神鋼環境ソリューション技報
2009年度・Vol.6・No.2
12
KOBELCO ECO-SOLUTIONS
ENGINEERING REPORTS

目　　次　　CONTENTS

1　＜巻頭言＞
『環境革命』実現のカギ

2　講演会抄録
機能性ケイ酸塩ガラスの製作
―光・分相・結晶化をキーワードとして―
"Production of Functional Silicate Glasses"
―Keywords are Optics, Phase Separation and Crystallization of Glass―

9　水素化脱塩素精製法（HDRプロセス）による微量PCB汚染絶縁油処理
―絶縁油再生リサイクルプロセスの実証―
Treatment of Insulating Oil Containing Very Small Amounts of PCBs by Hydro Dechlorination and Refining (HDR) Process

15　北九州PCB廃棄物処理施設向けPCB汚染物等処理設備
―プラズマ溶融分解技術による PCB汚染物処理技術の実用化―
PCB-Contaminated Waste Treatment System for Kitakyushu PCB Treatment Facility
―Commercialization of PCB-Contaminated Wastes Treatment System Using Plasma Melting Technology―

21　膜分離活性汚泥法の当社1号機における初期運転管理
～浜松市城西浄化センターの運転状況～
Introduction of our first commercial MBR（=Membrane Bio-Reactor）system installed in Shironishi Sewage-Treatment Center, Hamamatsu City, and it's operation control of primary stage

31　大阪沖埋立処分場排水処理施設
―フェニックス海面埋立型 処分場向け排水処理施設―
Leachate Treatment Facilities at Osaka Offshore Reclamation Disposal Site

38　製品・技術紹介

＜巻頭言＞

『環境革命』実現のカギ

大阪大学大学院 工学研究科
環境・エネルギー工学専攻 教授
工学博士 **池 道彦**
Michihiko Ike

レスター・ブラウンによれば，21世紀は「エコロジーの原則に従って世界経済を再構築する」時代であり，この変革を『環境革命』と呼ぶ。世界の経済や生活様式を大きく転換させてきた産業革命，IT 革命に次ぐ第３の革命ともいわれる環境革命は，温暖化に代表される地球環境危機への強い認識から生まれたものであり，自然と共生する持続社会の構築を目指す変革である。オバマ大統領によるグリーン・ニューディールの提唱などを見ていると，環境革命もにわかに現実味を帯びてきたように思えるが，革命という言葉とは裏腹に一夜にしては成らず，今世紀半ばを目指した息の長い緩やかな変化によって成就されるものであろう。環境技術に関わる者として，この革命の一端を担う立場にあることには非常な遣り甲斐を感じている。

産業革命は蒸気機関の発明を契機とした産業の機械化により，また IT 革命は高性能コンピュータによる情報技術の急伸により，いずれも画期的な新技術が主導することで世界の価値観，ひいては社会や文化を変えていった。これに対し環境革命では，人類が価値観を変える契機となる地球環境問題が先に生じ，これを解決するための技術革新が求められている。これまでと逆の，価値観の変化が技術を主導する革命である。原子力，太陽電池などは，産業革命における蒸気機関のように，環境革命の決め手となる脱温暖化技術にも思えるが，環境の問題は一つの新技術によって全てを解決することはできない。エネルギーが手に入っても，モノはどうするのか；有機材料は二酸化炭素またはバイオマスから作らねばならないし，レアメタル等の無機資源も環境負荷なしで完全循環しないといけない。これまでにない環境適合型リサイクル技術，物質生産技術が必要となる。さらには，これら産業活動の全てが，水，空気，土壌といった環境資源の健全性を損なうことなく行われなければならず，環境保全・浄化技術にも変化がもたらされる。革命の担い手となる環境技術者は，あらゆる分野の先端科学技術を駆使し，しかもそれらを地球・産業システムの中で適正に組み合せ，ときには選択利用するトータル・エンジニアリングの優れたセンスをも持ち併せるスーパーマンとなることが期待されているといえよう。

スーパーマンの登場を容易に期待はできないなかで，環境技術者にとって重要なのは，環境革命の契機ともなっている“価値観の転換”ではないだろうか。脳みその革命である。例えば，従来の下水処理技術開発では，いかに水をきれいにするか，その際に廃棄物となってしまう余剰汚泥の発生をどう最小限にとどめるか，といった環境負荷低減が主眼となってきたが，下水処理場を BOD という化学エネルギーが運搬され集約されるエネルギーステーションであるという視点から捉え直せば話は変わる。少々水質を犠牲にしようが，BOD をバイオマスである余剰汚泥に高い収率で転換すること，生じた汚泥を高効率でエネルギー化することが主目的となり，従来とは全く異なる技術が組み込まれた，新しいデザインの下水処理場ができあがる。もちろん，水質保全や汚泥の最終処分について無視することはできないため，最終的には従来の視点を交えた再検討が必要ではあろうが，常識という制約をはずした発想で技術を考え直す契機になり，画期的な環境技術・システムが生まれるかもしれない。

環境技術者の脳みその革命の積み重ねで，環境革命が現実のものになることを期待している。

講演会抄録
機能性ケイ酸塩ガラスの製作
—光・分相・結晶化をキーワードとして—
“Production of Functional Silicate Glasses”
—Keywords are Optics, Phase Separation and Crystallization of Glass—

安盛敦雄*
Atsuo Yasumori
香川博行**
Hiroyuki Kagawa
多田篤志***
Atsushi Tada

This is an abstract of the lecture by Prof. A. Yasumori in June 29, 2009 at Harima Plant. He is the professor of, Department of Materials Science and Technology, Faculty of Industrial Science and Technology, Tokyo University of Science and has rendered many distinguished services in the field of research of glasses. Point of view of his lecture was ; Development of functional glasses looking ahead to our glass lining equipments. Contents of his lecture were ; Introduction of various functional silicate glasses by using a phase separation and crystallization and so on.

ま え が き

2009年６月29日に東京理科大学 基礎工学部 材料工学科の安盛教授を播磨製作所にお迎えし，当社のグラスライニング機器における今後を見越した高機能性ガラスの開発という観点でご講演頂いた。安盛教授は無機マテリアル学会の評議員，（社）日本セラミックス協会情報委員会の副委員長，（社）ニューガラスフォーラムニューガラス大学院委員会委員等を務められ，ガラスの研究においてご活躍されておられる。本稿はガラスの光，分相，結晶化現象に着目した様々な機能性珪酸塩ガラスの先端技術についてご講演頂いた内容の抄録である。

1. ガラスの分相現象

ガラスの分相とは，単一相のガラスが複数の相に分離する現象のことである。複数成分からなるガラスが均一な液相として存在している場合に，温度の低下にともない，単一相状態よりも２相の混合物状態の方が自由エネルギーが低くなる領域が存在する。このような領域におかれたガラス融液は，２相にわかれた方が熱力学的に安定な状態となるため分離する。

1.1 ガラスの分相機構

図１に２成分ガラスの相平衡図を示す。ここで赤線はガラスが不混和となる領域の境界線を表してい

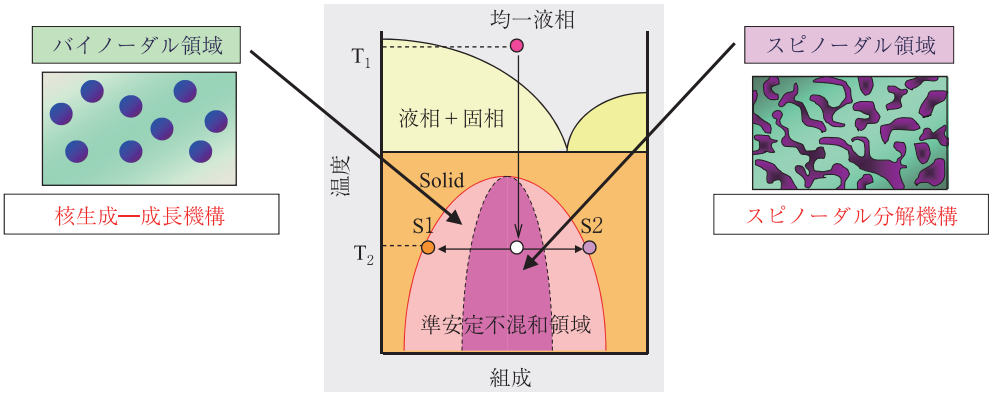


図１　２成分ガラスの相平衡図と分相機構

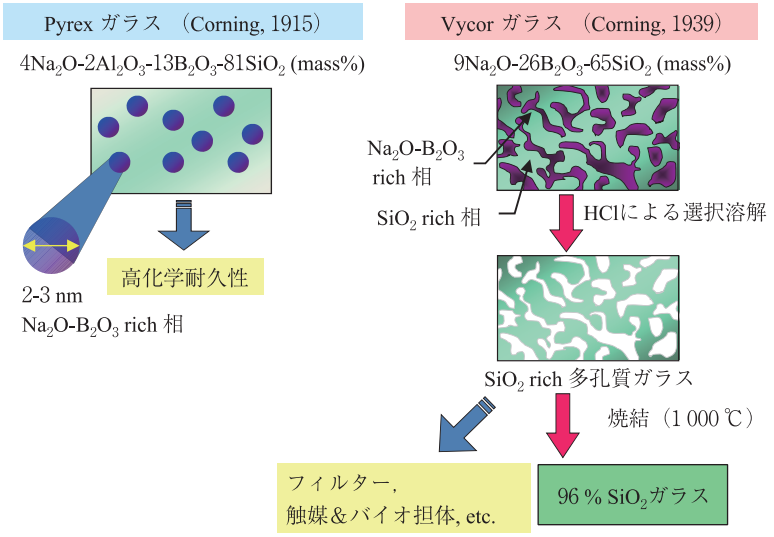


図２　分相現象をもちいた実用ガラス例

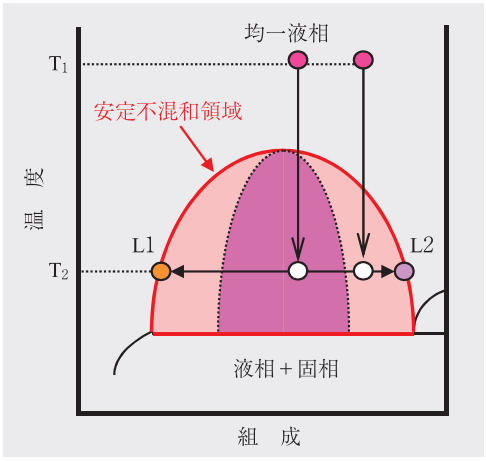


図３　安定不混和領域が存在する相平衡図

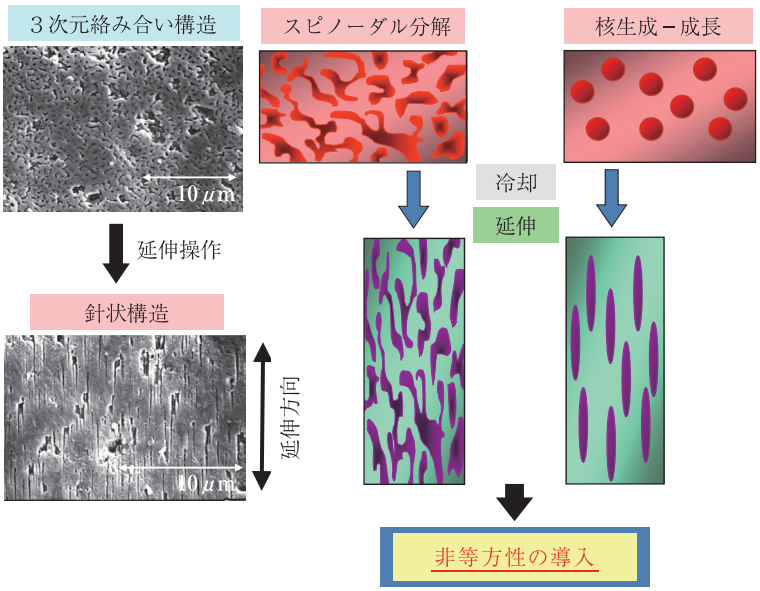


図４　延伸操作による分相組織の変形

る。破線は，自由エネルギー曲線の変曲点の軌跡を表し，スピノーダルと呼ばれる。不混和領域は，液相線よりも上まで伸びて存在する場合と液相線よりも下に存在する場合がある。図１は後者であり，このように液相線よりも下に存在する場合を準安定不混和領域と呼ぶ。

分相現象はガラスが不混和領域に置かれたときに発生するが，不混和領域内の赤線と破線で囲まれた領域では，まず核が発生しそれが成長する核生成―成長機構によって分相する。一方，スピノーダル（破線）の内側では，ガラス融液は熱力学的に不安定となり，核生成をともなうことなく分相（スピノーダル分解機構）する。図１に示すように，核生成―成長機構では，絡み合いのない球形粒子状に相が分相し，スピノーダル分解機構では，絡み合いの程度が高い非球形状に相が分相する傾向を示す。

1.2　分相をもちいて作られるガラス

分相現象は，実用化されているガラスの生産にも利用されており，Corning 社より製品化されている代表的な分相ガラスを図２に示す。

Pyrex ガラスは，核生成―成長機構による分相を利用したガラスであり，Na_2O-B_2O_3 がリッチな相が核として分相し，その周辺が SiO_2 リッチな相となるため，化学耐久性に優れたグラスとなる。

Vycor ガラスは，スピノーダル分解機構による分相を利用したガラスであり，分相によって生じた Na_2O-B_2O_3 がリッチな相を塩酸により選択的に溶解させることで，SiO_2 がリッチな多孔質ガラスが残る。えられた多孔質ガラスは，フィルタや触媒担体として使用されているほか，焼結して96 %SiO_2 のガラスとしても使用されている。

2.　安定不混和を利用した機能性材料の製作

図３に示すように，不混和領域が液相線よりも上に存在する場合，その領域を安定不混和領域と呼ぶ。安定不混和領域での分相ならびに，分相組織の結晶化を利用することで，新たな機能性グラスを製作することが可能となる。以下にその例を紹介する。

2.1　延伸操作による分相組織の変化

安定不混和融液の状態で分相したガラスに，冷却過程において延伸，圧縮の操作をおこなうことにより，分相組織の形状，大きさを変形させることが可能である。

例として図４にスピノーダル分解により分相した

組織を延伸した場合の変形例を示す。この技術を利用することにより，ガラス中に非等方性を導入することができ，分相機構による組織の制御に加えて，マイクロメートルオーダーで材料制御をおこなうことが可能となる。

2. 2　ポリスケールテクノロジーによる高機能性材料の創製

高機能性の材料には，性能を発揮するための鍵となる原子（キーアトム）があり，キーアトムを効率的に形成させることが，高機能性材料の製作にとって重要となる。たとえば図５に示すように，材料を分相させ，さらに相組織を選択的に結晶化させることで分相組織内にキーアトムの結晶を形成するというように，ミクロな状態からマクロな状態まで材料の形成を制御する（ポリスケールテクノロジー）ことで，より高度な機能性材料を製作することができる。

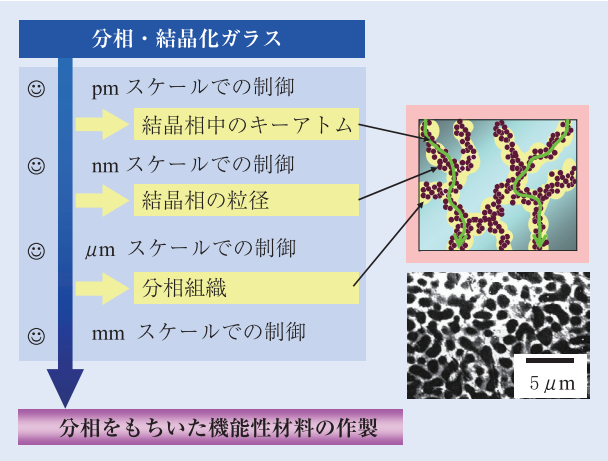


図５　ポリスケールテクノロジーによる機能性材料の製作例

以下にポリスケールテクノロジーを適用して製作した機能性材料の例を示す。

2. 2. 1　光多重散乱をもちいた発光材料

発光材料であるユーロピウム（Eu）をドープした $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ 系ガラスを，分相組織の大きさを制御しながらスピノーダル分解で相分離させ，その分相組織内に Eu を発光因子として結晶化させることにより，高輝度の発光材料を製作することができる。本材料に励起光を照射すると，図６に示すように連続した分相組織による光導波効果と光多重光散乱の作用によって，発光強度が増大する。

また図７に示すように，Al_2O_3 添加量の調整によって，分相組織の大きさと形状を制御することが可能であり，相組織を制御することで発光強度を変化させることが可能である。

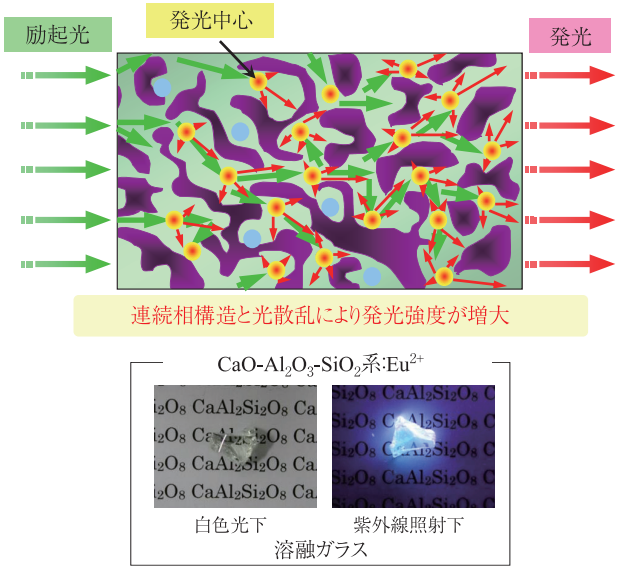


図６　光多重散乱をもちいた発光材料

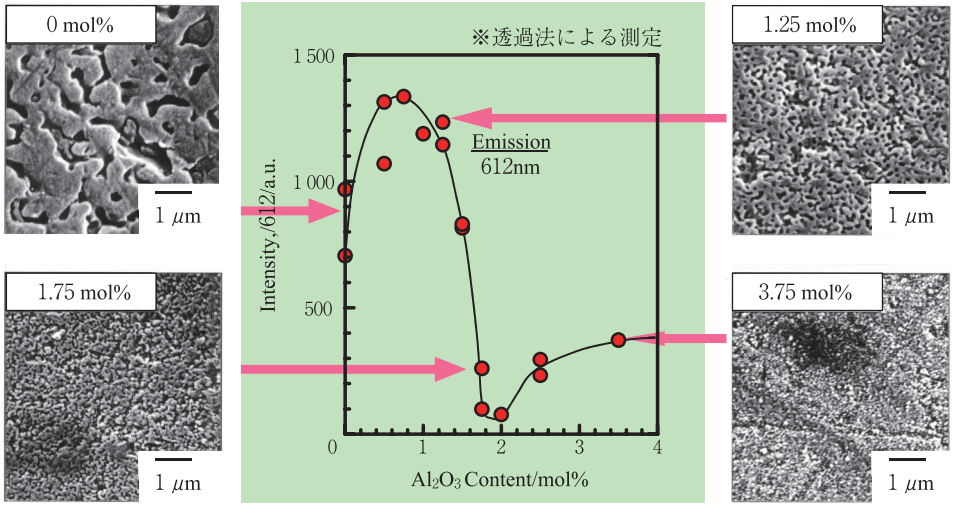


図７　Al_2O_3 添加量による Eu^{3+} イオンの発光強度の変化

この発光材料は，白色 LED 用や FPD 用の高輝度蛍光体としての利用が期待される。

2. 2. 2　分相を利用した光触媒材料

紫外光の照射により有機汚染物質等の分解が可能なアナターゼ相チタニア（TiO_2）は，触媒活性が高く，化学的にも安定で無害無毒であるため，もっとも実用化されている光触媒であるが，大きな反応面積をえるために，ナノメートルサイズの微粒子で利用しようとするとハンドリングが難しく，製造プロセスも複雑であることから，比較的高価な材料である。

この問題は，分相，結晶化現象を利用することにより，解決することが可能である。図８に示すように SiO_2-TiO_2 の均一融液を安定不混和領域で分相させ，冷却過程でアナターゼ TiO_2 相を結晶化させる。この段階では，SiO_2 リッチなガラス相中に TiO_2 結晶相が存在しているが，苛性ソーダ等でエッチングすることで，SiO_2 ガラス相が選択的にエッチングされ TiO_2 結晶相が表面に露出する。

このようにして製作した材料は，図９に示すように，ナノメートルサイズの TiO_2 粒子が SiO_2 のバインダーによって繋がれて，マイクロメートル以上の大きなサイズの粒子となっているため，ハンドリングが容易となる。図10に示すように，エタノール水溶液からの水素発生量から本材料と市販の光触媒の触媒活性の度合いを評価した結果，本材料は大粒子でありながら，表面に存在する微粒子の TiO_2 相によって大きな反応面積をえられるため，市販のチタニアと比較して高い光触媒活性を有していることがわかる。また原料は，熱処理プロセスでいったん均一融液となるまで溶解されることから，汎用品であるルチル相チタニアや珪砂を原料としてもちいることができ，製造コストについても低減が可能である。

このようにポリスケールテクノロジーを利用することにより，市販されている光触媒材料が抱える問題点を解決した材料を製作することが可能である。

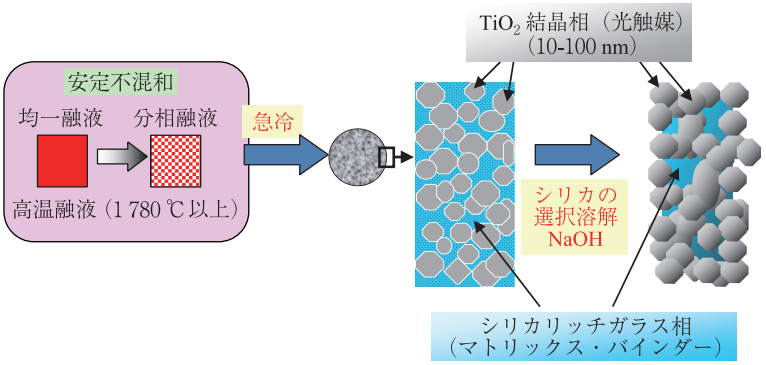


図８　分相を利用した TiO_2-SiO_2 系光触媒材料の製造プロセス

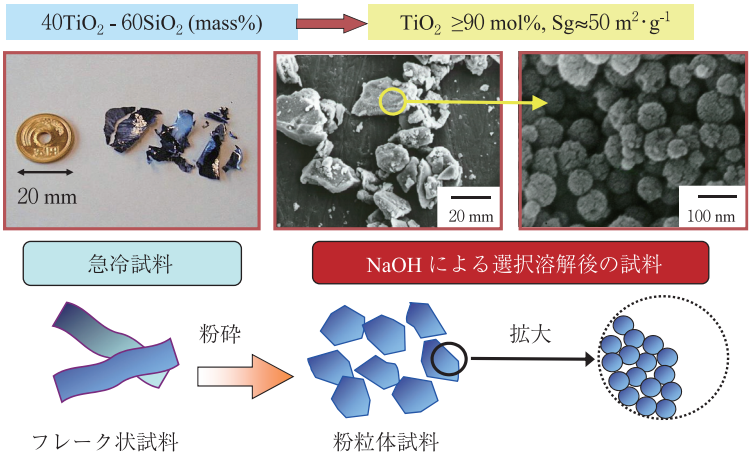


図９　分相を利用した TiO_2-SiO_2 系光触媒材料の製作例

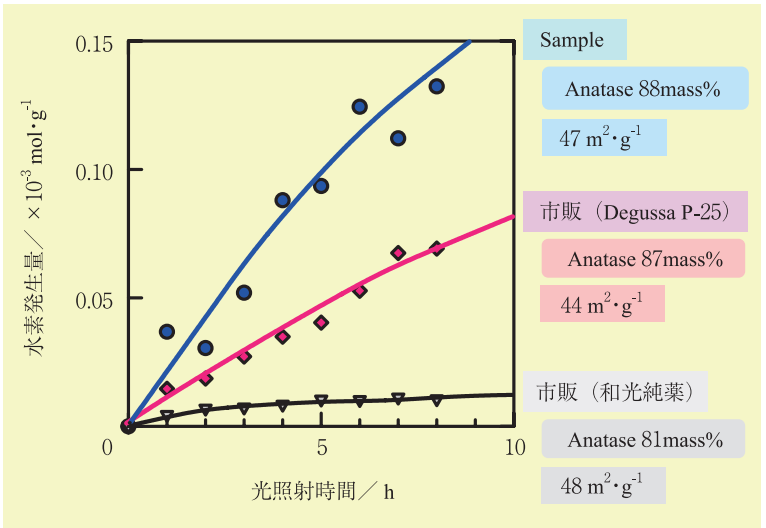


図10　分相を利用した TiO_2-SiO_2 系光触媒材料の触媒活性

3.　光をキーワードとした新たな機能性材料

以下には光の利用をキーワードとした新たな高機能性材料の製作に関して紹介する。

3. 1　光触媒と吸着剤の複合化

前章で取上げた光触媒のさらなる高機能化を図る

ために，光触媒と吸着材の複合化を試みた。光触媒を吸着材と複合化することにより，希薄な汚染物質が捕集可能となり，さらに紫外光が照射されない夜間においても，汚染物の除去が可能となる。

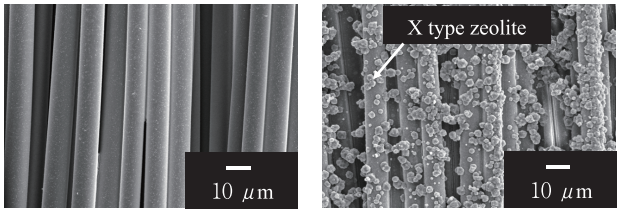
図11に示すように，C ガラス（硼珪酸ガラス）製のガラスクロスにチタニアをコートし，さらにガラスクロス繊維の表面に吸着材としてゼオライトを担持させ，チタニア―ゼオライトの複合材料を製作した。ゼオライトは，結晶中に微細孔を有するアルミノ珪酸塩のことであり，微細孔内に水や揮発性有機汚染物質等を吸着可能な吸着材である。

チタニア―ゼオライト複合材料とチタニアコートのみの試料を 2–プロパノール環境下に置き，紫外光照射後の 2–プロパノールと反応生成物であるアセトンと二酸化炭素の濃度の時間変化を図12に示す。チタニア―ゼオライト複合材料では，表面に露出していた光触媒の一部がゼオライトで覆われることにより，光触媒による汚染物質の分解能が低下することが懸念されたが，チタニア―ゼオライト複合材料の方が短時間で 2–プロパノール濃度が低下した。

2–プロパノールは，光触媒による分解反応の過程で，中間反応物としてアセトンとなり，さらに二酸化炭素に分解されるが，複合材料の方が中間反応物のアセトン発生量が少ないにも関わらず，分解後に発生する二酸化炭素の濃度は早く増加する結果となった。

これは，複合材料の場合，2–プロパノールがゼオライトに吸着され，その状態で光触媒により分解されるためと考えられる。いったんゼオライトに吸着されることで除去効率が向上し，チタニアと 2 プロパノールの接触機会が増加することにより，分解効率も向上したと考えられる。複合材料では，分解過程で発生したアセトンもゼオライトに吸着され，一部は未吸着，または放出されるために，チタニアコートのみのサンプルよりも発生量が少なくなったものと考える。（図13参照）

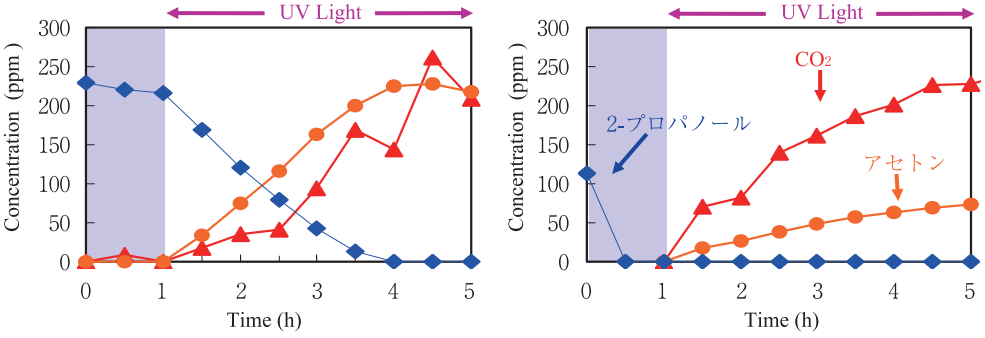
このように，光触媒と吸着材を複合化させることにより，汚染物質を高効率で除去可能な高機能性の



TiO_2-SiO_2 薄膜
担持ガラスクロス

チタニア－ゼオライト
複合ガラスクロス

図11　光触媒―吸着材複合体の製作例



選択溶解 TiO_2-SiO_2 試料

チタニアーゼオライト複合材料

図12　光触媒―吸着材複合体の汚染物質分解能

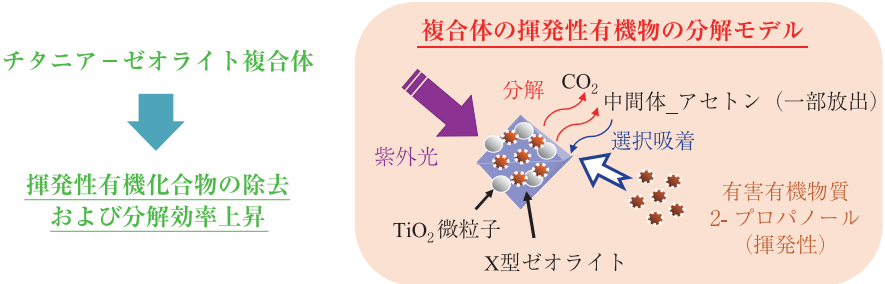


図13　光触媒―吸着材複合体の汚染物質分解モデル

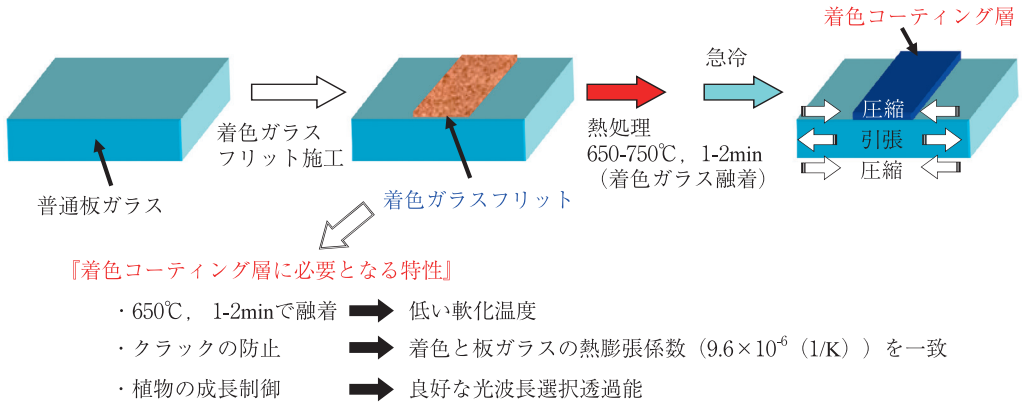
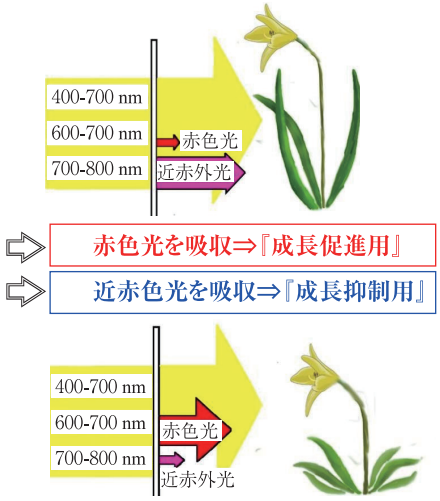


図14　着色コーティング板ガラスの製造プロセスモデル

表1　可視光域に吸収端を持つ遷移金属

金属	電荷数	配位数	吸収中心波長（nm）
Co	Co^{2+}	6	520
	Co^{2+}	4	600～700
Cu	Cu^{2+}	6	750～800
Ti	Ti^{3+}	6	550
Fe	Fe^{2+}		≒1 000
	Fe^{3+}	4	430



材料をえることが可能となる。

3.2　高強度な光形態形成反応制御材料の製作

3.2.1　光形態形成反応とその現状

現在，農作物生産の現場では，植物成長ホルモンや照射光の波長分布により植物成長の制御が検討されている。光の波長に対する植物の応答を利用して，成長や分化などの形態を制御する技術を光形態形成と呼び，照射される光の波長によって，植物の成長促進，抑制が可能である。一例を挙げると，光受容体の一種であるフィトクロムの反応が成長に影響する植物では，660 nm の赤色光を照射した場合に成長は抑制され，730 nm の遠赤色光を照射した場合には成長が促進されることが知られている。

植物工場等においては，LED 等の人工光源により，所望の波長の光を照射し植物の成長制御を実施しているが，ランニングコストが問題であり，太陽光をもちいた成長制御が望まれている。太陽光を利用する場合，所望の波長をえるために色素着色高分子フィルムがフィルタとして使用されている。高分子フィルムは，低コストかつ波長の選択透過性も良好であるが，長期の耐候性や機械的強度が劣り，多量の廃棄物が出ることが問題となっているため，高強度で優れた耐候性を備えた材料の開発が求められている。

3.2.2　風冷強化ガラスを利用した光形態形成材料の製作

太陽光を利用した光形態形成反応材料の問題を解決可能な材料として，着色ガラスの適用を試みた。**図14**に示すように，着色板ガラスを生産するために新たな製造ラインを整備すると高コストとなるため，従来の板ガラスの表面に着色ガラスをコーティングすることで，光形態形成反応制御用の着色ガラスの生産を検討した。また，機械的強度を増すために，着色ガラスフリットを施工した板ガラスを650～750 ℃，1 ～ 2 min で熱処理した後急冷し，ガラス表面に圧縮応力を発生させて強化する風冷強化処理を施し強化ガラスとする。

ここで着色コーティング層は，風冷強化の熱処理中に融着させるため，低い軟化温度かつ板ガラスと同じ熱膨張係数のガラスである必要がある。さらに光形態形成反応を制御するために，光波長の選択透過能を付与する必要があり，**表1**に示すような可視

光域波長を吸収する遷移金属を添加しなければならない。遷移金属の添加例として，Co^{2+} をドープしたガラスとその可視光域波長の透過率を図15に示す。図15より，成長を抑制する660 nm の波長を含む500～700 nm の波長の光が吸収されるため，成長促進を促す光が選択透過可能となることがわかる。

また成長促進制御に本ガラスをもちいるためには，現在使用されている高分子フィルムと同等の A 値と PPF 透過率を有している必要がある。A 値とは光の赤色の度合いを示し，PPF 透過率とは光合成有効光量子束（Photosynthetic Photon Flux）のことである。光合成は葉緑素に入射する光量子の数によって左右されるため，有効波長の光を照射した場合の，単位面積あたりの光量子の透過数を示す PPF 透過率を考慮することが重要である。現在，Co^{2+} のドープ量とコーティング厚みが A 値と PPF 透過率に及ぼす影響を調査しており，Co_3O_4 ドープ量を 0.6 mass%，コーティング層厚みを0.3 mm とした場合に，高分子フィルムと同等の A 値と PPF 透過率がえられ，成長促進を促す光の照射が実現できる可能性がある。

このように，板ガラス上に着色ガラスコーティングを施し，風冷強化処理を施すことにより，高強度で優れた耐候性を備えた光形態形成反応制御材料をえることが可能となる。

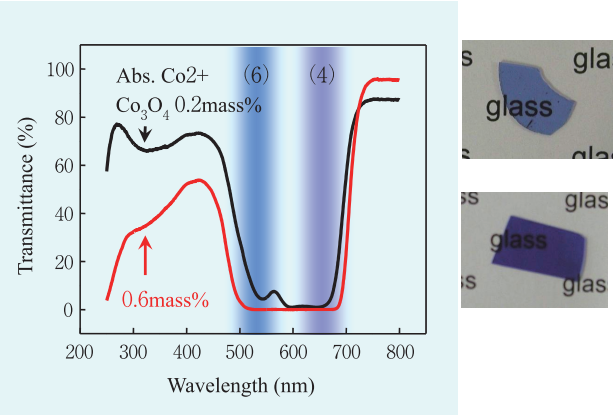


図15　Co^{2+} ドープガラスの製作例と可視光吸収特性

む　す　び

分相現象，結晶化現象を利用したポリスケールテクノロジーを始めとして，様々な高機能性珪酸塩ガラスの製作例の一端を紹介した。今回紹介した機能性ガラスをグラスライニングへ直接適用することは難しいが，ポリスケールテクノロジーやその他の方法を利用して新しいライニング用ガラスを開発し，製作することは可能であると考える。

今回紹介した技術や機能性材料を参考または利用して，新たな機能を備えたライニング用ガラスのアイデアが産まれ，開発，製品化されることを切に願う。

*東京理科大学 基礎工学部・材料工学科 教授　**プロセス機器事業部 生産部 製造室　***商品市場・技術開発センター プロセス技術開発部 新規プロセス室

水素化脱塩素精製法（HDR プロセス）による微量 PCB 汚染絶縁油処理

Treatment of Insulating Oil Containing Very Small Amounts of PCBs by Hydro Dechlorination and Refining (HDR) Process
―絶縁油再生リサイクルプロセスの実証―

小倉正裕*
Masahiro Ogura

箕輪　元**
Hajime Minowa

大開健司***
Kenji Ohiraki

水素化脱塩素精製法（HDR プロセス）は，水素とスカベンジャー（生成する塩の捕捉剤）による触媒脱塩素化に基づく技術である。2009年５月，オーストラリアのヤング市にある20 m^3/d 商用施設において，微量 PCB 汚染絶縁油処理の実証試験をおこなった。処理油，排ガスおよび廃アルカリ中の PCB およびダイオキシン類は，日本の基準値を充分に下回った。試験前，試験中，試験後における環境大気および作業環境中の PCB，ダイオキシン類についても日本の基準値を満足した。HDR プロセスは効果的かつ安全な PCB 分解処理システムであることが確認された。

Hydro Dechlorination and Refining (HDR) process is based on catalytic dechlorination with hydrogen and scavenger. In May 2009, the verification tests of insulating oil containing very small amount of PCBs were executed at 20 m^3/d commercial plant at the Young site in Australia. Test results showed that the content of PCBs and dioxins in product oil, flue gas and waste alkali were substantially less than the Japanese regulations. Before, during, and after the tests, PCBs and dioxins in atmospheric environment and working environment were also sufficiently less than the Japanese regulations. Consequently it is confirmed that HDR process is an effective and safe treatment system for low concentration PCBs destruction in insulating oil.

***Key Words*：**

PCB（ポリ塩化ビフェニル）	Polychlorinated Biphenyl
水　　素　　化	Hydration
脱　塩　素　化	Dechlorination
触　　媒	Catalyst

【セールスポイント】

微量 PCB 汚染油をバージングレードと同等のクリーンな絶縁油に再生し，3R の推進，CO_2 削減および化学物質リスクの低減に貢献する低コスト・低環境負荷なプロセスである。

ま え が き

PCB（Polychlorinated Biphenyl）は化学的に安定で金属腐食性が無く，耐熱性，電気絶縁性に優れることから，トランス，コンデンサ等の絶縁油，熱媒などに使用されてきたが，その毒性が明らかとなり，適正処理が求められている。[1] 日本国内では，大量保管者である各電力会社等による自社処理および日本環境安全事業株式会社（JESCO）による国内５箇所（北九州，豊田，東京，大阪，北海道）での広域処理がおこなわれている。[2]

しかし，2002年に日本電機工業会の調査で，PCBを使用していないはずの電気機器等に非意図的に微量のPCBが混入したものがあることが新たに判明した。その量は，トランス等約120万台，OFケーブル約1 400 kmと推計されている。[3] 環境省は，2006年３月から2009年３月にかけて国内９施設において，高温焼却法による微量PCB汚染廃棄物の処理試験を実施しており[4]，2009年11月に「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」施行規則の一部を改正し，環境省の個別認定による焼却処理を認めることとした。[5] しかし，微量PCB汚染物の量は上述のとおり非常に多く，汚染容器の処理を含めた処理体制の整備が課題となっている。

本報では，これら微量PCB汚染油の処理技術として，水素化脱塩素精製法（Hydro Dechlorination and Refining Process, HDRプロセス）によるPCB無害化および劣化絶縁油の再生を検討した結果を報告する。HDR法では，PCBの無害化のみならず，新油と同等の性状を有するクリーンな絶縁油に再生することが可能であり，3Rの推進，温室効果ガスの削減および化学物質リスクの低減に大きく貢献することが期待される。

1. HDR法の概要

1.1 無害化の基本原理

本法の基本原理は，触媒存在下でPCB汚染絶縁油に水素ガス，スカベンジャーを加え，約300～320℃，約3.4 MPaで脱塩素化分解する無害化処理方法である。**図1**に示すように，主な反応生成物は，ビフェニルおよびスカベンジャー塩（塩化アンモニウム等）である。

反応時には，絶縁油中に含まれる窒素や硫黄は，アンモニアや硫化水素に転換される。また，油の経年劣化による酸化物も水素化され，酸素は水となる。この水素化生成油を洗浄水および苛性ソーダで洗浄することにより，新油と同等のクリーンな油に再生することができる。また，触媒存在下での水素による脱塩素化反応であり，ダイオキシン類等の副生成がない。

1.2 技術の特長

本技術は，CSIRO（Common Scientific and Industrial Research Organisation, オーストラリア科学産業研究機構）とTransgrid（ニューサウスウェールズ（以下，NSW）州政府が経営する送電会社）が，ナフサ水素化反応技術を応用して開発した技術であり，オーストラリアおよびアメリカ合衆国において，Hydrodec社が経営するPCB含有絶縁油のリサイクルプラントとして実用化され，商用稼働している。処理実績を**表1**に示す。オーストラリアでは2006年より20 m^3/d設備の商用運転を開始し，SUPERfine™という商品名で再生絶縁油を販売している。新油と同等の品質であることから，バージンオイルと同程度の価格帯で販売されている。アメリカ合衆国オハイオ州

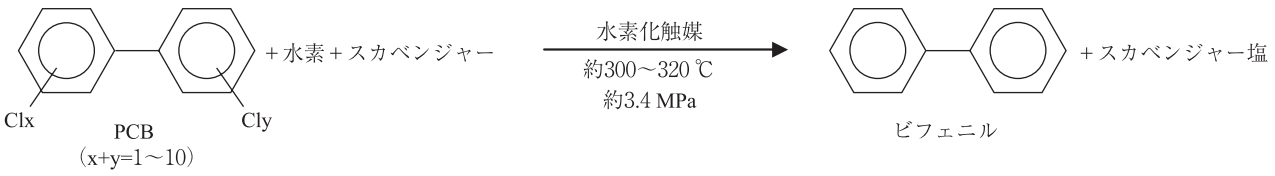


図1 PCBの水素化脱塩素反応

表1 海外におけるHDR法の処理実績

実施場所	PCB濃度	設備規模	処理実績
オーストラリア NSW州ヤング	2～50mg/kg （PCB汚染物40％）	20 m^3/d	2006年運転開始 2008年実績3 900 m^3/年
アメリカ合衆国 オハイオ州カントン	2～5 mg/kg （全て非PCB汚染物）	80 m^3/d	2008年10月開始 2009年後半，稼働率100％に上昇

カントン市の80 m^3/d 商用施設の全景およびオーストラリア NSW 州ヤング市の20 m^3/d 商用施設の外観を**写真１，２**に示す。アメリカ合衆国での評価は高く，ミシシッピ州に120 m^3/d の施設を建設中である。

プロセスの主な特長は以下のとおりである。

①安全性

PCB，ダイオキシン類を水素化反応により無害化でき，原理的にダイオキシン類等の有機塩素化合物の副生成がない。

②経済性

絶縁油の経年劣化による生成物を除去し，バージングレードと同等の性状に再生できる。微量 PCB 汚染物処理にともなう新油購入および汚染洗浄油の焼却処理費用と比較し，非常に安価である。

③ CO_2 削減

再生油をリサイクル使用することにより，焼却処理と比較して，絶縁油 1 ton あたり3.7 ton の CO_2 排出量が削減される。

写真１　80 m^3/d 商用施設
（米国オハイオ州カントン市）

写真２　20 m^3/d 商用施設
（オーストラリア NSW 州ヤング市）

④絶縁油の安定確保

微量 PCB 汚染容器の洗浄処理にともなう洗浄用油の需要増加により，絶縁油の不足が予想されているが，本技術を採用することにより，安定供給が可能となる。

HDR 法は，PCB 濃度5 000 mg/kg まで処理可能であることが確認されている。日本国内における商用プラントでは，PCB 濃度100 mg/kg 以下の汚染油および非汚染の劣化絶縁油を無害化・再生処理することを想定している。

2.　設備の概要および安全対策

2.1　設備の概要

処理プロセスのフローを**図２**に示す。PCB を含んだ使用済み絶縁油（汚染油）を受入槽に搬入し，PCB 濃度を確認後，油供給槽に貯留する。油供給槽の汚染油を約3.4 MPa でプロセスラインに供給し，熱交換器で予熱後の汚染油に水素ガスおよびスカベンジャーを添加・混合した後，電気ヒータで約300～320 ℃に昇温し，反応塔に供給し，水素化触媒の存在下，水素化反応により PCB を脱塩素無害化する。

脱塩素化反応後の油は，熱交換器で冷却し，減圧して低圧セパレータに送液し気液分離した後，苛性ソーダ槽を通過させ処理油をえる。処理油は確認槽に入れ PCB 分析確認後に処理油槽に保管する。脱塩素化により生成したスカベンジャー塩はクエンチ水により水相に移行させる。水相は，水処理しクエンチ水に循環利用，もしくは PCB 卒業判定（PCB 含有濃度が所定の基準を下回るかどうか判定すること）後に廃アルカリとして産廃処分する。反応塔から排出される余剰の水素ガスは，反応塔の入側に送り，循環再利用する。リサイクルガスの一部は間欠的にパージし，スクラバー処理，触媒酸化処理をおこない無害化した後，放出する。

2.2　安 全 対 策

設備には，温度・圧力・流量等の諸条件を自動制御し，中央制御室にて24時間監視し，安全に連続運転をおこなう。本設備では水素を取扱うため，計装機器は防爆仕様である。エリア数カ所に設置した水素検知器により水素漏洩を検知した場合，あるいはプロセス異常時，プラントは安全に停止するインターロックを備える。また火災に備え，防消火設備を完備する。

環境汚染防止対策として，プラント床面には浸透防止処理を施すとともに，ユニットごとに防液堤を設け，万一の場合でも，油などの流出を防止する。

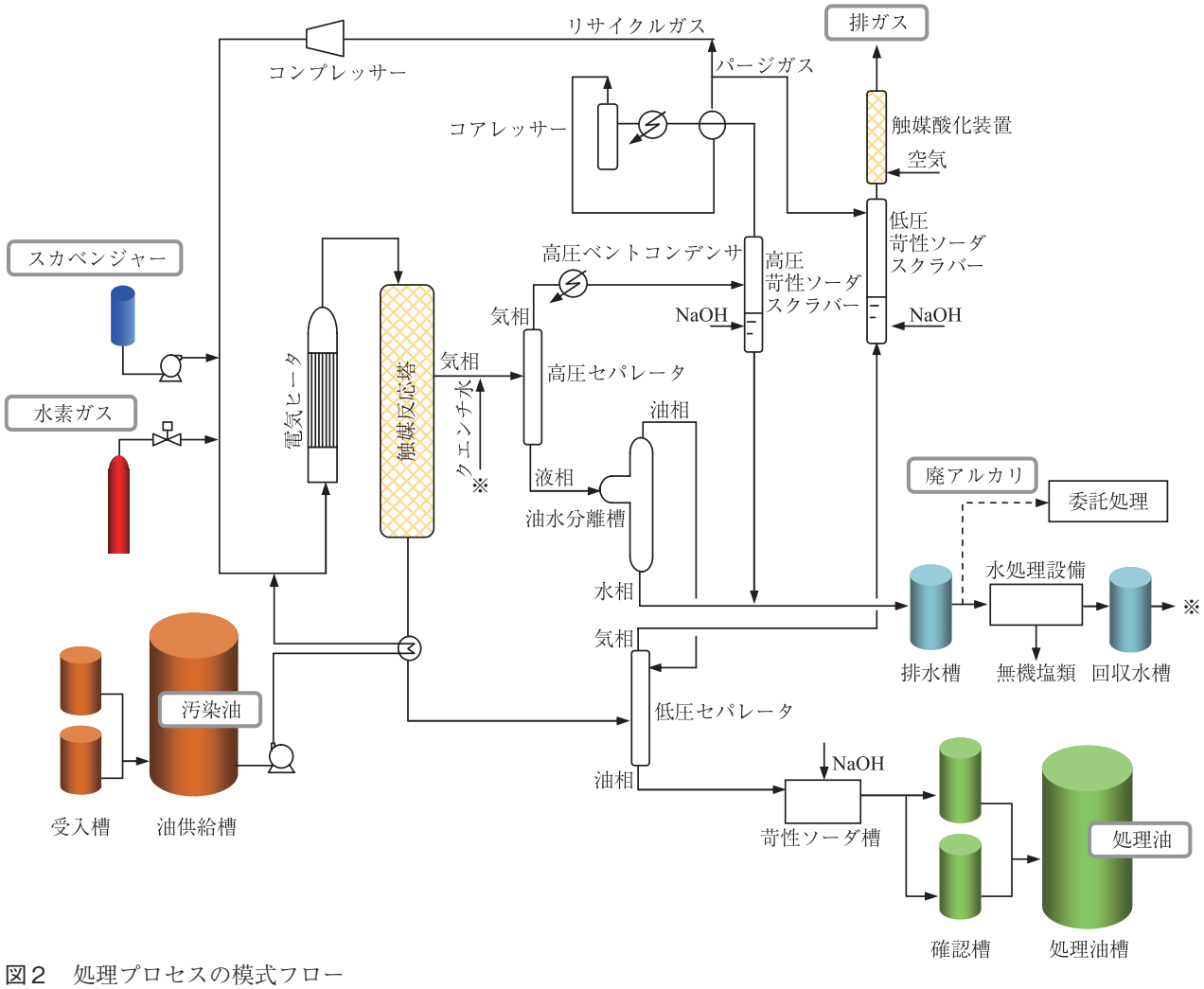


図２　処理プロセスの模式フロー

パージされるプロセスガスは，触媒酸化処理をおこない有害物質および悪臭成分の発生はない。騒音・振動の発生源となるコンプレッサー等の機器は，通常の振動吸収材等により抑制できる。

3. 実 験 方 法

オーストラリア NSW 州ヤング市の20 m^3/d 商用施設を使用し，微量 PCB 汚染油の無害化実証試験を実施した。

処理対象の PCB 汚染油として，PCB 濃度約70 mg/kg の汚染油40 m^3を使用した。処理対象油を20 m^3/d（14 L/min）で処理設備に供給し，処理温度300 ℃，処理圧力3.5 MPa で24時間の連続処理を２回実施し，処理油，排ガスおよび廃アルカリをサンプリングし，日本の公定法による分析をおこない，処理性能が日本基準に適合することを調査確認した。また，実験前・中・後におけるプラントエリア内７箇所での作業環境測定および敷地境界４箇所での環境大気測定を実施し，環境影響を調査した。

4. 実 験 結 果

4.1 運転時の温度および圧力推移

実験条件および結果を表２に示す。触媒反応塔の温度および圧力は，図３に示すように，終始安定して制御された。２度の24時間連続運転を通して，装置の異常停止やその他のトラブルは見られなかった。

4.2 処 理 油

油中の PCB 濃度は，HRGC/HRMS 法による分析で，汚染油では66－73 mg/kg であったのに対し，処理油では0.0052－0.015 mg/kg となり，日本の PCB 卒業基準値0.5 mg/kg の30分の１以下であった。

ダイオキシン類は，汚染油では29－31 pg-TEQ/g であったが，処理油では0－0.0078 pg-TEQ/g となり，充分に分解された。

GC/MS 法による処理油の定性分析の結果，PCB の脱塩素化生成物と考えられるビフェニル類が検出されたが，有害なベンゼン類は検出されなかった。

表２　試験条件および結果

項　　目		単　位	試験条件／分析結果	基準値／目標値
試験条件	試料供給速度	L/min	14	−
	試料供給時間	時間	24（２回実施）	−
	試料供給総量	L	40 003	−
	処理温度	℃	300	−
	処理圧力	MPa	3.5	−
汚染油	PCBs	mg/kg	66－73	−
	ダイオキシン類	ng-TEQ/g	0.029－0.031	−
処理油	PCBs	mg/kg	0.0052－0.015	0.5
	ダイオキシン類	ng-TEQ/g	0－0.0000078	−
廃アルカリ	PCBs	mg/L	＜0.003	0.03
	ダイオキシン類	pg-TEQ/L	0.000000065－0.00000025	100
排ガス	PCBs（酸素12％換算）	mg/m^3_N	0.000014－0.000017	0.10
	ダイオキシン類（酸素12％換算）	$ng\text{-}TEQ/m^3_N$	0.000019－0.000022	0.1
	硫黄酸化物（酸素12％換算）	ppm	＜6	300－5 000
	窒素酸化物（酸素12％換算）	ppm	17－18	60－400
	ベンゼン（酸素12％換算）	ppm	＜0.30	50－600
	塩素（酸素12％換算）	mg/m^3_N	＜2	30
	塩化水素（酸素12％換算）	mg/m^3_N	8－9	80
	硫化水素	ppm	＜5	10

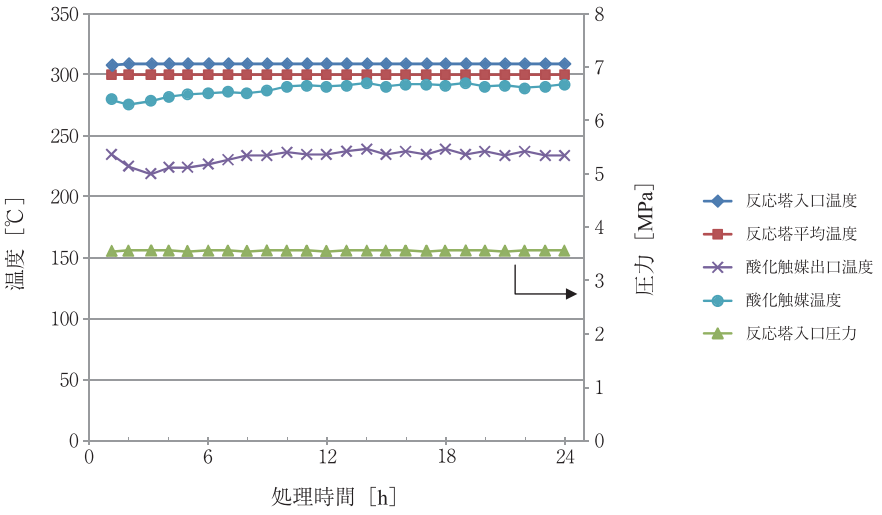


図３　連続処理試験時の運転状況（Run1）

4.3　排ガス，廃アルカリ

排ガス中のPCB濃度は，0.000014－0.000017 mg/m^3_N となり，排出基準値0.10 mg/m^3_N を充分に満足した。ダイオキシン類濃度は，0.000019－0.000022 $ng\text{-}TEQ/m^3_N$ となり，排出基準値0.1 $ng\text{-}TEQ/m^3_N$ を充分にクリアした。硫黄酸化物は６ppm未満，窒素酸化物は17－18 ppm，硫化水素は５ppm未満，ベンゼンは0.3 ppm未満，塩素は２ppm未満，塩化水素は８－９mg/m^3_N となり，充分に低い値であることを確認した。

廃アルカリ中のPCB濃度は，定量下限値（0.003 mg/L）未満となり，基準値0.03 mg/Lを満足した。ダイオキシン類は，0.000000065－0.00000025 pg-TEQ/Lとなり，基準値100 pg-TEQ/Lを満たした。廃アルカリは，産廃処分あるいは浄化し系内で再利用することが可能である。

4.4　作業環境

プラントエリアの作業環境測定結果を**表３**に示す。PCB濃度は，実験前・中・後を通し，全ての箇所で0.001mg/m^3未満となり，管理濃度0.01 mg/m^3

表３　プラントエリア内の作業環境測定結果

項目		単　位	試験前	試験中	試験後	管理濃度
PCB	A 測 定	mg/m^3	＜0.001 （７箇所）	＜0.001 （７箇所）	＜0.001 （７箇所）	0.01 mg/m^3
	B 測 定	mg/m^3	＜0.001	＜0.001	＜0.001	
	管理区域	−	1	1	1	
ダイオキシン類	測 定 値	pg-TEQ/m^3	0.25	0.25－0.27	0.25	2.5 pg-TEQ/m^3
	評　　価	−	適	適	適	

表４　敷地境界４箇所での環境大気測定結果

	単　位	実験前	実験中	実験後	基準値
PCB	μg/m^3	0.00036－0.0081	0.00018－0.0077	0.00024－0.0060	0.5
ダイオキシン類	pg-TEQ/m^3	0.0081－0.012	0.0072－0.012	0.0067－0.011	0.6

よりも低く，第１管理区域であった。ダイオキシン類濃度についても，実験前・中・後において0.25－0.27 pg-TEQ/m^{3}となり，管理濃度2.5 pg-TEQ/m^{3}よりも低く，適正であった。

敷地境界４箇所での環境大気測定結果を**表４**に示す。PCB 濃度は，0.00018－0.0081 μg/m^{3}となり，基準値0.5 μg/m^{3}を満足した。ダイオキシン類濃度は，0.0026－0.012 pg-TEQ/m^{3}となり，基準値0.6 pg-TEQ/m^{3}を満たした。PCB，ダイオキシン類ともに実験前・中・後で増加は無いことを確認した。

む　す　び

本水素化脱塩素精製法（HDR プロセス）により商用規模の微量 PCB 汚染油処理実証試験を実施し，以下の結果をえた。

①66－73 mg/kg の微量 PCB 汚染油を処理量20 m^3/d，温度300 ℃，圧力3.5 MPa で24連続処理し，処理油の PCB 濃度0.0052－0.015 mg/kg がえられ，日本の基準値を満足することを確認した。

②排ガスは PCB 濃度0.000014－0.000017 mg/m^3_N，ダイオキシン類濃度0.000019－0.000022 ng-TEQ/m^3_N であり，廃アルカリは PCB 濃度0.003 mg/L 未満，ダイオキシン類は，0.000000065－0.00000025 pg-TEQ/L となり，ともに基準値を充分に満足した。

③処理油および排ガス中に有害なベンゼン類は検出されなかった。

④作業環境では，PCB 濃度0.001 mg/m^{3}未満，ダイオキシン類濃度0.25－0.27 pg-TEQ/m^{3}であり，基準値を充分に満足した。

なお本プロセスは，2009年12月に「PCB 等処理技術調査検討委員会」（環境省）による技術評価を終了している。

微量 PCB 汚染油および汚染容器の処理は焼却による処理が検討されているが，本プロセスを使用した容器洗浄および汚染油再生処理の仕組みを構築することにより，より少ない環境負荷，低コストで，化学物質リスクの低減を推進していくことが期待される。

［参考文献］

１）環境省，POPs 条約に基づく国内実施計画
http://www.env.go.jp/chemi/pops/plan/all.pdf

２）（財）産業廃棄物処理事業振興財団：PCB 処理技術ガイドブック（改訂版），p.20-23，p.38-39（2005）

３）環境省，変圧器（トランス）などの重電機器からの微量の PCB 検出について
http://www.env.go.jp/recycle/poly/trans/index.html

４）環境省，報道発表資料，微量 PCB 汚染廃電気機器等の焼却実証試験（第８回）の実施について（お知らせ），平成21年11月10日
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11753

５）環境省，報道発表資料，廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則の一部を改正する省令等の交付について，平成21年11月10日
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11755

*商品市場・技術開発センター プロセス技術開発部新規プロセス室　**商品市場・技術開発センター　***環境プラント事業部 第二技術部

北九州 PCB 廃棄物処理施設向け PCB 汚染物等処理設備

―プラズマ溶融分解技術による PCB 汚染物処理技術の実用化―

PCB-Contaminated Waste Treatment System for Kitakyushu PCB Treatment Facility

―Commercialization of PCB-Contaminated Wastes Treatment System Using Plasma Melting Technology―

竹山俊通*
Toshimichi TAKEYAMA

田頭成能**
Shigeyoshi TAGASHIRA

清水由章***
Yoshiaki SHIMIZU

梶原康司****
Yasushi KAJIWARA

藤岡政憲***
Masanori FUJIOKA

プラズマ溶融分解技術による PCB 汚染物等処理設備を，世界で初めて実用化したのでここに紹介する。PCB 汚染物等とは，安定器，ウエス，汚泥，感圧紙など PCB に汚染された諸種の固体廃棄物の総称であり，その性状の多様さのために，従来技術では処理困難とされてきたものである。本技術は，１t/d 規模の実証試験設備において，４年間に渡って延べ約700時間の実証溶融運転をおこない，そのデータを基に約５倍のスケールアップをおこなって実用化したものである。実機の詳細設計においては，所定の溶融処理速度，排気処理性能を満足することに加えて，様々な性状の PCB 汚染物等が処理対象となることを想定し，処理が安全かつ安定した操業となるように，プロセス・設備の両面から設計検討を実施した。試運転においては，所定の環境性能を満たしていることを確認し，実用運転を開始した。

また，本設備に隣接して，同能力のプラズマ溶融炉設備を２系列目として建設工事が進行中である。

A plasma melting system, which is the world's first commercial plasma application on PCB-contaminated wastes treatment, is completed and started operation. PCB-contaminated wastes mean a category of various solid wastes containing PCB, such as fluorescent lamp ballasts, waste clothes, sludge and carbonless copy paper. They cannot be treated by conventional PCB treatment methods because of diversity of their characteristics, such as water content, metal content, etc. The authors have treated PCB-contaminated wastes in plasma melting demonstration plant with a capacity of 1 ton/day for about 700 hours in four years. Based on those operating data, the first commercial plant was designed through scaling up by approximately five times. At the detailed engineering stage, not only melting performance but also environmental protection through exhaust gas treatment was considered thoroughly. Moreover, to realize safe and stable operation, both process parameters and equipment specifications are carefully designed. The system proved to satisfy required environmental performance through commissioning operation. The second plasma melting system, having same capacity to the first line, is under construction adjacent to the existing one.

***Key Words*：**

PCB	Polychlorinated Biphenyl
運転廃棄物	Operation waste
PCB 汚染物等	PCB contaminated wastes
プラズマ溶融分解技術	Plasma melting technology

【セールスポイント】

・真空加熱炉など他の設備で処理困難な PCB 汚染物の処理対応が可能

・高い PCB 分解率と環境保全性能

・二次汚染物が発生しない自己完結型の処理方式

ま え が き

PCB（Polychlorinated Biphenyl：ポリ塩化ビフェニル）は，熱分解しにくいなどの高い化学的安定性と電気絶縁性を有することから，1970年代半ばまで，トランスやコンデンサなどの電気機器の絶縁油，熱交換器の熱媒，ノンカーボン紙，潤滑油，可塑剤，塗料などに使用されてきた。しかし，その有害性が明らかになり製造・使用が禁止され，2001年に制定された「PCB 特別措置法」により分解処理することが定められた。

同法に基づき，環境省の主導のもと，日本環境安全事業株式会社による PCB の拠点的広域処理施設が，豊田事業所・北海道事業所を含め日本全国で５ヶ所設置され，PCB の処理が進められている。

その中で，初めてプラズマ溶融分解技術を取入れた処理設備を2009年７月に北九州事業所へ納入した。

本設備は，安定器をはじめ小型トランス・コンデンサ，汚泥，感圧複写紙などの代表的な PCB 汚染物に加えて，運転廃棄物など従来方法では処理が困難であったものに対しても有効な設備である。

ここで言う運転廃棄物とは，PCB 処理施設の運転・維持管理にともない発生する PCB 汚染物であり，作業者が着用するタイベック，ゴム手袋，吸収缶，ウエスなどのほか，ガスケットなどの交換部品，および，排気処理にもちいた使用済み活性炭などである。

今回建設した PCB 汚染物等処理設備は，運転廃棄物も処理できる設備であり，事業所内に保管されている運転廃棄物の保管スペース削減にも寄与できる。

1. PCB 汚染物等処理設備の概要

1.1 プロセスの概要

プラズマ溶融分解設備フローを**図１**に示す。当該設備の処理能力は，５t/d（塩基度調整された破砕コンクリートを基準とした公称能力）としているが，処理対象物によって処理速度が異なる。プラズマ発生源としては，出力1 300 kW のプラズマトーチ１本を使用している。

対象処理物として受入れるものは，前述のほか，分析残渣，分析排水，絶縁油，ブッシング，プラスティックコンテナである。

PCB 汚染物は，受入れ時に外観検査をおこなう。その後，プラズマ前処理設備にて，種類ごとに定められた所定の重量ずつ，容器（ドラム缶）に詰替えをおこなう。これは，PCB 汚染物の種類が多種多様でありプラズマ溶融処理した際，分解速度が一定でないため排気ガス量が大幅に変動することを抑えることを目的におこなっている。また，詰替えをおこなう際の検査において，ガソリンやガスボンベなどの危険物など処理してはいけないものが含まれないことを確認している。

詰替えの容器については，対象処理物の種類ごとに20 L と27 L のペール缶，100 L と200 L，350 L のドラム缶の容器をもちいる。異なる容量の容器をもちいることで缶に由来するスラグの発生量を抑えている。

さらに詰替えの際，必要に応じて塩基度調整剤を封入する。これは，スラグの融点を調整し良好に出滓するためである。

詰替えられた PCB 汚染物は，200 L ドラム缶が６缶載るパレットに移載する。その際，容器の内容物がわかるバーコードを張りつける。

パレットは，基幹物流室にて一旦保管する。溶融計画に応じてパレットをドラム缶受入れ供給室に自動で取込み，必要分をドラム缶受入れコンベアに半自動にて移載する。コンベア上の容器は，１缶ずつ遠隔自動にて容器ごとプラズマ溶融分解炉へ投入される。

投入された PCB 汚染物は，電気エネルギにより発生させた高温のプラズマアーク（15 000 ℃以上）と溶融スラグ浴（1 400 ℃以上）の相乗効果によって効率よく溶融分解処理される。溶融分解炉の外観を**写真１**に，溶融中の分解炉内の状況を**写真２**に示す。投入した PCB 汚染物が溶融され処理完了したことを ITV（工業用テレビカメラ）で確認したのちに，次の缶を投入する。

溶融分解処理された PCB 汚染物の有機物は，二酸化炭素，水蒸気，塩化水素に分解され排気処理工程へ送られる。また，無機物はスラグとして排出さ

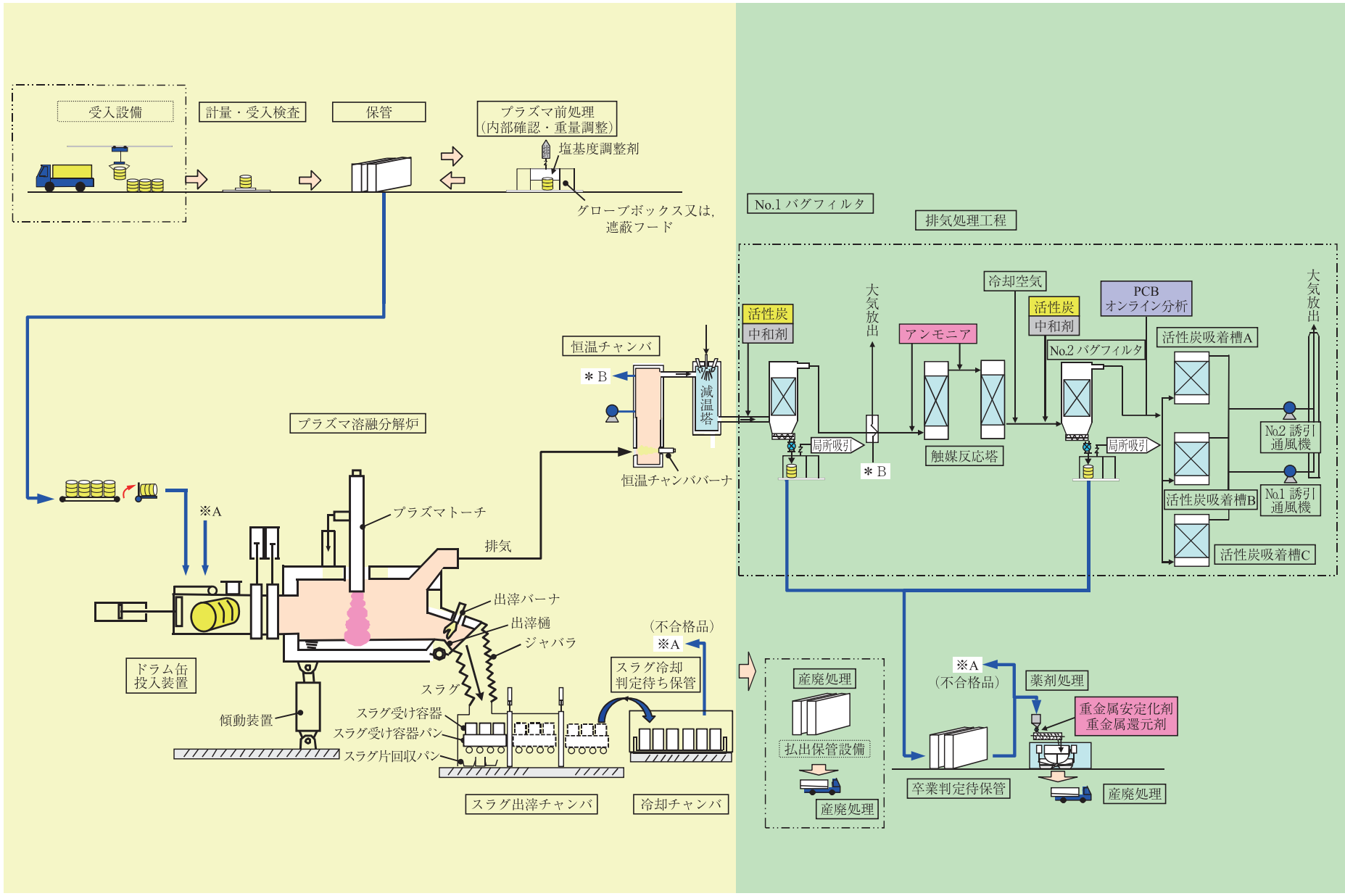


図1　プラズマ溶融分解設備フローシート

写真１　プラズマ溶融分解炉外観

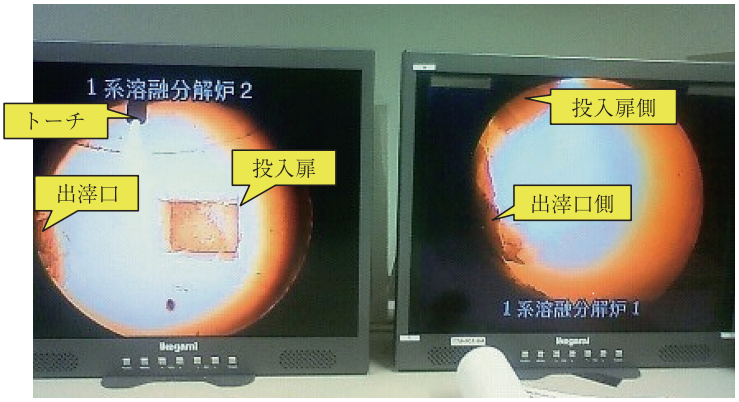


写真２　溶融中の分解炉内の状況
（左：炉体側面 ITV　右：炉上面 ITV）

写真３　出滓スラグ

れる。

排気処理工程は，PCB の確実な分解を図るため 1 200 ℃，２秒以上の滞留ができる恒温チャンバを通り，熱交換器で熱回収をおこなった後，減温塔でダイオキシン類の再合成を防ぐために水噴霧により急冷し約200 ℃まで温度を下げる。そして，バグフィルタにて消石灰を吹き込み酸性ガスである塩化水素やいおう酸化物を除去する。その後，触媒反応塔にてアンモニアガスを吹き込み窒素酸化物を除去するとともに，排気中のダイオキシン類を分解する。さらに，排気中に残留したダイオキシン類は，バグフィルタへ粉末活性炭を吹き込むことで吸着除去する。

本設備で触媒反応塔の後段にバグフィルタを設置しているが，これは，この配置が，触媒反応塔にて処理されなかったダイオキシン類があった場合，それを除去するために適していることが実証試験で証明されたためである。さらに，万が一これらの装置の機能が失われた場合においても PCB の流出を防ぐために，セーフティネットとして，排気処理設備の最後段に活性炭吸着塔を設置している。

このほか，排気中の PCB 濃度等は，PCB オンラインモニタリング装置，塩化水素，窒素酸化物オンライン分析装置により連続監視しており，安全を考慮し，必要に応じて処理停止のインターロックをとりいれている。

溶融スラグは，プラズマ溶融分解炉を傾動させてスラグ受け容器に出滓する。出滓ごとにスラグサンプリングをおこない，PCB 濃度が規制値以下であるか分析をおこなう。この分析を卒業判定（PCB 含有濃度が所定の基準を下回るかどうか判定すること）といい，規制値以下（環告13号溶出試験で 0.003 mg/L 未満）を合格としている。合格すれば事業所からの払出可となる。万が一不合格となれば再溶融させる。

スラグ受け容器は，スラグ出滓チャンバ内で冷却しスラグを凝固させたのち，さらに冷却チャンバにて冷却される。冷却チャンバに保管されている間に卒業判定を実施し，合格したスラグは払出保管設備へ移送され，そこから施設外へ搬出され最終処分する。スラグ受け容器に出滓されたスラグを**写真３**に示す。

表１　予備性能試験の外部分析結果

１．排気測定結果

No.	日付	処理物	排気濃度							備考
			成分	PCB mg/m^3_N	ダイオキシン類 $ng\text{-}TEQ/m^3_N$	硫黄酸化物 K値	窒素酸化物 ppm	塩化水素 ppm	ばいじん g/m^3_N	
			排出基準	0.01以下	0.1以下	1以下	230以下	250以下	0.05以下	
1	4月25日	安定器(混合)	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	99	6	0.008	酸素濃度17.4 vol%
2	4月26日	安定器(単独)	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	93	3	0.006	酸素濃度17.4 vol%
3	4月26日	手袋	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	89	7	0.007	酸素濃度17.7 vol%
4	4月27日	防護服	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	89	6	0.006	酸素濃度17.6 vol%
5	4月27日	汚泥	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	90	9	0.005	酸素濃度17.9 vol%
6	4月28日	按分	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	93	4	0.025	酸素濃度17.1 vol%

※按分：安定器(混合)，安定器(単独)，汚泥等他

２．処理済物卒業判定結果

No.	日付	処理物	卒業判定	固形物		スラグ		備考
			処理済物	PCB(溶出) mg/L		出滓缶数 缶	PCB(溶出) mg/L	
				No.1固形物	No.2固形物			
			判定基準	0.003以下	0.003以下	—	0.003以下	
1	4月25日	安定器(混合)	良	＜0.0005	＜0.0005	3	＜0.0005	
2	4月26日	安定器(単独)	良	＜0.0005	＜0.0005	3	＜0.0005	
3	4月26日	手袋	良	＜0.0005	＜0.0005	1	＜0.0005	
4	4月27日	防護服	良	＜0.0005	＜0.0005	1	＜0.0005	
5	4月27日	汚泥	良	＜0.0005	＜0.0005	2	＜0.0005	
6	4月28日	按分	良	＜0.0005	＜0.0005	2	＜0.0005	

表２　引渡性能試験の外部分析結果

１．排気測定結果

No.	日付	処理物	排気濃度							備考
			成分	PCB mg/m^3_N	ダイオキシン類 $ng\text{-}TEQ/m^3_N$	硫黄酸化物 K値	窒素酸化物 ppm	塩化水素 ppm	ばいじん g/m^3_N	
			排出基準	0.01以下	0.1以下	1以下	230以下	250以下	0.05以下	
1	5月９日	安定器(混合)	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	98	7	0.001未満	酸素濃度17.3 vol%
2	5月10日	安定器(単独)	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	99	6	0.001未満	酸素濃度17.8 vol%
3	5月10日	手袋	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	98	10	0.001未満	酸素濃度17.4 vol%
4	5月11日	防護服	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	100	9	0.001未満	酸素濃度17.2 vol%
5	5月11日	汚泥	良	N.D.	0(定量下限未満)	0(定量下限未満)	102	9	0.001未満	酸素濃度17.2 vol%
6	5月12日	按分	良	N.D.	—	0(定量下限未満)	99	12	0.003	酸素濃度17.3 vol%

※按分：安定器（混合），安定器（単独），汚泥等他

２．処理済物卒業判定結果

No.	日付	処理物	卒業判定	固形物		スラグ		備考
			処理済物	PCB(溶出) mg/L		出滓缶数 缶	PCB(溶出) mg/L	
				No.1固形物	No.2固形物			
			判定基準	0.003以下	0.003以下	—	0.003以下	
1	5月９日	安定器(混合)	良	＜0.0005	＜0.0005	2	＜0.0005	
2	5月10日	安定器(単独)	良	＜0.0005	＜0.0005	2	＜0.0005	
3	5月10日	手袋	良	＜0.0005	＜0.0005	1	＜0.0005	
4	5月11日	防護服	良	＜0.0005	＜0.0005	1	＜0.0005	
5	5月11日	汚泥	良	＜0.0005	＜0.0005	2	＜0.0005	
6	5月12日	按分	良	＜0.0005	＜0.0005	1	＜0.0005	

このほか，バグフィルタで捕集した固形物も卒業判定合格の確認後，薬剤処理をおこない施設外へ搬出され最終処分する。

2. プラズマ溶融分解炉の運転データ

2.1 非 PCB 汚染物負荷試運転

2009年１月９日から３月19日の間で，実際の PCB を含まない模擬汚染物による負荷試運転をおこない，合計362缶の模擬汚染物を処理した。排気中の窒素酸化物，硫黄酸化物，塩化水素，ばいじん等はオンラインモニタリング測定で排出基準値以下であり，問題ないことを確認した。また，この間の出滓作業は26回であった。

2.2 PCB 汚染物負荷試運転

2009年３月29日より５月15日の間で，実際に PCB を含む汚染物をもちいて負荷試運転をおこない，模擬物と同様に問題なく処理できることを確認した。この負荷試運転で使用した PCB 汚染物の種類と量および処理実績を以下に示す。

○小型トランス・コンデンサ　約75 kg
○安定器　　約13 644 kg
○廃活性炭　約4 994 kg
○無機汚泥　約3 434 kg
○感圧複写紙，ウエス，運転廃棄物，ブッシング（特殊な形状の絶縁ガイシ），他　2 588 kg
　合計　約24.7 ton

５月13日までで，合計906缶の PCB 汚染物を処理し，排気中の PCB，窒素酸化物，硫黄酸化物，塩化水素，ばいじん等のオンラインモニタリング測定で基準値以下であり問題ないことを確認した。さらに，処理済物のスラグ・固化物について卒業判定基準以下でありこれも問題ないことを確認した。また，この間の出滓は45回であった。

表１，２に処理試験内容および性能試験における主な確認項目と結果を示す。分析結果の全ての項目において所期の環境保全性能を達成していることが確認できた。

また，処理性能である処理速度は，想定される PCB 廃棄物の物量の比率に応じた処理物を所定の時間内に処理できることの確認をおこなった。想定時間63.3時間に対し，58.1時間であり十分な処理能力があるといえる結果をえた。

む　す　び

当社は，日本環境安全事業株式会社 豊田事業所をはじめ，北海道事業所・北九州事業所に PCB 処理設備を納入している。その中でも北九州事業所は，PCB 処理事業として世界で初めてのプラズマ溶融分解炉を設置した施設である。この初号機で経験したノウハウを次回の建設に活かし，更なる改善をおこない PCB 汚染物等の安全・安定な操業に貢献していきたい。

*水処理事業部 技術部　**商品市場・技術開発センター プロセス技術開発部　***環境プラント事業部 第二技術部 技術室
****環境プラント事業部　監理部　北九州プロジェクト室

膜分離活性汚泥法の当社１号機における初期運転管理

～浜松市城西浄化センターの運転状況～

Introduction of our first commercial MBR（=Membrane Bio-Reactor）system installed in Shironishi Sewage-Treatment Center, Hamamatsu City, and it's operation control of primary stage

石山　明*
Akira Ishiyama

中嶋雄大**
Yuta Nakajima

田路明宏***
Akihiro Toji

当社は2003年より，ポリフッ化ビニリデン（以下，PVDF と呼ぶ）製の中空糸膜をもちいた膜分離活性汚泥法（以下，MBR と呼ぶ）を開発してきた。そして2008年，実機１号機を浜松市城西（しろにし）浄化センターに納入した。運転立ち上げ時からこれまで，良好な膜ろ過運転と処理水質を維持している。

今後の MBR の普及を見据えると，初期運転管理は施設の円滑な立ち上げのために非常に重要な知見である。本報では，技術開発のエッセンスを整理しながら，当センターで実施した MBR の立ち上げ方法を紹介し，運転状況および処理水質について報告する。

We have been developed Membrane Bio-Reactor (MBR) system using poly vinylidene fluoride (PVDF) hollow fiber membrane since 2003, and delivered our first plant to Sironishi Wastewater Treatment Center, Hamamatsu City, in 2008. The operation of MBR in Shironishi smoothly started up, and the high quality of effluent has been maintained. For world-wide spread of MBR, operation data of primary stage is very important to smoothly start up MBR. In this report, we review essence of MBR development and introduce how to start up Shironishi plant, the operation management and water quality.

***Key Words*：**

膜分離活性汚泥法	Membrane Bio-Reactor (MBR)
浸漬膜	Submerged membrane
中空糸膜	Hollow fiber membrane
PVDF	Poly vinylidene fluoride
ファウリング	Fouling
CO_2 削減	CO_2 reduction
初期運転管理	Operation control of primary stage

まえがき

下水，排水処理分野における膜分離技術の発展は近年著しいものがあり，2005年に国内の公共下水処理に初めて MBR が導入されてから，これまで10件以上の MBR 施設が納入されてきている。しかしながら海外においてはさらに先を進んでおり，EU で MBR の標準化がすすめられるなど，すでに MBR の大規模施設が数多く稼働している。こうした背景から，国内でも MBR の大規模化への取組みが進められようとしている。

MBR とは，下水・排水浄化の心臓部である反応タンク（Bio-reactor）内に精密ろ過膜（以下，MF 膜と呼ぶ）を浸漬して膜ろ過により固液分離をおこなうシステムである。そのため，従来の固液分離装

置である沈殿池，砂ろ過池が不要になるとともに，活性汚泥濃度（以下，MLSS と呼ぶ）を10 000 mg/L に高濃度化（従来の高度処理の３～５倍程度に）できるため反応タンクを小型化できる。また，MF 膜は大腸菌をも通さない孔径0.1 μm 程度のものであるため，消毒装置が不要になる。したがって，MBR には，プロセスが簡略で省スペースでありながら高度な処理水質の達成が可能というメリットがある。

当社は2003年より，薬品耐性に優れた PVDF 製の中空糸膜からなる，円筒形の膜モジュールをもちいて MBR を開発してきた。とくに，CO_2 削減を目指し，モジュール形状のコンパクト性および膜の目詰まり（以下，ファウリングと呼ぶ）数式モデルを活用した曝気エネルギーの削減に注力し，2005年に開発を完了した。そして2008年，実施設１号機を浜松市城西浄化センターに納入した[1)～5)]。

天竜川の支流で一級河川である水窪（みさくぼ）川は，豊かな清流に恵まれ夏には釣り人やヤマメのつかみ取りで賑わっている。山間の非常に狭い場所に立地し，水窪川に処理水を放流する城西浄化センターでは，省スペースで高度処理が可能な MBR のメリットが十分に生かされており，運転の立ち上げ時からこれまで，良好な運転状況，処理水質を維持している。

これまで MBR の実施設における初期運転データについて報告された例は少ないが，今後の MBR の普及を見据えると，施設運転の円滑な立ち上げのためには非常に重要な知見である。本報では，当センターにおける MBR の運転立ち上げ方法，初期運転状況，処理水質について報告する。

1. 当社 MBR の概要

1.1 MBR の特長

一般的な MBR の概略フローと計画水質の一例を**図１**示す。原水に含まれる夾雑物を前処理スクリーンで除去し反応タンクに流入させる。反応タンクは無酸素タンクと好気タンクからなる循環式硝化脱窒法が採用されており，有機物のみならず窒素も同時に除去できる。好気タンク内に膜モジュールを浸漬し，定流量制御された吸引ろ過にて処理水をえる。反応タンクの一般的な設計数値は，MLSS が10 000 mg/L，滞留時間が６時間である。

当社 MBR における中空糸膜モジュールを**図２**に，概略仕様を**表１**に示す。モジュール形状は，φ0.15 m，有効膜長２m のコンパクトな円筒形である。膜面積は，汚泥や夾雑物の絡み付きを防止するため中空糸膜の集束度を考慮し，モジュール１本当たり25 m^2 としている。膜ろ過流束（以下，フラックスと呼ぶ）については日平均で0.6 $m^3/m^2/d$ を基本とするから，モジュール１本当たりの日平均処理水量は15 m^3/d となる。中空糸膜の公称孔径は0.1 μm，材質は次亜塩素酸ソーダ（以下，次亜と略す）などの薬品耐性に優れた PVDF である。また，膜面を洗

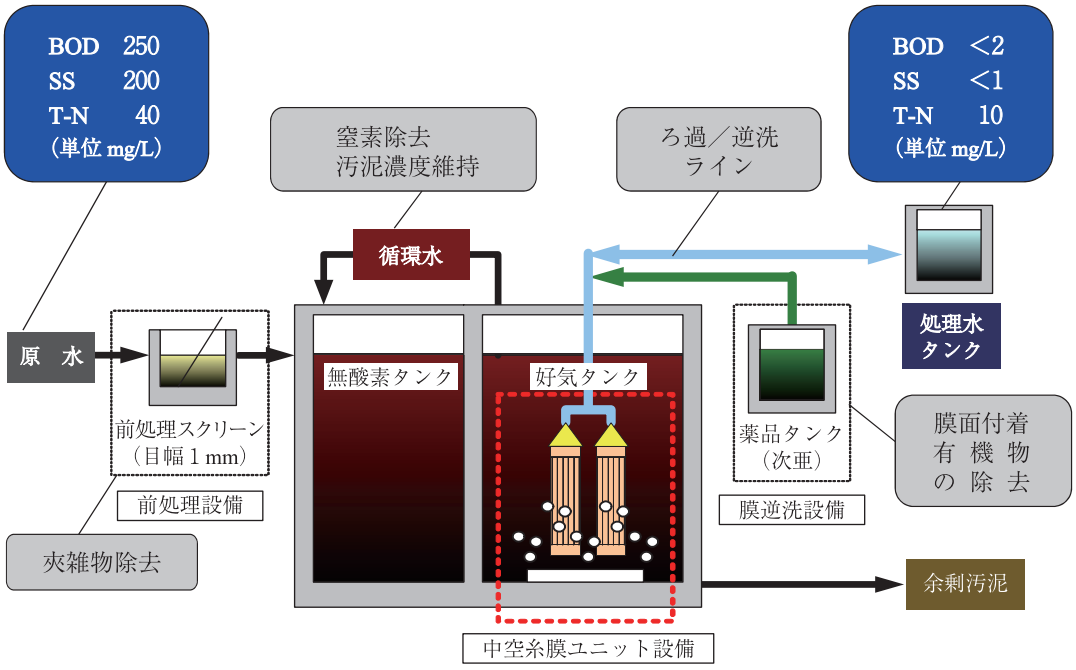
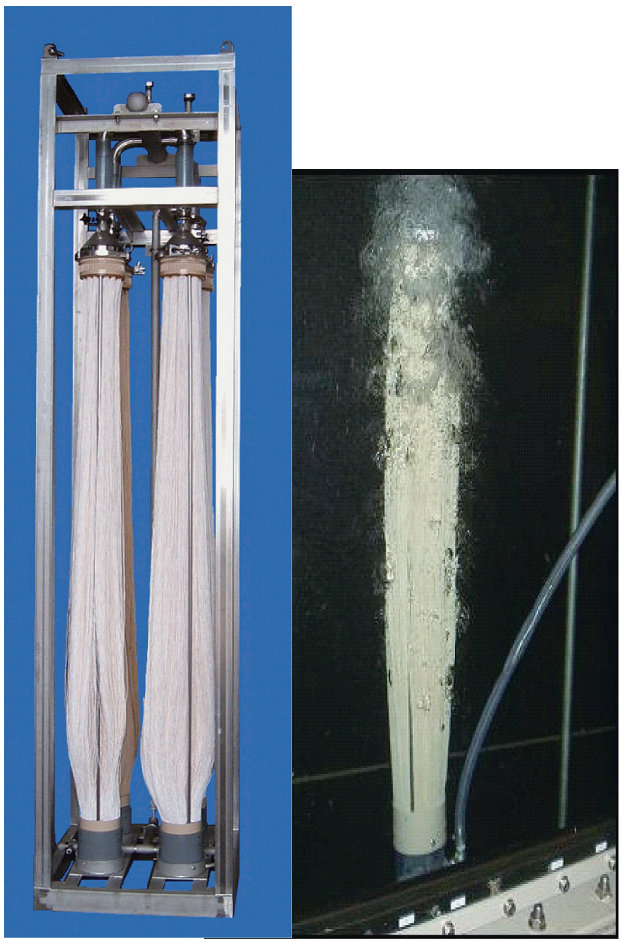


図１　概略フローと計画水質の一例



膜ユニット（一例）　　膜面曝気状況

図２　円筒形中空糸膜モジュール

表１　装置の概略仕様

形　　状	中空糸膜モジュール（円筒形）
サ イ ズ	ϕ0.15 m ×2.16 mH（有効膜長2.0 mH）
膜 面 積	25 m^2/モジュール×２本
膜 孔 径	0.1 μm（公称孔径）
膜 材 質	PVDF（ポリフッ化ビニリデン）
散気装置	粗大気泡散気装置（モジュール一体型）

浄する曝気（以下，膜面曝気と呼ぶ）については，円筒形のコンパクト性を生かし曝気量の低減をねらって，膜モジュール一体型の粗大気泡散気装置としている。

MBR では膜のファウリング防止がもっとも重要な技術課題のひとつである。中空糸膜モジュールをもちいた当社 MBR では，単位膜面積当たり0.2 m^3/h/m^2 というきわめて少ない膜面曝気量にて，膜面に付着する固形物の分離除去を常時おこなうことができる。この数値は平膜の約35 %（自社で実施した実験数値に対する比）に相当する。

また，膜内部から加圧できる中空糸膜の特長を生かし，通常の運転サイクルにおいて10分ごとに１回の逆圧洗浄（以下，逆洗と呼ぶ）を自動でおこない，膜面や膜孔に付着した固形物や溶解性有機物を押し出して分離除去する。なお，逆洗間隔はろ過水量のロスを最小限に抑えることを想定し，最大30分まで延ばすことが可能である。30分以上の間隔をあけると，膜のファウリングが進行しやすくなる。

膜面曝気および逆洗をおこなっていても，膜孔にゲル状の有機物が蓄積してくる。これを薬品洗浄（以下，薬洗と呼ぶ）にて分解除去するため，１カ月に１回程度，次亜をろ過水側から注入するインライン洗浄を実施する。

1. 2　MBR の基本性能

開発段階での実証プラントにおける処理水質を図３に示す。とくに，膜孔径0.1 μm の固液分離性能が十分に発揮されており，固形物（SS）についてはすべて検出限界（１mg/L）未満，大腸菌群数も検出されなかった。また，６時間という短い滞留時間ながら窒素（T-N ＜10 mg/L），有機物（BOD ＜１mg/L）の高度な処理水質には，MLSS を高濃度に保持することができる MBR ならではの特長があらわれている。

1. 3　MBR 開発のポイント

1. 3. 1　ファウリングの概略メカニズム

MBR の開発では，膜のファウリングをいかに効率良く防止するかが最大の焦点となった。ファウリングの概略メカニズムと洗浄機構を図４の模式図で示す。

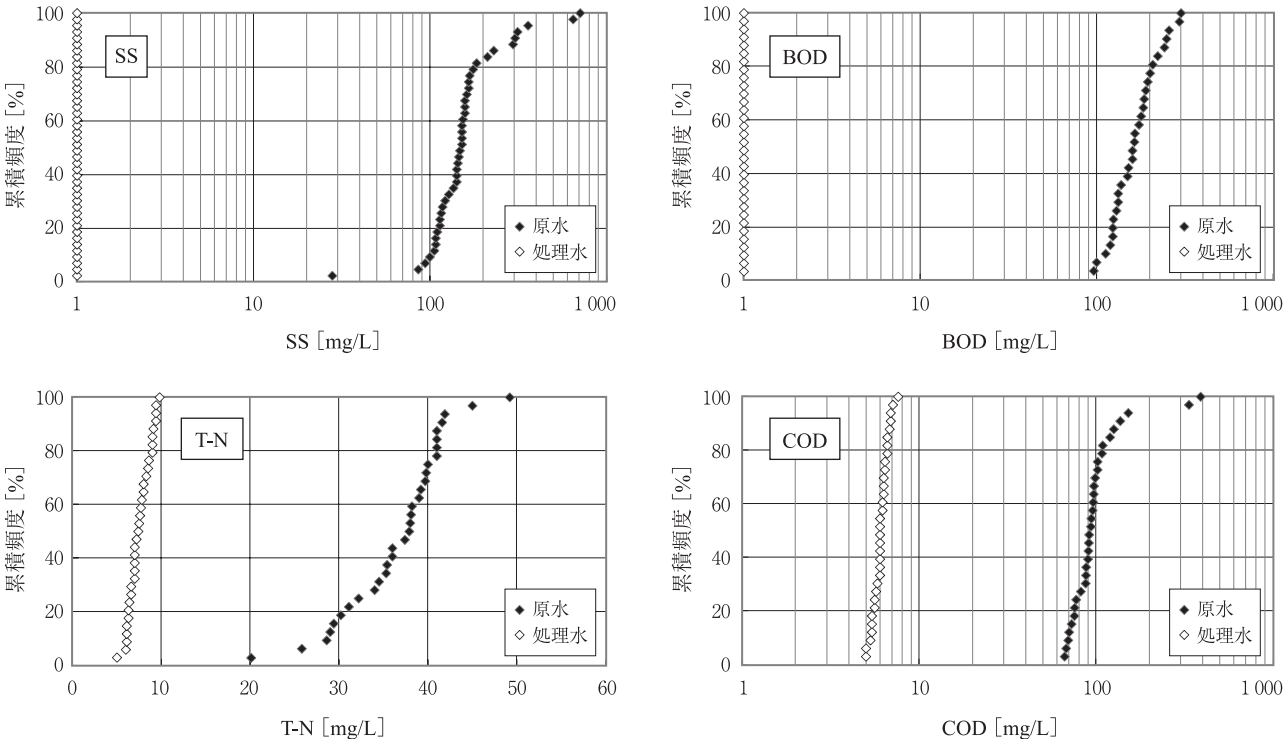
ファウリングの種類は，以下のように大きく３つに分類できる。

①汚泥（ケーキ）が膜の表面に堆積する
②溶解性有機物（ゲル）が膜孔内部に付着する
③無機物（スケール）が膜孔内部に付着する

①を防止するには，おもに堆積しようとするケーキを膜面曝気で常時洗浄する。エネルギーコスト縮減に向け，必要最小限の膜面曝気量を求めることがもっとも重要な取組みとなる。これについては 1. 3. 2 で後述する。

②を防止するには，付着したゲルを逆洗および次亜薬洗で除去するが，本報ではゲル濃度の少ない「ろ過しやすい活性汚泥」について当社が蓄積した知見を，後述する実施設１号機の初期運転管理のなかで紹介する。

③を防止するには，酸で定期的に洗浄する。スケール物質，施設の事情，価格等を考慮し，酸種を選択する。ただし，下水でのファウリング物質は有機物



〔備考〕SS, BOD の検出限界（1 mg/L）未満のものは，グラフ上では 1 mg/L とした。

図３　処 理 水 質

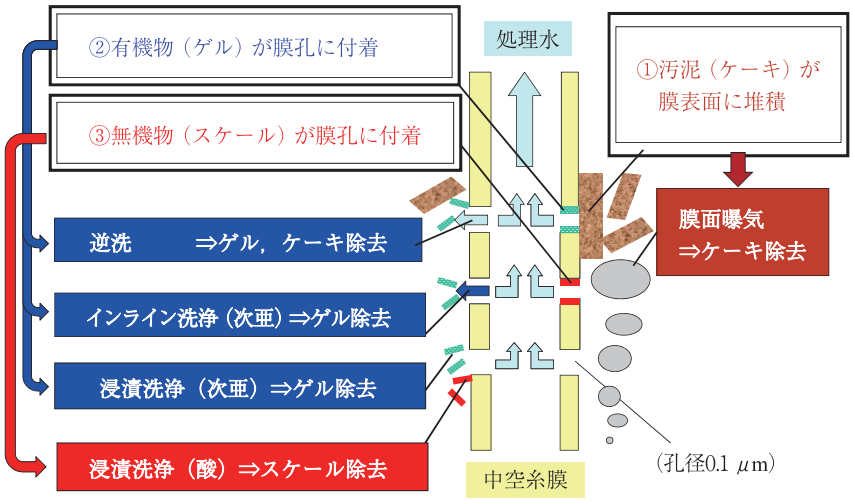


図４　ファウリングの概略メカニズムと洗浄機構

が圧倒的に多く，次亜にくらべると薬洗頻度は少ない。

1. 3. 2　膜面曝気量の低減[3)]

膜面曝気量の削減に活用するため，以下のようなファウリングモデルを数式化した。まず，図５に示すように，ⅰ）膜孔内部における閉塞（ゲル成分），ⅱ）膜表面における閉塞（ケーキ成分）の２つの要因で成り立つモデルを仮定した。ゲル成分と比較して相対量の少ない無機物スケール成分は無視して考えた。

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_g + \Delta P_c \qquad -(1)$$

ΔP　：膜差圧［kPa］
ΔP_m：膜自体が有する膜差圧［kPa］
ΔP_g：膜孔のゲル成分が寄与する膜差圧［kPa］
ΔP_c：膜表面のケーキ成分が寄与する膜差圧［kPa］

流体内のゲル成分が膜孔内部外辺から同心円状に付着堆積することにより生じるものと考えたとき，ゲル成分の収支式は以下のように示される。

$$QC_g t = (\pi R^2 - \pi r^2) \times n \times L \times \rho + Z\rho t \quad -(2)$$

Q：流量［m^3/d］，C_g：ゲル濃度［kg/m^3］，t：時間［d］
L：膜孔長さ［m］，R：膜孔半径［m］，n：膜孔数［-］
r：有孔半径（t経過後）［m］，ρ：ゲル密度［kg/m^3］
Z：逆洗によるゲル除去量［m^3/d］

膜孔内は層流であると仮定し，ゲル成分が寄与する膜差圧と各種パラメータとの関係を明らかにするために，(2)式に Hagen-Poiseuille 式を適用し以下の式をえた。

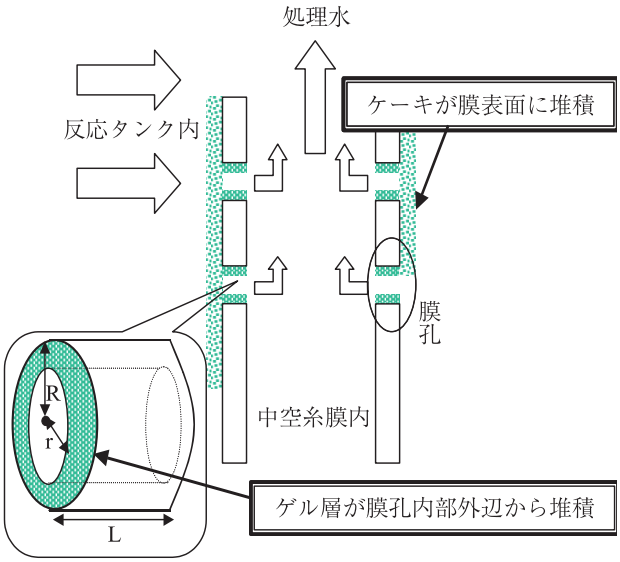


図５　膜閉塞モデル

$$d\Delta P_g/dt = B \cdot \Delta Pg^{3/2} \quad -(3)$$

B：膜閉塞係数［$kPa^{-1/2} \cdot d^{-1}$］

ここで，(1)式でケーキ成分が寄与する膜差圧 ΔP_c は（膜ろ過フラックスとケーキ濃度が一定であれば）膜面曝気量に依存し，かつ(3)式でゲル成分が寄与する膜閉塞係数 B 値に対して膜面曝気量が影響しないと仮定する。このとき，膜面曝気量を増加していったときに B 値が一定となるところが必要最小限の膜面曝気量となる。検討結果を図６に示すが，0.2 $m^3/h/m^2$ でケーキをほぼ十分に除去できることがわかった。なお，膜面曝気量0.2 $m^3/h/m^2$ の条件における $\Delta P_g^{3/2}$ と $d\Delta P_g/dt$ の相関性を図７に示す。

以上の検討を通じ，膜ろ過フラックス0.6 $m^3/m^2/d$ の条件において，膜面曝気量を0.2 $m^3/h/m^2$（膜モジュール１本当たり５m^3/h）に削減することができた。0.2 $m^3/h/m^2$ という数値は，平膜の約35 %（自社で実施した実験数値に対する比）に相当するから，約

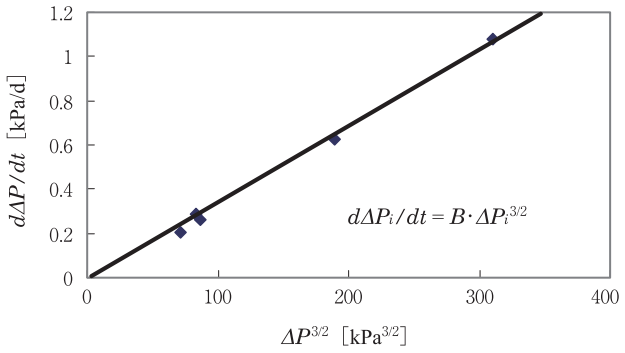


図７　膜閉塞係数の確認（$\Delta P_g^{3/2}$ と $d\Delta P_g/dt$ の相関性）

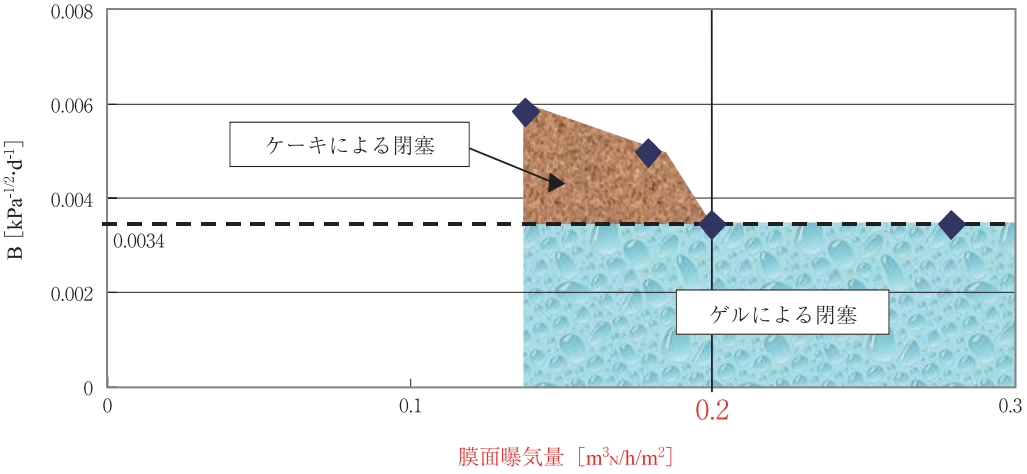


図６　必要膜面曝気量の検討（膜面曝気量による B 値の変化）

65 %の削減を達成したことになる。この数値を設計諸元として，次に紹介する当社１号機の膜面曝気量を決定した。

2.　浜松市城西浄化センターの施設概要と初期運転管理[4)]

2.1　施 設 概 要

2.1.1　計 画 概 要

浜松市城西浄化センター（図８）の計画値の概略を以下に記載する。

処理面積　：73.5 ha（処理人口 3 200人）
処理能力　：1 375 m^3/d
最低水温　：８℃
水質　BOD　：180 mg/L（流入）/3.0 mg/L（放流）
SS　：140 mg/L（流入）/1.0 mg/L（放流）
T-N　：35 mg/L（流入）/10 mg/L（放流）

図８　浜松市城西浄化センター

東日本以西の一般的な下水の最低水温は13～15℃程度であり，開発段階の実証プラントでもそうであったが，当センターの計画値は８℃と非常に厳しい条件である。一般的に低水温であればあるほど，水の粘度が増し膜差圧が上昇するとともに生物活性が低下してファウリング物質が増加すると予想されるため，とくに冬期の運転管理には注意を要した。

2.1.2　処理フローおよび施設概要

概略処理フローを図９に示す。当センターは分流式の下水処理場であり，目幅１mmの微細目スクリーンで流入下水の夾雑物を除去した後，流量調整槽を経て反応タンクに流入させている。反応タンクは２系列から構成される。余剰汚泥は好気タンクより引抜かれ直接脱水される。水処理施設（１系列）の概要を表２に，膜ユニットの外観を図10に示す。

当センターは新設の処理場である。前述した冬期運転の問題とは別に，流入下水量がきわめて少なく活性汚泥性状の悪化，すなわち膜ろ過性の悪化を招きやすい運転初期の管理にも注意を要した。

2.2　初期運転管理

2.2.1　運転立ち上げ方法

一般的に新設のMBRでは，近隣の下水処理場から高濃度の種汚泥を少量輸送する方が望ましいといわれるが，当社はさらに，膜ろ過性が良くフレッシュな状態の種汚泥を採用した。

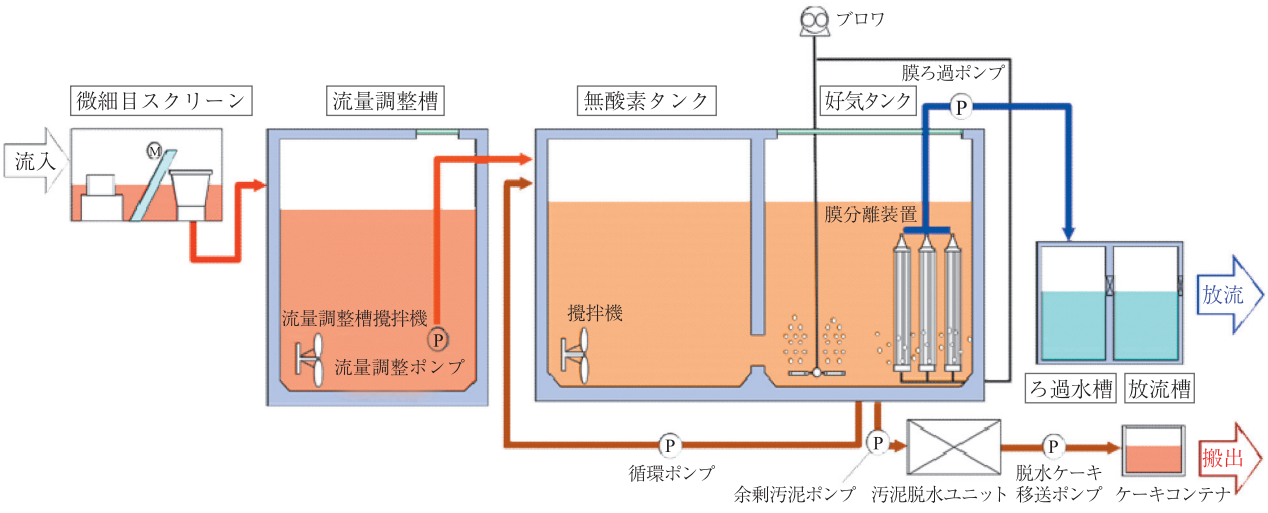


図９　概略処理フロー

表２　水処理施設の概要（１系列分）

施　設　名		主　　仕　　様
反応タンク	無酸素タンク	4.0 mW × 5.7 mL × 有効水深4.0 m
	好気タンク	4.0 mW × 5.7 mL × 有効水深4.0 m
膜分離装置	膜モジュール	表１を参照
	膜モジュール数	12本／ユニット
	膜ユニット数	５ユニット

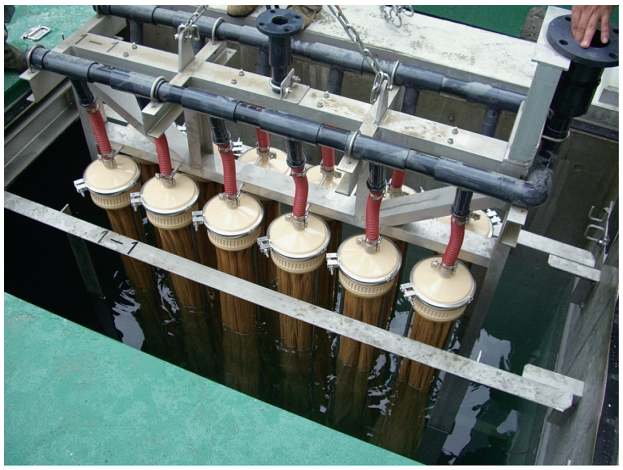


図10　膜ユニットの外観

表３　基本的な運転管理指標

MLSS	8 000～12 000 mg/L
好気タンク DO	1.5～4.0 mg/L
BOD-SS 負荷	0.05～0.10 kgBOD/kgSS/d

表４　種汚泥候補の MLSS，ろ紙ろ過量の測定結果

種 汚 泥 候 補		MLSS［mg/L］	ろ紙ろ過量［mL/5分］
佐久間浄化センター	返送汚泥	5 800	31
佐久間浄化センター	濃縮汚泥	14 400	29
浦川浄化センター	返送汚泥	7 500	39

【備考】各汚泥の MLSS 濃度を5 000 mg/L 程度に希釈・調整してから，水温26 ℃でろ紙ろ過量を測定した。

ろ過性の良し悪しの評価基準としては「ろ紙ろ過量」（試料50 mL を５C ろ紙で５分間自然ろ過した液量）をもちいている。ろ紙ろ過量が10 mL/5分以上となれば「ろ過しやすい活性汚泥」とみなし，それを維持するための基本的な運転管理指標（表３）を採用している[1)]。これらの運転管理指標にしたがえば，冬期水温13～15 ℃程度の一般的な下水であれば，おおむねろ過性の評価基準をクリアできる。

そこで，当センターの立ち上げにあたっては，近隣処理場の MLSS，ろ紙ろ過量を測定し性状を確認してから種汚泥を選定することとした。その結果，表４に示すように，ろ紙ろ過量がもっとも大きい値を示した浦川浄化センターの返送汚泥を種汚泥とした。また投入にあたっては，汚泥性状の変質を防ぐためバキューム車による種汚泥の採取・移送・投入を約５時間で速やかに完了した。なお，反応槽への投入にあたっては，夾雑物を除去するため，投入位置を微細目スクリーンの手前とした。

低負荷運転，高負荷運転は活性汚泥の膜ろ過性や処理水質に影響する可能性があるため，立ち上げ時における MLSS 設定は重要である。供用開始後，流量調整槽に流入する水質，水量を調査し，前述した知見[1)] より BOD-SS 負荷（１日あたり単位 MLSS 量にかかる流入下水 BOD 量の負荷）が0.05 kgBOD/kgSS/d となるよう，MLSS を約1 000 mg/L に設定した。

2.2.2　初期運転条件

MBR の初期運転条件を表５に示す。立ち上げ時期には回分式運転，次いで昼間のみの連続運転をおこない，水量の増加にともなって連続運転へと移行した。膜分離装置の起動に連動して散気装置，循環ポンプを起動させ，膜ろ過ポンプは定流量制御とし，膜の閉塞を防止するため10分ごとに１分間の逆洗をおこなった。なお期間３までの間は，補助散気装置の作動，余剰汚泥の引抜，膜の薬洗はおこなっていない。

2.2.3　初期運転状況

2008年５月15日に運転を立ち上げてからの，水

表５　初期運転条件の推移

項　　目	期間１	期間２	期間３
期　　間	2008/5/16 ～ 6/12	6/13 ～ 7/8	7/9 ～ 2009/3/2
流 入 水 量	30 m^3/d 以下	30～50 m^3/d	50 m^3/d 以上
運 転 方 法	回分式運転 （週２日）	連続運転 （週２日，昼間）	連続運転 *1
設定フラックス *2	0.26～0.46 m^3/m^2/d		0.26 m^3/m^2/d
散 気 装 置	5.0 m^3/m/ 系列（0.2 $m^3/h/m^2$ 膜）		
補助散気装置	停　　止		
余剰汚泥引抜量	引抜せず		

【備考】*1　無酸素槽水位に連動して膜分離装置を起動させた。
*2　流入水量，処理時間に応じてフラックスを設定した。膜分離装置作動時のフラックスを１日当たりに換算して表した。

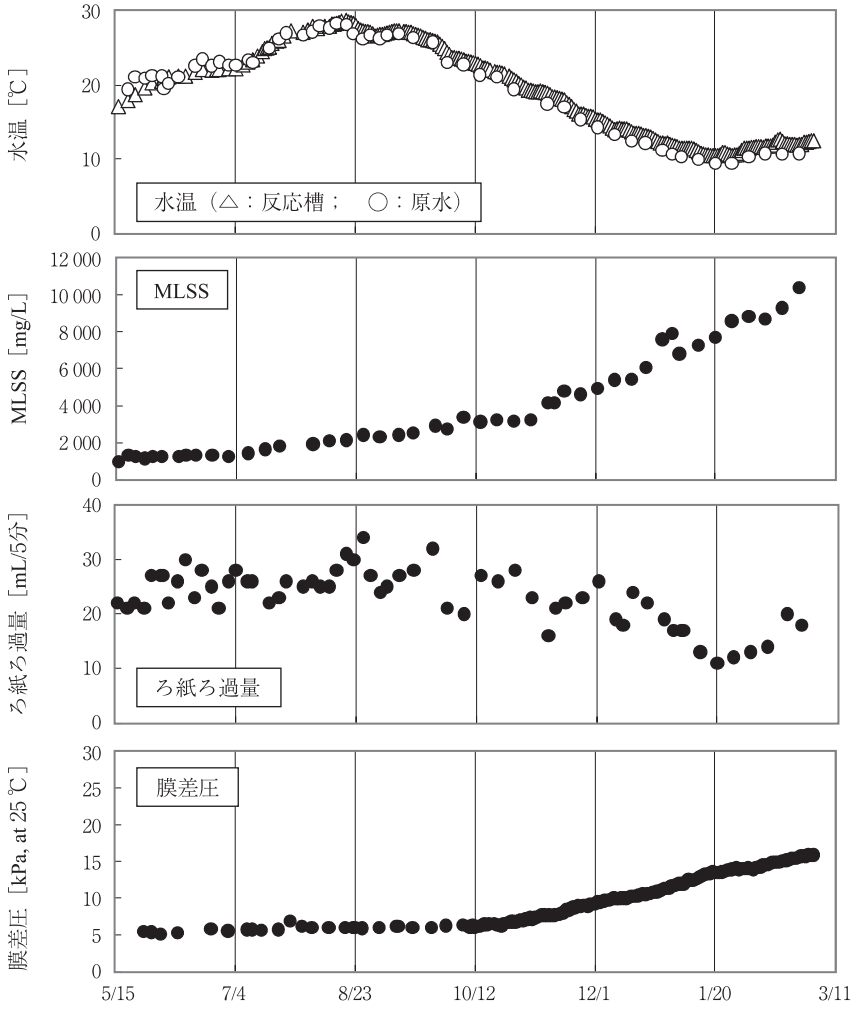


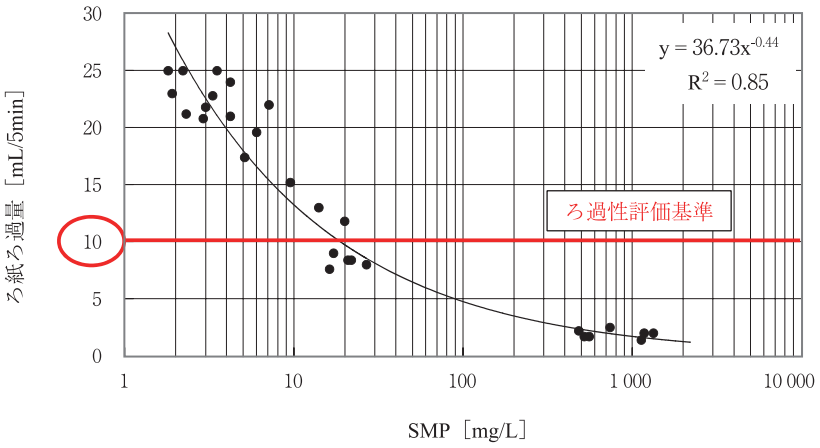
図11　運 転 状 況

温，MLSS，ろ紙ろ過量，膜差圧の推移を図11に示す。

（以下，日付の年表示は省略する。）

反応槽の水温については，立ち上げ時は17.0 ℃であった。高水温期を経て，12月５日から15 ℃を下回り，最低水温は１月18～21日，27日の10.4 ℃であった。このとき流入下水の水温は9.4 ℃であった。

MLSS については，立ち上げ時は940 mg/L，その後順調に汚泥が馴養され，２月24日時点で10 400 mg/L まで増加した。３月２日以降，補助散気装置



SMP（＝Soluble Microbial Products）：
溶解性有機物とみなし，（好気タンク内 S-TOC）－（ろ過水 TOC）で算出

図12　溶解性有機物濃度とろ紙ろ過量との相関

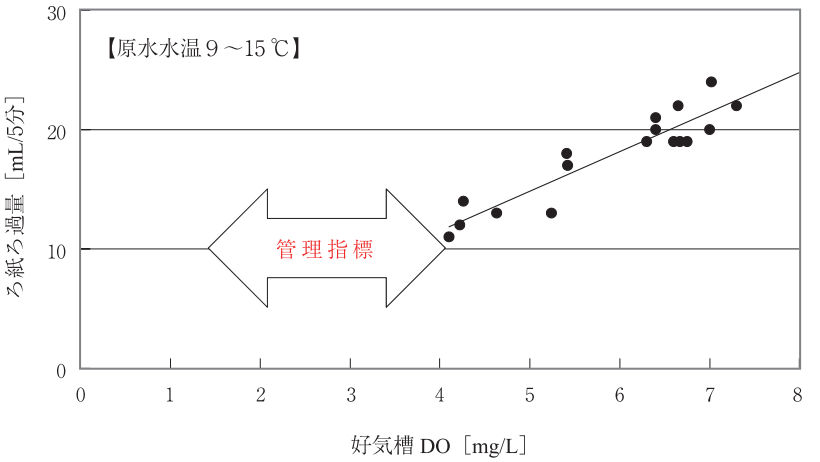


図13　好気タンク DO とろ紙ろ過量の相関

を作動させ，余剰汚泥の引抜きを開始した。

活性汚泥のろ紙ろ過量については，管理下限値目標を10 mL/5分としている。立ち上げ時は約20 mL/5分であったが，水温の低下とともに徐々に低下し，前述した最低水温日には11～12 mL/5分となった。その後，水温の上昇とともに回復し，２月中旬以降は18～20 mL/5分となった。

膜分離装置の膜差圧については，立ち上げ時から10月中旬までは５kPa 程度でほぼ一定であった。その後，膜差圧はおおむね一定の上昇速度で推移し，３月２日時点で約16 kPa となった。

2. 2. 4　「ろ過しやすい活性汚泥」を維持するために

図12に示すデータは下水の実証プラントデータおよびメタン発酵廃液の MBR 実施設データをまとめたものであるが，好気タンク内に蓄積する溶解性有機物の濃度が増えるほど，ろ紙ろ過量が少なくなるという相関がある[5]。溶解性有機物濃度の増加が，膜孔内部に付着するゲルの増加につながるためであると考えられる。したがって，ろ過しやすい汚泥を維持するには，膜に蓄積する溶解性有機物，すなわち好気タンク内 S-TOC とろ過水 TOC との差を一定値以下（20 mg/L 以下）にすることが肝要である。

当センターでは，図13に示すように，好気タンクの溶存酸素濃度（以下，DO と呼ぶ）が大きくなるほどろ過性が向上する傾向がみられた[5]。このデータは生物活性が低下する原水水温９～15℃の低水温期のものであるが，高い DO によって微生物代謝が活性化され，好気タンク内の溶解性有機物が分解されて膜への蓄積量が抑制されたためと考えられる。

したがって，活性汚泥のろ過性が低下してきた場

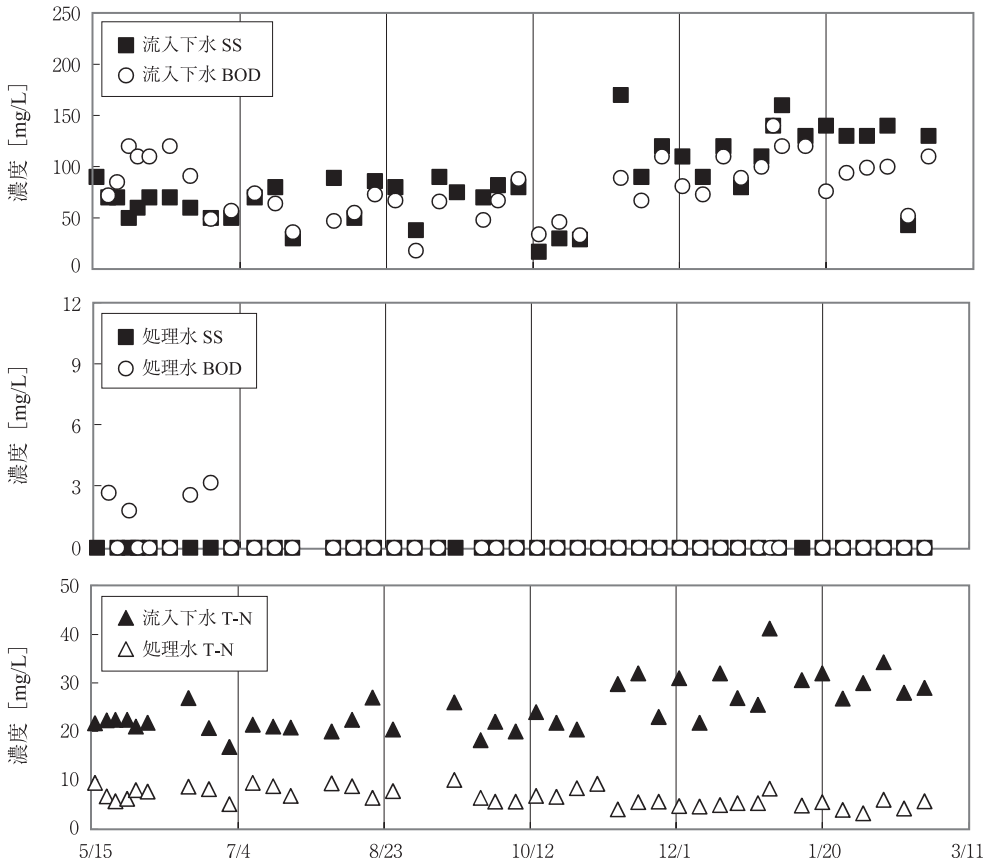


図14　処 理 水 質

合には，曝気エネルギー消費量を極力抑えるため低水温期の一時期に限定したうえで，好気タンクのDO をやや高く設定するのも一つの有効な手段である。

2.3　処 理 水 質

SS，BOD，T-N の推移を図14に示す。流入下水のSS は平均106 mg/L，BOD は平均89.8 mg/L であり，処理水の SS はすべて 1 mg/L 未満，BOD はおおむね 2 mg/L 未満であった。T-N については，MLSS が5 000 mg/L に達して以降，流入下水平均30.5 mg/L に対して処理水平均は5.7 mg/L，除去率は平均81.7 %であった。この期間の循環率は平均3.7であり，理論 T-N 除去率は78.7 %となるため，良好な処理がなされていたといえる。

む　す　び

当社は，PVDF 製の中空糸膜モジュールをもちいて，曝気エネルギーの削減を図りながら MBR を実用化し，実施設 1 号機の良好な運転を維持してきた。MBR には，プロセスが簡略で省スペースでありながら高度な処理水質の達成が可能という優れたメリットがあり，今後ますます普及していくと期待される。そのためには，ソフト面（ろ過しやすい活性汚泥の維持），ハード面（膜ユニットの改良等）の両面から，さらなるエネルギーコスト削減を推し進める必要がある。地球に優しい MBR を目指し，技術改良を成し遂げていく所存である。

【参考文献】

1）石山　明，中島優一，高橋　円，長谷川進，「膜分離活性汚泥法の運転管理に関する検討」，第41回下水道研究発表会講演集，2004，pp.756-758
2）尾崎敏之，中島優一，石山　明，長谷川進，「膜分離活性汚泥法の運転管理に関する検討」，第39回日本水環境学会年会講演集，2005，pp.43
3）石山　明，中島優一 , 長谷川進，尾崎敏之，「膜分離活性汚泥法の維持管理コスト縮減に関する検討」，第42回下水道研究発表会講演集，2005，pp.762-764
4）猿田晴広，山出　桂，石山　明，中嶋雄大，田路明宏，「浜松市城西浄化センターにおける MBR の初期運転について」，第46回下水道研究発表会講演集，2009，pp.314-316
5）石山　明，「MBR の運転管理について」，第12回日本水環境学会シンポジウム講演集，2009，pp.144

*商品市場・技術開発センター 水・汚泥技術開発部 水処理室　**水処理事業部 資源循環プロジェクト室　***水処理事業部 技術部 水処理室

大阪沖埋立処分場排水処理施設

Leachate Treatment Facilities at Osaka Offshore Reclamation Disposal Site

—フェニックス海面埋立型処分場向け排水処理施設—

谷澤　謙*
Yuzuru Tanizawa

当社は，2009年５月に大阪湾広域臨海環境整備センター殿大阪沖埋立処分場向け排水処理施設を納入，同10月開業した。その台船式水処理施設の概要を紹介する。

Kobelco Eco-Solutions Co.Ltd delivered Leachate water treatment facilities at Osaka offshore reclamation disposal site belong to Osakawan-center in May, 2009. Osaka offshore reclamation disposal site started doing business in October, 2009. We reports outline about this floating waste water treatment plant at Osaka offshore reclamation disposal site.

***Key Words*：**

浸　出　水　処　理	Leachate treatment
海面型埋立処分場	Water boarding landfills
台船式浸出水処理施設	Floating waste water treatment plant

【セールスポイント】

台船式水処理方式により，軟弱地盤等設置場所の制約を受けないなどの特長を有する。

ま え が き

我が国は国土が狭く，最終処分場の用地確保が難しいため，埋立残余年数の少なくなった処分場で運用せざるをえない自治体も少なくない。このような状況下で，近畿２府４県において広域かつ廃棄物を長期安定的に適正処理するために計画されたのが，大阪湾圏域広域処理場整備事業（大阪湾フェニックス計画）である。この大阪湾フェニックス計画に基づき，事業主体である大阪湾広域臨海環境整備センター殿では1990年に尼崎沖埋立処分場，1992年に泉大津沖埋立処分場，2001年に神戸沖埋立処分場を設置してきたが，長期安定的に廃棄物の適正処理を継続するため，第４番目の施設として2001年に大阪沖埋立処分場の建設に着手した。大阪沖埋立処分場は大阪市此花区の夢洲沖に2009年夏に全施設が完成し，2009年10月より廃棄物受入れを開始している。なお，廃棄物の受入れ対象自治体は近畿２府４県の175市町村（2009年現在）に及ぶ。この度，当社は大阪沖埋立処分場の余水・浸出水処理を目的とした排水処理施設を納入したので，その施設概要を紹介する。

1.　施設概要

1.1　大阪沖埋立処分場概要

大阪沖埋立処分場はその名のとおり，大阪沖に造成された海面埋立処分場である。大阪沖埋立処分場の概要を以下に示す。また，処分場全景を**写真１**に示す。

１）位　　置；大阪市此花区北港緑地　地先
２）面　　積；95ha
３）護岸延長；護岸延長 4.4 km
４）埋立容量；1 400万 m^3（管理型処分場）

海面埋立処分場は埋立開始時には残留海水をとど

めており，廃棄物の埋立が進むに合わせ，残留海水や雨水等の余水を適正に浄化し，処分場外へ放流する必要がある。海面埋立処分場における排水の特徴は，①塩化物イオン濃度が高い，②汚濁物質は埋立が進むごとに濃度が高くなり，その濃度は長期に継続する，③放流先が海域であるため，脱塩処理はほとんどの場合不要であるが，COD 除去を考慮する必要がある，などが挙げられる。

本排水処理施設はこれら条件を考慮し，浮体台船方式とし受注に結びついたものである。

写真１　大阪沖埋立処分場全景

1.2　設計条件

1.2.1　計画水質，水量

本施設は海面埋立処分場余水のため，埋立進行期に合わせ計画流入水質および水量負荷が高くなる計画である。計画流入水質および放流基準を**表１**に示す。

1.2.2　処理フロー

前項の水量，水質に基づき，処理フローについて検討した。**図１**に水処理フローを示す。メインフローは COD，SS 除去に凝集沈殿，BOD（T-N，T-P）除去に生物接触ろ過，SS 除去に砂ろ過を配置・組合せしたフローで構成している。なお，発生汚泥は場内返送としている（３期まで）。ブロックフローと各処理工程水質（第１，２期）を**図２**に示す。各埋立進行期の水質負荷に合わせ，COD 除去に活性炭吸着塔，窒素除去に生物処理（硝化槽，脱窒槽，再曝気槽）を第３，４期に追加する計画である。

表１　計画流入水質および放流基準

		第１期 埋立初期 （４年程度） ～2013	第２期 埋立中期 （５年程度） ～2018	第３期 埋立終期 （４年程度） ～2022	第４期 安定化期間 （埋立終了から廃止まで）	放流基準
計画処理水量（m^3/d）		4 000 m^3/d	4 100 m^3/d	5 400 m^3/d	3 800 m^3/d	—
計画流入水質	COD	25 mg/L	70 mg/L	105 mg/L	105 mg/L	30 mg/L
	BOD	30 mg/L	55 mg/L	80 mg/L	80 mg/L	10 mg/L
	SS	30 mg/L	55 mg/L	80 mg/L	80 mg/L	10 mg/L
	T-N	15 mg/L	30 mg/L	75 mg/L	75 mg/L	30 mg/L
	T-P	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.6 mg/L	0.6 mg/L	4 mg/L

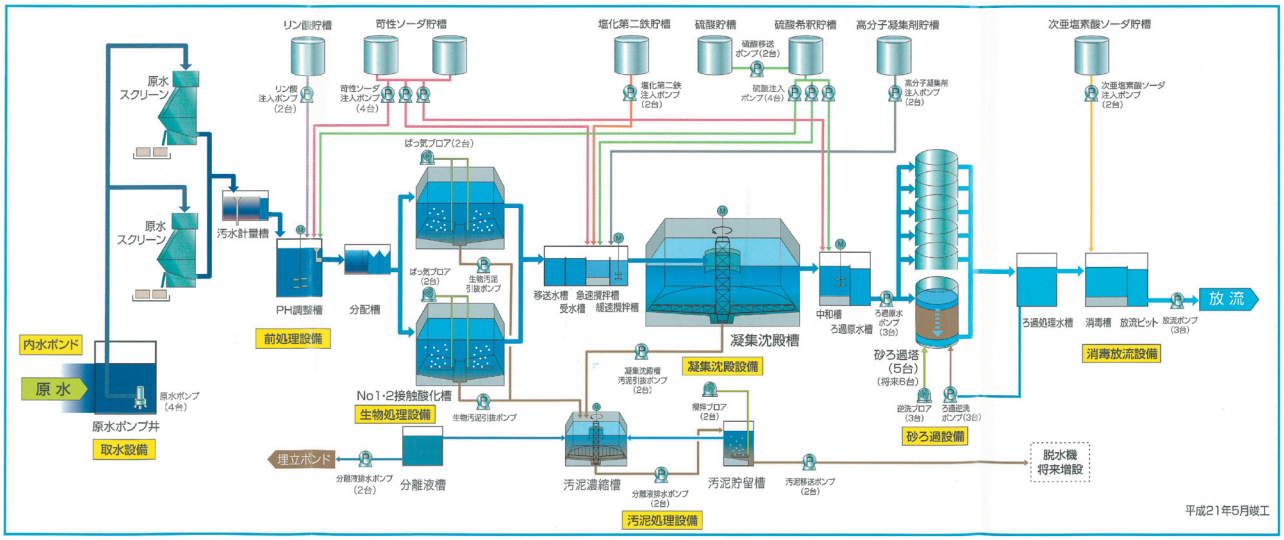
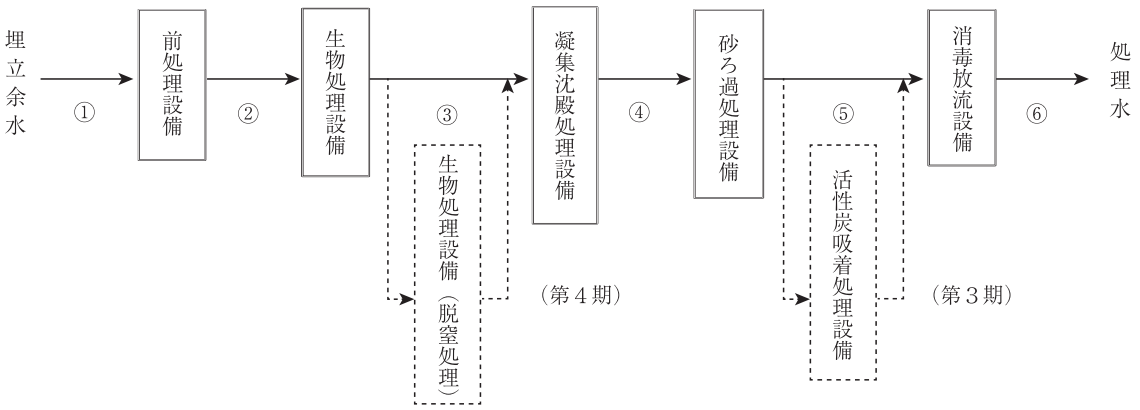


図１　水処理フローシート



項　目		①	②	③	④	⑤	⑥	放流基準値
pH	—	—					5～9	5～9
COD	mg/L	70	→	→	35	30	30以下	30
BOD	mg/L	55	→	10	→	→	10以下	—
SS	mg/L	55	→	→	17	10	10以下	10
T-N	mg/L	25	→	→	→	→	30以下	30
T-P	mg/L	0.3	→	→	→	→	4以下	4

図２　ブロックフローおよび各処理工程水質（第１，２期）

1.3　施設概要

本施設は専用台船上に水処理施設を配置する浮体台船形式である。排水処理施設全景を**写真２**に示す。

構　　造；鋼製二重殻　浮体台船方式
処理能力；最大5 400 m^3/d
台船寸法；全長66.75 m，全幅39 m（水没部61 m×37 m）舷高13.1 m，喫水下2.5 m
重　　量；約6 000トン（運転時）
常用発電施設；ディーゼル発電機　500kVA　２機（交互運転）

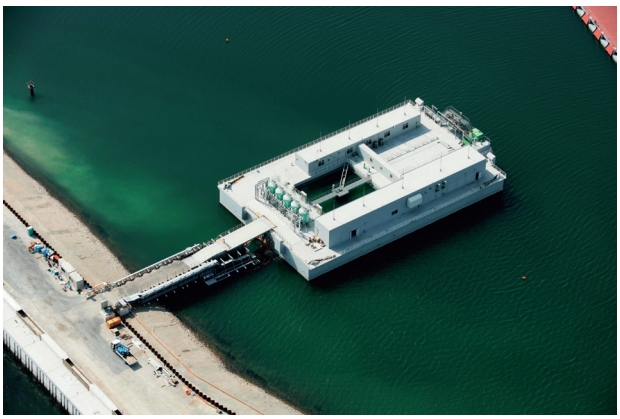


写真２　排水処理施設全景

1.4　施設構成

各構成設備は１）～９）で，その詳細仕様について**1.4.1**以降に示す。

１）前処理・生物処理設備
２）凝集沈殿処理
３）砂ろ過処理設備
４）消毒放流設備
５）薬品注入設備
６）汚泥処理設備
７）台船設備
８）発電機設備
９）電機計装設備

1.4.1　前処理設備

前処理設備では取水のほか，夾雑物等の除去，後段生物処理に適したpH調整をおこなう。前処理設備外観を**写真３**に示す。

写真３　前処理設備

1）原水ポンプ
形　　式；水中汚物汚水ポンプ
能　　力；1.6 m^3/min ×16 m ×7.5 kW
数　　量；４台（１台予備）
2）原水スクリーン
形　　式；ワイヤ式自動スクリーン
目　　幅；2.5 mm
数　　量；２台
3）pH 調整槽
形　　式；鋼板製角形水槽
容　　量；42 m^3

1. 4. 2　生物処理設備

生物処理設備では，充填した接触ろ材に付着する汚泥中の微生物の働きにより，主に BOD 成分の酸化分解（除去）をおこなう。（計画 BOD；原水55 mg/L，処理水；10 mg/L（除去率82 %））生物処理設備外観を**写真４**に示す。

1）接触酸化槽
有効容量；1 421 m^3
数　　量；２系列
2）接触材
形　　式；波板状接触材
材　　質；合成樹脂
接触材容量；705 m^3
比表面積；70 m^2/m^3
3）ばっ気装置
形　　式；微細気泡散気筒方式
材　　質；合成樹脂
4）ばっ気ブロワ
形　　式；ルーツブロワ
能　　力；7.1 m^3_N／分×45 kPa ×11 kW
数　　量；４台（２台予備）

1. 4. 3　凝集沈殿処理設備

凝集沈殿処理設備では凝集剤にポリ硫酸鉄を使用し，弱酸性領域下で COD・色度成分および懸濁物質（SS）の除去をおこなう。（計画 COD；流入水70 mg/L，処理水35 mg/L（除去率50 %），計画 SS；流入水55 mg/L，処理水17 mg/L（除去率69 %））また沈殿処理水を放流基準に適した pH（5.8～8.6）に中和をおこなう。凝集沈殿処理設備外観を**写真５**に示す。

1）急速撹拌槽
形　　式；鋼板製角形槽
容　　量；20 m^3（滞留時間5.3分）
撹 拌 機；ϕ500 mm × 2 段×7.5 kW × 1 台
2）緩速撹拌槽
形　　式；鋼板製角形槽
容　　量；98 m^3（滞留時間26.1分）
撹 拌 機；ϕ1 150 mm × 2 段×3.7 kW × 2 台
3）凝集沈殿槽
形　　式；鋼板製角形槽
容　　量；1 091 m^3（滞留時間4.85時間）
4）凝集沈殿汚泥掻寄機
形　　式；中央駆動支柱型
能　　力；ϕ18 000 mm ×1.5 kW
5）中和槽
形　　式；鋼板製角形槽
容　　量；39 m^3（滞留時間10.4分）

1. 4. 4　砂ろ過処理設備

砂ろ過処理設備では，凝集沈殿処理水に残存する SS 分の除去をおこなう（計画 SS；流入水17 mg/L，処理水10 mg/L 以下（除去率42 %））。砂ろ過処理設備外観を**写真６**に示す。

1）砂ろ過塔

写真４　生物処理設備

写真５　凝集沈殿処理設備

写真６　砂ろ過処理設備

写真７　消毒・放流設備

形　　式；鋼板製圧力式ろ過器
ろ過面積；4.9 m^2（ろ過速度約186 m/d）
数　　量；５塔（将来６塔）
洗浄方式；空気・水洗浄方式

２）逆洗ポンプ
形　　式；片吸込み渦巻きポンプ
能　　力；3.9 m^3/min ×15 m ×11 kW

３）逆洗ブロワ
形　　式；ルーツブロワ
能　　力；4.9 m^3/min ×45 kPa ×7.5 kW

1.4.5　消毒・放流設備

消毒・放流設備では，凝集沈殿・砂ろ過処理水を次亜塩素酸ソーダで滅菌し，放流基準に適した消毒（処理水大腸菌群数3 000個 /cm^3以下）をおこない，処分場外（海域）へ放流をおこなう。消毒・放流設備外観を**写真７**に示す。

１）消毒槽
形　　式；鋼板製角形水槽
容　　量；58 m^3（滞留（接触）時間15.5分）

２）放流槽
形　　式；鋼板製角形水槽
容　　量；115 m^3

３）放流ポンプ
形　　式；片吸込渦巻きポンプ
能　　力；1.9 m^3/min ×30 m ×18.5 kW
数　　量；３台（１台予備）

1.4.6　薬品注入設備

薬品注入設備は前処理，生物処理，凝集沈殿処理，消毒設備，汚泥処理設備に必要な薬品類（リン酸，硫酸，苛性ソーダ，ポリ硫酸鉄，高分子凝集剤，次亜塩素酸ソーダ）を貯留・注入ポンプで構成される。なお，各薬品貯槽の有効容量は30日分以上としている。

1.4.7　汚泥処理設備

汚泥処理設備では排水処理プロセスで発生した生物汚泥および凝集沈殿汚泥を濃縮減容した後，無機汚泥として廃棄物とともに埋立をおこなう。将来的には，脱水機等を増設し別途処理をおこなう。

１）汚泥濃縮槽
形　　式；鋼板製角形水槽（重力濃縮槽）
容　　量；107 m^3

２）汚泥濃縮槽掻寄機
形　　式；中央駆動式
掻寄速度；2.3 m/min

３）汚泥貯留槽
形式；鋼板製角形水槽
容量；16 m^3

４）汚泥貯留槽撹拌装置
形式；散気管方式
能力；0.27 m^3/min

５）汚泥移送ポンプ
形式；一軸ネジポンプ
能力；0.15 m^3/min ×30 m ×5.5 kW

1.4.8　台船設備

本設備は，各設備等を構築する基礎部分であり，建屋建築工事に該当する。外殻は鋼板製溶接構造の台船方式としている。

台船の固定は，排水処理施設の運転に支障をきたさないよう，護岸内海底に200トン／基のシンカー４基にて係留するとともに，台船の姿勢を姿勢制御機能（バラストタンク４基装備）にて水平（0.2度以内）を保っている。

台船へのアクセスは処分場南護岸から台船へ架橋し，通行・搬入を容易とし維持管理性向上を図って

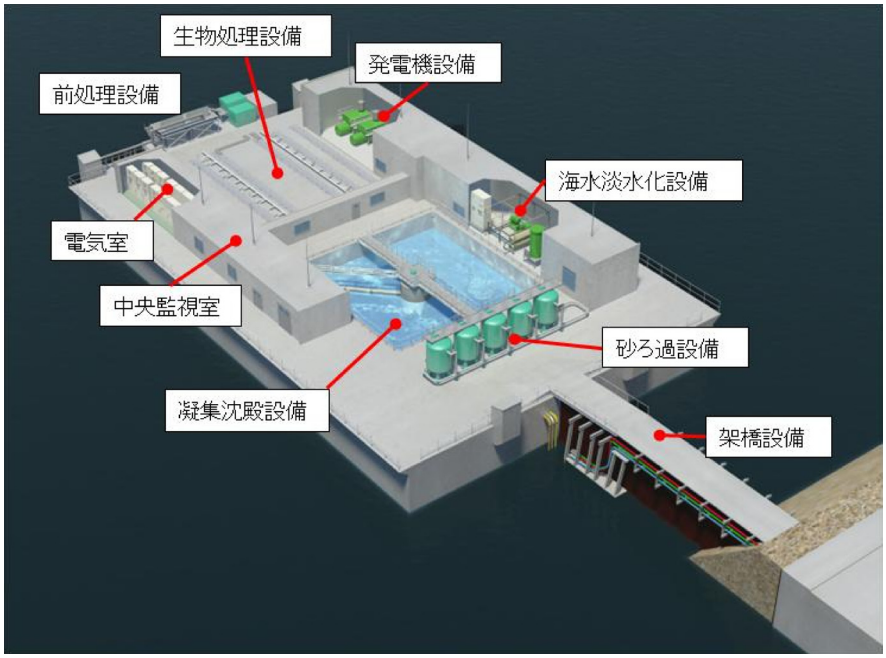


図３　台船設備

いる。台船設備内概略配置を図３に示す。

1）台船

形　　式；浮体台船方式

寸　　法；37 m ×61 m ×8.1 m

付属設備；キャビン（建家），建築換気・照明，浄化槽，衛生設備，姿勢制御装置，海水淡水化装置他

1. 4. 9　発電機設備

発電機設備は，排水処理設備および関連設備の動力，処分場管理棟などへの常用電源として設置し，交流発電機，ディーゼル機関および脱硝装置等の関連機器がある。

燃料は排ガス規制に対応するため LSA 重油を使用し，貯留量は15日分以上の72 kL タンクを船内に設置している。また，常用発電施設のため，排ガス NO_X を300 ppm 以下に制御，常時監視をおこなっている。発電機設備外観を写真８に示す。

1. 4. 10　電気計装設備

電気計装設備は，中央監視室・電気室内の監視盤・制御盤および現場操作盤，排水処理施設の運転管理に必要な計測機器（流量計，水位計，DO 計，pH 計，COD 計，濁度計等）により，処理状況の指示・警報，帳票集計等をおこない，自動制御運転を合理的におこなうことができるよう設備を設置している。

2.　排水処理施設運転状況

2009年10月以降の運転状況として，①放流水流量の経日変化を図4.1に，②放流水質例として2009年11月17日の連続モニタリング項目（濁度，COD）の経時変化を図4.2に示す。これら結果から，放流水量・水質とも計画能力・基準を満足している（SS10 mg/L 以下，COD30 mg/L 以下，pH5.8～8.6）。今後も安定運転に向けて，負荷増にともなう水質変動を経過確認していく。

写真８　発電機設備

む　す　び

2006年７月に工事着手した大阪沖埋立処分場排水処理施設は2009年５月に無事完工し，立上げ・客先引渡しを完了した。今後，廃棄物埋立が進むにつれ，水量・水質負荷は漸増していく計画である。安定操業に向け，処分場全体の管理を担っている（財）

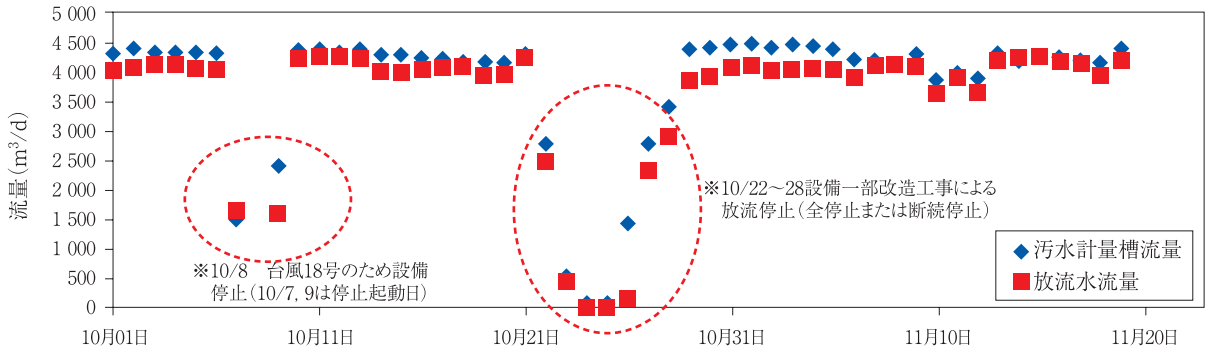


図4.1　原水流量，放流水流量の経日変化

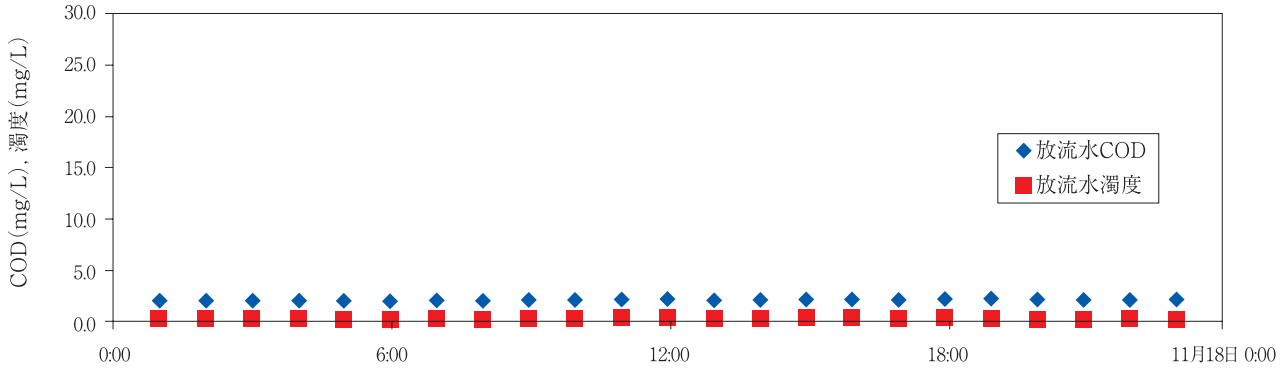


図4.2　放流水 COD，濁度の経時変化（2009年11月17日）

大阪市環境事業協会および排水処理施設の維持管理を請けている神鋼環境メンテナンス㈱と協力し，今後とも環境保全の維持に努め，大阪湾の環境回復の一助となりたい。

［参考文献］

1）㈱環境産業新聞社：浸出水処理技術ガイドブック，p46
2）㈱環境産業新聞社：日本の最終処分場　改訂版，p32，p71
3）大阪湾広域臨海環境整備センターホームページ「大阪湾フェニックス計画」
http://www.osakawan-center.or.jp/phoenix/index.html
4）大阪湾広域臨海環境整備センターホームページ「大阪沖処分場の開業について」
http://www.osakawan-center.or.jp/center/kouji.html

*水処理事業部 技術部 水処理室

発 電 用 大 型 冷 却 塔

（大阪ガス株式会社泉北天然ガス発電所殿向）

発電所向冷却塔は大規模となるため，冷却塔から発生する白煙，水飛散，周辺建屋・設備が冷却塔の空気取り入れに与える影響は一般工業用冷却塔より大きくなります。

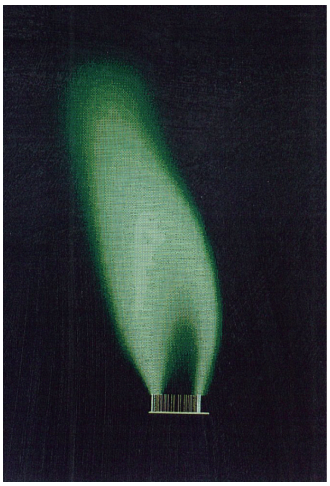
大阪ガス㈱泉北天然ガス発電所においては，天然ガス燃料，送電ロス低減，発電効率の高いシステム採用など環境負荷低減に配慮されています。

冷却塔での環境負荷への配慮は，配置，白煙低減の観点から冷却塔周辺建屋・設備を含めた冷却塔近傍の空気流れの数値シミュレーションをおこない，可能な範囲での最適配置をおこないまた，景観・視程（白煙）に関して，実験データと数値シミュレーションに基づき，白煙発生量の予測･低減対策をおこなっています。

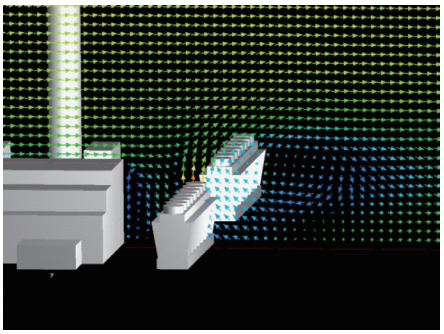
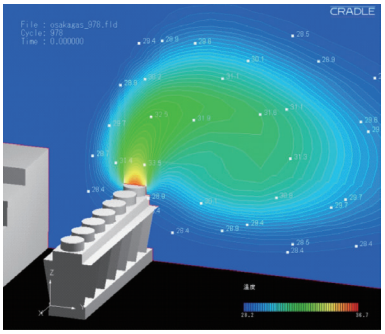
このように，冷却塔の周囲設置状況を踏まえた最適配置と，環境を配慮した冷却塔を提供しています。

白煙発生予測

実　験



数値シミュレーション



空気流れシミュレーション