

生物学的脱臭技術

Biological Deodorizing Technology

高 木 敏 彦^{*(1)}
Toshihiko
TAKAGI

田 中 瑞 穂^{*(2)}
Mizuho
TANAKA

嘉 森 裕 史^{*(3)}
Hiroshi KAMORI

有 留 清^{*(3)}
Kiyoshi
ARITOME

抄 録

臭気を除去する方法を大きく分類すると、生物脱臭法、吸着法及び薬液洗浄法等がある。それぞれの方法には一長一短があるので、脱臭条件及び設備条件に応じて、最適な方法を選択せねばならない。一方、一般的な脱臭条件の場合には、生物脱臭法がトータルコストで優位になることが多い。そこで、本論文では、生物脱臭技術の概要、バイオキャリアを利用した充填式生物脱臭法の研究開発及び実機操業の事例について報告した。

Abstract

Deodorizing methods can be categorized into biological deodorizing, adsorption, chemical fluid cleaning etc. Since each of these has its strong points and shortcomings, an optimum method needs to be selected according to the deodorizing and equipment conditions involved. On the other hand, under normal deodorizing conditions, biological deodorizing often excels in overall treatment costs. Therefore, this paper reports on the outline of biological deodorizing technology, research and development of a packed-tower-type biological deodorizing method, and an example of operation of a commercial plant.

1. 緒 言

臭気を除去する方法を大きく分類すると、生物脱臭法、吸着法、薬液洗浄法、オゾン酸化法、燃焼法等がある。それぞれの方法には一長一短があるので、脱臭条件(除去対象物濃度・除去率等)及び設備条件(許容スペース・水処理設備の有無等)に応じて、最適な方法を選択せねばならない。

一方、一般的な脱臭条件の場合には、生物脱臭法がトータルコスト(設備費+運転費)で優位になることが多い。更に、高度な処理が必要な場合でも、生物脱臭と活性炭吸着との組合せで、経済的な優位性を維持可能と考えられる。そこで、本論文では、生物脱臭技術の概要、バイオキャリアを利用した充填式生物脱臭法の研究開発及び実機操業の事例について報告する。

2. 生物脱臭技術の概要

2.1 生物脱臭のメカニズムと特長

微生物による悪臭物質分解のメカニズムは、図1の模式図に従うと考えられており、主要反応は以下のように説明されている。

- ・ガス中の臭気成分が、水に溶解する。
- ・溶解した臭気成分が、微生物に吸着・吸収される。

- ・吸収された臭気成分が、微生物に酸化・分解される。
(微生物は、酸化時にエネルギーを得る。)

上記反応より考えると、生物脱臭は原理的に以下の特長をもつ。

- ・水溶性の臭気成分は、高効率に除去できる。
- ・微生物によって酸化・分解され易い臭気成分は、継続的に除去できる。

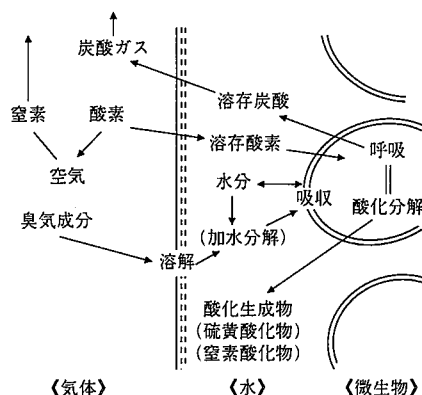


図1 生物による悪臭物質分解のメカニズム¹⁾

^{*(1)} エンジニアリング事業本部 機械・プラント事業部
環境プラント部
^{*(2)} 日鉄プラント設計(株) 環境・化学プラントエンジニアリング室
総括課長

^{*(3)} 技術開発本部 プロセス技術研究所
熱流・環境プロセス研究センター 主任研究員

2.2 生物脱臭システム

生物脱臭の特長を生かすためには、臭気成分に適した微生物を高密度に育成するとともに、以下の条件を満足させる必要がある。

- (1) 臭気成分と水分(微生物)の効率的な接触
- (2) 微生物活性維持に必要な水分・栄養分及び酸素の補給
- (3) 酸化生成物等の悪影響排除

これらの条件を満足させる手段として、図2のような充填式の生物脱臭システムがある。

このシステムでは、(1)の条件は、適切な生物担体の選択によって達成できる。なお、生物担体については、次項で詳細に説明する。(2)の条件は、散水槽を設けて生物担体に散水し、必要に応じて水に栄養分を補給したり、散水槽内の水を曝気することによって達成される。更に、酸化生成物等は散水中に溶解するので、(3)を達成するには、散水槽の水のpH調整及びブローダウンを行えば良い。

2.3 生物担体

生物担体は、生物脱臭の性能を決定する極めて重要な要素であり、種々の担体が開発されている。土壌脱臭法で利用する黒ぼく土も広い意味での担体であるが、充填式の生物脱臭では表1の担体の実機に導入されている。

著者らが使用している生物担体は、バイオフィリアと呼ぶサドル型多孔質セラミックである。これは、建設省土木研究所との共同研究“バイオフィカスWT”で、下水処理用生物担体として開発したものであるが、脱臭用生物担体として具備すべき下記の条件を、すべて満足している。

- ・臭気成分ガスと担体の効率的な接触：サドル型形状
- ・低圧損：高空隙率

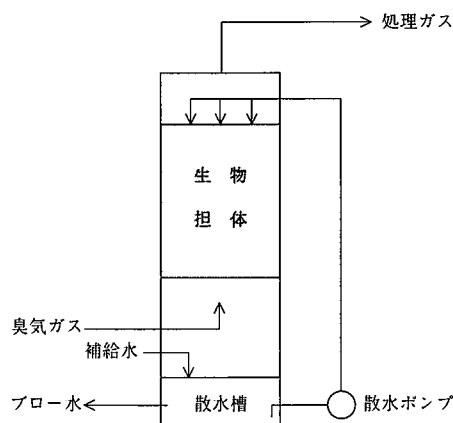


図2 充填式生物脱臭システム

- ・微生物保持量の多さ：多孔質・高空隙率・高比表面積
 - ・水分保持性：多孔質・高比表面積
 - ・微生物の高付着性：担体組成・表面の微細凹凸
 - ・性能の継続性：高強度・非劣化性のセラミック
- 当初開発したバイオフィリアは、高炉水砕(表2に主成分を示す)を主原料としたS I型(物理特性を表3、外観を写真1、製造フロー概要を図3に示す)であり、以下の特長がある。

表2 高炉水砕主成分

成分	範囲(重量%)
CaO	40~44
SiO ₂	32~35
Al ₂ O ₃	13~16
MgO	4~8
Fe ₂ O ₃	0.6~0.9

表3 S I型サドルの物理特性

項目	表面積	空隙率	単位重量
寸法	(m ² /m ³)	(%)	(kg/m ³)
3/4inch	335	77	540
1 inch	256	77	540



写真1 バイオフィリア

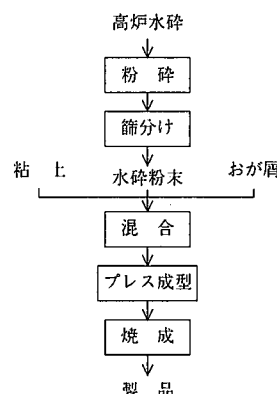


図3 バイオフィリアS I型製造フロー

表1 生物脱臭導入事例担体²⁾

担体	ビート (天然有機性繊維)	吸着剤併用型 (活性炭+ゼオライト)	多孔質セラミック	もみ殻 (同上醗酵処理品)	PVA粒子 (活性炭添着)	繊維状スポンジ (ウレタン系)
対象臭気発生源	汚泥濃縮槽 及び洗浄槽	汚水流入渠	汚泥濃縮槽 汚泥貯留槽	汚泥濃縮槽 及び調整槽	脱水ケーキ貯留塔	最初沈殿池 エアレーションタンク
設計条件						
線速度 (m/s)	0.062	0.1	0.1	0.12	0.2	0.3
空間速度(h ⁻¹)	75	225	116	240	340	540
圧力損失(mmAq)	130	100	10	84	30	30

- ・主原料の高炉水砕が、非常に安価である。
- ・カルシウムが含まれているため、アルミナ系のセラミックス等より、製造時の焼結温度が低くなるので、製造コストも割安である。
- ・カルシウム系担体なので、微生物の付着性が良好である。

但し、S I 型は耐酸性が劣るため、酸性の雰囲気等では使用できない。そこで、脱臭条件等によって適切な選択を可能とするため、新たに2種類のバイオキャリアを開発済である。その特性を表4に示す。R型は耐酸性であり、C型は耐酸性・高強度でキャリア自体に吸着力があるのが特長である。

表4 バイオキャリアの特性

型 式	SI型	R型	C型
主原料	高炉水砕	ろう石	褐炭チャー
保水率	37%	37%	50%
圧壊強度	>4kg/個	>4kg/個	>30kg/個
耐酸性*	30%	0.2%	微量

*5%硫酸に24時間浸漬後の重量減少割合

3. 充填式生物脱臭技術の研究開発

多くの研究開発を実施しているが、ここではバイオキャリアの特長である低圧損性を確認した実験、及び高空間速度を狙った硫化水素の除去研究について紹介する。

3.1 バイオキャリアの低圧損性確認実験

3.1.1 実験方法

(1)実験装置：図2に準拠(但し、水は循環せず一過放流)

充填容量：14.1ℓ

充填部：100mmφ×1800mmH

担体種類：R型 1/2, 3/4, 1 inch

(2)実験条件

利用ガス：空気(23～25℃)

空間速度(SV)：100～900h⁻¹

線速度(LV)：0.05～0.45m/s

液ガス比(L/G)：0～30ℓ/m³

微生物(汚泥量)：1g/ℓ担体

(3)圧損測定

空気流入・流出部の乱流の影響を避けるため、充填高さ中心部の1200mmで圧損を測定した。

3.1.2 実験結果

バイオキャリア充填高さ1m当たりの圧損を、図4～図6に示す。

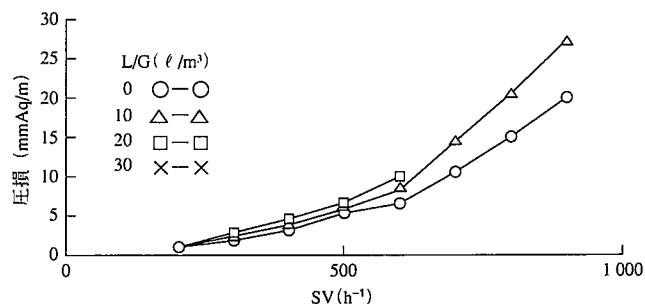


図4 バイオキャリア(1/2inch)圧損

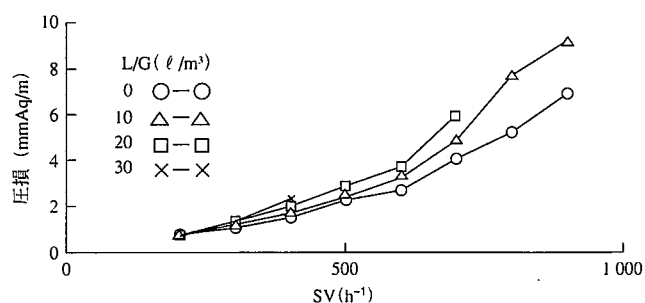


図5 バイオキャリア(3/4inch)圧損

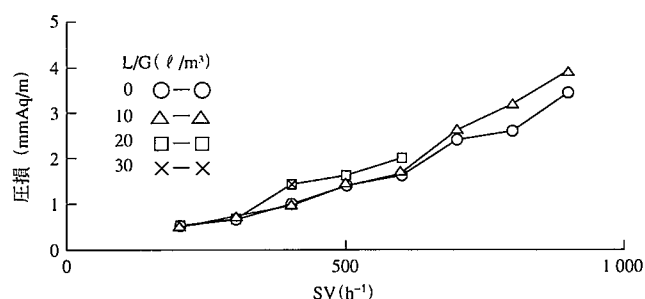


図6 バイオキャリア(1inch)圧損

3.1.3 実験結果のまとめと考察

- ・SV=100h⁻¹での圧損は、担体サイズにかかわらず、1mmAq/m以下であった。
- ・圧損は全体的に小さく、充填式生物担体の中でも、最小レベルであると考えられる。
- ・L/Gが大きい条件でSVを大きくすると、フラッディングが発生し、圧損測定できなかった。
- ・本実験では一般的な微生物付着量で圧損を測定したが、生物担体の圧損は、微生物の付着量及び活動状況等によって大幅に変動する。したがって、充填塔の設計に当たっては、それを十分考慮する必要がある。

3.2 硫化水素の除去研究

3.2.1 実験方法

(1)実験装置：図7参照

脱臭塔：充填容量：約3ℓ

充填部：145mmφ×60mmH×3段

担体種類：R型 3/8 inch

線速度LVm/s=体積速度SVh⁻¹/20000

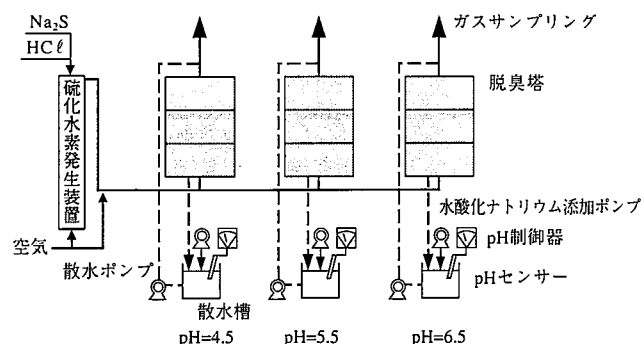


図7 硫化水素除去実験装置

散水槽：1 ℓ

(2) 微生物の固定化・馴致方法

下水処理場曝気槽より採取した活性汚泥を、担体充填容積 1 ℓ 当たり MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) が 1 g となるように散水槽に添加し、約 1 日間散水ポンプで担体上に散布して固定化した。その後、 $SV=200h^{-1}$ で通ガスして微生物を馴致した。

(3) 実験条件

キャリアガス：空気(約 20℃)
 臭気ガス：硫化水素(濃度設定目標 10ppm)
 空間速度(SV)：200～2 400 h^{-1}
 散水槽 pH：4.5、5.5 及び 6.5 に制御
 pH 調整方法：pH 計により、水酸化ナトリウム自動添加
 散水方法：15 分散水、15 分停止の繰返し
 散水量：1.2 $m^3/m^2 \cdot h$
 補給水：工業用水

(4) SV の設定方法

脱臭塔出口硫化水素濃度が、検出限界(0.1ppm)以下で安定していることを確認できたら、供給ガス量を増やして、SV を 200 h^{-1} ずつ増加させた。

(5) 栄養塩添加

当初は添加していなかったが、処理不調が発生したので、窒素及びりんを添加した。

(6) 散水のブローダウン

当初適宜ブローダウンしていたが、実験途中から全量入替え方式に変更した。

3.2.2 実験結果

立上げ時の硫化水素除去状況を図 8 に、散水 pH=6.5 の脱臭塔における SV が最大の実験条件での硫化水素除去状況を図 9、その脱臭塔の圧損を図 10 に示す。

- ・散水 pH=6.5 での脱臭が最も安定しており、SV が 2 200 h^{-1} までは、出口硫化水素濃度が 0.1ppm 以下であった。
- ・立上げ約 1 か月後頃に、散水 pH 制御値にかかわらず、相繼いで硫化水素除去能力が低下した。その時点で散水槽内の水を分析したところ、窒素及びりん濃度は 1mg/ℓ 以下であった。そこで、微生物の活動・増殖に窒素及びりんが不足していると判断し、散水槽内に栄養塩(りん酸アンモニウム)を添加することにした。添加

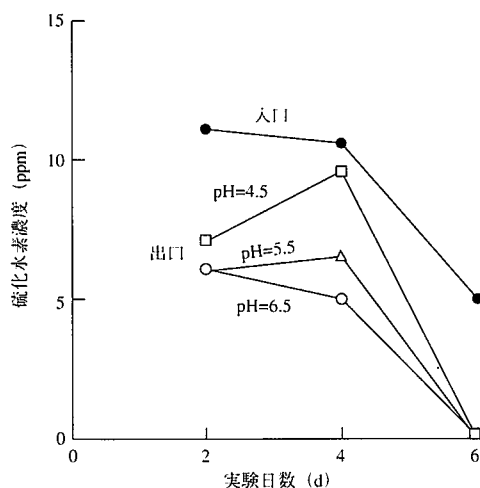


図 8 立上げ時の処理状況

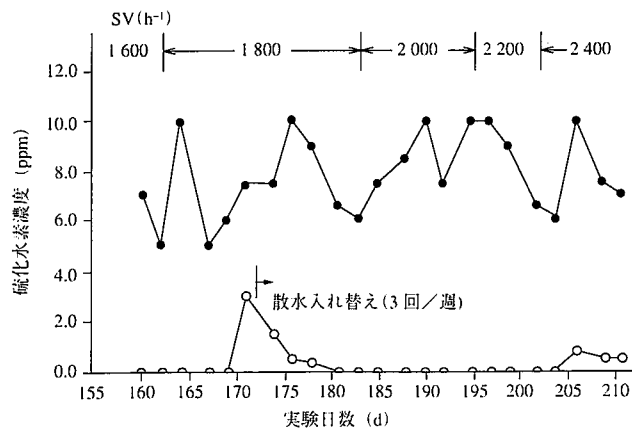


図 9 硫化水素除去実験結果(散水 pH=6.5)

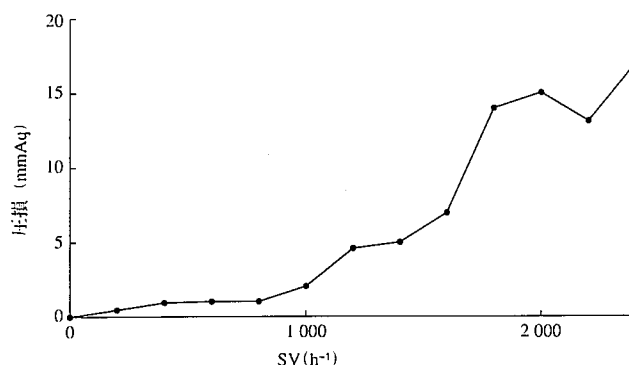


図 10 硫化水素処理時の圧損

直後の散水槽内の窒素及びりん濃度が、20mg/ℓ 以上になるようにしたら、その翌日には処理能力が回復した。その後、同一条件で週 3 回栄養塩を添加したところ、それ以降は栄養塩に起因する処理不調は発生しなかった。

- ・散水の制御 pH の低い順に、SV が 1 400～1 800 h^{-1} で処理不調が発生した。そこで、それ以上の SV では、週 3 回散水を全量入替えたら、処理不調は解消した。
- ・散水中の硫酸イオン濃度を測定して硫黄バランスを求めた結果、吸収された硫化水素は、ほぼ完全に酸化され、硫酸になっていることが確認された。また、pH 制御用の水酸化ナトリウムの使用量は、除去した硫化水素の約 2 倍のモル量となっていた。

3.2.3 考察

- ・立上げ時の脱臭塔入口硫化水素濃度変動が大きかったため、出口濃度も変動していたが、6 日目には 0.1ppm 以下になっていたため、この時点で微生物は馴致されていたと判断できる。
- ・栄養塩欠如は、硫化水素除去性能劣化の原因になることは確実である。なお、栄養塩は薬品を添加する必要はなく、下水処理水等の利用も可能と考えられる。
- ・散水を循環していると、散水中に生物活性阻害物質が増加する。本実験だけでは、その物質を断定することは困難であるが、実験状況から判断して、硫酸イオン又は硫酸ナトリウム濃度の上昇が、阻害原因と推定できる。
- ・散水 pH が高い方が硫化水素の除去が安定していたことより判断して、硫化水素の水への吸収が、除去の律速になっている可能性が高い。

- ・ 散水 pH、栄養塩及び散水ブローダウン等の条件を適切に制御すれば、 $SV=2\ 200h^{-1}$ で硫化水素濃度を10ppmから0.1ppmまで除去できる。
- ・ 硫化水素が硫酸まで酸化されていることより判断し、脱臭塔内の優勢微生物は硫酸酸化細菌である。
- ・ 硫化水素を水酸化ナトリウム水溶液等で吸収する化学的脱臭法では、吸収液のCOD(化学的酸素要求量)が高くなる。したがって、その酸化処理が必要となる危険性があるが、本システムでは硫化水素が系内で酸化されるので、ブロー水の酸化処理は不要と考えられる。
- ・ SVの増加に伴い、脱臭塔圧損のばらつきが増加していたのは、微生物の増殖及び剥離が原因と考えられる。
- ・ 本実験は空気(酸素濃度約21%)をキャリアガスにしているの、キャリアガスの酸素濃度が低い場合には、その影響を加味する必要がある。

4. 脱臭設備の実機化³⁾

新日本製鐵で実機化した脱臭設備を、表5に示す。このうち、No.2の設備概要と生物脱臭操業データを以下に紹介する。

4.1 設備概要

本設備は、汚水・排水処理用活性汚泥曝気槽等からの排ガス臭気の脱臭用として建設された。周囲の環境条件から特に厳しい脱臭条

件が求められたので、生物脱臭の後段に活性炭吸着を備えている。設備フローを図11に、主仕様を表6に、外観を写真2に示す。

本設備で除去する臭気成分は、脱臭塔内や散水槽内で酸化されて酸性物質に変化するため、放置すると系全体が酸性となり、脱臭率が低下する。そこで、生物処理に適したpH7程度(中性)を保つため、散水を水酸化ナトリウムで中和する設備を備えている。なお、本設備は全自動運転方式を採用しており、常時は無人運転である。

4.2 操業状況

設備は順調に操業を続けており、図12～16に示すように、主要臭気成分(硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチル及びアンモニア)の脱臭塔出口濃度は、非常に安定している。

表6 生物脱臭設備主仕様

項 目	主 仕 様
処 理 量	70m ³ /min
生物脱臭塔	FRP製角型：5 130mm×2 560mm×3 000mmH
充 填 材	バイオキャリアSI型 3/4inch 充填量：21m ³

表5 脱臭設備実機化実績

No.	対象臭気発生源	脱臭風量 (m ³ /min)	活性炭 吸着設備
1	下水処理場汚泥処理	44×2系列	有
2	汚水・排水処理場	70×1系列	有
3	下水処理場汚泥処理	75×1系列	有
4	ポンプ場沈砂池	70×2系列	有
5	散水ろ床	550×1系列	無
6	ポンプ場汚水・雨水沈砂池	93×1系列	無
7	ポンプ場汚水・雨水沈砂池	90×1系列	無
8	下水処理場沈砂池	150×2系列	有
9	下水汚泥乾燥機	350×2系列	有

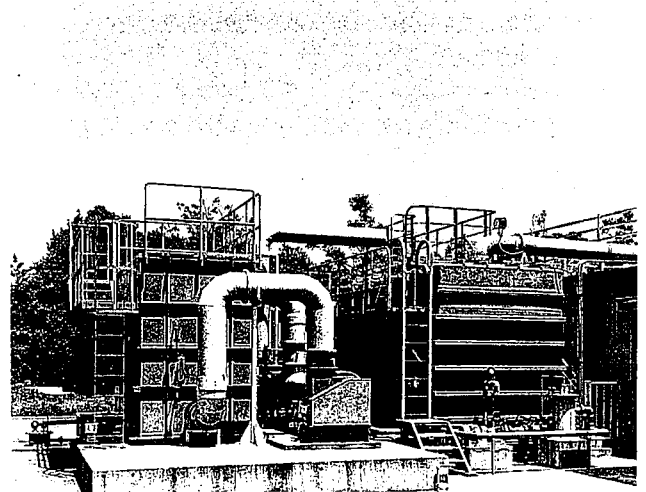


写真2 実機脱臭設備

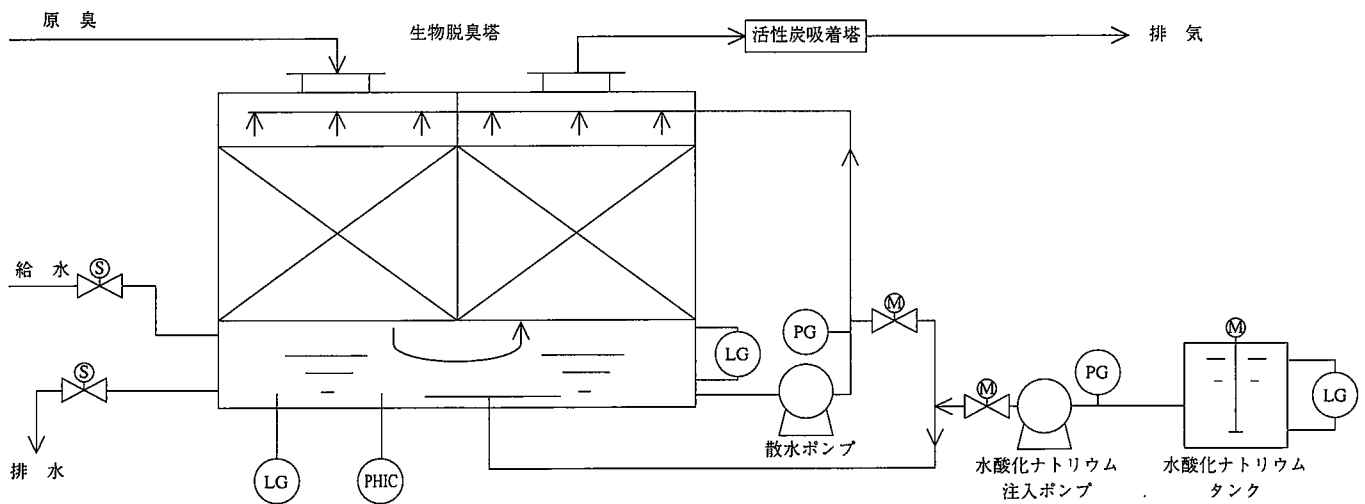


図11 設備フロー

・主要臭気成分の脱臭塔出口臭気強度は、すべて2.5以下であった。これは、この程度の入口臭気であれば、生物脱臭塔だけで悪臭防止法の規制臭気強度(2.5~3.5以下)を遵守できることを示している。

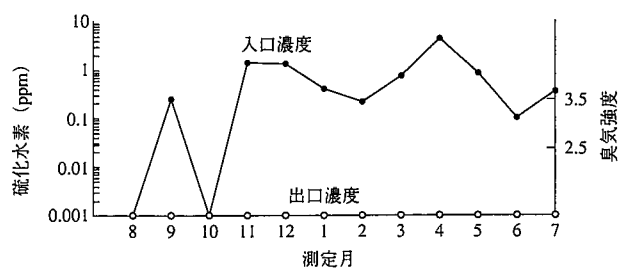


図12 硫化水素の年間除去実績

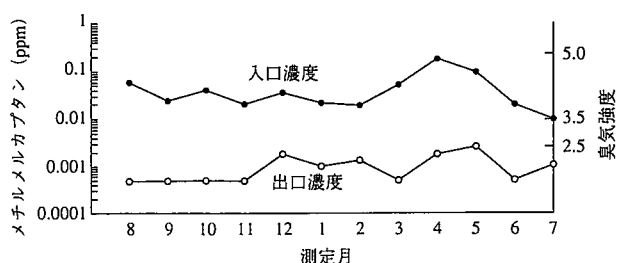


図13 メチルメルカプタンの年間除去実績

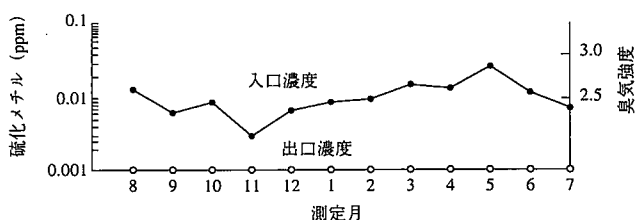


図14 硫化メチルの年間除去実績

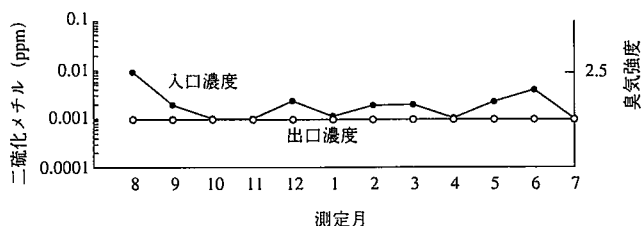


図15 二硫化メチルの年間除去実績

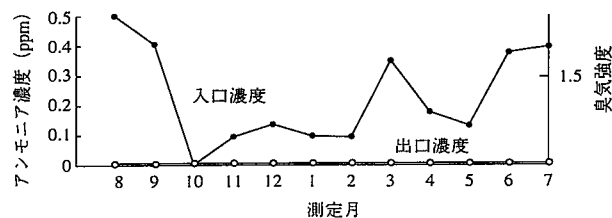


図16 アンモニアの年間除去実績

- ・官能試験法による臭気濃度測定では、入口が23 000のとき、出口で31であった。(測定時 $S V=200h^{-1}$)
- ・本運転状況と同等の脱臭条件を前提として、本法及び他の脱臭法の設置面積及び運転費比較を表7に示す。

表7 設置面積及び運転費の比較

脱臭方式	本法	土壌脱臭法	活性炭吸着法	薬液洗浄方法
設置面積	1	18	0.8	1
運転費	1	2.8	8	7

5. 結 言

以上説明したように充填式生物脱臭法には多くの特長があるが、主としてトータルコストが割安となるため、近年急速に普及している。それでも臭気に関する苦情は依然として増加しているので、今後更に脱臭ニーズが高まり、しかも高脱臭率が要求されることは確実である。しかし、いかに高脱臭率が要求されるとしても、生物脱臭法を前段処理として採用すれば、トータルコストが削減できることには変わりはない。そこで、著者らは今後とも生物脱臭の能力及び効率向上を図るとともに、生物脱臭以外の方法との最適な組合せによるコストパフォーマンスの高い脱臭法の開発・実機化に取り組んでいく所存である。

参照文献

- 1) 環境庁大気保全局特殊公害課編集：悪臭防止技術の手引き(X)。東京、(社)臭気対策研究協会、1994、p.68
- 2) 竹島正：下水道協会誌。30(7)、4(1993)
- 3) 高木敏彦、田中瑞穂：環境管理。31(2)、153(1995)