

目次	CONTENTS
1 <巻頭言> 水道事業の官民連携	
2 ビニループプロセスによる硬質塩ビ系廃棄物の マテリアルリサイクル	Material Recycling of Waste Rigid Polyvinylchloride by VinyLoop® Process
8 金属ナトリウム分散体の製造	Production of Sodium Dispersion
12 ほう素対応海水淡水化施設の運転状況	Report on Boron Removal Seawater Desalination Facility
19 ストーカ式焼却炉における低空気比燃焼運転	Operation Data from Grate Incinerator under Low Air Ratio
26 回転型濾過乾燥機「RFD™」	Rotary Type Filter Dryer "RFD™"
36 熱輸送システム技術「サーモウェイ®」	Thermal Energy Transport System "ThermoWay®"
42 蓄熱式燃焼脱臭装置の設計最適化	Design Optimization of Regenerative Thermal Oxidizer
48 製品・技術紹介	

水道事業の官民連携



北海道大学公共政策大学院

特任教授 **眞柄 泰基**

Yasumoto Magara

水道事業を含めて公共事業への官民連携が積極的に進められようとしている。水道施設の整備が積極的に進められるようになったのは、1960年代中葉からであり、1980年代にはその普及率が90%に達し実質的には水道普及の時代から維持管理の時代に移行したのである。水道施設の資産価値は約32兆円で、約3兆円の水道料金収入を得、年間約150億 m³の水道水を家庭用および事業所用に供給している。その資産のうち、管路施設と浄水施設との比率は7対3である。しかし、約150億 m³の水道水を供給している施設は、1970年代以前に建設された施設が給水能力の20%にも達し、さらに、毎年経年化した施設の占める割合が増加し続けるのである。

このような制約条件のなかであって、国際的にもレベルの高い良質で快適な水道水を供給できるサービス水準を確保するための政策が展開されてきている。水道法の改正により、水道事業管理者の自己責任体制を強く求めたり、水道施設の性能基準化を図ったり、あるいは、第三者委託制度の推進を進めてきている。あるいは、水道経営の効率化を図るために省人化が進められることを想定して、運転管理に省人化が図られると共に、凝集沈殿急速濾過という一般的な浄水処理に比べ良質な水道水を供給できる膜濾過処理の実用化が進められている。しかし、このように政策が進められているにもかかわらず、経年管の更新や浄水施設の高度化・更新は遅々として進んでいない。

水道は、国民の日常生活ばかりでなく、社会活動に不可欠な社会インフラでもあり、水道事業のサービス水準の確保・向上は、水道界に課せられた責務であるとの認識から水道ビジョンが明らかにされた。また、水道ビジョンの遂行状況をより明確にするため、水道事業ガイドラインが規格化され、水道事業体のサービス水準を定量化出来るようになったのである。水道事業ガイドラインはISOにさだめる水道サービス規格の適用を受けるものであり、国内の水道事業に海外企業が参入する際に適用されるものでもある。

水道事業ガイドラインにより、各水道事業体のサービス水準が比較可能になることにより、水道利用者の意見や要望がより直裁的になり水道事業の適切な展開を求めるようになるであろう。その際に、必要な資金調達にかかるリスクの計量化にも、このガイドラインの持つ意義は高い。工業先進国の上下水道分野の資金調達は、民間資金によるものが潮流であり、さらには、水道事業に民間企業が直接参画することも同様である。これまでの地方自治体の水道事業管理者の自己責任から、民間からの参画者の自己責任体制が求められることになる。自己責任の範囲内で、地方自治体との契約を満たす範囲での性能を満たす合理的で効率的な施設を整備し、運用することが可能になるのである。例えば、UF/MFとNFによる大規模な浄水施設が整備され、シンプルで省人化されながら、これまでの高度浄水処理を備えた浄水施設より格段に良質な水道水が供給されている海外事例もある。これまでといっても約150年の実績しかない浄水処理とは全く異なった概念による浄水施設へと変わろうとしている。まさに、水道サービスを支える技術とそれに基づくビジネスモデルが大きく変わろうとしている。

ビニループプロセスによる硬質塩ビ系廃棄物の マテリアルリサイクル

Material Recycling of Waste Rigid Polyvinylchloride
by VinyLoop[®] Process



技術開発本部
プロセス技術開発部新規プロセス室
井 出 昇 明
Shoaki Ide
(株)コベルコ・ビニループ・イースト
星 野 孝
Takashi Hoshino

前報において使用済農業用ビニルシート（農ビ）を中心に、軟質塩ビ系廃棄物をビニループプロセスで処理した各種再生塩ビの品質特性調査結果、ならびに実用化を図るうえでの技術課題と対応策、そして各種用途への適用検討結果をまとめ多くの用途に適用可能であることを報告した。

軟質塩ビ系廃棄物に対して、硬質塩ビ系廃棄物も既存のリサイクル法は、機械破砕による再利用あるいは処理コストの高いケミカルリサイクルのみであり、同廃棄物の多くは焼却や埋め立て処分されているのが実情である。硬質塩ビの有効利用方法の一つとして、ビニループプロセスにより硬質塩ビから回収した再生塩ビの各種用途への適用を検討した結果、硬質塩ビに再利用できるばかりでなく軟質塩ビにも転用できることが明らかとなった。本報告では、硬質塩ビ系廃棄物を再利用するうえでの技術課題ならびに軟質塩ビに適用するための同再生塩ビの粉体特性および基本物性の調査結果を中心に報告する。

In our previous report, we reported our investigation results of the basic properties of the regenerated PVC (R-PVC) obtained from waste PLASTICIZED PVC like Noubi Sheet and many kinds of other waste PVC products by Vinyloop Process, the application study in various markets, and the technical issue and the countermeasure on the utilization for their various use. As a result, we found out that most of R-PVC obtained from plasticized PVC can be applied to many kinds of products. On the other hand, most of waste RIGID (non-plasticized) PVC like pipe, connector etc. has not been recycled except for water pipe because of the difficult processability and the lower solubility to organic solvent. Eventually most of them has been treated by incineration or reclamation into ground. We investigated the utilization for their various use of the R-PVC obtained from rigid PVC by Vinyloop Process. As a result, it became clear that the R-PVC from waste rigid PVC can be applied for not only rigid PVC, but also plasticized PVC. This report shows the technical issue for recycling waste rigid PVC, the investigation results of basic and mechanical properties of the R-PVC for the utilization to plasticized PVC, and the application study in various markets.

Key Words :

ビニループプロセス
硬質ポリ塩化ビニル
リサイクル

Vinyloop process
Rigid polyvinylchloride (PVC)
Recycling

まえがき

現在、日本国内において年間約100万トンの使用済塩ビが廃棄されているが、その内軟質塩ビ系廃棄物は約60万トンが廃棄され動力電線や施設園芸のビニルハウスの使用済みフィルムなどを中心に約20万トンが処理され、電線、床材等の用途に再利用されている。しかしながら、床材や防水シートなどに代表されるポリエステル繊維や他のプラスチック繊維との複合製品は再利用することが難しいため、それらの多くは埋め立てあるいは焼却処分されている。

一方、硬質塩ビ系廃棄物は約40万トンが廃棄され、水道管を中心に約2万トンが再利用されているが、既存のリサイクルでは、水道管など一部の廃棄物に見られるように、機械的に破砕後ペレット化を経てもとの製品に再利用されたり、あるいは処理コストが高いケミカル処理されているのみである。また、硬質塩ビを可塑剤や軟質塩ビと混合した軟質化が試みられているが、成形加工の段階で軟化点の違いにより相分離してしまうため技術的に困難である。そのため、硬質塩ビ系廃棄物のリサイクルはほとんど進展しておらず適正な処理方法が望まれている。

当社がソルベイ社より技術導入したビニループプロセスは、軟質塩ビ系廃棄物を中心にほとんどの使用済み塩ビ系廃棄物の処理が可能であり、2006年度初めより当社が90%を出資するコベルコ・ビニループ・イースト（KVE）が同プロセスによる使用済み塩ビ系廃棄物から回収する再生塩ビの販売事業に取り組む計画である。現在、千葉県富津市に年間2万6千トンの処理能力をもつプラントを建設中であり、2006年3月には完成し、4月より試験操業を開始する予定である。

すでに軟質塩ビ系廃棄物である農ビ、農ビ／壁紙混合品、そして廃電線については、電線、土木シート、床材メーカーを中心に採用可能との評価をえている。

本報告では、従来再生利用が困難であった硬質塩ビ系廃棄物を対象に、ビニループプロセスに適用するうえでの技術課題と対策、そしてえられた再生品の粒子性状や粉体特性ならびに基本物性評価を実施し、それらの結果をもとにその有効利用可能性について検討した結果を報告する。

1. ビニループプロセスの基本構成とその特長

ビニループプロセスは溶剤をもちいた使用済み塩ビ系廃棄物の再利用プロセスであり、表1に示すように異物の混入量が少ないこと、有機溶剤中で塩ビおよび添加剤が完全に溶解するので品質が安定すること、プロセスの途中で可塑剤・安定剤などを添加できるので再生塩ビの硬度が調整できること、など従来法とは異なる多くの特長を有し、大部分の塩ビ系廃棄物を再利用することが可能である。写真1は



写真1 建設中の千葉工場（撮影日：2006.1.11）

表1 ビニループプロセスと従来のマテリアルリサイクル技術の比較

項 目	ビ ニ ル ー プ 法	従 来 法
取 扱 性	粒子径が均一のため容易	性状の変動が大きいことや困難なケースあり
異 物 混 入	少ない	多い 注) 異物量が多いと再生を断念せざるを得ない場合がある
品質のバラツキ	溶剤中に塩ビおよび添加剤が均一に溶解するため安定	材料のバラツキがそのまま再生品のバラツキとなるために不安定
再生品の調整	品質の異なる塩ビ廃棄物を同時処理することで再生品の品質調整が可能	簡単な処理のみ可能

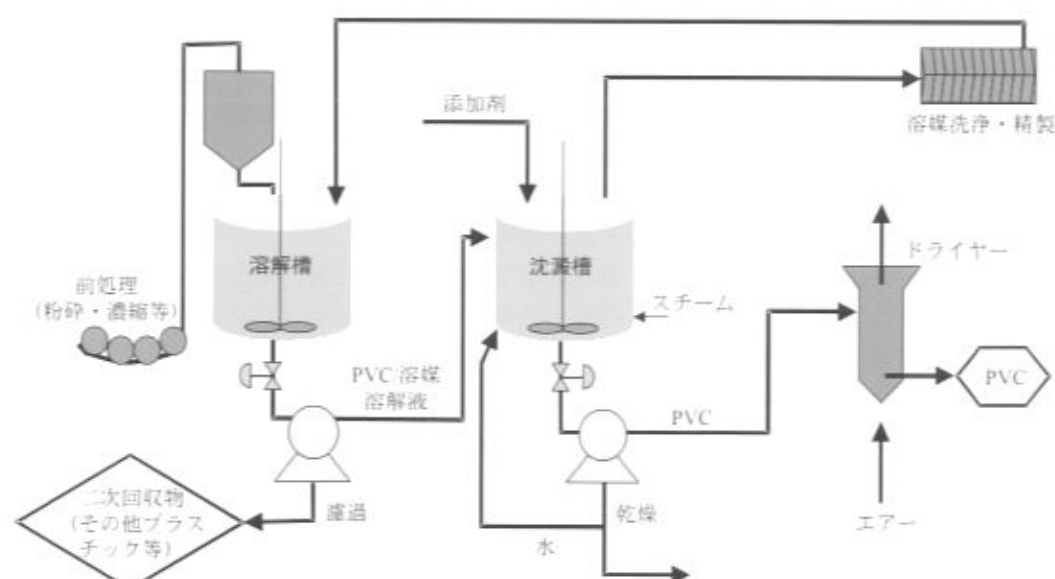


図1 ビニールプロセスフロー

表2 硬質塩ビと軟質塩ビの特長および相違点

項 目	硬 質 塩 ビ	軟 質 塩 ビ
用 途	水道用管継手、窓枠サッシ、波板、フィルム	農ビ、床材、電線シース、軟質フィルム、止水板
構 成 成 分	安定剤、滑剤、フィラー (TiO ₂ 等)	可塑剤、安定剤、フィラー (CaCO ₃ 、TiO ₂ 等)、繊維 (PET、GF 等)
主な塩ビ重合度	800、1100	800、1100、1300
特 長 お よ び 相 違 点	加工性や溶剤への溶解性に劣る、長期耐久性に優れる	加工性や溶剤への溶解性に優れる、成形性や製品設計の自由度が大きい

千葉県富津市に建設中のプラントを示す。図1に使用済農ビを例に本プロセスの処理フローを示す。本プロセスは①前処理工程、②溶解工程、③分離工程、そして④沈澱・回収工程の4つの工程から成り立っている。前処理工程では、使用済農ビを破砕機により適当な大きさに破砕処理した後農ビ表面に付着した土砂類を水洗浄し、土砂量を所定濃度以下まで低減させたのち溶解工程で容易に処理可能な形状に加工処理をおこなう。溶解工程では塩ビ（可塑剤、安定剤等を含む）を選択的に溶解する溶剤をもちいて、塩ビのみを溶解させ、土砂やポリエチレンなど不溶なその他成分と分離する。沈澱工程では、溶剤中に溶解した塩ビ溶液からスチーム・ストリップング操作により溶剤を蒸発させ、塩ビを粒状に固化沈澱させ回収する。溶剤回収工程では、蒸発させた溶剤を冷却凝集させ、溶解工程で循環再利用する。

本処理技術の特長は以下のとおりである。

- ① ほとんどの塩ビ系混合廃棄物から塩ビのみを分離し、マテリアルリサイクルを実現できる。

- ② 回収された塩ビは、もともとの原料に含まれていた可塑剤や安定剤等の添加剤も塩ビとともに溶出するため、再利用する場合に可塑剤や安定剤の添加量を低減できる。
- ③ 塩ビ回収（溶解）工程において、必要に応じて可塑剤や安定剤など添加剤を投入して成分調整することも可能である。
- ④ 再生塩ビは、バージン材とくらべ物性的に遜色がなく、また従来と同様な成型法をもちいて再利用が可能である。

2. 硬質塩ビと軟質塩ビの特長および相違点

表2に硬質塩ビと軟質塩ビの特長および相違点をまとめて示す。軟質塩ビは塩ビのほかに可塑剤、各種安定剤、添加剤等を含むが、その用途は農ビ、電線、軟質フィルム、床材など多種多様であり、使用される樹脂や添加剤（安定剤、可塑剤）そして強化材（ポリエステル繊維等）の種類も多い。一方、硬質塩ビの配合組成は塩ビ成分が主体であり、樹脂の種類も成形加工性確保を目的に低重合度品が中心に

使用されている。また、廃棄物の再利用の観点からは軟質塩ビは複合材を除けば有機溶剤に溶解しやすく成形加工性も良いことから比較的マテリアルリサイクルしやすい材料であるといえる。これに対して、硬質塩ビは有機溶剤に溶解しにくく、また成形体のまま軟質塩ビや可塑剤と混ぜて使用することが不可能であるため、水道管など一部の廃棄物がペレット化されたのち再利用されているのみである。

表3に各種塩ビ系廃棄物の溶解性を調べるために起こった溶解条件と溶解度の関係を示す。使用済農ビをはじめ軟質塩ビは80℃、常圧、1～2時間あるいは100℃、1 kg/cm²G、15分前後の条件下で完全に溶解するが、硬質塩ビは5 mm 前後まで微粉砕した場合においても80℃、常圧では溶解困難であり、100℃、1 kg/cm²Gの条件下でも0.5～1時間の溶解時間が必要であり、軟質にくらべて溶解しにくい原材料である。また、硬質塩ビと軟質塩ビ混合

品の処理においても、硬質塩ビが溶解の律速となるため硬質と同様な溶解条件が必要である。硬質塩ビは軟質塩ビにくらべて溶解しにくい、溶解時間は破砕粒度を小さくすれば短縮できる。

3. 硬質塩ビ系廃棄物から回収した再生塩ビの粒子形態および粉体特性

使用済硬質塩ビから回収した再生塩ビが軟質塩ビ材料として利用できるかを調査する目的で、再生塩ビの粒子形態および粉体特性を調査した。

(1) 再生塩ビの粒子形態

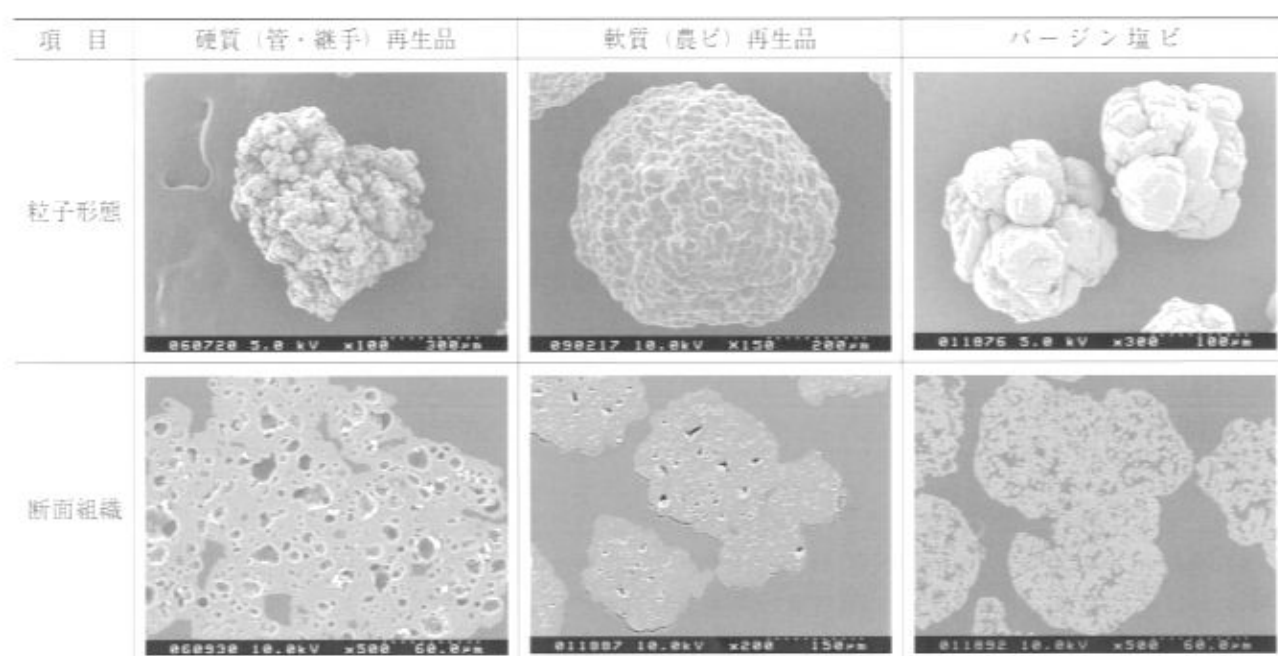
写真2に水道管・継手から回収した再生品粒子のSEMによる観察結果を示す。比較材として軟質塩ビ再生品（農ビ再生品）そして合成品（バージン）の各粒子の粒子形態、断面組織（モルホルジー）を示す。

懸濁重合法により製造されたバージン材は数μm単位の一次粒子が凝集して形成された二次粒子がさ

表3 各種塩ビ系廃棄物の溶解条件と溶解時間の関係

項 目	形 状	軟 質 塩 ビ		硬 質 塩 ビ	
		農 び	壁 紙	管・継手	
溶解条件	温 度 (℃)	80	100	80	100
	圧力 (kg/cm ² G)	0	1	0	1
溶 解 時 間 (min) (注)		120	15	60	15
					溶解せず
					30

注) 塩ビ濃度10 wt %において各種廃棄物が完全に溶解するまでに要する時間



注) 軟質（農ビ）再生品は可塑剤を含む

写真2 各種再生品のSEMによる観察結果

表4 各種再生品の粉体特性

項 目	硬質（管・継手）再生品	軟質（農ビ）再生品	バージン塩ビ
かさ密度（g/dm ³ ）	0.43	0.56	0.51
平均粒子径（μm）	210	340	150
空隙率（cc/g）（注1）	0.39	0.06	0.33
可塑剤最大吸収量（g／再生品100g）	80	70	100
可塑剤吸収時間（分）（注2）	11	13	8

注1）水銀注入法により測定 注2）DOP80部を添加した時の吸収時間

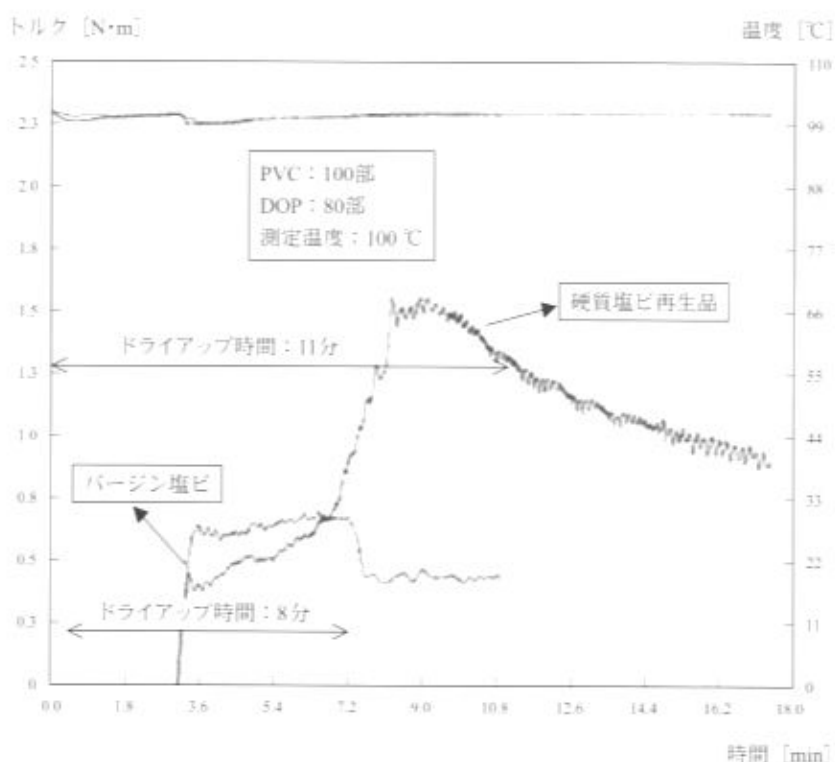


図2 可塑剤吸収特性試験結果

らに凝集した球状粒子であり、その粒子径は100～150μmである。写真に示すように、バージン材には内部には無数の空隙部が存在し、可塑剤は本空隙部に吸収されると推定される。

軟質塩ビ再生品はバージンと同様に球状粒子であるが、粒子径は可塑剤を含むためにバージンよりも大きく350μm前後である。可塑剤吸収性の目安となる内部空隙部の割合はバージンにくらべて少ないが、既報のように、成形加工上は問題ないことを確認済みである。

これに対して、硬質塩ビ再生品は、バージンや軟質塩ビ再生品と異なり均一な球状形態はとらないが、平均粒子径は可塑剤を含まないため軟質塩ビ再生品より小さくおよそ200μmである。また、内部の空隙部は軟質塩ビより多い。それ故、可塑剤の吸収性は軟質塩ビ再生品と同等以上である。

(2) 粉体特性

表4に上記3種類の試料の各種粉体特性（かさ密度、平均粒子径、空隙率、可塑剤吸収特性、可塑剤吸収時間）を示す。図2はラボプラストミルによる可塑剤吸収特性試験結果を示す。軟質塩ビ再生品はもともと可塑剤を含有（35部程度）していたが、さらに可塑剤を添加して吸収量を調べた結果、バージンにくらべて吸収時間は長い、最大70部まで吸収可能であった。一方、硬質塩ビ再生品は軟質塩ビ再生品と同様に吸収時間は長い、可塑剤吸収量はおおよそ80部であった。

以上の結果より、異物を多く含む軟質系塩ビ廃棄物がビニループプロセスにより異物含有量の少ない軟質塩ビに再利用できたと同様に、硬質塩ビも同プロセスにより異物含有量の少ない硬質塩ビに再利用できることはもちろんながら軟質塩ビにも再利用で

表5 各種再生塩ビの物性測定結果

	試験項目	単位	試験規格	原 料				バージン塩ビ (農ビ配合)
				硬質塩ビ (管継手)	硬質塩ビ／軟質塩ビ混合品		軟質塩ビ (農ビ)	
					70:30	50:50		
性状	密度	Kg/m ³	JIS K7112	—	—	—	1.30	—
	かさ密度	Kg/m ³	—	0.43	—	0.50	0.56	0.51
	平均粒度	μm	—	210	—	310	340	150
	水分	%	JIS K7251	<0.1	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
	残留溶媒	ppm	GC法	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	—
	可塑剤含有量	%	GC法	—	9	15	31	—
	重合度	—	JIS K6720	—	—	—	1300	1300
基礎 物性	硬度(注)	ShoreA	JIS K6253	—	—	—	84	88
	引張強度(注)	MPa	JIS K6723	20.5	21.0	21.2	23	20
	破断伸び(注)	%	JIS K6723	280	300	300	320	344
	熱安定性(@200℃)	h	ISO	—	—	—	13	—
	同(コンゴーレッド 試験@180℃)	h	JIS K6723	—	—	—	4	4

注) 配合条件: 再生塩ビ100部、DOP40部、アデカサイザー O-130P 2部、アデカスタブ AC-278 2部

きると考える。

4. 基本物性評価結果

表5に可塑剤および安定剤の配合割合を同一にした条件下(軟質シート配合)で、硬質塩ビ(管・継手)再生品単体および軟質塩ビ(農ビ)再生品との混合処理品(混合割合: 硬質: 軟質=70:30および50:50)の引張特性を調べた結果を示す。

表に示すように、引張強度は農ビ単体で20~23 MPa(破断伸び300~330%)であるのに対して硬質塩ビ再生品単体は21 MPa(破断伸び280%)であり軟質(農ビ)と比較して遜色ない物性を発現した。また、同硬質と農ビの混合処理再生品も同じ強度特性を確保できることを確認した。

今後、軟質シート、床材をはじめ各種用途への展開を検討する。

む す び

本事業は、出資会社であるコベルコ・ビニループ・イースト(KVE)が運営し、当社はプロセス供給

者の立場で同事業を技術開発面で支援する体制を敷いている。KVEは千葉県の中西部エコタウン指定地域(富津市)を工場建設地とし環境省および千葉県よりエコタウン補助を受けている。主要な処理対象廃棄物としては使用済み農ビを年間1万3千トン、壁紙工場からの端材が同3千トン、使用済み電線被覆材が同8千トン、硬質塩ビを含むその他が同2千トンで、これら廃棄物から再生塩ビとして年間1万8千トンを回収し販売する計画である。2006年度3月にプラントが竣工し、4月より試験操業を開始する予定である。

[参考文献]

- 1) 星野孝, 井出昇明, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.1 (1), (2004)
- 2) 井出昇明, 星野孝, 後藤和彦, 「電気と工事」, 2月号 (2005)
- 3) 井出昇明, 星野孝, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.1 (2), (2005)

金属ナトリウム分散体の製造

Production of Sodium Dispersion



技術本部環境再生部 SD 室
牛 越 憲 治
Kenji Ushikoshi

PCB の脱塩素化無害化処理の反応薬剤として使用される金属ナトリウム分散体 (Sodium Dispersion: SD) は、電気絶縁油などの鉱物油のなかに10ミクロン以下の微粒子状ナトリウムを分散させたものである。ナトリウム微粒子の表面が常に油で覆われているため空気や水との反応が穏やかで、液体として取扱うことができる。当社は播磨製作所内に SD 製造プラントを建設し、日本環境安全事業(株) (JESCO) 豊田 PCB 廃棄物処理施設に供給を開始した。

Sodium Dispersion (SD) is sodium particles that are finer than 10 microns in diameter and dispersed in mineral oil such as insulating oil. The reaction of SD with air and water is more moderate than solid sodium, and SD is possible to handle like Liquids. SD is used as the active ingredient for decomposing PCB. A commercial plant producing SD was built in Harima Plant of Kobelco Eco-Solutions Co. Ltd. and has started supplying of SD to Toyota Plant of Japan Environmental Safety Corporation for decomposing of PCB.

Key Words :

金属ナトリウム分散体
PCB
脱 塩 素 化
化 学 処 理 法

Sodium Dispersion
Poly Chlorinated Biphenyl
Dechlorination
Chemical method

ま え が き

PCB (Poly Chlorinated Biphenyl: ポリ塩化ビフェニル) は化学的に安定で熱分解しにくく、絶縁性、耐熱性、耐薬品性に優れることから、我国でも1950年頃から使用されるようになった。1954年からは、国内でも製造され始め、1972年までに約59,000トンが生産された。¹⁾

PCB は、トランス、コンデンサなどの電気絶縁油や熱交換器の熱媒体、感圧複写紙の他、潤滑油、各種可塑剤、塗料などの用途に使用されていた。

しかし、1968年のカネミ油症事件などにより PCB の毒性が問題化し、1972年に製造中止となった。さらに、1974年には特定化学物質に指定され、PCB に汚染された廃棄物は特別管理廃棄物に指定され、保管および数量の管理が義務付けられた。その後、一部の製造事業者による高温熱分解処理が国の指導のもとでおこなわれたものの、処理の促進に

はつながらず長い間、保管が継続していた。2001年に「ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法 (PCB 特措法)」が成立し、PCB 廃物を保管する事業者には一定期間内 (2016年7月15日まで) に処分することを義務付けられた。この PCB 廃棄物の早期処理という環境政策の実施をになう特殊会社として、日本環境安全事業(株)が設立され、全国5カ所に PCB 廃棄物の拠点的広域処理施設を設置し、保管事業者から処理委託を受け処理を推進することになった。この5カ所の広域 PCB 廃棄物処理施設のうち3カ所で、金属ナトリウムによる脱塩素化分解法による PCB 処理方式が採用されている。当社は播磨製作所内に金属ナトリウム分散体 (Sodium Dispersion: 以下 SD) の製造施設を建設し、PCB の無害化処理薬剤として SD の商業生産を開始した。

本報ではその概要を示す。

1. 金属ナトリウム分散体法による PCB 処理技術

PCB 汚染油の化学処理法の一つである金属ナトリウム分散体法は、電気絶縁油などの鉱物油中に金属ナトリウムを超微粒子にして分散させた懸濁液と PCB を含む被処理液を攪拌混合して、被処理液中の PCB と金属ナトリウムを反応させて、PCB の塩素を食塩 (NaCl) として脱離する方法である (図 1)。他の処理方法とくらべて低温で処理できること、還元反応なのでダイオキシン類の二次生成がないのが特長である。

2. 金属ナトリウム分散体 (SD)

PCB の脱塩素化に使用する金属ナトリウムは次のような性質を持っている。

- ・非常に強力な還元性
- ・常温で固体、銀白色の柔らかい金属
- ・融点 98℃、沸点 880℃
- ・熱伝導性に優れ、ステンレスの約 9 倍
- ・空気中で水と激しく反応する。

金属ナトリウムの強力な還元力を持ちて PCB から塩素を脱離させるのであるが、金属ナトリウムは固体であること、また空気でも湿気が多いと空気中の水分と金属ナトリウムが反応して水素を発生し燃えることがあるなど、そのままの形で PCB の脱塩素化剤として使用するには取扱いが難しい。そこで、電気絶縁油等の鉱物油のなかに金属ナトリウムを 10 μm 以下の細かな粒子にし混合分散した懸濁液とした SD とすると次のような特徴を持つ。

- ・常温で液体として取扱える
- ・空気や水との反応がおだやか

これは SD では金属ナトリウムの表面が常に油で覆われているためであり、消防法において金属ナトリウムは危険物第 3 類 (自然発火性物質および禁水性物質) に分類されるが、当社の SD は電気絶縁油と同じ危険物第 4 類第 3 石油類 (引火性液体) に分

類される。PCB の脱塩素化には金属ナトリウムをそのままの形でなく SD にして利用することにより安全でかつ効率的に処理できるようになる。写真 1 に SD 外観を写真 2 に顕微鏡写真を示す。

3. SD 製造プロセス

当社は、SD 製造プロセス開発のため、2002年にパイロット設備を播磨製作所内に設置し、阪神溶接機材(株)の PCB 自社処理用の SD 供給をおこなった。このパイロット試験の結果に基づき商業用 SD 製造プロセスを開発し、2005年 5 月に SD 製造工場が完成した。SD 製造工場の外観を写真 3 に、SD 製造プロセスの概要ブロックフローを図 2 に示す。

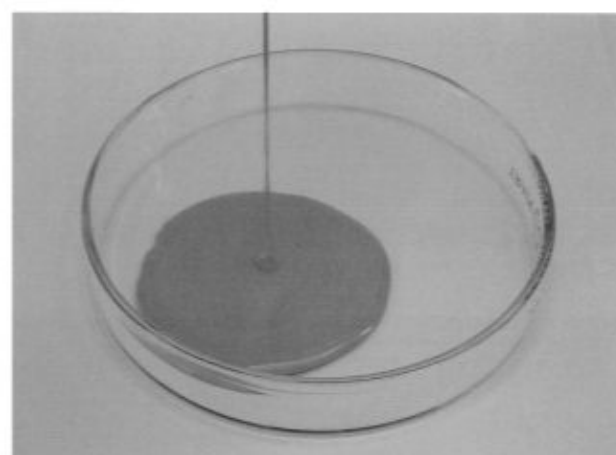


写真 1 SD 外観

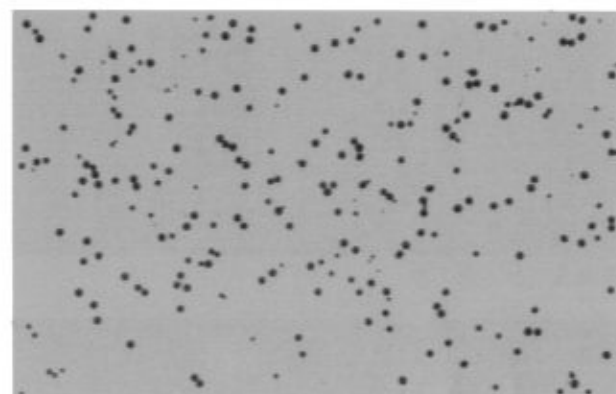


写真 2 SD 顕微鏡写真

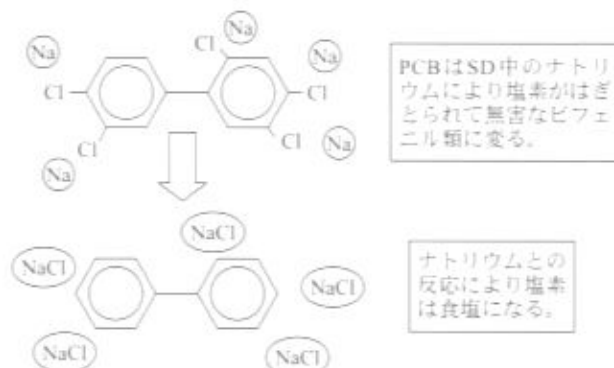


図 1 PCB 脱塩素化概要



写真 3 SD 製造工場外観



図2 SD 製造プロセス



写真4 ナトリウムタンクコンテナ



写真5 分散機



写真6 SD 貯槽

3.1 原料

金属ナトリウムは食塩（NaCl）を電気分解して製造され、ISO タンクコンテナで輸送される。ナトリウムタンクコンテナを写真4に示す。このタンクコンテナで輸送中は金属ナトリウムは常温なので固体の状態である。タンクコンテナより金属ナトリウムを拔出するときは、約120℃に加熱して金属ナトリウムを溶解するためタンクに熱媒油が通るジャケットが設置されている。タンクコンテナ内で溶解した金属ナトリウムは窒素ガスにより加圧されて、金属ナトリウム貯槽に送られる。金属ナトリウム貯槽はタンクコンテナと同様に熱媒油により加熱され金属ナトリウムを液体状態で貯蔵する。SD のもう一つの原料である絶縁油はタンクローリで搬入され、絶縁油貯槽に貯蔵される。

3.2 SD 分散工程

溶解した金属ナトリウムは窒素による加圧により、また絶縁油はポンプによりSD工場へ送られる。SD工場では金属ナトリウムを絶縁油中で高速攪拌することにより物理混合して10μm以下の微粒子にしてSDを製造する。

この分散工程には当社の攪拌機技術を活用し、播磨製作所で製作した高速攪拌機などが使用されている。この高速攪拌機に溶解した金属ナトリウムと絶縁油を連続的に供給し、内部に多段に設けられた剪断翼を高速回転することにより金属ナトリウムを微粒子にする。²⁾ 分散直後のSDは温度が高く金属ナトリウムは液体状態であるため調整槽で冷却後、SD貯槽に送液する。SD貯槽は金属ナトリウムが沈降分離するのを防止するため常に攪拌してSDを貯蔵する。写真5に分散機を、写真6にSD貯槽を示す。

3.3 SD 輸送 ISO タンクコンテナ

製品SDは、SD貯槽から窒素加圧により20m³のISOタンクコンテナに充填され、PCB処理施設へ輸送される。写真7にSDタンクコンテナを示す。このタンクコンテナはSDの充填、拔出しを全てタンク上部のノズルからおこない、ドレンもタンク上部から拔出し管を入れる方式にして漏洩防止をはかっ



写真7 SD タンクコンテナ

ている。

4. SD の性能確認

SD が PCB 無害化処理において、薬剤効果を適切に発揮するためには、金属ナトリウム粒子の微細化と均質化が重要と考えられる。微細化により比表面積が増加し、金属ナトリウムの反応性が向上する。また微細化が不十分な場合は、金属ナトリウムが沈降しやすくなり、固液分離が起り、金属ナトリウムの含有率にバラツキが生じ、反応薬剤の性能を十分発揮しない可能性がある。製造した SD は日本環境安全事業(株)豊田事業所の試運転に供給し、輸送、荷下ろし送液に問題がないことを確認した。また試運転において所定の PCB 分解性能を確認した。

5. 安全対策

SD は消防法による危険物の分類試験で危険物第4類第3石油類として取扱える。しかし原料である金属ナトリウムは第3類(自然発火性物質および禁水性物質)に、鉱油は第4類第3石油類(引火性液体)の危険物にそれぞれ指定される物質の混合物であり、水と接触して可燃性ガス(水素)を発生する。SD 製造設備は、金属ナトリウム、絶縁油、SD などの危険物を取扱うため次の対策をおこなった。

5.1 防火対策

装置全般について、安全増防爆以上の仕様の電気機器および本質安全防爆器の使用により電気火花による着火を防止し、アース配線を確実にして漏電あるいは静電気による着火防止をはかった。また金属

ナトリウムおよび SD の加熱は熱媒油を使用し直火による過熱を避けた。また SD など冷却にはチラー水で冷却した熱媒油を使用し工場内の禁水を徹底した。

金属ナトリウムの配管は熱媒加熱による2重管とし、万一金属ナトリウム配管が損傷しても直接金属ナトリウムが外に漏れないようにした。金属ナトリウム、絶縁油、SD のタンク類は常に窒素により微加圧状態に保ち、空気との接触を断つようにした。また金属ナトリウムの貯槽はタンクの下部にノズルや弁を設けず、抜出しは上部の抜き出し管からおこなう構造とした。

5.2 火災予防対策

火災予防対策として、自動火災報知器を設置し、中央制御室ならびに播磨製作所守衛室で監視をおこなうようにした。また固定式粉末消火設備を設置し、スプリンクラーより粉末消火剤と窒素を吹出して消火する構造とした。

5.3 安全対策

SD 製造設備では金属ナトリウムを取扱うため防災服および面体付ヘルメット、ゴム手袋、安全靴を着用して作業することとしている。金属ナトリウムおよび SD の火災では酸化ナトリウムのミストが発生し、吸込むと気道を刺激し、炎症を起こし、さらに肺に損傷を与える恐れがあるため、消火活動では防塵マスクを着用する。金属ナトリウムおよび SD は一般的な危険物である油火災と異なるため、加古川消防署より消防士90名の参加をえて消火研修をおこなった。

む す び

PCB の広域拠点処理施設による処理が開始され、本格的な PCB 処理が開始された。今後も金属ナトリウムの安全な取扱いに細心の注意を払い SD 製造をおこない、目標の2016年7月15日を目指して20世紀の負の遺産である PCB の安全な処理に貢献していきたい。

[参考文献]

- 1) (財)産業廃棄物処理事業振興財団: PCB 処理ガイドブック、平成11年8月発行、p.5
- 2) 公開特許: 2003-268417

ほう素対応海水淡水化施設の 運転状況

Report on Boron Removal Seawater Desalination Facility



技術本部
水処理第二技術部技術室
佐藤 良太
Ryota Sato
竹坂 憲治
Kenji Takesaka
野下 昌伸
Masanobu Noshita

小呂島では水質基準改正と将来の水需要増大（下水道整備等）による水不足を補うために海水淡水化設備（計画浄水量 50 m³/d）を導入し、2003年3月より給水を開始している。本設備は、ほう素の除去を目的とした2段RO膜処理方式を採用している。ほう素濃度は常に水質基準以下となっており、安定した運転をおこなっている。薬品洗浄は現地洗浄方式であり、半年に1回の頻度で実施している。

In order to meet the revision of potable water standard and expected increase of future water demand, a desalination facility with design capacity of 50 m³/d is installed in Oronoshima Island, and has been operating since March 2003. The facility employs Double pass RO system to remove boron. On site chemical cleaning is carried out semi-annually, so that the facility operates stably with keeping boron concentration lower than the standard.

Key Words :

U F 膜	Ultrafiltration membrane
スパイラル膜	Spiral membrane
逆浸透膜	Reverse osmosis membrane
薬品洗浄	Chemical cleaning
ほう素	Boron

まえがき

一般に海水は96.5 %の水と3.5 %の塩分からなっており、海水中の塩分を除去することによって海水から真水をえることができる。海水淡水化の方法としては蒸発法、電気透析法、逆浸透法がある。これらの方式のなかで近年は、エネルギー消費量が少なく、コンパクトで運転管理が容易な逆浸透法式の設備が多くなっている。わが国における水道用海水淡水化施設の設置状況の特徴は下記である。①離島地域の簡易水道に多く設置されている。②全施設の大半が500 m³/d 規模以下の小規模施設である。③全施設の約90 %が逆浸透法である。¹⁾ 一方、国内の大

規模施設の例としては、1997年4月より沖縄県で造水量40 000 m³/d、2005年3月より福岡市で造水量50 000 m³/dの逆浸透膜プラントが稼働している。

また海水中に5 mg/L 前後含まれるほう素はRO膜での除去率が他の無機成分とくらべて低いため²⁾ ほう素除去を目的とした低圧RO膜を高圧RO膜の後段に追加した2段RO膜処理法が開発された。

本報では2003年3月より供用を開始した小呂島海水淡水化設備についての運転状況について報告する。

1. はじめに

小呂島は、福岡市西区姪浜から北西約45 km 渡船で約1時間に位置し、周囲3.5 km、面積0.43 km²、

人口約230人の島である。写真1³⁾に小呂島全景を示す。写真2³⁾に雨水貯留ダムを示す。本島の主要産業は漁業で、島には川がないので従来は島の各所に設けた雨水貯留ダムを水道水源にしているが、慢性的に水不足に悩まされ、時には本土より給水船にて飲料水を輸送することもあった。そのため、1991年に日量20 m³の海水淡水化設備が設置され、福岡市が渇水になった1994年も含めて約12年間一度も渇水になることなく島の水源として活躍してきたが、2000年の水質基準改正と将来の水需要増大（下水道整備等）に対応するため2003年に日量50 m³の新しい海水淡水化設備が設置された。本設備は、国内で最初に稼動した水道水質のほう素規制対応の海水淡水化設備で、既設備にくらべて水質・維持管理が大幅に改善されている。ここに、設備概要・運転状況を紹介する。

2. 設備概要

2.1 設備の構成

本設備は従来の1系列から日量25 m³×2系列とし、水需要への対応性と水供給の安定性を重視した

施設となっている。本設備の概要を図1のフロー、表1に設備仕様、写真3に海水淡水化施設、写真4に膜ユニットを示す。海水淡水化設備は、①取水設備②前処理設備③第1段RO設備④第2段RO設備⑤後処理設備から構成される。

2.2 設備のフロー

海水淡水化設備に供給される海水は取水ポンプにより海面下より取水され、原海水貯槽に貯留する。このとき海水中の貝・藻類の付着を防止するため電解塩素発生装置によって発生させた次亜塩素酸ナトリウムを注入する。次に前処理工程として、ろ過給水ポンプで砂ろ過およびUF膜ろ過をおこない、ろ過海水貯槽に貯留する。ろ過水質としては Fouling Index (FI) が4以下となり、第1段RO膜への供給水水質を満足している。砂ろ過は圧力式の単層ろ過であり、24時間に1回の頻度で逆洗をおこなって

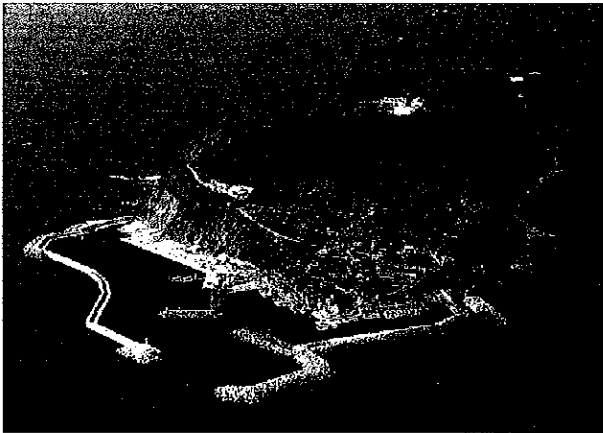


写真1 小呂島全景

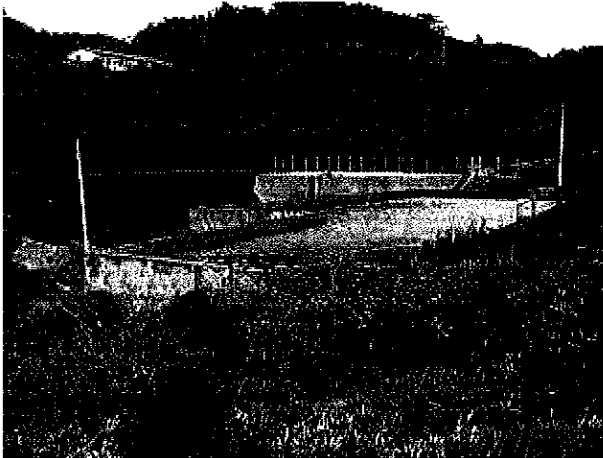


写真2 雨水貯留ダム

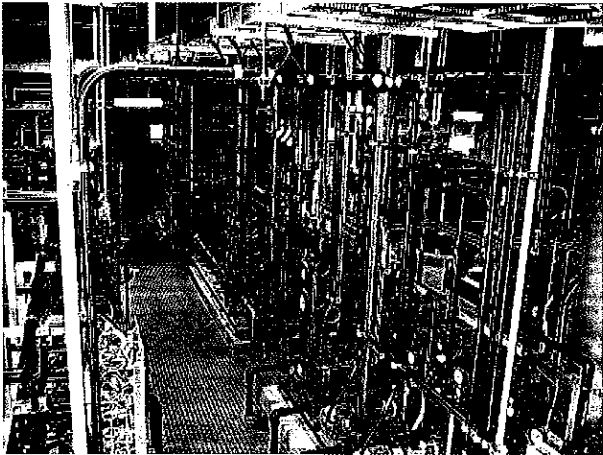


写真3 海水淡水化施設

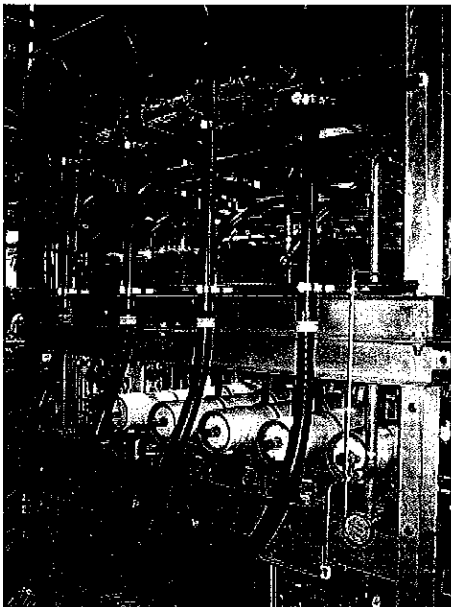


写真4 膜ユニット

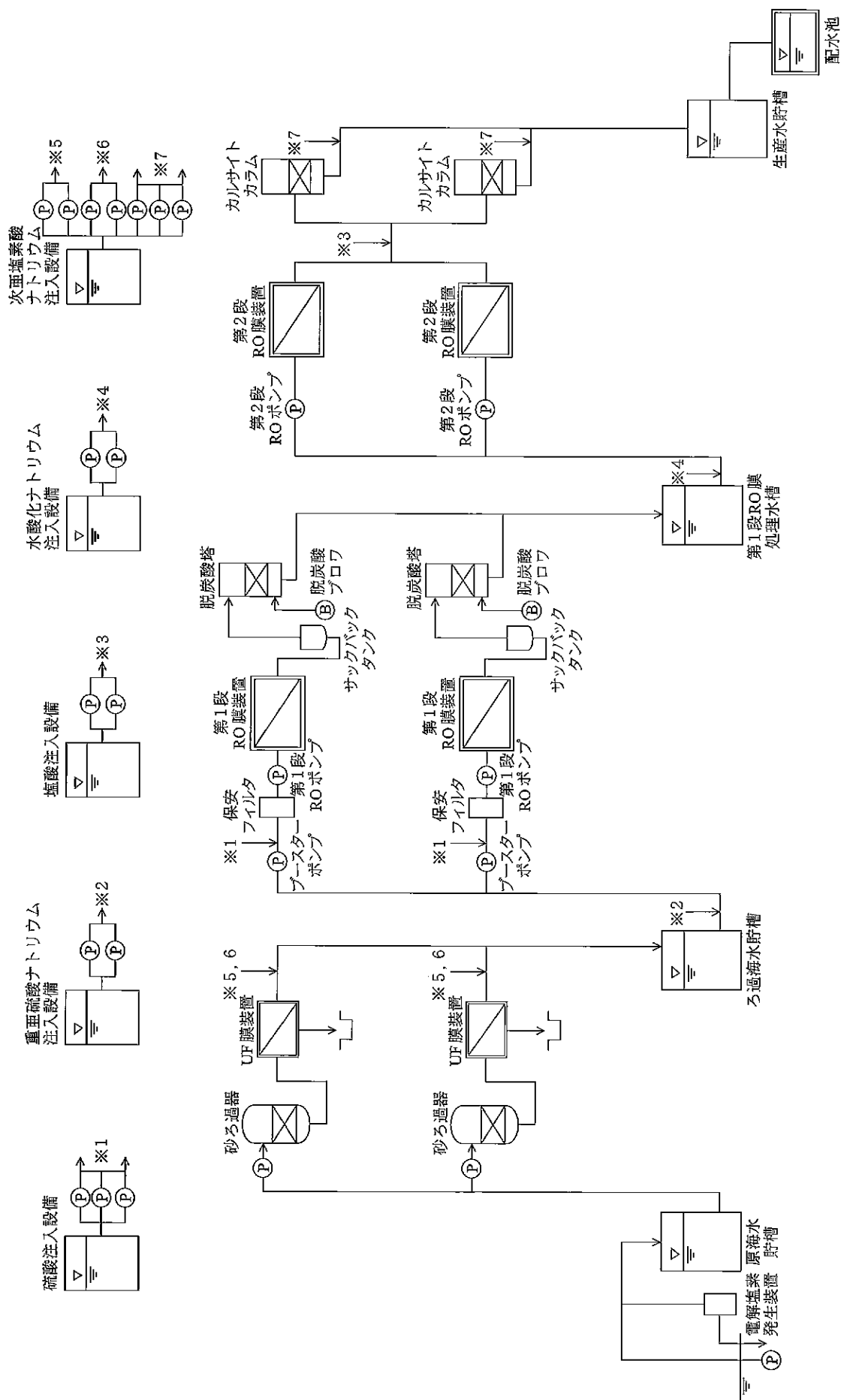


図1 海水淡水化設備フローシート

表1 設備仕様

項 目		設 備 仕 様	
取 水 設 備	取水ポンプ 電解塩素発生装置		
	207 L/min×79 m×2台（1台予備） 25 g/h		
前 処 理 設 備	砂ろ過器		
	圧力式円筒型単層砂ろ過器		
	UF膜ろ過装置	膜 材 質 系 列 モジュール本数 モジュール配列 ろ 過 方 式 物 理 洗 浄 薬 品 洗 浄	
		ポリフッ化ビニリデン（PVDF） 2 系 列 10本（5本／系列） 並 列 全量ろ過 逆圧水洗浄，浸漬洗浄 クエン酸	
第1段RO膜設備	保安フィルタ		
	10μm×2本		
	供給ポンプ		
	73 L/min×7.0 MPa×15 kW×3台（1台予備）		
	逆浸透膜装置	三酢酸セルロース 2 系 列 8本（4本／系列） 並 列 クロスフローろ過 29 L/min（41.7 m³/d） 40 % クエン酸	
第2段RO膜設備	供給ポンプ		
	29 L/min×2.0 MPa×4.0 kW×3台（1台予備）		
	逆浸透膜装置	合成高分子系複合膜（ポリアミド系） 2 系 列 12本（6本／系列） 3本リジェクト クロスフローろ過 17.4 L/min（25 m³/d） 60 % クエン酸	

いる。UF膜ろ過装置は全量ろ過方式である。UF膜装置は2系列で構成されている。

前処理された海水は、スケール防止のために硫酸を添加しpHを6.0～6.5に調整後、ブースターポンプにて保安フィルタ（目開き10μm）を通過し、さらに第1段ROポンプに送られ、5～6MPaに加圧されて第1段RO膜に送られる。

第1段RO膜装置により処理された透過水は脱炭酸塔に送られ、脱炭酸プロワにより炭酸ガスの除去をおこなう。その後第1段RO膜処理水槽にいったん貯留され、さらに第2段RO膜装置で処理される。

第2段RO膜への供給水は、ほう素の除去をおこなうために、pHを9～10に調整している。第2段RO膜により処理された透過水は塩酸を添加しpHを調整後、カルサイト（粒状大理石）による硬度成分の調整および次亜塩素酸ナトリウムによる滅菌をおこない、生産水貯槽に送られる。

2.3 膜および膜モジュール

前処理設備にもちいているUF膜はポリフッ化ビニリデン製の分画分子量150 000のスパイラル型で、膜モジュールは膜面積30 m²（モジュール1本当たり）である。本装置には各系列5本の膜エレメントが装備されている。本膜は定期的なろ過海水での逆洗により膜面堆積物を排出する。

第1段RO膜にもちいている膜は三酢酸セルロース製の中空糸型である。本装置には各系列4本の膜エレメントが装備されている。

第2段RO膜にもちいている膜は合成高分子系複合膜（ポリアミド系）であり、スパイラル型である。本装置には各系列6本の膜エレメントが装備されている。

2.4 洗 浄

2.4.1 物理洗浄（UF膜）

UF膜ろ過装置の物理洗浄方式は逆圧水洗浄であ

る。約1時間に1回の頻度で次亜塩素酸ナトリウムを0.5～5 mg/L 添加して洗浄を実施している。そして逆圧水洗浄の10回に1度、浸漬洗浄を実施している。これは、次亜塩素酸ナトリウム注入率（150～500 ppm）の洗浄水に約60分間浸漬させることで逆圧水洗浄では除去できない汚れを除去することを目的としている。

2. 4. 2 薬品洗浄（UF 膜，第 1 段 RO 膜，第 2 段 RO 膜）

長時間の運転により膜表面にスケールの付着，鉄分の沈着が起こり，間欠的に繰り返される物理洗浄だけでは膜差圧が十分回復しなくなる。そのためUF 膜，第 1 段 RO 膜，第 2 段 RO 膜とも約半年に1回薬品洗浄を実施している。使用する薬品は，無機塩類，金属類の除去を目的としてクエン酸（2％）をもちいる。洗浄工程では，薬品によるろ過循環，浸漬をおこなう。

2. 5 維持管理

施設は全自動で運転管理されている。主な維持管理は，日常の機器点検，テレメータでの監視，薬品補充，薬品洗浄，回転機器類のオーバーホール，膜本数の切替である。

テレメータでは，ろ過水量，pH，電気伝導率，残塩濃度，自動弁の開閉状態の表示および機器故障などの警報信号を送っている。テレメータによって小呂島と夫婦石浄水場の双方で運転を監視できる。

RO 膜の透過水水質は供給水圧力が高いほど良くなる性質がある。一定の透過水量をえるために必要な供給水圧力は水温が高くなるほど低くなるため，

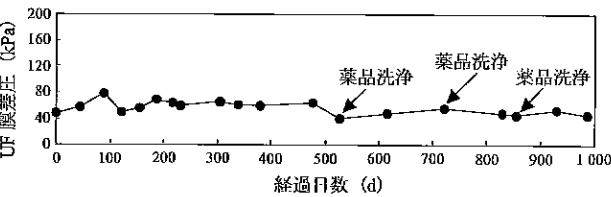


図2 UF 膜 膜差圧の経日変化

表2 薬品注入条件

項 目	注 入 点	注 入 率 (mg/L as 100 % Chem.)
硫 酸	第 1 段 RO 膜入口	20～60
重亜硫酸ナトリウム	第 1 段 RO 膜入口	6～10
水酸化ナトリウム	第 2 段 RO 膜供給水入口	20～40
塩 酸	第 2 段 RO 膜出口	10～80
次 亜 塩 素 酸	UF 膜逆洗水入口（逆圧水洗浄用）	0.5～5
ナ ト リ ウ ム	UF 膜逆洗水入口（浸漬洗浄用）	150～500
	カルサイトカラム出口（滅菌用）	0.3～2.0

水温が高くなる場合には RO 膜を削減して供給水圧力を高める必要がある。本設備では，安定した水質を確保するために，年 2 回水温20度を基準として膜の削減および復旧をおこなっている。

3. 運 転 状 況

3. 1. 1 前処理設備

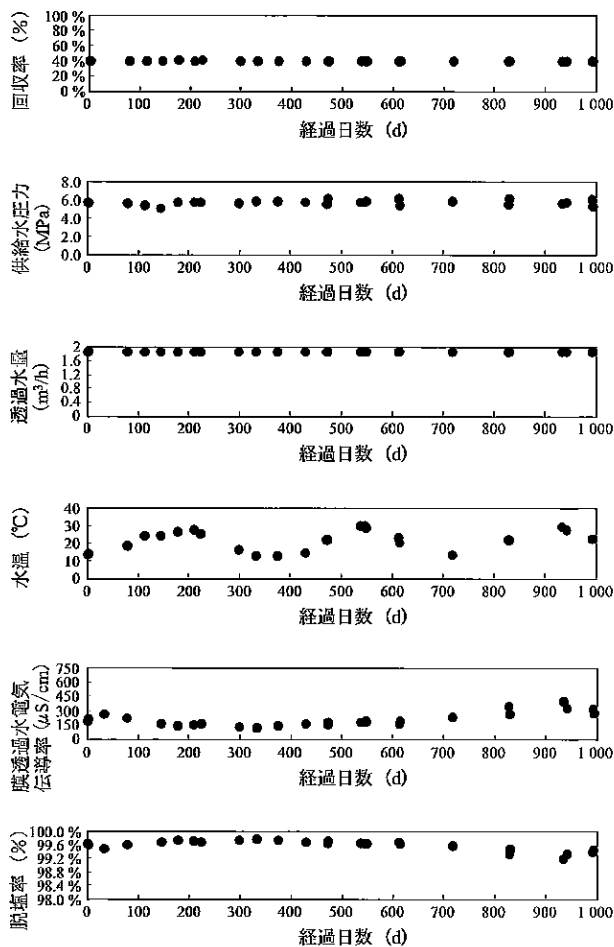
図2に前処理設備であるUF膜ろ過装置の運転データを示す。膜差圧は平均55 kPa で推移している。薬品洗浄は運転開始1年後から，約半年ごと（523日目，723日目，857日目）に実施している。運転開始から約1000日経過しているが急激な差圧上昇はみられず安定して運転されている。これは，海水淡水化設備において前段の砂ろ過装置がUF 膜の前処理として有効であることを示している。また，UF 膜の逆圧水洗浄および浸漬洗浄により膜面に付着した汚れが効果的に除去されているといえる。表2に各設備の薬品注入率を示す。前処理設備では，次亜塩素酸ナトリウムを使用している。第1段 RO 膜，第2段 RO 膜では，硫酸，重亜硫酸ナトリウム，苛性ソーダ，塩酸をもちいている。

3. 1. 2 第 1 段 RO 膜

図3に第1段 RO 膜の運転データを示す。運転開始より回収率は40％に保たれている。処理水量は1.85 m³/h がえられている。原海水の電気伝導率は50 300 μS/cm に対し，透過水電気伝導率は平均220 μS/cm である。脱塩率として電気伝導率ベースで99.2％である。運転開始から約1000日が経過しているが，運転圧力も問題なく，差圧の上昇もみられない。運転状況，透過水水質は良好である。700日目を経過したところより徐々に脱塩率が低下傾向にあるが，第1段 RO 膜については4年で全数交換をおこなうように計画しており，予定通り995日目に膜交換（4本中2本）をおこない設備は順調に運転を継続している。

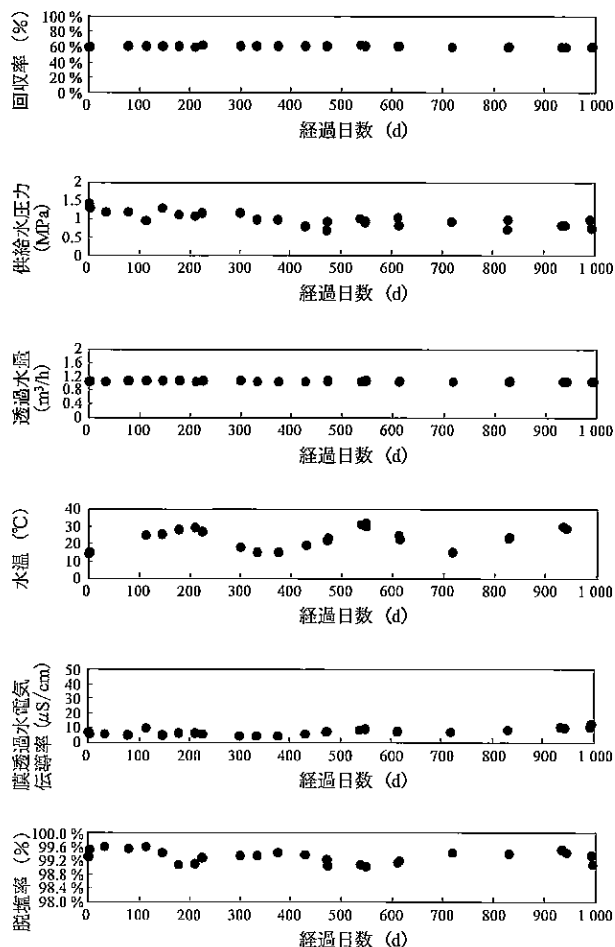
3. 1. 3 第 2 段 RO 膜

図4に第2段 RO 膜の運転データを示す。運転開



期間：2003年2月21日～2005年11月12日
 透過水量：1.74 m³/h
 回収率：40 %
 第1段RO膜供給水電気伝導率：50 300 μS/cm（平均）
 膜モジュール：Hollosep HB9155E1
 脱塩率： $(1 - C_p/C_f) \times 100 \%$

図3 第1段RO膜運転状況



期間：2003年2月21日～2005年11月12日
 透過水量：1.04 m³/h
 回収率：60 %
 第2段RO膜供給水電気伝導率：220 μS/cm（平均）
 膜モジュール：ES20B-D4
 脱塩率： $(1 - C_p/C_f) \times 100 \%$

図4 第2段RO膜運転状況

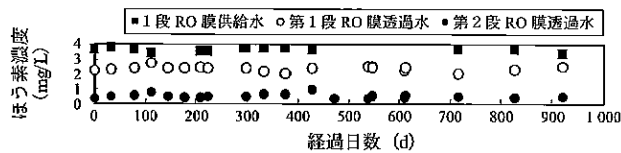
表3 水質分析結果

検 査 項 目	単 位	原 海 水 (2003年2月27日)	浄 水 (2003年2月27日)	水 質 基 準
濁 度	度	0.4	<0.1	<2
色 度	度	<1	<1	<5
pH	—	8.2	7.5	5.8～8.6
蒸発残留物	mg/L	37 700	161	<500
ナトリウム	mg/L	10 300	1.4	<200
全 硬 度	mg/L	6 460	85	<300
塩素イオン	mg/L	19 500	34	<200
有機物等（過マンガン酸カリウム消費量）	mg/L	3.9	0.7	<10
ほう 素	mg/L	4.91	0.4	<1.0

始より回収率は60 %に保たれている。処理水量は1.04 m³/h がえられている。第2段 RO 膜供給水の電気伝導率は平均220 μS/cm に対し、透過水電気伝導率は平均 8 μS/cm である。脱塩率として電気伝導率ベースとして93 %である。表3に原海水および浄水の水質分析結果を示す。

3.2 ほう素の安定除去

図5に第1段 RO 膜，第2段 RO 膜のほう素濃度のデータ，図6にそれぞれの膜のほう素除去率のデータ，図7に第2段 RO 膜供給水の水温のデータ，図8に pH のデータを示す。第1段 RO 膜供給水のほう素濃度は平均3.6 mg/L に対し，1段 RO 膜濃縮水



※期間中のほう素濃度は弊社分析値
図5 第1段RO膜・第2段RO膜 ほう素濃度の経日変化

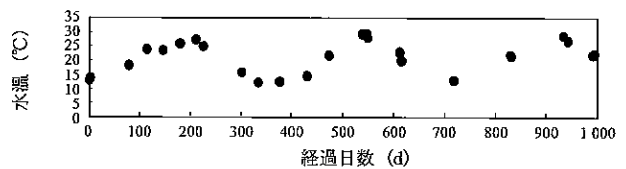


図7 第1段RO膜・第2段RO膜 水温の経日変化

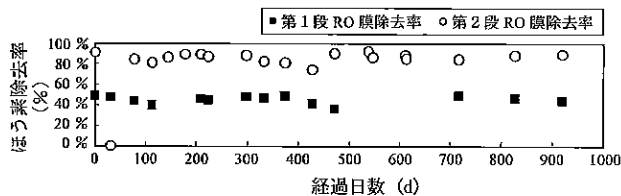


図6 第1段RO膜・第2段RO膜 ほう素濃度除去率の経日変化

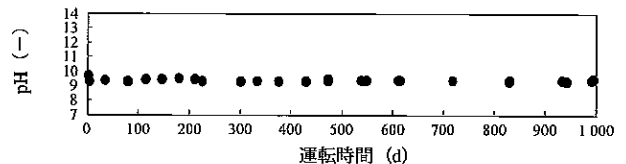


図8 第2段RO膜供給水pHの経日変化

のほう素濃度は平均4.9 mg/L, 1 段 RO 膜透過水のほう素濃度は水温によるとみられる変動はあるが平均2.4 mg/L, 回収率を考慮した除去率は平均44 %である。第2 段 RO 膜供給水の pH は, 9 ~10に調整している。ほう素はアルカリ領域では解離が進みイオン化するため, 高 pH 領域では高いほう素除去性がえられる。透過水ほう素濃度は平均0.5 mg/L, 除去率は平均85 %である。運転開始以来, 安定的に運転されている。

む す び

本設備は, 2003年3月に給水を開始して以来順調に安定した運転をおこなっている。この運転結果より次のことが確認できた。

- 1) RO 膜の前処理として砂ろ過と UF 膜の組み合わせで安定処理がおこなえる。
- 2) 2 段 RO 膜処理によりほう素は確実に水質基準 1.0 mg/L 以下の値を満足する。
- 3) 約半年に 1 回の薬品洗浄をおこなうことで安定運転を継続することができる。

[参考文献]

- 1) 藤原正弘：日本の水道技術, 技術レポート No.32, p.15-17
- 2) Yasumoto Magara, et al., WATER HONGKONG'96 (1996)
- 3) 福岡市立小呂中学校ホームページ

ストーカ式焼却炉における 低空気比燃焼運転

Operation Data from Grate Incinerator
under Low Air Ratio



技術本部プラント技術部技術室
樋口 豪

Go Higuchi

技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室
伊藤 正

Tadashi Ito

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
生産システム研究所計測制御研究室
前田 知幸
Tomoyuki Maeda

当社は、2000年6月に下関市よりストーカ式都市ごみ焼却施設を受注し、2002年11月の竣工以来、順調に運転を継続している。本施設は高温燃焼・高度排ガス処理にくわえて、焼却灰、飛灰の溶融処理による総合的な環境対策技術を適用したものであり、さらなる環境負荷の低減をめざして2004年11月より低空気比燃焼運転をおこなっている。その結果、ボイラ出口ダイオキシン類濃度の低減、排ガス流量の減少およびボイラ蒸発量の増加と良好な運転成果がえられた。また、ボイラ蒸発量のより一層の安定化を目的として、新たにアドバンスト制御を開発した。

The plant in Shimonoseki City is composed of a grate incinerator featuring high-temperature incineration with air ratio of 1.6, a high-efficiency heat recovery process, and an ash melting process. In view of furthermore reduction of harmful influences on the environment, a practical operation with air ratio of 1.4 has been conducted. The operation results show decrease in dioxins concentration at boiler exit, decrease in flue gas flow, and increase in steam generation rate. A new control system is developed using model predictive control theory, which is able to stabilize steam generation rate.

Key Words :

都 市 ご み
ストーカ式焼却炉
低 空 気 比
モデル予測制御

Municipal solid waste
Grate incinerator
Low air ratio
Model predictive control system

まえがき

ストーカ式焼却炉は今日までごみ焼却処理の主要技術として多くの実績を有しているが、ダイオキシン類の規制強化や最終処分場残余量が少なくなるなか、高度燃焼技術、高効率発電および焼却残さの有効利用などの技術改善が本格化してきている。

当社は、1970年代から続く欧州ストーカ炉の技術を継承し、世界的に多くのストーカ炉の経験を有するルルギ社（独）と技術提携した。ルルギ社ではヘ

ルテンリサイクル施設（480 t/24 h）をはじめとして、すでに低空気比／高温燃焼での長期連続運転をおこなっており、当該技術による当社1号機が2002年11月に下関市で竣工し、以降順調な運転を続けている。本報では、竣工以降の稼働実績、2004年11月以降実施している低空気比（総空気比1.4における）燃焼での運転状況、および適用試験をおこなっているアドバンスト制御システムの概要について報告する。

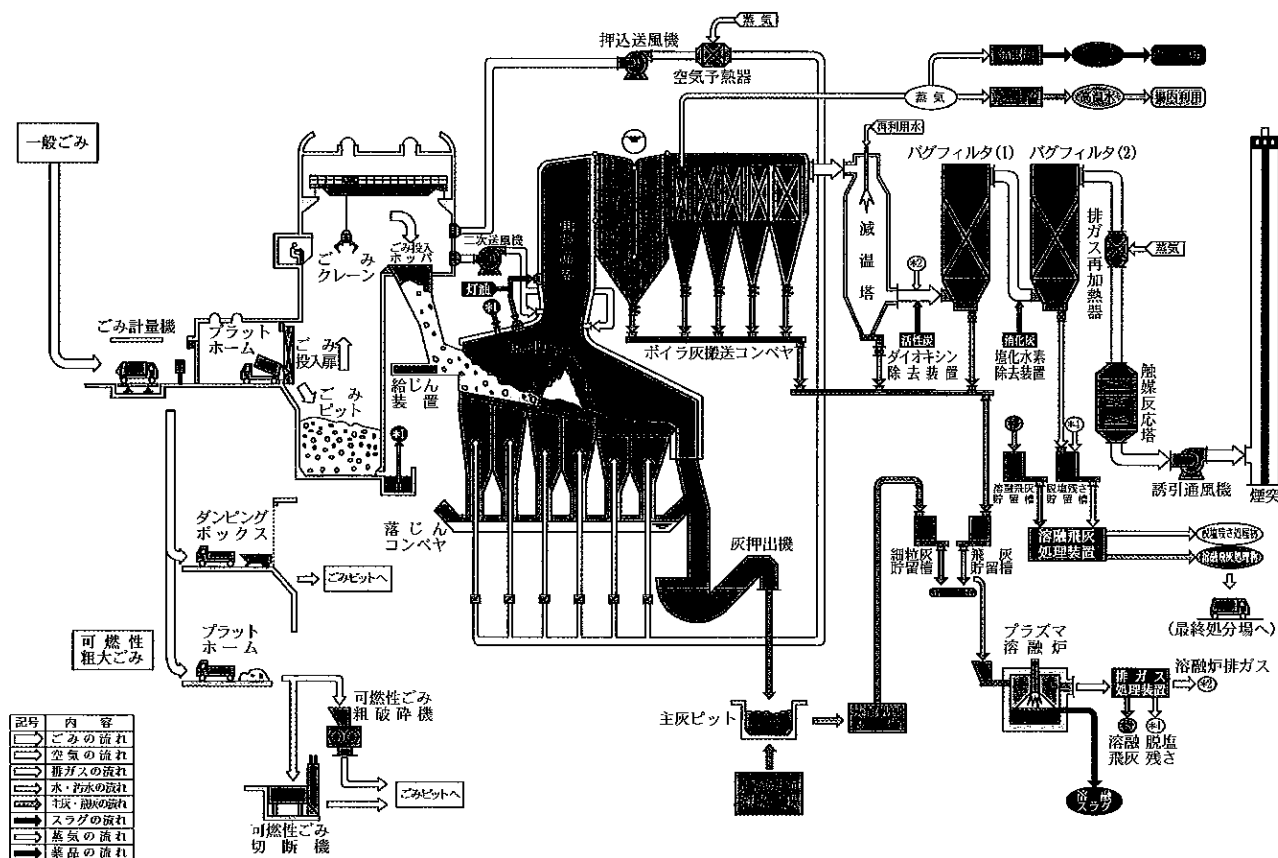


図1 施設フロー

1. 施設の概要

下関市奥山工場の処理フローを図1に、施設外観写真を写真1に示す。ストーカ式焼却炉の能力は180 t/24 h×1 炉、ボイラは最大蒸発量32 t/h の自然循環式水平煙道型（テールエンド型）ボイラを採用しており、蒸気条件は（常用）3.92 MPa×400℃、発電容量は3180 kW である。焼却炉火格子は対向摺動式と並行摺動式を組み合わせたコンバインドストーカ、主燃焼室は全メンブレン水冷壁構造とし、高温燃焼を実現しながらもクリンカの発生を抑制している。また、二次燃焼室は炉中央部に位置する直交流型で、一次燃焼室出口に絞り部を設け、さらに二次空気を前後方向から吹き込む構造となっている。

灰熔融炉についてはプラズマ方式で、本施設および隣接する既設炉で発生する焼却灰および飛灰を全量処理する能力（41 t/24 h×1 炉）を有している。炉内に投入された焼却灰・飛灰は1400℃程度の高温により熔融され、ダイオキシン類を分解するとともに塩類・重金属類を揮散させる。減温塔にて200℃以下に急冷された熔融排ガスはバグフィルタにて熔融飛灰の除去、乾式脱塩を施された後、焼却バグフィルタ前にて合流される。

焼却排ガス処理設備にはダブルバグフィルタ方式

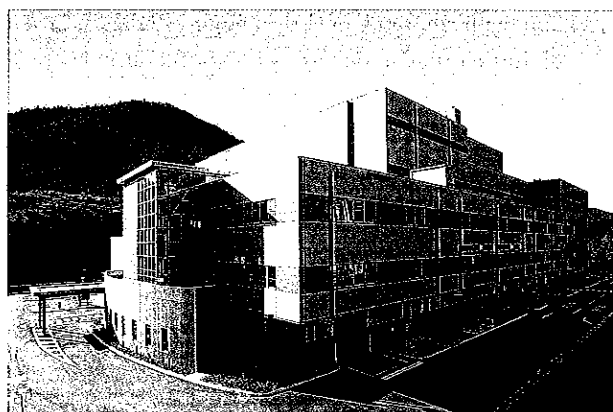


写真1 施設外観

+触媒反応塔を採用している。第1バグフィルタで捕集される飛灰は溶融処理し、第2バグフィルタで捕集されるカルシウム・塩素を多量に含む脱塩残さは薬剤処理の後、最終処分している。

2. 稼働実績

2.1 稼働実績

本施設は2002年12月より稼働を開始し、順調な運転を続けている。稼働実績を図2に示す。ストーカ炉に関しては2003年12月から6月までの196日連続運転をはじめ、2003年度、2004年度の稼働日数はそ

れぞれ321日、318日と高い稼働率を達成している。
灰溶融炉についても2004年1月から5月までの107日連続運転をはじめ、2003年度および2004年度の稼働日数はそれぞれ274日、287日となっている。

2.2 マテリアルバランス

2004年度1年間を通じたマテリアルバランスを図3に示す。57 566 tのごみを受け入れ、5 309 tの焼却灰および1 453 tの飛灰が発生している。隣接す

る既設炉から4 102 tの焼却灰、飛灰を受け入れ、前処理として不適物などを取り除いた後、溶融炉にて7 541 tの焼却灰、飛灰を溶融処理している。溶融炉でのスラグ化率は93.7 %、不適物も含めた最終処分量は3 296 t（既存炉も含めた総ごみ処理量 95 935 tに対して3.4 %）となっている。

2.3 ダイオキシン類総排出量

本施設は高温燃焼・高度排ガス処理に加えて、焼

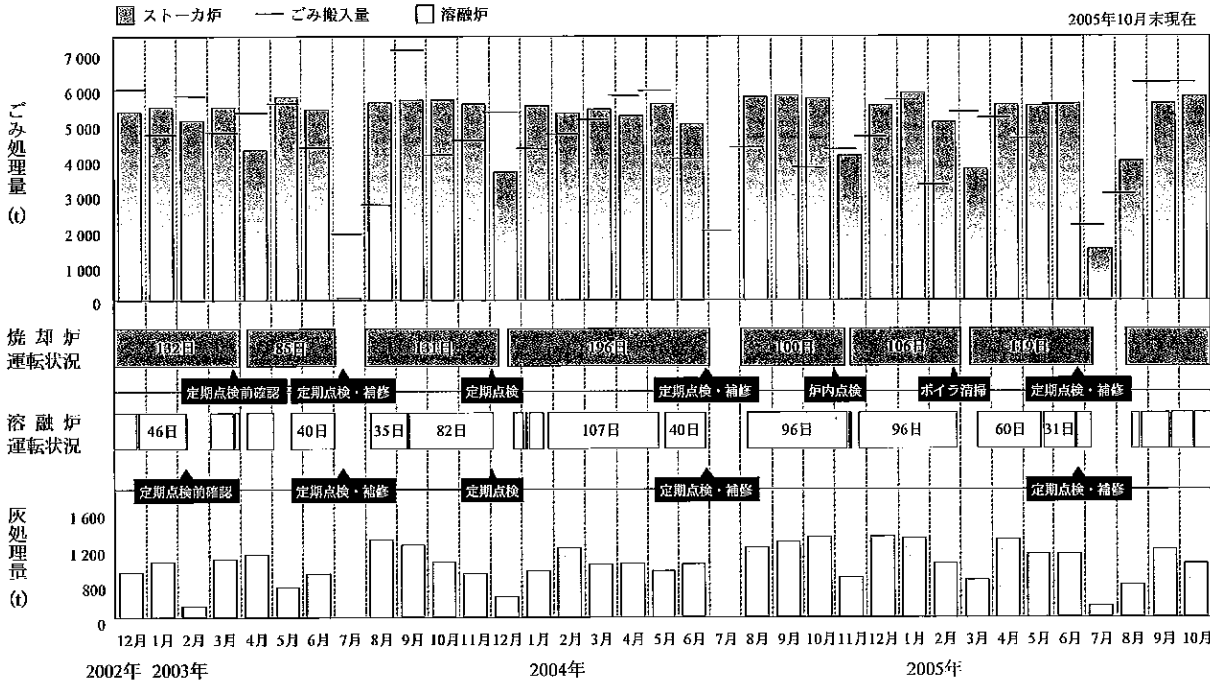


図2 施設稼働実績

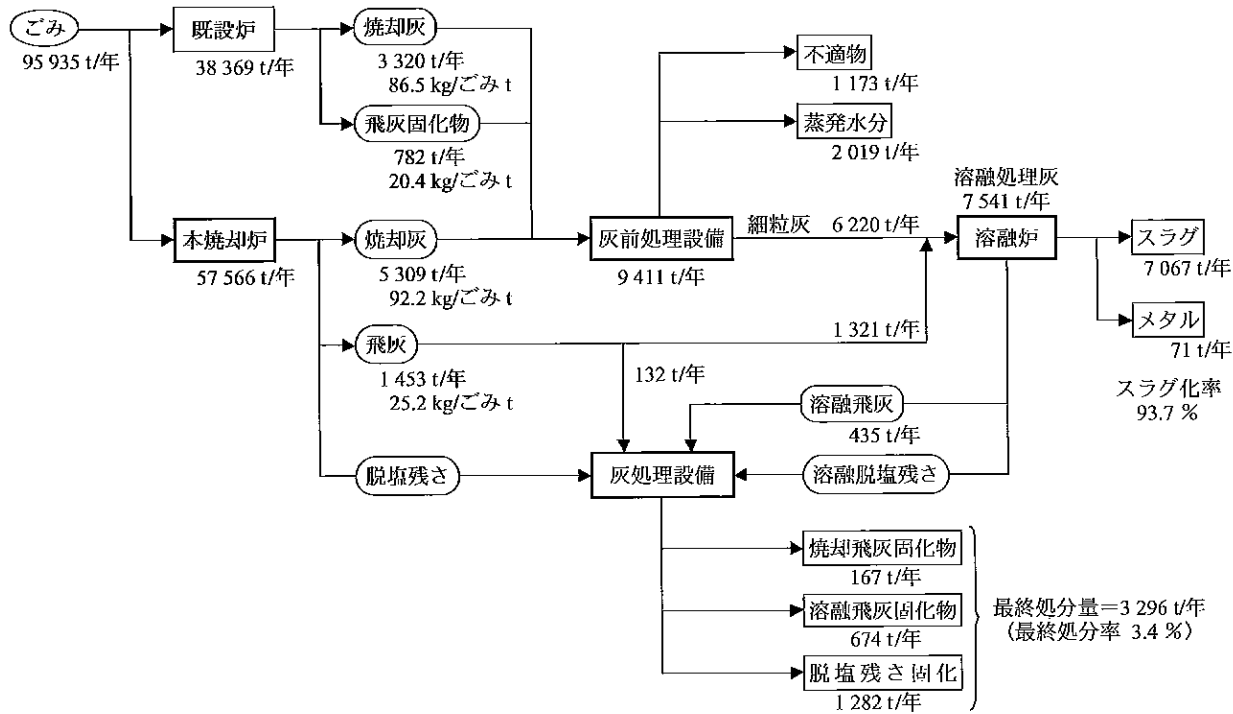


図3 マテリアルバランス (2004年度)

表1 ごみ1tあたりのダイオキシン類発生量

項 目	排 出 量 (kg/ごみ t)	ダイオキシン類 濃 度 (ng-TEQ/g)	ダイオキシン類 総排出量 (μg -TEQ/ごみ t)	割 合 (%)
不 適 物	21	0.000048	0.0010	0.25
鉄 分	6.7	0.0013	0.0085	2.1
ス ラ グ	88	0.0000026	0.00023	0.058
熔融飛灰固化物	12	0.019	0.23	58
脱塩残さ固化物	18	0.0088	0.15	38
排 ガ ス	(6 840 m ³ _N /ごみ t)	(0.00019 ng-TEQ/m ³ _N)	0.0013	0.33
合 計	146	—	0.40	100

表2 運転条件

実 施 時 期	—	2002年11月～ 2004年10月	2004年11月～ (継続中)
平均ごみ処理量	t/d	181.7	178.0
一次空気比(設定値)	—	1.05	1.00
二次空気比(設定値)	—	0.55	0.40
総空気比(設定値)	—	1.60	1.40
平均ごみ発熱量	kJ/kg	8 570	9 570

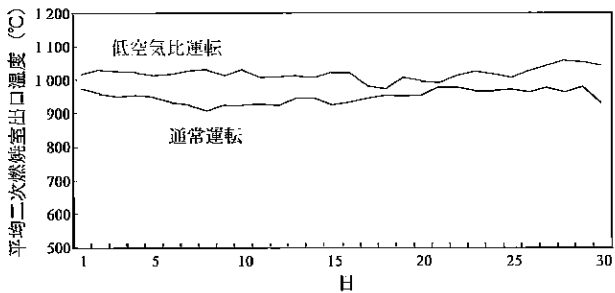


図4 二次燃焼室出口温度比較

却灰、飛灰の熔融処理による総合的な環境対策技術を適用したものであり、表1に示すようにごみ1tあたりのダイオキシン類総排出量は「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」でうたわれている5 μg -TEQを大きく下回る0.4 μg -TEQを達成している。

3. 低空気比燃焼運転

3.1 運転条件

従来、本施設は空気比1.6、ボイラ出口 O₂ 濃度 8 % (乾ガス基準) 程度で運転されていたが、低空気比燃焼運転に変更するにあたり、一次空気比は焼却灰熱しゃく減量の増加など燃焼悪化を引き起こさない値として1.0を設定した。また、二次燃焼室出口温度の上限値を1100℃として総空気比の設定をおこなったが、ごみ焼却量などの他の設定値は通常運転時の状態を維持した。運転条件を表2に示す。な

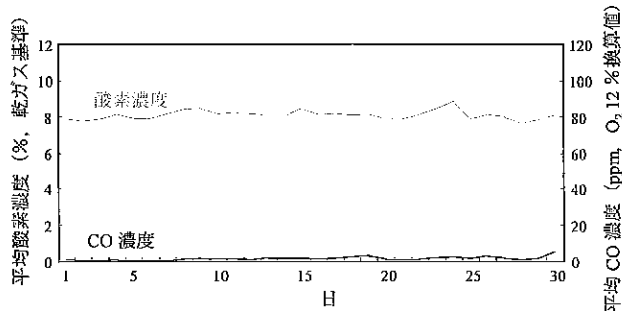


図5-a ボイラ出口排ガス濃度(通常運転)

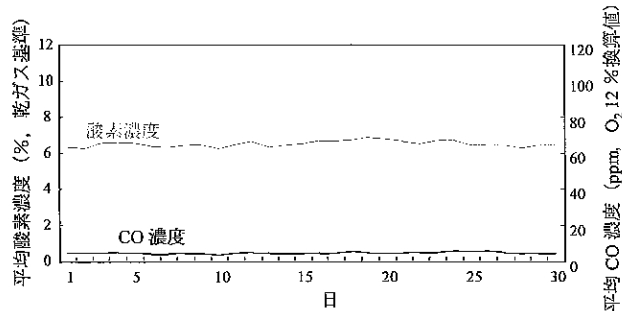


図5-b ボイラ出口排ガス濃度(低空気比運転)

お、低空気比燃焼運転時においても排ガス再循環はおこなっていない。

3.2 二次燃焼室出口温度

通常運転時と低空気比燃焼運転時の二次燃焼室出口温度(滞留時間2秒経過後の炉内温度)の比較を図4に示す。通常運転では平均950℃(標準偏差20℃)で運転していたが、低空気比燃焼運転では平均1019℃(標準偏差19℃)と高温で燃焼しており、標準偏差から判断した安定性についても通常運転時と遜色ないものとなっている。

3.3 排ガス濃度

通常運転時と低空気比燃焼運転時のボイラ出口 O₂ 濃度および CO 濃度を図5-a、5-bに示す。排ガス再循環をおこなわずとも、ボイラ出口 O₂ 濃度は平均6.5%(乾ガス基準、空気比1.4相当)を安定して維持している。ボイラ出口 CO 濃度については

通常運転時平均値1.7 ppm に対して、低空気比燃焼運転時平均値4.6 ppmと若干増加しているが、30 ppmを超えるCOピークも認められず、低空気比燃焼条件下においても適正に燃焼していることがわかる。

ボイラ出口排ガス中のダイオキシン類およびNOx 濃度の測定結果をそれぞれ図6、7に示す。安定して炉内を高温に維持することにより、ボイラ出口排ガス中のダイオキシン類濃度は0.5 ng-TEQ/m³_Nを十分に下回っており、通常運転時とくらべ約50%に低減している。また、高温燃焼にもかかわらずNOx 濃度は低下している。

3.4 燃焼シミュレーション

本施設の燃焼室形状などの条件を合わせ、3次元燃焼シミュレーションによる検討をおこなった。図8、9に総空気比1.4としたときの温度およびO₂ 濃度コンター図を示す。燃焼帯の火格子近傍が高温となり、下流の二次燃焼室乾燥帯側が最も高温となっていることがわかる。O₂ 濃度分布としては、乾燥

帯から燃焼帯中央までの主燃焼室で低O₂ 濃度領域が認められ、燃焼帯中央から後燃焼帯で急激にO₂ 濃度の高い領域が広がっている。低空気比燃焼運転では二次空気流量が少なく、吹込流速も約20 m/s と低いため、ガスと空気の混合は炉頂部に向け緩やかにおこなわれていることがわかる。

3.5 焼却灰性状

低空気比燃焼運転時に採取した焼却灰の熱しゃく減量を表3に示す。焼却灰中の熱しゃく減量（年平均値）は3%未満となっており、低空気比燃焼運転による焼却灰性状の悪化は認められなかった。また、焼却灰中のダイオキシン類濃度についても0.1 ng-TEQ/gを十分に下回っていた。

3.6 排ガス量、ボイラ蒸発量について

通常運転時と低空気比燃焼運転時のごみ発熱量とボイラ蒸発量の関係を図10に示す。図より、通常運転時にくらべ、低空気比燃焼運転時には全体的にボイラ蒸発量が高くなっていることがわかる。これは排ガスの持出し熱量が減少したことによる効果である。

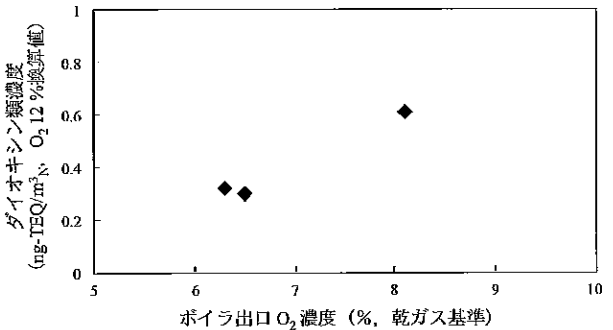


図6 ボイラ出口排ガス濃度 (DXNs)

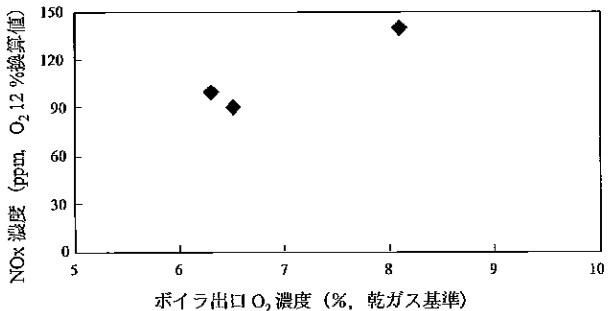


図7 ボイラ出口排ガス濃度 (NOx)

表3 焼却灰性状

項目	単位	数 値
熱しゃく減量 (2004年度平均値)	%	2.6
ダイオキシン類濃度	ng-TEQ/g	0.063

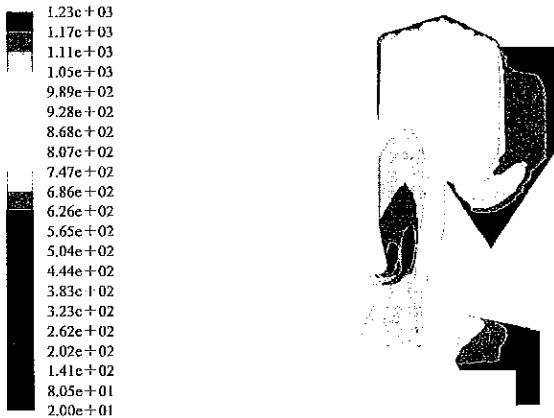


図8 温度コンター図

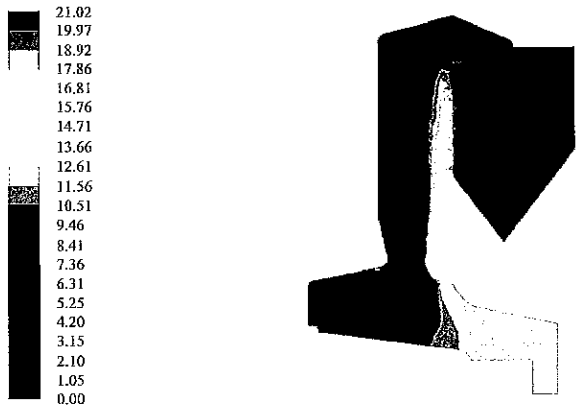


図9 O₂ 濃度コンター図

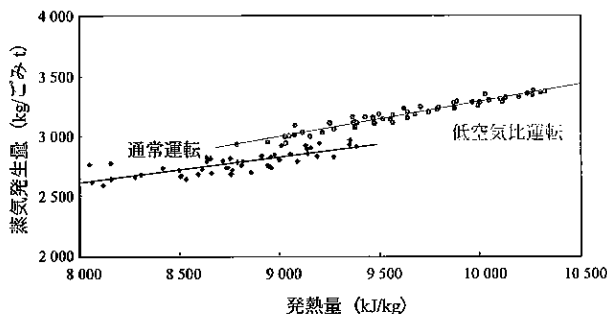


図10 ボイラ蒸気発生量比較

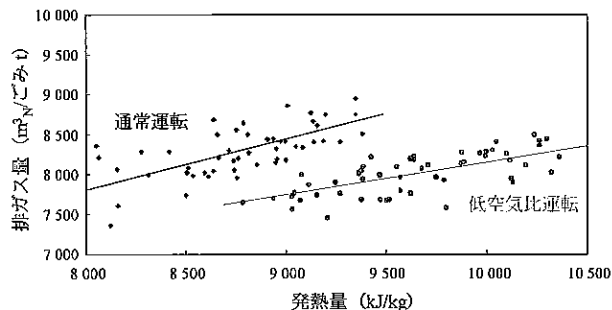


図11 煙突入口排ガス量比較

通常運転時と低空気比燃焼運転時の煙突入口での排ガス量の比較を図11に示す。溶融排ガスが第1バグフィルタ前で焼却排ガスに合流しているため、焼却排ガス量のみを比較することはできないが、ごみ発熱量9 000 kJ/kg 時、低空気比燃焼運転では排ガス量約7 700 m³/hとなり、通常運転時の排ガス量約8 400 m³/hとくらべ約8.3 %低減している。

3. 7 炉内点検

低空気比燃焼運転を開始して約8カ月が経過した2005年7月に炉内点検を実施した。焼却炉の内部状況を写真2に示す。焼却炉内の空冷火格子、耐火物の損耗状況については通常運転時とくらべ有意差は認められなかった。また、炉内水冷壁へのクリンカ付着も軽微であった。

4. アドバンスト制御の適用

4. 1 制御システムの概要

アドバンスト制御システムは以下の3つの制御機能から構成されている。

① 燃え切り点予測制御機能

燃え切り点位置を適正に保持し、発生蒸気量変動を抑制するために、燃え切り点予測モデルをもちいてストーカ送り速度を操作する。

② ごみ層厚制御機能

ストーカ上に滞留するごみの量と分布を適正な範囲に保持し、ごみ層厚と発生蒸気量の変動を抑制するために給じん機出力を操作する。

③ 燃焼制御機能

発生蒸気量を適正に保持するために、給じん機出力、二次空気流量を操作する。本機能は急激な燃焼負荷変動など上記2機能での抑制が困難な場合に対応するバックアップ機能である。

以下では、これらの機能のうち燃え切り点予測制御機能に関して述べる。

4. 2 燃え切り点予測制御

ストーカ炉にはむだ時間が存在するため、PID制御などのフィードバック制御では制御ゲインアップ

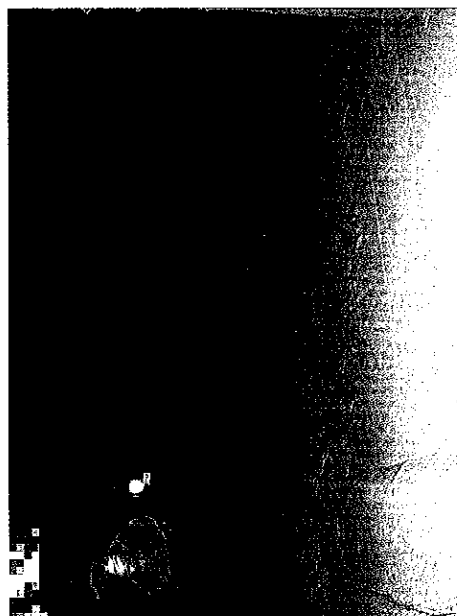


写真2 炉内点検

による制御性能向上には限界がある。その限界を超える性能をえるためには一種の予測機能を備えたフィードフォワード制御が必要となる。この点に着目して高精度な予測モデルを構築し、制御をおこなう機能を開発した。

予測モデルの構築には燃焼状態変化をより迅速に把握することができる火格子温度とともに燃え切り点を中間変数とするモデルを採用した。モデル式としては以下に示す一般的な線形モデルをもちいた。

$$X_t = \sum_{k=1}^{M1} A_k * X_{t-k} + \sum_{k=1}^{M1} B_{1k} * T_{1t-k} + \sum_{k=1}^{M1} B_{2k} * T_{2t-k} \\ + \dots + \sum_{k=1}^{M1} B_{pk} * T_{pt-k} + \sum_{k=1}^{M1} C_k * T_{gt-k} \\ y_t = \sum_{k=1}^{M2} D_k * y_{t-k} + \sum_{k=1}^{M2} E_k * X_{t-k}$$

ここで、 y_t 、 X_t はそれぞれ時刻 t での蒸気発生量と燃え切り点を表し、 T_{it} は送り方向にゾーンを設

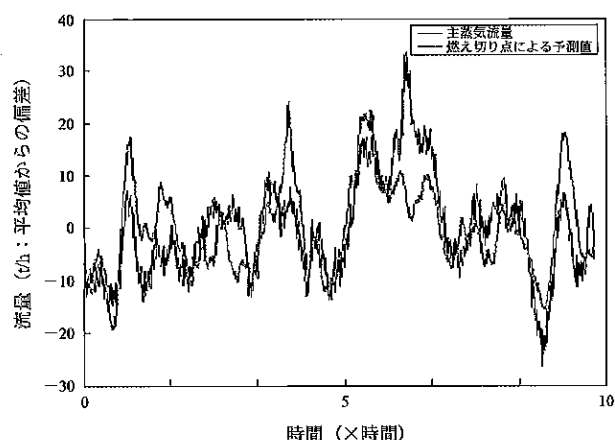


図12 燃え切り点による蒸気発生量予測

けた各ゾーンでの火格子温度を、 T_g は以下の式にて計算される燃焼重心位置を示す。

$$T_{gl} = \frac{\sum_{i=1}^p (i \cdot T_{il})}{\sum_{i=1}^p T_{il}}$$

モデル式中の係数 $A_k, B_{ik}, C_k, D_k, E_k$ を実績データによりパラメータ推定することで予測モデルを構築し、その精度検証をおこなった。予測モデルをもちいて5分先を予測した蒸気発生量と実測値を比較したものを図12に示す。図より、平均値からの流量偏差が±10以下の小さな変動に対する予測精度は低いものの、大きな変動に関してはおおむね正確に予測できていることがわかる。

4.3 今後の課題

今後は長時間連続適用による予測モデル精度の向上とその評価をおこない、ごみ処理量補償など制御システムの拡張により、さらなるブラッシュアップを図っていく予定である。

むすび

下関市奥山工場での低空気比燃焼運転により、以下の結果がえられた。なお、低空気比燃焼運転は2005年11月現在も継続して実施中であり、今後とも長期的な影響について観察を続ける予定である。

- ① 実設備において低空気比（空気比1.4）での安定運転が可能であった。
- ② 炉内を高温に安定して維持することにより、ボイラ出口排ガス中のダイオキシン類濃度を低減することが可能であった。
- ③ 低空気比燃焼運転により、排ガス流量の低減、ボイラ蒸発量の増加が達成された。
- ④ ボイラ蒸発量の一層の安定化を目的として、新たにアドバンス制御を開発した。

最後に、今回の低空気比燃焼運転の実施にあたり、多大なご協力をいただきました下関市殿に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 島倉久範：神鋼環境ソリューション技報「ストーカ式焼却炉とプラズマ式溶融炉の実用運転結果」, Vol.1 (1), p.55-61, (2004)
- 2) 宮本博司, 伊藤正, 山上恵造：「ストーカ式焼却炉における低空気比燃焼」, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p.737-739, (2005)

回転型濾過乾燥機「RFD™」

Rotary Type Filter Dryer "RFD™"

[特許出願中]



プロセス機器事業部技術部
永 田 純 洋
Sumihiro Nagata

新しいタイプの濾過乾燥機として回転型濾過乾燥機 RFD を開発した。濾過乾燥機は濾過から乾燥までの工程を 1 台で処理できる機器であり、高い濾過能力と乾燥能力が要求され、また、洗浄性、コンタミレス、製品の全量排出などの機能も要求される。今回開発した回転型濾過乾燥機 RFD は、これら両方の要求を満たしており、機能はこれまでの濾過乾燥機と同等以上、能力はこれまでの濾過乾燥機の 2 倍以上の濾過・乾燥能力を有する機器である。本稿では回転型濾過乾燥機 RFD の構造・特長・能力を報告する。

A new type filter dryer, rotary type filter dryer RFD has been developed. Filter dryers are the equipment capable of handling the process of filtration through drying in a single unit, and accordingly high performance of filtration and drying is required. Also functions such as cleaning, non-contaminating and discharging of the entire volume are required. The newly developed RFD meets both of these requirements and is an equipment of function equal to or more than and of performance in filtration and drying about two times as high as the conventional filter dryer. This article describes the structure, features and capability of the rotary type filter dryer RFD.

Key Words :

濾
過
乾

過
燥

Filtering
Drying

ま え が き

粉体製品の製造工程には、反応、晶析、濾過、乾燥、混合、粉碎など様々な工程があり、その目的や用途によって様々な機器がもちいられている。一方、設備の簡略化、省スペース化、良好な洗浄性、処理時間の短縮化の点より、1 台の機器で多工程を効率的に処理可能な機器の開発が望まれている。とくに濾過から乾燥の工程では、処理物の物性が大きく変化し、処理物のハンドリングが困難となるため、同一の機器で処理したいという要求が多い。また、最近では薬理活性の高い物質や、外部へ曝露させてはならない物質も多く、ケミカルハザード対応の必要性が重要視されている。それらの対応機器として、新しいタイプの濾過乾燥機「回転型濾過乾燥機 RFD」

を開発したので紹介する。

1. 回転型濾過乾燥機 RFD の構造

回転型濾過乾燥機 RFD の外観を写真 1 に、断面図を図 1 に示す。構造としては大きく 3 つの部分からなり、濾過・乾燥をおこなう本体部、本体を覆うケーシング部、本体を駆動する伝動装置部からなり、これらが架台で支持されている。本体は横型で円筒面が濾過面となっている。また、本体は外套付で中空の伝動軸より熱媒体を通せる構造となっている。

2. RFD の処理工程

RFD では原料を供給してから、濾過、ケーキ洗浄、ケーキ剥離、乾燥、排出の各工程を連続しておこなうことができる。それぞれの工程について模式図をもちいて以下に説明する。

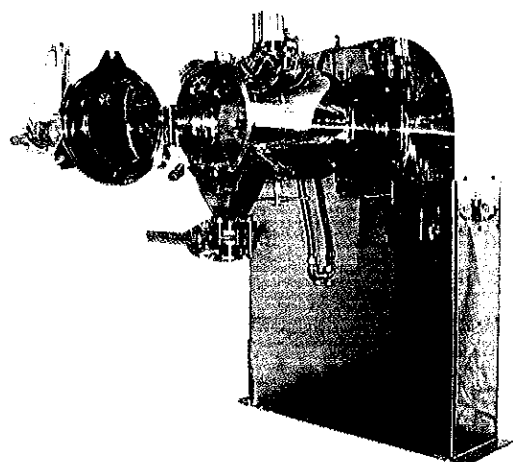


写真1 回転型濾過乾燥機

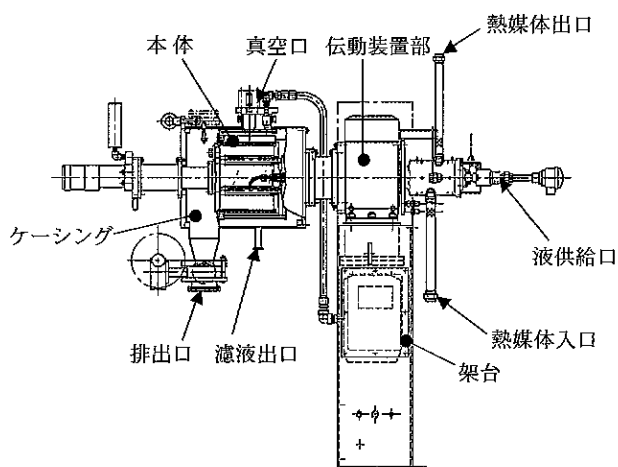


図1 回転型濾過乾燥機 RFD 全体図

1) 濾過工程

図2—1に濾過工程の模式図を示す。濾過は本体内を加圧することによってケーキ濾過をおこなう。本体内は蓋を閉じることで隔離された空間となり、この中へ液供給口から二重中空の伝動軸を通じてスラリーが供給される。満液あるいは全量を供給した時点で本体を回転し、遠心力により本体円筒壁面に常にスラリーが存在する状態とし、気体あるいは供給液で加圧すると円筒面で濾過がおこなわれケーキが生成される。このときの回転数は、円筒壁面に一様なケーキ層を形成するために3G程度の遠心力となる回転数とする。

2) ケーキ洗浄工程

図2—2にケーキ洗浄工程の模式図を示す。本体の回転を停止した状態で液供給口から洗浄液を供給し、2G程度の低い回転数で本体を回転すると生成されたケーキがリスラリーされ攪拌洗浄をおこなうことが可能である。洗浄後は濾過工程と同様に濾過をおこなう。また、本体を停止した状態で所定量の洗浄液を供給した後、本体を回転させ、洗浄液を連続で供給しリスラリーせずに洗浄する置換洗浄もおこなえる。

3) ケーキ剥離工程

図2—3にケーキ剥離工程の模式図を示す。回転を停止し、濾過時に濾液口となっていた部分に気体吹込口を自動セットして、気体を一気に噴出することによりケーキを剥離させる。同様に各濾液口から気体を噴出することで全体を剥離することができる。

4) 乾燥工程

図2—4に乾燥工程の模式図を示す。乾燥はバップルおよび外套に通した熱媒体により、間接的に加熱をおこないながら本体を低速で回転させ、ケーシ

ング内を所定の真空度とすることで真空乾燥をおこなう。このとき、濾過面はフィルターの役割を果たす。また、バップルは加熱源のほかに、乾燥時の混合を促進する効果もある。

5) 排出工程

図2—5に排出工程の模式図を示す。蓋を開け、本体を回転することによって乾燥粉体を排出する。本体を低速で回転すると乾燥粉体は内部に設けられたガイド翼により、蓋側へ送られて排出される。また、本体内部に粉体が付着し残留する場合は本体に振動を与えることによって、乾燥粉体の回収率をより高めることができる機構を有している。

6) 洗浄工程

図2—6に洗浄工程の模式図を示す。粉体排出口、濾液口のバルブおよび蓋を閉めた状態で供給液口より洗浄液を供給し低速で回転させて本体内の洗浄をおこなう。洗浄後は、洗浄液排出配管と濾液配管を通じて、洗浄液を排出する。

3. 回転型濾過乾燥機 RFD の特長

特長として以下があげられる。

1) 効率的な濾過・乾燥

濾過は遠心力を利用して本体円筒部全面を濾過面として加圧にておこなう。乾燥は、バップルによる伝導加熱と容器回転による混合にて真空乾燥をおこなう。

従来型濾過乾燥機と比較して濾過能力、乾燥能力、ともに2倍以上の能力がある。

2) 洗浄および洗浄バリデーションの確認が容易

スプレーノズルおよびケーシング内に液を貯めて回転洗浄をおこなうことによってCIP洗浄が可能である。また、ケーシングの蓋を開けることにより目視確認や洗浄面のサンプリングなどによる清浄度

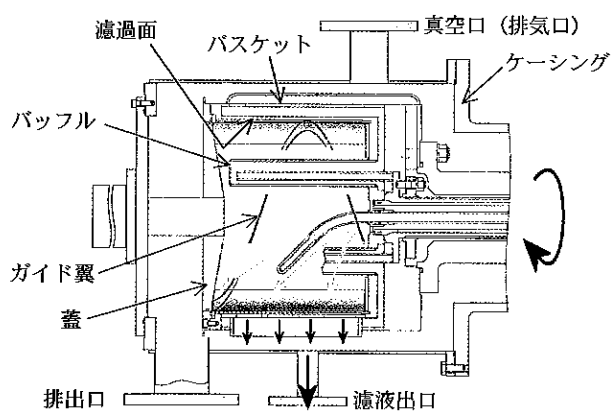


図2-1 濾過工程

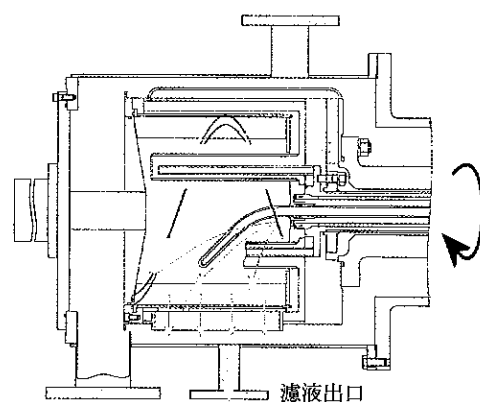


図2-2 ケーク洗浄工程

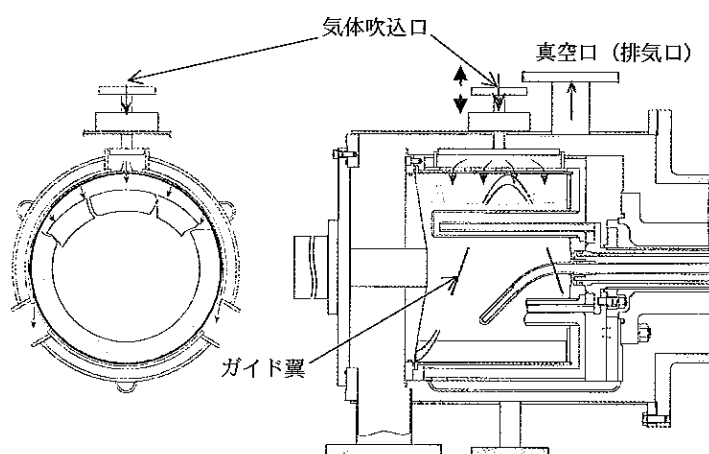


図2-3 ケーク剥離工程

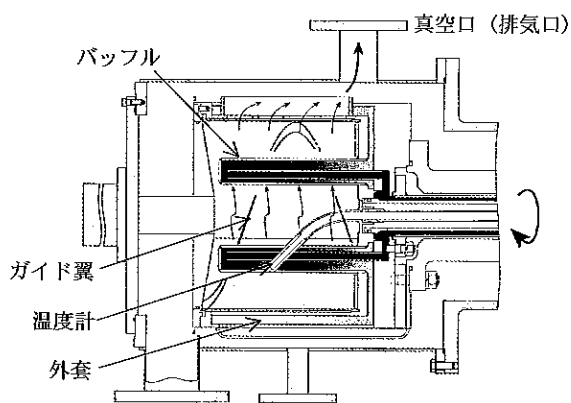


図2-4 乾燥工程

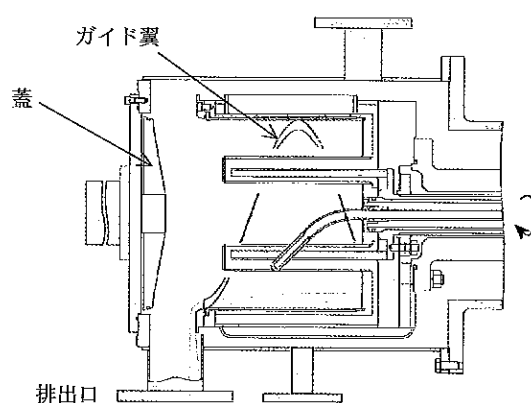


図2-5 排出工程

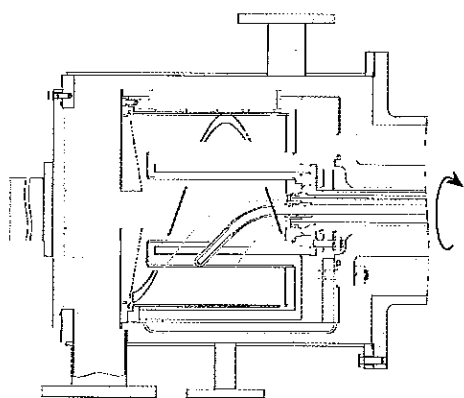


図2-6 洗浄工程

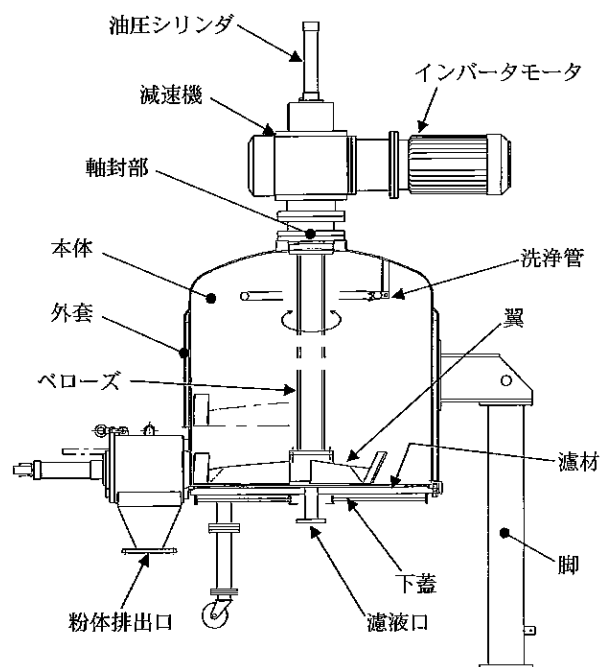


図3 フィルタドライヤ全体図

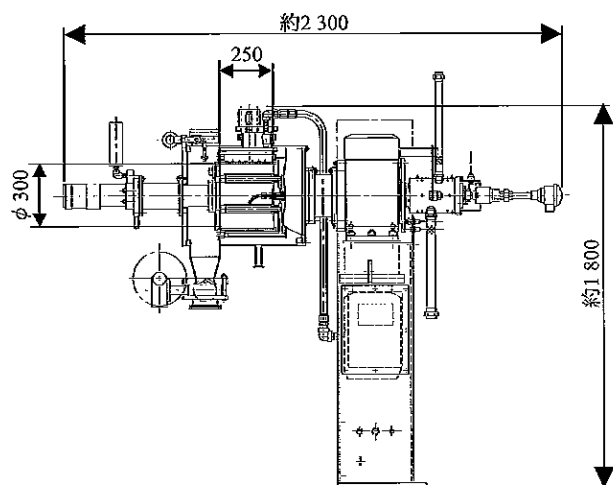


図4 RFDテスト機

の確認が容易にできる。

3) クリーンルーム内への設置

本体部分と駆動部をクリーンルームの内と外に分けることで、クリーンルームスペースの最小化と駆動部からの汚染を防止できる。

4) 高い製品回収率

容器回転と振動機構で全量排出が可能。

5) コンパクトな構造

伝動装置部を特殊設計することでコンパクトな構造となっている。

比較のため濾過乾燥機のひとつである当社の多機能ろ過乾燥機フィルタドライヤ（図3）との違いを

表1 回転型濾過乾燥機RFDと多機能ろ過乾燥機FDの比較

	混合方式	回転軸	伝熱面	濾過面
RFD	容器回転	水平	バッフル	円筒面
FD	攪拌翼	垂直	本体外套	下蓋面

表2 RFDテスト機仕様

内径 [mm]	ケーキ容量 [Lt]	濾過面積 [m ²]	濾過目開き (焼結金網) [μm]	伝熱面積 [m ²]
φ300	7.1	0.24	2	0.07

表3 テスト試料

テスト試料	かさ密度 [kg/m ³]	平均粒子径d ₅₀ [μm]	安息角 [°]	含水率 [wt %]
No.R 重炭	1100	20	53	<0.1
重質炭酸カルシウム	780	12	58	<0.1
SUPER S	750	6.3	59	<0.1

表1に示す。

4. テスト機

本体径φ300のテスト機を製作し、混合、濾過、ケーキ洗浄、乾燥、排出などの各種能力の確認をおこなった。テスト機の仕様を表2に、形状を図4に示す。各種能力確認のために使用したテスト試料の物性を表3に示す。

5. 混合テスト

5.1 テスト方法

バッフルおよびガイド翼の配置を変えて混合テストをおこなった。混合の評価については(社)日本粉体工業技術協会混合攪拌分科会で微細混合について検討をおこなっており、¹⁾ 各種混合装置における混合装置の比較がおこなわれている。テスト試料としては同分科会で共通試料とした炭酸カルシウム（丸尾カルシウム製 SUPER 1500）と弁柄（戸田工業製 トダカラー140ED）を使用し、重量比95：5にて混合した。混合が進行するに従い弁柄が分散し試料は白から赤に着色される。所定の混合時間ごとに本体内の3カ所をサンプリングし、色差計をもちいて明度を測定し到達度を求めた。到達度は1に近いほど混合が進んでいることを意味する。

5.2 テスト結果および考察

本体内のバッフルおよびガイド翼の配置が混合におよぼす影響について検討をおこない混合に最適な配置を決定した。

5. 2. 1 回転数による影響

図5に回転数による到達度の変化を示す。ガイド翼およびバッフル配置は同じとし、回転数のみを15, 30, 45, 60 rpm と変えてテストをおこなった。120, 240 min 経過後の到達度を示す。どちらも30 rpm 以上では値に変化がないことがわかる。一般に容器回転型の混合機では、臨界回転速度の50~80 %が適当な回転数とされている。臨界回転速度とは「粉体層に働く重力と遠心力が平衡になり、粉体が壁面に押し付けられて回転しはじめる臨界の回転速度」であり、次式で求められる。²⁾

$$N_{cr} = 30.2 R_{max}^{-1/2}$$

ここで、 N_{cr} : 臨界回転速度 [rpm]

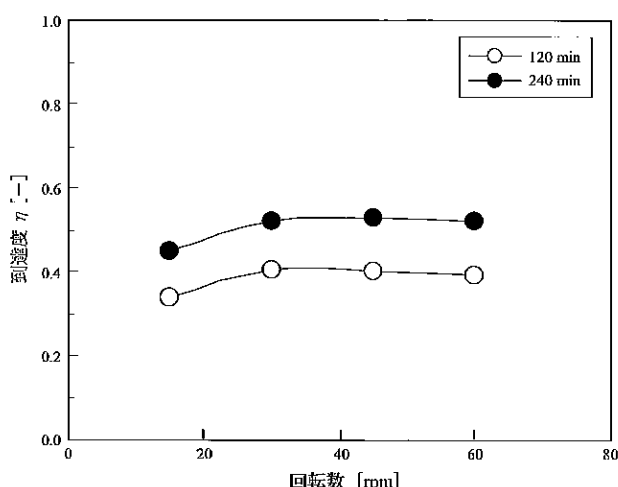


図5 回転数による到達度の変化

R_{max} : 円筒の半径 [m]

これより、テスト機においては混合に最適な回転数は38~62 rpm となるが、テスト結果を見るとバッフルの効果により低速でも混合が促進されており、30 rpm でも十分と考える。これより、混合を評価する場合の回転数は30 rpm とした。

5. 2. 2 バッフルとガイド翼の影響

バッフルおよびガイド翼の形状、配置を変えて混合テストをおこなった。図6にテストをおこなった配置を示す。結果を図7に示す。到達度は120, 240 min 経過後の値である。これより、配置 B→G→I とガイド翼の枚数が多いほど到達度の値が高くなっていることがわかる。しかし、配置 H はガイド翼の枚数が多いにもかかわらず到達度は低く、これはバッフル径が異なるためであると考えられる。配置 I の

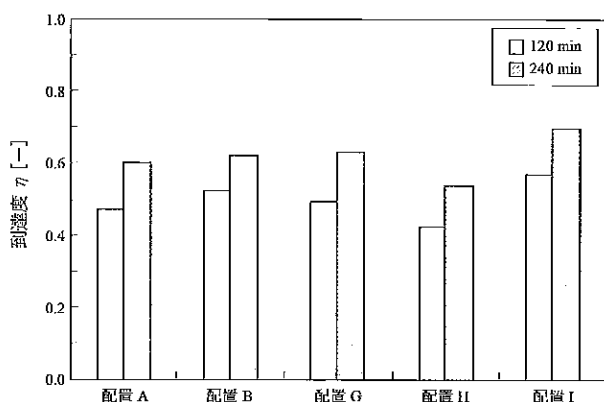


図7 各ガイド翼の配置による到達度

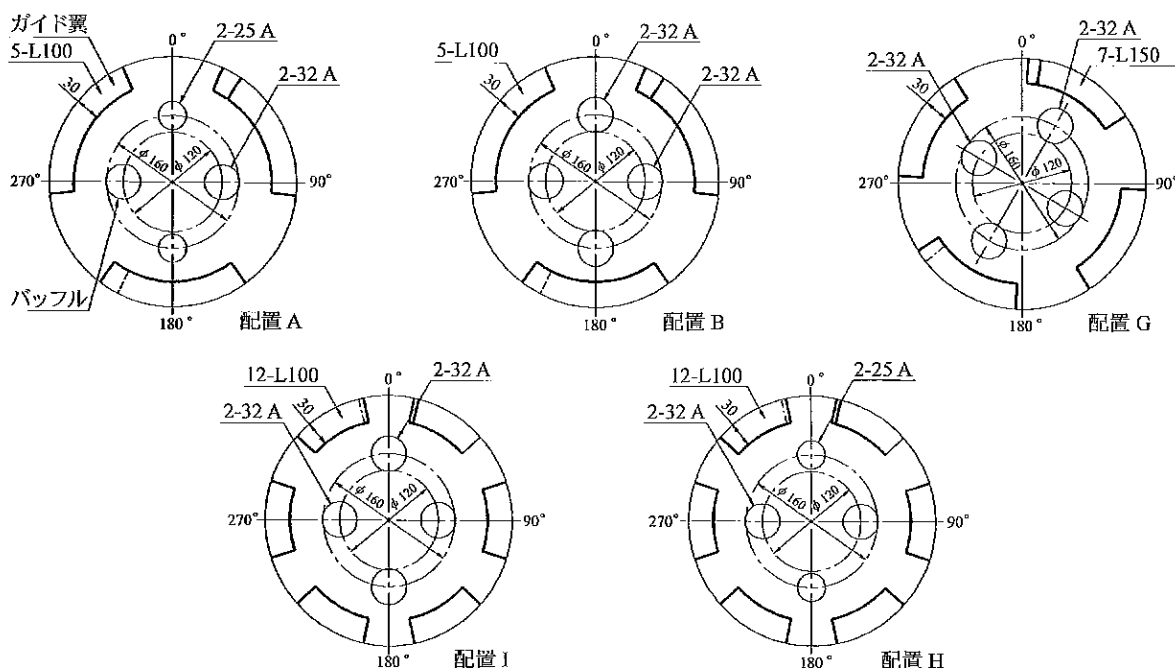


図6 バッフルとガイド翼の配置

到達度は、120 min 経過後で0.6に近い値となっている。容器回転型混合機の場合、100 min 経過後で0.4～0.6程度であり、十分な混合能力を有していることがわかる。

これらの結果より、配置Ⅰをバッフルおよびガイド翼の標準配置とした。

6. 濾過能力

6.1 テスト方法

テスト試料に水道水を加えて所定の濃度に調整した後、スラリーを装置に供給し、加圧濾過をおこなった。

6.2 テスト結果および考察

6.2.1 濾過圧力の影響

図8に濾過圧力を変えた場合の濾過後の含水率を

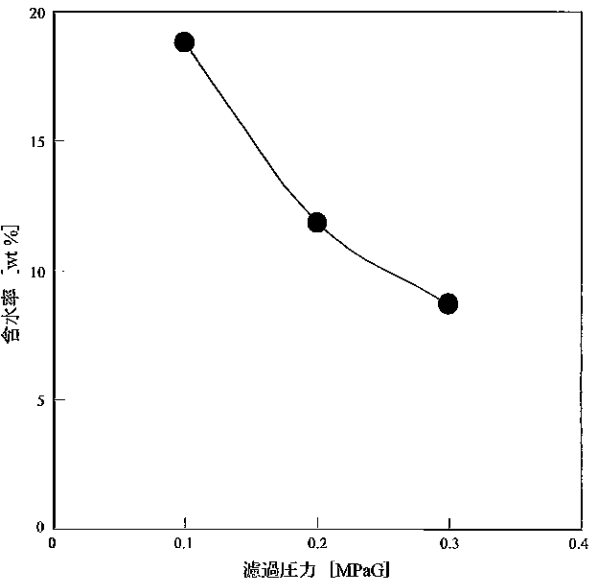


図8 濾過後の含水率

表4 濾過テスト条件（濾過圧力による比較）

テスト試料	粉体容量 (乾粉基準) [Lt]	スラリー濃度 [wt %]	濾過圧力 [MPaG]	回転数 [rpm]
No.R 重炭	7.1	20	0.1, 0.2, 0.3	135

表5 FD テスト機仕様

内径 [mm]	最大 ケーキ容量 [Lt]	濾過面積 [m²]	濾過日開き [μm]	最大 伝熱面積 [m²]
φ450	24	0.16	濾布使用	0.21

表6 濾過テスト条件（機種による比較）

機種	テスト試料	粉体容量 (乾粉基準) [Lt]	スラリー濃度 [wt %]	濾過圧力 [MPaG]	濾過面積 [m²]	回転数 [rpm]
RFD	SUPER S, 重質炭酸カルシウム	7.1	30	0.2	0.24	135
FD	SUPER S, 重質炭酸カルシウム	7.1	30	0.2	0.16	—

示す。濾過の条件を表4に示す。濾過圧力が高くなると含水率が低くなり後工程の乾燥に有利である。

6.2.2 回転数の影響

回転数（遠心力）によるケーキの状態を確認するため、回転数を110, 135, 170 rpm（遠心力：2, 3, 5 G）と変化させ濾過圧力0.2 MPaGにて濾過をおこないケーキの観察をおこなった。110 rpmではケーキの厚さが若干不均一であったが、135, 170 rpmではケーキの状態に差はなく、回転数は135 rpm（3 G）で十分であることを確認した。濾過時の回転数は標準で135 rpm（3 G）とした。

6.2.3 他機種との比較

濾過速度の比較のため、当社の多機能ろ過乾燥機フィルタドライヤ（FD）と同じケーキ処理量での比較テストをおこなった。FDのテスト機仕様を表5に、テスト条件を表6に示す。図9, 10に、それ

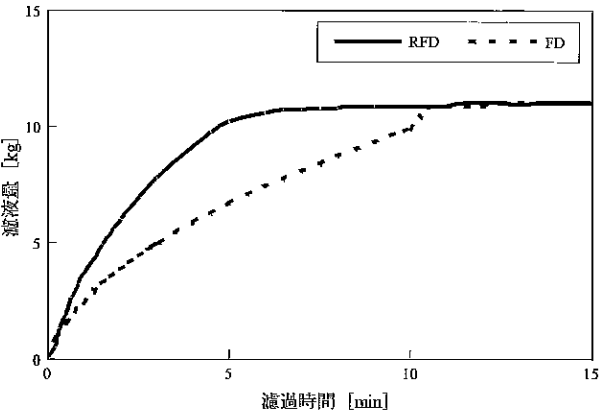


図9 濾過速度の比較（SUPER S）

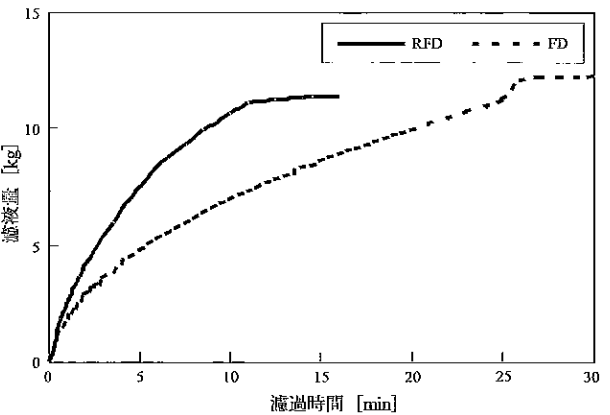


図10 濾過速度の比較（重質炭酸カルシウム）

ぞれ、SUPER S、重質炭酸カルシウムの結果を示す。横軸が濾過を開始してから時間、縦軸がその時の濾液量を示す。

ケーキ濾過時に濾過のしやすさの指標となる平均濾過比抵抗 α_{av} を表7に示す。参考のために内径 ϕ 100のヌッチェろ過器にて測定した値も示す。FD、回転型濾過乾燥機 RFD とともにほぼ同じ値を示しており正常なケーキ濾過がおこなわれたことがわかる。これより、図9、10においてRFDがFDより短時間で濾過が終了しているのは、RFDの濾過面積が広く濾過速度が速くなっているためであるといえる。

平均粒子径の小さいSUPER Sが平均粒子径の大きい重質炭酸カルシウムよりも短い時間で濾過が終了しているが、これは重質炭酸カルシウムの粒度分布がブロードで粒子径の細かいものが多い、SUPER Sの粒度分布がシャープであるためである。

7. ケーク洗浄

ケーキ洗浄の理論やテスト方法については当社の技報³⁾に詳しく示されており、本稿では結果のみを示す。

ケーキ洗浄には攪拌洗浄と置換洗浄があり、攪拌洗浄はケーキに洗浄液を加え、攪拌しスラリーすることでケーキ内の溶質（不純物）濃度を下げる洗浄方法であり、置換洗浄は、ケーキ中の溶質を洗浄液により押し出し流れで置換することにより洗浄する方法である。

図11に置換洗浄、攪拌洗浄、および置換洗浄と攪拌洗浄を組み合わせた結果を示す。また、それぞれの洗浄の理論線を示す。横軸は濾過後のケーキ中に含まれる母液の量を基準として加えられた洗浄液の量比を示し、縦軸は濾過後のケーキ中の溶質残留量を基準としてケーキ中に残留している溶質の割合を示す。攪拌洗浄の場合、加える洗浄液量により溶質残留率が下がり、その傾きは一定となる。置換洗浄の場合、洗浄初期では理論線に沿って洗浄が進行するが途中から効率が悪くなっている。置換洗浄では洗浄液がケーキ内を偏流し洗浄できない部分が存在するためである。置換洗浄と攪拌洗浄を組み合わせた場合、少ない洗浄液量で効率の良い洗浄がおこなわれている。また、後半に攪拌洗浄をおこなうことによりケーキ内の溶質濃度の均一化を担保できる。

8. 乾燥能力

8.1 テスト方法

粒子径の異なる炭酸カルシウムをテスト試料として濾過後の水分を含むケーキの乾燥テストをおこなった。乾燥テストの条件を表8に示す。濾過の条件は

表7 平均濾過比抵抗 α_{av} の値 [m/kg]

テスト試料	RFD	FD	ヌッチェろ過器
SUPER S	9.73×10^0	1.08×10^1	9.56×10^0
重質炭酸カルシウム	1.67×10^1	2.17×10^1	1.52×10^1

表8 乾燥テスト条件 (RFD) 間欠運転：30秒ごとに1回転

テスト試料	外套温度 (温水) [℃]	真空度 [kPa]	回転数 [rpm]	
			0～30 min	30 min～
SUPER S	80	4	間欠運転	18
重質炭酸カルシウム	80	4	間欠運転	18

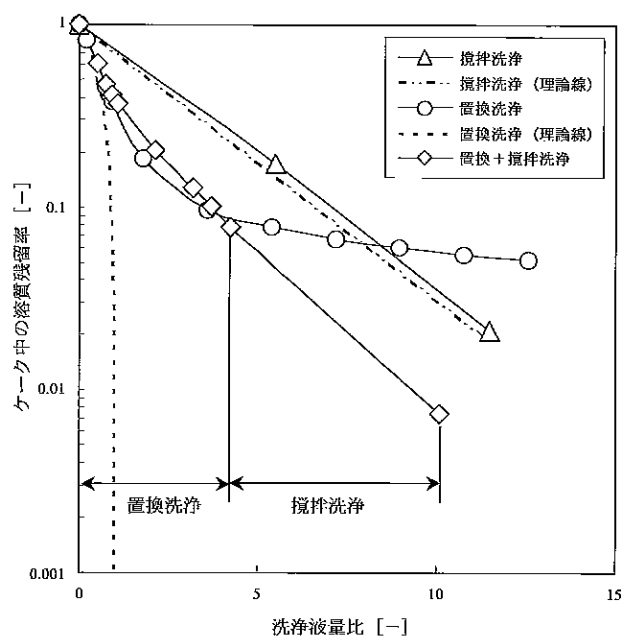


図11 ケーク洗浄方法による洗浄効果

表6と同じとした。なお、乾燥の終点は含水率0.1 wt %以下とした。

8.2 テスト結果および考察

8.2.1 処理物による違い

粒子径の異なる2種類の炭酸カルシウム (SUPER S、重質炭酸カルシウム) をテスト試料として乾燥テストをおこなった。図12、13に結果を示す。どちらの粉体においても、乾燥初期から連続で回転するとダマを生成するため、最初の30 min は間欠運転 (30秒ごとに1回転) をおこない、ダマの生成にくい含水率まで乾燥した後に連続で回転をおこなった。

8.2.2 他機種との比較

乾燥についてもFDとの比較をおこなった。テスト試料には、重質炭酸カルシウムをもちいた。乾燥

の条件を表9に示す。濾過の条件は表6と同じとした。結果を図14に示す。乾燥時間はRFDと同様に約120 minで含水率0.1 wt %以下となり、乾燥能力としてはほぼ同じであった。しかしながら、FDではダマを生成してしまい、乾燥終了までダマが残ったままであった。乾燥の方式はどちらも同じ伝導加熱の真空乾燥であるが、混合方式が異なる。RFDでは本体の回転、FDでは攪拌翼の回転による混合のため、ケーキに与えるせん断の強さが異なり、ダマの生成に関係したと考えられる。RFDはダマを生成しにくい低せん断での乾燥がおこなえる。

9. 排出能力

9.1 テスト方法

粒子径の異なる炭酸カルシウム3種にて濾過、乾燥、排出をおこない、回収率を求めた。

9.2 テスト結果および考察

図15に結果を示す。比較として、FDにて攪拌翼と濾過面のクリアランスを10 mmと仮定して計算した値も示す。回転型濾過乾燥機RFDでは、粒子径が大きいほど回収率が高く、最高で99.7 %までの回収が可能であった。また、粒子径の小さいSUPER Sにおいても98 %の回収が可能であった。FDの回収率は93 %であり、RFDの回収率が非常に高いこ

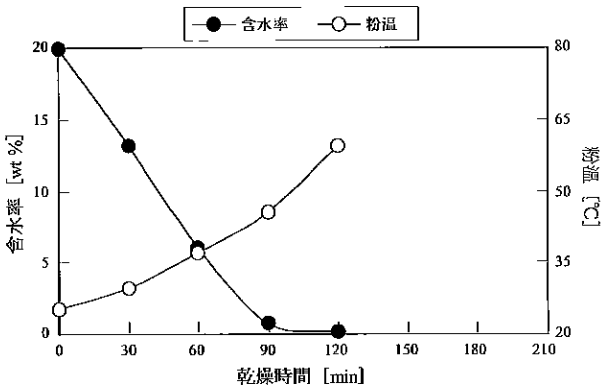


図12 RFDの乾燥曲線 (SUPER S)

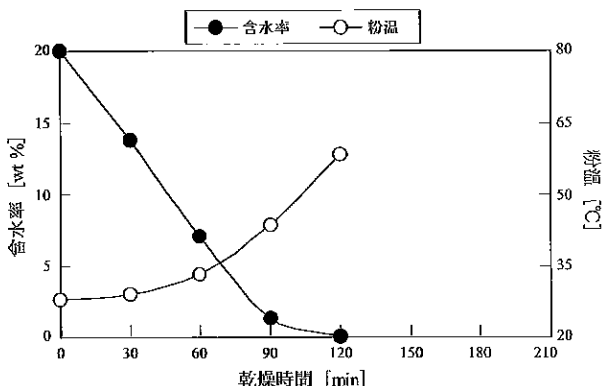


図13 RFDの乾燥曲線 (重質炭酸カルシウム)

とがわかる。FDの値はあくまでも計算値であり、缶内への付着などを考慮すれば、回収率の差はさらに大きくなる。

10. スケールアップの考え方

主な工程である濾過と乾燥のスケールアップについて述べる。

10.1 濾過工程のスケールアップ

回転型濾過乾燥機RFDでは円筒面を濾過面として利用するために遠心力をかけながら加圧濾過をおこなう。しかしながら、この遠心力は3 Gと低く、濾過の形態としてはケーキ濾過と変わらない。これは、6項の濾過能力で述べたように濾過比抵抗がヌッチェ型ろ過器とほぼ同じ値を示すことからわかる。

ケーキ濾過における過程はRuthの濾過理論によって説明できる。濾過圧力が一定となる定圧濾過では次のRuthの定圧濾過式⁴⁾がえられる。

表9 乾燥テスト条件 (FD) 間欠運転：30秒ごとに1回転

テスト試料	外套温度 (温水) [°C]	真空度 [kPa]	回転数 [rpm]	
			0~30 min	30 min~
重質炭酸カルシウム	80	4	間欠運転	60

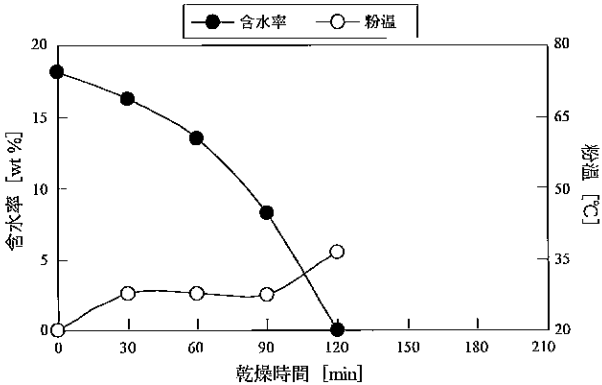


図14 FDの乾燥曲線 (重質炭酸カルシウム)

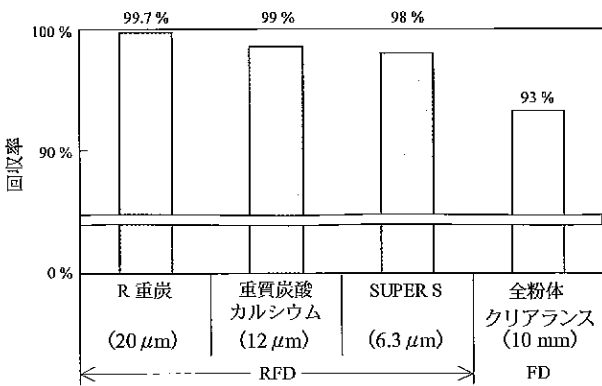


図15 回収率の比較

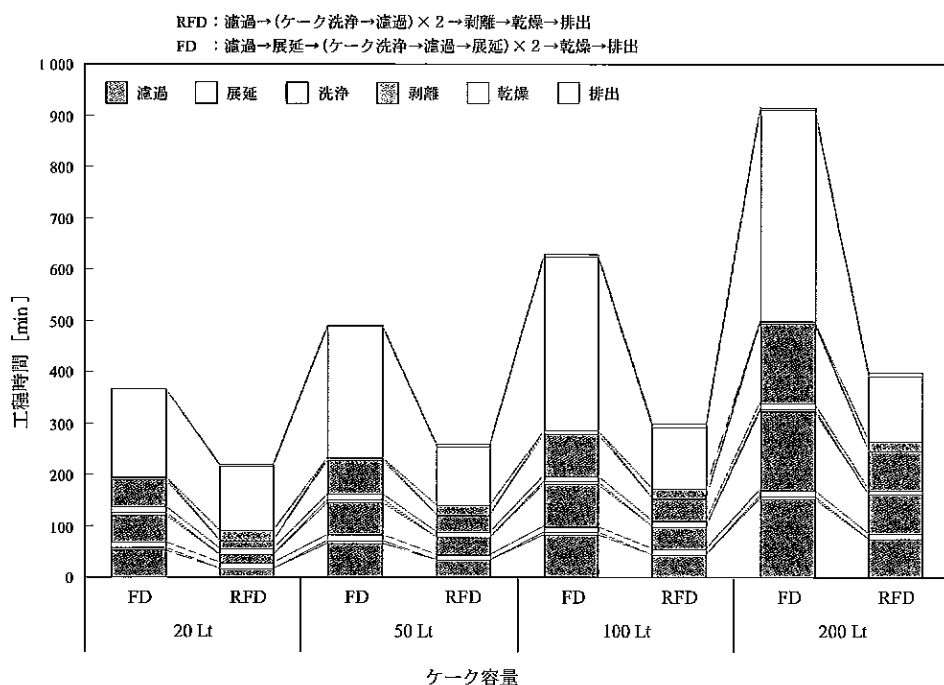


図16 工程時間の比較

$$(v+v_m)^2 = K(\theta+\theta_m)$$

ただし,

$$K = 2p(1-ms)/\mu\rho s\alpha_{av}$$

$$\theta_m = v_m^2/K$$

v : 濾液量 [kg] θ : 時間 [s]

K : Ruth の定圧濾過係数

θ_m : 仮定の濾液量 v_m をえるのに要する仮想的な濾過時間 [s]

p : 濾過圧力 [Pa]

ρ : 濾液密度 [kg/m³]

m : ケーキの湿乾質量比 [—]

μ : 濾液粘度 [Pa·s]

s : スラリー中の固体質量分率 [—]

α_{av} : 平均濾過比抵抗 [kg/m]

物質により α_{av} は異なるが、実験により求めることが可能であるため、スケールアップした際の濾過時間を推定することができる。

10.2 乾燥工程のスケールアップ

乾燥時間は、流動状態と単位伝熱面積あたりのケーキ量により推定できる。

まず、流動状態について考える。容器回転型の混合機の場合、遠心力と重力の作用比であるフルード数を一定とすることがスケールアップの主要因子となる。フルード数は、次式で表される。

$$F_r = N^2 R / g$$

N : 回転数 [rps]

R : 代表径 [m]

g : 重力加速度 [m/s²]

代表径 R_1, R_2 を持つ場合には、次式が成り立つ。

$$N_1^2 R_1 = N_2^2 R_2$$

これよりスケールアップ後の回転数は代表径比の平方根に比例することがわかる。

次に、単位伝熱面積あたりのケーキ量については、伝熱部がバツフルであるためケーキ量の増加に従って本数を増やすことで一定に保つことができる。

これらの条件を満たすことにより、乾燥時間はスケールアップしても変わらない。

10.3 全工程における他機種との能力比較

スケールアップした際の能力比較のために、同じ条件にて多機能ろ過乾燥機 FD との工程処理時間の比較をおこなう。スケールアップの傾向としては、濾過、乾燥の工程において以下のことがいえる。

濾過工程においては FD, RFD とともに処理量を増やすとケーキ高さが高くなり濾過時間は高さの 2 乗に比例して長くなる。ただし、RFD は円筒面を利用することで濾過面積を大きくとれるため、同じ処理量であればケーキ高さが低く抑えられ濾過時間は短くなる。

乾燥工程においては、FD はケーキ量の増加に比例して円筒面の伝熱面積が増えるため、型式が変わらなければ乾燥時間は一定であるが、型式をアップするとケーキ量当たりの伝熱面積が小さくなり、乾燥時間は型式がアップする度に長くなる。RFD は型式が変わってもケーキ量当たりの伝熱面積が同じとなるように伝熱面であるバツフルを配置することで、スケールアップしても乾燥時間がほぼ一定となる。FD とRFD のケーキ量当たりの伝熱面積を比較すると RFD の方が大きく、乾燥時間は短くなる。

FD と RFD の工程処理時間を比較した結果を図16 に示す。工程には実運転を考慮して洗浄工程を 2 回含む。供給するスラリー濃度、濾過・乾燥条件を同じとし、ケーキ容量を変えた場合の図である。ケーキ容量の少ない20 Lt では、乾燥時間はあまり変わらないが、濾過時間は RFD がケーキ量当たりの濾過面積を多くとれるために短く、全体として RFD が短時間で処理できる。ケーキ量が増加すると、RFD では乾燥時間が一定であるため、FD との差が大きくなっていく。ケーキ容量200 Lt で比較すると、回転型濾過乾燥機 RFD の工程処理時間が短く、濾

過では約50 %、乾燥では約30 %の時間で終了しており、全体では半分以下の時間で終了している。つまり、RFD は 2 倍以上の能力を有しているといえる。処理量が増えるほど RFD と FD の工程処理時間の差が大きくなっているのがわかる。

む す び

今回、新たに開発した回転型濾過乾燥機 RFD は、本体回転により円筒壁面を濾過面とした加圧濾過と真空伝導伝熱乾燥を主体としたユニークな装置である。これまでの濾過乾燥機と比較して、機能と能力の両方の点から有用な装置であると考えている。今後も客先ニーズに応えるべく改善・改良を加え、より良い製品を提供できるよう尽力していく。

【参考文献】

- 1) 井上速男：混合度評価法検討会報告，粉体と工業，Vol.26, No.11 (1994)
- 2) 化学工業会編：“改訂五版 化学工学便覧”，p.865, 丸善 (1988)
- 3) 本郷孝男，神鋼パンテック技報，Vol.33, No.3, (1989)
- 4) Ruth, B.F., G.H. Montillon, R.E. Montonna: Ind. Eng. Chem., 25, 153 (1933)

熱輸送システム技術「サーモウェイ®」

Thermal Energy Transport System
"ThermoWay®"



技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室
田 頭 成 能

Shigeyoshi Tagashira

技術開発本部開発企画室
伊 藤 裕
Yutaka Ito

技術開発本部
プロセス技術開発部新規プロセス室
村 上 吉 明
Yoshiaki Murakami

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
機械研究所流熱技術研究室
東 康 夫
Yasuo Higashi
高 橋 和 雄
Kazuo Takahashi

蓄熱材にエリスリトールを、熱交換方式に直接接触式をもちいた熱輸送システム技術を開発した。工場などで未利用のまま放散されていた中・低温域（おおむね200℃以下）の廃熱を利用して、蓄熱装置に熱エネルギーを蓄え、トラックなどで遠隔地へ輸送し、熱利用時には90℃以上の高温水として取り出せる。熱利用温度が従来技術よりも高いため、暖房や給湯用途での利用に留まらず、市販の吸収式冷凍機と組み合わせることにより冷房用エネルギーとしても利用可能である。本技術による総重量1トン規模の蓄熱装置を試作し、公道での熱輸送と、吸収式冷温水機との組み合わせによる冷熱転換を実証した。

A new thermal energy transport system, which employs Erythritol as heat storage medium and direct contact heat transfer technology, has been developed. Waste heat at the temperature of 200℃ or lower can be a heat source for this system, and after transportation, the system retrieves the stored heat energy as hot water at the temperature of 90℃. The temperature of retrieved hot water is sufficiently high, so that the energy can be utilized to cooling purposes in combination with absorption refrigerators. A 1-tonne heat storage cassette and heat storage/retrieval units are manufactured as a prototype system, which demonstrated the transportation on public road and also stable operation together with an absorption refrigerator.

Key Words :

熱輸送システム
潜熱蓄熱
直接接触
エリスリトール
吸収式冷凍機

Thermal energy transport system
Latent thermal energy storage
Direct contact
Erythritol
Absorption refrigerator

まえがき

当社と(株)神戸製鋼所とは共同で、製鉄所や工場、あるいはごみ焼却場などで、従来有効利用されことなく放散されていた中・低温域（おおむね200℃以下）の廃熱を利用して、独自開発の高効率な蓄熱装置に熱エネルギーを蓄え、トラックで遠隔地へ輸送する技術を開発した。本技術は、蓄熱材にエリスリトールを、熱交換方式に直接接触式を採用していることが特長である。熱利用側での温水を温度90℃以上の高温水にできるため、暖房や給湯用途での利用に留まらず、市販の吸収式冷凍機と組み合わせることにより冷房用エネルギーとしても利用が可能となる。本開発では高温水取出温度90℃以上を1つのターゲットとした。

パイプラインなどのインフラ整備が不要であり、CO₂排出削減・地球温暖化対策にも結びつく有効な熱エネルギー利用手段として、集合住宅などの民間施設や地域・公共機関などの冷暖房・温水として、幅広く利用されることを期待している。

本報告では、まず、筆者らが開発してきた熱輸送システムの概要と特長を紹介する。つづいて、本システムの試験機として、総重量1トン規模の蓄熱装置を試作し、公道での熱輸送をおこない、90℃の高温水を供給した「公道輸送試験」の結果を述べる。最後に、市販の吸収式冷水機との組み合わせによ

り、蓄熱装置の熱をエネルギー源として冷水を生成し、夏季に床面積30㎡の室内を冷房する「冷熱転換試験」を実施したので、その結果を示す。

1. 熱輸送システム

1.1 熱輸送システムとは

現状の工場、廃棄物処理施設、バイオマス熱利用システム等においては、高温廃熱はたとえば熱回収してボイラ用空気の予熱に使用するなど、工場内での利用が進んでいる。しかし、おおむね200℃以下の中・低温の廃熱は、工場内での熱回収・利用が効率的でなく、未利用のまま放散される場合が多い。

一方、我々が日常生活において空調や給湯の用途で必要とする温度域はたかだか数十℃であり、中低温廃熱で十分にカバーできる。

しかしながら、工場などの施設と熱需要のある施設とは、立地が互いに離れていることが多く、従来、工場施設で発生した200℃以下の中・低温排熱を熱需要施設で経済的に利用できなかった。

今回開発された熱輸送システム技術を利用すれば、工場では放散されていた未利用の廃熱を、需要のある場所まで輸送し利用できるようになる。廃熱を利用した分については燃料を節減できるので、CO₂排出を抑えることができる。たとえば、廃棄物処理施設の排熱利用を例にとると、熱輸送システムをもちいた場合のエネルギー利用の将来像として図1のよう

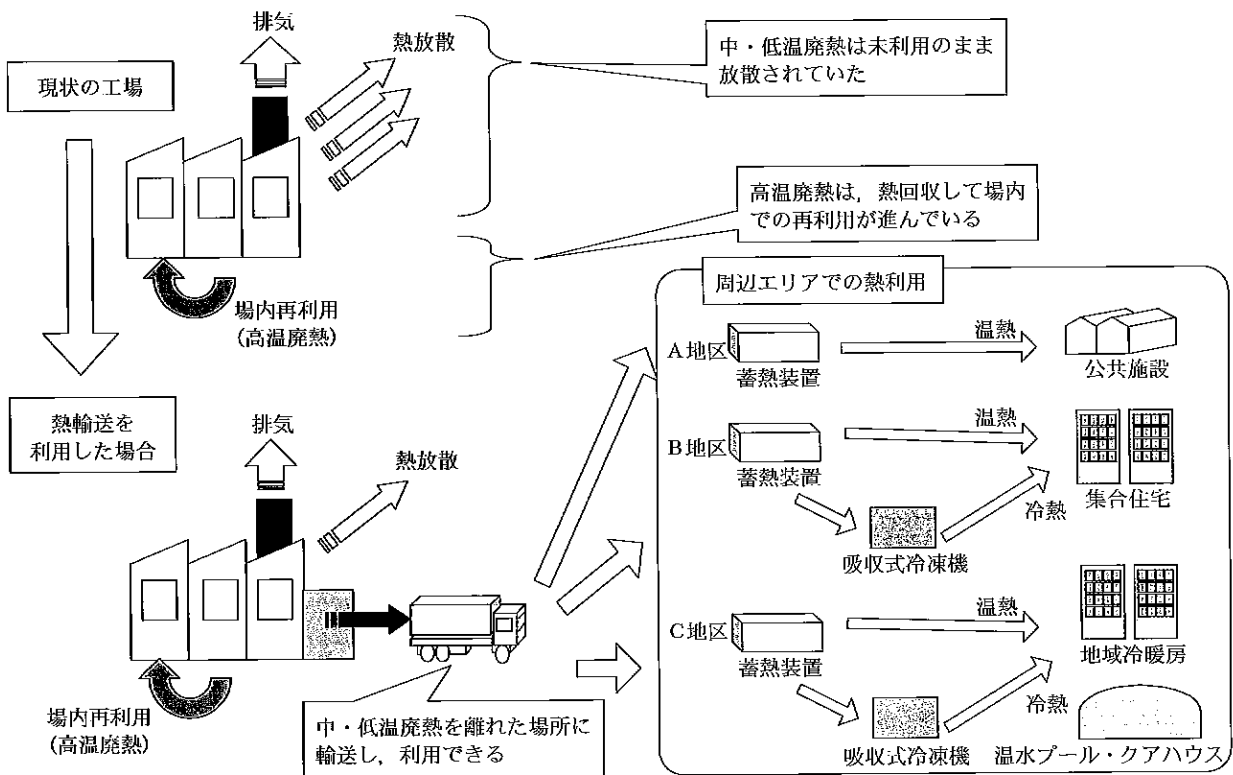


図1 熱輸送システムの概念

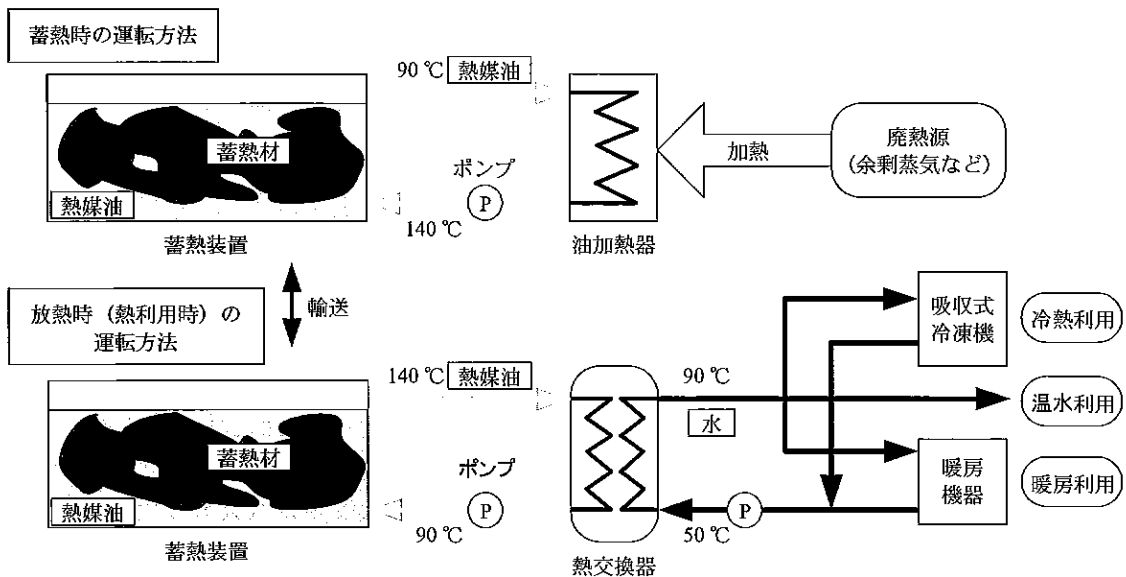


図2 熱輸送システムの運転方法

な利用状況が考えられる。

1. 2 蓄熱装置の運転方法

熱輸送システムで使用する蓄熱装置には、少ない質量で多くの熱を蓄えることのできる「蓄熱材」と呼ばれる物質が入っている。この物質に蓄熱する方法としては、熱媒体として油を使用するのが一般的である。

図2に、蓄熱装置への蓄熱時、および放熱時（熱利用時）の運転方法を例示した。熱を蓄えるときには、熱源により熱媒油を加熱して蓄熱装置内を循環させ、蓄熱材に熱を蓄える。一方で、放熱時には、蓄熱装置から高温の熱媒油を取り出し、これを水と熱交換して、空調や給湯用途に使用する。

1. 3 本技術の特長

この熱輸送システムを運営する場合には、1回当たりに輸送できる熱量の向上とシステムの年間稼働率の向上、すなわち暖房、冷房の双方への適用が技術課題となる。この際に大きな役割を果たすのが、潜熱蓄熱材である。物体が固体から液体へと融解するときには、潜熱と呼ばれる物質固有の熱量を必要とする。この現象を利用して熱を蓄熱する材料を潜熱蓄熱材と呼び、質量あたりの蓄熱量を大きくとれるという利点がある。代表的な潜熱蓄熱材としては、酢酸ナトリウムやパラフィンなどがある。

すでに欧州では、酢酸ナトリウム（融解潜熱：63 kcal/kg、融点温度58℃）を蓄熱材として使用した熱エネルギー輸送技術が実用化されている。

これに対し、本技術は、

- ① 単位質量あたりの蓄熱量が大きく（融解潜熱：76 kcal/kg）、高い融点温度（119℃）を持つエリ



図3 エリスリトール (meso-Erythritol)

スリトールを蓄熱材として使用。

- ② 蓄熱装置に独自開発の特殊構造（特許出願中）を採用。蓄熱材に、熱エネルギーを伝える熱媒体（熱媒油）との熱交換に、直接接触式の採用を可能としたことで、蓄熱装置内の伝熱効率・充填効率が高くなり、従来比で30%小型化。などにより、熱エネルギーの輸送効率を向上させたという特長を持つ。

エリスリトールは、糖アルコール類の一種で、図3に示すように分子式 $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$ で表される。ノンカロリーの人工甘味料として、菓子や飲料に広く利用されており、人体に安全で地球環境にもやさしい。写真1に示すように、白色粉末として市販されているが、一度融解して再凝固すると写真2のように氷砂糖状に凝固する。

図4に、各種の潜熱蓄熱材の比較を示す。この図からもわかるように、エリスリトールは融点が高く吸収式冷凍機が必要とする90℃を超えており、かつ融解潜熱が大きいことから、潜熱蓄熱材として好適な性質を有しており、この分野での利用が期待されている。

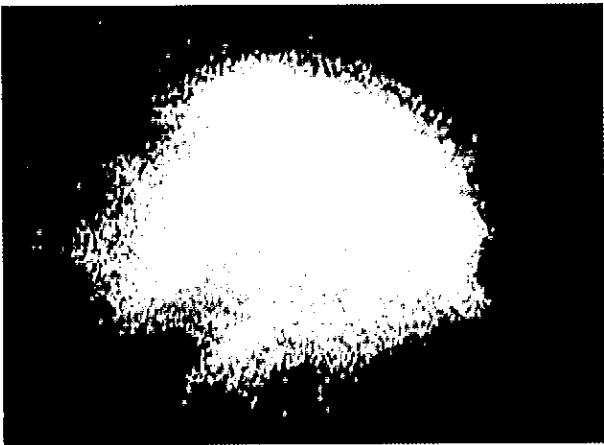


写真1 エリスリトール（粉末状）

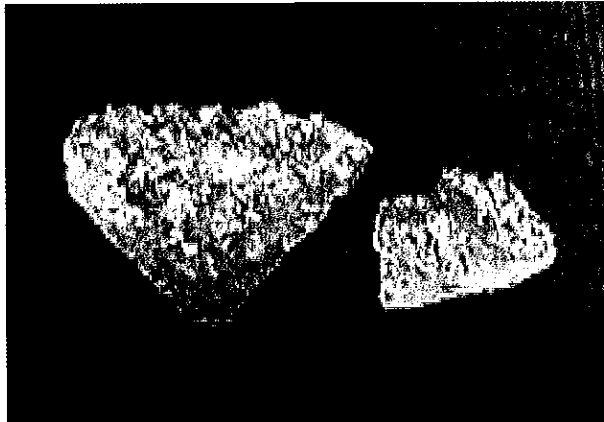


写真2 エリスリトール（固形状）

一方、従来、エリスリトールを蓄熱材として利用
する場合は、球形のカプセルや伝熱管の中にエリス
リトールを充填し、あるいはエリスリトールを充填
した容器内を伝熱管が通過するようにするなどして、
エリスリトールが直接熱媒油に接触しないような方
法をとっていた。²⁾ これに対し、本技術では、エリ
スリトールなどの蓄熱材を、熱媒油の中に直接浸し
て蓄熱・放熱をおこなう方式（直接接触型熱交換）
を採用している（図5参照）。これは、エリスリト
ールが熱媒油には溶けないため、比重差による分離が
可能であることを利用している。

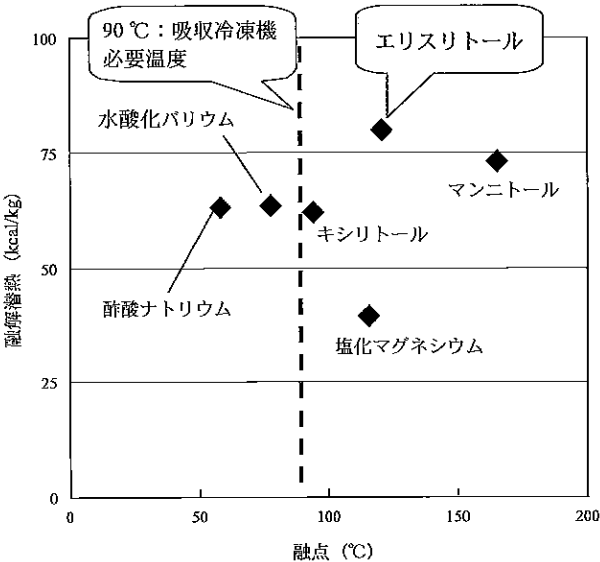


図4 各種潜熱蓄熱材の比較

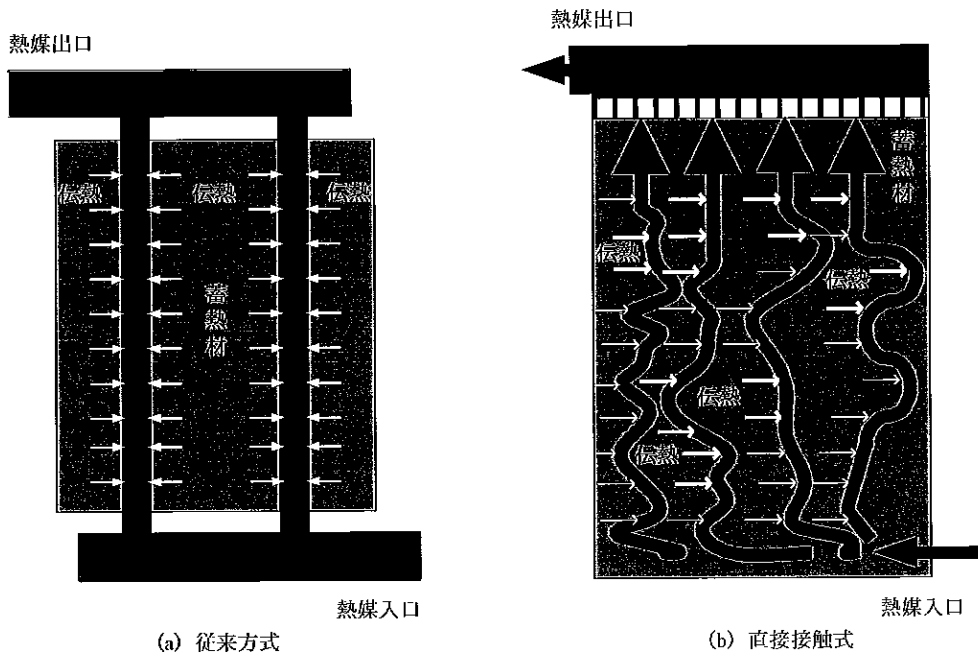


図5 直接接触式熱交換の概念図

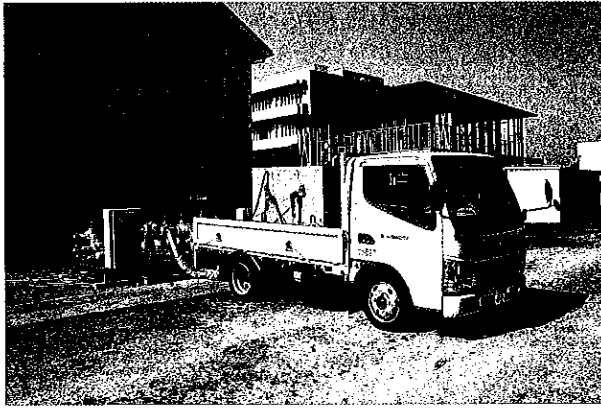


写真3 蓄熱装置の外観

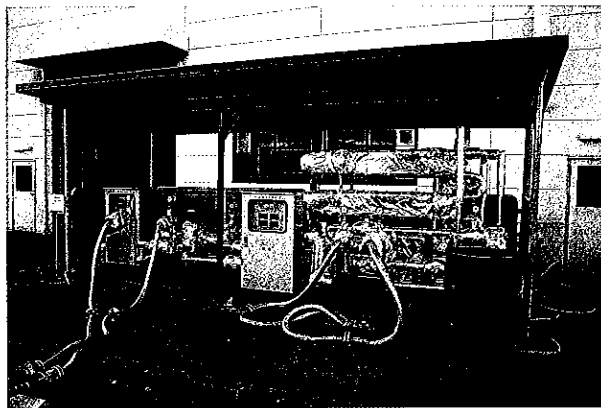


写真4 蓄熱ユニット（左）と放熱ユニット

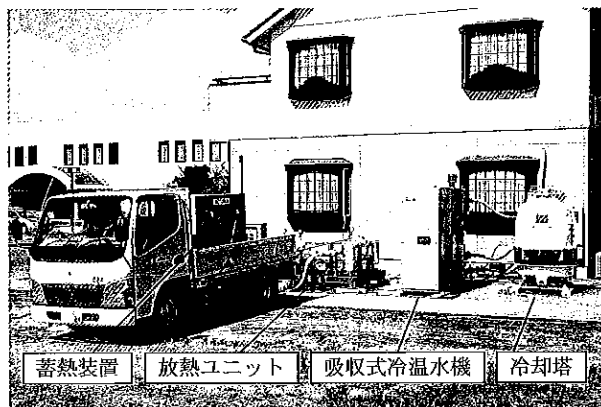


写真5 冷熱転換試験装置の外観

装置内に伝熱管などが無いことから、蓄熱材の充填効率に優れ、また、熱媒油と蓄熱材の接触面積が大きく伝熱効率がよいことから、コンパクトな蓄熱装置を実現できる。

2. 公道輸送実験³⁾

熱輸送システム技術の実証のため、実験用の小型蓄熱装置（総重量約1トン、蓄熱材：400kg）を製作し、（株）神戸製鋼所の神戸総合技術研究所（神戸市西区）から、当社の技術研究所（同）までの約5

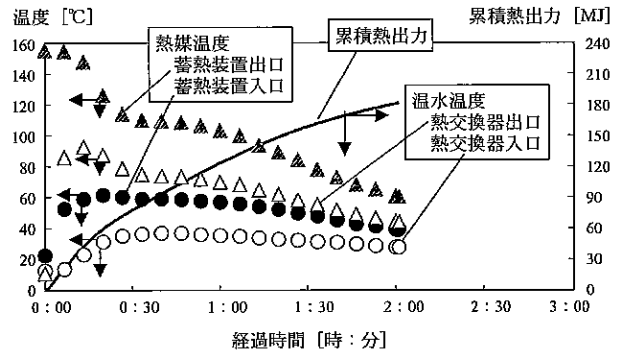


図6 公道輸送実験における温水生成状況

kmの間で、蓄熱したコンテナを公道輸送する試験をおこなった。本試験に使用した蓄熱装置を写真3に、また、蓄熱装置への熱供給をおこなう蓄熱ユニット、ならびに蓄熱装置からの熱の取り出し温水を加温する放熱ユニットを、写真4に示す。

放熱時における蓄熱装置の入口・出口の熱媒温度、ならびに、熱交換器を介して熱交換した温水の温度を図6に示す。本図より、蓄熱装置に蓄えられた熱を90℃温水として回収できていることがわかる。

3. 冷熱転換実験⁴⁾

前項で紹介した蓄熱装置と、吸収式冷温水機システム（本体：矢崎総業製 WFC-SCB77型、定格冷房出力25kW、クーリングタワー：冷却能力60.7kW、室内機：定格出力5kW）とを組み合わせ、冷熱転換実験をおこなった。

本実験装置においては、放熱ユニットで熱回収した温水を、配管を通して吸収式冷温水機との間で一定流量で循環し、吸収サイクルの再生用熱源として使用した。吸収冷房サイクルによって冷却された冷水は、30m²の屋内に設置された室内機に一定流量で供給され、冷風を発生させた後に冷温水機本体に戻る。実験装置の外観を、写真5に示す。

実験時の温度トレンドを図7に示す。試験開始後約20分間は、LPGを使用し吸収式冷温水機を起動した。その後、LPGを停止し、蓄熱カセットからの熱供給により吸収式冷温水機を駆動した。蓄熱装置出口の熱媒温度を見ると、試験開始当初は徐々に温度が降下するが、エリスリトールの融点よりもやや低い温度でほぼ一定となる期間が約1.5時間続き、その後再び下降に転じていることがわかる。これは、温度一定の期間は、主にエリスリトールの融解熱に相当する熱量を取り出していることを示している。実験全体を通じて、吸収式冷温水機の温水入口温度は安定しており、約7℃の冷水を定常的に供給できていることがわかる。

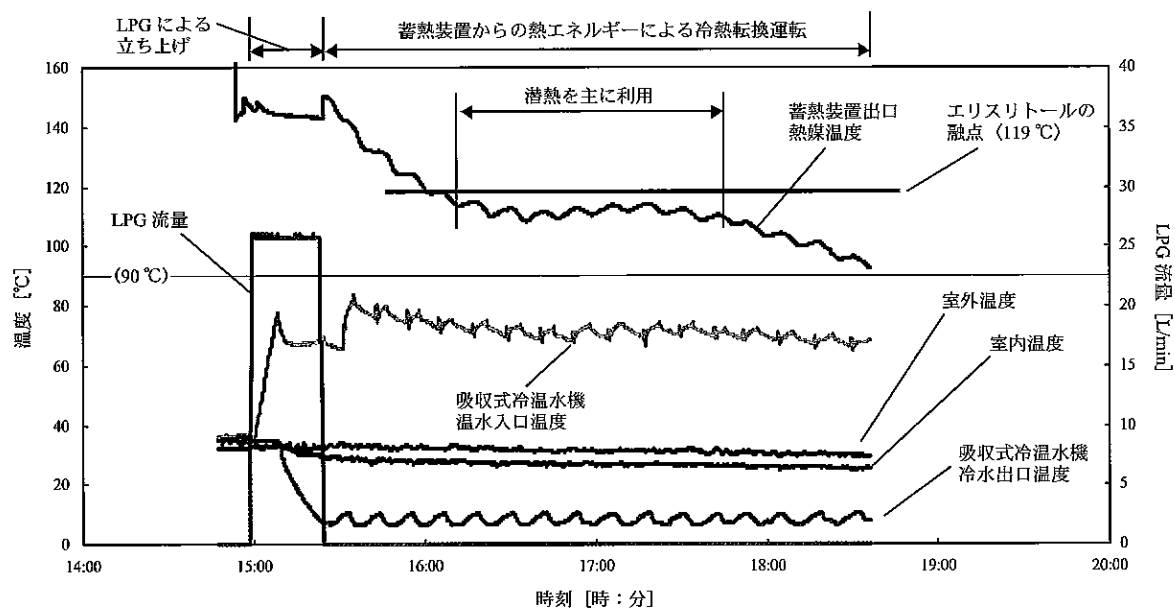


図7 冷熱転換実験の運転状況

むすび

蓄熱材としてエリスリトールを使用し、熱交換方式に直接接触式を採用した熱輸送システムを開発した。本方式による蓄熱装置（総重量：約1トン、蓄熱材：400kg）を製作し、熱を蓄えた蓄熱装置を公道輸送する試験をおこない、90℃以上の温水を採取することができることを示した。また、吸収式冷温水機との組み合わせにより、蓄熱装置に蓄えられた熱をエネルギー源として、冷熱を発生する冷熱転換試験に成功した。

本研究は、2005年度から2006年度まで、NEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）との

共同研究テーマ：「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発／バイオマスエネルギー転換要素技術開発」に採択された。今後は実用化に向けた開発を推進してゆく所存である。

【参考文献】

- 1) NEDO 平成9年度調査報告書 NEDO-NP-9734 (1998)
- 2) たとえば、特開平11-44494など。
- 3) 高橋和雄ほか、第15回 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, p.207-209, 2005年7月
- 4) 高橋和雄ほか、日本機械学会熱工学コンファレンス 2005講演論文集, p.297-298, 2005年11月

蓄熱式燃焼脱臭装置の設計最適化

Design Optimization of Regenerative Thermal Oxidizer



技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室
青 木 勇
Isamu Aoki
田 頭 成 能
Shigeyoshi Tagashira

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
機械研究所流熱技術研究室
多 田 俊 哉
Toshiya Tada

工場等から排出される揮発性有機化合物（以下、VOC（volatile organic compounds））の処理方法として、蓄熱式燃焼脱臭装置（以下、RTO（Regenerative Thermal Oxidizer））が注目されている。RTOは安定した高いVOC分解率（99％以上）にくわえ、ほかの脱臭技術では不可能な高い熱回収率（95％以上）が可能であり、経済面および環境面で優れたVOC処理装置であるといえる。燃焼の数値シミュレーションにより、RTOの燃焼室内の燃焼性能を最適化することで、コンパクトで燃焼効率に優れたRTOを実現することができる。

Regenerative Thermal Oxidizer (hereinafter RTO) is noticed as the method to treat volatile organic compounds (hereinafter VOC) exhausted from factories. The advantages of RTO are steady high VOC removal efficiency (more than 99 %) and high heat recovery efficiency (more than 95 %). Therefore RTO is superior to other VOC treatment equipment from economical and environmental viewpoints. Through the optimization of combustion performance in RTO combustion chamber employing combustion simulation technology, the optimized RTO design, which can achieve high removal efficiency with compact body is obtained.

Key Words :

燃 焼	Combustion
蓄熱式燃焼脱臭装置	Regenerative thermal oxidizer (RTO)
揮発性有機化合物	Volatile organic compounds (VOC)
脱 臭	Deodorization

ま え が き

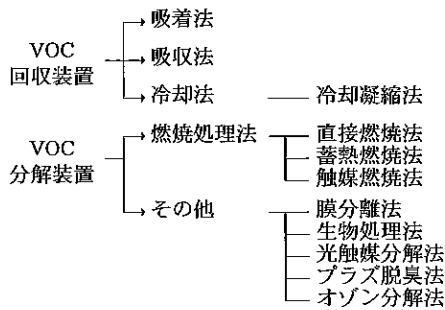
揮発性有機化合物（VOC）は浮遊粒子状物質（SPM）や光化学オキシダントの生成の原因となる物質（前駆物質）の一つであり、現在の我が国全体のVOC排出量の9割が工場等の固定発生源からのものである。

SPMおよび光化学オキシダント対策の一環として、VOCの排出を抑制するため、大気汚染防止法が改正（2004年5月26日）された。これを受けて、

2006年4月1日からVOCの排出規制が開始される。

VOC処理装置は回収装置と分解装置に大別される。このなかで、直接燃焼法は750～800℃でVOC成分を酸化分解するもので、幅広い悪臭ガスに対して高効率に安定して処理が可能である。触媒燃焼法は300～350℃の低温燃焼にて処理が可能のために燃料消費量を大幅に低減できるが、粉じんやミストなどの触媒被毒成分を含むガスの処理には適していない。蓄熱燃焼法は直接燃焼法の一つで、排熱を高

効率に回収し、燃料消費量を大幅に低減できることから燃焼処理法の中で主力機種となっている。



蓄熱式燃焼脱臭装置（RTO）は排熱を回収して再利用するための蓄熱室と VOC 成分等を酸化分解する燃焼室を有する。VOC 成分等の分解率の性能には燃焼室内の燃焼効率が大きく影響する。燃焼室の形状の最適化により、燃焼室を小型化、燃焼効率の良い形状に設計することで、外表面積を減らして放熱量を低減でき、さらに燃料消費量を最小化できる、かつ設備費の低減にもつながり、RTO のメリットを最大限に引き出した省エネルギーな RTO を実現できる。

そこで本報では、RTO の燃焼室内の燃焼シミュレーションをおこない、燃焼室の形状について燃焼

性能を評価した結果の一例について報告する。

1. 蓄熱式燃焼脱臭装置（RTO）の概要

RTO は800℃以上の高温下で VOC 成分等を酸化分解するもので、セラミック製の蓄熱材（写真1）を使用することでその排熱を95%以上の高効率で熱回収できることを最大の特長とする。表1にはほかの燃焼処理法との比較を示す。

RTO は蓄熱材を充填した蓄熱層、VOC 成分等を酸化分解するための燃焼室、燃焼室内に熱源であるバーナ、ガスの流れパターンを周期的に切り替えるためのバルブ、動力系の送風機から構成される。バルブの方式により塔式と回転式に分かれる。図1に3塔式 RTO、図2に回転式 RTO の概念図を示す。

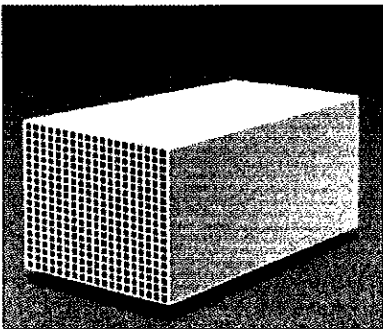


写真1 蓄熱材「ハニカムセラミック」

表1 燃焼処理法の比較

	直接燃焼法	蓄熱燃焼法	触媒燃焼法
長所	・ 雑多な成分を含むガスに対しても適用可能で、処理効率が安定している。 ・ 設置面積が小さい。 ・ 設備費が安い。	・ 燃料費が最も安い。 ・ 低濃度で自燃する。(燃料ゼロ) ・ NOx の発生量が小さい。 ・ 蓄熱材の寿命は半永久的。	・ 触媒により低温（200～350℃）での処理が可能。 ・ 直接燃焼法より燃料費が安い。
短所	・ 燃料費が高い。 ・ NOx の発生量が多い。	・ 直接燃焼法より設置面積が大きく、設備費が高い。 ・ 付着成分等に対して、除去などの前処理が必要。	・ 設備費が最も高い。 ・ 触媒被毒成分の影響などを受けやすく、適用可能なガスの制約が大きい。

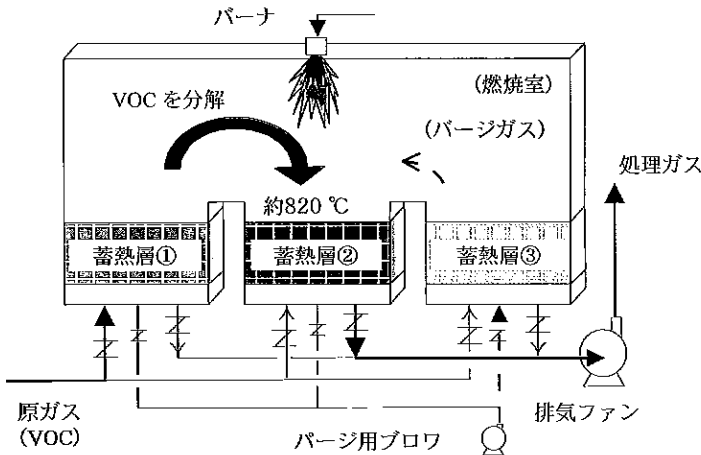


図1 3塔式 RTO

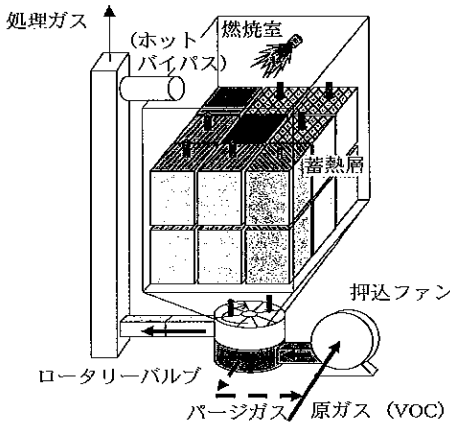


図2 回転式 RTO

塔式 RTO は各蓄熱層の下にある入側バルブと出側バルブを周期的に開閉することでガスの流れパターンを規則的に切り替える方式である。回転式 RTO はロータリーバルブが回転することでガスの流れパターンを連続的に切り替える方式である。VOC 成分等の分解や熱回収の原理は塔式 RTO，回転式 RTO と同じである（図 3）。

VOC 成分等を含む原ガスは入側の蓄熱層を通過する間に蓄熱材と熱交換をおこない、800℃前後まで加熱されて燃焼室に入る。燃焼室で VOC 成分等が分解された後のガスは出側の蓄熱層を通過する間に蓄熱材と熱交換する。そのとき、蓄熱材は加熱され、ガスは冷却される。蓄熱材にハニカムセラミックを使用し、ガスの入側、出側の蓄熱層を規則的に切り替えることにより、排熱を高効率に回収（熱回収率 95 % 以上）して利用することで、燃料使用量を大幅に削減できる。

ここで熱回収率は次式により定義するものである。たとえば、熱回収率 95 % とは、RTO 入口のガス温度が 25℃ の場合、燃焼室で 820℃，RTO 出口のガス温度は 65℃ である。さらに、入口ガス中の可燃成分の濃度が高い場合（トルエン換算でおおむね

400 ppm 以上）であれば、自然できるために、設備の温度が定常となった後は補助燃料は不要となる。

$$\eta = (T_c - T_{out}) / (T_c - T_{in}) \times 100$$

η : 熱回収率 [%]

T_c : 燃焼室温度 [℃]

T_{in} : 入口ガス温度 [℃]

T_{out} : 出口ガス温度 [℃]

入側の蓄熱層を通った原ガスは燃焼室にほぼ均一に入る。トルエンなど、入側の蓄熱層を通過する途中の温度で燃焼を開始し、燃焼室ではほぼ完全に分解され、VOC 分解率 98～99.5 % 以上が可能である。しかし、もし、燃焼室での燃焼効率が悪ければ、VOC 分解率を確保するために燃焼室を大型化して燃焼室での滞留時間を長く確保する必要が生じる。その結果、燃焼室の大型化により外皮の表面積が大きくなるため放熱量が増加し、燃焼効率がさらに悪化するという悪循環に陥る。

RTO の最大の特長である高い熱回収率を最大限に活かすためには、小型で燃焼効率の良い、燃焼室の形状の最適化が重要である。その結果、設備の小型化と燃料消費量の低減を実現できる。

2. 燃焼室の内部構造の検討

2.1 計算条件

3 塔式 RTO の燃焼室の外形を固定し、燃焼室の内部構造による燃焼性能について評価した。ここでは、燃焼室内に 4 枚×2 列の菱形の乱流板を配置した形状 1（図 4），燃焼室の下部にバッフル板を設けた形状 2（図 5），燃焼室内に縦スリットを設けた形状 3（図 6）について燃焼シミュレーションをおこなった結果について紹介する。燃焼計算には汎用ソフト「Fluent」を使用した。燃焼室の燃焼性能を評価するため、各種の VOC を取りあつかう代わりに、CO の燃焼シミュレーションをおこなった。

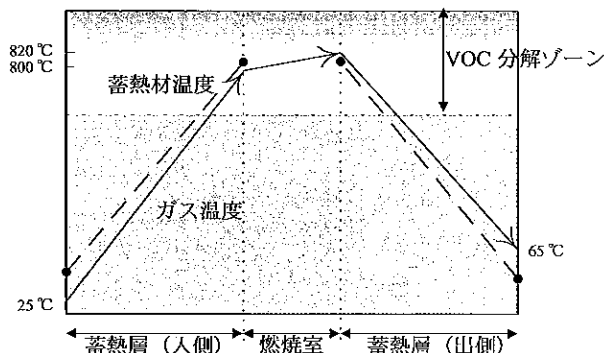


図 3 RTO の熱回収の原理（熱吸収率 95 % の場合）

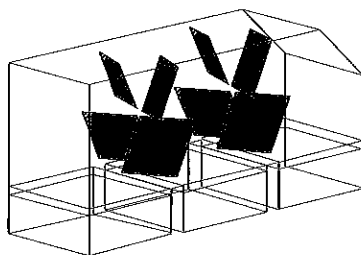


図 4 形状 1（乱流板）

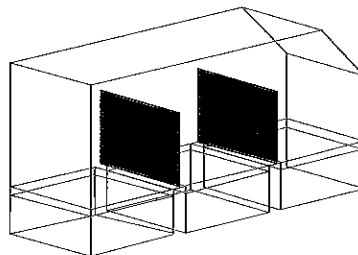


図 5 形状 2（下部バッフル板）

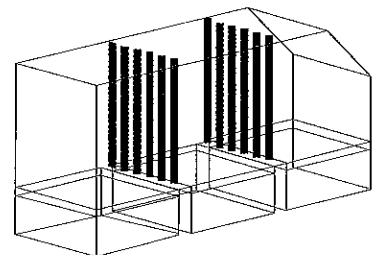


図 6 形状 3（縦スリット）

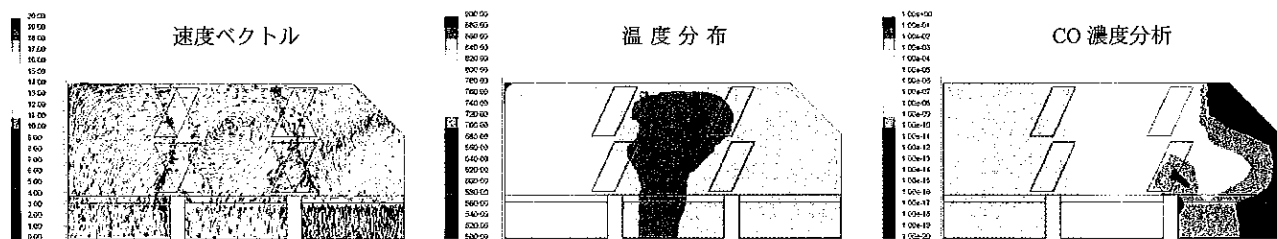


図 7 形状 1 (乱流板)

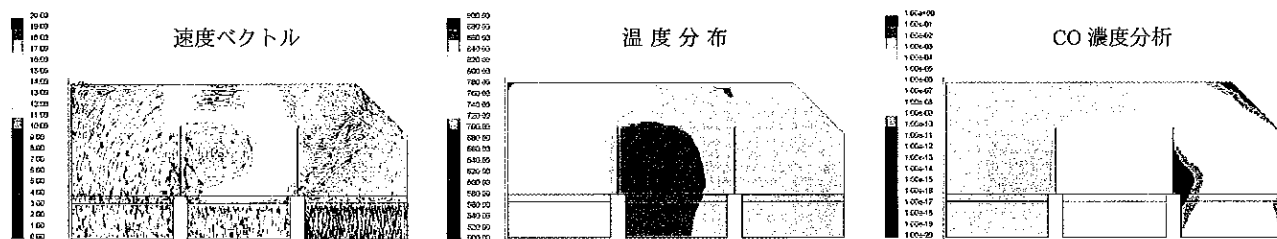


図 8 形状 2 (下部バッフル板)

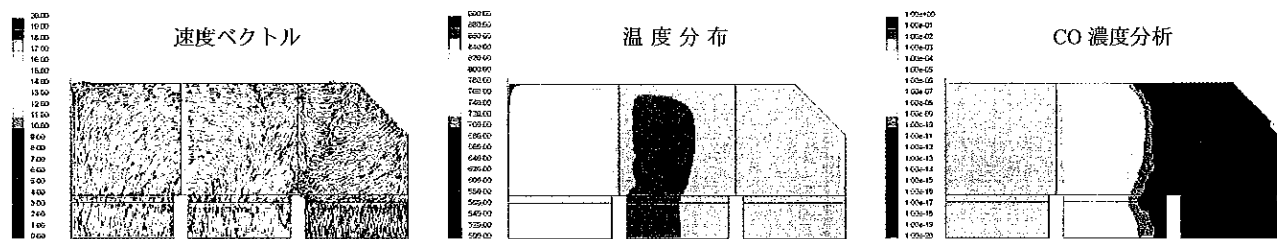


図 9 形状 3 (縦スリット)

表 2 燃焼室の圧力損失

	形状 1 (乱流板)	形状 2 (下部バッフル板)	形状 3 (縦スリット)
流れパターン 1 (入側) 蓄熱層左 → (出側) 蓄熱層中央	24.4 Pa	55.2 Pa	46.1 Pa
流れパターン 2 (入側) 蓄熱層中央 → (出側) 蓄熱層右	15.8 Pa	35.1 Pa	33.3 Pa
流れパターン 3 (入側) 蓄熱層右 → (出側) 蓄熱層左	30.1 Pa	21.7 Pa	73.0 Pa

2.2 計算結果

計算結果について、図 7～9 に各形状の流速分布、温度分布、CO 濃度分布を示し、表 2 に燃焼室の圧力損失を示す。図 7～9 では、左の蓄熱層がガス入側、中央の蓄熱層がガス出側という流れパターン 1 の場合の計算結果を紹介する。

形状 1 ではガスが乱流板を通過した裏側で 3 次元の渦を形成し、非常に攪拌性に優れている。燃焼室中央のやや上でよく燃焼し、ここに高温域が存在する。形状 1 は攪拌性が良い上、圧力損失が小さい。

形状 2 では下部バッフルの裏側で縦に大きな 2 次

元の渦を形成し、中央の蓄熱層（ガス出側）に入るとき濃度分布が均一である。形状 1 に比べて圧力損失は大きいですが、構造がシンプルであり、設備費を安価とできる。形状 3 では縦スリットの裏で水平に小さな 2 次元の渦を形成し、燃焼性が良い。縦スリットを 2 回通過する流れパターン 3（入側－右の蓄熱層、出側－左の蓄熱層）の場合に圧力損失が大きくなる。

こうした知見を活用して、燃焼室の内部構造について燃焼効率の良い最適な形状を設計できる。

3. 燃焼室の形状の検討

3.1 計算条件

ここでは燃焼室の容積を固定し、燃焼室の外形の縦横比を変化させた形状について燃焼性能を評価した結果について紹介する。形状4 (図10) に対して奥行きの幅を小さく、横幅を大きく変形したものが形状5 (図11)、逆に奥行きの幅を大きく、横幅を小さく変形したものが形状6 (図12) である。

3.2 計算結果

形状5では下部バッフル板の裏側に形成された大きな渦の下端が中央の蓄熱層 (ガス出側) の上面に到達している。そのため、燃焼の不十分なガスの一部が中央の蓄熱層 (ガス出側) に入る結果となっている。この形状で高い燃焼率を確保するためには、燃焼室の外形を大きくするか、ガス流れの攪拌を促す構造物を燃焼室内に追加する必要がある。また、

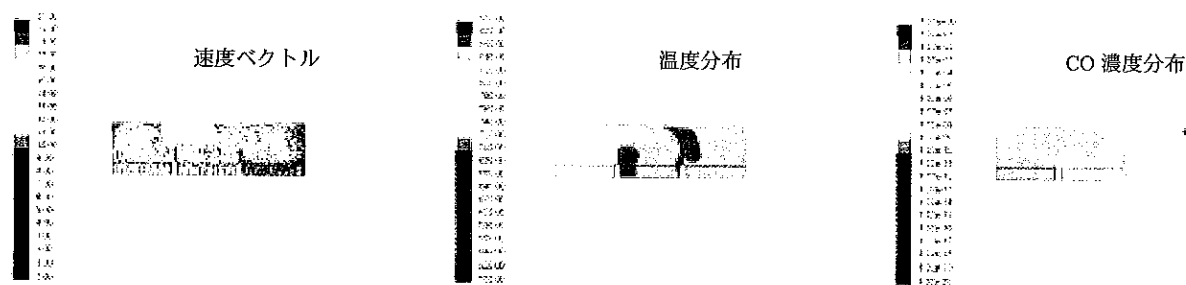


図10 形状4

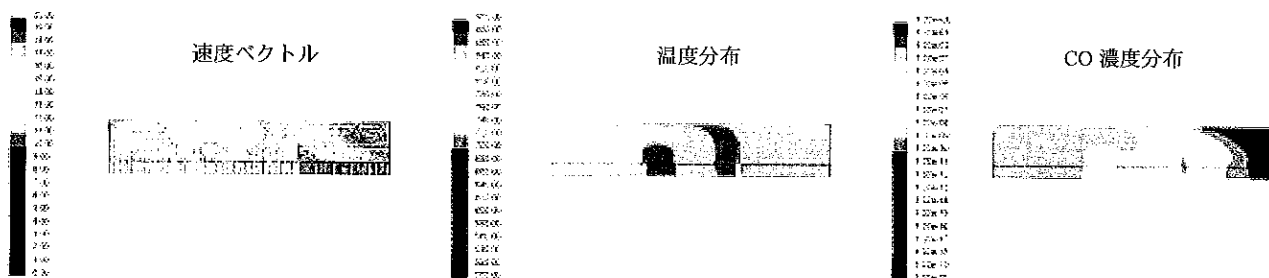


図11 形状5

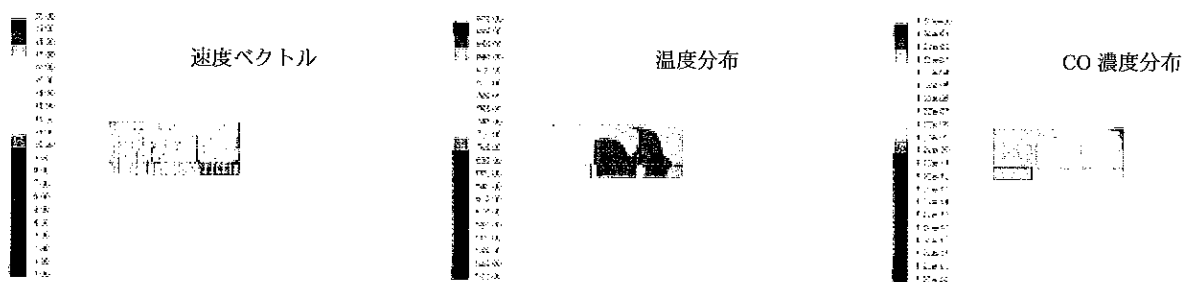


図12 形状6

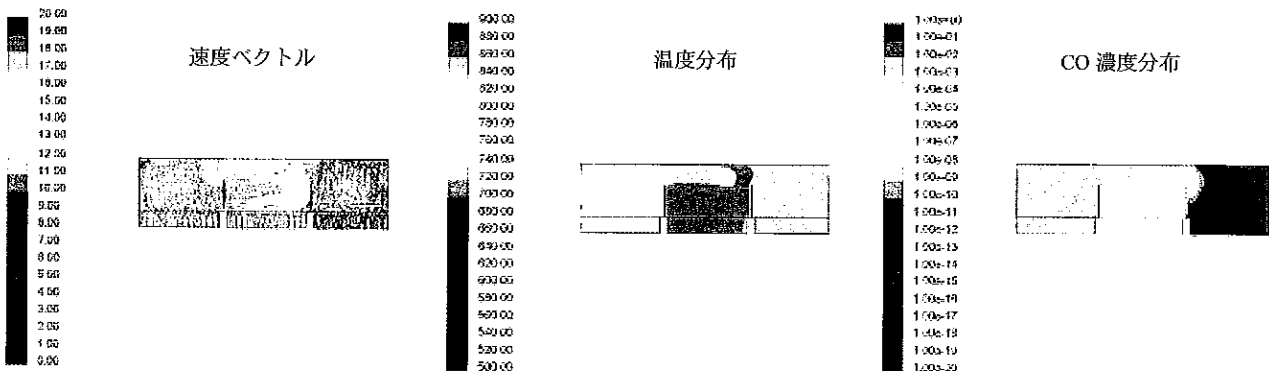


図13 形状7

形状6では、奥行きの幅が大きいため、奥行き方向の濃度分布に注意が必要である。

こうした知見を活用して、設備の設置スペースに応じた最適な燃焼室の形状を設計できる。

4. スケールアップの検討

4.1 計算条件

ここでは3塔式RTOのスケールアップについて検証した一例について紹介する。形状2（下部バッフル板）に対し、約3倍にスケールアップしたケースの形状7（図13）について紹介する。燃焼室形状の最適化を図り、CO燃焼の数値解析をおこなって評価した。

4.2 計算結果

下部バッフル板の裏側に大きな渦をうまく形成することで、中央の蓄熱層（ガス出側）に入る面において、温度とCO濃度の分布が均一となっていることがわかる。数値解析による燃焼性能の評価は、燃

焼室の形状の最適化に非常に有効である。

むすび

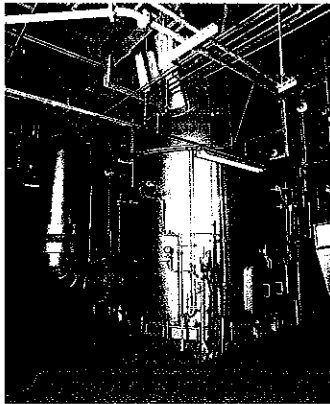
RTOは安定した高いVOC分解率（99％以上）と高い熱回収率（95％以上）が可能で、経済面および環境面で優れたVOC処理技術として非常に有効である。本報では、燃焼シミュレーションによりRTOの燃焼室内の燃焼性能を評価することで、燃焼室の形状や内部構造の最適化を図った。その結果、処理風量や設置スペースに応じて、燃焼室の最適設計を与えることができ、RTOの小型化と燃料消費量の低減が実現可能となった。

[参考文献]

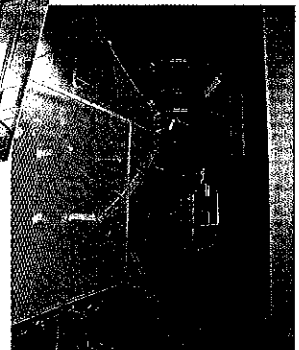
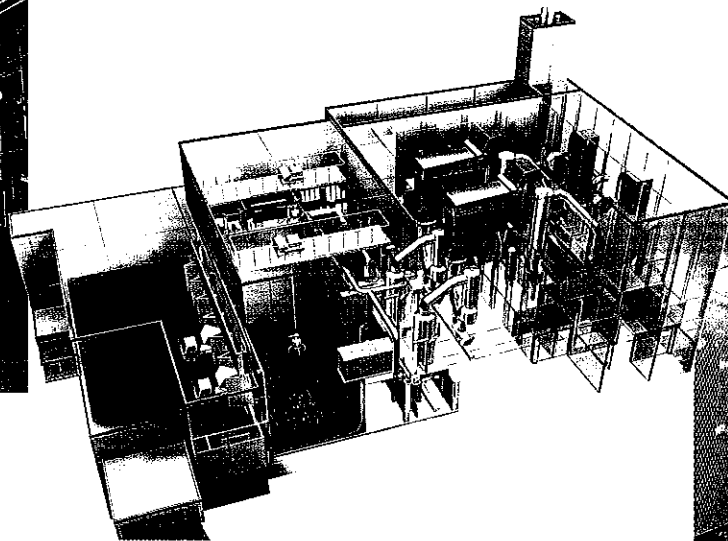
- 1) 道場研二：「蓄熱式燃焼脱臭装置 RTO」, 神鋼パンテック技報 Vol.46 No.1 (2002/8), pp.73-78
- 2) 金田芳典：「蓄熱式燃焼脱臭装置 (RTO)」, ECO INDUSTRY Vol.10 No.1 (2005), pp.42-48

確かな実績でごみ処理技術の標準機へ 「流動床式ガス化溶融システム」

流動床式ガス化溶融システムは、当社が長年培った廃棄物処理技術をベースに、独自に開発した廃棄物処理システムです。有害物質の排出を限界まで抑制し、熱や資源のリサイクル性に優れ、循環型社会構築に応える先進技術です。2000年10月に国内初の実用機を立ち上げて以来、現在全国で5施設が順調に稼動中、また、新たに2施設が建設中です。



ガス化炉外観



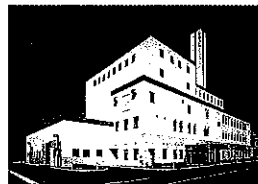
溶融炉外観



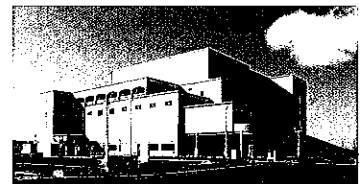
▲青森県
中部上北広域事業組合殿
(処理量 60 t/日)



▲広島県
安芸地区衛生施設管理組合殿
(処理量 130 t/日)



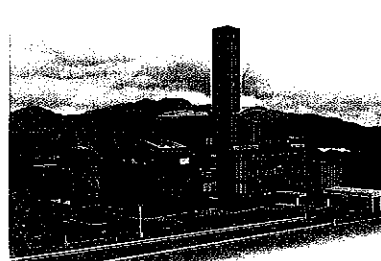
▲秋田県
鹿角広域行政組合殿
(処理量 60 t/日)



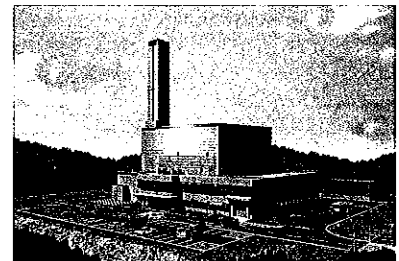
▲宮城県
石巻地区広域行政事務組合殿
(処理量 230 t/日)



▲岐阜県
中津川・恵北環境施設組合殿
(処理量 98 t/日)



▲福岡県
大野・勝山地区広域行政事務組合殿
(処理量 84 t/日)



▲北海道
根室北部廃棄物処理広域連合殿
(処理量 62 t/日)