toshihiko_Nakajima@member.metro.tokyo.jp

1. ABSTRACT

More than half of total greenhouse gas (GHG) emissions from Sewage activities in Tokyo had been originated from the sludge incineration process. Tokyo Metropolitan Government (TMG) has been working on several stages of incineration technologies development to reduce the GHG emissions. Previously, we had developed sludge incinerators that reduce large amount of sludge combustion origin nitrous oxide (N_2O) and auxiliary fuel origin carbon dioxide (CO_2).
Recently, we developed a turbocharged fluidized bed incinerator which enabled to reduce the amount of electricity consumption for the first time. Together with the reduction of N_2O and auxiliary fuel origin CO_2, the GHG emissions from the incinerator are largely reduced compared with previous types.
We have evaluated the effect of the turbocharged fluidized bed incineration technology. Progress of the incinerator development for further reduction of GHG emissions is also reported.

KEYWORDS: Sludge incinerator, reduction of greenhouse gas, turbocharger

2. BACKGROUND

TMG is accelerating various efforts to become “A City that Leads the World in Preserving the Environment; Tokyo” towards the 2020 Olympic and Paralympic Games which take place in Tokyo.
The sewerage services contribute to a good water environment, while discharging a large amount of GHG. Bureau of Sewerage discharged 42% of total GHG emissions from TMG activities in FY 2000 (Figure 1). Therefore, Bureau of Sewerage, TMG, formulated a set of global warming countermeasures named “Earth Plan 2010” that aims to reduce GHG emissions from sewerage services activities by 25% or more relative to FY 2000 by FY 2020, and thereby we are promoting practical measures, such as innovating incinerator technologies. As of FY 2014, the contribution of Bureau of Sewerage descended to 37%.

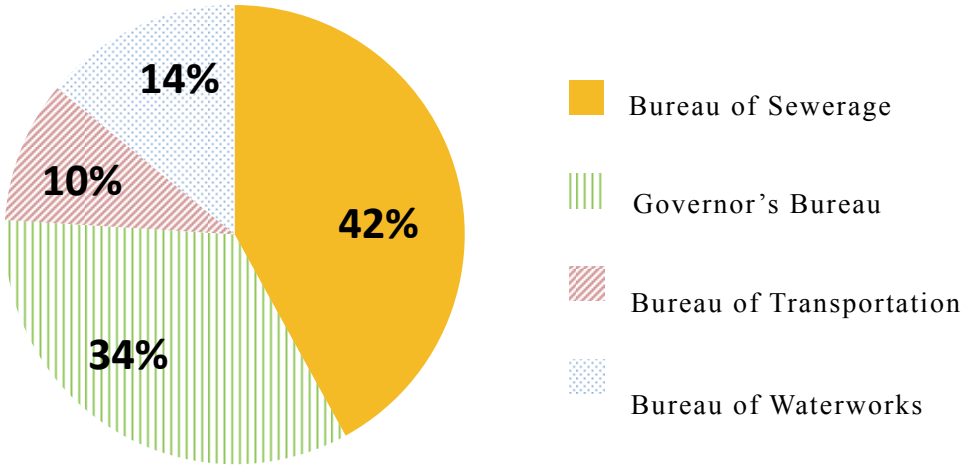


Figure 1. Breakdown of greenhouse gas emissions from TMG activities in FY 2000

Figure 2 shows the breakdown of the GHG emissions from Bureau of Sewerage, TMG activities in FY 2000. The emission from the sludge incineration processes is outstanding, which amounts to 570,000 t-CO_2/year and accounts for more than the half of the total emission (1,065,000 t-CO_2/year). The breakdown of the emission from the sludge incineration processes is as follows; sludge combustion origin N_2O: 381,000 t-CO_2/year, auxiliary fuel origin CO_2: 67,000 t-CO_2/year, electricity origin CO_2: 122,000 t-CO_2/year. It is important for the global warming countermeasures of the sewerage services to reduce all of these factors including electricity which was difficult before.

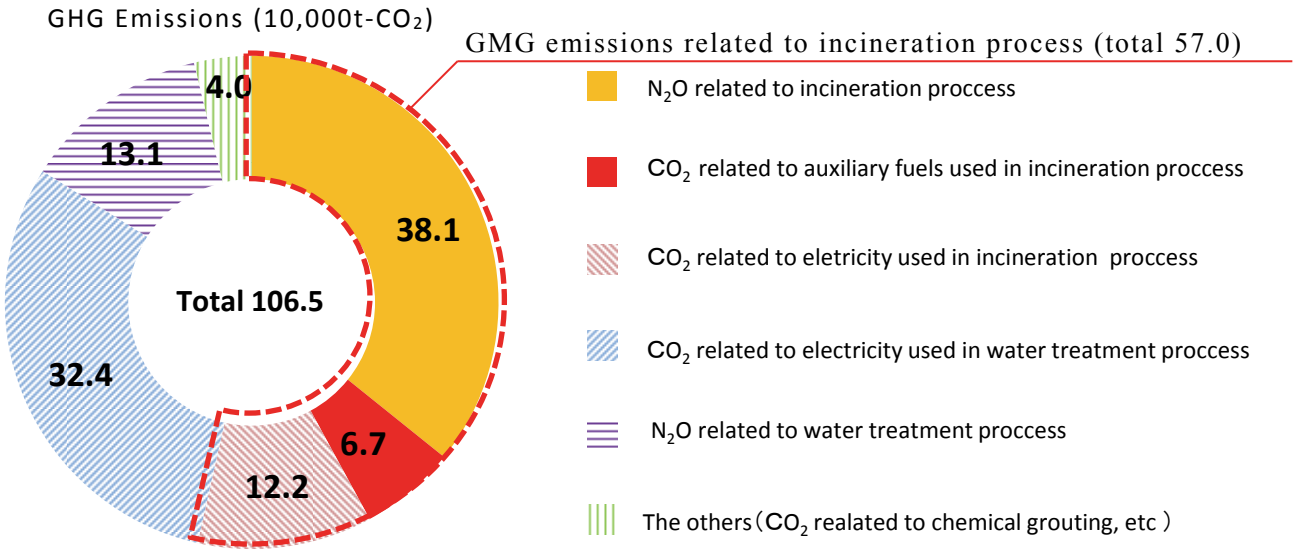


Figure 2. Proportion of GMG emissions of Bureau of Sewerage ,TMG in FY 2000

3. REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM INCINERATION PROCESS (1ST AND 2ND STAGE)

TMG has promoted technological innovation of sludge incinerators to reduce GHG emissions in stages.

At the first stage, we focused on N_2O which has about 300 times more greenhouse effect per unit mass than CO_2.

We could reduce 50% of N_2O emissions by raising the incineration temperature from 800°C (1472°F) to 850°C (1562°F) because higher incineration temperature expedites thermal decomposition of N_2O.

At the second stage, we developed two types of incinerators which can reduce N_2O and CO_2 emissions from auxiliary fuels. One is the "multilayer burning fluidized bed incinerator" that we made combustion air supplied from not only the bottom but also the middle of the incinerator and raised combustion efficiency due to high temperature layer formed in the middle of the chamber. The other is the "sludge gasification incinerator" that decomposes organic components of sludge and turns it into combustible gas. Waste heat emitted from high-temperature-combustion (900°C, or 1652°F) of the combustible gas is reused efficiently for drying sludge prior to incinerate. Flow charts of these types of incinerators are shown in Figure 3.

These two types of incinerators could achieve the reduction target of N_2O emissions by 50% and CO_2 emissions from auxiliary fuels by 20% compared with the conventional fluidized bed incinerators of the first stage.

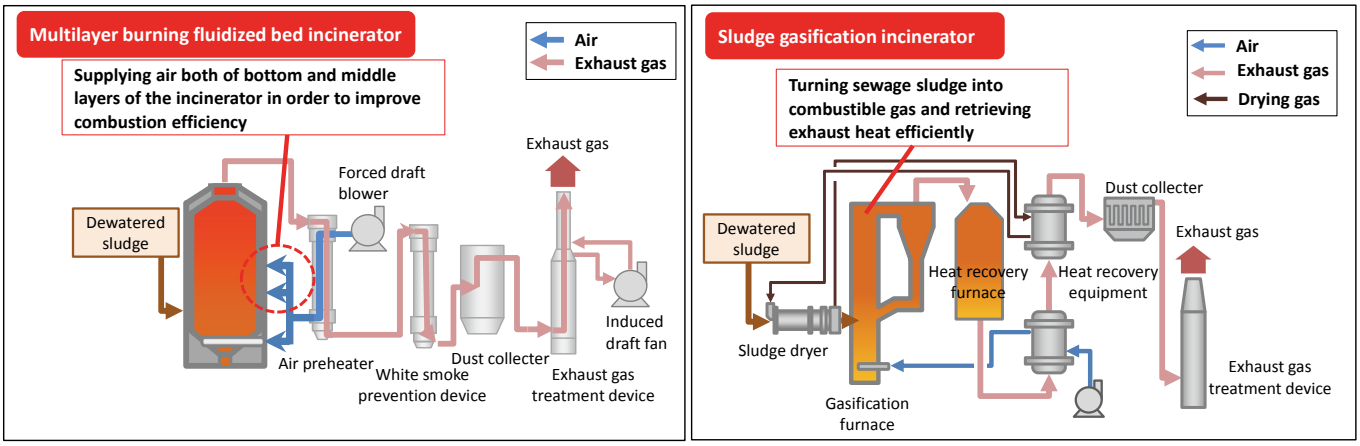


Figure 3. Multilayer burning fluidized bed incinerator and Sludge gasification incinerator (Example)

As a result of the first stage and the second stage efforts, N_2O emissions from incineration process and CO_2 emissions originated from auxiliary fuels had reduced significantly (Figure 4). Thus the contribution of the incineration process descended from more than the half of the total GHG emissions of Bureau of Sewerage in FY 2000 to approximately 40% in FY 2014.

On the other hand, we did not see much progress in reducing CO_2 emissions from the electricity, and it was our next challenge to reduce electricity consumption in the incineration process.

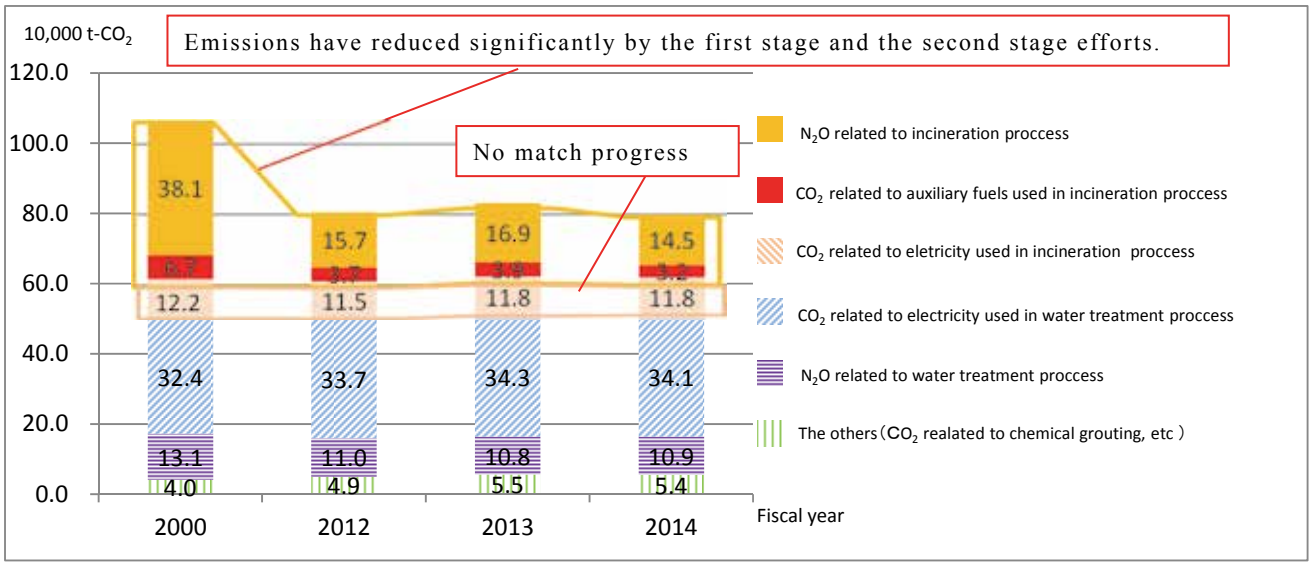


Figure 4. Transition of GHG emissions of Bureau of Sewerage, TMG

4. FURTHER REDUCTIONS OF GHG EMISSIONS BY THE PRESSURE-SUPERCHARGED FLUIDIZED BED INCINERATOR (3RD STAGE)

At the third stage, we have developed turbocharged fluidized bed incinerator targeting to reduction of the electricity consumption which was not possible for conventional incinerators (Figure 5). The newly developed incinerator was initially introduced to two water reclamation centers (WRC), or wastewater treatment plants, in Tokyo: Asakawa WRC and Kasai WRC.

One of advantages of the turbocharged fluidized bed incinerator is that it does not require large blowers, as conventional incinerators do, for supplying combustion air. This feature could reduce electricity consumption significantly.

We incorporated the incinerator with a turbocharger, widely used for watercrafts and automobiles, to supply combustion air (Figure 6). Therefore, the forced draft blower, necessary for the conventional fluidized bed incinerators, is not needed.

Another feature is that the pressure inside of the incinerator is positive. Therefore, the draft fan discharging the exhaust gas out of the system is not needed.

Electricity used in incineration process is reduced significantly by eliminating the forced draft blower and the induced draft fan.

Also, we can utilize a general-purpose turbocharger, which is available in the market and it will contribute to save the operation and maintenance cost.

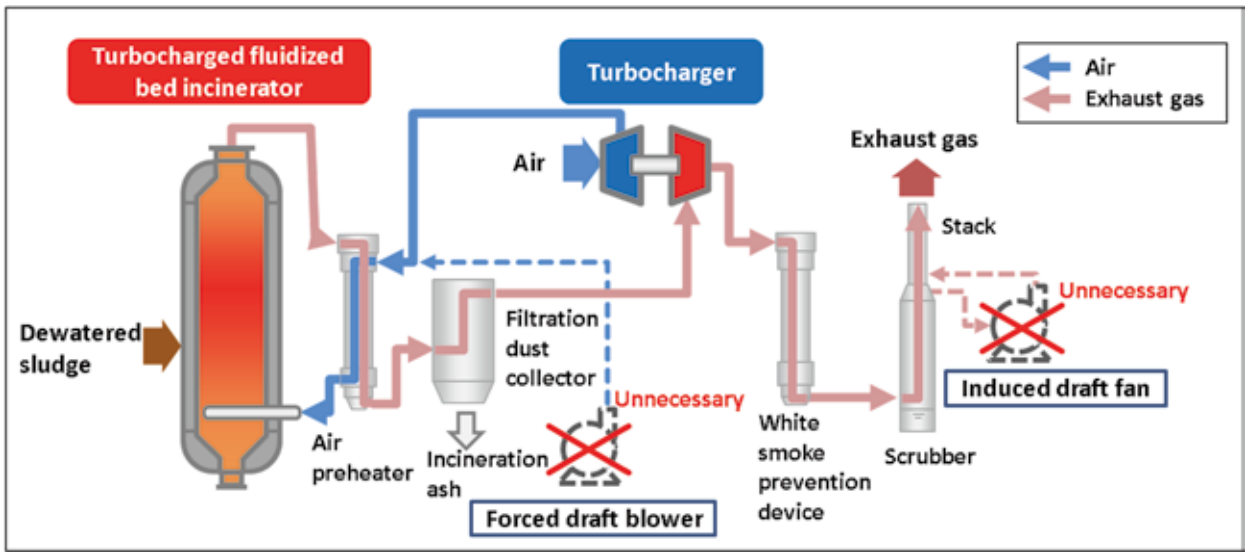


Figure 5. Flow chart of the turbocharged fluidized bed incinerator system

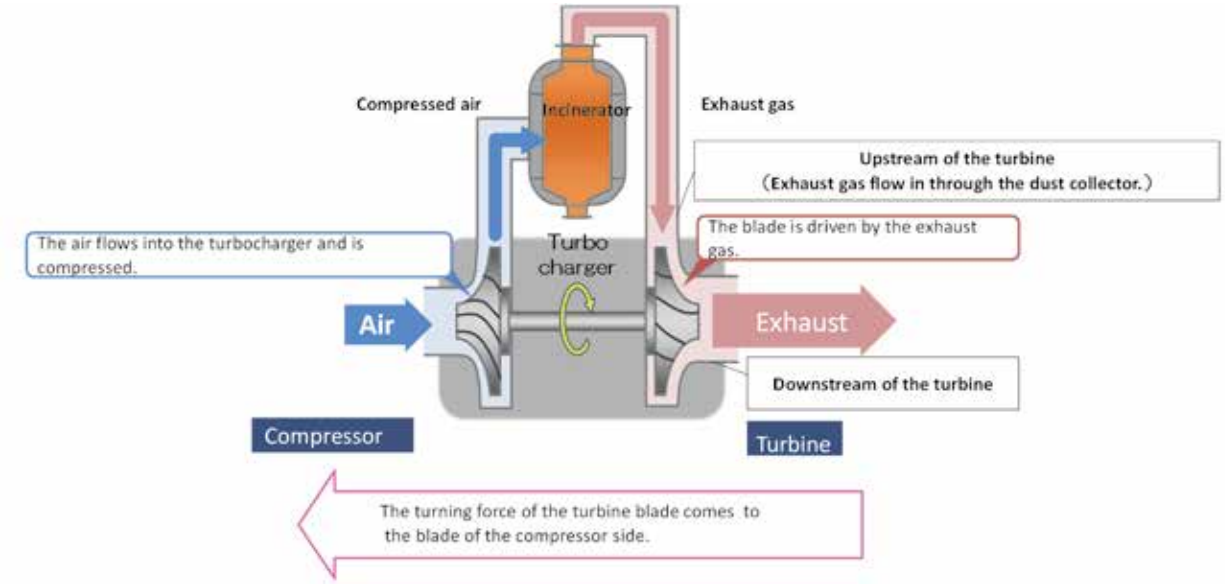


Figure 6. Structure of turbocharger

5. RESULT OF THE INTRODUCTION OF THE TURBOCHARGED FLUIDIZED BED INCINERATORS

The development target of the turbocharged fluidized bed incinerator was set to reduce 40% or more CO_2 emissions originated from electricity, compared with conventional fluidized bed incinerators (first stage; incinerating at 850°C). We set the same reduction targets for N_2O (50% or more) and auxiliary fuel origin CO_2 (20% or more) as the second stage.

Figure 7 shows comparison of GHG emissions at each stage of incineration technologies. The turbocharged fluidized bed incinerator was able to reduce more than 50% of CO_2 emission originated from the electricity, which exceeded the target. Also, N_2O and auxiliary fuel origin CO_2 emissions were significantly reduced. Details of the operational results of the two WRCs are

shown in Table 1.

The positive pressure inside of the incinerator contributes to the huge reduction through two aspects. One is the higher temperature range (around 880°C, or 1616°F) formed in the middle layer of the incinerator which expedites thermal decomposition of N_2O (64% or more). The other is that the turbocharged fluidized bed incinerator could be made compact compared with the conventional ones, due to its internally pressurized condition and high incineration rate (Figure 8). The benefit of smaller incinerator body is the less surface area which leads to less heat discharge. As a result, it reduced 39% of CO_2 emission originated from auxiliary fuel.

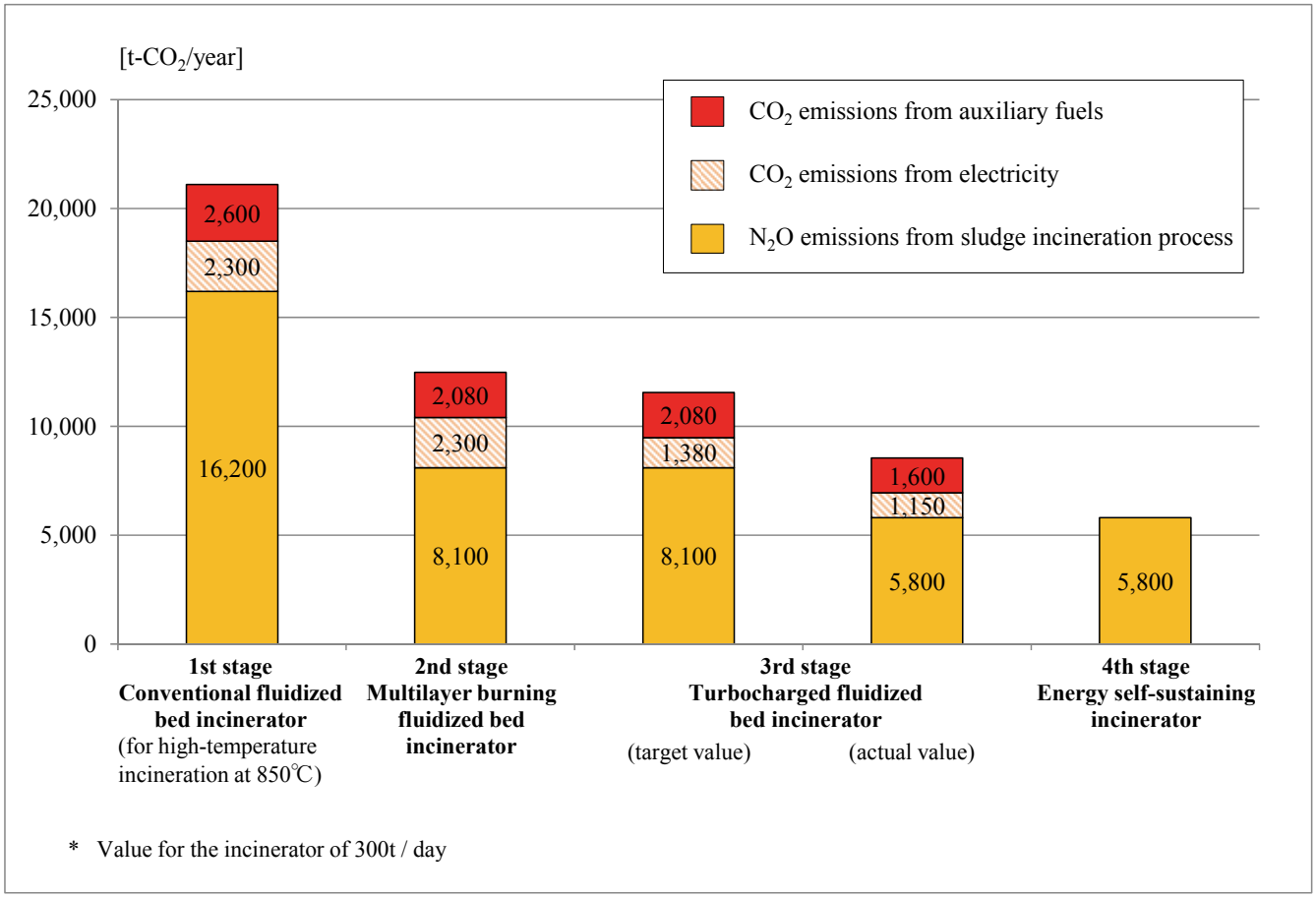


Figure 7. GHG emissions at each stage of incineration technologies

Table 1. Reduction of GHG emissions at Asakawa WRC and Kasai WRC

	Target reduction rate	Unit	Asakawa WRC (60t/day incinerator)			Kasai WRC (300t/day incinerator)		
			Conventional fluidized bed incinerator*1 (1st stage)	Turbocharged fluidized bed incinerator (3rd stage)	Reduction rate	Conventional fluidized bed incinerator*1 (1st stage)	Turbocharged fluidized bed incinerator*2 (3rd stage)	Reduction rate
CO_2 emissions from auxiliary fuels	20%	t-CO_2/year	571	350	39%	2,593	0	100%
CO_2 emissions from electricity used	40%	t-CO_2/year	587	287	51%	2,332	1,147	51%
N_2O emissons from sludge incineration process	50%	t-CO_2/year	2,873	853	70%	16,239	5,790	64%

*1 Conventional incinerators indicate the high-temperature (850℃) incineration-type fluidized bed incinerators that we had used at these plants.
*2 At Kasai WRC, auxiliary fuel is not required because the low water content of incinerated sludge (74%) allows self-sustained incineration.

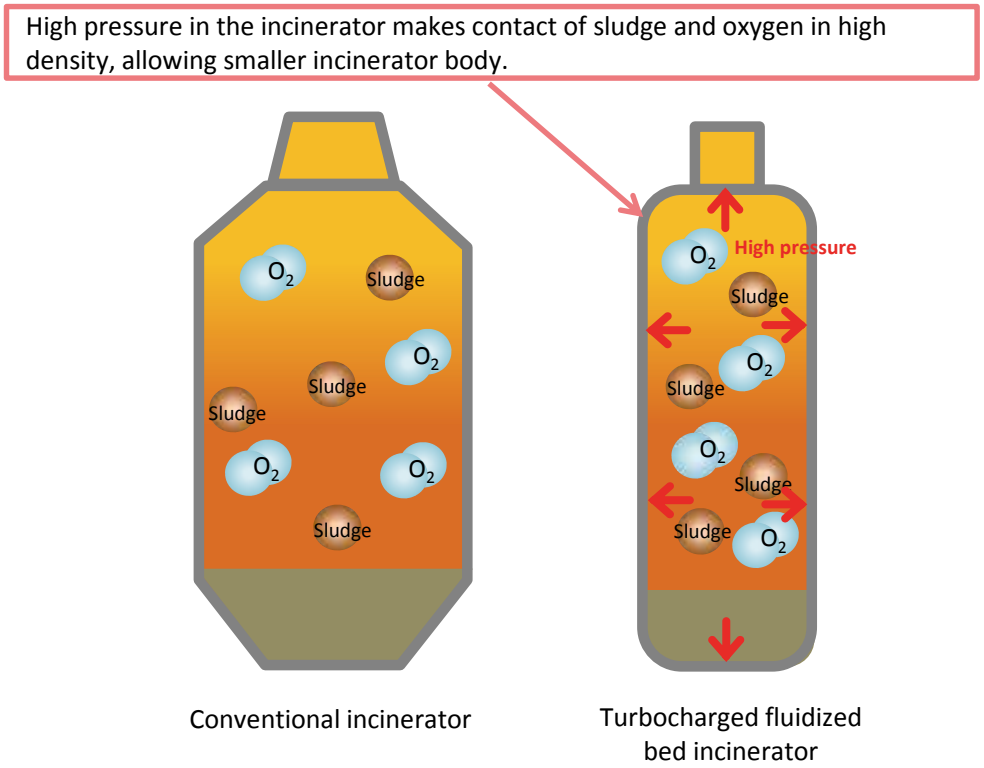


Figure 8. Effect of pressurizing of the incinerator internally

6. FURTHER IMPROVEMENT OF FACILITIES AFTER STARTING OPERATIONS

Inside of conventional incinerators is usually kept in negative pressure for safety reasons. On the other hand, the turbocharged fluidized bed incinerator adopted new combustion system that utilizes the turbocharger and keeps its inside pressure positive. This new combustion system had some specific troubles at initial operations.

6.1 Dust collector breakage

Breaking of an exhaust gas dust collector, set upstream of the turbocharger, made dust leaks. The leaked dust could wear the fast rotating turbine and cause serious trouble. The cause of this defect had been identified as thermal deformation of a metal cell plate holding ceramic filters inside the dust collector, which made filters touch each other and damaged them (Figure 9). In addition to that, failure in detection of dust collecting malfunction allowed continual dust inflow to the turbocharger. As a counter measure, we replaced it with a reinforced metal cell plate.

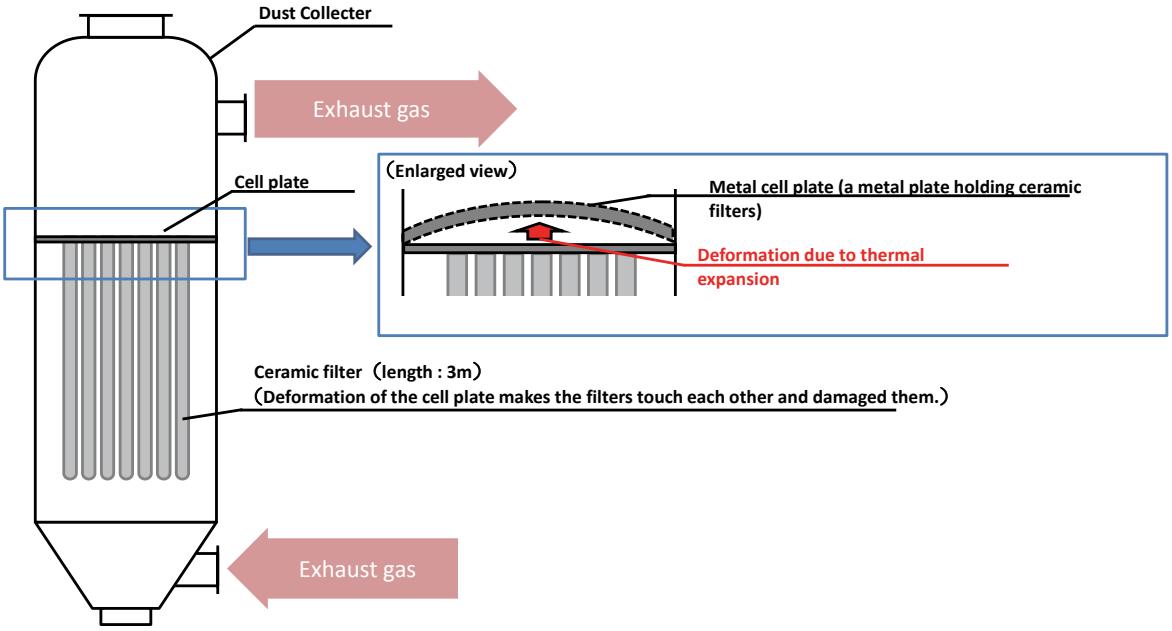


Figure 9. Breakage mechanism of the ceramic filters by deformation of metal cell plate due to thermal expansion

6.2 Standalone operation disability because of insufficient air supply

This system is designed as a blower assists the fluid bed draft only during a startup process. Once the combustion stabilized, the turbocharger is supposed to blow enough air into the incinerator, and then the blower shuts down, and contributes to save electricity.

During initial operations, the turbocharger could not supply enough amount of air for the standalone operation, so the blower had to keep assisting even though the startup process had been completed. We identified that the cause was a mismatch of the operating condition and the compressor capacity of the turbocharger.

As a countermeasure, the shape of the turbine blades was changed. In addition, pipes around the turbocharger were enlarged in order to reduce pressure loss. At the end, the turbocharger supplied enough air to the incinerator for the stand alone operation.

6.3 Necessity of the malfunction detection system for the case of duct clogging

Dust deposition on an exhaust gas duct made the pressure difference increased, and the surge at the turbocharger damaged the supports of the duct.

Kurozumi et al. [1)] revealed the causes of the deposition and suggested effective countermeasures. Pushing the introduction of advanced wastewater treatment methods to our plants, the amount of phosphorus contained in sludge has been increased. Meanwhile, sludge combustion temperatures have been raised in order to expedite N_2O thermal decomposition. As the ratio of phosphorus to metals exceeds a certain level, low-melting-point materials are formed and melt in the incinerator. Then the melted materials solidify and clog in the waste gas duct. Kurozumi et al. [1)] found that a metal additive to the sludge cake is effective to prevent the clogging. They defined the clogging prevention factor which was evaluated as the ratio of metals to phosphorus contained in the

sludge cake, and estimated the required amount of the metal additive based on the factor. Referring to this study, we started adding the metal additive in the sludge cake in order to prevent the duct from clogging. We also installed a differential-pressure detecting procedure to the dust collector to be able to early detect of the dust collector malfunction, and make the incinerator stop immediately in case of an emergency, protecting the facilities.

Because the turbocharged fluidized bed incinerate system keeps its combustion chamber in positive pressure, serious damaged and injuries can be caused by sudden pressure fluctuate or breakdown of the turbocharger due to dust intrusion. Therefore, we immediately investigated the causes of the troubles and took countermeasures mentioned above, together with the incinerator manufactures. We established a safe and reliable turbocharged fluidized bed incinerate system based both of the advanced failure detection and emergency shut-down procedure.

7. FUTURE DEVELOPMENT STRATEGY

Performance of the turbocharged fluidized bed incinerator enables us to set advanced GHG emissions reducing targets of 50% for N_2O, 40% for electricity origin CO_2, and 20% for auxiliary fuel origin CO_2. Other competing manufactures also collaborated with TMG and made innovations through other types of incinerators (step grate stoker incinerator, multilayer burning fluidized bed incinerator using supercharger, and sludge gasification incinerator using supercharger) aiming at these targets.

Furthermore, now we are at the fourth development stage that will realize an “energy self-sustaining incinerator system”: utilizing waste heat and supplying electricity by itself (Figure 10). The system consists of ultra-low water content centrifugal dehydrators, sludge incinerators, and electric generators utilizing waste heat from the incinerators. The lower water content (around 71%) of combusted sludge cake not only eliminates auxiliary fuels at all, but also keeps enough amount of waste heat for generating electricity more than that used in the system (in annual perspective). The installment of the system will reduce the GHG emissions further more. As for the electric generating, we considered costs of the generating, and constrained those below the market buying electricity price.

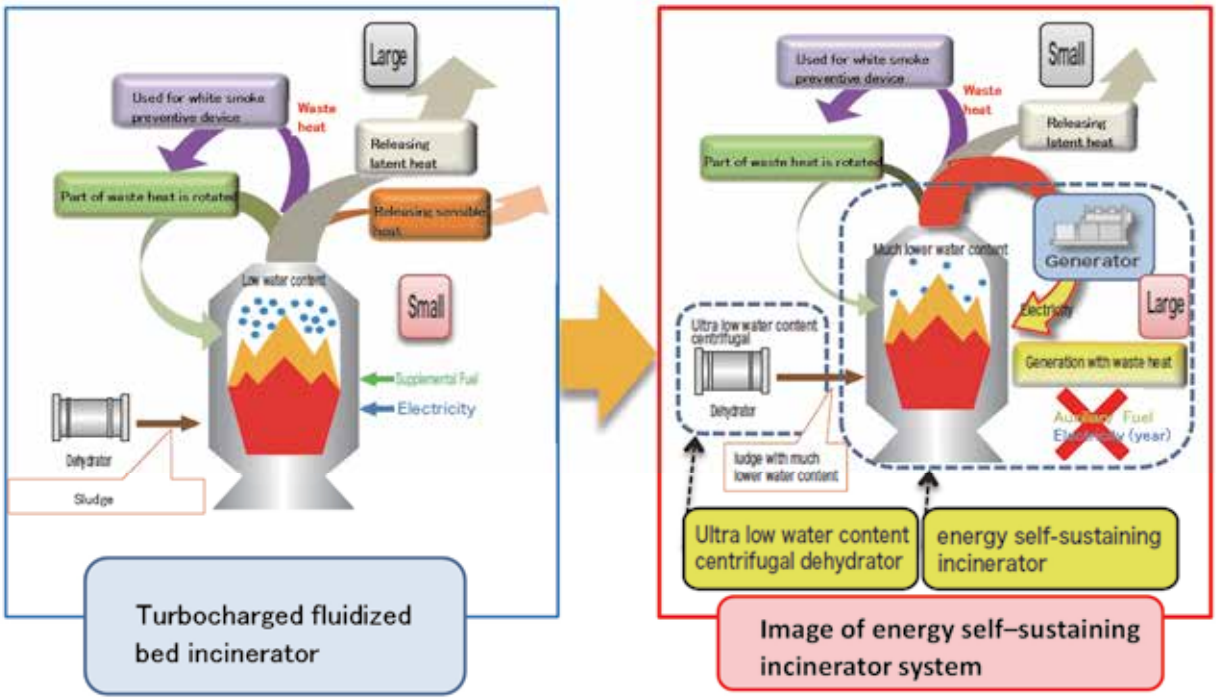


Figure 10. Image of the energy self-sustaining incinerator system

8. CONCLUSION

The turbocharged fluidized bed incinerator was proved to be able to reduce CO_2 emissions from electricity, that any conventional technologies could not achieve. It also turned out that the N_2O emissions from sludge incineration process and CO_2 emissions from auxiliary fuels could also be reduced substantially, which were not included in the original targets. Those facts show that the system we have developed so far would largely contribute to reduce GHG emissions. In addition to that, some other incineration systems were led to innovative technologies which were the same level as the turbocharged fluidized bed incinerator, and achieved the tall reduction targets of GHG emissions we required.

The further development has established the energy self-sustaining incinerator system that utilizes waste heat to generate enough electricity for its own consumption. It cuts almost all of electricity origin CO_2 emission. We are currently planning to build an energy self-sustaining incinerator system at Shingashi WRC. This system requires certain scale and constant full load operation in order to maximize its energy efficiency. Therefore, we examine the specifications of incinerators planned to build and introduce this system when the requirements match. If the requirements do not match for the energy self-sustaining incinerator system, then we will select the turbocharged fluidized bed incinerator, or other incinerators at the same GHG emissions reduction level. We will choose suitable systems from these two levels of technologies, and steadily progress the reduction of GHG emissions. Our next target of the incinerator development is utilization of low temperature waste heat to further electricity generation, maximizing the use of potential sewerage energy.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the staffs of manufactures who developed, constructed and improved new incineration technology in order to reduce GHG emissions.

10. REFERENCE

1) Kurozumi M., Kanjou T., Nakada T., Tsukahara J. (2016) Blockage Risk Evaluation and Method to Prevent its Occurrencein Sewage Sludge Incinerators, *Journal of Japan Sewage Works Association*, Japan Sewage Works Association (posting)

4-1-1　東京都下水道局における下水汚泥焼却炉

温室効果ガス排出量削減技術の開発

流域下水道本部技術部計画課　中島俊彦
（現　施設管理部施設保全課）
中部下水道事務所ポンプ施設課長　石黒雅樹
（現　東部第一下水道事務所砂町水再生センター）
日本下水道協会常務理事（前流域下水道本部長）　黒住光浩

1. 概要

下水道事業から排出される温室効果ガスの 50％以上は､汚泥焼却工程から排出されていた。このため東京都では､段階的に汚泥焼却工程での温室効果ガス排出量を削減するための技術革新を進め、これまでに汚泥焼却に伴う一酸化二窒素（N_2O）と補助燃料由来の CO_2 を削減する焼却炉を開発してきた。

東京都が初めて導入し、平成 25 年度に稼働したターボ型流動焼却炉は、N_2O、補助燃料由来の CO_2 のみならず、従来は困難であった電気使用量の削減を可能とするものであり、従来の焼却炉と比較して大幅な温室効果ガス排出量の削減が可能な技術である。

本文は、導入したターボ型流動焼却炉で実証された導入効果と、この成果をもとに温室効果ガスの一層の削減を目指す焼却炉の開発状況について報告するものである。

キーワード：汚泥焼却炉、温室効果ガス削減、ターボチャージャー

2. 背景

東京都では４年後に開催される東京オリンピック・パラリンピックに向けて、「世界一の環境先進都市・東京」を実現するため、様々な取組を加速させている。

東京都の下水道事業においては、水環境の改善に寄与する一方で、大量の温室効果ガスを排出しており、2000 年度では、日本の首都である東京都の事務事業活動における温室効果ガス排出量の 42%を占めていた（図１）。このため、東京都下水道局では、2010 年に「アースプラン 2010」を策定し、温室効果ガス排出量を 2020 年度までに 2000 年度比で 25%以上削減する目標を設定し、焼却炉の技術革新など具体的な対策を進めており、東京都における温室効果ガス排出量割合は 37%まで低減した。

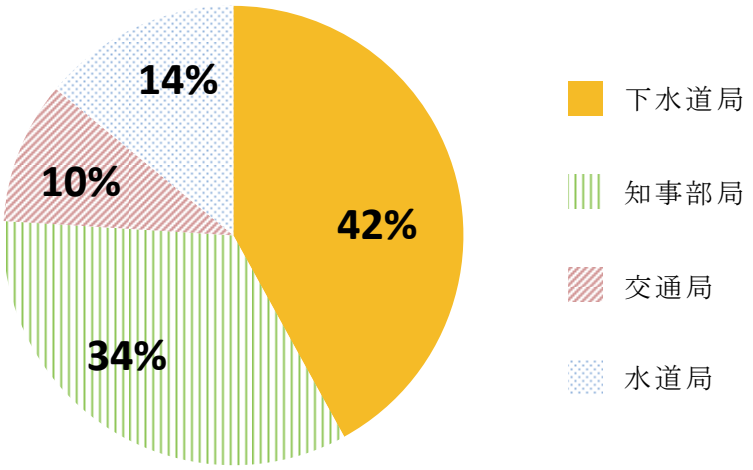


図 1　東京都の 2000 年度における事務事業活動における温室効果ガス排出量の割合

東京都の下水道事業における温室効果ガス排出量の内訳をグラフ２に示す。着目すべきなのは、下水道事業から排出される温室効果ガス全体 106.5 万 t-CO2 の 50%以上である 57 万 t-CO_2 が汚泥焼却工程から排出されている点である。焼却工程からの温室効果ガスの内訳としては、汚泥焼却に伴う一酸化二窒素（N_2O）が 38.1 万 t-CO_2、焼却炉で使用する補助燃料由来 CO2 が 6.7 万 t-CO_2、電力由来 CO_2 が 12.2 万 t-CO_2 である。削減が困難であった電力由来を含め、一層の削減を目指すことが重要である。

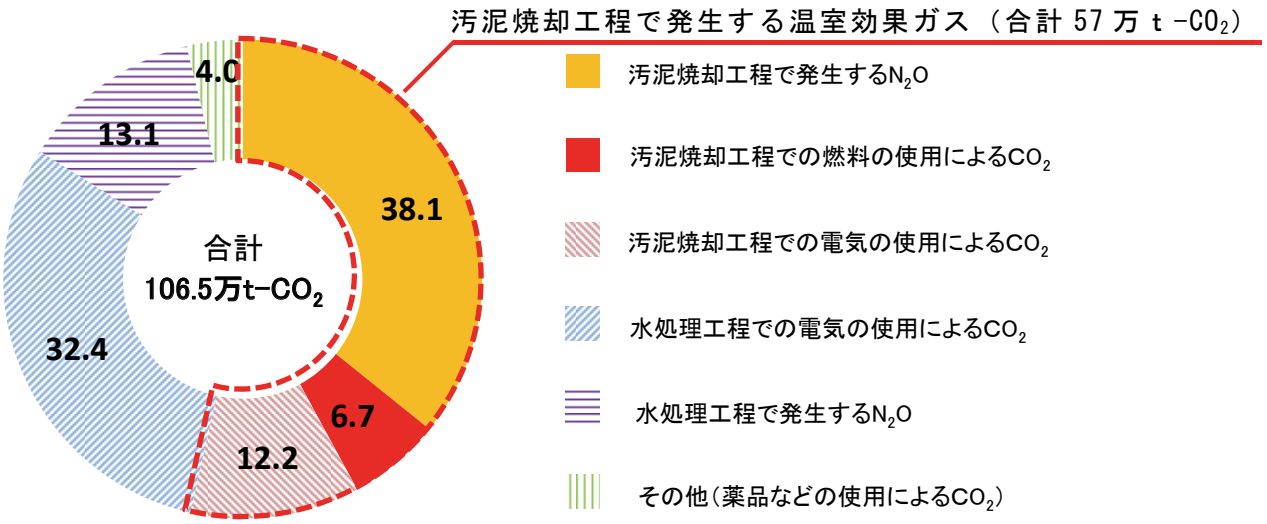


図 2　東京都下水道局の 2000 年度における温室効果ガス排出量の内訳[万 t-CO_2/年]

3. 汚泥焼却工程での温室効果ガスの削減（第一段階、第二段階）

東京都は、温室効果ガス排出量の削減を進めるため、焼却炉の技術革新を段階的に進めてきた。

第一段階では、CO_2 の約 300 倍の温室効果を持つ N_2O に着目した。N_2O の発生量は、焼却温度を上げること N_2O の熱分解を促進することが可能であるため、焼却温度を 800℃から 850℃へ高温化することで、N_2O の 50%削減に成功した。

第二段階では、N_2O と補助燃料由来の CO_2 を削減する二つの焼却炉を開発した。一つは、従来の焼却炉では下部だけからの燃焼用空気供給システムを、炉の中央部からも供給するよう見直し、高温領域が広範囲に形成されることで燃焼効率を高めた多層型流動焼却炉である。もう一つは、汚泥の有機分の熱分解により生成した可燃性ガスを高温(880℃)で燃焼し、その廃熱を焼却の前工程の汚泥乾燥などに活用するなどして効率的に熱回収する汚泥ガス化炉である（図3）。この二つの焼却炉の開発目標は、850℃の高温焼却炉と比較し、N_2O を 50%、補助燃料に起因する CO_2 を 20%削減することに設定した。

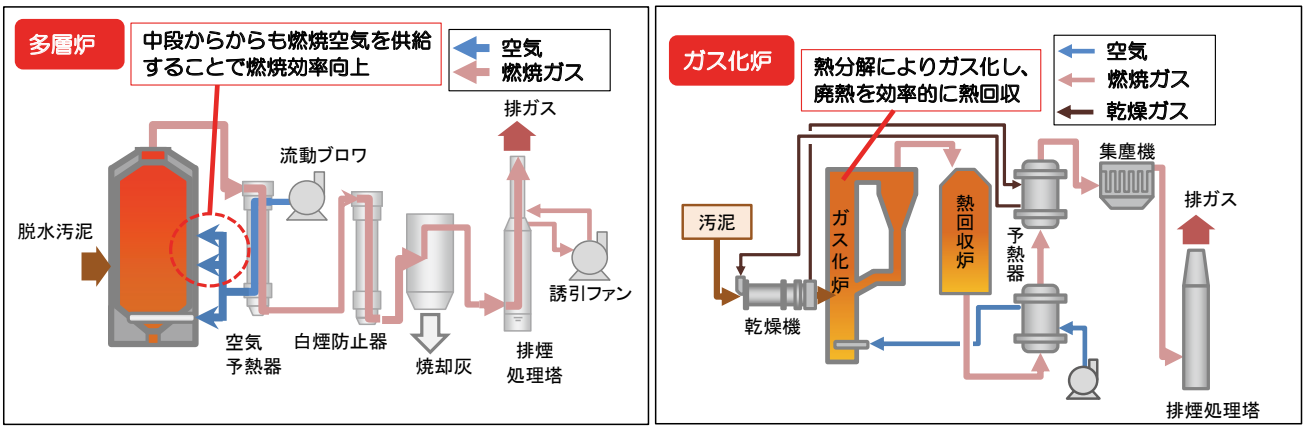


図 3　多層型流動焼却炉とガス化炉の設備フロー

第一段階、第二段階の取組により、焼却工程で排出する N_2O と補助燃料由来の CO_2 は大幅に削減し（図 4）、2000 年度に温室効果ガス排出量全体の半分以上を占めていた汚泥焼却工程での排出量は、2014 年度には約 4 割まで低減した。一方で、電気由来の CO2 発生量は横ばいが継続しており、焼却工程における電気使用量の削減が求められている。

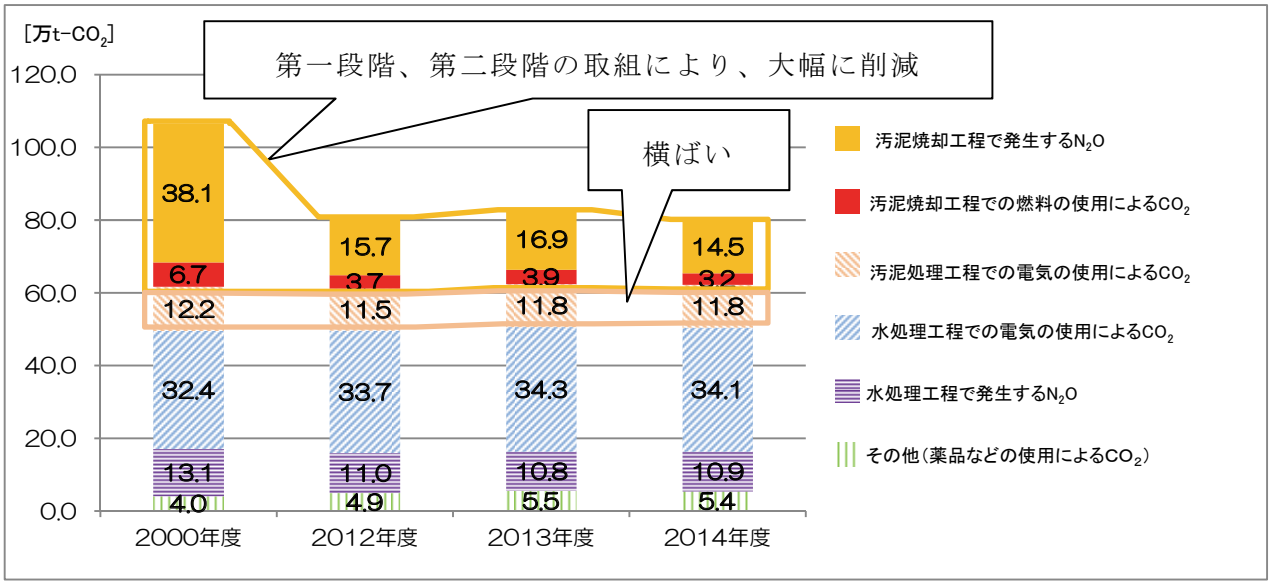


図 4　東京都下水道局の温室効果ガス排出量の推移

4. ターボ型流動焼却炉の導入による温室効果ガスのさらなる削減（第三段階）

第三段階として、従来は困難であった電力使用量の削減を目標として、ターボ型流動焼却炉を開発し（図 5）、浅川水再生センターと葛西水再生センターで 2 基を導入した。

ターボ型流動焼却炉の強みは、従来の焼却炉では必要であった燃焼用空気を供給するための大型送風機を不要にし、電力使用量を大幅に削減できることである。船舶や自動車などで実用化されている過給機（ターボチャージャー）を組み入れ、これにより燃焼に必要な空気を焼却炉に供給できるため（図 6）、従来の焼却炉で必要であった流動ブロワが不要となった。また、この炉は従来の負圧炉とは異なり、加圧炉であるため、排ガスを系外に出すための誘引ファンが不要となる。この流動ブロワと誘引ファンが不要となったことに伴い、電力使用量の大幅な削減が可能である。

また、ターボチャージャーは、汎用品を活用できることもターボ型流動焼却炉の大きな特徴の一つであり、維持管理コストの抑制が期待できる。

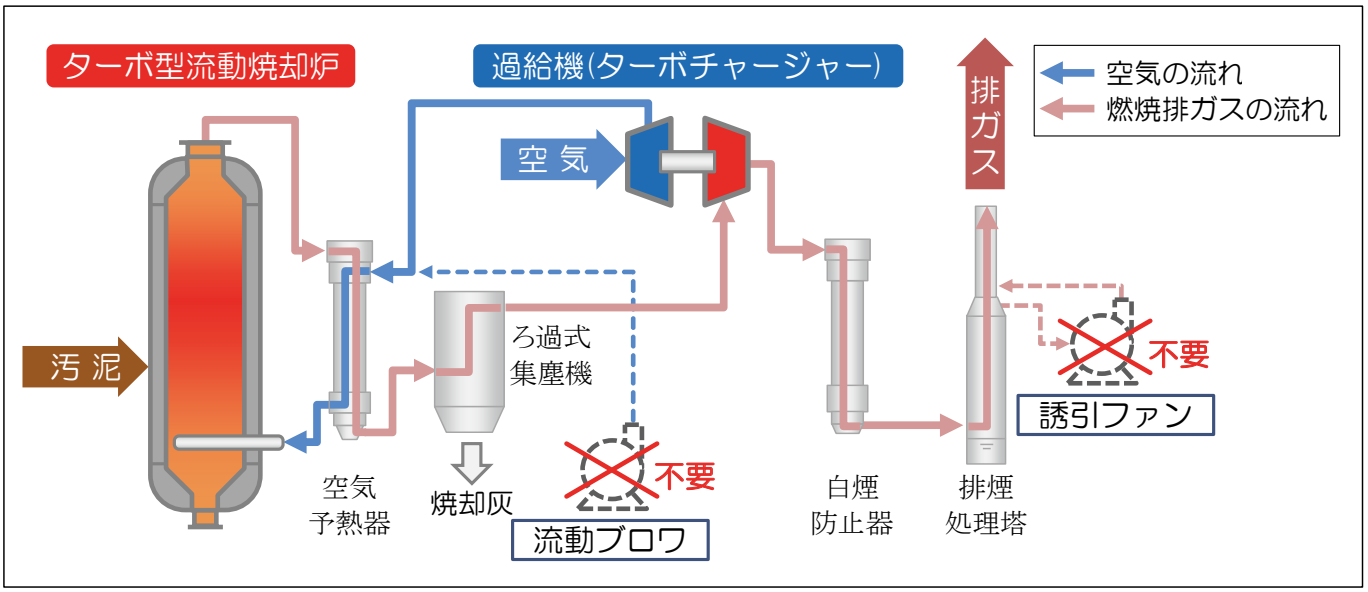


図 5　ターボ炉型流動焼却炉フロー

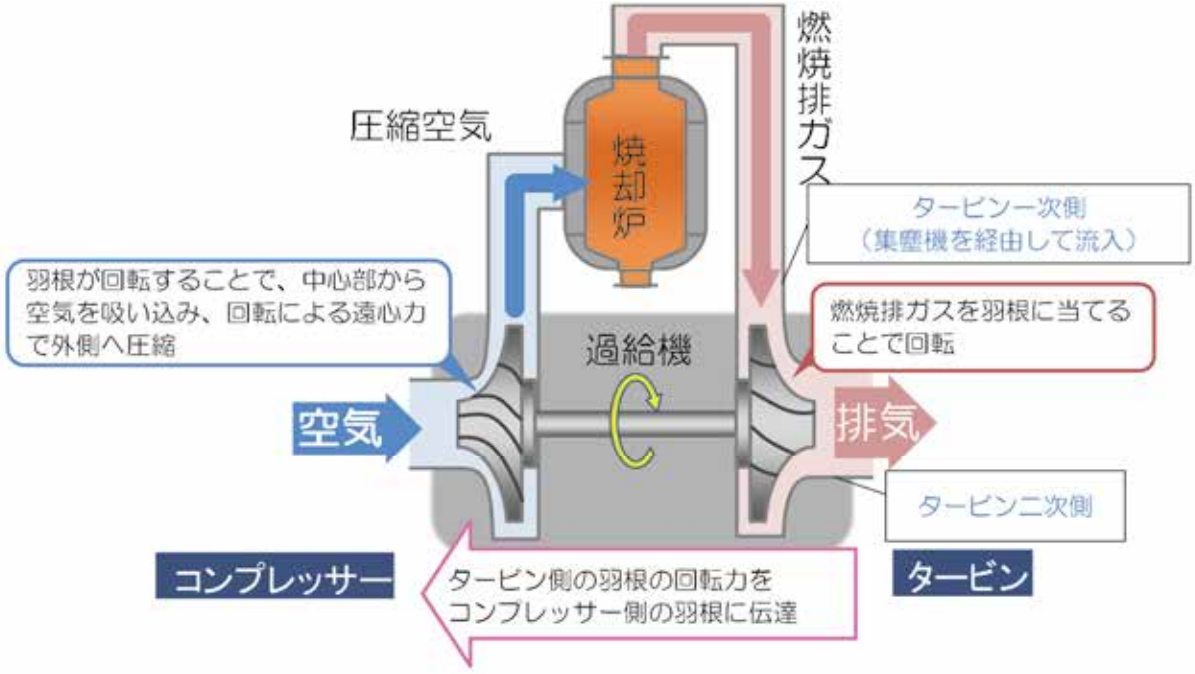


図 6　過給機の仕組み

5. ターボ型流動焼却炉導入の結果

ターボ型流動焼却炉の開発目標は、850℃の高温焼却炉と比較し、電力由来の CO_2 の 40%削減に設定した。なお、N_2O50%と補助燃料由来の $CO_2$20%の削減率は第２段階と同等に設定した。図７に各段階における汚泥焼却炉のレベルアップに伴う温室効果ガス削減効果を示す。ターボ型流動焼却炉は、電力由来の CO_2 は目標を上回る 50%以上の削減を実現できたのに加え、N_2O と補助燃料由来の CO_2 も大幅に削減することができた。２つの水再生センターにおける温室効果ガス削減効果は表１のとおりである。

その理由は、この炉が加圧炉であることである。加圧炉となったことに伴うメリットは、①加圧が燃焼速度を早め、炉内中間部での約 880℃への高温化を実現することにより、N_2O の熱分解が促進され、N_2O 排出量を 64%以上削減できたこと、②汚泥と酸素が高密度で接触するため、燃焼速度が速く従来炉よりコンパクト化が可能になったことで、焼却炉の表面積低減に伴い放熱量が削減され、補助燃料由来の CO_2 を約 39%削減できたことである。

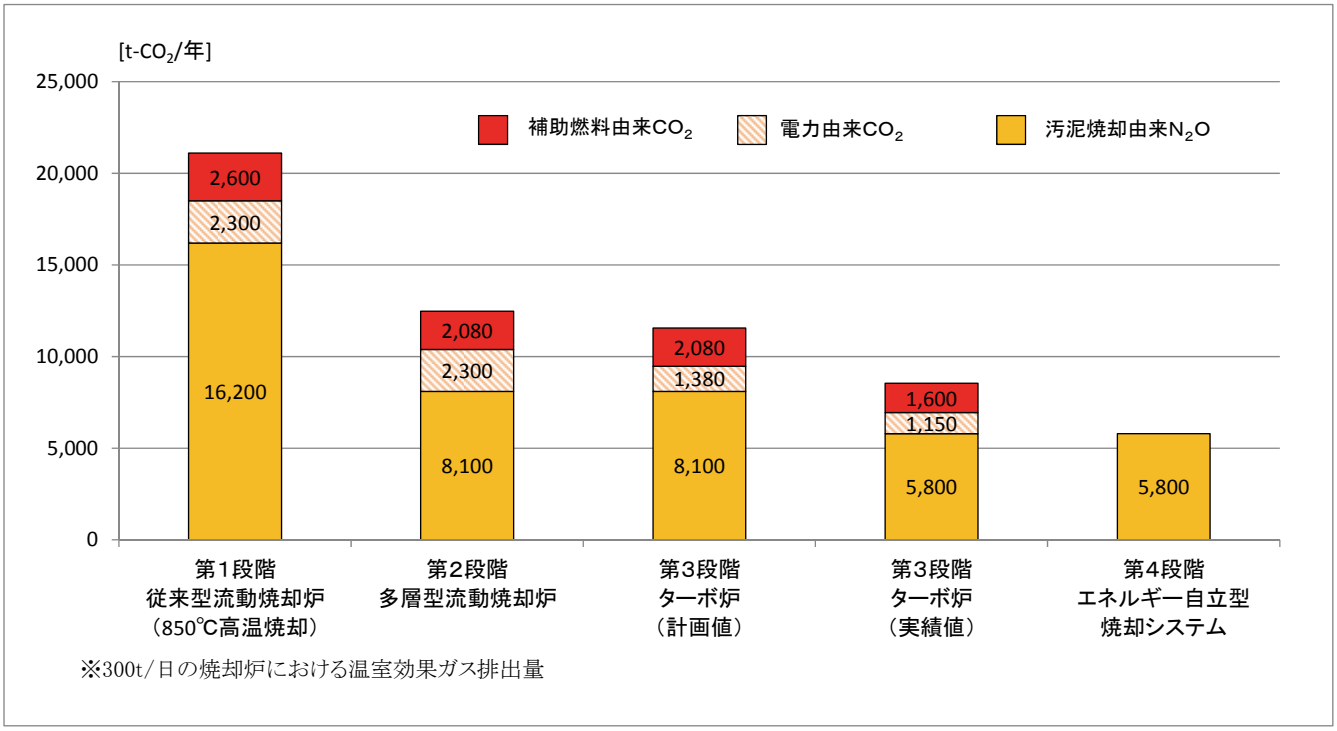


図７　汚泥焼却炉のレベルアップに伴う温室効果ガスの削減効果

表１　温室効果ガスの削減効果

	目標削減率	単位	浅川水再生センター(60t炉)			葛西水再生センター(300t炉)		
			従来型炉※1	ターボ炉	削減率	従来型炉※1	ターボ炉※2	削減率
補助燃料由来CO_2	20%	t-CO_2/年	571	350	39%	2,593	0	100%
電力由来CO_2	40%	t-CO_2/年	587	287	51%	2,332	1,147	51%
汚泥焼却由来N_2O	50%	t-CO_2/年	2,873	853	70%	16,239	5,790	64%

※1 従来型炉とは、当該センターで従来採用してきた高温(850℃)燃焼型流動焼却炉を指す
※2 葛西水再生センターでは、焼却炉へ投入する汚泥の含水率が74%と低く、自燃するため、補助燃料を使用しない

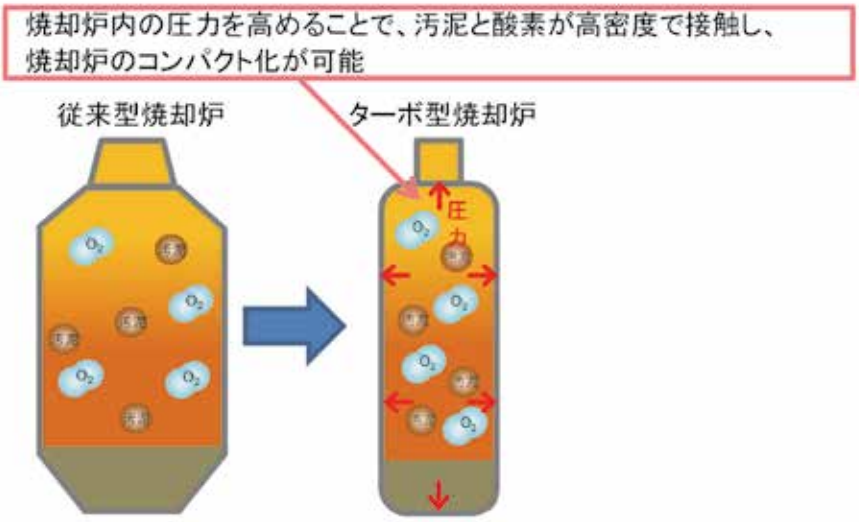


図 8　加圧炉化による効果

6. 稼働後の設備改良による技術の確立

従来の焼却炉は安全性などを考慮し負圧炉であった。一方、ターボ型流動焼却炉は、従来の流動焼却炉と異なり、過給機を利用して炉内を加圧状態で燃焼させる新しいシステムを採用している。

新しいシステムを採用したことに伴い、初期稼働時には次のような課題が発生した。

6.1 ろ過式集塵機破損

過給機の一次側に設置されている集塵機の破損が発生し、過給機に灰が流入した。過給機への灰の流入は、高速で回転するタービンを摩耗させ、重大な事項につながるものである。

これらの原因として、高温の廃熱を有効利用する過給機の一次側に設置されたフィルターをおさえるためのセルプレート（図 9）が熱膨張により歪んでフィルター同士が接触して破損したことや、集塵機破断情報の早期検知ができず、タービンに灰が流入したことが判明した。このため、対策としてセルプレートの補強等の対策を講じた。

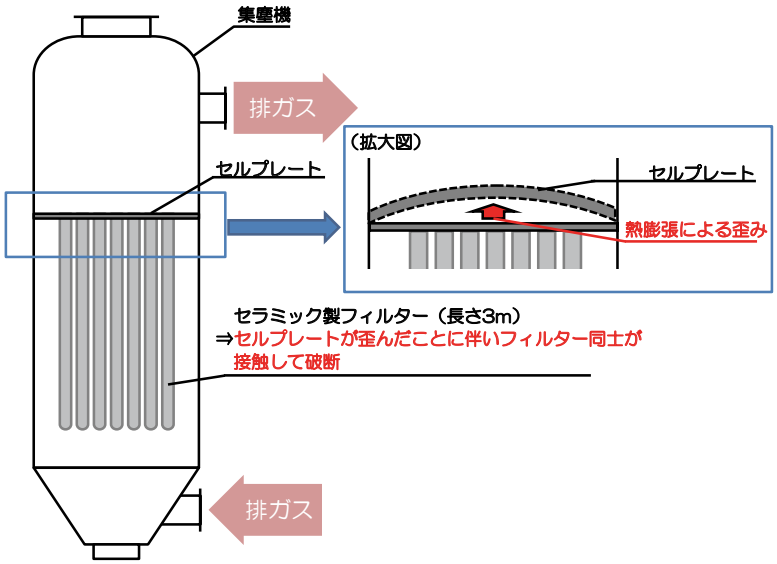


図 9　集塵機内のセルプレートが熱膨張したことによるフィルター破断のイメージ

6.2 風量不足による過給機の自立運転の困難性

ターボ型流動焼却炉は、起動用流動ブロワにより運転を開始し、運転開始後はターボチャージャーが自立運転して起動用流動ブロワを停止させることで、電力量を削減する。しかし、初期稼働時にはターボチャージャーの風量不足に伴い、過給機が自立運転状態に移行できず、起動用流動ブロワが補助運転を継続するというトラブルがあり、原因として、運転条件と過給機コンプレッサ仕様のミスマッチなどが判明した。

このため、過給機コンプレッサ翼などの仕様の変更、過給機周辺配管の大口径化などによる圧力損失の低減などの対応を講じた。その結果、過給機への供給風量が増加し、自立運転が可能になった。

6.3 ダクト閉塞時などの異常検知システムの必要性

浅川水再生センターのターボ型流動焼却炉において、排ガスダクト内に灰が堆積して差圧が発生し、過給機がサージングを起こしてダクトのサポートが破損するという不具合が発生した。

この不具合については、その後の研究[1)]で、原因と対策が明確になっている。

高度処理化を進めている東京都の水再生センターでは、汚泥中のりん濃度が高まっている。また、汚泥の焼却工程で発生する大きな温室効果を持つ一酸化二窒素を削減するため、高温焼却を進めている。このため、①汚泥中の金属とりんの比率が一定値を下回ると低融点物質が生成され、煙道閉塞を引き起こすこと、②閉塞防止対策としては、金属含有薬剤を添加した上で焼却することが有効であること、③金属対りんの比率で示される“閉塞抑制指標値”に基づき水再生センター毎に必要とされる薬剤添加量の算出が可能であることが解明されている。

この研究に基づき、“閉塞抑制指標値”により、灰の詰まりを抑制するため必要量の薬剤添加を行うこととした。

また、灰が堆積しやすい浅川水再生センターのターボ型流動焼却炉の運転の安全性を確保するため、炉内圧力と流動用空気予熱器の差圧を検知し、非常時に緊急停止するソフト面の対策を講じた。

ターボ型流動焼却炉は、炉内を加圧状態にして燃焼させるシステムであることより、炉内圧力異常や過給機への灰の混入による破損は大きな被害となる可能性がある。このため、以上のような原因究明や対策を焼却炉メーカーとともに速やかに行った。トラブルを未然に防止するため早期に異常を検知する機能を追加するとともに、トラブルが発生した場合でも、安全に焼却炉を停止するシステム対策を施すことで、安全かつ安定的に運転可能なターボ型流動焼却炉を構築することができた。

7　さらなる焼却炉の技術革新

ターボ型流動焼却炉実機による性能が確認できたことで、N_2O 50%、電力由来CO_2 40%、補助燃料由来CO_2 20%の削減目標の設定が可能になった。これに対応するため、競合する他メーカーにおいても並行して、東京都との共同研究により、技術革新が推進された。ストーカ炉、流動タービン多層型焼却炉、流動タービンガス化炉である。

さらに、東京都では新たな目標として、焼却廃熱を回収し、これによる廃熱発電により、焼却炉で使用する全電力を供給する「エネルギー自立型焼却システム」（第４段階）の開発を行った（図 10）。このシステムは、含水率を 71%程度まで下げる超低含水率型脱水機と、廃熱発電機能を付加した焼却炉で構成される。エネルギー自立型焼却システムは、低含水率化した汚泥を焼却することで、自燃により補助燃料が不要となるとともに、廃熱発電により焼却工程

における年間の使用電力量を発電量が上回るものであり、今後実機の導入により更なる温室効果ガス排出量の削減が可能となる。

なお、発電においては、発電コストも考慮しており、買電単価より安価に発電できる条件を設定している。

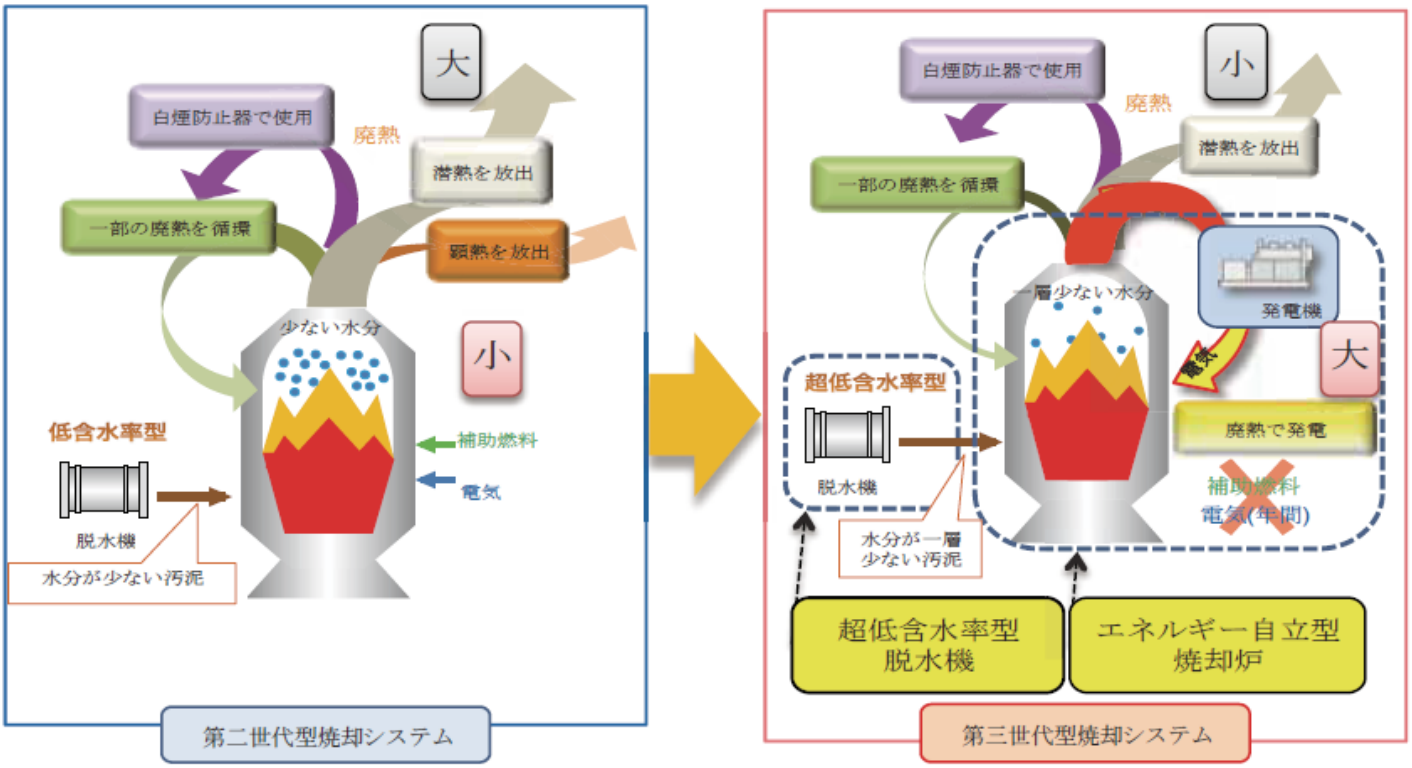


図 10　エネルギー自立型焼却システム概念図

8　結論

ターボ型流動焼却炉は、従来の技術では削減が困難であった電力由来の CO_2 を削減できることを実証した。また、目標では想定していなかった N_2O と補助燃料由来の CO_2 も大幅に削減できることを実証した。このことは、ターボ型流動焼却炉が温室効果ガスの削減に大きく貢献できる焼却炉であることを示している。加えて、他の焼却炉システムにおいても、ターボ型流動焼却炉と同等の性能を有する技術革新が誘導され、東京都が求めるハイレベルな温室効果ガス削減条件への対応が可能になった。

また、その後の技術開発により、焼却炉に廃熱発電機能を付加して焼却工程での使用電力量を上回る発電量を得て更なる温室効果ガス排出量の削減が可能な「エネルギー自立型焼却システム」の開発も完了している。東京都では現在、新河岸水再生センターにおいて「エネルギー自立型焼却システム」の導入を予定している。

このシステムの導入には、一定以上の大規模焼却炉であること、定格運転が可能な炉であることなどの条件が必要である。このため、今後、施設規模に応じて他のプラントへも「エネルギー自立型焼却システム」を導入していく。この条件に該当しない焼却炉においてはターボ型流動焼却炉のような省エネ型の焼却炉の導入を図ることにより、温室効果ガス排出量の一層の削減を進めていく。

また、今後の目標として、これまで利用が困難であった低温域の焼却廃熱をより一層活用して発電を行う新たな技術を導入し、下水の持つエネルギーを最大限に活用していく。

9　謝辞

温室効果ガスの削減に寄与するため、汚泥焼却炉における新しい技術の開発、建設及び改良に尽力された焼却炉メーカーの方々に感謝いたします。

10　参考文献

1) 黒住光浩、冠城敏之、中田友三、塚原純哉(2016)
「下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法及び閉塞防止方法」（下水道協会誌）

4-1-2 Improvement of Observation Accuracy of Rainfall Information System: Tokyo Amesh

Yuki Fujita[1*], Tetsuya Okajima[1]

[1] Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government
***E-mail: Yuuki_1_Fujita@member.metro.tokyo.jp**

ABSTRACT

Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government operates a rainfall information system, "Tokyo Amesh" to rapidly obtain information of rainfall such as localized thunder storm and heavy rain to make the operation of pumping stations and water reclamation centers more efficiently. Due to deterioration of main components such as rain radars and central processing unit after more than ten years of operation, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government completed the system reconstruction of Tokyo Amesh between FY2012 and the end of FY2015.

In the reconstruction, we replaced old radars with new radars which can obtain data of additional meteorological parameters to ensure reliability of the information. We worked at improving observation precision including installing X-band Multi Parameter (MP) radars with both horizontal and vertical polarimetric waves to improve observation precision. We continue to address challenges such as Bright Band for further improving observation precision.

KEYWORDS: Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government, pumping station, water reclamation center, pump operation, radar rain gauge system, Tokyo Amesh, rain radar, X-band MP radar, X-band radar, ground rain gauges

INTRODUCTION

The sewerage system plays a vital role in ensuring a safe and comfortable environment by cleaning dirty water after using in the daily lives and urban activities and returning that water to the rivers and sea. In addition, the system also plays a role in preventing floods by removing stormwater from roads and land surface to sewer through pipes and pumps rapidly. In Tokyo urban area, most area covered with combined sewer system. Urbanization of Tokyo has led to the decrease of unpaved grounds. Because of the low permeation rate, most of the

rainwater rushes in to pumping stations and water reclamation centers through sewerage.

The accurate and real-time information of rainfall conditions is essential to respond rapidly changing unstable rainfall with adequate pump operation.

In addition, most of pumping stations in Tokyo are remote controlled from centralized monitoring room in distant pumping station or water reclamation center. It enables us to operate pumps by fewer operators. However, operators need to monitor rainfall information in each distant pumping station. For these reasons, we use a rainfall information system to grasp the accurate and real-time information of rainfall conditions such as localized thunder storm and heavy rain, and to improve reliability and safety of stormwater drainage by pump operation.

Besides, to reduce flood damages, it is important that citizen of Tokyo prepares against flooding by themselves. So the Bureau of Sewerage runs a real time online rainfall information system, naming it “Tokyo Amesh”, since FY2002.

But due to deterioration of its main components such as rain radars and central processing unit after ten years in operation, Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government completed the reconstruction of radar stations and central processing unit of Tokyo Amesh over the period between FY2012 and the end of FY2015.

At this reconstruction, we installed X-band MP radars, which can measure with both horizontal and vertical polarized waves to ensure the reliability of Tokyo Amesh and to improve observation precision.

In recent years, there has been an increase in the frequency of localized thunder storms and heavy rain, which bring much rain to small areas in short period of time and increase a risk of floods. We address to rapidly detect early signs of sudden rain with the new radars, by indicating the very first sign of rainfall which was undetectable with former radars.

In this paper, the efforts of Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government to prevent floods through reconstruction of Tokyo Amesh system will be shown.

TOKYO AMESH

A radar beam travels straight and reflects on the surface of raindrops. This property enables radar to measure the size of raindrops. The radar rain gauge system is based on this principle. The system gathers reflect waves, removing the ones from buildings or mountains. Based on the measured data with the radars, the central processing station calculates the intensity and locations of the rainfall and processes the results into appropriate form of data for pump

operation. (See Figure1).

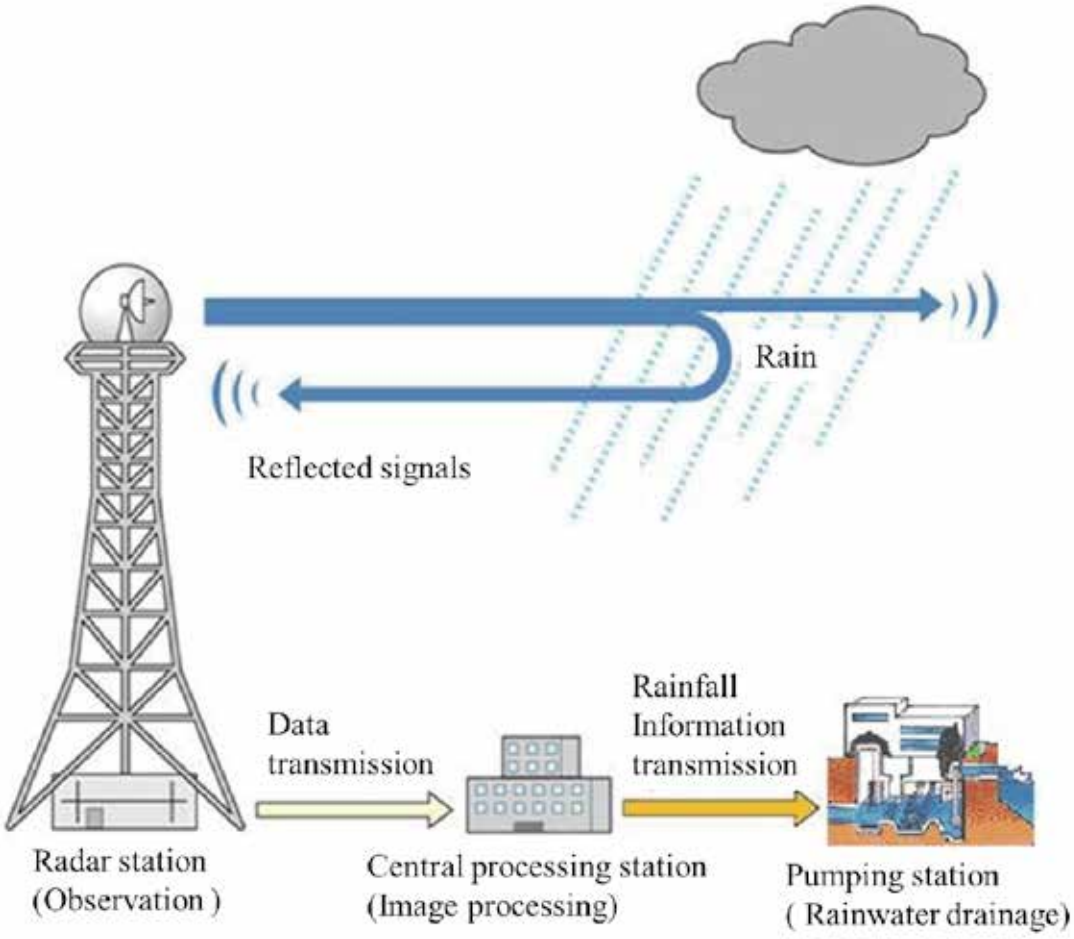


Figure 1. System Overview

Because the radars receive the echo and measure the power to estimate rainfall intensity, the calibration with the ground rain gauge data contributes to the minimization of any error.
Each of the radars has the observation area of 50km radius, so Tokyo is totally covered by two radars.

Tokyo Amesh also shares the rainfall information with Japan Meteorological Agency and the neighboring local governments from 2007, successfully enhancing observation accuracy and extending observation range. The reflected wave attenuation occurs because beam weakens while passing through rain. Radar's rainfall observation is obstructed by strong rain near the antenna and lower accuracy of rainfall intensity in distant locations. The influence by the attenuation is minimized by complementing data with the neighboring local governments.

Tokyo Amesh system consists of two radar stations in Tokyo (Minato Radar and Inagi Radar) and two radars of the neighboring local governments, about 130 ground rain gauges (Bureau of

Sewerage, Bureau of Construction and the neighboring local governments) and 119 rainfall information terminals around central processing unit in the central processing station (See Figure 2).

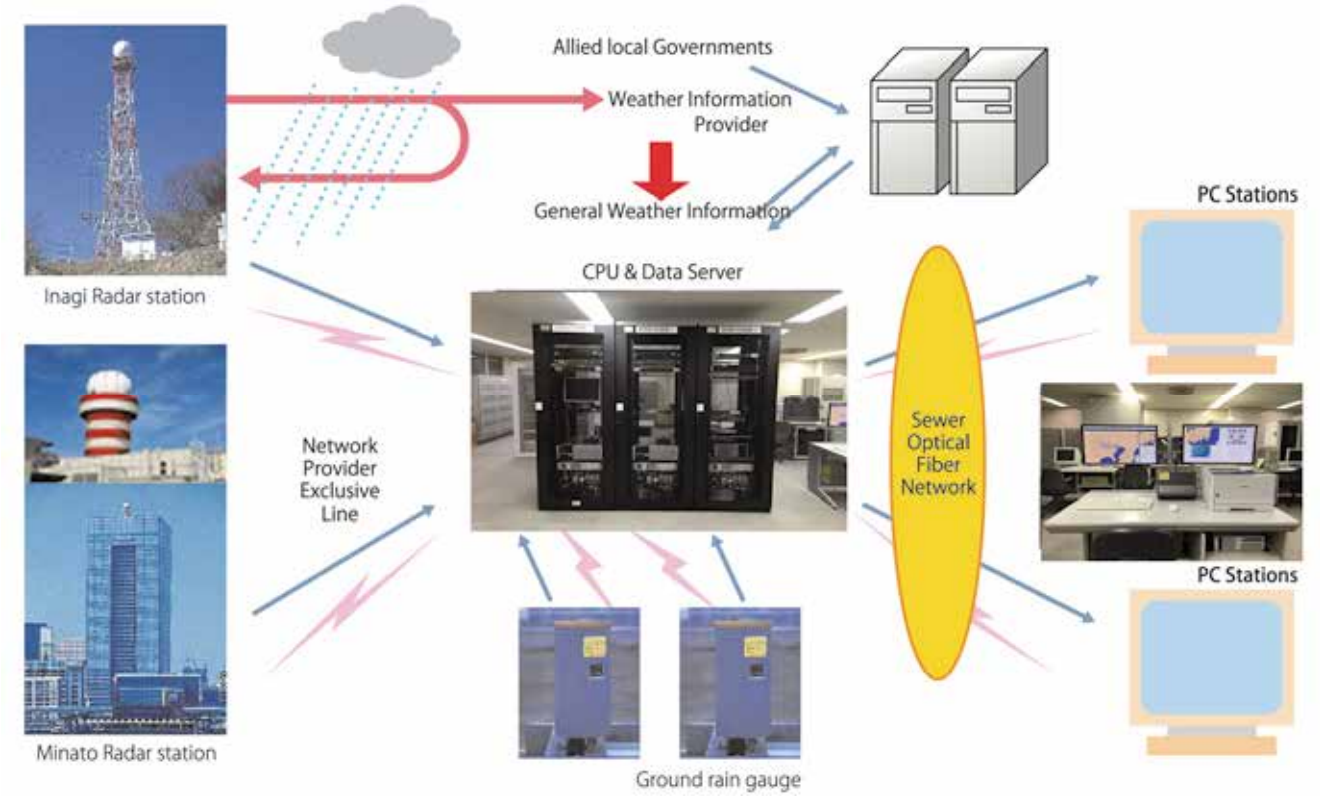


Figure 2. System configuration of Tokyo Amesh

Based on the measured data with the radars and ground rain gauges, the central processing unit calculates the intensity of the rain and sends the results to information terminal through our own optical fiber network laid inside sewerage pipes. At each terminal, the information is shown on the graphical interface suited to pump operation (See Figure 3).

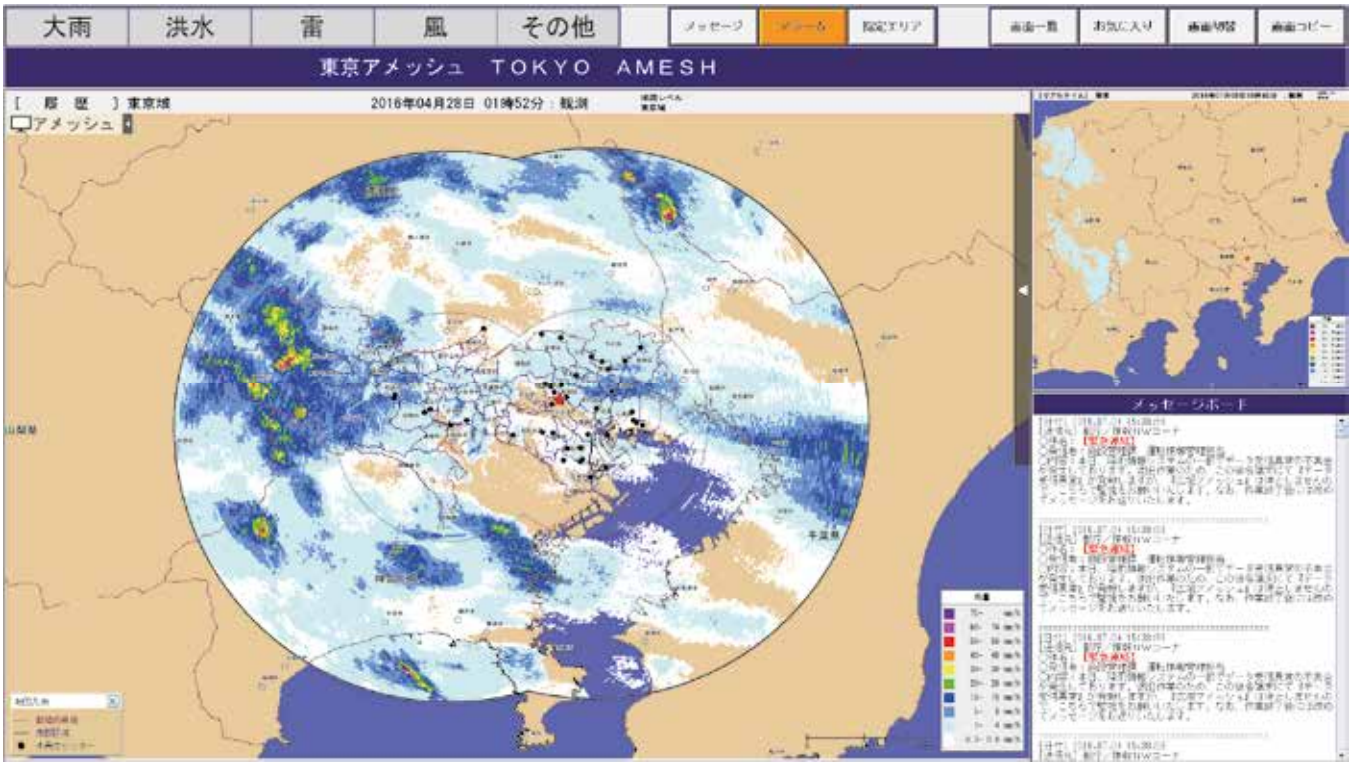


Figure 3. Example of main surveillance screen of Tokyo Amesh

As the information obtained from Tokyo Amesh is open to the public via Internet and smartphones, it is popular among citizen of Tokyo and is accessed about 60 million times in FY2015.
(Our web site: http://tokyo-ame.jwa.or.jp/en/index.html Tokyo Amesh in English) (See Figure 4)

Figure 4. Example of Main surveillance screen of Tokyo Amesh in English

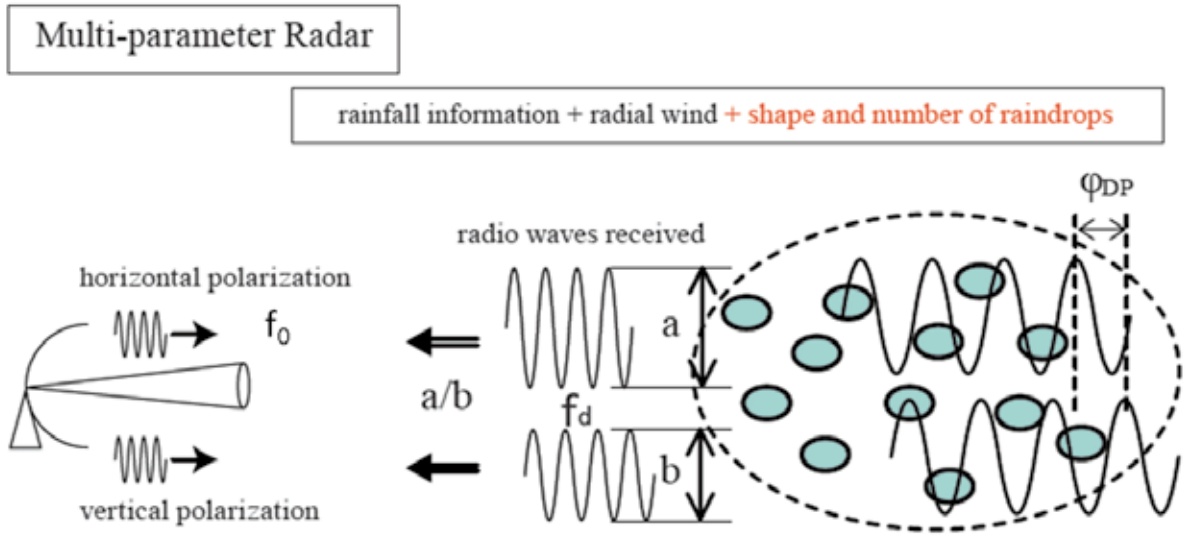
Reconstruction of Radars

After ten years of operation, former radars sometimes had troubles like system stoppage caused by mechanical failure. In the management plan 2013, Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government made a decision to replace the old radars as one of the countermeasures against floods. The plan aims to improve the accuracy of the rain information system by introducing newly developed X-band MP radar for ensuring safety of pump operation against localized heavy rain. Features and advantages of the new radars are shown in next chapter.

Principle of X-Band MP Radar

Former rainfall radars measure rainfall intensity with received signal strength of only horizontal polarized wave. On the other hand, newly installed X-band MP radars enable to identify the shape and the diameter distribution of raindrops by measuring rainfall with both horizontal and vertical polarized waves and to improve accuracy of radar rain gauging (See Figure 5).

The major parameters measured with the new X-band polarization radars are shown in Table.1.



Z_H, K_{DP}, Z_{DR}, ρ_{HV}

a,b; amplitude, f_0: frequency of transmitted wave, f_d: Doppler frequency, φ_{DP}: differential propagation phase, Z_H: reflectivity factor, K_{DP}: specific differential phase, Z_{DR}: differential reflectivity, ρ_{HV}: co-polar correlation coefficient

Figure 5. Measurement principles

Table 1. Major parameters of X-Band MP radar

Parameter	Symbol	Description
Horizontal Reflectivity Factor	Z_H	To estimate rainfall intensity.
Differential Reflectivity	Z_{DR}	To identify the shape of raindrop (spherical or flattened) with the ratio of horizontal reflectivity factor(Z_H) and vertical reflectivity factor(Z_V).
Differential Propagation Phase	φ_{DP}	To estimate ellipticity of raindrops with the phase difference between horizontal and vertical polarimetric wave.
Co-Polar Correlation Coefficient	ρ_{HV}	Calculated with a correlated function of received signals of horizontal and vertical polarimetric wave. To identify the raindrop type(rain, snow or hail) in combination with differential reflectivity ratio(Z_{DR}).
Specific Differential Phase	K_{DP}	Differential propagation phase per unit distance(φ_{DP}). To estimate rainfall intensity calculated with Specific Differential Phase(K_{DP}), being less interfered by rain attenuation.

Radial Velocity	V_D	To measure wind direction and wind velocity with the radial velocity of raindrop.
Spectrum Width	W	To indicate accuracy of the measured radial velocity.
Doppler Velocity Unfolding	V_H	Radial velocity(V_D) corrected for folding effect.
Doppler Velocity Spectrum Width	W_H	Spectrum width of Doppler velocity unfolding.

Solid-State Transmitter

Magnetron transmitters, which can transmit at a high output power and have many track records, were used in the former radars. However, the short mechanical life of about 1 year and the occasional occurrence of sudden failure make its maintenance cost higher.

In the new radars, solid-state transmitters are used. Solid-state transmitters offer longer mechanical life, less maintenance cost and stable continuous rainfall monitoring. Although the output power of solid-state transmitter is less than that of magnetron transmitter, the output power is enhanced by assembling eight solid-state transmitters. The assembled transmitters enable us to deliver equal performance to the conventional transmitter at a smaller output power by applying for pulse compression technology. Comparison between magnetron and solid-state transmitter specification are shown in Table 2.

Table 2. Comparison of magnetron and solid-state transmitter specification

	Magnetron	Solid-State
Type	Coaxial Magnetron	Gallium Nitride(GaN)Device
Replacement Frequency	Approximately 1-year	No Regular Replacement
Transmitter Power	70kW	1.2kW (Eight 200W Devices Assembled)
Pulse Width	2μs	0 to 7.5 km 1 μs 7.5 to 80 km 48 μs
Pulse Compression	Inapplicable	Applicable
Minimum Detectable Signal	-109dBm	-110dBm

New Radar Specification

Comparison of specifications between the former radar and the new radar is shown in Table 3.

Table 3. Specification comparison between former and new Radar

		Former Radar	New Radar
Operation Range		0～80km (0～50km : Quantitative Monitoring) (50～80km : Qualitative Monitoring))	0～80km (0～50km : Quantitative Monitoring) (50～80km : Qualitative Monitoring))
Antenna	Diameter	Φ3m Circular Parabolic	Φ3m Circular Parabolic
	Polarization	Horizontal	Horizontal, Vertical
	Beam Width	Less than 1.4°	Less than 0.8°
	Gain	More than 43dB	More than 43dB
	Rotation	$3min^{-1}$	$3min^{-1}$
Transmitter	Peak Power	70kW	1.2kW
	Frequency	9710MHz (Minato Radar) 9730MHz (Inagi Radar)	9710MHz (Minato Radar) 9730MHz (Inagi Radar)
	Type	Coaxial Magnetron	Solid-State
	Pulse Repetition Frequency	450pps	1200/1500pps （Dual Type）
Data Processing Capability	Range Resolution	250m	150m
	Lateral Resolution	1.4°	0.8°
	Update Frequency	1 minute	1 minute
Parameters		・ Horizontal Electric Wave Signal (Pr-NOR) ・ Horizontal Electric Wave Signal(Pr-MTI) ・ Horizontal Reflectivity Factor (Z-NOR) ・ Horizontal Reflectivity Factor (Z-MTI) ・ Rainfall Intensity (Rr-MTI) ・ Rainfall Intensity (Rr-NOR)	・ Horizontal Electric Wave Signal (P_H-NOR) ・ Vertical Electric Wave Signal (P_V-NOR) ・ Horizontal Electric Wave Signal (P_H-MTI) ・ Vertical Electric Wave Signal (P_V-MTI) ・ Horizontal Reflectivity Factor (Z_H) ・ Vertical Reflectivity Factor (Z_V) ・ Differential Reflectivity (Z_{DR}) ・ Differential

		Propagation ・ Phase (Φ_{DP}) ・ Co-Polar Correlation Coefficient (ρ_{HV}) ・ Specific Differential Phase (K_{DP}) ・ Radial Velocity (V) ・ Spectrum Width (W) ・ Doppler Velocity Unfolding (V_H) ・ Doppler Velocity Spectrum Width (W_H) ・ Rainfall Intensity (Rr)

Note: NOR (Normal) is a raw value from the radar. MTI (Moving Target Indicator) is a value corrected for interfering reflected wave from the moving target.

Improved observation precision brought by X-Band MP Radar

Due to the installation of X-band polarization radars, precision of estimate rainfall intensity was improved by decreasing the errors with the new radars.

(1) Effect by the shape of raindrops
As intensity of radar beam is affected by ellipticity of raindrops, error tends to occur by the uncertainty of the shape of raindrops. To identify the shape of the raindrops by measuring rainfall with both horizontal and vertical polarized waves using X-band polarization radars could be estimated more precisely.

(2) Underestimating by Rain Attenuation
Former X-band (9000MHz band) radars are susceptible to rain attenuation. Decline of radar wave by rain attenuation causes an underestimation of the rainfall intensity.

On the other hand, X-band polarization radars calculate specific differential phase (K_{DP}) with horizontal and vertical polarized wave phase and estimate rainfall intensity with specific differential phase (K_{DP}). As phase of radar wave is not affected by the rain attenuation, it can estimate rainfall intensity less susceptible to rain attenuation by calculating rainfall based on both the waves' phase.

It was also difficult to observe low rainfall (less than 1 mm/hr.) with the former radars, but to estimate rainfall more precisely with the new radars made it possible to identify low rainfall from about 0.3 to 1 mm/hr. and to indicate the very first sign of rainfall.

(3)Improvement in lateral and distance resolution and subdivision of observation area

The former radar had 1.4 degrees of lateral resolution (divided into 256), and observed rainfall intensity at the smallest unit of 250m by 250m square mesh within a circle of 20km radius, and 500m by 500m square mesh within a circle of 20km to 50km radius. With 0.8 degree of lateral resolution (divided into 450) and 150m range resolution, new radar can observe almost entire Tokyo area at the unit of 150m by 150m square mesh (See Figure 6).

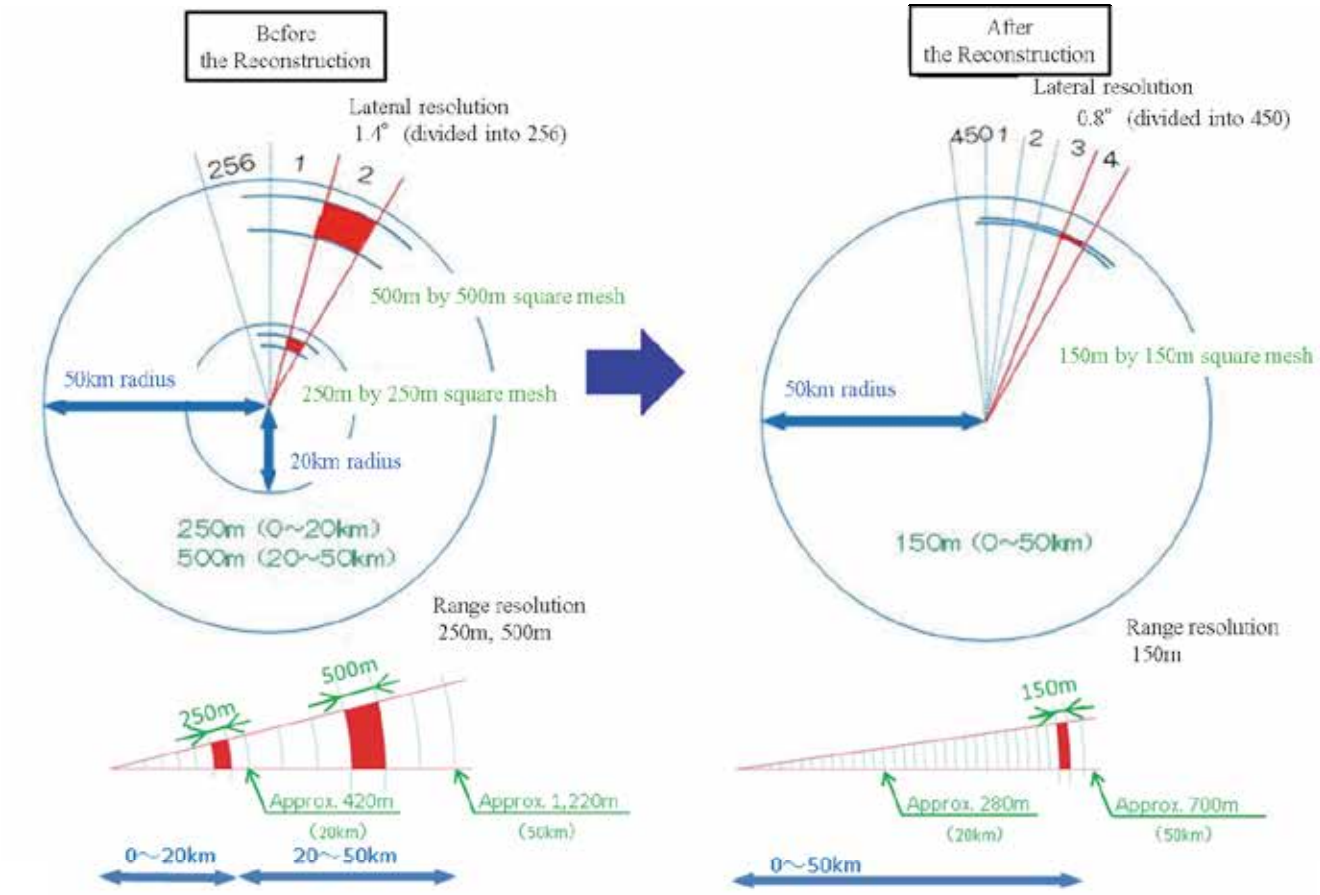


Figure 6. Conceptual diagram of observation area subdivision

Heavy Rain Alert based on High Observation Precision

Rainfall radars are for observing rainfall conditions and able to identify rainfall only after the rainfall starts. Detecting early signs of urban heavy rain is essential to be ready for a pump operation.

We programed the system to issue an alert when difference between observation values at last and current updated data (updated every minute) in arbitrarily selected area exceeds input value. Average observation value of the last updated data in multiple meshes in the selected area is compared to observation values of current updated data in the same meshes. (See Figure 7)

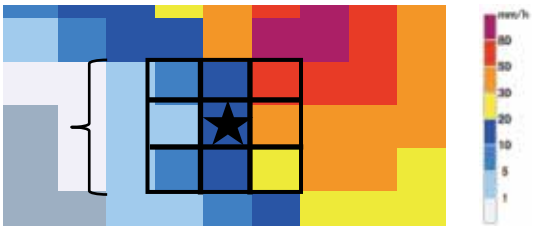


Figure 7. Conceptual diagram

Future Efforts

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government continues to address challenges for further improving observation precision.

Radar waves are reflected strongly at layers of melting rain cloud (layer of rain cloud with near zero degree Celsius temperature where ice particles start to melt), which is called the bright band. Bright band makes received signal stronger than actual rainfall. Melting rain cloud tend to descends in winter time, and when bright band is observed, there is a possibility of snow on the ground.

With X-band MP radar, combining differential propagation phase (ϕ_{DP}) and co-polar correlation coefficient (ρ_{HV}) enables distinguishing whether the strong signal is from raindrops or from bright band. It also enables to interpolate omitted reflection from the altitude of the melting rain cloud layers with weighted mean of surrounding reflection. We continue to improve observation precision of the rainfall intensity by those bright band minimizing study and efforts.

SUMMARY

We utilize Tokyo Amesh as the important means of information-gathering with the increased frequency of localized intense rainfall more than ever. Operating the standby pump which is capable of operation prior to rainwater inflow when localized intense rainfall occurs in upstream of the pumping station area even if no precipitation is observed in such area is a good example to prove usefulness of the system to prevent flood.

Based on “Tokyo Metropolitan Government’s Basic Policy for Intense Rainfall”, Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government aims to improve sewage facilities that can cope with rainfalls up to 60 millimeters per hour to prevent flood damages in 30 years from now. We also instituted “the management plan 2016” in February 2016. As one of the flood prevention measures, we will improve reliability on flood damage prevention by utilizing X-band MP radars, which was installed at reconstruction of Tokyo Amesh, in pump station. In addition, we will support citizen of Tokyo so they can protect themselves against flooding by

distributing rainfall information including even the very first sign of rainfall.

REFERENCES

Tokyo Amesh Website (http://tokyo-ame.jwa.or.jp/en/index.html)

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, *Rainfall Observation with X-band multi parameter radar* (Japanese only) (http://www.bosai.go.jp/activity_general/pdf/nied_brochure_J.pdf)

Maki et al. 2005 (Researchers of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

4-1-2　降雨情報システム(東京アメッシュ)の観測精度の向上について

施設管理部　施設管理課　藤田　悠樹
岡島　哲也

キーワード
東京都下水道局、ポンプ所、水再生センター、ポンプの運転管理、降雨情報システム、
東京アメッシュ、気象レーダー、ＸバンドＭＰレーダー、地上雨量計

要旨
東京都下水道局では、局地的な雷雨や豪雨などの気象情報を迅速に把握し、ポンプ所や水再生センターでポンプの運転管理に活用することを目的に、気象レーダーを使用した降雨情報システム（東京アメッシュ）を導入している。降雨情報システム（東京アメッシュ）は、稼働から10年以上が経過し、気象レーダーや中央処理装置等の主要機器が老朽化していたため、平成24年度から平成27年度末までに再構築を行った。
この再構築にあわせて、従来の気象レーダーより、多くの観測情報が得られる新型の気象レーダーを採用することにより、信頼性を確保した。具体的には、水平方向と垂直方向、二つの偏波での観測が可能なＸバンドＭＰレーダーを導入する等、観測精度の向上に取り組んだ。また、今後の取り組みとして、ブライトバンド対策を検討するなど、継続的な観測精度の向上に努めていく。

１．イントロダクション

下水道は、日常生活や都市活動で発生する汚れた水をきれいにして川や海に戻し、安全で快適な生活環境の確保を担っているほか、道路や宅地に降り下水道管渠に流れ込んだ雨水を雨水ポンプにより速やかに排除するなど、浸水防除の役割を担っている。特に東京都区部の下水道は、その大部分が合流式下水道を採用しており、都市化により地面の舗装化が進んだことで、雨水は地面に浸透せず、そのほとんどが下水道管渠を通り、ポンプ所や水再生センターに急激に流れ込む。
そこで、時間と共に激しく変化する雨に対して、適切なポンプ運転を行うためには、リアルタイムの正確な降雨情報の把握が必要不可欠である。
さらに、都内のポンプ所の多くは、離れたポンプ所や水再生センターの監視室から遠方監視制御されている。遠方監視制御システムは、少ない運転員でポンプ運転が可能となる一方、運転員は遠方監視しているポンプ所の降雨情報を把握しなければならない。
そのため、当局では、気象レーダーを使用した降雨情報システム“東京アメッシュ”を用いて、局地的な雷雨や豪雨などの気象情報をきめ細かくリアルタイムに把握し、雨水ポンプ等の運転による雨水排水の信頼性及び安全性の向上を図っている。
また、浸水被害の軽減のためには、都民自ら浸水に備える取組みも重要であるため、「東京アメッシュ」と命名し、平成14年度から、降雨状況をリアルタイムでインターネットに配信している。
しかし、東京アメッシュは、稼働から10年以上が経過し、気象レーダーや中央処理装置等の主要機器が老朽化していたため、平成24年度から平成27年度末までにレーダー基地局及び中央処理局の再構築を行った。この再構築にあわせて、水平方向と垂直方向、二つの偏波での観測が可能なＸバンドＭＰレーダーを導入し、東京アメッシュの信頼性を確保するとともに観測精度を向上させる、再構築工事を行った。
また、近年狭い地域に短時間で多量の降雨をもたらす、局地的な雷雨や豪雨などの発生頻度が増

加しており、浸水のリスクも高まっているため、当局は、新型レーダーを使ってこれまで分からなかった降り始めの僅かな雨も表示することにより、急な雨の予兆も察知できる取組みを進めている。

この論文では、東京都下水道局の浸水対策として、東京アメッシュの再構築の取組みを紹介する。

2. 東京アメッシュの仕組み

東京アメッシュは、東京都内2箇所の気象レーダーと地上雨量計で構成されている。

レーダーは、電波がまっすぐ進む特性と雨粒に当たると跳ね返ってくる特性を利用して、雨粒の大きさなどを観測している。この原理を利用して、レーダー雨量計システムを構築している。レーダー雨量計システムは、その反射波の中から、ビルや山岳などにぶつかった不要な部分を除去し、降雨からの反射波だけを抽出する能力を持たせたもので、探知した降雨の強さや分布状態を計算機で算出し、これを運転管理に適したデータに加工して表示している（図1参照）。

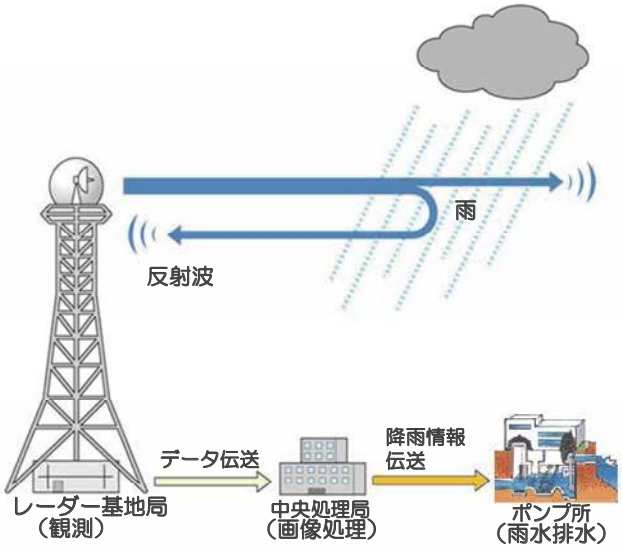


図１ システム概要

このシステムでは、雨粒で反射された電波をレーダーがとらえ、反射波の強度から雨の強さを推定しているため、地上雨量計の実測値により補正し、誤差を最小限に抑えている。

また、レーダーの観測範囲は半径50ｋｍであり、二つのレーダーで東京都全域をカバーすることができる。

平成19年より、気象庁や近隣自治体と降雨情報を互いに共有することで、観測精度の向上と観測範囲の広域化を行っている。レーダーによる降雨の観測では、電波が雨域を通るときに減衰するため、レーダーの近くに強い降雨があると、反射波が減衰し、遠くの降雨の観測精度が低下する。近隣自治体と協力し、各データを補完することで、降雨減衰による影響を最小限に抑えている。

東京アメッシュは、中央処理局にある降雨情報中央処理装置を中心に、東京の２箇所のレーダー基地局（港レーダー，稲城レーダー）と、近隣自治体2つのレーダー、約130台の地上雨量計（下水道局、建設局、近隣自治体）、119台の降雨情報端末から構成されている（図2参照）。

図２　システム構成

気象レーダーと地上雨量計で観測されたデータを、降雨情報中央処理装置で処理し、下水道管内に敷設した当局独自の光ファイバー通信網で各端末に送信している。各降雨情報端末では、降雨情報を運転管理に適した画面で見ることができる（図3参照）。

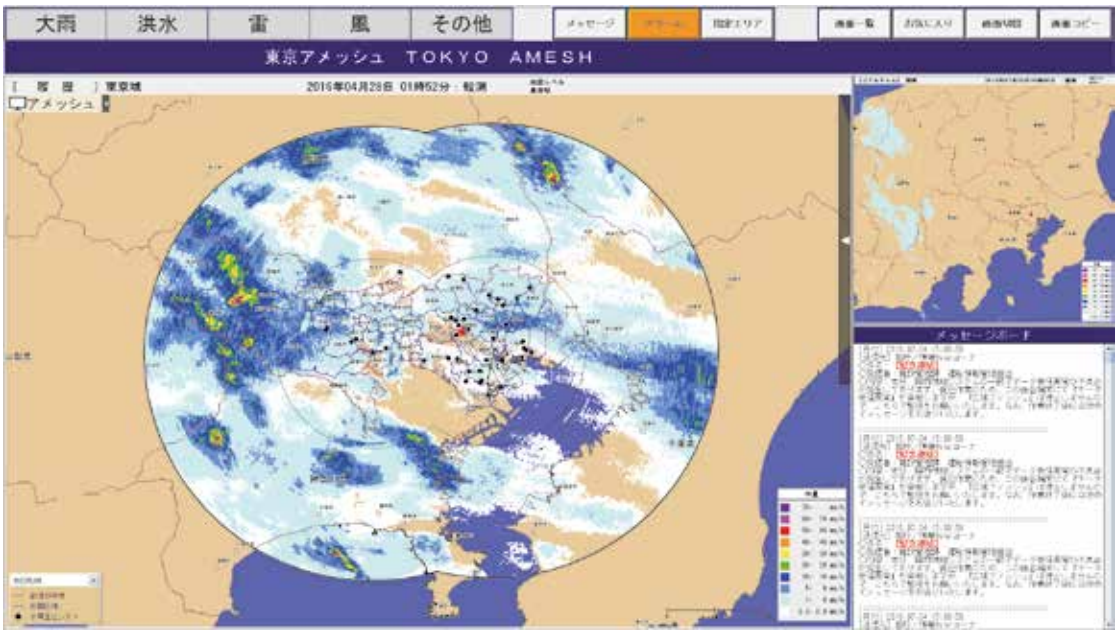


図３　端末画面表示例

また、当局では東京アメッシュをインターネットに配信し、パソコンやスマートフォンからアクセスできるようになっている。都民には人気のコンテンツとなっており、平成27年度には約6,000万件ものアクセスがあった。

（ http://tokyo-ame.jwa.or.jp/en/index.html　英語版東京アメッシュ　図4参照）

図４　英語版東京アメッシュ画面表示例

3.　レーダーの再構築

従来のレーダーは、稼働から 10 年が経過し、機械的な突発故障によるシステム停止などのトラブルが発生するようになっていた。東京都下水道局の事業計画である経営計画 2013 において、浸水対策の取組みの一つとして、老朽化したレーダーを更新することを事業計画として定めた。経営計画では、局地的な大雨などに対するポンプ運転の安全性を高めるため、新型の X バンドＭＰ（マルチパラメータ）レーダーを導入し、観測精度の向上を図ることとした。次に新型レーダーの特徴と利点を紹介する。

3.1　ＸバンドＭＰレーダーの原理

従来のレーダーは、水平偏波のみから降雨強度を算出する手法で観測を行っていた。対して、新たに導入したＸバンドＭＰレーダーは、水平と垂直の 2 つの偏波を用いて雨量を観測することにより、雨粒の形状や大きさの推定が可能となり、より精密なレーダー雨量の観測ができる（図 5 参照）。

表-1 にＸバンドＭＰレーダーで利用可能な主な情報を示す。

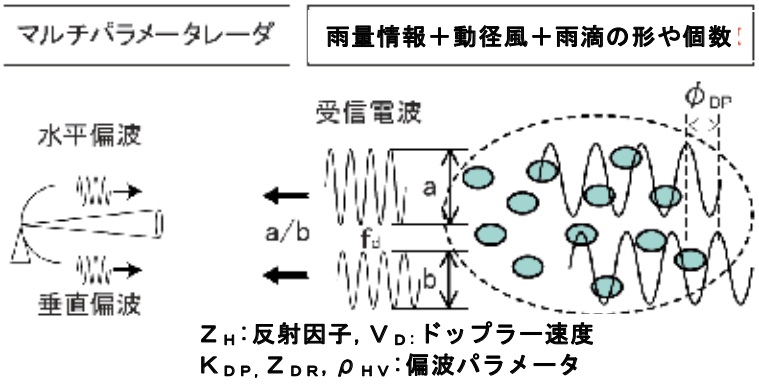


図 5　観測原理

表 1　XバンドMPレーダーで利用可能な主な情報

名称	記号	概要
水平偏波反射因子	Z_H	水平偏波から降雨強度を推定する。
直交偏波比	Z_{DR}	水平偏波反射因子(Z_H)と垂直偏波反射因子(Z_V)の比率によって、雨滴が球状なのか扁平状なのかを判別可能。
偏波間位相差	ϕ_{DP}	水平偏波と垂直偏波の位相差から、降水粒子の扁平度合いを判別可能。
偏波間相関係数	ρ_{HV}	水平偏波と垂直偏波の受信波の相互相関関数から算出される。直交偏波比(Z_{DR})との組合せで、雨滴の性状(雨、雪、雹)の判別が可能。
比偏波間位相差	K_{DP}	単位距離当たりの偏波間位相差(ϕ_{DP})から算定される。比偏波間位相差(K_{DP})から算出される降雨強度推定は、降雨減衰の影響を受け難い特徴がある。
ドップラー速度	V_D	雨滴の動径方向の移動速度から風向・風速観測が可能。
速度幅	W	ドップラー速度の観測品質を示す指標
折り返し補正速度	V_H	ドップラー速度(V_D)を折り返し補正したもの
折り返し補正速度幅	W_H	折り返し補正された速度幅

3.2　半導体レーダーの採用

従来のレーダーでは、送信機にマグネトロンを使用していた。マグネトロンは、高出力を得ることが容易であり、実績も多いが、寿命が 1 年程度と短いことや、突発故障による停止が多く、維持管理費用が高くなることが問題だった。

そこで、新しいレーダーには、半導体素子による送信機を採用することとした。半導体素子は寿命が長く、維持管理費用の削減が期待でき、安定した降雨観測を続けることが可能になる。また、半導体素子による送信機は、1 台で高い出力が得られないため 8 台を合成すると共に、パルス圧縮技術を採用して、従来と同等以上の観測精度を得ることを可能とした。表 2 にマグネトロン式と半導体式の送信機の比較を示す。

表 2　マグネトロン式と半導体式の送信機比較

項目	マグネトロン式	半導体式
形式	同軸形マグネトロン	半導体（ＧａＮ）素子
交換時期	約 1 年	定期的交換なし
送信出力	70ｋW	1.2ｋW (200W素子を 8 合成)
パルス幅	2μｓ	0～7.5ｋｍ 1μｓ 7.5～80ｋｍ 48μｓ
パルス圧縮	無し	適用
最小受信電力	－109ｄＢｍ	－110ｄＢｍ

3.3 新レーダー仕様諸元

表 3 に従来と更新後の気象レーダー仕様諸元を示す。

表 3　新旧気象レーダー仕様諸元比較

項目		従来	更新後
観測距離		0～80km (0～50km：定量観測) (50～80km：定性観測)	0～80km (0～50km：定量観測) (50～80km：定性観測)
空中線装置	アンテナ径	Φ3m　円形パラボラ	Φ3m　円形パラボラ
	偏波面	水平偏波	水平偏波、垂直偏波
	ビーム幅	1.4° 以下	0.8° 以下
	空中線利得	43dB 以上	43dB 以上
	回転数	3rpm	3rpm
送受信装置	送信尖頭出力	70kW	1.2kW
	送信周波数	港レーダー　9,710MHz 稲城レーダー　9,730MHz	港レーダー　9,710MHz 稲城レーダー　9,730MHz
	送信方式	同軸形マグネトロン	半導体
	パルス繰返し周波数	450pps	1,200/1,500pps （二重方式）
データ処理	距離分解能	250m	150m
	方位分解能	1.4°	0.8°
	更新周期	1 分	1 分
データ		・受信電力水平(Pr－NOR) ・受信電力水平(Pr－MTI) ・水平偏波反射因子(Z-NOR) ・水平偏波反射因子(Z-MTI) ・降雨強度(Rr-MTI) ・降雨強度(Rr-NOR)	・受信電力水平(P_H-NOR) ・受信電力垂直(P_V-NOR) ・受信電力水平(P_H-MTI) ・受信電力垂直(P_V-MTI) ・水平偏波反射因子(Z_H) ・垂直偏波反射因子(Z_V) ・直交偏波比　(Z_{DR}) ・偏波間位相差(Φ_{DP}) ・偏波間相関係数（ρ_{HV}） ・比偏波間位相差(K_{DP}) ・ドップラー速度（V） ・速度幅（W） ・折り返し補正速度（V_H） ・折り返し補正速度幅（W_H） ・降雨強度（Rr）

注：NOR は通常(normal)の意味で、レーダー受信データのそのままの値を示し、MTI は moving target indicator の略で、移動目標からの反射波に含まれる不要な反射波成分を除去した値を示す。

3.4　Ｘバンドｍｐレーダー導入による観測精度の向上

Ｘバンドｍｐレーダーの導入により、誤差要因を抑えて観測精度を向上させた。

3.4.1　雨粒の形状による誤差

レーダー電波の強度は雨粒の形状に影響を受けるため、雨粒の形状を正確に把握しないと雨量の推定には誤差が生じる。Ｘバンドｍｐレーダーを使って、水平方向と垂直方向の電波で雨粒の形状を特定することで、より高い精度での雨量推定が可能となる。

3.4.2　降雨減衰による誤差

Ｘバンド帯(9,000ＭＨｚ帯)を使った従来のレーダーは、降雨減衰の影響を受けやすいため、降雨減衰により電波強度が減衰すると、算定される雨量は実際よりも小さくなってしまう。

一方で、ＸバンドＭＰレーダーでは水平偏波と垂直偏波の位相情報から比偏波間位相差(K_{DP})を算出し、この比偏波間位相差(K_{DP})から降雨強度を推定する。電波の位相は降雨減衰の影響を受けないため、2 つの偏波の位相情報をもとに雨量を算定することで、降雨減衰による観測精度の影響を抑えることができる。

さらに、従来のレーダーでは、1ｍｍ／ｈ以下の降雨の観測が困難だったが、ＸバンドＭＰレーダーを使ってより高い精度で観測を行うことで、0.3～1ｍｍ／ｈ程度の弱い降雨についても検出が可能となり、降り始めの僅かな雨も表示できる。

3.4.3　方位・距離分解能の向上による観測区画の細分化

従来のレーダーでは、方位分解能が 1.4 度であり、レーダー中心から半径 20ｋｍの地点までが250m区画、20ｋｍから 50ｋｍまでは 500m区画で観測していた。新しいレーダーでは、方位分解能を 0.8 度（450 分割)、距離分解能を 150m間隔にすることで、東京都ほぼ全域を 150m区画で観測できるようになった。(図 6 参照)

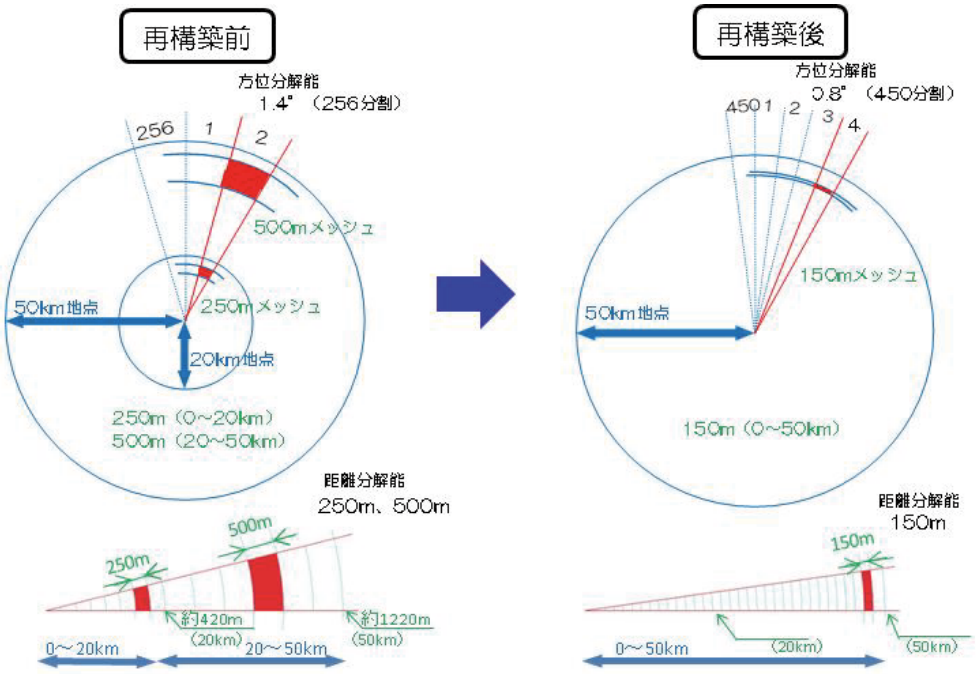


図 6　観測の細分化イメージ図

3.5　高い観測精度に基づいた豪雨アラート

レーダーは降雨状況を観測するものであり、降雨が開始してから観測が可能となる。しかし、雨水ポンプの運転準備のためには、都市型豪雨が発生する兆候を早期に捉えることが必要不可欠である。

今回、任意に設定するエリア内において、前回観測値（1 分前）と今回観測値とを比較し、降雨強度の差分が指定値以上となった観測区画があった場合、アラートを発するようにした。比較する観測区画は、指定エリア内の複数の区画における前回観測値の平均値と、指定エリア内の複数の区画の今回観測値としている。(図 7 参照)

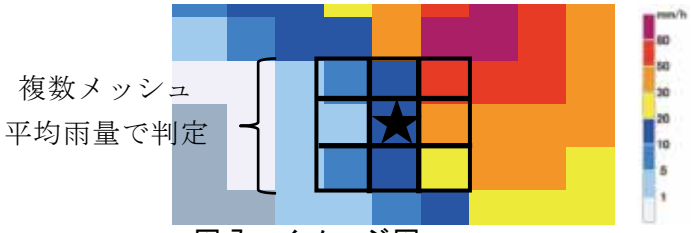


図７　イメージ図

4.　今後の取組み

東京都下水道局では、継続的に雨量観測精度を向上させる取組みを進めていく。

ブライトバンドとは、レーダーのアンテナから発射された電波が雨雲の融解層(雨雲の中で気温が0℃に近く氷の粒が溶け始める層)によって反射されることで、実際の降雨量よりも強い反射波が観測される現象である。融解層は冬季に下降することが多く、ブライトバンドが観測されると、地上に雪が降っている可能性がある。

ＸバンドＭＰレーダーにより偏波間位相差（ϕ_{DP}）と偏波間相関係数（ρ_{HV}）とを組み合わせることで、強い反射波を受信した場合、それが降雨によるものか、ブライトバンドによるものかを判別することや、融解層の高度を求めこの付近のレーダーの反射波を取り除き、周囲の反射波を重み付き内挿して反射波を推定する等、ブライトバンド低減対策を検討、実施することで、雨量観測精度の向上への取り組みを進めていく。

5.　まとめ

近年、局所的な集中豪雨が増えていることから、さらに東京アメッシュを重要な情報収集手段として活用している。例えば、ポンプ所周辺に降雨がなくても、その上流部で局所的な集中豪雨があった場合は、雨水が流入する前から運転が可能な先行待機型ポンプの運転を行うなど、浸水の防除に大いに役立っている。

当局では、「東京都豪雨対策基本方針」に基づき、概ね 30 年後の浸水被害の防止を目標に、1 時間 60 ミリ降雨に対応する下水道施設を整備することとしている。平成 28 年 2 月に東京都下水道事業「経営計画 2016」を策定し、浸水対策におけるソフト対策の一つとして、東京アメッシュの再構築にあわせ導入したＸバンドＭＰレーダーをポンプ運転等に活用し、浸水被害防止に対する信頼性が向上するとともに、降り始めの僅かな雨も降雨情報として配信することで、都民の浸水への備えを支援していく。

6.　出典

1）東京アメッシュ　インターネットサイト
2）NIED,2005　防災科学技術研究所パンフレット
3）Maki et al. 2005　（　防災科学技術研究所の研究者　）

4-2-1 The basic energy plan for sewerage works of Tokyo “Smart plan 2014”

Kinji Yamada*, Toshikazu Koike*, Hajime Takahashi*

* Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government, 2-8-1 Nishi-Shinjuku Shinjuku-ku, Tokyo 163-8001 Japan
E-mail: Kinji_Yamada@member.metro.tokyo.jp

Abstract: Sewerage works of Tokyo consumes 9.8 hundred million kWh annually, which is approx.1.1% of total power consumption in Tokyo, 86.0 billion kWh. Moreover, energy consumption is predicted to increase as sewerage system service improves. In addition to expand the use of renewable energy, it is necessary to promote energy saving of each process and of entire system. The Bureau of sewerage, Tokyo Metropolitan Government should contribute to the reduction of the total energy consumption as well as reduction of GHGs emissions. Therefore, the Bureau made the basic plan for sewerage works of Tokyo “Smart plan 2014”, which is the first master plan to enhance energy efficiency and promote energy management. The Bureau aims to expand the amount of renewable energy and energy saving to more than 20% of total energy consumption within 10 years. For example, renewable energies such as much as solar power and power generation with the heat of the incinerators are further utilized and obtain as possible energy. Sludge thickeners and dehydrators of energy-saving type are installed and further energy saving equipment is devised. Also the Bureau will introduce the self-sustaining incinerator to save the energy of sludge treatment.

Keywords: energy measures plan; renewable energy; energy saving; self-sustaining incinerator

Introduction

Tokyo sewerage system is an important urban infrastructure which supports the lives of 13 million living people and urban activities. The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (the Bureau) manages sewers with the total length of approx. 16,000 kilo-meters in 23 wards area and Tama area as well as an enormous number of facilities including 20 wastewater treatment plants (WWTPs) and 86 pumping stations. It contributes to the improvement of living environment, prevention of floods, and water quality conservation of public water bodies. In order to provide those high-quality sewerage services, the Bureau uses a huge amount of energy. It is about 9.8 hundred million kWh electricity, which is more than 1% of the annual electricity consumption of Tokyo (Approx. 86.0 billion kWh), and about 20 million m^3 fuels in city gas equivalent. They are respectively equivalent to the electricity consumption of about 270,000 general households and the city gas consumption of about 52,000 households.

The Bureau is one of the biggest energy consumer and has a great responsibility in reducing energy consumption. In reconstructing facilities and equipment, we have actively worked on the utilization of renewable energy and energy conservation efforts to enhance energy efficiency.

Due to the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011, power plants suffered damage from the tsunami-disaster and we were forced to respond to planned blackouts and restriction on electricity use during the summer. In addition, the confusion of distribution network and the stagnation of fuel supply posed an obstacle to securement of electricity in an emergency. Moreover, the shutdown of nuclear power plants caused a major increase in electricity charges and affected the sewerage

management. Facing on these difficulties, we are pressed to make a major shift in its energy policy.

On the other hand, it will be necessary to actively advance the efforts including enhancement of flood control, improvement of combined sewer system (CSO) and introduction of advanced wastewater treatment. Therefore, the energy consumption is expected to increase with the implementation of those projects.

Furthermore, in the Tokyo Olympic and Paralympic Games 2020, the Bureau needs to actively advance preventive measures against road subsidence due to aged sewers, further improvement of water quality in public water bodies, and response to heavy rain during summer time, etc.

In light of these circumstances, the Bureau has to actively advance the utilization of renewable energy, the energy-saving efforts in individual facilities and equipment, the comprehensive operational management in the whole plant from water treatment to sludge treatment and the energy management from broad-based perspective to reduce energy consumption. Additionally, we also need to work on an enhancement of crisis management for sewerage functions to cope with emergencies.

In order to ensure the implementation of these efforts and stable supply of sewerage services, the Bureau decided to plan, a basic energy plan, “Smart plan 2014”.

Energy Use of Sewerage works

(1) Current Situation of Energy Use

The sewerage works uses the energy in the 3 facilities mainly shown Figure 1.

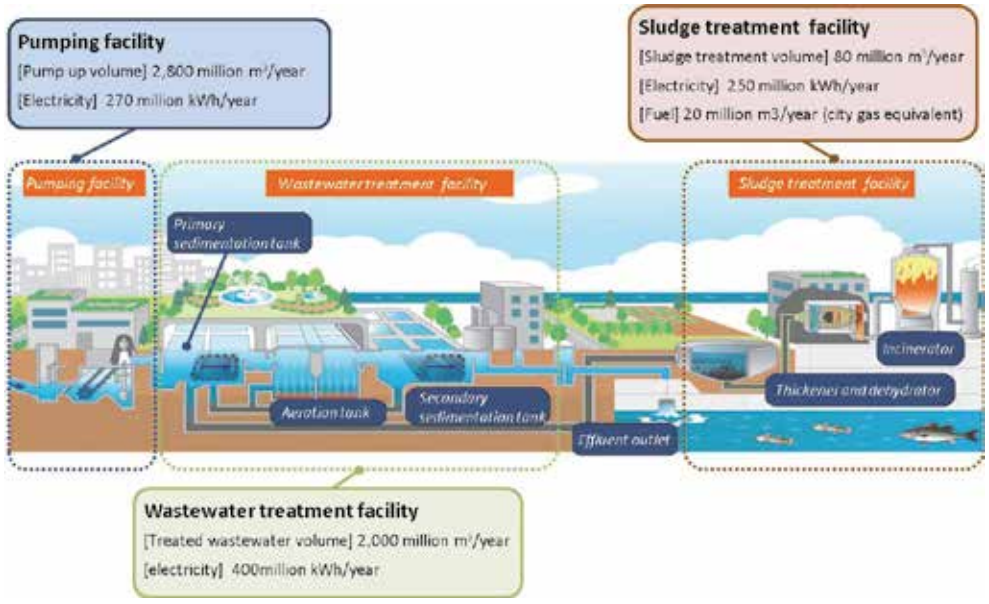


Figure 1 Energy use of Tokyo sewerage works in FY2013

(2) Electricity and Fuel Use

The sewerage works uses a great volume of fuel (city gas, etc.) as well as electricity. The annual energy consumption with electricity and fuel combined is 4,620 TJ (Tera-joule) as shown in the figure 2. We have to reduce the whole energy, both electricity and fuel.

(3) Increase in Energy Consumption

Promoting flood measures and improvement of CSO increases the amount of rainwater pumped in heavy rain and the amount of wastewater to be treated, especially dirty wastewater at the early period of rainfall, which increases the energy consumption. Furthermore, the expansion in the introduction of advanced wastewater treatment, which improves the effluent quality, also needs additional facilities and increases the energy consumption. In order to respond to the energy consumption increased by these efforts to improve sewerage services, we need to continue the energy reduction measures and introduce new measures.

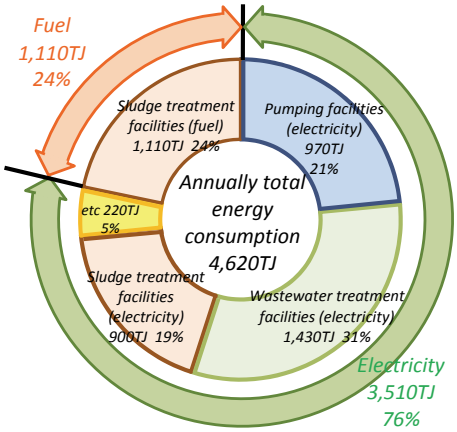


Figure 2 Ratio of energy consumption in FY2013

Strategy of Smart Plan 2014

Based on the current situation and issues of energy use for the sewerage works, the following four effort policies are to advance the energy use and optimize the energy management.

(1) Expansion of renewable energy utilization

Figure 3 Solar panels on the reaction tank

The Bureau will make further use of renewable energy, such as solar power generation (Figure 3) and new power generation with the heat of the incinerators, to secure energy by ourselves as much as possible in the sewerage works.

(2) Further promotion of energy saving

By development/introduction of new advanced wastewater treatment technologies and Self-sustaining incineration system, etc., the Bureau will promote energy conservation further to reduce energy consumption.

(3) Optimization of energy through the treatment process of the whole facility

The Bureau will introduce energy smart management to optimize energy use through the treatment process from wastewater treatment to sludge treatment in the whole facilities and to improve the efficiency of operational management between several facilities from a broader perspective.

(4) Improvement of energy crisis management

By expanding emergency power-generation facility, introducing dispersed power system and passing fuels between facilities to operate the emergency power-generation facility, the Bureau will enhance energy crisis management to maintain sewerage functions at any time.

Goal of Smart plan 2014

In order to ensure the implementation of efforts set forth in Smart plan 2014, the Bureau will work on to accomplish the goal, planning period and the idea of energy reduction.

(1) Target Value

The Bureau aims to expand the amount of renewable energy and energy saving to more than 20% of total energy consumption by FY2024 (Figure 4).

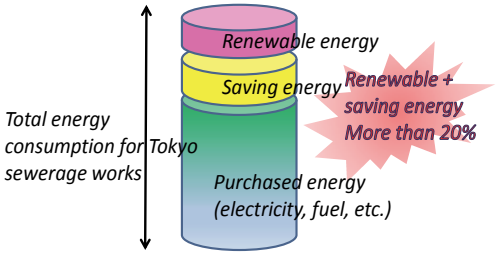


Figure 4 Smart plan 2014 in FY2024

(2) Planned Period

From FY2014 to FY2024

(3) Actions of Energy Reduction

The energy used in the sewerage works is expected to be increased by the promotion of projects such as flood measures and improvement of CSO. Therefore, it is important in sewerage management to work on the expansion of renewable energy use, further promotion of energy saving and to reduce the volume of purchasing energy.

In this plan, the total energy consumption should be the volume of purchasing energy plus the volume of renewable energy and saving energy. The idea of energy reduction is to increase the ratio of renewable energy and saving energy to the total energy consumption.

Total energy consumption in the future and efforts on renewable energy, etc.

The total energy consumption in FY2013 was 4,620TJ and, among the volume, the renewable energy volume was 230TJ (the ratio is 5% to the total energy consumption). In the future as well, the Bureau will work on the improvement in sewerage services, including the enhancement in the level of flood measures and the improvement of CSO. The volume of purchase energy is expected to increase to 4,930TJ in FY2024.

Therefore, we will work on the expansion of renewable energy use and the further promotion of saving energy and, as in the table, based on the reference year FY2013, we will reduce the purchase energy in FY2024 to 4,060TJ (3,620+440), aiming to make the ratio of renewable energy, etc. to the total energy consumption to be more than 20% (Figure 5).

Main Efforts in the Future: Renewable Energy, etc.

In addition to the expansion of renewable energy efforts including solar power generation and the utilization of thermal energy of sewerage, which have been implemented so far, the Bureau will further utilize usable energy with new power generation using the low temperature waste heat at the time of incinerating unused sludge, etc. By these new measures, the volume of renewable energy will be expanded in FY2024 to 350TJ. And then, the volume of saving energy will be expanded in FY2024 to 750TJ by introducing the new advanced wastewater treatment technology and the development/introduction of self-sustaining incinerator, etc (Table 1).

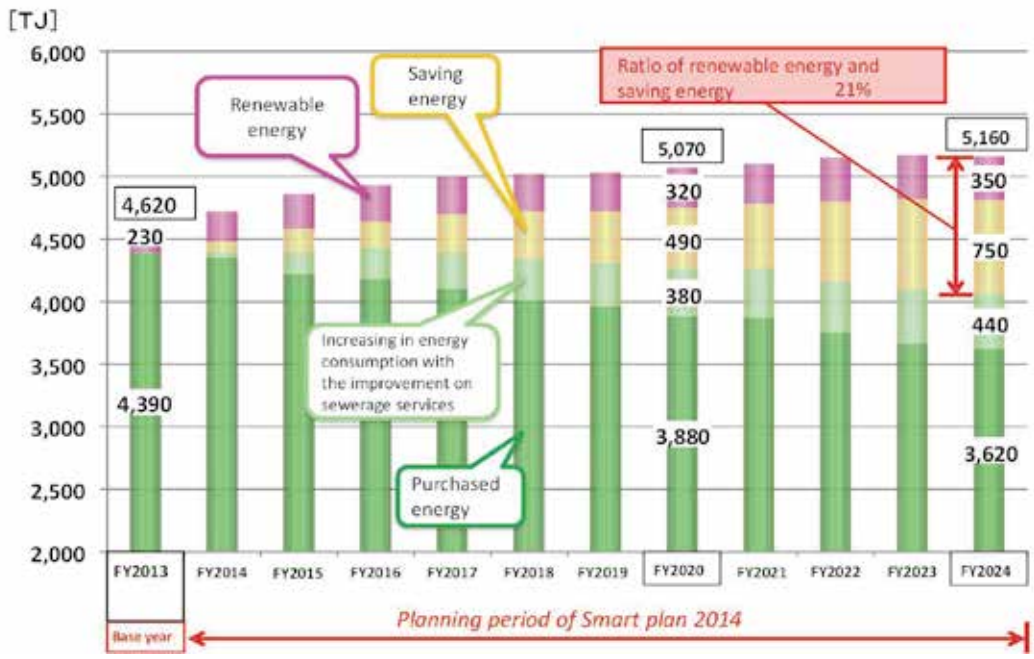


Figure 5 Change the energy consumption of Tokyo sewerage works in the future

Table 1 Main measures for renewable energy (left) and energy saving (right)

measures	renewable energy (TJ)	
	expand	continuation
Solar power generator	21	3
Power generation from low temperature heat of incinerator	9	-
Self-sustaining incinerator	41	
Wastewater heat	2	33
Solar heat	3	-
Sludge drying by waste heat of incinerator	43	-
Micro hydraulic power generator	1	2
Sludge carbonization furnace	-	60
Power generation by digest gas	-	82
Waste heat recovery steam generator	-	50
amount	120	230
	350	

measures	saving energy (TJ)
New advanced wastewater treatment system	11
Power generation from low temperature heat of incinerator	110
Energy saving type incinerator	314
Semi-advanced wastewater treatment system	178
Diffuser replacement	31
Optimization of aeration system	69
Energy saving type thickener and dehydrator	37
amount	750

Representative Examples of Our Efforts

Specific examples of efforts in this plan are shown in the following.

(1) Development/introduction of self-sustaining incineration system (Figure 6)

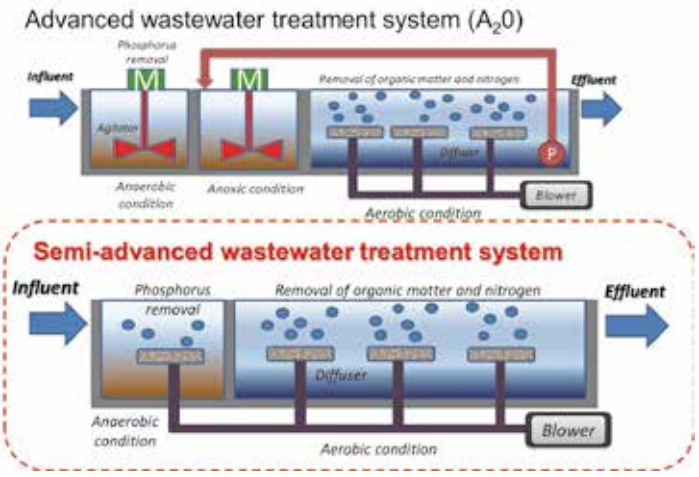
The Bureau developed the energy self-sustaining incineration system which generates electricity from emitted heat and dewatered sludge. In addition, we developed new dehydrator which enables to produce super low water content sludge. By the system which is a combination of these, fuel and electricity are unnecessary. Moreover, GHGs emissions from sludge incineration can be reduced in approx. 50%. This system will be introduced in 2019 at Shingashi-WWTP.

Figure 6 Image of self-sustaining incineration system

(2) Introduction of semi-advanced wastewater treatment system (Figure 7)

Effluent quality (T-N and T-P) by semi-advanced wastewater treatment system is slightly poorer than the advanced (A_2O-method). But, this system can be implemented in short time by modifying the existing structures. It has been introduced in accordance with the reconstructing.

Energy consumption of semi-advanced system is also equivalent to the normal activated sludge process.



Wastewater treatment process	Effluent quality	Electricity consumption	Treatment capacity
Normal	*T-N:100 T-P:100*	*100*	*100*
Semi-advanced	*T-N:85 T-P:50*	*100*	*100*
Advanced (A_2O)	*T-N:65 T-P:40*	*130*	*63*

※The data are expressed as relative values, with normal treatment process being 100 %.

Figure 7 Image of semi-advanced wastewater treatment system

(3) Energy management by the whole facility in WWTPs

The Bureau uses effectively the energy of sludge from wastewater treatment to reduce the volume of fuel by sludge treatment facility. In addition, we promote improvement of operation method and technical development to reduce the energy of the whole facilities even if the energy of the wastewater treatment is increased.

(4) Introduction of dual fuel type power generator (Figure 8)

In preparation for the traffic disruption caused by the earthquake, the Bureau introduced a power generator with a combination of kerosene and city gas. It was introduced in 2016 at Nakagawa-WWTP, and in the future it will plan to expand the introduction.

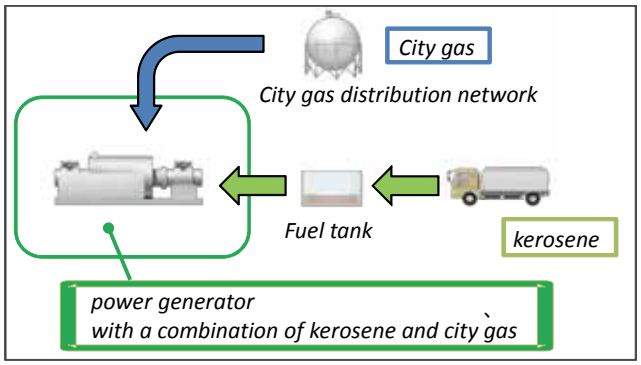


Figure 8 Image of dual fuel type power generator

Conclusion

By advancing various efforts set forth in this plan, the ratio became over 9% as of the end of FY2015, and seems able to achieve the target value 20% by 2024. On the other hand, it is required to reduce GHGs emissions. The Bureau has already planned a global warming prevention plan in the sewerage works ”Earth plan 2010” in 2010, aiming to reduce the volume of GHGs emissions to more than 25% from FY2000 by FY2020. As Measures of Smart plan 2014 also lead to reduce GHGs emissions, we will enhance our efforts to achieve both plans.

In having Tokyo Olympic and Paralympic games 2020, the Bureau should contribute to advanced urban environment. Furthermore, we will not only promote energy management but also drive further development to accomplish Smart plan 2014.

Reference

S. Taketani (2015). *Basic Energy Plan “Smart Plan 2014” for sewerage system, EWA/JSWA/WEF Water and Energy 2015 conference*

4-2-1　東京の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」

計画調整部　エネルギー・温暖化対策推進担当課長　山田　欣司
（現　施設管理部　排水指導担当課長）

1. はじめに

東京の下水道は首都東京 1,300 万人の都民生活や都市活動を支える重要な都市インフラである。東京都下水道局（以下「当局」という。）は、区部と多摩地域をあわせて約 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管理している。これらの施設を 24 時間 365 日休むことなく稼働させることにより、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。

こうした質の高い下水道サービスを提供するため、当局は、下水道施設の運転を継続的に行うことで大量のエネルギーを使用している。この内訳は、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 の電力や、都市ガス換算で約 0.2 億 m^3 の燃料であり、それぞれ一般家庭約 27 万世帯の電力使用量、約 52,000 世帯の都市ガス使用量に相当する。

このように、当局は都内最大級のエネルギー消費者であり、エネルギー使用量削減に大きな責務を負っている。これまでも施設や設備の再構築にあたっては、再生可能エネルギーの活用や省エネルギーの取組を積極的に行い、エネルギーの効率化を図ってきている。

一方で、平成 23 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、計画停電、夏季の電気使用制限への対応を余儀なくされた。また、流通網が混乱し、燃料の供給が停滞したことにより、非常時の電力確保に支障をきたした。さらに、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た。こうした困難な状況に直面し、当局は、エネルギー対策の大きな転換を迫られている。

今後も、浸水対策の充実強化や合流式下水道の改善、高度処理の導入拡大などの取組を積極的に進めていく必要があることから、これらの事業実施に伴いエネルギー使用量の増加が見込まれる。

さらに、4 年後の東京オリンピック・パラリンピックの開催に向けて、老朽化した下水道管に起因する道路陥没の未然防止、水辺環境の更なる向上、夏季の豪雨への対応などを積極的に進めていく必要がある。

こうした状況を踏まえ、再生可能エネルギーの活用や、個々の施設や設備での省エネルギーの取組、水処理から汚泥処理までの施設全体での総合的な運転管理や広域的視点からのエネルギー管理を積極的に進め、エネルギー使用量を削減していかなければならない。加えて、いざという時に備えて、下水道機能の危機管理対応の強化にも取り組んでいく必要がある。

これらの取組を確実に実施し、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、下水道事業初のエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を策定することとした。

2. 下水道事業を取巻くエネルギー使用の現状と課題

2.1 エネルギー使用の現状

下水道事業では、大量のエネルギーを以下の**図 1** に示す 3 つの施設で使用している。

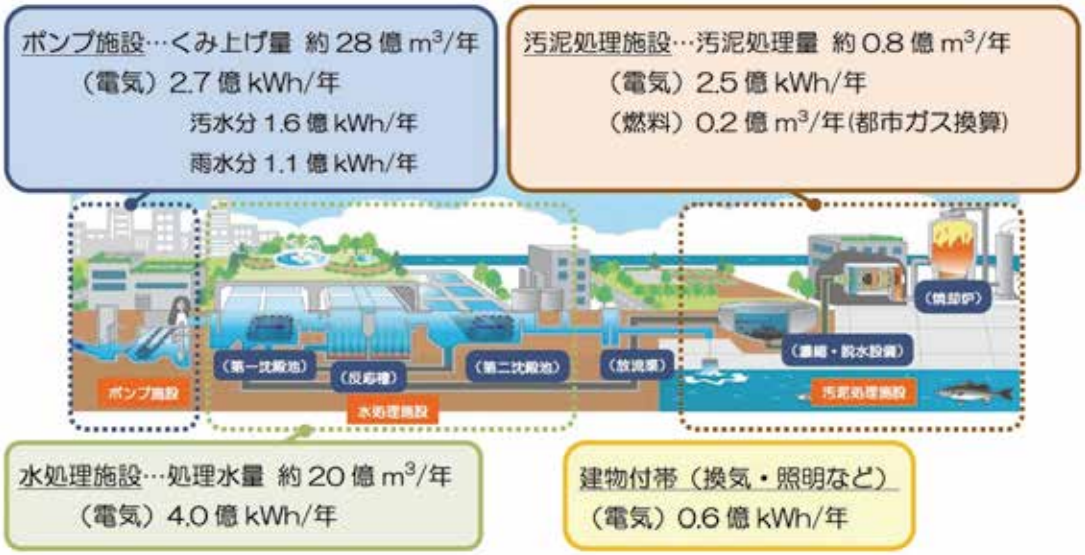


図 1　当局の下水道事業におけるエネルギー使用量（平成 25 年度）

2.2　電気と燃料の使用状況

下水道事業では電気だけでなく、燃料（都市ガスなど）も大量に使用している。電気と燃料をあわせた 1 年間のエネルギー使用量は、**図 2** に示すように 4,620TJ（テラジュール）であり、その内訳は、電気 76%、燃料 24%となっている。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なければならない。

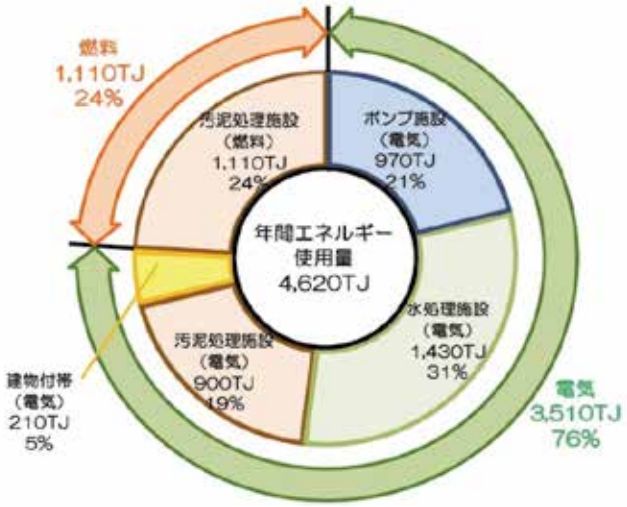


図 2　当局のエネルギー使用量の内訳
（平成 25 年度）

2.3　下水道サービス向上に伴うエネルギー使用量の増加

浸水対策や合流式下水道の改善などの取組を推進することにより、雨天時にポンプでくみ上げる雨水量や降雨初期の特に汚れた下水の処理水量が増え、エネルギー使用量が増加する。さらに下水処理水の水質を改善する高度処理の導入を拡大することでも設備の増設が必要となり、エネルギー使用量が増加する。

こうした下水道サービス向上の取組によって増加するエネルギー使用量に対応するため、エネルギー使用量削減対策の継続及び新たな対策が必要である。

3.　計画上の 4 つの取り組み方針

下水道事業を取巻くエネルギー使用の現状と課題を踏まえ、下水道事業におけるエネルギー活用の高度化及びエネルギー管理の最適化を図るための 4 つの取組方針を、以下に示す。

3.1　再生可能エネルギーの活用拡大

太陽光発電（**図 3**）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。

図 3　反応槽の蓋に設置した太陽光パネル

3.2　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。

3.3　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。

3.4　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。

4.　スマートプラン 2014 の目標

スマートプラン 2014 に掲げた取組を確実に実施していくために、目標、計画期間、エネルギー削減の考え方を明確にして取り組んでいく。

4.1　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平成 36 年度までに 20%以上とすることを目指す（**図 4**）。

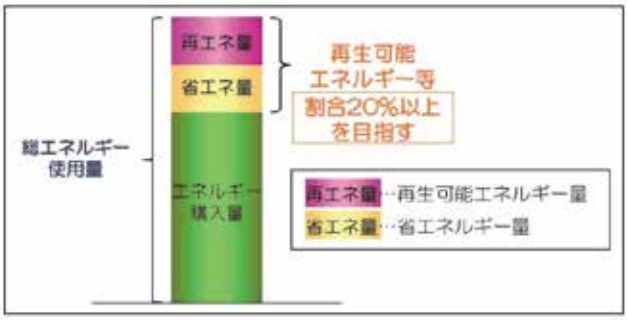


図 4　スマートプラン 2014 の目標（平成 36 年度）

4.2　計画期間

平成 26 年度から 36 年度まで

4.3　エネルギー削減の考え方

下水道事業で使用するエネルギーは、浸水対策、合流式下水道の改善などの事業を推進することにより増加が見込まれる。そのため、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、エネルギー購入量を削減することが、下水道経営においては重要となる。本プランでは、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量を総エネルギー使用量とする。エネルギー削減の考え方としては、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。

5.　今後の総エネルギー使用量の見込みと再生可能エネルギー等の取組

平成 25 年度の総エネルギー使用量は 4,620TJ であり、そのうち、再生可能エネルギー量は 230TJ（総エネルギー使用量に対する割合５％）である。今後とも、浸水対策のレベルアップ、合流式下水道の改善などの下水道サービス向上に取り組んでいく。そのため、平成 36 年度のエネルギー購入量は、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、表のように、平成 25 年度を基準として、平成 36 年度のエネルギー購入量を 4,060TJ まで削減し、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 20%以上を目指す（**図 5**）。

6. 再生可能エネルギー等の今後の主な取組内容

太陽光発電や下水の持つ熱エネルギーの利用など、これまでも実施してきた再生可能エネルギーの取組の拡大に加え、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により、再生可能エネルギーをより一層活用する。これにより、平成 36 年度の再生可能エネルギー量を 350TJ に拡大する。また、新たな高度処理技術の導入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、平成 36 年度の省エネルギー量を 750TJ まで拡大する。

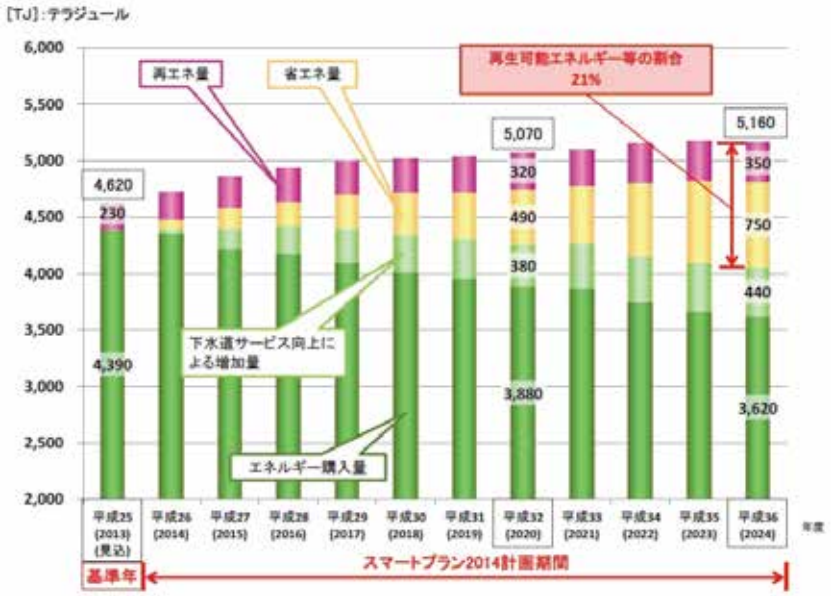


図 5　当局事業における今後のエネルギー使用量の推移

表 1　主な再生可能エネルギー（左）と省エネルギー（右）の取組一覧

取組内容	再生可能エネルギー(TJ)	
	拡大	継続
太陽光発電の拡大導入	21	3
汚泥焼却時の低温域の廃熱を活用した新たな発電	9	-
エネルギー自立型の焼却システムの開発・導入	41	
下水の持つ熱エネルギーの利用拡大	2	33
太陽熱を利用した熱供給設備の導入	3	-
焼却炉の廃熱を利用した汚泥乾燥	43	-
小水力発電の拡大導入	1	2
汚泥炭化炉の取組	-	60
消化ガス発電の取組	-	82
廃熱回収蒸気発電の取組	-	50
合計	120	230
	350	

取組内容	省エネルギー(TJ)
新たな高度処理技術の導入	11
エネルギー自立型の焼却システムの開発・導入	110
第二世代型焼却システムの導入	314
準高度処理の導入	178
散気装置の改善	31
ばっ気システムの最適化	69
省エネルギー型濃縮機・脱水機の導入	37
合計	750

7. 取組内容の代表事例

以下に、スマートプラン 2014 の具体的な取り組み事例を示す。

7.1 エネルギー自立型汚泥焼却システムの開発・導入

下水道局では、焼却排熱と脱水汚泥から発電するエネルギー自立型焼却炉と超低含水率型の脱水機も開発した。これらの組み合わせにより、焼却炉における補助燃料と電気が不要（**図 6**）となる。さらに汚泥焼却炉から発生する N_2O 発生量も約 50%削減できる。このシステムを平成 31 年に新河岸水再生センターに導入する予定である。

図 6　エネルギー自立型焼却システムのイメージ

7.2 準高度処理の導入

準高度処理の導入により、従来の高度処理（A_2O 法）より放流水の全窒素、全りんの処理能力は小さいが、既存の施設の改造により短期間で導入が可能となる。このシステムを再構築にあわせて導入している。

準高度処理のエネルギー消費量は、標準活性汚泥法とほぼ同じである（**図 7**）。

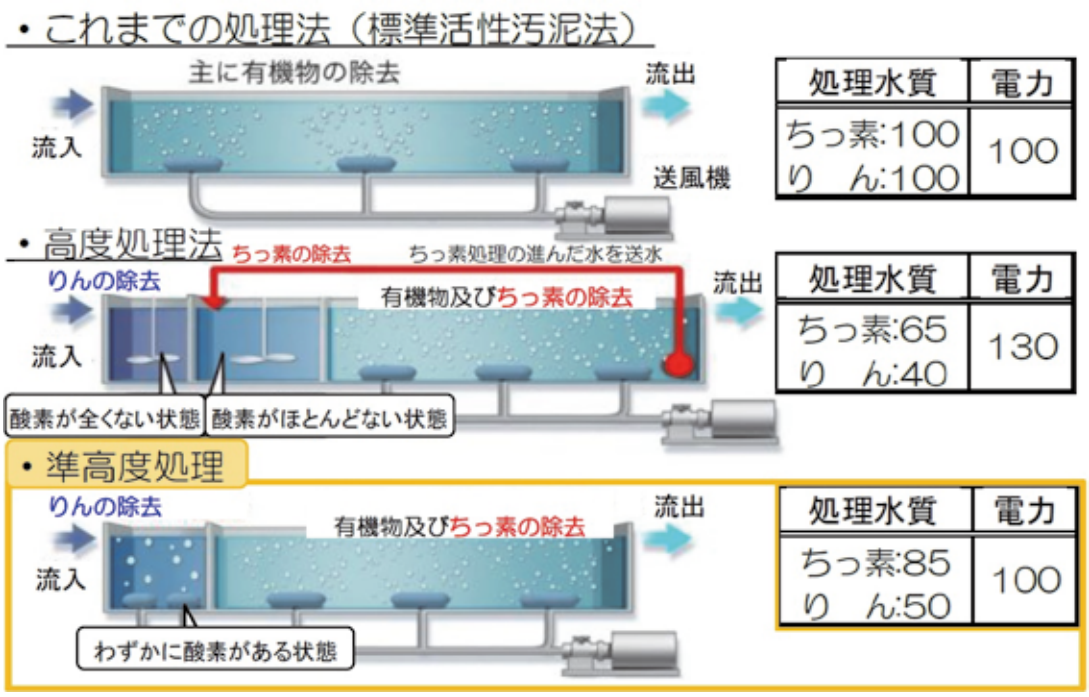


図 7　準高度処理のイメージ

7.3　水再生センターにおける施設全体でのエネルギー管理

汚泥処理施設での補助燃料量の削減のために、水処理施設で発生する汚泥の有するエネルギーを効率的に活用する。また、水処理施設のエネルギーを増加させても施設全体のエネルギーが削減できるような運転の工夫や技術開発を推進している。

7.4　灯油・都市ガス併用型発電設備の導入

震災時の流通網の混乱に備えて、下水道局では灯油と都市ガスの併用可能な発電機を導入（図 8）した。この発電機を平成 28 年に中川水再生センターに導入したほか、将来導入拡大の予定である。

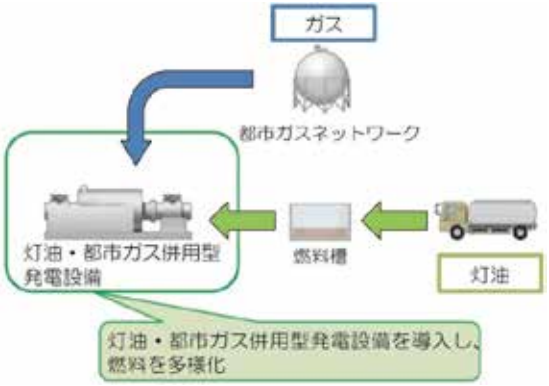


図 8　灯油・都市ガス併用発電機のイメージ

8.　おわりに

本プランに掲げる様々な取り組みを進めることで、平成 27 年度末現在、着実に計画を達成できている。

一方で、全世界的には温室効果ガスの削減も求められている。当局では、事務事業活動から発生す

る温室効果ガス排出量を、2020 年度までに 2000 年度比で 25%以上削減することを目標とした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」を策定している。

スマートプラン 2014 の施策は、温室効果ガス削減対策にもつながることから、両プラン達成に向け、取り組みを強化していく。

また、オリンピック・パラリンピックの開催を見据えた対応を図るとともに、エネルギー管理システムの進化・発展を促進させていく。

さらには、新しい技術開発を積極的に推進するとともに、エネルギーに関する状況の変化への柔軟な対応を行いながら、引き続き、本プランの実現に努めていきたい。

【参考文献】エネルギー基本計画「スマートプラン 2014」竹谷（2015 年）EWA/JSWA/WEF Water and Energy 2015 会議

4-2-2 Caisson Work at the Senjusekiya Pumping Station Simultaneous Installation of Two Caissons

Bureau of Sewerage,Tokyo Metropolitan Government Ryota Okazaki

１. Introduction

Although these roles of sewage system will never change, its capacity must be increased because of the recent climate change; partly because of the recent global warming, localized heavy rains with more than 50 mm/hr occur frequently. There are flood disasters caused by the highly localized downpours with more than 100 mm/hr in Tokyo. In order to cope with this situation, Tokyo Government Bureau of Sewage is rapidly reinforcing the main sewage line and pump station so that they can cope with 50 mm/hr rainfall in order to cope with the increase of rainwater inflow as a result of the urbanization. As one of these measures, the rainwater pump station “Senjusekiya Pump Station” is built to increase the capacity enough to cope with the increase of rainwater in Senju basin, Adachi Ward, Tokyo.

２. Outline of the Construction

Senjusekiya Pumping Station is a rainwater pump station designed to cope with the increase of the rain runoff in the basin of the existing pump station. Additionally, it has a rainwater reservoir to reduce the pollution load of combined sewerage.

General Information of the Facility:

Name of the Facility: Senjusekiya Pumping Station

Drainage area: 292.85 [ha]

Design Drainage Discharge, amount of rainfall: 37.3m^3/s

Rainwater Reservoir: 17,600 m^3

Structure and Scale: Reinforced-Concrete building, two stories over ground, five stories underground.

Construction was done in “Pneumatic Caisson Method,” dividing the underground structure into two caissons. This construction project builds two caissons simultaneously in order to realize the purpose of the construction, in the method which requires high technology.

Plan of the pump station is shown in Figure 1. In the two-dimensional view, the station is divided into two blocks: one has the inlet passage of the main line and a sand settling basin, and the other has the pumping well and a rainwater reservoir. The left block is denoted “West-side caisson” (excavation area 2,614 m^2, depth 53.8 m), and the right one “East-side caisson” (excavation area 2,289 m^2, depth 50.1 m).

Scale of Construction：West-side Caisson 53.9m × 48.5m (depth: 53.8m), Final Air Pressure: 0.450MPa

East-side Caisson 39.8m × 57.5m (depth: 50.1m), Final Air Pressure: 0.417MPa

Excavation Area: 4,983 m^2, Amount of Earth Excavated: 265,555 m^3

Concrete: 14,018 m^3, Reinforcing Steel: 19,913 t

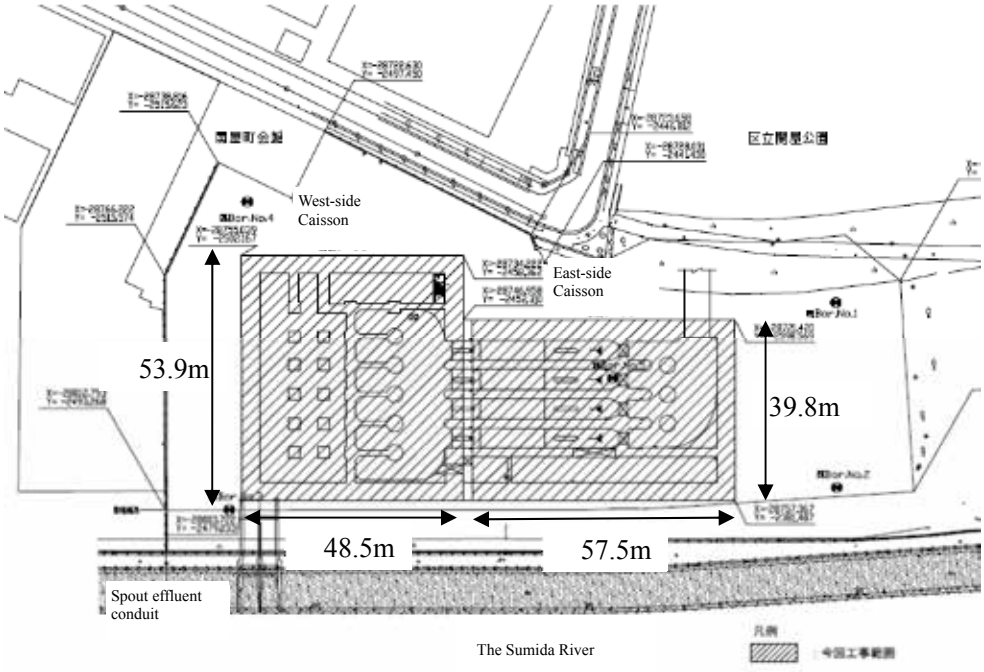


Figure 1: Plan of Senjusekiya Pumping Station

３. Feature of this Construction (simultaneous installation of 2 caissons)

3.1 Adoption of two-caisson boxes

In case of one-box excavation of this pumping station, the digging area would be 4983 m^2. There was no experience of similar sized project, and it would have not been adopted. The main reason of the rejection was the structural problem of dropping caisson. It is prefer to be able to sustain the construction load of the drop only by the proof strength of structural members.

However, in case of a large excavation area, it has a high risk of cracking and buckling for the lack of strength of deck slab because the less construction height makes the planar structure unstable in the beginning of the dropping. This pump station also needed not only the deck slab was increased for the rigidity but the temporary member called lift beam was necessary to reinforce. This is a temporary structure to build a wall to connect the upper floor slab and the base version, and it will be removed after completion. If the one-box excavation is employed, size and quantity of the lift beam would be large, and their removal could lead to be less cost efficiency and more construction period.

Moreover this pump station would not be adopted rectangular shape caisson but heterotypic shape caisson. The heterotypic shape caisson is considering new scheme, which causes a twist phenomenon, and it could not be the safest and the most certain construction because it would have been the largest project ever.

In addition, because the inflow trunk sewer is shallow than the pump well, the drop caisson will get depth difference by dividing into two boxes, and it will be designed economically.

3.2 Adoption of simultaneous two-box construction

When the construction is divided into two boxes, there are two ways that they construct one by

one and two boxes together. The former needs longer construction periods, but a yearly investment is lower.

In consultation with local residents, the entire construction period of this pump station is constrained within 10 years. Thus, the simultaneous construction is adopted even if the yearly investment is higher. In addition, the necessary space was reserved by compacting noise control building into 2-storied to accommodate air facility, and by using the neighboring road, parks, and river sites as the work yard.

4. Study of simultaneous construction

4.1 Setting the stress shield wall and controlling the construction period

When neibouring two caissons are dropped simultaneously, it has a risk of phenomena that the one box drags the other box with surrounding ground, so-called “co-drop (tomo-sagari)”. And when there is an air leakage from the work chamber of the one box, the risk that the poor oxygen air, which is passed through the oxygen deficient layer, flows into the work chamber of the other box. To prevent them, we decided to place steel sheet piles, which are called stress shield wall between the two boxes.

In addition, the commencement of the drop construction is adjusted so that the one box does not complete dropping the first than the other. It is easy to control the position if it is the drop construction, and it can be modified even if the leaning is occurred with co-drop.

4.2 Clearance of two boxes

This project is planed 2.0 m clearance between two boxes. In determining the clearance, the mutual influence of inclinations between boxes and the effects of boxes and the stress shield wall are investigated.

According to the work progress control standard of the caisson method, the displacement distance per a box is less than 300 mm, and the inclination is less than 1/100. If the two boxes inclined toward each other, the total displacement distance is 600 mm, and the horizontal displacement is 1 m (calculated with the depth of this pump station). Thus, the clearances were necessary over 1.0 m between two boxes and over 1.0 m between shielding boxes and wall. So, the clearance of two boxes is determined at 2.0 m.

With this clearance, it is considered that there are no obstacles to set a general scaffold.

4.3 Combination of two boxes

Because the caisson of this pumping station was divided into two and each separated at the distance of 2.0 m, each caisson is an independent facility. After finishing the installation of the two caissons, the walls connected to them must be removed and the walls and slabs are connected into one (hereinafter, “connection work”).

It is planned that the two places circled in black are dug and underground walls connecting the caissons are constructed on them.

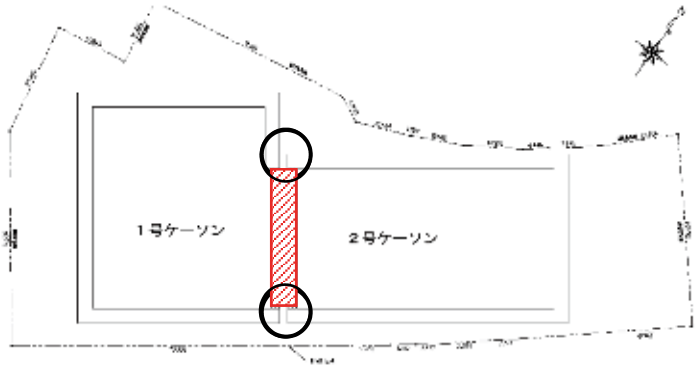


Figure 2: Plan of Twin Caissons

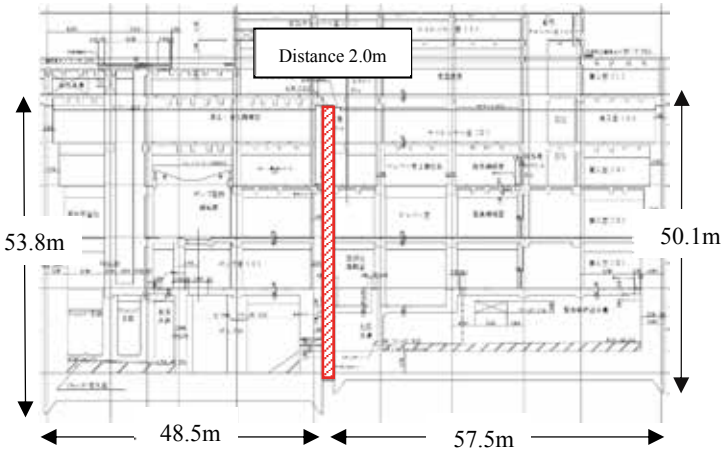


Figure 3: Sectional View of the twin Caissons

5.Consideration

This project is facing at the start of the main construction. As the first example of two-box simultaneous construction, the knowledge of accumulation as the aspects of the construction management, such as co-down and air leakage, and the extraction of new issues in design stage are expected.

Installation of the two caissons has finished now. The construction work to connect the two caissons is going to be launched. The connection work of this great depth has never been done before. Therefore careful plan considering construction management must be prepared in the design stage so that the construction work may be sure and safe.

4-2-2　千住関屋ポンプ所におけるケーソン工事について

ケーソン二函同時沈設

建設部　土木設計課　岡嵜　諒太

１．はじめに

東京は、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や、近年、多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。こうした事態を受け、東京都下水道局では、浸水対策として下水道幹線やポンプ所等の基幹施設の整備を積極的に進めている。このうち、毎年のように浸水被害が発生している足立区千住地区において、雨水排除能力の増大に対応する「千住関屋ポンプ所」を築造する。

２．ポンプ所概要

千住関屋ポンプ所は、東京都足立区千住地区の既設ポンプ所流域の雨水流出量増大に対応するために計画された雨水ポンプ所である。また、合流式下水道による汚濁負荷の軽減のため、雨水貯留池を併設する施設である。

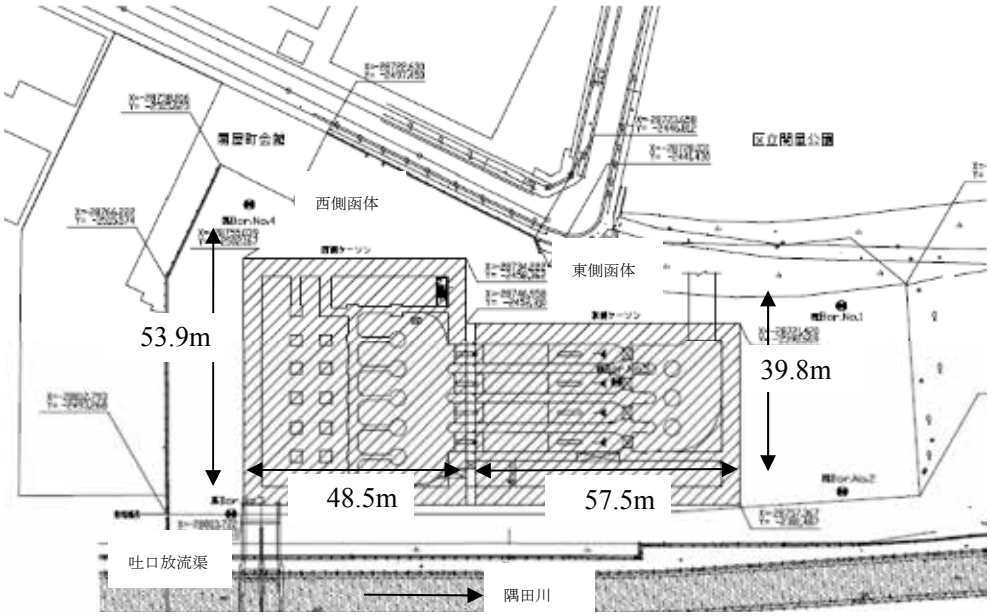
施設概要

1）施設名称　　千住関屋ポンプ所
2）流域面積　　292.85[ha]
3）計画排水量　雨水量　37.3m3/ｓ
4）雨水貯留池　17,600m3
5）構造及び規模 RC 造、地上 2 階、地下 5 階

施工方法は、「ニューマチックケーソン工法」であり、将来的に一体となる地下土木構造物を二函に分割し施工する。早期に事業効果を発現するため、二函同時沈設するという高度な技術を要する工事である。

ポンプ所の平面図を図－1 に示す。平面的には、幹線の流入部及び沈砂池を配置した部分、ポンプ井及び雨水貯留池を配置した部分のふたつのブロックに分割されており、左側のブロックを「西側函体」（掘削面積 2,614 ㎡、沈設深さ 53.8m）、右側のブロックを「東側函体」（掘削面積 2,289 ㎡、沈設深さ 50.1m）としている。

施工規模：西側函体　53.9m×48.5m（深さ53.8m）最終圧気圧0.450MPa
　　東側函体　39.8m×57.5m（深さ50.1m）最終圧気圧0.417MPa
　　掘削面積　4,983㎡、掘削土量　265,555m^3
　　コンクリート　14,018m3、鉄筋　19,913ｔ



図－１　千住関屋ポンプ所平面図

３．二函同時施工の採用経緯

３．１　ニューマチックケーソン工法の採用

ポンプ所地下部の施工については、当初ニューマチックケーソン工法との比較検討の結果、地下連続壁工法を計画していた。しかし、ポンプ所建設についての地元との協議に 10 年以上の時間を要し、その間、掘削面積 2000 ㎡、掘削深 40m 以上等の大規模・大深度ケーソンの施工実績が積み上げられるなどの技術的な進歩があった。これらを踏まえてあらためて比較検討し、工期短縮を主な理由として本工法に変更することとした。

３．２　二函施工の採用

本ポンプ所を一函体として施工する場合の掘削面積は 4,983 ㎡となるが、この規模での施工実績はなく、今回も採用できなかった。この主な原因は、沈設時の構造上の問題であった。沈設に伴って生じる施工時荷重に対しては、本体構造部材の耐力のみで対抗できることが望ましい。

しかし、掘削面積が大きい場合、沈下開始当初は面積と比較して構築高が低く不安定な平板状の構造体となるため、底版の耐力が不足して割れや座屈を生じる危険性が高い。本ポンプ所の場合も、底版厚を増して剛性を高めるだけでは耐力不足であり、吊桁と呼ばれる仮設部材を設けて補強する必要があった。これは、底版と上階スラブを接続するように構築する仮設の構造壁であり、完成後には撤去することとなる。一函体とした場合には、吊桁の寸法・数量ともに膨大となり、これらの撤去は経済性が劣るとともに工期の増大を招く。

また、本ポンプ所は一函体とすると長方形ではなく、異型ケーソンとなる。異型ケーソンには検討手法の確立していない「ねじれ」などの現象の発生が知られており、過去最大の規模であることを考え合わせれば、安全で確実な施工が可能とは言い切れない。

さらに、幹線流入部側はポンプ井側に比べて浅いため、二函に分割して沈設深さに差をつけることによって、経済的な設計となる。

３．３　二函同時施工の採用

二函に分割して施工する場合、一函ずつ順番に施工する方法と二函を同時に施工する方法が考えられる。前者の方が工期は長くなるが、年あたりの投資額は低く抑えられ、作業ヤードも小さくて済む。

しかし、本ポンプ所では、地元との協議の結果、全体工期を 10 年以内とするよう制約を受けた。このため、年あたりの投資額は高くなっても同時に施工する方法を採用することとした。また、作業ヤードは、送気設備を収める防音建屋を二階建てとしたり、周辺の道路、公園並びに河川用地を占用したりするなどの工夫により、必要な広さを確保した。

４．二函同時施工に伴う設計上の検討

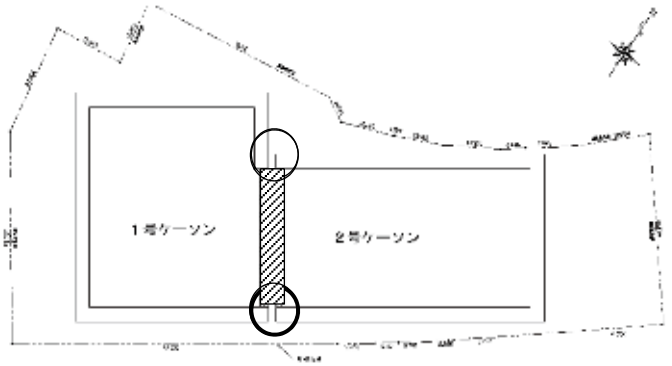
４．１　応力遮断壁の設置と工程調整

近接したふたつのケーソン函体を同時に沈下させた場合、周辺地盤とともにもう一方の函体を引きずり込む現象、いわゆる「共下がり」が発生する懸念がある。また、一方の函体の作業室から漏気が発生した場合、酸欠層の地盤を通過して酸欠状態となった空気が、もう一方の函体の作業室へ流れ込む危険性もある。これらの防止を目的に、応力遮断壁を設置することとした。この設置は、沈設前の二函体の中間部に鋼矢板Ｌ＝20.5m を打設するものである。

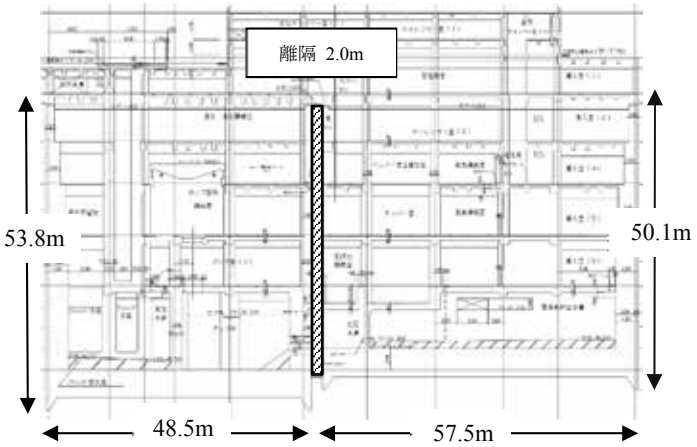
さらに、一方の函体が先に沈設を完了しないよう沈設開始の時期を調整した。沈設中での両函体の姿勢制御が容易となら、共下がりによる傾斜が発生したとしても修正が可能である。

４．２　二函体の離隔

本現場では、ふたつの函体の離隔を 2.0ｍで計画している。離隔の決定にあたり、両函体の傾斜による相互の影響と、函体と応力遮断壁との影響について検討した。国等の主な発注機関が示すケーソン工法の出来形管理基準値では、一函当りの偏心が 300 ㎜以下、傾斜が 1／100 以下となっている。二函がお互いの方向へ傾斜したとしても偏心の合計は 600 ㎜、傾斜による水平変位は 1m（本ポンプ所の深さを用いて算出）となる。このことから、二函体の離隔は 1.0m以上、函体と応力遮断壁との離隔は 1.0m以上とすればよい。そこで、両函体の離隔を 2.0ｍと決定した。



図－２: 平面図



図－３　断面図

４．３　二函体の連結

本ポンプ所は、二つの函体の離隔を 2.0ｍとして分割し沈設しているため、一函ずつ独立した構造物となっている。

二函沈設完了後、それぞれの隣接する壁面部を撤去し、壁・スラブ等を繋ぎ合せ一体化する必要がある。（以下「連結工」という。）その手順は、ケーソンの沈下が終わったのち、図 - ２に黒丸印で示した二箇所（側部）及び函体底版付近に地盤改良工を施工して止水を図ったうえで、幅 2.0ｍの隙間を掘削し、構造物を構築するというものである。ケーソン函体の鉄筋には、将来の連結を想定して機械式継手を設置しておくこととした。

５．考察

今回は、一函での施工が不可能であったためにケーソン二函の同時施工を採用しているが、参考として一函施工（掘削面積の 4,500 ㎡、11 ロット）のケーソンをモデルとして試算した。二函に分割して同時施工する方が約 200 日の工期短縮が可能であった。工期短縮は工事費の多くを占める機械器具損料の縮減にもつながり、費用の削減もできた。

現在、ケーソン二函体の沈設は完了し、今後、ケーソン連結工事の施工を開始する。
このような大深度の連結工事は日本で初めてとなり、今後、より安全で確実な施工となるよう検討が必要である。

4-2-3 Aeration control by real time nitrification control using activated sludge model

T. Oikawa, M. Nishiyachi, H. Terajima, S. Watanabe

Abstract: Aeration in biological wastewater treatment is an energy intensive process. The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government has been working to develop new aeration control technologies that can achieve both reduction of air flow volume and improvement of treated water quality. In this study, we have developed the aeration control by "real-time nitrification control (RNC)" using Activated Sludge Model (ASM) aiming at establishing a feedforward based technology that allows control of air flow volume required to meet water quality targets. The research results at an actual facility showed that 10 % reduction of air to flow ratio in clear weather and constant treated water quality (NH_4-N lower than 1 mg/L) during rainfall was achieved by applying RNC. Therefore, it is considered that RNC can be applied for wastewater treatment under a variety of treatment conditions.

Introduction

Aeration in biological wastewater treatment is an energy intensive process because it requires certain air flow for oxidation of organic contaminant and ammonia. Although energy consumption can be reduced by minimizing air flow rate, reduction of air flow rate can cause degradation in effluent water quality. Thus, improvement of water quality and reduction of energy consumption is a trade-off relationship. Therefore, the Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government has been working to develop new aeration control technologies that can achieve both reduction of air flow rate and improvement of treated water quality. Currently, as for aeration control, DO (dissolved oxygen) control, which keeps DO concentration at the end of a reaction tank in feedback, is widely used (Amand *et al.*, 2013). However, feed-back control has a delay in responding to a fluctuation of influent load. If variations of influent load are monitored in real-time and air flow volume can be controlled in feedforward by calculating the amount of oxygen required for biological treatment, both stabilization of effluent water quality and reduction of excess air flow would be achieved. However, at present, it is difficult to continuously measure influent quality (particularly, ammonia nitrogen (NH_4-N) which requires nitrification). Additionally, among the control technology using the influx NH_4-N, the systems, which are reportedly implemented in the actual facilities, are based on the past record of processing, such as fuzzy control (Meyer *et al*., 2003; Baroni *et al*., 2006; Yong *et al*., 2006). Therefore there is an anxiety that the system cannot cope with a sudden change of the influent quality, inflow rate or water temperature. There are only few studies which applied Activated Sludge Model (Henze et al. 1987) for aeration control (Holenda *et al.*, 2008; Thornton *et al.*, 2010; Sunner *et al*., 2012). In addition, these studies only utilized a part of the Activated Sludge Model (ASM).

In this study, we developed the aeration control by "Real-time Nitrification Control (RNC)" using the whole ASM aiming at establishing a feedforward based technology that allows control of air flow volume required to meet water quality targets. And effects on air flow volume reduction and water quality improvement of the RNC were evaluated.

Materials and methods

Real-time Nitrification Control (RNC)

The principle of the RNC is combining the measurement of the inflow load and computation of the ASM to successively compute the required air flow rate and control the air flow by feed-forward for realizing the target water quality. ASM is a mathematical model proposed by International Water Association, which expresses the biological reaction process and the accompanying material balance (organic matter, nitrogen, phosphorous, etc.). It enables to estimate the quality of the processed water, required amount of oxygen, and the amount of excess sludge, etc. The block flow diagram of the RNC is illustrated in Figure 1. Main constituents are ammonia meter, which were newly installed to the inlet of the reactor, and numeric processing device (laptop PC). For calculation of required amount of oxygen, a simulation system (SIMWATER, Meidensha Co. Ltd., Japan) based on the ASM2d (Henze et al., 1999) was used. In order to apply the system to existing facilities easily, the RNC utilizes existing DO control, and calculates DO set-point automatically based on ASM2d using the data obtained from the sensors.

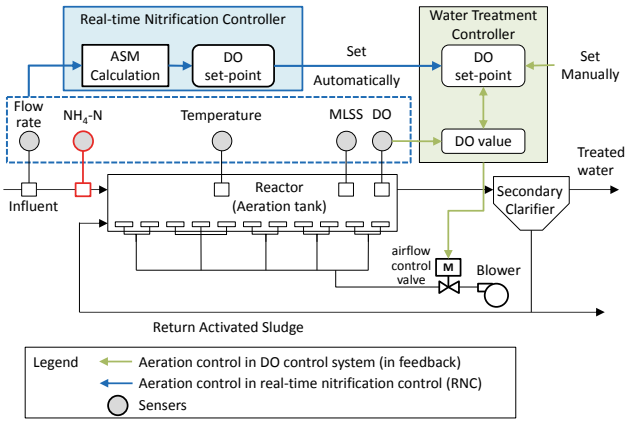


Figure 1 Schematic flow diagram of the wastewater treatment plant used in this study and the flow diagram of the RNC developed in this study as comparison with the existing DO control system.

The RNC performs the following operations in order to determine the DO set-point required for nitrification: 1) to obtain influent NH_4-N concentration, inflow rate, water temperature and MLSS concentration, 2) to calculate each air flow volume which can achieve given DO values (1.0 to 5.0 mg/L) at the end of the reactor with the ASM, 3) to compare the results of calculation and choose the optimum DO value for satisfying the target water quality (NH_4-N concentration) at the end of the reactor, 4) to define the DO value as the DO set-point at the end of the reactor. By substituting the existing DO set-point of the DO control with the obtained DO set-point, the air flow is controlled according to the renewed DO set-point, and consequently the feedforward control according to the fluctuation of the influx load is realized.

Test Period and Facility

In order to validate the stability of control, response to the change of DO set-point, and the effects on both air flow reduction and improvement of water quality, experiments were carried out in an actual facility. The experiments were performed from August 2013 to March 2014 in *Sunamachi* Water Reclamation Center. The reaction tank used in the experiments was operated by conventional activated sludge method with 5 zones (zone A – E) and the first zone was operated as pseudo-anaerobic zone. The capacity was 8,443 m^3 and hydraulic retention time (HRT) was about 8 hours.

Evaluation of Ammonia Meters

The performance of the ammonia meter NH4Dsc (HACH Co. Ltd., USA, ion-selective electrodes methods, range: 0.0 – 50.0mg/L) used to measure the influent NH_4-N concentration to the reaction tank, which is necessary for the RNC, was validated in order to confirm the long-term stability. It is fitted with an air nozzle to wash the surface of the electrode intermittently. The test period was from December of 2013 to February of 2014. The ammonia meter

was installed on the inlet channel of the reaction tank. During the test period, samples were taken from the influent of the reactor to analyze the NH_4-N and nitrate nitrogen (NO_3-N) with ion-chromatograph (IC) in order to compare the precision. Samples for IC analysis were filtrated with acetyl-cellulose membrane filter (ADVANTEC, Japan, pore size: 0.45μm) and subsequently contained in vials to use in the analysis. It was validated whether the error of indication by ammonia meter compared with the actual measurement with IC is within ± 5% of the full-scale (FS) or comparative error is within 10%.

Configuration of the Simulation model and Characterization of Influent

Tank in series model was used in the ASM simulation of the reactor. Separation of zone and each capacity are shown in Figure 2. In the same way as the production facility, with each zone was divided into 1 to 3, considering the capacity ratio. In order to obtain water quality and process status data to use in ASM calculations, process water was sampled 6 times a day during November of 2013 to September of 2014. Samples were taken from influx to reactors, outlet of the zone A to E, overflow of the second sedimentation basin and returning sludge. Influent was characterized (classifying organic matter, etc. into components used in ASM) by WERF method (Melcer *et al.*, 2003). ASM simulation was performed based on the result of characterization, and subsequently the result was compared with the process status obtained by the sampling survey to validate the ASM parameter.

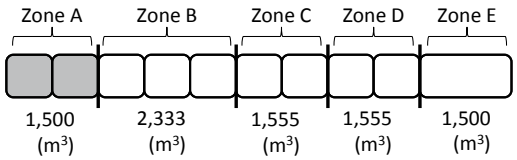


Figure 2 Separation model of the reactor and each capacity of zones

Test of the Air Flow Control by Real-time Nitrification Control

Off-line tests for validating the RNC and adjustment of the parameters had been executed in advance of on-line experiments. After the completion of the offline tests, air flow control with RNC was tested. Upper and lower limit of the DO setting was defined considering the stability of microorganisms in the reactor and relevant devices (blower and air flow control valves). At first, stability of the control was validated twice for 6 hours. After that, the effect of air flow reduction and water quality improvement was evaluated in the continuous control test which lasts for 28 to 76 hours.

Results and Discussions

Evaluation of the Ammonia Meter

The errors, correlation coefficient, and determination coefficient between measured values with the sensor and the IC measurement are shown on Table 1.

Table 1 Error, Correlation Coefficient, and Determination Coefficient in different Periods in the Evaluation of Ammonia Sensor

	Range of data (mg/L)	Mean Error (mg/L)	Mean relative Error (%)	correlation coefficient R	determination coefficient R^2
Evaluation Criteria		(≤2.5)	(≤10)		
Initial evaluation (Dec. 2013-Feb. 2014)	11.2 - 24.7	1.9	9.9	0.825	0.680
During declined precision (Mar. 2014)	11.3 - 20.1	2.7	17	0.428	0.184
Additional evaluation (Oct. 2014-Feb. 2015)	13.6 - 22.3	0.8	4.0	0.938	0.880

Generally, measured value with the sensor agreed with IC measurements, catching up with increase and decrease of NH_4-N caused by rainfall. However, there occurred some gap between the sensor and IC measurement because of adhesion of dirt on the surface of the electrode at the end of the third month. Position of air nozzle for intermittent washing and direction of blowing were adjusted. The results of comparing measured values and IC measurement during initial evaluation period (before the adjustment) and additional evaluation period (after adjustment) are shown in Figure 3. After the nozzle was adjusted, the error were significantly decreased, with average error 0.8mg/L, and average relative error 4.0%, well satisfying the standard, and the determination coefficient was 0.880, showing that the indication well agreed with the measurement. From the above observation, it was concluded that it would be possible to continuously analyze the influent to reaction tank with the ammonia meter.

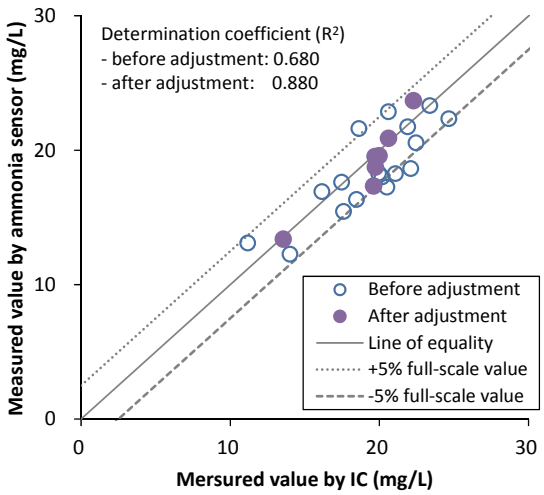


Figure 3 Comparison between NH_4-N conc. measured by NH_4-N sensor (vertical axis) and IC (horizontal axis).

Constitution of the Simulation Model and Characterization of Influent

Simulation model was evaluated by computing RNC off-line, using the water quality and process status data collected in sampling survey. Parameters were set according to result of the sampling survey during 12th – 13th November 2013, considering the temperature and weather. Characterization result of influent to the reactor is shown in Table 2. Comparison between the result of simulation and measurement is shown in Figure 4. The simulation mostly agrees with the measurement of NH_4-N concentration of samples in each zone obtained by characterization of influent, and the value corresponded precisely to the periodical change. Additionally, among the parameters (67 in all) of ASM, $K_{O2.H}$ was changed (Table 3). Default values of ASM2d were used for the rest of the parameters.

Table 2 Characterization results of influent

Symbol	value (mg/L)	Symbol	value (mg/L)
S_I	25	X_I	10
S_{O2}	0.1	X_S	83.7
S_{N2}	0	X_H	0
S_A	10	X_{AUT}	0
S_F	4	X_{PAO}	0
S_{NO3}	0	X_{PP}	0
S_{PO4}	3	X_{PHA}	0
S_{NH4}	15.5	X_{TSS}	82.275
S_{ALK}	200	X_{MeOH}	0
		X_{MeP}	0

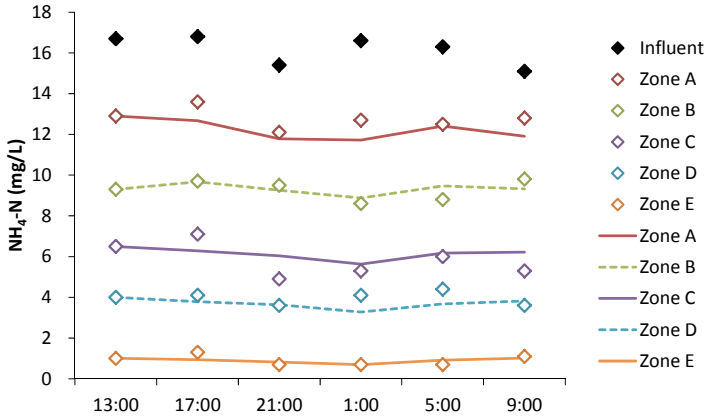


Figure 4 Comparison of the result of ASM simulation and measurements of NH_4-N conc.: (**line**) simulation results; (**circle**) measured value.

Off-line Validation of the Stability of RNC

Confirmation test of obtaining operation data and validation of RNC were carried out from September to November 2014. It was ensured that the RNC could continuously operate and compute DO set-point from data continuously obtained from the ammonia and the other existing meters. Additionally, among the parameters of activated sludge model, $K_{NH4.A}$ was changed (Table 3). On account of this tuning, result of computed NH_4-N and actual measurement came to agree well. As a result, the RNC was successfully tuned so that it could follow the change of inflow load on both rainy and fine days and show presumably optimum DO set-point in the normal range.

Table 3 Parameters which were changed from the default values of ASM2d

Symbol	Name	Change	Reason
$K_{O2.H}$	Saturation/inhibition coffeicient for oxygen	0.2→0.05gO_2/m^3	Computed value of the NO_3-N concentration was rather lower than the actual measurement.
$K_{NH4.A}$	Saturation/inhibition constant of ammonium	1.0→0.4gN/m^3	Estimatied NH_4-N concentration was rather higher than the actual measurement in the low-concentration range.

Validation of the Stability of Air Flow Control by RNC

According to the result of the test during the initial 6 hours in the daytime, there was not any trouble such as disconnection or troubles of control in the test of air flow control with RNC. The installed control devises and software worked without problem. Additionally, it was also confirmed that feedforward control corresponding to changes of inflow NH_4-N load with variable DO control using RNC was possible. Besides, actual DO concentration follows the changes of DO set-points in the continuous test of 28 – 76 hours, showing that the system can steadily control the air flow rate. As an example of track records of the control during the test period, data during the DO control and RNC are shown in Figure 5. While DO set-point was constant at 2.5 mg/L in DO control, in RNC it varied in the range of 2.0 – 3.0 mg/L corresponding to the change of inflow NH_4-N load, with the actual DO well responding to the change of DO set-points, reaching approximately equal to the set-point within 10 minutes. Additionally, the outflow water quality of the reactor showed that the water quality in RNC was maintained as stable as the DO control for the similar NH_4-N inflow load.

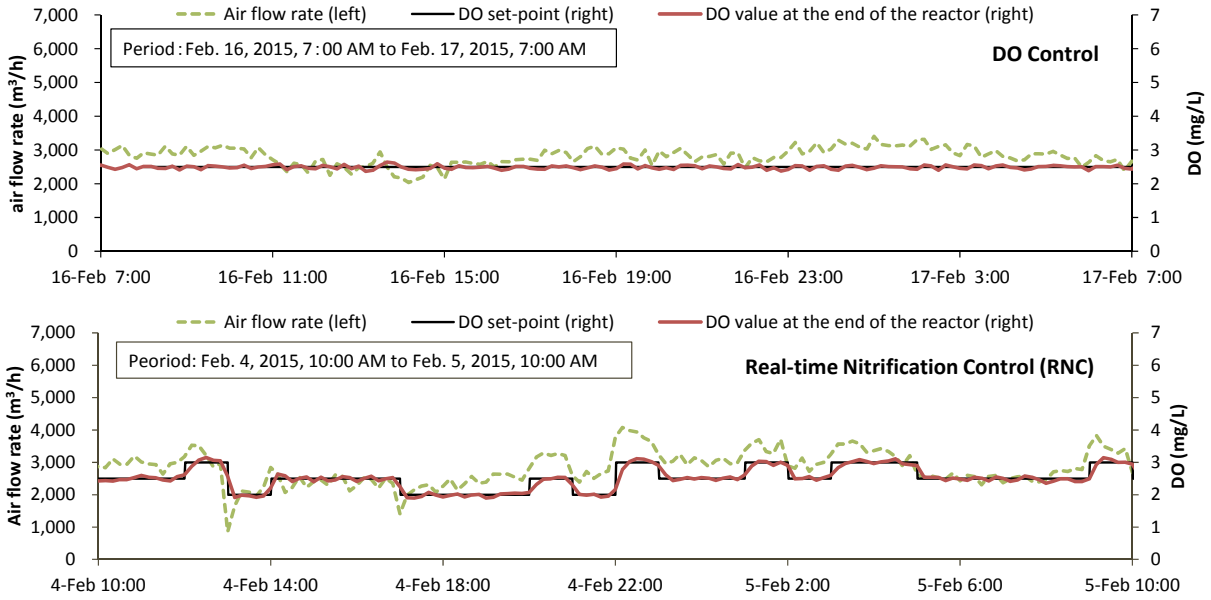


Figure 5 Air flow rate and DO value of the DO control (**upper**) and real-time nitrification control (RNC) (**lower**) at the time of fine weather

Effect of Air Flow Reduction with RNC

In order to validate the air flow saving effect of RNC, air flow rate was compared on sunny days, when water quality was stable, during the test period (January – March, 2014). Data were extracted under the rule that NH_4-N concentration of outflow water is less than 1.0mg/L. Result of comparing the air flow rate between DO control and RNC is shown in Table 4. Table 4 shows that the air flow rate to the reactor controlled in RNC was lower than in DO control by 4.5% on average. Comparing the air to flow ratio (to the influx volume and NH_4-N load), it was concluded that the air flow was reduced by 10% in the ratio to the influent quantity, and by 7.5% in the ratio to the inflow load.

Table 4 Result of Comparing the Air Flow in Reactors

Item		DO Control	RNC	Ratio to the DO Control (%)*
Days of Observation		15	5	—
supplied air flow (m^3/h)		2,876	2,747	-4.5
influx volume (m^3/h)		864	915	5.9
inflow NH_4-N load (g/h)		19,952	20,638	3.4
air to flow ratio	(to the influx volume)	3.33	3.00	-10.4
	(to the inflow load)	0.144	0.133	-7.5

* Minus value means reduction in RNC

Effect of the Improvement of Water Quality with RNC

In order to validate the effect of RNC to water quality, result of DO control (22nd – 24th February) was compared with that of RNC (9th – 11th March). Trend graph of the data under DO control during the period is shown in Figure 6, and the ones under RNC in Figure 7. In DO control (Figure 6), DO value was mostly 2.5 mg/L, the set-point, excluding the surge of DO value because of the influx dissolved oxygen brought by rain. NH_4-N concentration of outflow water of the reactors rose up to 5.3 mg/L because of the decline of the temperature. On the other hand, in RNC (Figure 7), DO value was elevated (4.5 mg/L in the max.) according to the rise of inflow

NH_4-N load caused by rain. And during the recovery from the influence of the rain, considering the slowdown of nitrification because of the decline of temperature, DO set-point was elevated (5.0 mg/L) so that NH_4-N concentration of outflow was maintained at less than 1.0mg/L. Besides, DO set-point was raised according to the rise of inflow load and consequently the mean DO set-point was set higher than 2.5 mg/L and air flow rate was increased in RNC.

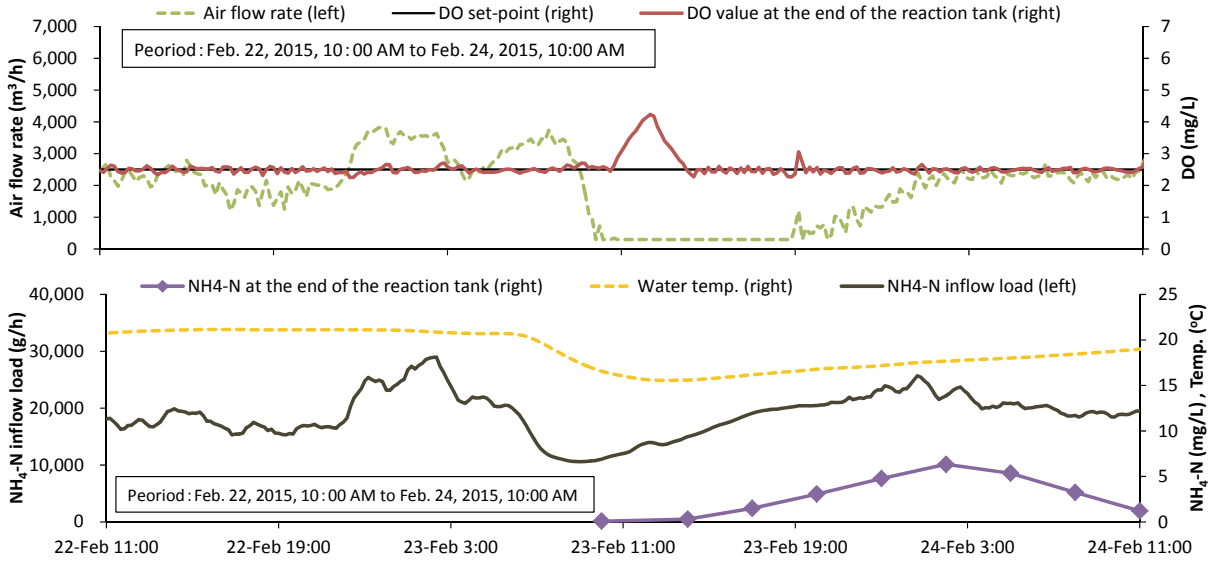


Figure 6 Reference result of the DO control during rainfall: (**upper**) DO set-point (fixed), actual DO value at the end of the reaction tank (control point) and air flow rate of the reaction tank; (**lower**) NH_4-N inflow load, water temperature and NH_4-N conc. at the end of the reaction tank.

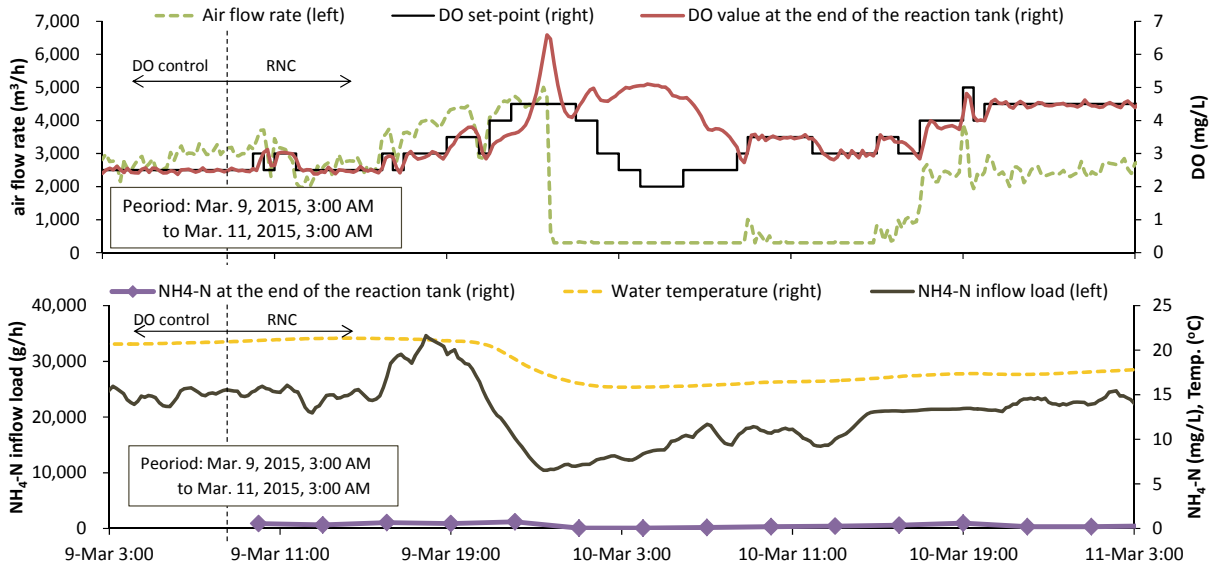


Figure 7 Control test result of the RNC during rainfall: (**upper**) DO set-point calculated by RNC, actual DO value at the end of the reaction tank (control point) and air flow rate of the reaction tank; (**lower**) NH_4-N inflow load, water temperature and NH_4-N conc. at the end of the reaction tank.

In the feedback control in the DO control, air flow rate is determined according to DO value of the outflow of reactors after the process. On the other hand, RNC changed DO value by changing DO set-point according to the inflow NH_4-N load in feed-forward, thereby keeping NH_4-N concentration of treated water constant. Especially, in the case evaluated in this study, where temperature was reduced by the influent of winter rain, and consequently

nitrification rate was declined, it was shown that it could contribute to prevention of instability of water quality in winter.

Conclusion

This study validated the air flow control technology of obtaining inflow load by continuously measuring quality of influent in ammonia meter, simulating process status in reactors in ASM2d, a standard activated sludge model, to determine DO set-point necessary for nitrification in reaction tanks in feed-forward, and interrupting to the existing DO control system with real-time nitrification control, in an actual facility. As a result, as well as long-term stability of ammonia meters was confirmed, the air flow to influent quantity ratio was reduced by 10% on sunny days, and water quality was improved on rainy days. We are going to continue validation test for a long term including summer season, and additionally, we are planning to study further on processing other contaminants than NH_4-N.

References

Amand, L., Olsson, G. and B. Carlsson, B. (2013). Aeration control – a review. *Water Sci. Technol.*, 67(**11**), 2374-2398

Baroni, P., Bertanza, G., Collivignarelli, C. and Zambarda, V. (2006). Process improvement and energy saving in a full scale wastewater treatment plant: air supply regulation by fuzzy logic system. *Environ. Technol.* 27(**7**), 733-746

Henze, M., Grady, C. P. L., Gujer, W., Marais, G. v. R. and Matsuo, T. (1987). Activated Sludge Model No.1, *IAWPEC Scientific and Technical Report, No. 1*, IAWPEC, London. ISSN: 1010-707X

Henze, M. Gujer, W. Mino, T. Matsuo, T. Wentzel, M.C. Marais, G.V.R. and Van Loosdrecht, M.C.M. (1999). *Activated Sludge Model No.2d, ASM2d. Water Sci. Technol*. 39(**1**), 165-182

Holenda, B., Domokos, E., Redey, A. and Fazakas, J. (2008). Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control, *Computers and Chem. Eng.*, 32(**6**), 1270-1278

Melcer, H., Dold, P.L., Jones, R. M., Bye, C. M., Takacs, I., Stensel, H. D., Wilson, A. W., Sun, P., and Bury, S. (2003). Methods for wastewater characterization in activated sludge modelling. Water Environmental Research Foundation (WERF), Alexandria, VA, USA.

Meyer, U. and Popel, H. J. (2003). Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification. *Water Sci. Technol.*, 47(**11**), 69-76

Sunner, N. Haeck, M. and Thornton, A. (2012). UK Experiences of Full Scale Activated Sludge Real Time Control Systems, Proceedings of the Water Environment Federation. *WEFTEC 2012*, Session 71 -80, 5570-5588

Thornton, A. Sunner, N. and Haeck, M. (2010). Real time control for reduced aeration and chemical consumption. a full case study, *Water Sci. Technol.*, 61(**9**), 2169-2175

Yong, M., Yong-zhen, P., Xiao-lian, W. and Shu-ying, W. (2006). Intelligent control aeration and external carbon addition for improving nitrogen removal. *Environ. Modelling and Software*, 21(**6**), 821-828

4-2-3　水質改善と省エネルギーの両立を目的とした活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御

施設管理部環境管理課
及川　智
（現　西部第一下水道事務所　落合水再生センター長）
西谷内　光春
（現　水道局　多摩水道改革推進本部　調整部 技術指導課）
寺島　英雄
（現　森ヶ崎水再生センター　所長）
施設管理部長　渡辺　志津男
（現　下水道局長）

要旨

下水の生物処理には多くの空気が必要であり、多くの電力を消費している。そこで東京都下水道局では水質改善と省エネルギーの両立を目的とした新しい送風制御技術の開発を進めている。

本研究では、目標水質の達成に必要な送風量をフィードフォワード的に制御する技術の確立を目的として、活性汚泥モデルを利用した「リアルタイム硝化制御」による送風制御について検討した。冬季における実施設での運転結果では、晴天時は DO 一定制御に比べて送気倍率が約 10%低減され、雨天時の初期降雨による流入水質や水温の変動に対しても目標水質が安定して達成された。この結果、水質改善と省エネルギーを両立できる有用な技術であることが期待できる。

1　はじめに

下水の生物処理では、曝気のために多くの電力を消費している。曝気のための送風量を削減することで使用電力量を低減することは可能だが、有機物除去やアンモニア性窒素の硝化には一定の送風が必要であり、送風量の削減は処理水質の低下を引き起こす恐れがある。このように、水質の改善と電力使用量の削減はトレードオフの関係となるが、事業のために膨大な電力（東京都内の約 1%）を消費する東京都下水道局にとって、水質改善と電力使用量の削減を両立させることが大きな課題となっている。そこで、東京都下水道局では適切な水処理と送風量削減が両立できる新しい送風制御技術の開発を進めている。

現在、送風制御は反応槽終端の溶存酸素（DO）濃度を一定に保つ DO 一定制御が広く用いられている[1)]。もし、流入負荷量の変動に対してリアルタイムに追従し、生物処理に必要となる酸素量を算出してフィードフォワード的に送風する制御が実現すれば、様々な活性汚泥法施設において処理水質の安定化と過剰な送風の削減とが両立可能となる。しかし、現状では、生物処理反応槽への流入水質（特に、硝化が必要となるアンモニア性窒素、NH4-N）の安定的な連続測定は難しい。また、現在、実施設での適用例が報告されている流入アンモニア性窒素濃度を用いた制御システムは、ファジー制御[2),7),10)]など、過去の処理状況を基に必要空気量を推定するものであり、流入水質の急激な変動への対応や、流入水量、水温等の変化への対応が十分ではないおそれがある。流入負荷量の変動に応じて生物処理に必要となる酸素量を算出し、送風制御を行った事例はほとんどない[3),5),8),9)]。

そこで本研究では、目標水質の達成に必要な送風量をフィードフォワード的に制御する技術の確立を目的として、活性汚泥モデルを利用した「リアルタイム硝化制御」による送風制御について、その制御

性、送風量削減効果及び水質改善効果について検討を行った。

2　リアルタイム硝化制御の原理と制御フロー

本実験で使用したリアルタイム硝化制御の原理は、流入負荷量の測定と ASM による硝化速度計算を組み合わせ、目標水質を達成できる送風量を逐次計算し、フィードフォワード制御により送風量を制御するというものである。ここで、ASM とは、国際水協会（IWA）が提唱したもので、生物反応プロセスとそれにともなう物質収支（有機物、窒素、りん等）による水質変化を表現する数学的モデルであり、処理水質、必要酸素量、余剰汚泥発生量等の推定が可能である。

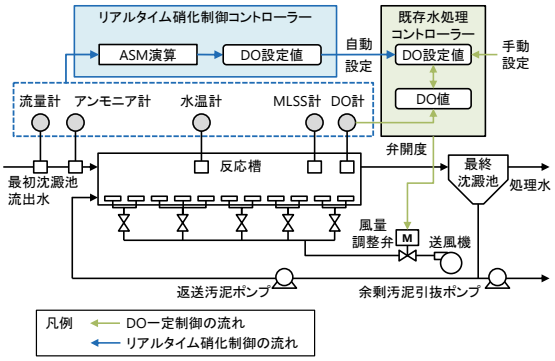


図 1　リアルタイム硝化制御構成図

リアルタイム硝化制御の構成図を図 1 に示す。主な構成要素は反応槽の流入部に新たに設置したアンモニア計と演算装置（ノート型 PC。以下、リアルタイム硝化制御コントローラー）である。リアルタイム硝化制御コントローラーにおける生物反応プロセスと物質収支の計算には、下水処理のシミュレーションシステムである SIMWATER[11]を使用した。本システムは ASM モデルとして最も広く用いられている ASM2d[4]を採用している。

本制御では、処理に必要な DO 設定値を決定するため、①流入アンモニア性窒素（以下、NH_4-N）濃度、流入水量、反応槽水温、MLSS 濃度等を取得し、②活性汚泥モデルを用いて反応槽内の硝化速度を計算し、③別途定めた反応槽末端での目標水質（NH_4-N 濃度）を満たす最適な硝化速度から DO 値を求め、④反応槽末端の DO 設定値として決定する。得られた DO 設定値を既存の DO 一定制御の DO 設定値に対して新たな DO 設定値として更新することで、更新された DO 設定値に従った送風制御が行われ、流入水の負荷変動に応じたフィードフォワード制御が実現される。

3　実験内容

3.1　実験期間及び施設

リアルタイム硝化制御について、制御の安定性、DO 設定値変更に対する追従性及び送風量削減と水質改善を検証するため、実施設で実験を行った。

期間は平成 25 年 8 月 12 日～平成 27 年 3 月 20 日、施設は東部第一下水道事務所砂町水再生センター（実験池及び対象池は同一）で、処理方式は疑似嫌気好気法（疑似嫌気槽：A 回路、好気槽：B～E 回路、反応槽容量：8,443m^3、水理学的滞留時間（HRT）：約 8 時間）である。

3.2　アンモニア計の評価

流入水における電極式アンモニア計の長期安定性の検証をするため、リアルタイム硝化制御に必要な反応槽流入 NH_4-N 濃度の計測に使用するアンモニア計の性能を評価した。使用したアンモニア計は、HACH 社製イオン電極式アンモニア計 NH_4Dsc（測定範囲：0.0～50.0mg/L、測定方法：浸漬型イオン電極による連続測定）で、電極表面の汚れを間欠的に洗浄する空気ノズルが設置されている。

実験期間は、平成 25 年 12 月から平成 26 年 2 月であり、実験反応槽の最初沈澱池流出部に電極式アンモニア計を設置した。期間中、精度の比較のため、反応槽流入水（アンモニア計設置個所）を採水し、イオンクロマトグラフ（以下、IC）により NH_4-N 濃度及び硝酸性窒素（以下、NO_3-N）濃度を分析した。IC 分析のサンプルは、現場にて孔径 0.45μm のディスミックフィルターにより固液分離を行った後、ろ液をバイアル瓶に保管したものを使用した。

アンモニア計の性能評価には法定の基準がないため、総量規制用の窒素・りん自動計測器の性能基準[12]を準用して、IC による実測値とアンモニア計の測定値の誤差がフルスケール（以下、FS）の±5%以内もしくは誤差率が 10%以内であるかどうかを検証した。

3.3 シミュレーションモデルの構成及び水質分画

ASM シミュレーションにおける反応槽のモデルとしては、完全混合押し出し流れモデルを採用した。反応槽の分割と反応槽容積を図 2 に示す。反応槽は実施設と同様に A 回路から E 回路に分割し、各回路は容積比を考慮し 1～3 分割した。また、各槽の風量バランスはライザー管の開度と処理の状況から推定した。ASM シミュレーションに使用する水質及び処理状況データを取得するため、平成 25 年 11 月から平成 26 年 9 月の間に、各回 1 時、5 時、9 時、13 時、17 時、21 時の 6 回採水調査を行った。採水サンプルは、反応槽流入水、A, B, C, D, E 回路末端の水、最終沈澱池越流水、返送汚泥である。流入水分画（流入水中の有機物等の ASM 上で用いられる物質種へのふるい分け）には WERF 法[6]を用いた。流入水分画結果を用いて ASM シミュレーションを行い、その結果を採水調査から得られた処理状況と比較して、ASM パラメータの検証を行った。

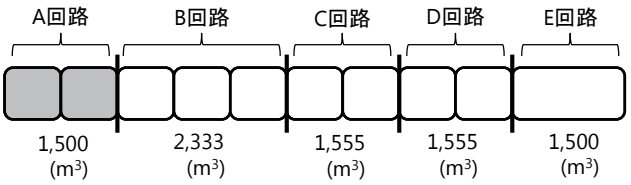


図 2　反応槽分割モデル及び容積

3.4 リアルタイム硝化制御による風量制御実験

硝化制御コントローラーの動作確認及びモデル調整のためのオフライン実験を平成 26 年 9 月から同年 11 月まで実施した。

オフライン実験完了後、リアルタイム硝化制御による送風制御実験を実施した。その際、DO 設定値については、反応槽内における微生物の安定と該当する機器（主に送風ブロアと風調弁）への安全性を考慮し、上下限値の設定を行った。

送風制御実験では、まず、制御の安定性について 2 回の 6 時間程度の制御実験（12 月実施）で確認した後、送風量削減効果と水質改善効果について、28 時間から 76 時間の連続制御実験で検証した。

4 結果と考察

4.1 アンモニア計の評価

表 1 に期間別のセンサー値と手分析値との誤差、相関係数及び決定係数を示す。

表 1　アンモニアセンサーの評価における期間別の誤差，相関係数及び決定係数

	手分析値の範囲 (mg/L)			誤差（絶対値）の平均 (mg/L)	誤差率（絶対値）の平均 (%)	相関係数 R	決定係数 R^2
評価基準				（≦2.5）	（≦10）		
当初評価期間（3 カ月間：H25年12月～H26年2月）	11.2	～	24.7	1.9	9.9	0.825	0.680
精度低下時　（1 か月間：H26年3月）	11.3	～	20.1	2.7	17	0.428	0.184
追加評価期間（5 か月間：H26年10月～H27年2月）	13.6	～	22.3	0.8	4.0	0.938	0.880

センサー値は手分析値と概ね一致しており、降雨による NH_4-N 濃度の増減に対しても良好な追従性を示した。しかし、3 か月終了時点で電極表面への汚れの付着によりセンサー値と手分析値との乖離が発生するようになった。そこで、間欠洗浄のための空気吹き出しノズルの位置と吹き出し方向を調整し、追加検証を行った。また、当初評価期間（実測値との乖離発生前）と追加評価期間（空気吹き出しノズル調整後）におけるセンサー値と手分析値との比較結果を図 3 に示す。

空気吹き出しノズルの調整後の追加評価期間については誤差及び誤差率ともに大幅に改善し、誤差の平均が 0.8mg/L、誤差率の平均が 4.0%となり、基準を十分満たすとともに、決定係数が 0.880 となり実測値とよく一致するようになった。以上から、アンモニア計を用いた最初沈澱池流出水の連続測定は可能であると評価した。

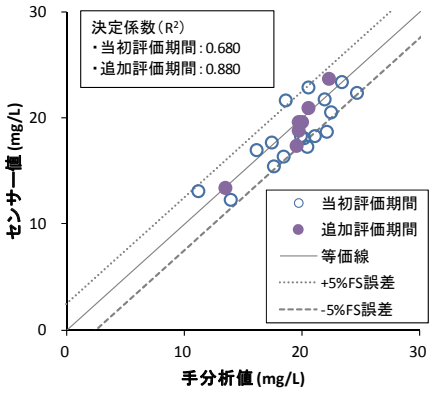


図 3　アンモニアセンサー計測値と手分析値の比較

4.2　シミュレーションモデルの構成及び水質分画の評価

採水調査により得られた水質及び処理状況データを用いて、オフラインでリアルタイム硝化計算によるシミュレーションモデルの評価を行った。パラメータの設定は、水温及び気象状況を考慮し平成 25 年 11 月 12 日～13 日に実施した採水調査の結果により決定した。反応槽流入水分画データを表 2 に示す。また、シミュレーション結果と実測結果の比較を図 4 に示す。シミュレーション結果は流入水分画によって得られた各反応回路における NH_4-N 濃度実測値と概ね一致し、時系列の変化にも精度よく対応していた。なお、活性汚泥モデルのパラメータ（全 67 種類）のうち、$K_{O2.H}$ を変更した（表 3 上段）。それ以外のパラメータ及び反応速度係数は ASM2d の定める典型値（デフォルト値）を使用した。

表 2　反応槽流入水分画データ（11 月 12～13 日）

名称	記号	値(mg/L)
溶解性非生物分解性有機物	S_I	25
溶存酸素	S_{O2}	0.1
窒素ガス	S_{N2}	0
発酵生成物	S_A	10
発酵可能な易生物分解性有機物	S_F	4
硝酸性窒素	S_{NO3}	0
溶解性無機りん	S_{PO4}	3
アンモニア性窒素	S_{NH4}	15.5
アルカリ度	S_{ALK}	200
固形性生物非分解性有機物	X_I	10
遅生物分解性有機物	X_S	83.7
非ポリりん酸性従属栄養微生物の総量	X_H	0
独立栄養微生物の総量	X_{AUT}	0
ポリりん酸従属栄養微生物の総量	X_{PAO}	0
ポリりん酸	X_{PP}	0
りん蓄積微生物の細胞内貯蔵物質	X_{PHA}	0
浮遊物質	X_{TSS}	82.275
金属水酸化物	X_{MeOH}	0
金属りん酸化物	X_{MeP}	0

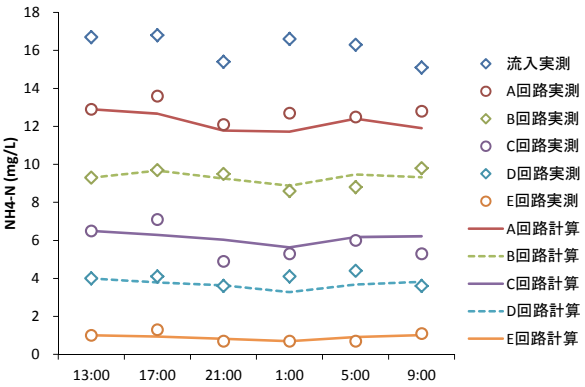


図 4　シミュレーション－実測値比較
（流入水及び各回路の NH_4-N 濃度）

4.3　オフラインによるリアルタイム硝化制御の安定性の確認

運用データ取得確認試験及び硝化制御コントローラー動作確認試験をオフラインにて平成 26 年 9 月から 11 月まで行った。この実験期間中、アンモニア計や他の既設計器、水処理コントローラーからの水量等の運用データが取得できるとともに、硝化制御コントローラーが連続して稼働し取得したデータから DO 設定値を計算できることを確認した。なお、活性汚泥モデルのパラメータのうち $K_{NH4.A}$ を変更した（表 3 下段）。これにより、NH_4-N 濃度計算結果と実測値がよく一致するようになった。その結果、晴天時及び雨天時共に流入負荷量の変動に追従し、正常な範囲で最適と考えられる DO 設定値を示すように硝化制御コントローラーを調整できた。

表 3　ASM2d の典型値から変更したパラメータ

記号	名称	説明	影響	変更	変更理由
$K_{O2.H}$	溶存酸素濃度(S_{O2})に対する従属栄養生物の飽和･阻害定数	脱窒に関連	値が大きい場合は溶存酸素濃度が高い状況でも脱窒が進行する	0.2→ $0.05gO_2/m^3$	シミュレーションによるNO_3-N濃度の計算値が実測値に対してやや低かったため
$K_{NH4.A}$	NH_4-N濃度(S_{NH4})に対する硝化細菌の飽和･阻害定数	硝化細菌の硝化に関連	値が低いほど低濃度まで硝化が進みやすくなる	1.0→ $0.4gN/m^3$	硝化制御コントローラー上のNH_4-N濃度計算結果について、低濃度域の計算結果が実測値よりやや高かったため

4.4　リアルタイム硝化制御による送風制御の安定性の確認

リアルタイム硝化制御による送風制御実験において､最初に行った 6 時間程度の日中試験の結果では、リアルタイム硝化制御実施時において通信の断絶、制御のトラブルは発生せず、導入・接続した制御設備やソフトウェアが問題なく稼働した。また、実験反応槽でリアルタイム硝化制御を用いた DO 変動制御により、流入負荷量の変動に応じたフィードフォワード制御が可能であることも確認した。また、28～76 時間の連続実験においても DO 設定値の変更に対し、実測 DO 濃度はよく追従しており、安定的に送風量を制御できることを確認した。

評価期間中の制御実績の一例として、DO 一定制御時（2 月 16 日 7 時～17 日 7 時）及びリアルタイム硝化制御時（2 月 4 日 10 時～5 日 10 時）のトレンドグラフを図 5 に示す。DO 一定制御では DO 設定値 2.5mg/L で一定しているのに対し、リアルタイム硝化制御では、流入水の負荷変動に合わせ 2.0～3.0mg/L の範囲で変動し、DO 設定値の変更に対して実測 DO 濃度の追従性は高く、およそ 10 分以内に設定値とほぼ同値となった。また､反応槽流出水質の測定結果から､同程度の NH_4-N 流入負荷量（約 20,000g/h）に対し、リアルタイム硝化制御において DO 一定制御と同等に安定的な処理水質が維持されていることが示された。

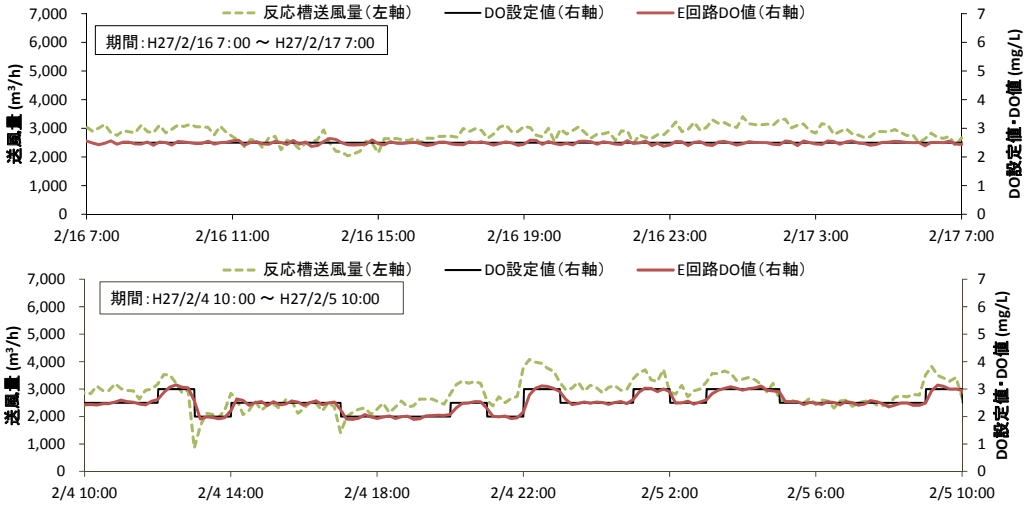


図 5　反応槽送風量及び反応槽 DO 値ー晴天時

（上：DO 一定制御結果，下：リアルタイム硝化制御結果）

4.5　リアルタイム硝化制御による送風量削減効果

リアルタイム硝化制御による送風量削減効果を検証するため、実験期間（平成 26 年 1 月 6 日～同年 3 月 12 日）における水質の変動が少ない晴天日の反応槽送風量の比較検証を行った。データは、①10：

00～翌日 10 : 00 を一日分データとする、②降雨日を除外、③反応槽流出 NH_4-N 濃度 1.0mg/L 未満（砂町水再生センター日常試験結果より）を条件として抽出した。DO 一定制御とリアルタイム硝化制御との送風量の比較結果を表 4 に示す。表 4 より、期間中の反応槽送風量平均値は、リアルタイム硝化制御が DO 一定制御に対して約 4.5%の削減となった。流入水量・負荷量平均値の差を考慮して送風量を比較した場合、流入水量に対する送気倍率で約 10%、流入負荷量に対する送気倍率で約 7.5%の削減となった。

表 4　反応槽送風量の比較結果

比較項目	DO一定制御	リアルタイム制御	DO一定制御に対する比 (%)※
参照日数(日)	15	5	—
送風量 (m^3/h)	2,876	2,747	-4.5
流入水量 (m^3/h)	864	915	5.9
流入負荷量 (g/h)	19,952	20,638	3.4
送気倍率（流入水量）	3.33	3.00	-10.4
送気倍率（負荷流入量）	0.144	0.133	-7.5

※：マイナスの場合は削減を意味する。

4.6　リアルタイム硝化制御による水質改善の効果

リアルタイム硝化制御による水質改善効果を検証するため、実験期間中の流入負荷量が大きく変動する雨天時での DO 一定制御の結果（2 月 22 日 10 時～24 日 11 時）及びリアルタイム硝化制御の結果（3 月 9 日 3 時～11 日 3 時）の比較検討を行った。期間中の DO 一定制御下のトレンドグラフを図 6 に、リアルタイム硝化制御のトレンドグラフを図 7 に示す。DO 一定制御では降雨の持ち込み溶存酸素による DO 値の上昇（2 月 23 日 12 時付近）を除き、DO 値は概ね設定値である 2.5mg/L を示した。一方、リアルタイム硝化制御では、降雨の影響による流入負荷量の増加に合わせ DO 値を上昇させ（最大 4.5mg/L）、降雨の影響からの回復過程では、流入負荷量の上昇と雨水流入によって低下した水温による硝化反応速度の低下を見込み DO 値を上昇（最大 5.0mg/L）させる制御となった。具体的には、反応槽流出水の NH_4-N 濃度は、DO 一定制御時（図 6）では 2 月 24 日 2 時付近にて、反応槽水温低下による硝化速度の低下により 5.3mg/L まで上昇した。一方、図 7 に示されるリアルタイム硝化制御結果では、反応槽水温の低下から引き起こされる硝化速度の低下を見込み DO 値を上昇させたため、反応槽流出水の NH_4-N 濃度が 1.0mg/L 未満に維持された。また、リアルタイム硝化制御では、流入負荷量の増加に対応して DO 設定値を変動させたことで、期間の平均 DO 設定値が 2.5mg/L よりも高くなり送風量は増大する結果となった。DO 一定制御におけるフィードバック制御では処理が終わった後の反応槽末端における DO 値によって送風量を決定している。一方、リアルタイム硝化制御は、流入負荷量の変動に応じてフィードフォワード的に DO 設定値の変更を行い、DO 値を変動させることにより、処理水の NH_4-N 濃度を一定に保つことを確認できた。特に、冬期の雨天時流入水に起因する水温低下によって硝化速度が低下した今回の事例では、冬季の水質安定性の低下防止に寄与できる結果が得られたことから、更なる調査研究を進める必要性を再確認するものであった。

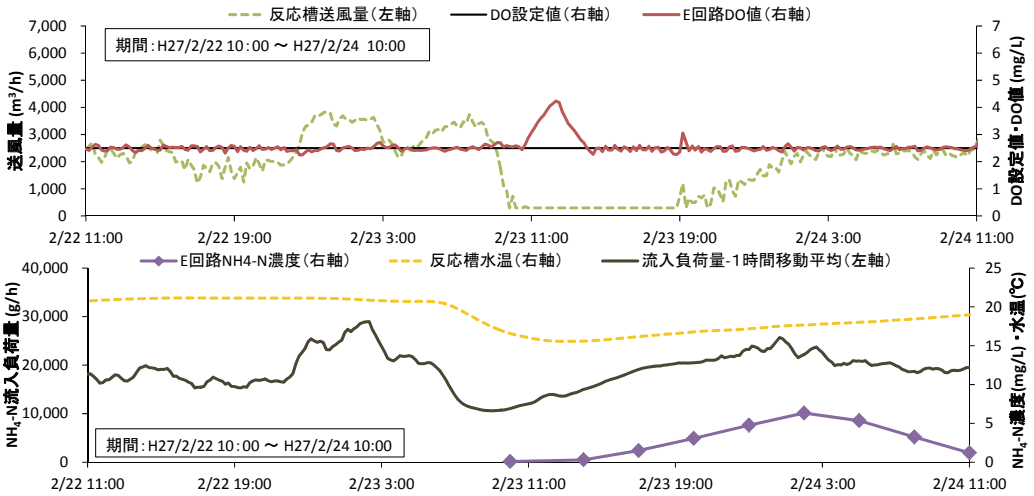


図 6　DO 一定制御結果－雨天時

（上：反応槽送風量，反応槽 DO 値，下：流入負荷量，E 回路 NH_4-N 濃度，水温）

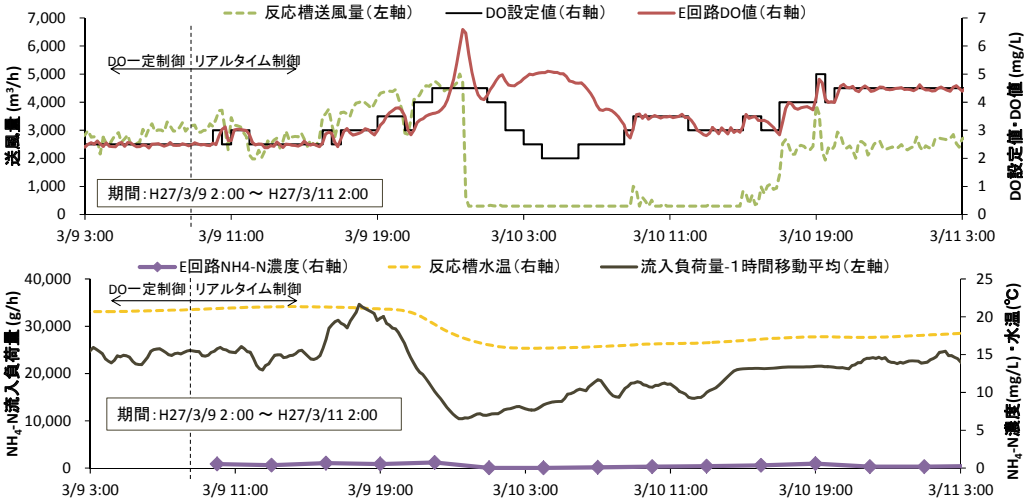


図 7　リアルタイム硝化制御結果－雨天時

（上：反応槽送風量，反応槽 DO 値，下：負荷流入量，E 回路 NH_4-N 値，水温）

5　結論及び今後の予定

本研究では、流入水質をアンモニア計で連続測定して流入負荷量を求め、反応槽内の処理状況を標準的な活性汚泥モデルである ASM2d によりシミュレートして、反応槽内で硝化反応に必要な DO 設定値をフィードフォワード的に定め、既設の DO 制御に介入させるリアルタイム硝化制御による送風制御技術を実施設で検証したものである。その結果、アンモニア計の長期安定性を確認できたほか、この制御により、晴天時では対流入量送気倍率を 10%削減でき、雨天時では処理水質の改善を図ることができた。

今後は夏季を含むより長期間にわたる調査を実施するとともに、NH_4-N 以外の項目についても調査を行い検討していく予定である。

6　参考文献

1) Amand, L., Olsson, G. and B. Carlsson, B. (2013). Aeration control – a review. Water Sci. Technol., 67(11), 2374-2398
2) Baroni, P., Bertanza, G., Collivignarelli, C. and Zambarda, V. (2006). Process improvement and energy saving in a full scale wastewater treatment plant: air supply regulation by fuzzy logic system. Environ. Technol. 27(7), 733-746
3) Henze, M., Grady, C. P. L., Gujer, W., Marais, G. v. R. and Matsuo, T. (1987). Activated Sludge Model No.1, IAWPEC Scientific and Technical Report, No. 1, IAWPEC, London. ISSN: 1010-707X
4) Henze, M. Gujer, W. Mino, T. Matsuo, T. Wentzel, M.C. Marais, G.V.R. and Van Loosdrecht, M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No.2d, ASM2d. Water Sci. Technol. 39(1), 165-182
5) Holenda, B., Domokos, E., Redey, A. and Fazakas, J. (2008). Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control, Computers and Chem. Eng., 32(6), 1270-1278
6) Melcer, H., Dold, P.L., Jones, R. M., Bye, C. M., Takacs, I., Stensel, H. D., Wilson, A. W., Sun, P., and Bury, S. (2003). Methods for wastewater characterization in activated sludge modelling. Water Environmental Research Foundation (WERF), Alexandria, VA, USA.
7) Meyer, U. and Popel, H. J. (2003). Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification. Water Sci. Technol., 47(11), 69-76
8) Sunner, N. Haeck, M. and Thornton, A. (2012). UK Experiences of Full Scale Activated Sludge Real Time Control Systems, Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2012, Session 71 -80,　5570-5588
9) Thornton, A. Sunner, N. and Haeck, M. (2010). Real time control for reduced aeration and chemical consumption. a full case study, Water Sci. Technol., 61(9), 2169-2175
10) Yong, M., Yong-zhen, P., Xiao-lian, W. and Shu-ying, W. (2006). Intelligent control aeration and external carbon addition for improving nitrogen removal. Environ. Modelling and Software, 21(6), 821-828
11) 大石亮、後藤浩之、豊岡和宏：下水処理プロセスシミュレータ SIMWATER、明電時報、Vol.310、No.5、pp.19-23 (2006)
12) 環境省水・大気環境局 : 窒素・りん自動計測器による水質汚濁負荷量測定方法マニュアル (改訂版)、pp.12-22 (2007)