

熱媒循環式排熱回収設備に炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉を組み合わせた熱風炉操業の低コスト・高効率化

～高効率 BFG 専焼の実現～

Achievement of low cost and high efficiency of Hot Stove operation of both heat medium circulation type WHRS and Top-Combustion Hot Stove with Metallic Burners

～Realization of highly-efficient solely BFG operation～

嶋津 弘志 Hiroshi SHIMAZU
製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第一部
商品技術室 室長

石川 裕信 Hironobu ISHIKAWA
製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第一部
商品技術室 製鉄技術グループ
グループ長

前川 典正 Norimasa MAEKAWA
製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第一部
商品技術室 製鉄技術グループ
マネージャー

薄井 健吾 Kengo USUI
製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第一部
商品技術室 製鉄技術グループ

嶋村 剛士 Tsuyoshi SHIMAMURA
製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第一部
商品技術室 製鉄技術グループ

抄 録

排熱回収設備とは、高炉に高温空気を供給するための設備である熱風炉から出る排ガスの熱エネルギーを再利用し、エネルギーコストを削減するための設備である。

当社の熱媒循環式排熱回収設備は、熱回収量が調整可能、受熱部・加熱部を単独で設置可能、という特徴を持ち、①高い熱回収効率、②安価な高炉ガスのみによる操業(BFG 専焼)をより少ない高炉ガスで実現可能、③レイアウト自由度が高く既設設備への導入が容易、というメリットがある。

また、当社が開発した燃焼効率の高い炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉と組み合わせることで BFG 専焼をより高効率に実現できる。本稿では、これら設備の技術的優位性について述べる。

Abstract

A Waste gas Heat Recovery System(WHRS)for Hot Stove which supplies hot air to a Blast Furnace is an equipment to reduce the energy cost by reusing the waste gas heat energy of Hot Stove. Our WHRS is of heat medium circulation type, and has characteristics that enable to control the recovered heat and also provide the flexibility to install the heat receiving unit and heating unit separately, resulting in advantage of①High efficiency of heat recovery, ②Operation in Hot Stove by solely affordable Blast Furnace Gas(Solely BFG Operation)with less consumption of Blast Furnace Gas, ③High layout flexibility resulting in easy installation our WHRS to existing Hot Stove.

Furthermore in combination with Top-Combustion Hot Stove with Metallic Burners which has high combustion efficiency(described in technical review of our company in 2013), Solely BFG Operation can be realized with higher efficiency. In this report, we describe technical advantages of these equipments.

1 緒言

1.1 はじめに

世界の鉄鋼需要は今後も新興国を中心に成長を続けることが予想される。鉄鋼業が消費するエネルギーは世界全体のエネルギー消費量の約15%と非常に大きく、中でも高炉の占める割合は最も大きい。従って CO₂排出量削減や新興国の電力不足等の観点から高炉の省エネルギー化に取り組むことは非常に重要であり、さらに省エネルギー化による操業コスト低減や高効率化を期待することができる。こうした中で日本の粗鋼 1t 当たりのエネルギー消費量は世界で最も低く、当社も50年以上に渡って日本の高炉及びその付帯設備の設計、製作、工事、さらに開発、改善を行い、その省エネルギー化に貢献してきた。本稿では高炉の付帯設備の一つである熱風炉の省エネルギー化による操業コスト低減・高効率化を実現した技術を紹介する。

1.2 熱風炉設備及び排熱回収設備の概要

熱風炉とは高炉に約1200℃の高温空気を連続的に供給するための設備で、「高炉へ送られる空気を予熱する蓄熱式の熱交換器」である。図1に熱風炉概要を示す。

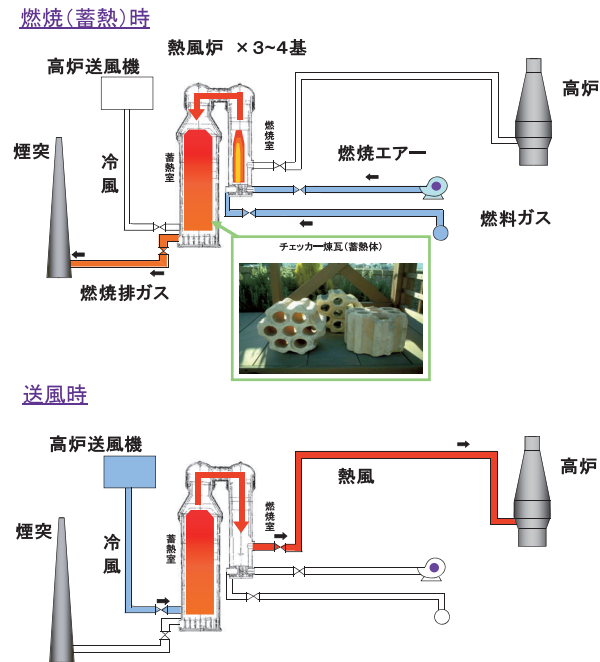


図1 熱風炉設備概要
Fig. 1 Schema of Hot Stove System

燃焼(蓄熱)時は燃焼室のバーナーでガスを燃焼させ、発生した高温の排ガスで蓄熱室に敷き詰めたチェッカー煉瓦に膨大な熱量を蓄熱する。送風時には大量の空気をチェッカー煉瓦に通すことで煉瓦から熱を奪い約1200℃まで昇温させる。

また、排熱回収設備とは熱風炉から排出される約300℃の排ガスから熱エネルギーを回収する設備である。図2に当社の排熱回収設備のフローを示す。熱交換器①で回収した熱エネルギーを熱媒により搬送し、熱交換器②、③で燃焼ガス及び燃焼空気を予熱することにより熱風炉に投入するエネルギーコストを削減できる。

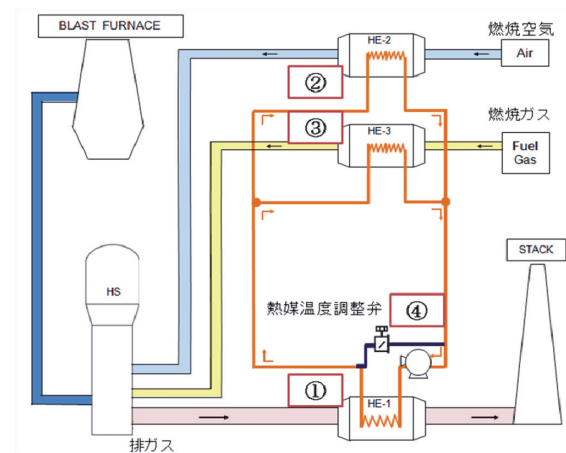


図2 排熱回収設備フロー
Fig. 2 Schematic diagram of waste-gas heat recovery system

1.3 BFG 専焼とは

熱風炉のバーナー燃焼に用いられる燃焼ガスはBFG(高炉ガス)が主に用いられるが、BFGはカロリーが低いため、COG(コークス炉ガス)、LPG等の高カロリーガスを付加している。

ここで、燃焼ガス及び燃焼空気をさらに高温まで予熱すればBFGのみで所定の送風温度を達成することができるため(以下 BFG 専焼と言う)、高カロリーガスを使用する必要がなくなり、大きなコストメリットを享受できる。

BFG 専焼は他社の昇温システムでも実現可能であるが、当社は以下の二つの技術により、他方式よりも低コストにBFG 専焼を実現することができる。

①当社の熱媒循環式排熱回収設備(以下 NSENGI 熱媒循環式という)及び追い炊きバーナーを用いた昇温システム。

②燃焼効率の高い炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉

表1にBFG+COG混焼の場合とBFG専焼の場合のBFG-COG使用量を示す。これらは、高炉の炉容積約5,000m³、送風温度約1,250℃の前提で試算した。

表1 BFG専焼によるメリット
Table 1 Merits acquired by Solely BFG Operation

排熱回収方式	BFG+COG混焼		BFG専焼	
	他方式 (ヒートパイプ式)	NSENGI 熱媒循環式	他方式 (ヒートパイプ式)	NSENGI 熱媒循環式+炉頂 燃焼メタリック バーナー式熱風炉
燃焼ガス温度[℃]	145	201	295	295
燃焼空気温度[℃]	173	251	295	295
BFG使用量[Nm ³ /年](熱風炉バーナー用)	1,887×10 ⁶	2,037×10 ⁶	2,209×10 ⁶	2,209×10 ⁶
BFG使用量[Nm ³ /年](追吹きバーナー用)	-	-	246×10 ⁶	126×10 ⁶
COG使用量[Nm ³ /年]	86×10 ⁶	46×10 ⁶	0	0

→ COG使用量 ▲40×10⁶Nm³/年
→ BFG使用量 ▲120×10⁶Nm³/年

この様にBFG+COG混焼の場合NSENGI熱媒循環式の方が他方式に比べCOG使用量が少なく済む。また、NSENGI熱媒循環式及び炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉を採用することにより、他方式に比べ少ないBFG量でBFG専焼を実現できる。本稿では、この様に熱風炉操業の高効率化、低コストを実現した上記二つの技術について述べる。

2 NSENGI熱媒循環式排熱回収及び追い炊きバーナーを用いた昇温システムの特徴

当社が独自に技術開発を行い、多数の実績を持つ熱媒循環式排熱回収設備の特徴として、熱回収量が調整可能である点、受熱用・加熱用熱交換器が別々に設置できる点が挙げられる。それにより、他方式に比べ、以下(1)~(3)のメリットを享受できる。

- (1)高い熱回収効率(ランニングコスト低減)
- (2)BFG専焼におけるBFG量の削減
(ランニングコスト低減)
- (3)高いレイアウト自由度による既設熱風炉への容易な導入
(イニシャルコスト低減)

以下では、ヒートパイプ式等の他方式(熱回収量

調整不可、受熱用・加熱用熱交換器一体型)と比較することにより、(1)~(3)の技術的優位性について説明する。

(1)「高い熱回収効率」(ランニングコスト低減)

図3に他方式の排熱回収設備フローを示す。

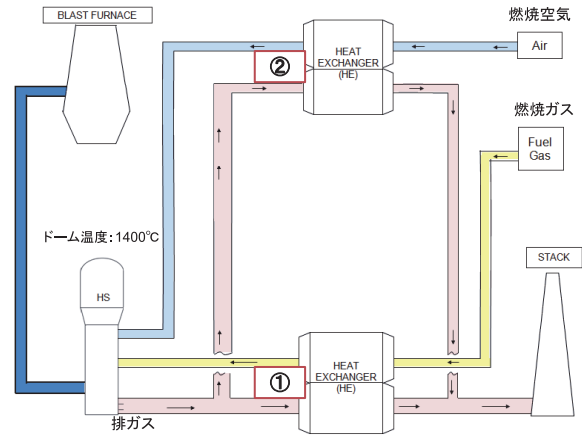


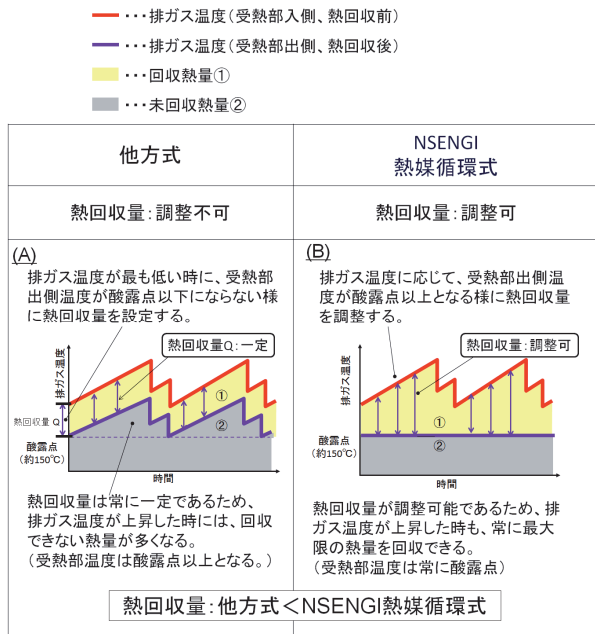
図3 他方式排熱回収設備フロー
Fig. 3 Other type waste-gas heat recovery system

図2に示すNSENGI熱媒循環式が受熱用熱交換器①で回収した熱を熱媒で移動し、加熱用熱交換器②③で燃焼ガスと燃焼空気を予熱しているのに対し、他方式は排ガスダクトと燃焼ガス、燃焼空気ダクトを受熱・加熱一体型の熱交換器(図3①、②)に接続し熱交換を行うことで燃焼ガスと燃焼空気を予熱する。NSENGI熱媒循環式と他方式の熱回収量についての比較を表2に示す。

表2に示す様に熱風炉から排出される排ガス温度は時間と共に変動する。蓄熱開始時はチェッカー煉瓦の温度が低いが、チェッカー煉瓦の温度が上昇するに連れて熱風炉から排出される排ガス温度は高くなる。また、熱風炉から排出される排ガスには水分とSOxなどの腐食成分が含まれており、排ガス温度が酸露点(約150℃)以下になると、受熱部表面に酸が発生し腐食が起こる。それを防ぐためには熱交換器入側の排ガス温度が変動した場合でも、熱回収後の排ガス温度を常に酸露点(約150℃)以上に保つ必要がある。

表2-(A)に示す様に他方式は熱回収量を調整できないため、排ガス温度が最も低い時に受熱部出側排ガス温度が酸露点以下にならない様に熱回収量Q

表2 NSENGI 熱媒循環式と他方式の熱回収量の比較
Table2 Comparison of heat recovery amount between NSENGI heat medium type and other type

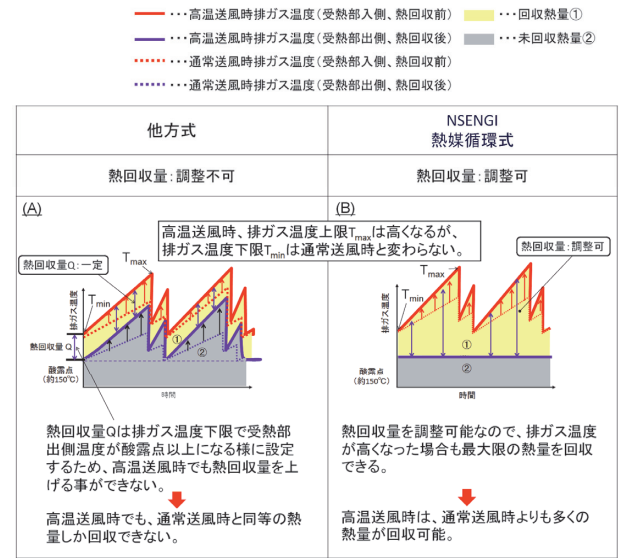


を設定しなければならない。そのため排ガス温度が上昇した場合、熱回収できずに放散される熱量(表2 (A)②)が大きくなってしまふ。結果、熱回収量は表2 (A)黄色面積部①となる。一方、NSENGI 熱媒循環式は熱媒温度調整弁(図2、④)の操作により熱回収量を調整し、排ガス温度が低い場合でも高い場合でも受熱部出側排ガス温度を常に酸露点付近に維持することが可能であるため、最大限の熱量(表2 (B)の黄色面積部①)を回収できる。結果、他方式よりも多くの熱量を回収することができ、その分燃焼ガス・燃焼空気の前熱温度が高くなるため同じ送風温度を達成するのに必要なCOG量が少なくなる。

また、高炉操業の省エネ・省コストの指標として銑鉄1tを生産するために必要な還元材(コークス、微粉炭)の重量、すなわち還元材比が用いられるが、送風温度を高く設定することによりこの還元材比低減等のメリットを享受することが可能である。この場合さらにNSENGI 熱媒循環式と他方式の熱回収量の差が顕著となる。以下にその理由を示す。まず、表3に高温送風時と通常送風時の熱回収量の比較を示す。

高温送風を達成するためには、チェッカー煉瓦により大きな熱量を蓄える必要があり、蓄熱完了前のチェッカー煉瓦温度及び排ガス最大温度(表3 -

表3 高温送風時の熱回収量の比較
Table3 Comparison of heat recovery amount in case of operation of high blast temperature



Tmax)が通常送風時よりも高くなる。一方、排ガス最低温度(表3 - Tmin)は蓄熱開始時の下部チェッカー煉瓦の温度と等しく、それは送風時にチェッカー煉瓦に通す空気温度と等しい。この温度は高温送風時・通常送風時で変わらないため、排ガス最低温度は高温送風時・通常送風時で変わらない。他方式は、前述の様に排ガス温度が最も低い時(表3 (A) - Tmin)に受熱部出側排ガス温度が酸露点以下にならない様に熱回収量 Q を設定するため高温送風を行った場合でも通常送風時と同等の熱量しか回収できない。一方、NSENGI 熱媒循環式は排ガス温度が高くなった場合には熱回収量を上げることが可能であるため、表3 (B)の黄色面積部①に示す様に排ガス最大温度 Tmax が上がった分の熱量を全て回収できる。送風温度を1,250°Cとした場合、ヒートパイプ式と比較して同じ送風温度を得るのに必要なCOG量が年間約40×10⁶Nm³少なくなる。

(2)「BFG 専焼における BFG 量の削減」(ランニングコスト低減)

図4にNSENGI 熱媒循環式、図5に他方式でBFG 専焼を行う場合のフローを示す。BFG 専焼を実現する為に図4、図5で示すように追い炊きバーナーを用いることで燃焼ガス(BFG)・燃焼空気の更なる予熱を行う。

NSENGI 熱媒循環式では追い炊きバーナーで熱

媒を昇温することで加熱用熱交換器にてBFG・燃烧空気を予熱する。また追い炊きバーナーで排出された排ガスは熱風炉からの排ガスと合流し受熱用熱媒交換器にて熱媒を加熱し、加熱用熱交換器にてBFG・燃烧空気を予熱する。一方、他方式は追い炊きバーナーからの排ガスを熱風炉排ガスと混合し、受熱・加熱一体の熱交換器にてBFG・燃烧空気を予熱する。この時、追い炊きバーナーの排ガス温度の調整により、受熱部入り側排ガス温度(図5-T₃)は一定に保つことが可能であるため、熱回収量が一定の他方式でも出側排ガス温度は常に酸露点(150℃)付近に保つことができる。

しかし、NSENGI熱媒循環式は他方式(ヒートパイプ式)と比較して追い炊きに必要なBFG量が年間117×10⁶Nm³少ない。以下にその理由を示す。

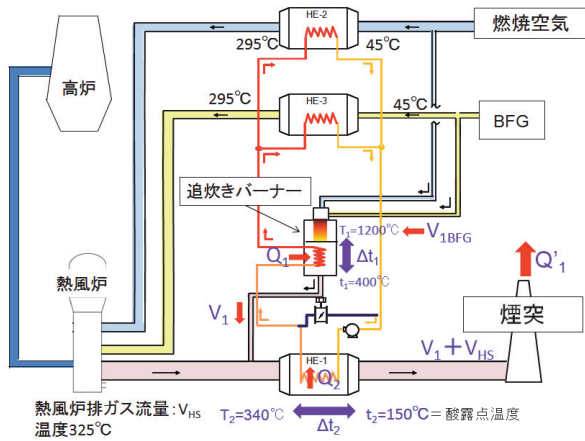


図4 NSENGI熱媒循環式でのBFG専焼
Fig. 4 Solely BFG Operation of NSENGI heat medium circulation type

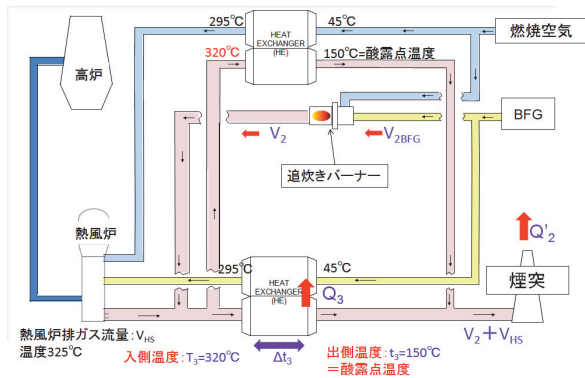


図5 他方式でのBFG専焼
Fig. 5 Solely BFG operation of other type

表4にNSENGI熱媒循環式とヒートパイプ式での追い炊き方式を比較する。(高炉容積約5,000m³、送風温度約1,250℃の前提でBFG専焼を実施した場合。)

表4 熱媒循環式とヒートパイプ式での追い炊き方式の比較
Table 4 Comparison of additional burning system between NSENGI heat medium circulation type and heat pipe type

	NSENGI 熱媒循環式	ヒートパイプ式
回収熱量調整	可能	不可
追い炊きによって得られる熱量Q	$Q = Q_1 + Q_2 = \Delta t_1 \times Cp_1 \times V_1 + \Delta t_2 \times Cp_2 \times (V_1 + V_{HS})$ (1200℃ - 400℃) (340℃ - 150℃)	$Q = Q_3 = \Delta t_3 \times Cp_3 \times (V_2 + V_{HS}) = Q_1 + Q_2 \uparrow$ (320℃ - 150℃)
追い炊きバーナーで排出される排ガス量	V ₁ (Base)	V ₂ ≒ 8V ₁ (※)
追い炊きバーナーで使用するBFG量 V _{BFG}	129 × 10 ⁶ [Nm ³ /年]	246 × 10 ⁶ [Nm ³ /年]
※ Cp ₁ =0.42, Cp ₂ =Cp ₃ =0.35, V _{HS} =11V ₁ として計算		

BFG専焼を達成するためには、熱風炉のバーナー燃焼に用いられるBFG、燃烧空気を295℃まで予熱する必要がある、この時必要な熱回収量(図4-Q₁+Q₂、図5-Q₃)はNSENGI熱媒循環式でも他方式でも変わらない。

ヒートパイプ式の場合、内部の熱媒には水(蒸気)が使用されているため、内部温度が300℃を超えると電離度の上昇により腐食が生じやすくなり、ヒートパイプ内面が劣化する。従って、受熱部内面の腐食を少しでも防ぐために、受熱部入り側排ガス温度(図5-T₃)はBFG・燃烧空気を295℃まで予熱するのに必要な最低温度320℃とする必要がある。(空気を多めに混合し、追い炊きバーナー排ガス温度を下げる。)一方、NSENGI熱媒循環式は使用上限温度の高い熱媒体を用いており、さらに熱媒循環量を調整することにより熱媒温度を使用上限以下に調整可能であるため、追い炊きバーナーの排ガス温度(図4-T₁)はバーナー燃焼排ガス温度1200℃のままが良い。すなわち、受熱部の入り側・出側排ガス温度の差Δt₁をヒートパイプ式のΔt₃に比べ大きく設定できるため、少ない排ガス流量で必要な熱量を得ることができる。(図4-V₁<図5-V₂)

煙突から排出される排ガス温度は同等であるた

め、排出ガス量(図4-V₁、図5-V₂)の少ない NSENGI 熱媒循環式の方が煙突から放散される熱量(図4-Q'₁、図5-Q'₂)が少ない。前述の様に、必要とされる熱回収量は等しいので煙突より放散される熱量の少ない NSENGI 熱媒循環式の方が追い炊きバーナーでの消費 BFG 量(図4-V_{1BFG}、図5-V_{2BFG})が少なくて済む。

表4に示すように BFG・燃焼空気を295℃まで予熱する場合、NSENGI 熱媒循環式はヒートパイプ式と比べて追い炊きバーナーで使用される BFG 量は年間で117×10⁶Nm³少ない。

また、他方式の熱回収量が調整できないタイプの排熱回収設備についても、受熱部が温度上限を超えない様に Δt を小さく設定する必要があるため、ヒートパイプ式と同様に放散する熱エネルギー量が増え、BFG 専焼に必要な BFG 量は NSENGI 熱媒循環式に比べ多くなる。

更に、寿命の観点からみても、前述の様にヒートパイプ式は内面の腐食・劣化が起きやすいため、長年使用していると熱回収効率が低下するが、NSENGI 熱媒循環式は30年以上熱効率が低下することなく使用できる。

(3)「高いレイアウト自由度による既設熱風炉への容易な導入」(イニシャルコスト低減)

既設熱風炉に導入する場合、NSENGI 熱媒循環式は図2に示す様に排ガス煙道内の受熱用熱交換器(図2①)、燃焼空気および BFG ダクト内の加熱用熱交換器(図2②、③)をそれぞれ単独で設置できるため、他方式の様にダクト同士を接近したレイアウトに変更する必要が無く、導入時のコストが少なくて済む。

3 BFG 専焼に適した NSENGI 炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉

当社製熱風炉の商品ラインナップには内燃式、外燃式、炉頂燃焼式がある。内燃式は燃焼室及び蓄熱室が仕切壁で仕切られたコンパクトな構造となっているのに対し、外燃式は燃焼室と蓄熱室が別々に分かれており大型高炉にも対応できる。(内燃式も内燃改善型の開発により大型高炉に適応可能となっ

た。)当社はさらなる低コスト、省エネニーズに応えるため、炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉を開発、商品化した¹⁾。

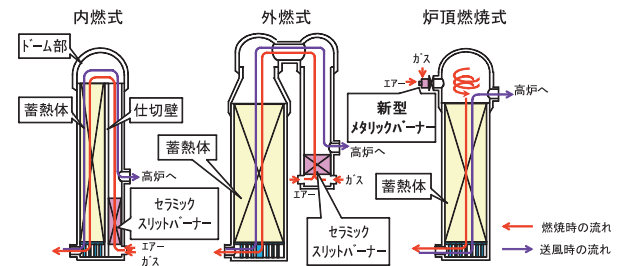
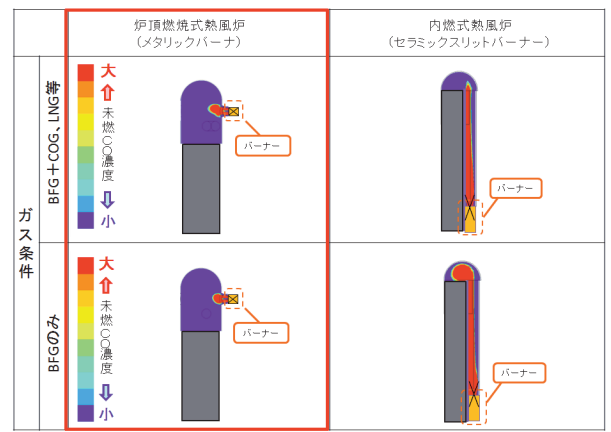


図6 熱風炉形式
Fig. 6 Type of Hot Stove

BFG 専焼を実施した場合、BFG は COG に比べガスカロリーが低く燃えにくい気体のため、従来の熱風炉用バーナーでは未燃 CO が増えてしまうという課題があった。しかし当社の炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉は複雑な流路を持ったメタリックバーナーを採用しており、燃焼空気と燃焼ガスの高い混合燃焼性を実現している。従って炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉は BFG 専焼に適した熱風炉であると言える。

表5に炉頂燃焼式・内燃式それぞれの BFG+COG、LNG で燃焼させた場合、BFG のみで燃焼させた場合の燃焼性を解析にて比較した図を示す。表5の結果より、炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉は BFG 専焼を行った場合でも未燃 CO が少なく高い燃焼性を確保できていることがわかる。(バーナー開口部でほぼ完全燃焼している。)未燃 CO 濃度は、セラミックバーナーと比較して約 1/10まで低

表5 バーナー燃焼性比較(未燃 CO 濃度分布図)
Table 5 Comparison of burner combustibility
(Distribution chart of unburned CO concentration)



減できるためエネルギー使用量を年間 $7.1 \times 10^3 \text{GJ}$ 削減することができる。これはBFGに換算すると年間 $2.4 \times 10^6 \text{Nm}^3$ の削減に相当する。

4 結言

以上、NSENGI 熱媒循環式排熱回収及び追い炊きバーナーを用いた昇温システムと、燃焼効率の高い炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉によってBFG専焼をより低いイニシャルコスト・ランニングコストで実現でき、大きなコストメリットを享受できることを述べた。NSENGIでは、今後も変わりゆくユーザーのニーズに対応し、高炉及びその付帯設備の技術開発を継続的に行っていく。

参考文献

- 1) 前川典正, 井上航哉, 嶋津弘志, 古谷俊治, 国重直樹, 大下伸浩, 金満秀和: 新型熱風炉/炉頂燃焼メタリックバーナー式熱風炉の商品化: 新日鉄住金エンジニアリング技報 Vol. 4(2013)