

# CFD シミュレーションによる溶融炉二次空気供給方法の最適化

## Optimization of Melting Furnace Secondary Air Supply Method by Simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD)



福富裕太\*  
Yuta Fukutomi



多田俊哉\*  
Toshiya Tada

当社主力メニューの一つであるガス化溶融炉において燃焼における総空気比を低減することで大きなライフサイクルコスト低減効果が期待できることから、より安定した低空気比燃焼運転の実現は重要な課題である。

本報では、ガス化溶融炉の低空気比燃焼を実現するための重要な因子である溶融炉二次空気供給方法を、CFD (Computational Fluid Dynamics) によるシミュレーションを活用して検討した結果について報告する。検討の結果、最適な二次燃焼空気の供給方法として、旋回流の形成と炉中心への燃焼空気供給を兼ね備えたノズル配置を上下段とも同じ旋回方向に設置する方式が最適であった。さらに、実稼働中のガス化溶融炉を用いた燃焼試験を行い、CFD で最適であったノズル配置を模擬した二次空気供給方法が CO 低減にもっとも効果があることが確認できた。

Low excess air ratio operation can reduce the life-cycle costs of a gasification and melting furnace, which is one of our leading products. The melting furnace secondary air supply method is an important factor of low excess air ratio combustion. By simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD), a nozzle position has been optimized that can achieve both generation of swirl flow and air supply to the center of the boiler. Furthermore, a combustion test was conducted at an operating plant equipped with a gasification and melting furnace. It was confirmed that the CFD-optimized method of supplying secondary air for melting furnace is the most effective way to reduce CO.

### Key Words :

ガス化溶融炉  
数値流体力学  
低空気比  
一酸化炭素  
二次燃焼

Gasification and Melting Furnace  
Computational Fluid Dynamics  
Low Excess Air Ratio  
Carbon Monoxide  
Secondary Combustion

### 【セールスポイント】

- ・最適な溶融炉二次空気供給方法
- ・CFD シミュレーションの予測精度向上

## まえがき

当社環境プラント関連の主力メニューの一つであるガス化溶融炉は2000年に初号機が稼働して以来、国内15カ所で順調に稼働しており、2カ所で新規建設が進められている。これら多くの実績の下、環境負荷の少ない安定操業の実現にむけて、ガス化溶融炉の性能向上に取り組んでいる。燃焼改善に関する取組みでは、レーザ O<sub>2</sub> 計を用いた溶融炉燃焼空気制御等により、より高度な燃焼安定性を達成できることを報告している<sup>1)</sup>。ここで、ガス化溶融炉は灰が溶融することを前提として設計されており、温度調整のための排ガス再循環設備が不要である。排ガス循環がなくとも低空気比運転が可能なのでボイラ内の排ガス量が少なく、ボイラをコンパクトに設計することができる。このようなメリットがあるガス化溶融炉において、燃焼における総空気比を低減することでさらなるライフサイクルコスト低減効果が期待できることから、より安定した低空気比燃焼運転の実現は重要な課題である。

今回、ガス化溶融炉の低空気比燃焼を実現するための重要な因子である溶融炉二次空気供給方法を、CFDによるシミュレーションを活用して検討し、供給方法を最適化した。さらに、実稼働中のガス化溶融炉を用いて実施した燃焼試験結果についても報告する。

## 1. ガス化溶融プロセスの概要

ガス化溶融炉の概要を図1に示す。ガス化炉は気泡流動層炉であり、供給された廃棄物は押込空気で部分燃焼され、速やかにガス化される。ガス化炉で発生したガス化ガスおよびチャー・タールは溶融炉に導入され、一次空気によって燃焼することで溶融炉を高温化する。溶融炉では、ガス化炉で発生する

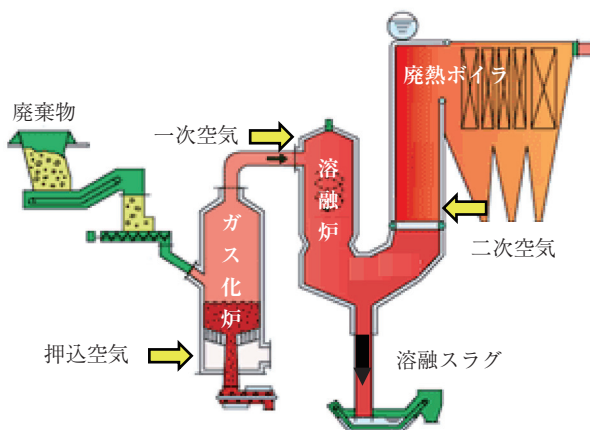


図1 ガス化溶融炉の概要

飛灰を廃棄物自体の熱量を利用して溶融スラグ化する。溶融スラグは重金属類が閉じ込められるため、路盤材などに利用可能である。溶融炉からの高温排ガスは二次空気で完全燃焼させたのち、廃熱ボイラで熱回収し、回収した熱は発電などに利用される。

## 2. シミュレーションによる溶融炉二次空気供給方法の検討

### 2.1 シミュレーション方法

燃焼方法の適正化において、CFDシミュレーションは非常に有効なツールであり、これまでも多くの成果<sup>2, 3)</sup>を上げている。今回は、ケーススタディによってボイラ内の流れとCO燃焼挙動を可視化して比較することで、二次空気のノズル配置や供給方法の最適化を行った。

シミュレーションには汎用熱流体解析ソフトANSYS® Fluent®（アンシス・ジャパン株の商標）を使用し、解析領域は溶融炉入口からボイラ1パス出口までとした。シミュレーションで使用したモデル等の設定内容を表1に示す。

図2に解析形状を模式的に示す。溶融炉入口から解析領域に流入するガス化ガスの流量と組成（C, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>）は、ごみの性状と発熱量および押込空気量から決定した。流入したガス化ガ

表1 シミュレーション設定

領域	三次元
時間	定常
乱流モデル	k- $\omega$ SST
燃焼モデル	渦消散モデル
輻射モデル	DOモデル

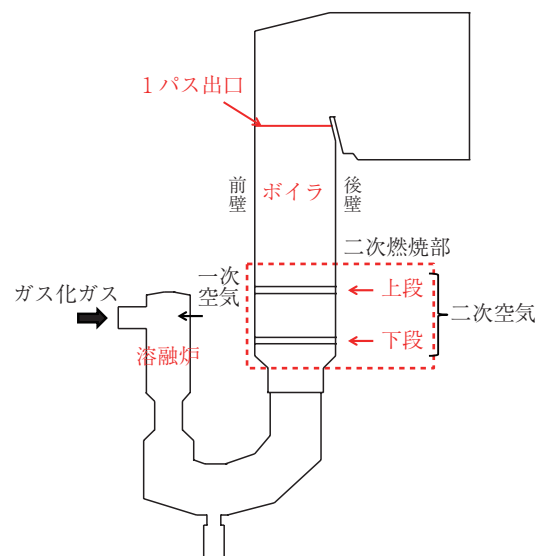


図2 解析形状

スは溶融炉溶融部に供給される一次空気とボイラ入口の二次燃焼部で供給される二次空気によって燃焼する。溶融炉～ボイラ部分の壁面には伝熱条件を与えており、対流と輻射による伝熱を考慮した。

## 2.2 二次空気供給条件

低空気比運転を可能とする二次空気供給方法の最適化を行うために、図2に示した二次燃焼部のノズル配置についてケーススタディを行った。検討に当たっては、ボイラ内を流れる排ガス流量に対して、二次空気量が少ないことに留意する必要がある。すなわち、低空気比運転条件として総空気比1.3を想定した場合は、二次空気流量は供給する全空気量の25～30%の少流量で効果的な燃焼を実現する必要がある。したがって、三段以上にすると一段当たりの空気量が少なくなるので、ノズル段数は二段を採用することとした。

表2に、ケーススタディをおこなったノズル配置の中で代表的なものを示す。各条件において供給される二次空気の総量は同じであり、全てのノズルに均等に分配されて供給される。また、それぞれのノズル配置の狙いを以下に示す。

- T-1：ボイラ内への均一な燃焼空気の供給のため、下段・上段とも全面に二次空気を供給する。
- S-3：強い旋回流での攪拌を狙って、炉壁4面から下段・上段とも同じ方向に二次空気を供給する。
- ST-1：旋回流形成だけでなく、排ガスが吹抜けやすい炉中心部への燃焼空気を供給する。
- ST-3：ST-1と同じ思想で、下段と上段で旋回方向を逆にすることで攪拌効果向上を狙う。

表2 ノズル配置

	T-1	S-3	ST-1	ST-3
上段				
下段				

※左側がボイラ前壁側

シミュレーションでは、各ノズル配置でのボイラ内の流れとCO濃度分布を可視化して燃焼挙動を把握し、図2に示した1パス出口でのCO濃度で最適なノズル配置を評価した。

## 2.3 シミュレーション結果

まず、シミュレーション結果から、ボイラ内排ガス流れの状況を確認した。各条件での下段、上段ノズル高さの水平断面における流速ベクトル図を図3～6に示す。また、S-3、ST-1については、下段、上段ノズル高さ断面のZ（垂直方向）成分の流速コンタ図を図7、8に示す。

T-1では、下段ノズルにおいて二次空気を交差するように供給したが、ボイラ内排ガスの流れは不規則な状態になった。これは、二次空気に比べて排ガス主流の流れの方が強かったためと思われる。一方、後流の上段ノズル高さでは二次空気は交差するように流れており、ボイラ内全面に空気を供給できていたものと思われる。

S-3では、上段・下段とも同じノズル配置で壁面寄りに二次空気を吹込んだことにより、ボイラ内の周方向に排ガスの強い旋回流が形成された。しかし、ボイラ中心部には水平方向の流速の小さい領域が形成されており、図7に示すように、その領域の排ガスは上向きの流速が大きく、吹抜けが生じていることがわかった。

ST-1では、下段ノズル高さにおいて中心部も含めたボイラ全体で排ガスの旋回流が形成された。これは、ボイラ中心部へも二次空気を供給するノズルを配置した効果と考えられる。さらに、上段ノズルでも下段ノズルと同じ旋回方向に二次空気を供給したことで、下段ノズル高さと同じように全体を攪拌するような旋回流が維持された。その結果、図8に示されるように、排ガスの上向きの流れが上段・下段ノズル高さで一部分に集中することはなく、十分に混合できていたものと思われる。

ST-3では、下段ノズル高さにおいてST-1と同様の旋回流が形成された。しかし、逆旋回させる方向に二次空気を吹込んだ上段ノズル高さでは、不規則な流れとなった。これは上段の二次空気によって、下段ノズルで形成された旋回流が打消されてしまったためだと考えられる。

次に、CO燃焼挙動を確認することで、最適な二次空気の供給方法を検討した。ボイラ中心を通る垂直断面における乾きガスベースのCO濃度コンタ図を図9に示す。

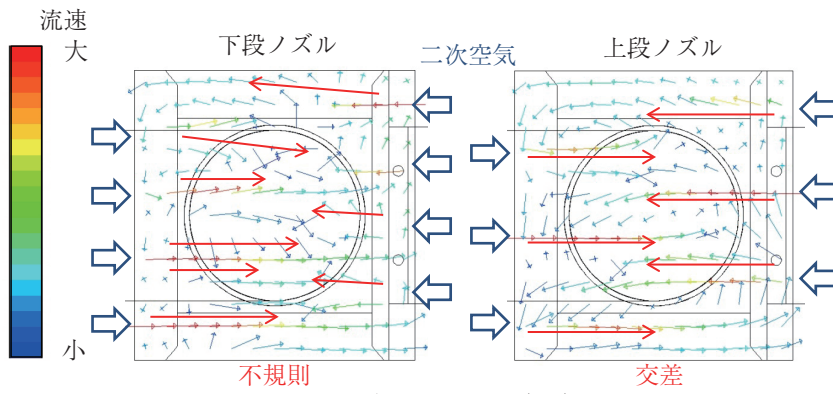


図3 流速ベクトル図 (T-1)

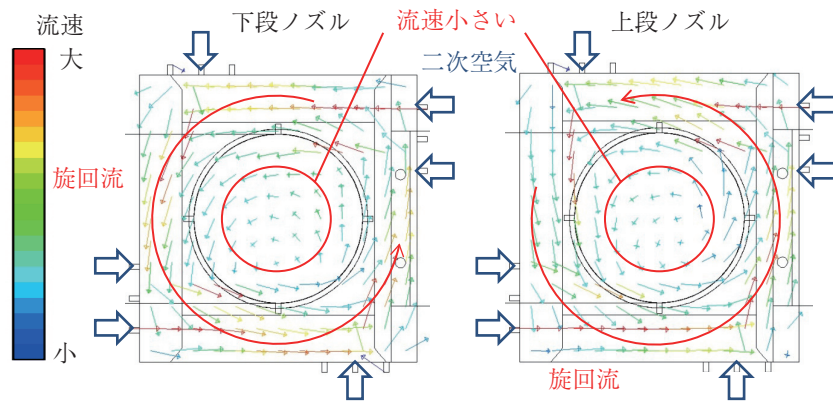


図4 流速ベクトル図 (S-3)

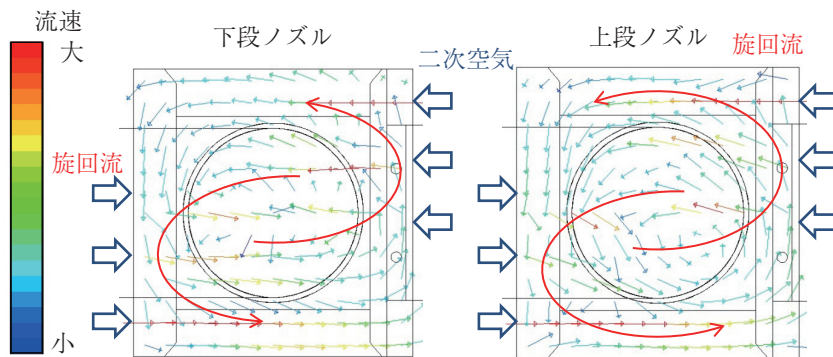


図5 流速ベクトル図 (ST-1)

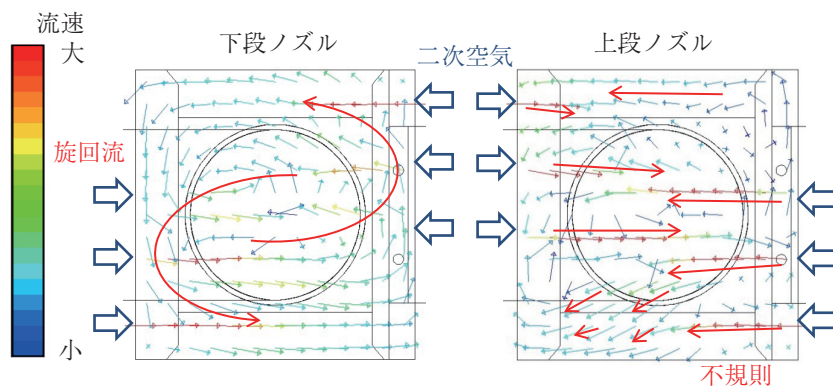


図6 流速ベクトル図 (ST-3)

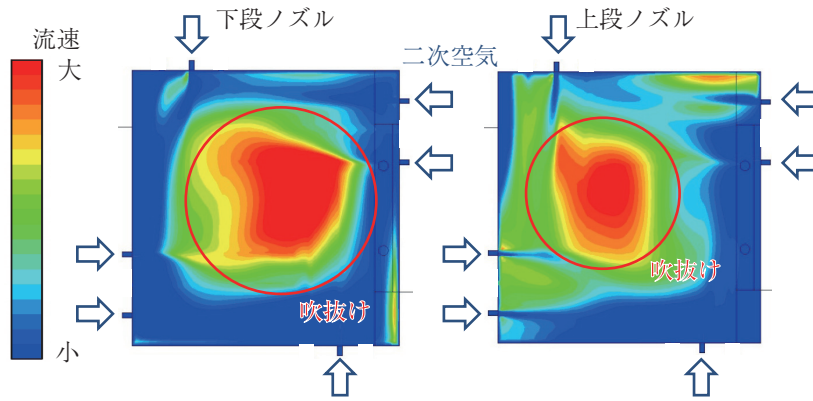


図7 Z方向成分速度コンタ図 (S-3)

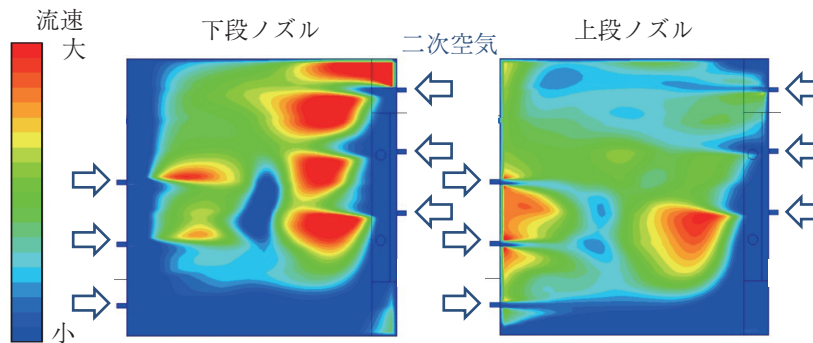


図8 Z方向成分速度コンタ図 (ST-1)

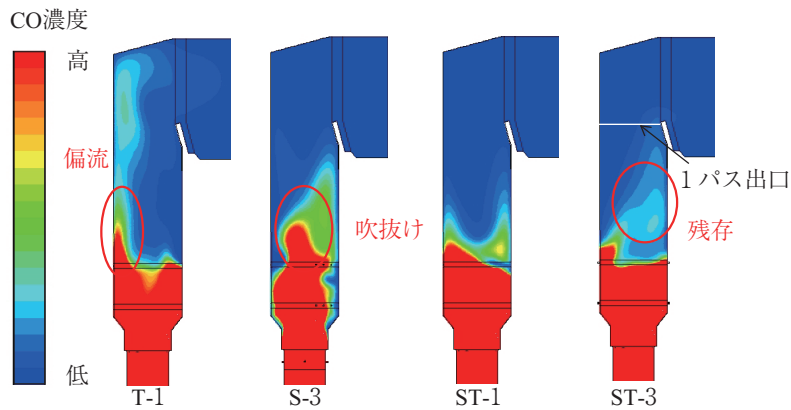


図9 CO濃度コンタ図

T-1では、ボイラ前壁側にCO濃度の高い排ガスが流れ、それによって1パス出口において高濃度のCOが残存する結果となった。対向するノズルから全面に空気を吹込んで均一な燃焼を期待したが、壁際のノズル間に燃焼空気が不足する部分が発生し、ボイラ1パス内での混合も不十分であったため、もっともCOが残存する結果となったと思われる。

S-3では、前述したとおり、ボイラ内に強い旋回流が形成されたことでボイラ中心部の上向き流速が

大きくなったため、ここをCO濃度の高い排ガスが吹抜けて、1パス出口においても高濃度のCOが残存する結果となった。

一方、旋回流の形成と炉中心への燃焼空気供給を兼ね備えたノズル配置であるST-1では排ガスの偏流や吹抜けはなく、二次燃焼部でのCOの燃焼状況は非常に良好な結果であった。上段と下段で同じ方向に旋回させることで、中心部も含めてボイラ全体を攪拌するような旋回流が維持されたためと考えられる。

また、旋回方向を上段と下段で逆にしたノズル配置である ST-3では、CO がボイラ後壁側でやや残存した。前述したとおり、下段ノズルで形成された旋回流が上段ノズルによって打ち消されたことによって流れが不規則になったことが原因と考えられる。

各条件における 1パス出口断面平均の CO 濃度を表 3 に示す。CO 濃度は乾きガススペースであり、酸素濃度換算していない。もっとも CO 濃度が低い結果となったのは ST-1であり、旋回流の形成と炉中心への燃焼空気供給を兼ね備えたノズル配置を上下段とも同じ旋回方向に設置することが、低空気比条件下で CO 濃度を抑制するのに最適であることがわかった。

### 3. 実機を用いた燃焼試験

#### 3.1 燃焼試験内容

燃焼試験は処理規模100 t/day のガス化溶融設備にて行った。図10に試験を行った廃棄物処理施設の概

表 3 各ノズル配置における 1パス出口 CO 濃度

	T-1	S-3	ST-1	ST-3
CO 濃度 [ppm]	236	178	11	47

略プロセスフローを示す。試験を行った溶融炉の二次燃焼部には上段に 8カ所、下段に10カ所の二次空気ノズルを有しており、これらを組合わせて使用することによって表 4 に示した 3つの二次空気供給パターンで試験を行った。

ここで、試験を行ったガス化溶融設備の形状はシミュレーションとは異なる形状であるため、シミュレーションと実機試験結果の比較は相対的なものである。燃焼試験のパターン 1 では下段ノズル R4~5 と L4~5, 上段ノズル R1~2 と L1~2 を使うことで同じ方向に旋回流を形成し、さらに上段および下段ノズルの R3 と L3 で炉中心に燃焼空気を供給した。これはシミュレーションの ST-1 を模擬した供給方法である。

パターン 2 は、下段では全てのノズルを用いて均一に二次空気を供給した後に上段で旋回吹込みを行った。これはシミュレーションの T-1 の模擬に近い供給方法と言える。

パターン 3 では下段をパターン 1 と同様に旋回吹込みを行うが、上段では逆方向に旋回するようにノズル R2~4 と L2~4 を使用した。これはシミュレー

表 4 二次空気供給パターンと使用したノズル

		パターン 1	パターン 2	パターン 3
使用したノズル	上段	旋回 L1~3, R1~3	旋回 L1~3, R1~3	逆旋回 L2~4, R2~4
	下段	旋回 L3~5, R3~5	全面 L1~5, R1~5	旋回 L3~5, R3~5
ノズル配置図 (⇨: 使用) (X: 不使用)				
シミュレーション条件との対応		ST-1	T-1 近似	ST-3

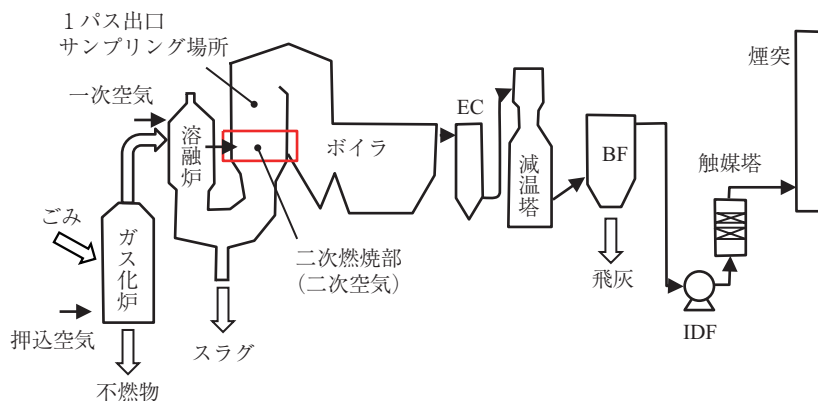


図10 概略プロセスフロー

シヨンの ST-3を模擬した供給方法となる。

また、燃焼試験では二次燃焼部での最適な燃焼空気の供給方法を確認するために、図10中に示したボイラ1パス出口における排ガス中 CO 濃度を測定した。測定時間は1時間とし、プローブから排ガスを連続的に吸引して分析計に通し、CO 濃度を測定した。

### 3.2 燃焼試験結果

各二次空気供給パターンでの排ガス中 CO 濃度測定結果を表5に示す。CO 濃度は実測された濃度(1時間平均値)であり、酸素濃度換算していない。測定の結果、上段・下段とも同じ方向に回転させるとともに炉中心にも燃焼空気を吹込むパターン1における CO 濃度は7 ppm となり、良好な結果が得られた。一方、下段で二次空気を全面に供給し、上段を回転させたパターン2では74 ppm、下段と上段を逆方向に回転させたパターン3では62 ppm となり、ボイラ1パス出口での CO 濃度を低く抑えることはできなかった。

実機による燃焼試験結果は、先のシミュレーション結果と整合性があった。これより、ガス化溶融炉における二次燃焼空気の供給方法として、旋回流の

形成と炉中心への燃焼空気供給を兼ね備えたノズル配置を上下段とも同じ旋回方向に設置する方式が CO 低減にもっとも効果があることが確認できた。

### むすび

ガス化溶融炉の安定した低空気比燃焼運転を実現するための溶融炉二次空気供給方法をシミュレーションで検討し、旋回流の形成と炉中心への燃焼空気供給を兼ね備えたノズル配置を上下段とも同じ旋回方向に設置する方式が最適であった。さらに、実稼働中のガス化溶融炉を用いた燃焼試験を行うことで、提案したノズル配置を模擬した二次空気供給方法が CO 低減にもっとも効果があることが確認できた。

今回のように CFD シミュレーションで検討した結果が実機での性能向上に役立つ例は多く、有効なツールとして活用が定着している。今後もシミュレーションの予測精度向上を図り、魅力ある当社製品の提供に貢献していく。

### [参考文献]

- 1) 砂田浩志ほか：神鋼環境ソリューション技報“ガス化溶融炉の燃焼改善”，Vol.8, No.2 (2012) p23-30
- 2) 井上尚子ほか：神鋼環境ソリューション技報“機器設計における熱流体解析の活用事例”，Vol.11, No.1 (2014) p38-42
- 3) 井上尚子ほか：神鋼環境ソリューション技報“流動床式焼却炉における低 NOx 燃焼技術の検証”，Vol.13, No.2 (2017) p11-16

表5 1パス出口における CO 濃度測定結果

	パターン1	パターン2	パターン3
CO 濃度 [ppm]	7	74	62