

# 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

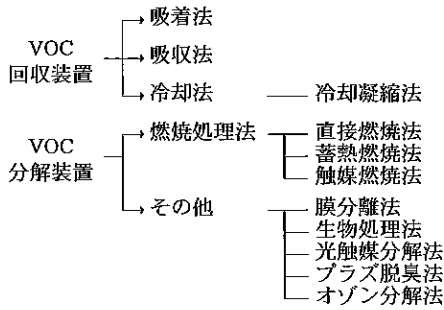
揮発性有機化合物（VOC）は浮遊粒子状物質（SPM）や光化学オキシダントの生成の原因となる物質（前駆物質）の一つであり、現在の我が国全体のVOC排出量の9割が工場等の固定発生源からのものである。

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。

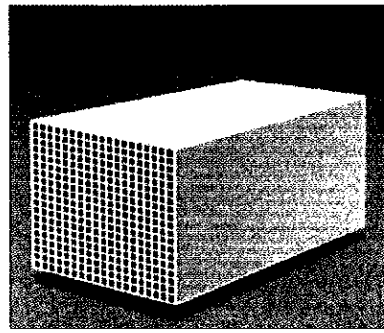


写真1 蓄熱材「ハニカムセラミック」

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。</li> <li>・ 設置面積が小さい。</li> <li>・ 設備費が安い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料費が最も安い。</li> <li>・ 低濃度で自燃する。(燃料ゼロ)</li> <li>・ NOx の発生量が小さい。</li> <li>・ 蓄熱材の寿命は半永久的。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 触媒により低温 (200~350℃) での処理が可能。</li> <li>・ 直接燃焼法より燃料費が安い。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料費が高い。</li> <li>・ NOx の発生量が多い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 直接燃焼法より設置面積が大きく、設備費が高い。</li> <li>・ 付着成分等に対して、除去などの前処理が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設備費が最も高い。</li> <li>・ 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。</li> </ul>

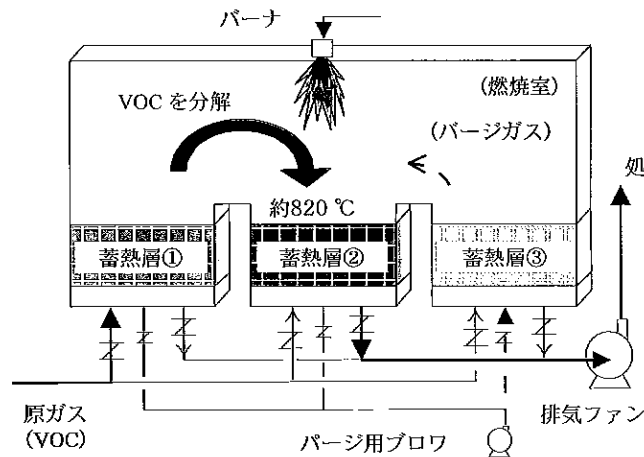


図1 3塔式 RTO

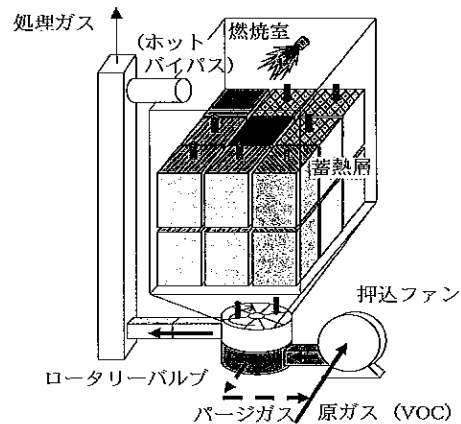


図2 回転式 RTO

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 とも同じである (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。

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

$\eta$  : 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。

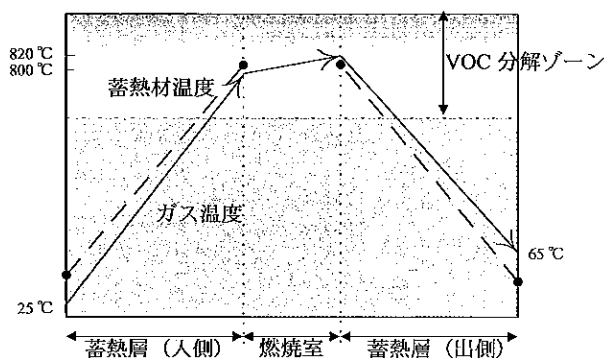


図 3 RTO の熱回収の原理 (熱回収率 95% の場合)

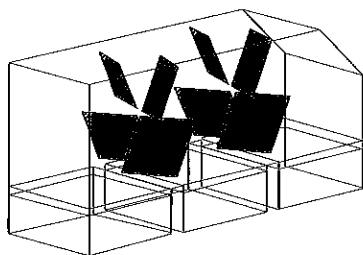


図 4 形状 1 (乱流板)

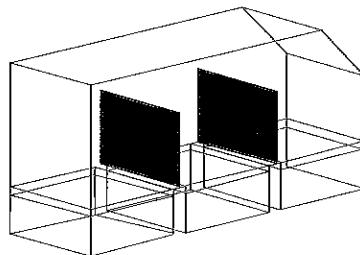


図 5 形状 2 (下部バッフル板)

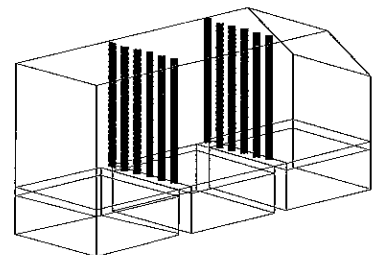


図 6 形状 3 (縦スリット)

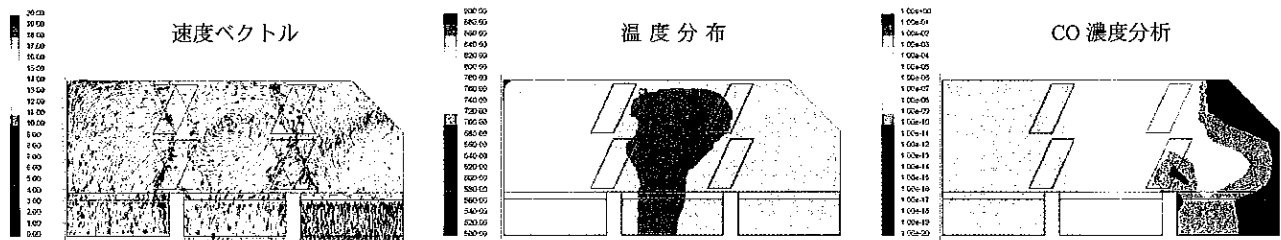


図7 形状1 (乱流板)

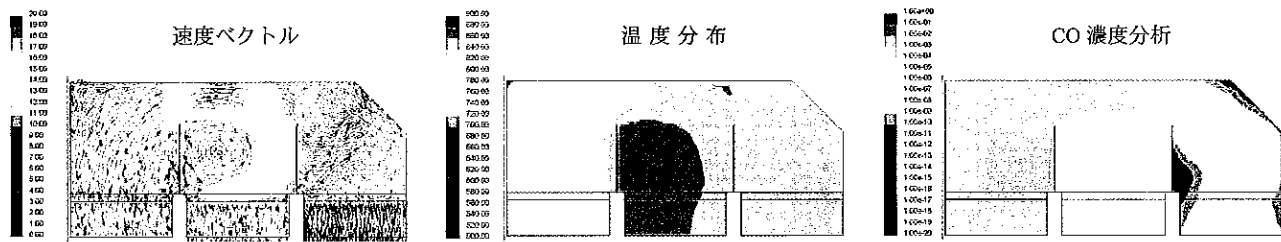


図8 形状2 (下部バッフル板)

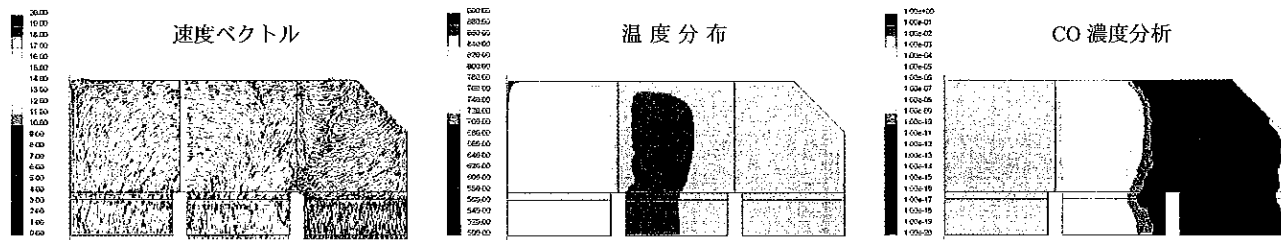


図9 形状3 (縦スリット)

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）に入るときに濃度分布が均一である。形状1にくら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、

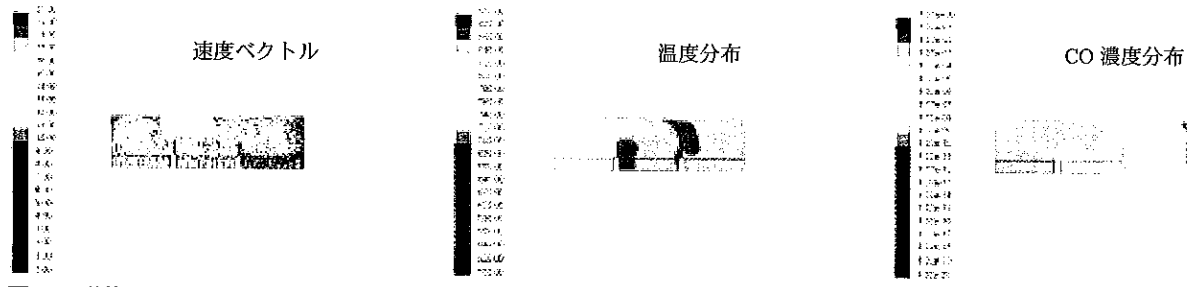


図10 形状4

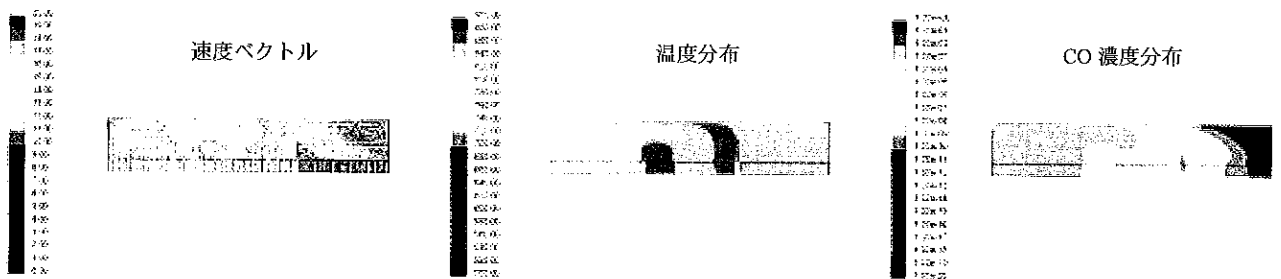


図11 形状5

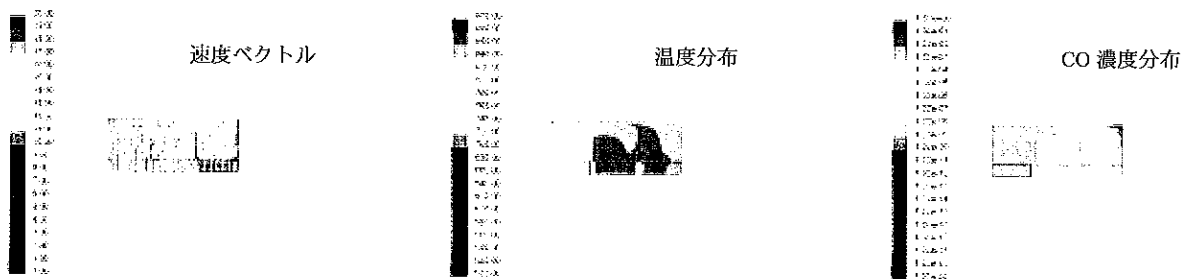


図12 形状6

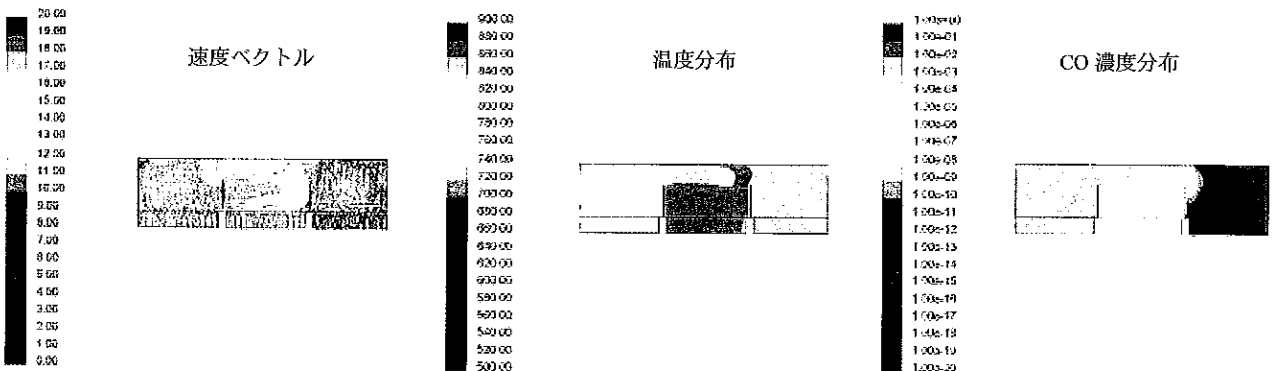


図13 形状7

形状6では、奥行きが大きいいため、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（下部バツフル板）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

下部バツ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