

大気浄化システムの改良（性能および運用・維持管理の利便性向上）

Improved air purification system (improved convenience of the performance and operation system and the maintenance)

内場 弘毅*

Kouki Uchiba

村上 薫*

Kaoru Murakami

要 約

1998年（平成10年）から技術開発に着手したトンネル換気所に設置可能な大気浄化システムは、大気汚染物質である浮遊粒子状物質 SPM および二酸化窒素 NO_2 を同時に除去する機械式システムである。本システムは、首都高速中央環状新宿線の換気所に初採用¹⁾され、平成19年12月に1換気所、平成22年3月に4換気所で供用を開始した。その後、平成27年3月に首都高速中央環状品川線で4換気所、平成29年3月に高速横浜環状北線で3換気所に本システムが採用され、供用を開始した。本稿では、大気浄化システムの改良として、これまで実施した主な性能および運用・維持管理作業の利便性向上について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 西松式大気浄化システムについて
- § 3. 脱硝槽の形状改良による圧力損失の低減
- § 4. 加湿装置噴霧ノズルの高圧・高耐久化
- § 5. 運用情報の把握・周知
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

都市部の道路トンネル換気所へ設置されている大気浄化システムは、全14換気所（施工中2換気所を含む）での採用実績がある。今回、これまでに改良した各種内容（形状改良による圧力損失の低減、噴霧ノズルの高圧・高耐久化、再生情報の把握・周知、運用に合わせた維持管理作業の利便性向上等）を報告する。

§ 2. 西松式大気浄化システムについて

2-1 システムの概要

トンネル換気設備は、①換気ファン（排気）②電気集塵機（SPM除去）③脱硝装置（ NO_2 除去）、④消音装置で構成され、大気浄化システム工事の範囲は、②電気集塵機（SPM除去）③脱硝装置（ NO_2 除去）の製作・据付けである（図-1）。大気浄化の処理フローは、①換気フ

ァンにて汚れたトンネル内空気を吸い込み、②電気集塵機に最初に導入されることで SPM が除去され、③脱硝装置で NO_2 が吸着除去され、浄化空気を換気塔で地上へ放気する手順となる。

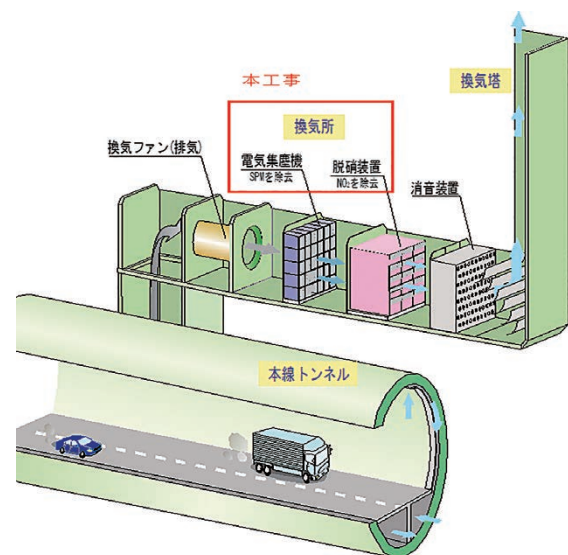


図-1 大気浄化装置イメージ図

2-2 システムの特徴

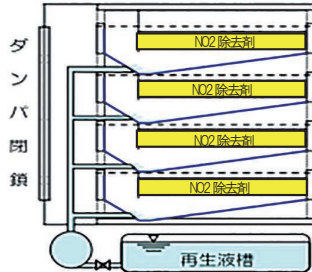
システムの除去性能は、SPM 80%以上、 NO_2 90%以上である。また、本システムは再生液を使用した現地での吸着剤再生作業により、除去性能の維持ができる。再生液は人体および環境に無害な水溶液（亜硫酸ナトリウム Na_2SO_3 の1%水溶液）を使用し、再生液は繰り返し使用

* 関東土木（支）首都高横浜換気（出）

特殊脱硝材の再生手順を以下に示します。

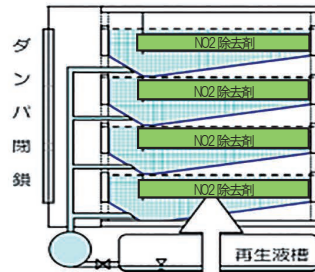
①再生液注入

1ユニットのダンパーを閉じ、通気を停止する。
（他のユニットは脱硝運転を継続）
ポンプにより各段の脱硝槽内に再生液を注入する。



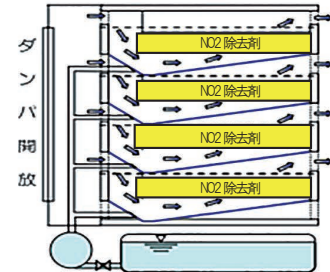
②浸漬

数分間、特殊脱硝を再生液の中に浸す。
その後ポンプにて再生液を排水する。



③通気再開

1ユニットのダンパーを開き通気を再開する。
これにより、特殊脱硝材を乾燥させる。

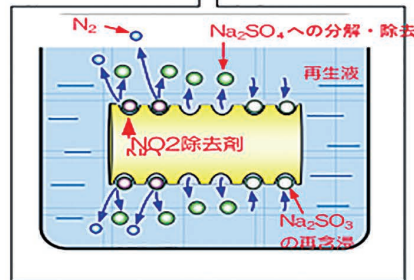
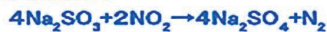


再生メカニズム

脱硝機能の再生は、 Na_2SO_3 の1%濃度の水溶液（再生液）を用いて、以下を行います。

- ①吸着した NO_2 の分解
- ②蓄積した中性塩類の溶出
- ③消耗した Na_2SO_3 の再含浸

化学反応式



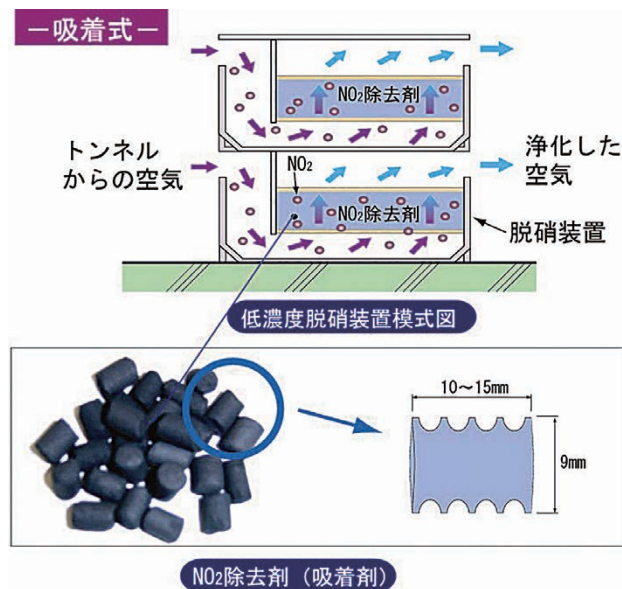
当社再生方式の特徴

- ・常温常圧で再生可能
- ・現位置再生
- ・安全な化学物質の使用

Na_2SO_3 ：食品添加剤など

Na_2SO_4 ：合成洗剤など

図一2 再生液を使用した現地での吸着剤再生作業（イメージ図）



図一3 NO_2 除去剤（イメージ図）

後、下水道放流による処理が可能である（図一2 参照）。活性炭をベースに開発した吸着剤（ NO_2 除去剤）は、軽量で耐久性が高く、常温常圧下でトンネル内空気の NO_2 を吸着除去することができる（図一3 参照）。

NO_2 除去剤の形状は、直径9mm・長さ10～15mmのペレット状であり、トンネル内空気の NO_2 濃度によって、このペレットはユニット内で25～30cm程度の厚さに敷き均した状態になっている。

トンネル内空気は、層状に敷き均された NO_2 除去剤の下面から鉛直方向に流れ（アップフロー）、 NO_2 除去剤の細孔（数nm～数 μm ）に NO_2 分子が物理吸着する。本システムでは、剤の通気面風速（アップフロー速度）は、 NO_2 濃度0.1ppmで0.8m/sを基本としている。

§3. 脱硝槽の形状改良による圧力損失の低減

道路トンネルでは、換気ファンの設定風量を維持するため等、当該工事設備による圧力損失は極力抑えることが求められている。そこで、脱硝槽の形状改良により圧力損失の低減を行った工夫を以下に述べる。

NO_2 除去剤を充填する脱硝槽の形状は、図一4に示すように従来は突起物があり、圧力損失が大きかった。そこで、品川線以降では突起物を無くし、かつ導風板を設置する等の滑らかな通気の確保を行うことで、圧力損を最大50Pa低減した（図一5 参照）。

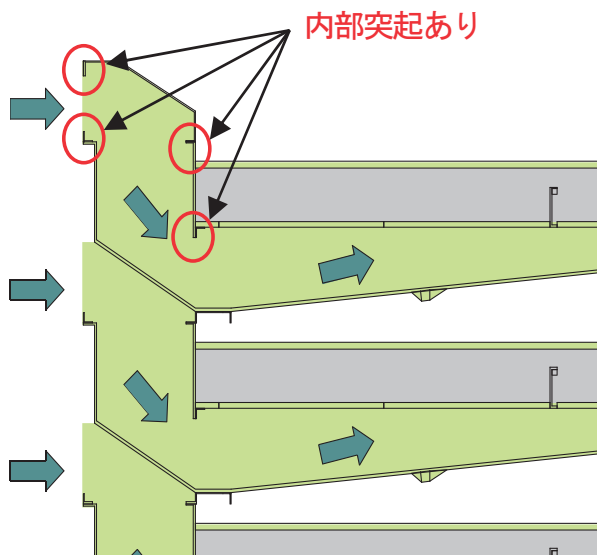


図-4 脱硝槽イメージ図（改良前）

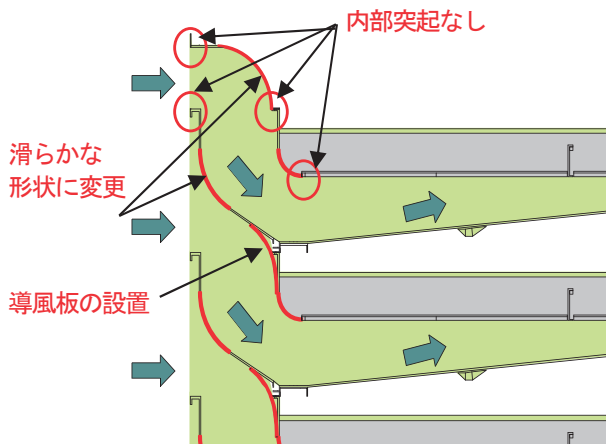


図-5 脱硝槽イメージ図（改良後）

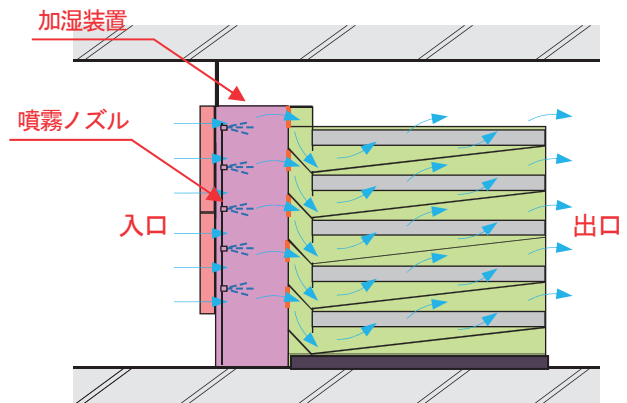
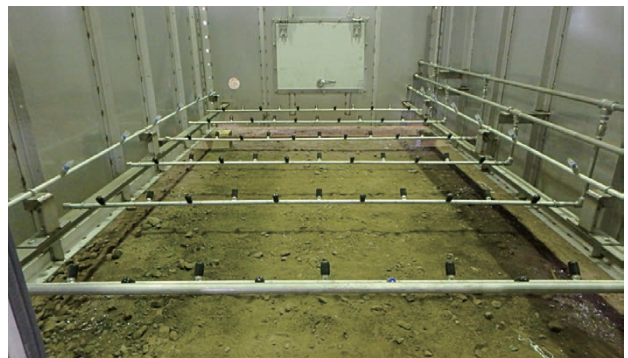


図-6 加湿装置概略図

写真-1 加湿装置
（上：噴霧ノズル設置状況，下：噴霧試験状況）

§ 4. 加湿装置噴霧ノズルの高圧・高耐久化

4-1 加湿装置の仕組み

加湿装置は、空気を取り込み口にダンパー、内部に空気の湿度を上昇させるための噴霧ノズルおよび水供給用配管で構成され、流入してくる速度約 9 m/s の大気を湿度 55% 以上に短時間で加湿し、脱硝装置に送り込む仕組みとなっている。

加湿のための噴霧ノズル数量は、処理風量による装置の大きさにより変わるが、脱硝トレイが 4 段で構成されている場合、計 200 個以上のノズルを装備している。現状使用している噴霧ノズルは平均粒径 25~30 μm 、ノズル 1 個当たりの噴霧水量は噴霧圧力 6 MPa 時で 5.2 kg/h の仕様である。加湿装置の概要図を図-6 に、噴霧ノズル設置状況を写真-1 に示す。

4-2 加湿装置の必要性

NO_2 は NO_2 除去剤の細孔に物理吸着することで除去される。除去メカニズムとして、本システムでは細孔と細孔内に毛管凝縮した水との二相吸着を期待している。

NO_2 除去率 90% 以上を保持するためには、適度な細孔分布と共に NO_2 除去剤の適度な加湿が重要である。

ここに、二相吸着とは、 NO_2 分子が細孔内の表面に吸着する固相吸着と細孔内水分に吸収される液相吸着の両方の吸着挙動のことをいう。本システムでは、剤の乾燥防止のため、装置入口でのトンネル内空気（以下、換気ガス）の湿度が 50% 未満の時は、自動で加湿を行うものとしている。

NO_2 除去剤の細孔内水分は、加湿運転により吸湿し、維持または増加する（図-7 参照）。

剤の細孔内が全て水分で満たされた状態が飽和であり、剤の飽和含水率は約 40% である。再生後の乾燥運転終了時には、剤は飽和含水率に近い状態にあり、 NO_2 除去率

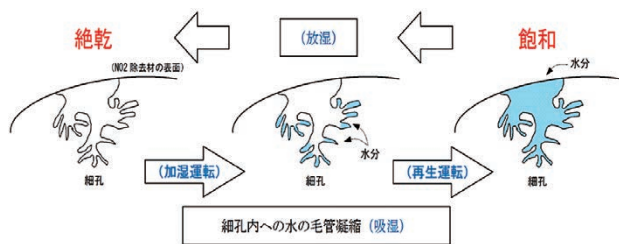
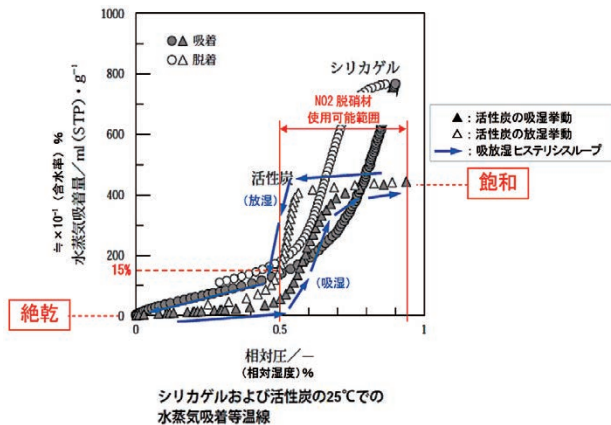
図-7 NO₂除去剤の吸湿・放湿の挙動（イメージ図）

図-8 活性炭の水蒸気吸着等温線

出典：岡山県工業技術センター，技術情報，No. 473 に加筆

90%以上を保持しうる好適な状態である。

再生後、加湿を行わないと、剤は放湿により含水率が徐々に減少する（図-7 参照）。過去の実験により剤の含水率が15%以上あれば、NO₂除去率90%以上を確保できることがわかっている。

相対湿度50%程度以下になると、含水率が急激に小さくなり（図-8 参照）、含水率15%を下回ることになる。そのまま加湿を行わなければ、剤は絶乾状態に近くなり、二相吸着のうちの液相吸着が消滅し固相吸着のみとなるので、NO₂除去率90%以上の除去性能が確保できなくなることがある。そのため、本システムでは換気ガスの相対湿度が50%未満で自動加湿を行い、NO₂除去剤の含水率を15%以上に維持するものとしている。

4-3 加湿水量の計画

京浜島での実ガス実験¹⁾では、本システムの加湿水量は処理風量あたり1.8 g/m³で必要十分であることが示された（図-9 参照）。これより、本システムの加湿水量の当初設計は1.8 g/m³と決定した。

新宿線の加湿ノズルは2 MPa仕様のため、噴霧時の水粒子径が大きく、蒸発量が低く、使用水量が多い状況であった。そこで、品川線では噴霧水压を2 MPaから6 MPaに上げた最新型の微粒子化ノズルを採用し、蒸発効率の向上を図り、全体の使用水量を減少した経済的な設備とした（図-10 参照）。ただし、NO₂除去剤の含水率の維持に必要な加湿水量は、新宿線と品川線で同等にな

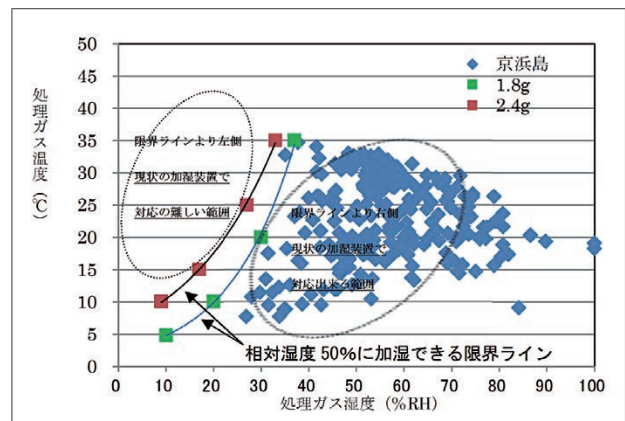
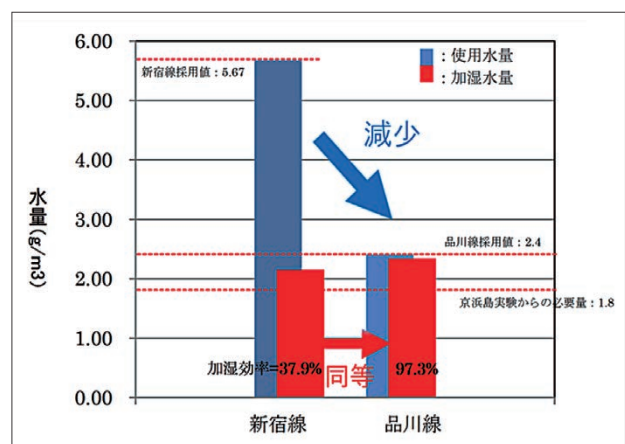
図-9 京浜島実験における処理ガスの温湿度（日平均）
※運転時間：5,074 時間（H16.5～H17.1）

図-10 加湿システム新宿線と品川線の比較

っていることがわかる。

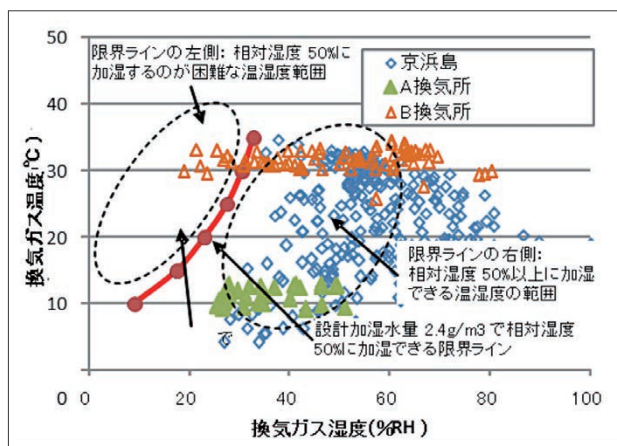
4-4 品川線供用後の換気ガス性状

品川線の加湿装置は、先に供用していた新宿線A換気所で得られていた供用時の温湿度データの中で、最も低湿度の条件（温度10℃、相対湿度20%）で加湿水量を決定し、高圧6 MPaノズルを用いて使用水量を削減したシステムを設置した。品川線での使用水量（≒設計加湿水量）は図-10に示したように2.4 g/m³になっている。

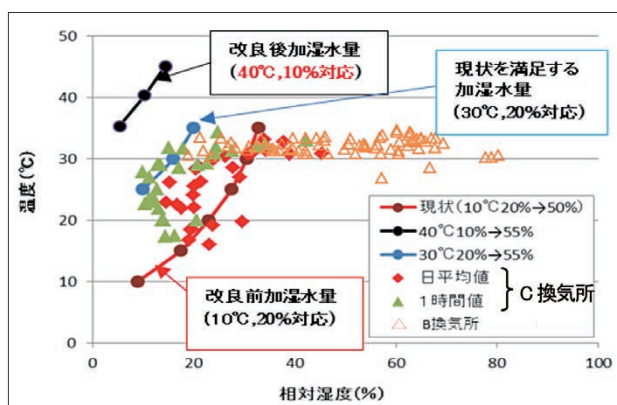
しかし、品川線供用後6ヶ月間での換気ガスは、当初想定していた温湿度条件より、時間によっては厳しい状態（温度30℃、相対湿度20%）であることが、品川線B換気所で観測された。この状態では、時間帯によっては換気ガスを相対湿度50%以上に加湿することが困難な温湿度の範囲が存在することがわかった（図-11 参照）。

4-5 品川線供用後の加湿水量

本システムでは、換気ガスの相対湿度が50%を下回るとNO₂除去率90%を維持するのが不安定となる。本件では日平均値では問題ないが、時間単位で除去性能が不安定になることから、品川線供用後の換気ガスの温湿度に対応した加湿水量を再検討する必要性が生じた²⁾。



図一11 加湿水量と換気ガス温湿度（日平均）



図一12 加湿装置の設計仕様

加湿装置の改良にあたり、以下の温湿度状態を考慮した検討を行った。

- ・品川線供用後6ヶ月間で最も厳しい実測値は、日平均値で温度30℃、湿度20%程度である。
- ・NO₂除去率を安定させるために、換気ガスの相対湿度を余裕をみて55%以上に加湿させたい。

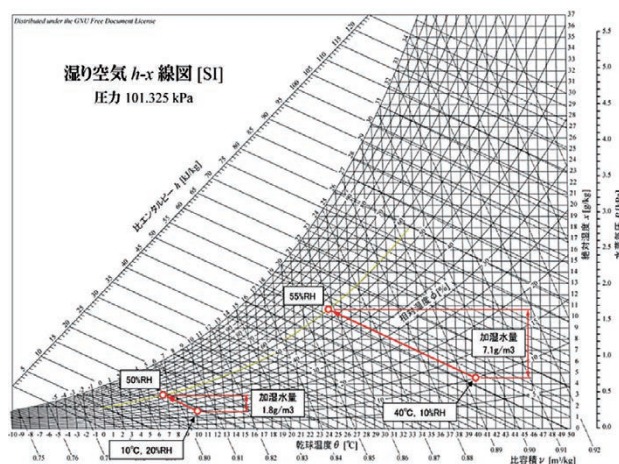
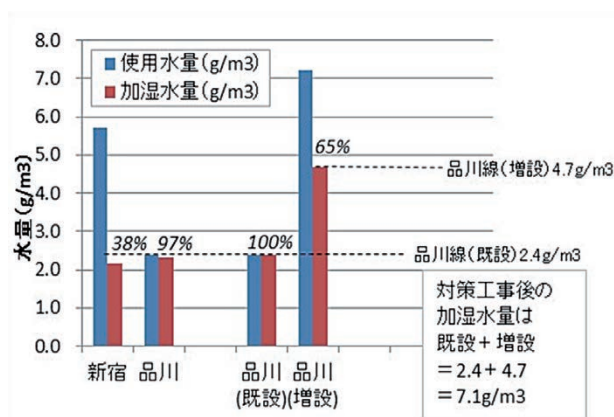
以上の項目を考慮し、加湿水量の設定は、実測に変動余裕幅を想定し、特記仕様書にある換気ガス性状の中で最も厳しい組み合わせとなる温度40℃、湿度10%（1時間値）を、相対湿度55%以上に加湿できる仕様とした（図一12参照）。この仕様は、供用データが得られていた新宿線C換気所における過去1年の温湿度データと比較しても、十分に余裕のある加湿水量になっていることを確認した。

表一1に加湿水量の検討結果をまとめる。改良後の加湿水量は当初設計に比べて約3.9倍の水量になっている。図一13は、本検討結果を空気線図上で整理したものである。

品川線での改良は、ノズルを別系統で増設することで対処した。増設するノズルは、設置スペース等の都合により、新宿線と同じ2MPa仕様のノズルとした。使用水量については、上記で設定した加湿水量に蒸発効率を考慮して求めた。40℃、10%における増設ノズルの蒸発率は、新宿線での実績から安全側に65%とした。一方、

表一1 加湿条件と加湿水量

	当初設計	改良後
加湿条件	10℃、20%RH → 50%RH	40℃、10%RH → 55%RH
加湿水量	1.8 g/m ³	7.1 g/m ³

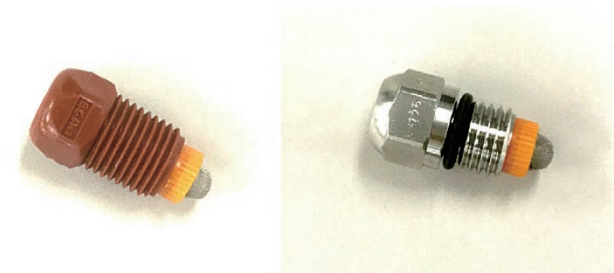
図一13 必要加湿水量（g/m³）

図一14 使用水量と加湿水量の関係

既設ノズルの40℃、10%における蒸発率は100%とした（図一14参照）。

4-6 加湿ノズルの高耐久化

現在、大気浄化システムの施工中である高速横浜環状北西線2換気所（以下、北西線）では、加湿ノズルを樹脂製からステンレス製に改良し、高圧6Mpaに対して高耐久化を図っている（写真一2参照）。



写真一2 左：樹脂製 右：ステンレス製

§ 5. 運用情報の把握・周知

5-1 維持管理日報の自動作成

北西線では、日常管理の工夫として各種計測データや各機器の運用データを取り込み、維持管理の日報を自動作成し、現場 PC に保存するようにしている。NO₂ 除去率データと運転記録を日報化することで、再生作業の把握や機器の運用状況をビジュアル化できる（図-15 参照）。図-15 では、NO₂ 除去率の低下が P-7 ポンプの故障が原因であったことを例示している。

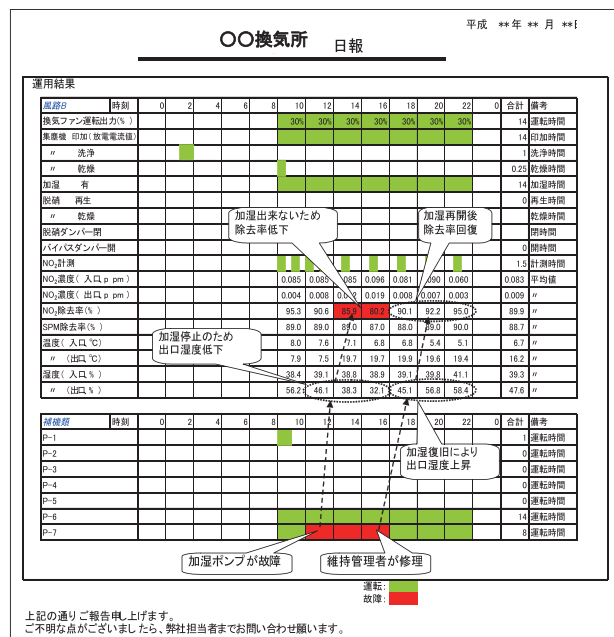


図-15 維持管理日報イメージ図

5-2 NO₂ 暴露量・再生時間のトレンドグラフ化

全換気所にて使用されている NO₂ 除去剤は、同じ材質・規格の物を使用しており、除去性能や許容暴露量は同一である。NO₂ 除去剤は NO₂ 暴露量がある一定の量に達すると除去性能が低下することが、これまでの供用実績等で確認されている。

NO₂ 暴露量は再生作業を行う事でリセットされるので、NO₂ 暴露量の実績値を日々自動集計し、トレンドグラフ化することで、再生時期の判断指標とした（図-16 参照）。図-16 では、設定した再生時期の目安（赤棒）に対して、換気運転実績（青棒）を一日単位で累積表示させている。

現在施工中の北西線からは、再生時間の時間変化をグラフ化することによって再生時間を監視し、関連する補機類の故障診断の材料としている（図-17 参照）。図-17 では、標準的な再生時間に対して徐々に時間が増えるイメージを例示している。再生時間が増えることは、関連補機類に何らかの不具合が発生している可能性が高いことから、このようなトレンドグラフ化を行うことで部品交換等の判断指標として活用できる。

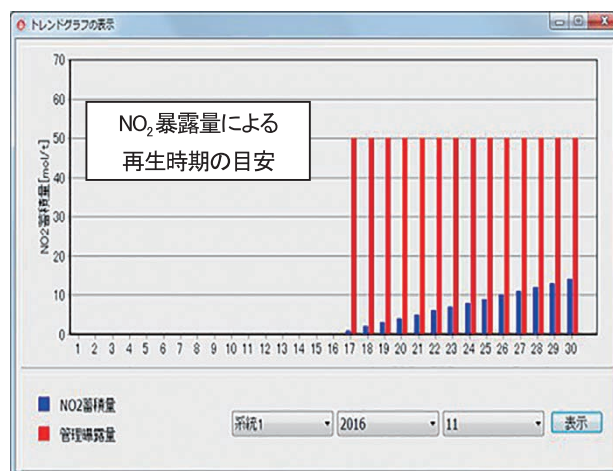


図-16 NO₂ 暴露量トレンドグラフイメージ図

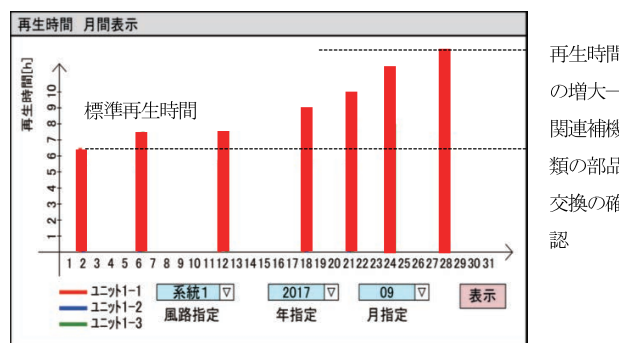


図-17 再生時間トレンドグラフイメージ図

§ 6. まとめ

大気浄化システムは平成 19 年 12 月に中央環状新宿線の 1 換気所にて供用を開始し、現在では 14 換気所（施工中 2 換気所を含む）で施工実績を得る技術になった。

本システムは、供用後の処理ガス性状が変化中、NO₂ 除去メカニズムの特性に応じた加湿装置の改良など、様々な改善を行なってきた。また、維持管理業務を通じて、維持管理業務の利便性を向上させるシステムに改良し、現場へのフィードバックを続けてきた。今後も過去の実績を活かしつつ、よりよい設備の構築と簡便な維持管理システムを目指していきたい。

最後に本システムの改良に当たりご協力頂いた技術研究所並びに関係者様方に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森田侃志, 伊藤忠彦: 我が国初の道路トンネル低濃度脱硝設備の設置 - 首都高新宿線換気所大気浄化システム -, 建設の施工企画, No.665, pp. 22-26, 2005. 7
- 2) 内場弘毅, 伊藤忠彦, 齊藤博之, 坂口泰祐: 道路トンネルにおける低濃度脱硝設備の処理ガス性状と加湿性能, 土木学会第 73 回年次学術講演会 (第Ⅶ部門) 7-059, pp. 117-118, 2018. 8