

高効率粉体直接溶融バーナの開発

Development of New High Efficient Burner for Direct Fusion Combustion

藤本隆之* 山本康之* 萩原義之* 飯野公夫**
 FUJIMOTO Takayuki YAMAMOTO Yasuyuki HAGIHARA Yoshiyuki IINO Kimio

粉体原料を高効率に加熱・溶融することが可能な新しい粉体直接溶融燃焼バーナ(DFCバーナ)を開発した。本バーナは、原料粉体を高温の酸素燃焼火炎中に投入することにより、直接的に加熱・溶融するものである。筆者らは、ベンチスケール溶融試験と数値シミュレーションによりバーナ構造を検討した結果、原料粉体の噴出口を燃料噴出口で挟み込む配置とすることにより、原料粉体を高効率に溶融できることを確認した。さらに、本バーナ構造をベースとして数値シミュレーションによるスケール則の検討を行い、パイロットスケール溶融試験において高い溶融性能(ガラス溶融量420kg/h規模、溶融効率65%)が得られることを確認し、スケールアップ技術を確立した。

We have developed a new high efficiency DFC (Direct Fusion Combustion) oxy-fuel burner. This burner injects powdered raw material directly into the flame, which heats and melts the precipitating particles. The numerical simulation and bench-scale experiment were carried out due to discuss a suitable burner structure for DFC burner. As a result, we found out the highly-efficient burner. We designed the pilot-scale burner (glass feed rate: 420 kg/h) using numerical simulation, and the pilot-scale experiment was carried out about the glass culet ($d_{50} \sim 300 \mu\text{m}$). The heat efficiency was achieved 65%. We confirmed the rules for scaling of DFC burner.

1. はじめに

支燃性ガスに酸素を用いる酸素燃焼バーナは、高温の燃焼火炎が容易に得られことや、排ガス量の低減によるエネルギー利用効率が高いこと、さらには排ガス中空素酸化物の発生抑制が可能なることから、金属溶融、ガラス溶融、ごみ焼却など、多量の熱エネルギーを消費する工業分野において広く利用されている^{1,2)}。

近年、酸素燃焼バーナの重要な利用技術分野の一つに、粉体状の原料を酸素火炎中で効率良く加熱・溶融する技術がある。当社においては、火炎中で原料となる粉碎されたセラミックス粒子を高効率で加熱・溶融処理し、球状化したセラミックス粒子を製造することが可能なシステム(CERAMELT™)を開発・販売している³⁻⁸⁾。一方、粉体原料を火炎中で溶融し、高温の溶融物として処理可能な粉体処理用酸素バーナも開発しており、ごみ処理過程で発生する飛灰を火炎中で溶

融処理する飛灰溶融バーナなど、産業廃棄物分野での実績を主に上げてきた^{1,9,10)}。

最近では、ガラス業界において革新的ガラス製造技術「気中溶解法」の開発がナショナルプロジェクトなどで進められている^{11,12)}。この中の重要な要素技術開発の一つとしても、ガラス原料粉体を酸素燃焼火炎中に投入し、高効率で加熱・溶融する酸素バーナ技術が掲げられており、酸素燃焼火炎を利用した粉体処理技術の可能性が次第に拡大している。

従来当社の粉体処理バーナは、粒径が数10 μm 以下の、気流搬送可能な粉体原料を対象とした開発が主流であった。しかし市場からは、数100 μm サイズの比較的大粒径の粉体を、高効率で加熱・溶融処理可能な粉体処理バーナに対するニーズも高まっている。

そこで、数100 μm サイズの大粒径の粉体原料に対して、高効率で加熱・溶融処理することを可能とする、新たな粉体直接溶融燃焼バーナを開発したので、その詳細について以下に報告する。

* 開発・エンジニアリング本部ガスアップセンター

** 開発・エンジニアリング本部ガスアップ戦略統括プロジェクト

2. 粉体直接溶融バーナの基本構造の決定

2.1 求められる性能

今回、開発したバーナは、数100 μmの粉体原料を加熱・溶融し、高温の溶融物として処理可能な粉体処理用酸素バーナである。このバーナに要求される機能を以下にまとめる。

- (1) 粉体原料の火炎中での高い伝熱性能：火炎中での粉体原料への伝熱促進を図ること。
- (2) 溶融物への高い伝熱性能：火炎から的高温溶融物への伝熱促進を図ること。
- (3) 粉体原料の飛散率低減：粉体原料の飛散を抑制し、高温の溶融物として歩留まらせること。

開発するバーナ構造は、飛灰溶融バーナをベースとし、先端面に燃料、酸素、粉体原料の噴出口を同心円状に配置させた構造とした。

2.2 ベンチスケール設備と溶融効率の評価方法

ベンチスケールでのバーナ性能を評価するため、Table 1に示す諸元の溶融試験設備を設計・製作した。溶融試験設備の構成をFig.1に示す。

Table 1 Specification of bench-scale equipment

Furnace size	750 × 750 × 900 mm
Melt capacity	100 L
Heat input	126 kW

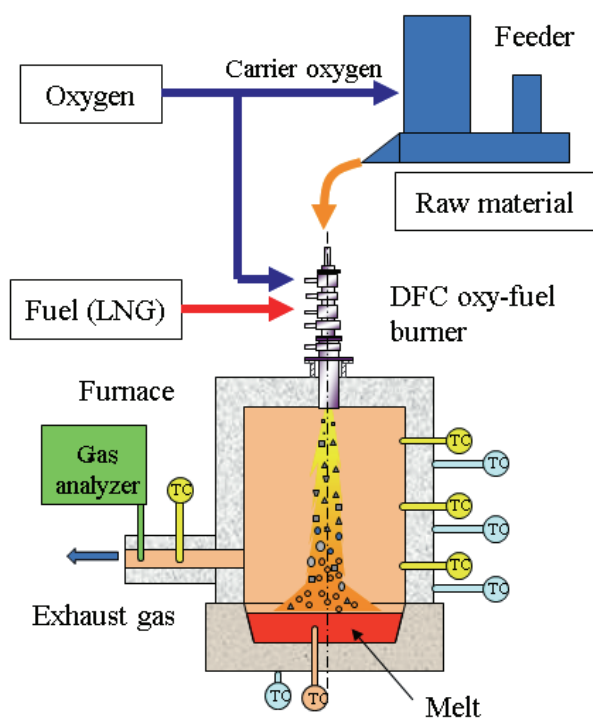


Fig.1 Schematic of bench-scale equipment

溶融試験設備は、原料供給機、縦型溶融炉から構成され、粉塵の回収装置としてサイクロンおよびバグフィルターを設けた。縦型溶融炉の上部にバーナが鉛直下向きに設置され、炉底部にバーナで加熱・溶融された溶融物を貯留する構造となっている。溶融物の温度測定のために、水平方向に5箇所の位置において深さ方向に3点、計15点の熱電対を設置している。

要求されるバーナの性能は2.1節に記載したが、今回の評価試験においては粉体原料の火炎中伝熱と溶融物への伝熱を全体として評価することを目的として試験を実施した。

バーナの伝熱性能は、式(1)で定義される溶融効率η (%)によって評価した。

$$\eta = \frac{Q_{\alpha}}{Q_i} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 Q_{α} : 原料への伝熱量 (kW)

Q_i : 燃焼熱量 (kW)

粉体原料として破碎状のガラス屑であるガラスカレットを用いると、 Q_{α} はガラス顕熱の時間変化量で評価することができることから、原料粉体溶融後のガラス溶湯質量 W (kg)、外気温度に対するガラス溶湯温度 T (°C)、ガラスの比熱 C (kJ/(kg·°C))を用い式(2)で表せる。

$$Q_{\alpha} = \frac{d}{dt}(CWT) = C \left(T \cdot \frac{dW}{dt} + W \cdot \frac{dT}{dt} \right) \quad (2)$$

さらに溶融試験の熱平衡に達した段階で評価を実施すると、溶湯温度 T の時間変化は無視できる。また W の時間変化は原料供給速度を意味することから、溶融効率は式(3)により評価することができる。

$$\eta = \frac{\Delta W}{Q_i} \cdot CT \times \frac{100}{3600} \quad (3)$$

ただし、 ΔW : 原料供給速度 (kg/h)

そこで、式(3)により溶融効率を評価できるように、原料にはガラスカレット粉体を利用することとした。ただし、原料粉体と採用したガラスカレットの粒径は500μm以下 ($d_{50} \sim 300 \mu\text{m}$) のものを使用した。

2.3 試験バーナ

原料粉体の分散性に関しては、事前の検討により円環状に噴出口を配置することが最適であることを確認しており、すべての設計においてその思想を採用し

た。その上で、設計思想の異なる3種類のバーナを設計・製作し、溶融性能評価を実施した。各バーナの軸方向の断面を Fig. 2 に示す。3種類のバーナはそれぞれバーナに要求される機能のうち、火炎中での粉体原料への伝熱と溶融物への伝熱を両立しようと考えたもの(バーナ A)、また火炎中での伝熱を重視したもの(バーナ B)、さらに火炎中での伝熱を強化したもの(バーナ C)を準備した。以下に、各バーナの特徴について記述する。

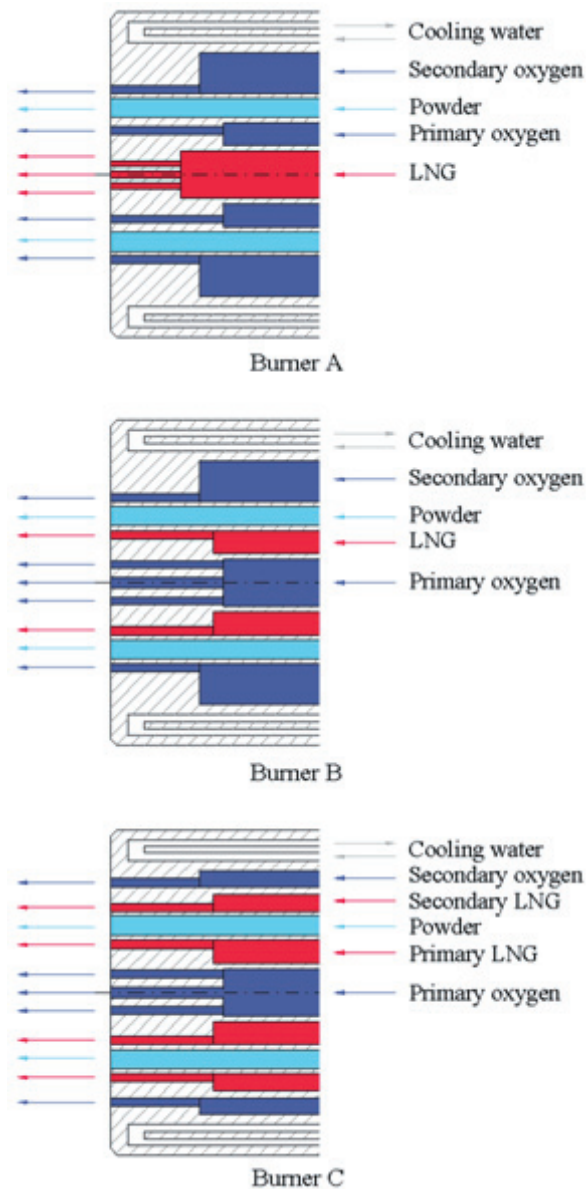


Fig. 2 Schematic of burner structures

【バーナ A】

原料粉体の粒径が小さく、気流搬送用に開発され、原料粉体の粒径が小さいものに適合した飛灰溶融バーナをベースに、先端面には中心軸から順に燃料、1次

酸素、粉体原料、2次酸素の噴出口を同心円状に配置するように設計し、緩慢燃焼を指向したものである。これにより形成される火炎は長炎となり、粉体原料の火炎中での滞留時間を延ばすことによる伝熱向上が期待できることと同時に、溶融物への高温燃焼ガス流の衝突による伝熱向上が図れることを期待している。

【バーナ B】

先端面には中心から順に1次酸素、燃料、粉体原料、2次酸素の噴出口を同心円状に配置するように設計した。これにより形成される火炎はバーナ A に比較して短炎傾向となるが、バーナノズル近傍から太い火炎を形成することが可能であり、粉体原料の火炎中での伝熱向上と火炎からの逸脱抑制を図ることを期待している。

【バーナ C】

先端面には中心から順に1次酸素、1次燃料、粉体原料、2次燃料、2次酸素の噴出口を同心円状に配置するように設計した。これにより粉体原料は内炎と外炎に挟まれるように火炎中に供給され、火炎中での伝熱向上が図れることを期待している。

3. ベンチスケール試験結果および考察

3.1 バーナ構造の最適化検討

ベンチスケール溶融試験設備を用いて、Table 2 に示す条件にて実験を行った。炉体の蓄熱量や炉内表面温度がすべての条件で一定になるように、十分に予熱を行った後に試験を開始した。

Table 2 Experimental conditions on bench-scale

LNG flow rate	(m ³ (normal)/h)	11.0
Oxygen flow rate	(m ³ (normal)/h)	26.6
Oxygen ratio	(-)	1.05
Glass powder feed rate	(kg/h)	129 ~ 145

バーナ A ~ C を用いて実施した試験結果を Table 3 に示す。試験は同じバーナで複数回行い、再現性を確認した。

Table 3 Experimental results on bench-scale

Burner type	A	B	C
Melting efficiency (%)	43	48	54
Temperature of molten glass (°C)	1382	1392	1416

これらの結果より、火炎中での伝熱を重視する設計のバーナ C において最も効率が良いことが示された。

3.2 数値シミュレーションによる検証

熔融試験の結果を検証するために、熱流体解析コード FLUENT 6.3 を利用して数値シミュレーション¹³⁾を実施した。解析に用いた物理モデルと計算条件は、Table 4、Table 5 に示す通りである。

Table 4 Computational models

Turbulence	Standard k-ε model
Combustion	Probability Density Function model (PDF)
Radiation heat transfer	Discrete Ordinate model (DO)
Multiphase flows	Euler-Lagrangian model

Table 5 Computational conditions

LNG flow rate	(m ³ (normal)/h)	11.0	
Oxygen flow rate	(m ³ (normal)/h)	26.6	
Glass powder feed rate	(kg/h)	145.0	
Glass powder	Diameter	(μm)	300
	Density	(kg/m ³)	2500
	Specific heat	(kJ/(kg·K))	1.2

Fig.3 に各バーナの炉内温度分布を、Fig. 4 に原料粉体の軌跡と温度変化を示す。本結果から、各バーナの試験結果を考察する。

バーナ A では、高温燃焼ガスが溶湯表面に到達し、溶湯表面上を高温ガスが流れており、設計思想通りの火炎が形成されている。しかし、原料粉体が通過する火炎中心軸付近の火炎温度が低く、火炎中での原料粉体への伝熱が悪いため、熔融効率が低くなったものと考えられる。一方、バーナ B では、原料が通過する中心軸付近に高温領域が形成されることにより、原料粉体への伝熱が促進され、バーナ A に比較して熔融効率が高くなったものと考えられる。さらに、バーナ C では、設計思想どおりバーナ近傍から原料粉体を挟み込む形で高温領域が形成されるため、バーナ B に比較して原料粉体が高温雰囲気曝される時間が長くなるため、熔融効率が最も高くなったものと考えられる。

数値シミュレーションによる検証の結果から、大粒径の粉体原料を効率よく熔融するには、火炎中での伝熱を高めることが最も重要であり、バーナ C の構造が最も適していると判断した。

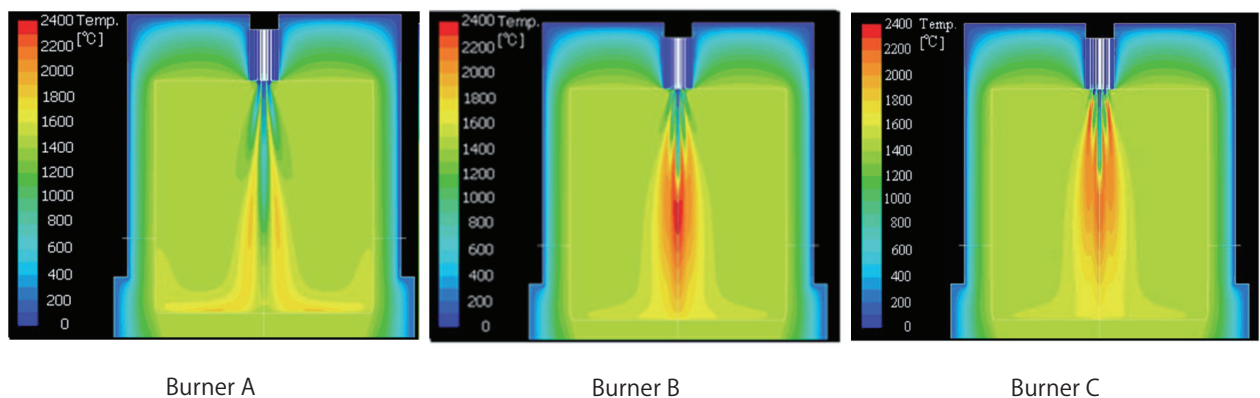


Fig. 3 Calculating temperature distribution

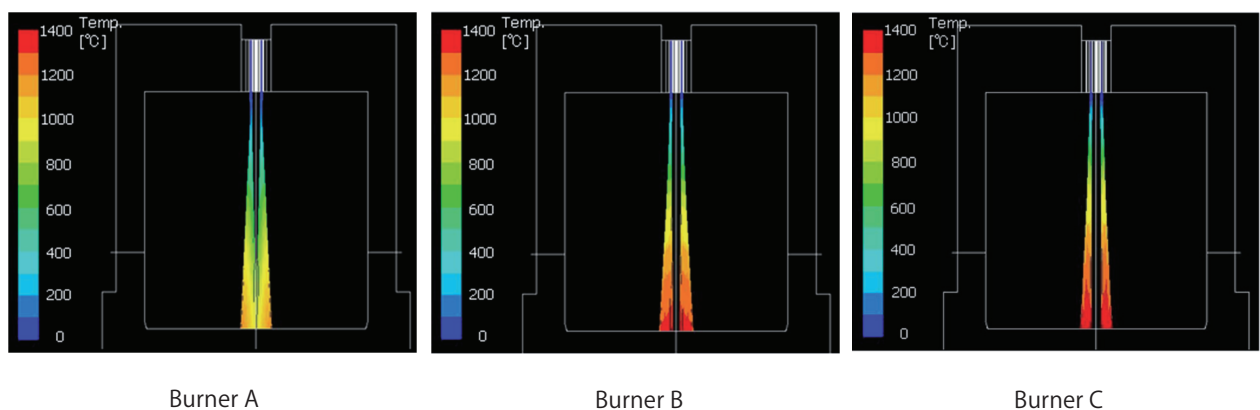


Fig. 4 Calculating particle trajectory and temperature

3.3 バーナ配置の最適化

バーナCを使い、バーナとガラス溶湯面との距離を変えて溶融試験を実施した。Fig.5に溶融効率とガラス温度の結果を示す。

バーナとガラス溶湯面との距離が1m前後で、溶融効率が最も高くなる傾向にある。別途実施したバーナ高さを変えたシミュレーション結果から、バーナから1mの位置で火炎温度は1600℃程度まで低下することが分かっており、バーナとガラス溶湯面の距離を1mより長くすると、ガラス溶湯面への伝熱量が低下するため、溶融効率は下がるものと考えられる。一方、バーナとガラス溶湯面までの距離が短い場合、火炎内での伝熱量が少なくなるため、溶融効率が低下するものと考えられる。

これにより、バーナと溶湯面との距離についても重要な設計事項であることが確認された。

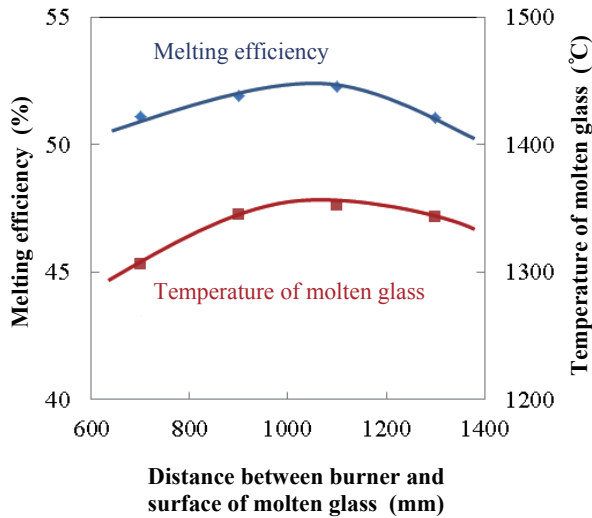


Fig.5 Influence of distance between burner and melt

4. パイロットスケール試験とスケール則の検証

4.1 パイロットスケール試験設備

ベンチスケールで基本構造を決定したバーナの実用性を高めるために、商用スケールまでのバーナ設計を可能とするスケール則の確立を目的として、パイロットスケールの溶融試験設備を設計・製作した。パイロットスケールの試験設備の諸元を Table 6に、設備全景を Fig.6に示す。

試験設備の構成は、ベンチスケール設備と同様であり、縦型溶融炉の設計においては容積負荷が一定となるようにした。溶湯貯留部には水平方向に7箇所の位置において深さ方向に4点、計28点に熱電対を設置し、溶融物の温度を測定できるようにした。

Table 6 Specification of pilot-scale equipment

Furnace size	1050 × 1050 × 1260 mm
Melt capacity	380 L
Heat input	310 kW

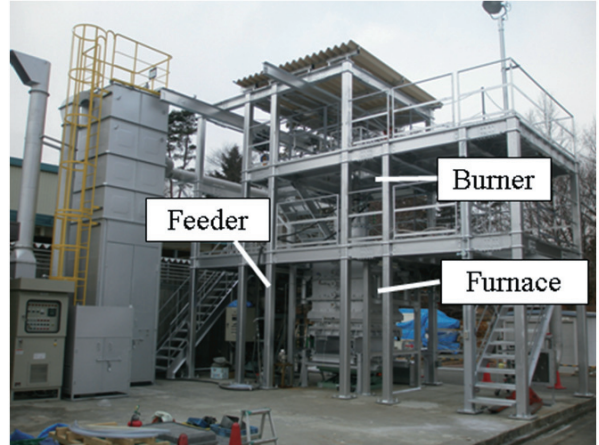


Fig.6 Pilot-scale Equipment

4.2 スケール則の検討

粉体原料への伝熱に対して大きな影響を及ぼす火炎のスケール則に関しては、原料噴出口と燃料・酸素噴出口の間隔や各々の噴出速度を各種スケール則に基づき、バーナノズル設計を実施し、シミュレーションにより溶融性能を評価した。その結果、最適なスケール則を確立した。最適化したスケール則に基づき、パイロットスケールのバーナを設計・製作した。

最適化したスケール則で設計したバーナのシミュレーション結果を Fig.7に示す。Fig.3に示したバーナCの炉内温度分布と同様に、バーナ近傍から高温領域が形成されていることが分かる。

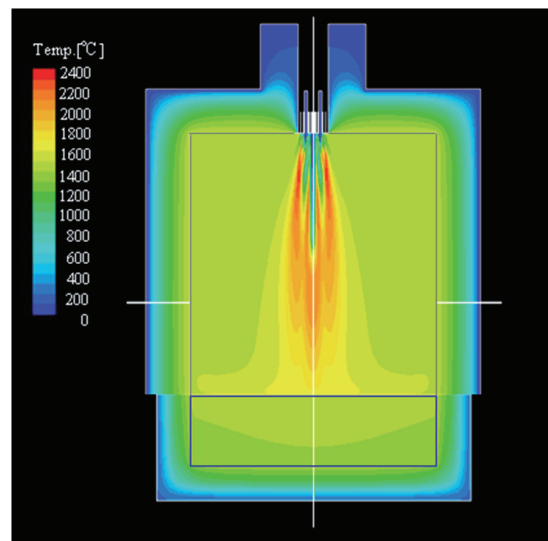


Fig.7 Calculating temperature distribution for pilot-scale

4.3 パイロットスケールバーナの試験結果

最適化したスケール則をもとに設計したパイロットスケールバーナを用いて溶融試験を行った。試験条件を Table 7 に示す。

Table 7 Experimental conditions on pilot-scale

LNG flow rate	(m ³ (normal)/h)	26.5
Oxygen flow rate	(m ³ (normal)/h)	64.0
Oxygen ratio	(-)	1.05
Glass powder feed rate	(kg/h)	420

スケール則に基づき予測された溶融効率と、試験から得られた溶融効率を Table 8 に示す。

Table 8 Melting efficiencies of simulations and experiments

Scale	Melting efficiency (%)	
	Experiment	Simulation
Bench (145 kg/h)	54	57
Pilot (420 kg/h)	65	63
Business (2 ton/h)	—	70

Table 8 では、最適化されたスケール則を用いたシミュレーション結果が実験結果と良い一致を示しており、スケール則の有用性を確認することができる。さらに、スケールアップに伴い溶融効率が高くなる傾向にあることが分かった。この要因については以下のように考察した。

バーナの溶融効率を評価する式 (1) は、式 (4) のように火炎中での伝熱効率 η_p (%) と溶湯への伝熱効率 η_g (%) の二つの伝熱効率に分解することができる。

$$\eta = \frac{Q_p + Q_g}{Q_i} \times 100 = \eta_p + \eta_g \quad (3)$$

ただし、 Q_p : 火炎中伝熱量 (kW)

Q_g : 溶湯伝熱量 (kW)

Fig.8 に、シミュレーション結果から算出した火炎中での伝熱効率、溶湯への伝熱効率を示す。これより、全体の溶融効率を支配しているのは、火炎中での伝熱効率であり、溶湯への伝熱効率はスケールによらず 18% 程度で一定の値となっている。火炎中での伝熱効率はスケールの増大に伴って上昇していく傾向になっており、これは粉体原料の火炎内滞留時間が増大し、それによって粉体原料への伝熱量が増加するためである。

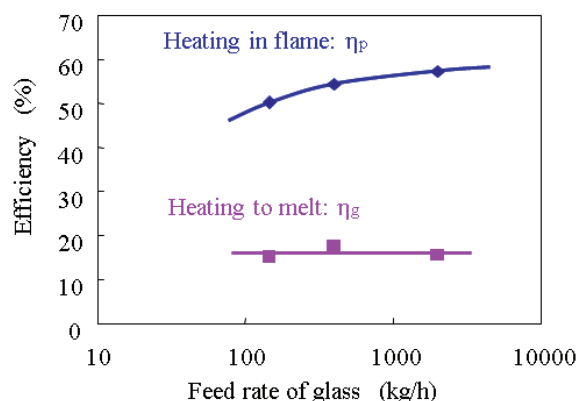


Fig. 8 Efficiencies of heating in flame and heating to melt

5. まとめ

- (1) 数 100 μ m サイズの大粒径の粉体原料においては、火炎中での伝熱が重要であることを確認し、粉体原料を内外の火炎で挟み込むバーナ構造が最適であることを見いだした。
- (2) 最適化したスケール則に基づいてバーナ設計を行い、パイロットスケールでの実験においてその有用性を確認した。これによって、実機規模までのバーナ設計が可能となった。

参考文献

- 1) 諏訪俊雄, 小林伸明, 三宅新一. 酸素燃焼技術とその展望. 工業加熱, 2002, 39(3), 3-12.
- 2) 大原清司. 酸素による燃焼の技術. 工業加熱, 2002, 39(3), 13-18.
- 3) 三宅新一, 鈴木喬, 諏訪俊雄. 火炎法によるシリカの球状化. 無機マテリアル. 1996, 3(262), 219-224.
- 4) 三宅新一, 木野村暢一, 鈴木喬, 諏訪俊雄. シリカの球状化における火炎バーナの特性. 無機マテリアル. 1997, 4(267), 139-147.
- 5) 矢島尊, 村上伸吾, 三宅新一. 酸素燃焼による酸化粒子の球状化技術. 日本酸素技報. 1998, 17, 43-53.
- 6) Miyake, S.; Kinomura, N.; Suzuki, T.; Suwa, T. Fabrication of spherical magnetite particles by the flame fusion method. J. Mater. Sci. 1999, 34, 2921-2928.
- 7) 村上真二, 鈴木一路, 萩原義之. 高融点材料用球状化システム. 大陽日酸技報. 2009, 28, 34-35.
- 8) 萩原義之, 藤本隆之. 未来を切り開く新技術セラミックス球状化システム「CERAMELT」の技術. JETI. 2010, 58(8), 92-93.
- 9) 金藤紘一郎, 広瀬秀志, 後藤拓, 市原忠. 酸素バーナによるごみ焼却飛灰溶融試験の概要 (第 1 報). 廃棄物学会研究発表会講演論文集. 1997, 8(Pt.2), 608-610.
- 10) 山田進, 近藤鋺一郎, 三宅新一. 飛灰溶融炉に適用する酸素燃焼バーナの開発. 工業加熱. 2003, 40(2), 23-28.
- 11) 酒本修. 革新的省エネルギーガラス溶解技術. 旭硝子研究報告. 2009, 59, 55-60.
- 12) 酒本修, 伊勢田徹. ガラス溶融工程における省エネルギー技術. 伝熱. 2010, 49(207), 14-18.
- 13) 山本康之, 萩原義之, 北村祐一郎. 数値シミュレーションを用いた酸素燃焼火炎内での粉体挙動の予測. 大陽日酸技報. 2008, 27, 6-11