

# 神戸市東部スラッジセンター： 気泡式高効率二段燃焼炉の稼働実績と導入効果

## Operation Results and Introduction Effects of Advanced Bubbling-fluidized-bed Two-stage Incinerator at Kobe City Tobu Sludge Center



迫田健吾\*  
Kengo Sakoda



松永敏朗\*  
Toshio Matsunaga



吉田成希\*  
Shigeki Yoshida

当社は、温室効果ガス低減と省エネルギーを両立させながら、安定操業ができる次世代型汚泥焼却炉として気泡式高効率二段燃焼炉を開発し、神戸市東部スラッジセンターの更新炉として導入、2010年9月（2系炉は2012年7月）より操業開始している。本炉の導入を含め全体システムの改善により、既設炉に対し温室効果ガス（ $N_2O$  および  $CO_2$ ）の排出量低減、および省エネルギーを実現し、環境負荷を低減した設備として安定操業を継続している。

ここでは気泡式高効率二段燃焼炉の稼働実績と導入効果について紹介する。

Kobelco Eco-Solutions has developed Advanced Bubbling-fluidized-bed Two-stage Incinerator (ABTI) which enables both reduction of greenhouse gases and energy saving. We introduced it to Kobe City Tobu Sludge Center upon renewal of the incineration facilities and started operation in September, 2010 (First line) and July, 2012 (Second line). Improving total sludge incineration system as well as introducing ABTI resulted in reduction of greenhouse gases ( $N_2O$ ,  $CO_2$ ) and energy saving against the previous system. The renewed facilities have been successfully operating as environmental load-reducing facilities.

This paper reports the operation results and introduction effects of ABTI.

### Key Words :

下水汚泥	Sewage sludge
流動床式焼却炉	Bubbling-fluidized-bed incinerator
二段燃焼	Two-stage combustion
省エネルギー	Energy saving
温室効果ガス	Greenhouse gas
一酸化二窒素 ( $N_2O$ )	Nitrous oxide

### 【セールスポイント】

- ・熱分解ゾーンでの抑制燃焼、および完全燃焼ゾーンでの高温燃焼（二段燃焼）により、温室効果ガス（ $N_2O$ ）の発生量を低減できる。
- ・投入される下水汚泥自体のエネルギーを最大限に利用し、完全燃焼ゾーンを局部的に高温化することで、燃料を増やすことなく温室効果ガス（ $N_2O$ ）の排出量を低減できる。
- ・流動床部の空気分散板を多数最適に配列し、少ない流動砂にて熱分解ゾーンの燃焼効率を向上させることで、流動ブロワ、誘引ファンなどの電力を低減し、省エネルギーな設備にできる。

## まえがき

神戸市東部スラッジセンターの既設気泡炉の更新工事において、新設炉として気泡式高効率二段燃焼炉を導入した。従来の気泡炉の形状・燃焼状況を見直し、焼却処理を効率化した技術である。本炉の導入を含め、全体システムの改善により、設備全体の年間CO<sub>2</sub>排出量（補助燃料+消費電力）を既設炉（実績最大値）より約33%低減する計画となっている。

本工事は、1986年に供用開始した既設炉の老朽化に伴い実施された更新工事であり、既設炉を操業しながら、まず既設3炉のうちの既設1系炉を撤去してから新設1系炉を建設・納入し、次に既設3系炉を撤去してから新設2系炉を建設・納入、最後に既設2系炉を撤去するという内容である。既設炉および新設炉にて汚泥焼却処理を継続しながら、既設機器や配管、電気設備の撤去工事を行い、大きなトラブルもなく更新工事を終了した。新設炉が操業を開始してから3年以上経過しており、安定した運転操業を達成している。以下に新設炉の稼働実績と導入効果について紹介する。

## 1. 設備概要

### 1.1 処理プロセス

本焼却設備の概要を表1に、処理フローを図1に示す。当処理プロセスは、熱回収設備に廃熱ボイラを設置し、その蒸気を用いて乾燥機により下水汚泥を乾燥することで燃料消費量を抑えるシステムである。さらに焼却炉に従来の気泡炉に用いていた二段燃焼を改良した気泡式高効率二段燃焼炉を採用することで、温室効果ガス低減とランニングコスト低減

の両立が可能である安定的な設備となるように設計している。以下に各設備の特徴と既設焼却設備からの改良項目について紹介する。

#### 1.1.1 汚泥供給設備

脱水ケーキ（下水汚泥）を市内各下水処理場から有蓋ダンプカーで当処理場に運び、トラックスケールで計量した後、投入ステージから脱水ケーキピットに投入し、貯留する。

投入クレーンで脱水ケーキ供給装置に投入した後、乾燥機、焼却炉へそれぞれコンベヤに乗せ、定量供給する。

乾燥機に運ばれた脱水ケーキを、排ガスの廃熱にて生成した蒸気により間接乾燥させた後、乾燥ケーキ供給装置から焼却炉投入コンベヤに供給する。

#### 1.1.2 焼却設備

焼却炉投入コンベヤで運ばれる脱水ケーキ（直送汚泥と乾燥汚泥）を、ケーキ混合機で均質に混合した後、炉頂部からケーキ投入機、ケーキ分散機により定量的に分散供給する。

焼却炉に投入した脱水ケーキは、炉下部より供給される燃焼空気および珪砂により熱分解した後、フリーボード部にて二次空気を吹込み、850℃以上で焼却処理を行う。

#### 1.1.3 排ガス設備

焼却後の排ガスは、空気予熱器、廃熱ボイラで廃熱回収した後、セラミックフィルタにて焼却灰を取り除き、排煙処理塔で脱硫・冷却することで無害化・減湿化され、誘引ファンによって煙突から排出する。焼却灰は各種灰コンベヤを経て、灰ホッパに貯留し、加湿後にダンプカーで埋立処分場に輸送する。

表1 設備概要

処 理 量	200 t-wet/（日・系列） ・乾燥能力（水分蒸発量）：50 t/（日・系列） ・焼却処理能力：150 t-wet/（日・系列）
処 理 系 列	2 系列
処 理 方 式	間接加熱式乾燥機+気泡式高効率二段燃焼炉
熱回収設備	熱交換器+廃熱ボイラ
排ガス処理設備	ろ過式集塵（セラミックフィルタ）+洗煙処理
排ガス規制値 （O <sub>2</sub> 12%換算値）	ばいじん：30 mg/Nm <sup>3</sup> 以下 硫黄酸化物：20 ppm以下 窒素酸化物：100 ppm以下 塩化水素：30 mg/Nm <sup>3</sup> 以下 ダイオキシン：0.1 ng-TEQ/Nm <sup>3</sup> 以下
操業開始日	1系炉：2010年9月1日 2系炉：2012年7月1日



有効利用する焼却灰は、灰サイロに貯留し、専用車で搬出する。

## 1.2 既設焼却設備からの改善項目

省エネルギーを考慮して、既設焼却設備から次に示す改善を行った。

- ① 排ガス熱回収フローの見直しを行い、熱交換器と廃熱ボイラの順番を入れ替え、焼却炉直後に熱交換器を配置することによって、流動空気温度の高温化（既設：300℃→新設：540℃）を図った。さらに、廃熱ボイラの特性を生かし、より低温域（既設：300℃→新設：250℃）まで熱回収を行い、廃熱の有効利用を行った。
- ② 乾燥機および白煙防止予熱器に用いた蒸気のドレンは高圧復水タンクに全量回収するフローとし、回収したドレンを高温（既設：30℃→新設：140℃）のまま廃熱ボイラへ給水することにより、熱利用効率の改善を図った。
- ③ 焼却炉に既設気泡炉の二段燃焼システムを改良した気泡式高効率二段燃焼炉を採用した。（詳細は1.3にて説明）
- ④ 焼却炉へのケーキ投入部にケーキ混合機を設置し、直送汚泥と乾燥汚泥を混合することにより、乾燥汚泥の分離やショートパスを防止し、完全燃焼を図った。
- ⑤ 流動ブロワ、誘引ファン、白煙防止ファン、

排煙処理塔冷却水ポンプ、空気圧縮機の大容量電動機はインバータ方式を採用し、消費電力低減を図った。

## 1.3 気泡式高効率二段燃焼炉の概要（図2参照）

当社は、東部スラッジセンターの既設炉において、すでに二段燃焼システムを採用していたが、今回採用した気泡式高効率二段燃焼炉（写真1）は、従来の二段燃焼システムを改良し、下水汚泥の持っているエネルギーをより効率的に有効利用できるように開発した気泡式流動炉である。以下に改良項目を示す。

- ① 空気分散板ノズル形状・配列の最適化
- ② 炉形状の最適化
- ③ 二次空気吹込み方法の最適化

①～③の項目をパラメータとし、数値シミュレーションで各パラメータの最適化を行った焼却炉が、今回新設炉として採用した気泡式高効率二段燃焼炉である。

①および②の改良により、気泡炉の形状と燃焼状況が最適化され、熱分解ゾーン（流動床部）における燃焼効率の向上に繋がり、③の改良により、完全燃焼ゾーン（フリーボード部）における攪拌が促進されることで排ガスを局所高温状況下で完全燃焼することが可能となった。効果については、次に紹介する。

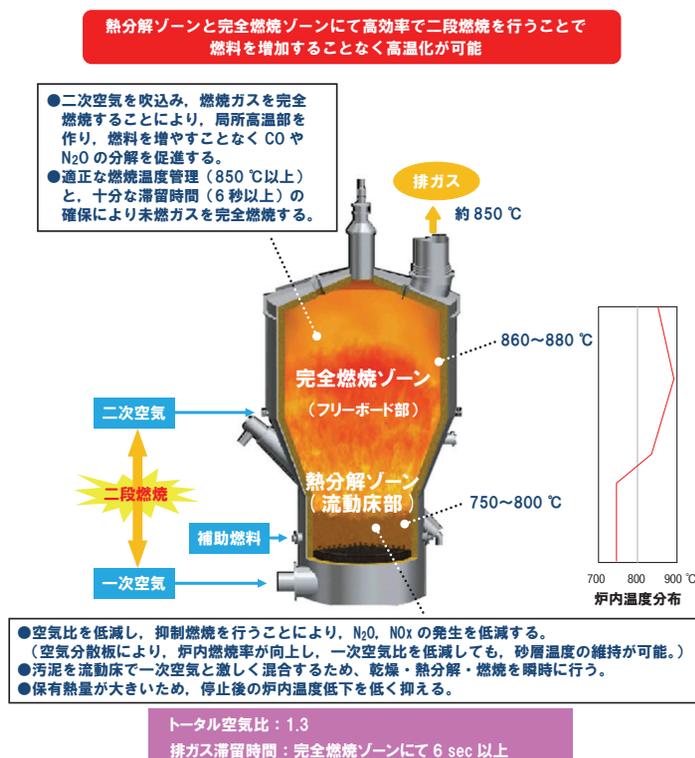


図2 気泡式高効率二段燃焼炉の概要



写真1 気泡式高効率二段燃焼炉

### 1.3.1 省エネルギー

流動床部の空気分散板にT型/TU型ノズルを多数最適に配列(写真2参照)することで、流動床部全面から均一に空気吹込みが可能となり、熱分解ゾーン(流動床部)において、少ない流動砂保有量でも流動床部の燃焼効率を向上させることができた。その結果、流動ブロワ吐出圧力の低減と流動空気量(空気比)の低減が可能となることから、流動ブロワの電力低減が可能で、さらには排ガス量の低減にも繋がるため、誘引ファンなどの排ガス系統機器についても電力低減が可能となる。

また、流動床部の燃焼効率向上により、燃焼温度と空気比を低く抑制した状態で下水汚泥の熱分解が可能となり、効率的に未燃ガスを生成し、完全燃焼



写真2 空気分散板

ゾーン(フリーボード部)において攪拌が促進されるように二次空気を吹込み、燃焼させることで局所的な高温化を可能としている。投入される下水汚泥自体のエネルギーを最大限に利用しているため、従来炉で炉内全体を高温化する場合よりも燃料を増加することなく高効率に高温化が可能となる。

### 1.3.2 N<sub>2</sub>O低減

熱分解ゾーンにて抑制燃焼(空気比1.0~1.2程度)することにより未燃ガスを含む熱分解ガスを発生させる。このとき熱分解ゾーンが還元雰囲気となることを利用し、下水汚泥中の窒素の酸化を抑え、N<sub>2</sub>Oの生成を抑制することが可能となる。

完全燃焼ゾーンでは、トータル空気比が1.3となるように二次空気を投入し、瞬時に熱分解ガスを850℃以上(860~880℃)の高温で燃焼させ、CO、シアンなどの未燃ガスを完全燃焼させるとともに、温室効果ガスであるN<sub>2</sub>Oを最大限に熱分解することなくN<sub>2</sub>Oの低減が可能となる。

## 2. 稼働実績

### 2.1 汚泥処理量および稼働率

操業開始は、1系炉:2010年9月1日、2系炉:2012年7月1日からであり、2010年9月1日から2012年6月30日までは1系炉と既設2系炉の2炉運転、2012年7月1日からは1系炉と2系炉の2炉運転を行っている。2010年9月から2013年9月までの実績処理量と稼働率について図3に示す。また、各年度の計画処理量と実績処理量について表2に示す。

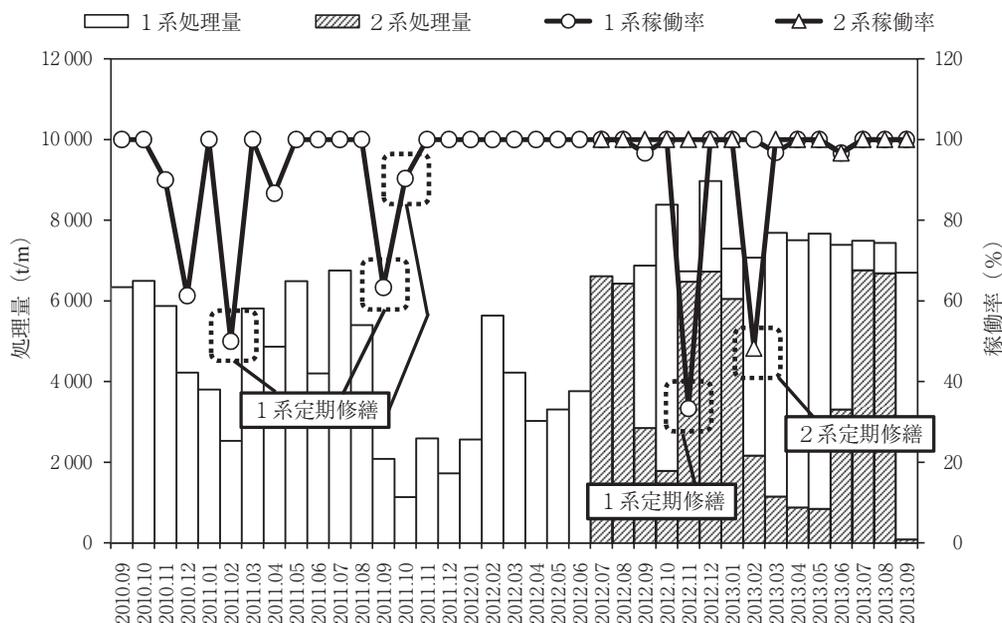


図3 汚泥処理量と稼働率

汚泥の処理量については、各年度の計画処理量に対して実績処理量の方が上回っていることから、順調に汚泥を処理できていることが分かる。

稼働率については、ほぼ100%の稼働率を維持しており、安定操業ができています。稼働率が90%未満となっている月は、定期修繕などによる計画停止を行っている。

## 2.2 排ガス性状

試運転時に実施した引渡性能試験での煙突出口排ガス性状について表3に示す。また、操業を開始(2010年9月)してからの煙突出口で測定した排ガス性状について、図4および図5に示す。試運転および操業を開始してからの運転においても、全ての項目で規制値を満足していることが確認された。

表2 汚泥処理量実績

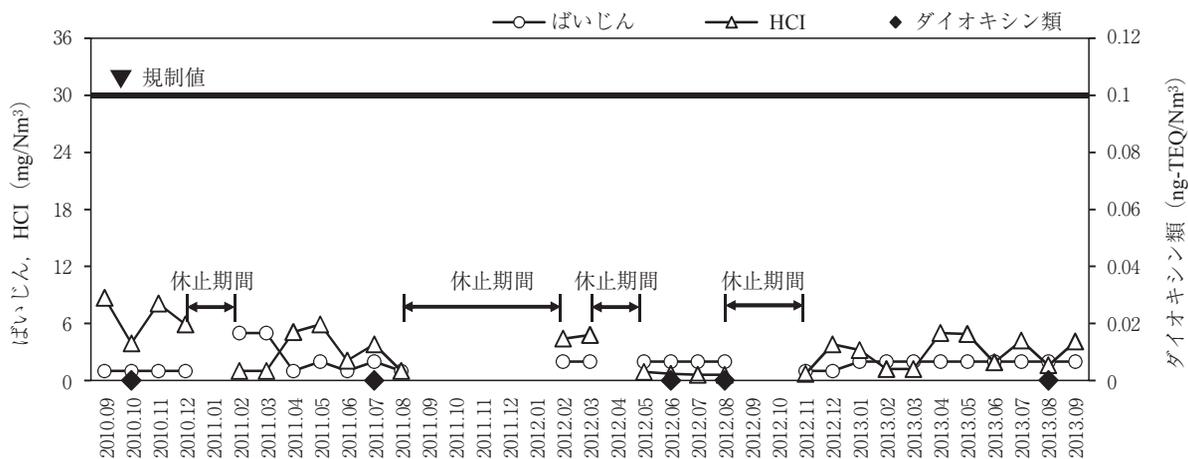
単位：t-wet/年

年度	1系炉			2系炉			合計(1系+2系)	
	運転期間	計画処理量	実績処理量	運転期間	計画処理量	実績処理量	計画処理量	実績処理量
2010	2010年9月 ～ 2011年3月	23 567	35 096	—	—	—	23 567	35 096
2011	2011年4月 ～ 2012年3月	40 400	47 696	—	—	—	40 400	47 696
2012	2012年4月 ～ 2013年3月	40 400	35 921	2012年7月 ～ 2013年3月	30 300	40 267	70 700	76 188
2013	2013年4月 ～ 2013年9月	20 200	25 608	2013年4月 ～ 2013年9月	20 200	18 586	40 400	44 194

注記：計画処理量は2系列で年間80 800 t-wet/日であり、稼働月数に合わせて計算

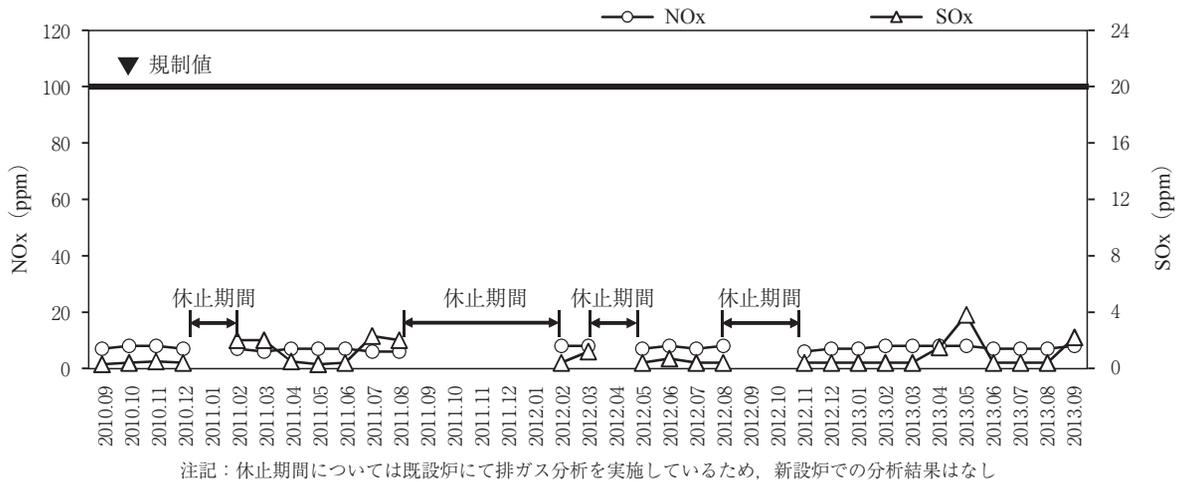
表3 試運転引渡性能試験の排ガス性状

項目	単位	規制値	汚泥投入負荷量							
			1系炉				2系炉			
			90%	100%	110%	123%	90%	100%	110%	123%
SOx	ppm	20	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
NOx	ppm	100	9	6	7	7	7	7	8	7
ばいじん	mg/Nm <sup>3</sup>	30	2	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	30	2.3	1.9	3	2.3	1.6	1.8	2.4	3.4
ダイオキシン類	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1	0.00002	0.000049	0.00035	0.00084	0.00004	0.0023	0.00059	0.000008



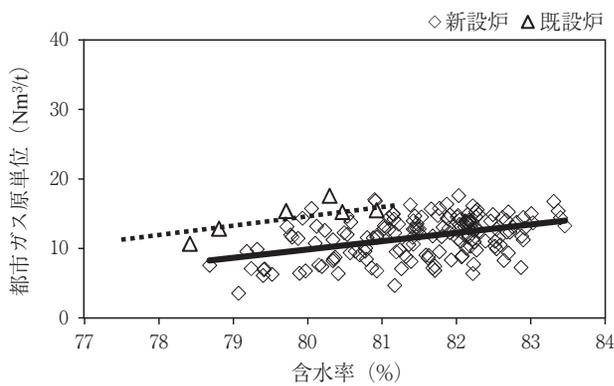
注記：休止期間については既設炉にて排ガス分析を実施しているため、新設炉での分析結果はなし

図4 供用開始後排ガス分析結果① (ばいじん, HCl, ダイオキシン類)



注記：休止期間については既設炉にて排ガス分析を実施しているため、新設炉での分析結果はなし

図5 供用開始後排ガス分析結果② (NOx, SOx)



注記：既設炉は補助燃料として重油を使用していたため、都市ガスへ熱量換算を実施

図6 都市ガス原単位比較

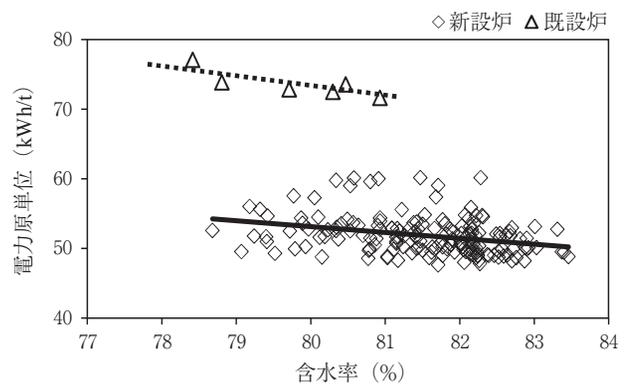


図7 電力原単位比較

### 3. 導入効果

#### 3.1 燃費および消費電力低減

既設炉（従来気泡炉）と新設炉（気泡式高効率二段燃焼炉）における都市ガス使用量と消費電力の原単位（脱水ケーキを1t処理するための必要量）について図6および図7に示す。どちらも新設炉の方が優れた結果となっている。ここで、含水率81%（汚泥性状分布の中間値）において既設炉と新設炉の原単位を比較すると、都市ガス使用量は35%低減、消費電力は30%低減していることが確認された。

#### 3.2 実運転におけるCO<sub>2</sub>排出量低減

既設炉と新設炉のランニング（補助燃料および消費電力）によるCO<sub>2</sub>排出量の原単位（脱水ケーキを1t処理する際に排出するCO<sub>2</sub>量）について表4に示す。CO<sub>2</sub>低減率において、既設炉の実績最大値に対して、新設炉の計画値は約33%低減することを目標としていたが、新設炉の実績平均は約50%の低減を達成しており、優れた結果となっている。

#### 3.3 N<sub>2</sub>O排出量低減

既設炉と新設炉のN<sub>2</sub>O排出係数について図8に

表4 CO<sub>2</sub>排出量原単位

項目	CO <sub>2</sub> 排出量 原単位	低減率
	kg-CO <sub>2</sub> /t-wet	%
既設炉（実績最大値）	104.0	—
新設炉（計画）	70.1	32.6
新設炉（実績平均）	52.5	49.5

注記1：低減率は、既設炉（実績最大値）を基準として、その低減割合を示した数値

注記2：CO<sub>2</sub>排出量原単位は新設炉で処理した汚泥の平均含水率（81.24%）における数値に換算

示す。焼却温度850℃におけるN<sub>2</sub>O排出係数は、既設炉は算定省令とほぼ同じ0.645 kg-N<sub>2</sub>O/t-wetであるのに対し、新設炉は0.4 kg-N<sub>2</sub>O/t-wet程度となっており、約40%低減される結果となった。また、新設炉では二段燃焼の改良により、補助燃料の使用量を増やさず20~30℃程度炉内温度の高温化が図れることから、補助燃料の使用量を同量とする場合、N<sub>2</sub>O排出係数は新設炉で0.2 kg-N<sub>2</sub>O/t-wet程度となり、N<sub>2</sub>Oの排出量は約70%低減できることが確認できた。

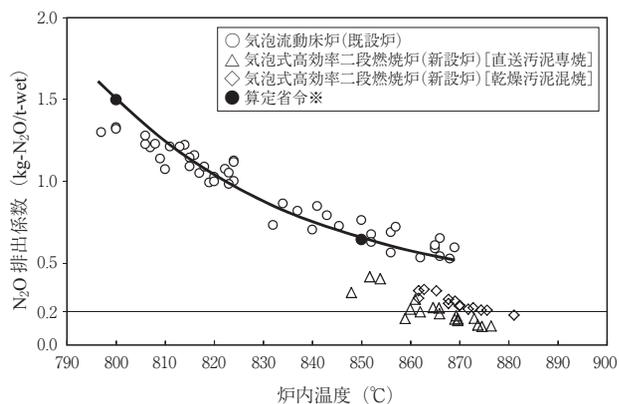


図8 炉内温度とN<sub>2</sub>O排出係数

## むすび

前述のとおり、1系炉が2010年9月から操業開始（2系炉は2012年7月から操業開始）して以降、温室効果ガスの排出量低減、および省エネルギーを実現し、環境負荷を低減した設備として、安定的な操業を継続している。今後は、これまでに得られた知見や運転実績に基づき、気泡式高効率二段燃焼炉の拡販に努めていきたい。

最後に、本工事を遂行するにあたり、多大なご助言、ご協力をいただきました神戸市建設局下水道河川部工務課、神戸市建設局東水環境センター施設課の関係各位には、深く感謝の意を表します。

\*水環境事業部 資源循環技術部