

# 焼結点火炉高加熱効率バーナの開発

## Development of High-efficiency Burner at Ignition Furnace of Sinter Plant

堀川 透理 HORIKAWA Yukimasa JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 設備部 開発・設計室 主任部員 (副課長)  
岩田 好司 IWATA Koji JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) エネルギー部 エネルギー技術室 主任部員 (課長)  
野中 俊輔 NONAKA Shunsuke JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) 製鉄部 製鉄技術室 主任部員 (副課長)

### 要旨

地球温暖化防止のために CO<sub>2</sub> 排出量削減が求められるなかで、JFE スチールでは、高炉の原料である鉄鉱石を処理する焼結工場の燃料ガス使用量を大幅に削減できるバーナを開発した。開発したバーナは、従来のバーナでは吹き消えてしまう高い流速での安定燃焼を可能とするもので、原料の加熱効率を向上させることができる。開発バーナを社内焼結工場へ導入し、燃料ガス使用量および CO<sub>2</sub> 排出量を削減した。

### Abstract:

To reduce CO<sub>2</sub> emissions for the prevention of global warming, JFE Steel has developed a burner that can significantly reduce the amount of fuel gas used in the sintering plant, where iron ore, which is the raw material for blast furnaces, is processed. The developed burner enables stable combustion at high flow rates that may cause conventional burners to flame out, and improves the heating efficiency of raw materials. By introducing the developed burner into sintering plant in JFE Steel, reduction in fuel gas usage and CO<sub>2</sub> emissions have been achieved.

### 1. はじめに

近年、地球温暖化防止のため、温室効果ガスの排出量削減が求められている。温室効果ガスの 90% 以上は CO<sub>2</sub> であり、**図 1** に示すとおり、近年の CO<sub>2</sub> の排出量は徐々に増加している<sup>1)</sup>。また、**図 2** のグラフは日本の CO<sub>2</sub> 排出量を産業別に分類したものであり、鉄鋼業は全体の 15% を占めている<sup>2)</sup>。このことから、鉄鋼業での CO<sub>2</sub> 削減技術の開発は地球温暖化防止に大きく貢献できると考えられる。

筆者らは、焼結工場の点火炉で、燃料ガス使用量を削減しエネルギーを節約できる新しいタイプのバーナを開発した。バーナの技術的特徴の 1 点目は、高い吐出流速である。従来バーナの 3 倍以上の吐出流速とすることで、加熱面での熱伝達率を増加させて加熱力を向上させた。2 点目は、1 台のバーナが 2 系統のノズルをもつ構造となっており、メインノズルが高速火炎を形成し、サブノズルがメイン火炎を安定して保持するという役割を持つことである。開発したバーナは、2015 年に JFE スチール 西日本製鉄所 (倉敷地区) の第 2 焼結工場に初めて導入された。燃料ガス使用量は以前より約 30% 削減され、現在も稼働中である。

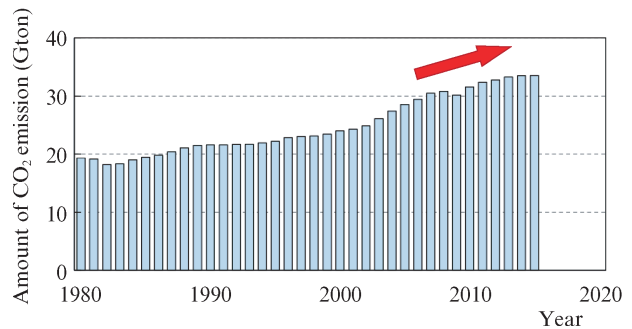


図 1 世界の CO<sub>2</sub> 排出量推移

Fig. 1 Global CO<sub>2</sub> emissions

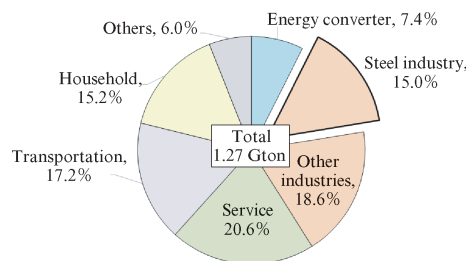


図 2 産業別 CO<sub>2</sub> 排出量 (2015 年)

Fig. 2 CO<sub>2</sub> emission by sector in Japan, 2015

2023 年 9 月 26 日受付

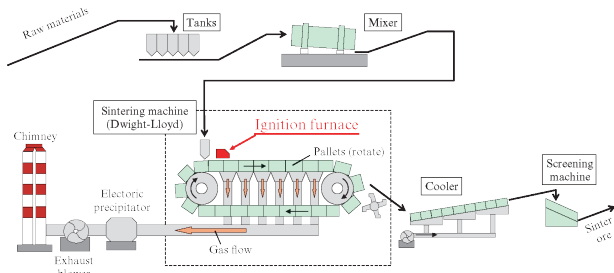


図3 焼結工場のマテリアルフロー  
Fig. 3 Material flow at sinter plant

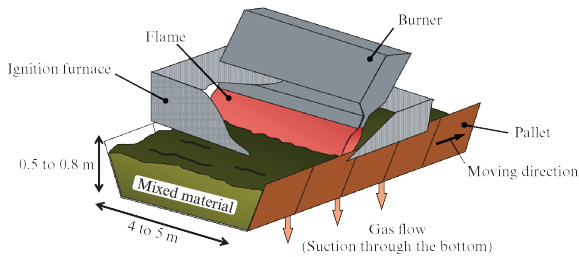


図4 点火炉模式図  
Fig. 4 Composition of ignition furnace

## 2. 焼結プロセスと点火炉

高炉の鉄源として使われる焼結鉱は、焼結工場で生産される。図3に焼結工場のマテリアルフローを示す。主原料である鉄鉱石に、副原料として粉コークス、石灰、水を加えて混合した後、着火して焼結する。混合原料に着火するため、図4に示すとおり、原料で満たされたパレットの上方に点火炉と呼ばれる設備が設置されている。点火炉の天井部分にはバーナが設置されており、下向きに火炎を形成して原料層表面を加熱し、原料内の粉コークスに点火する。点火後は、パレット底面からの吸引により燃焼反応が下方へと進み、すべての原料が焼結反応を完結させる。

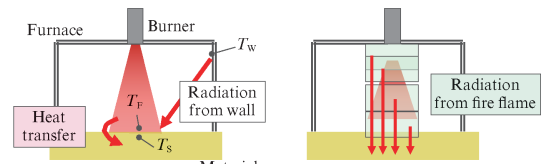
点火炉の役割は、原料を粉コークスの着火温度である約900℃へと加熱し、焼結反応を開始させることである。さらに、幅約5mのパレットの幅方向に均等に着火することが求められる。着火が不十分であれば、燃焼不足と品質不良を引き起こすことから、点火炉は焼結工場の中で重要なプロセスの1つである。

## 3. 2段燃焼式高流速バーナの開発

### 3.1 加熱能力の増加

図5に、点火炉内におけるバーナから原料への伝熱プロセスをモデル化したものを示す。原料への入熱は、①原料表面における火炎からの熱伝達、②炉壁からの輻射、③火炎からの輻射、の3つの経路に分けることができ、それぞれ

$$Q_{total} = \alpha(T_F - T_S) + \phi_{CG}(T_w^4 - T_S^4) + \sum_{i=1}^n [\sigma \epsilon_i \epsilon_s F_i (T_{Fi}^4 - T_S^4)]$$



$\alpha$ : Heat transfer coefficient

図5 点火炉の加熱能力

Fig. 5 Heating capacity of ignition furnace

図に示すような式で書き表すことができる。

今回、①原料表面における火炎からの熱伝達に注目し、これを増加させることで全体の伝熱量  $Q_{total}$  の増加を狙った。原料表面における火炎から原料表面への伝熱量  $Q$  は、

$$Q = \alpha(T_F - T_S)A \dots\dots\dots (1)$$

で表せる。ここで、 $\alpha$ は熱伝達係数、 $T_F$ は火炎温度、 $T_S$ は原料表面温度、 $A$ は伝熱面積である。

パレット全長に均一に加熱するため、点火炉バーナのノズルは、通常幅方向に一直線に並ぶように配列される。そのため、このようなノズルからの流れは、図6に示すような二次元衝突噴流群としてモデル化できる。伝熱面における平均ヌセルト数  $Nu$  は、

$$Nu = 0.36Re_a^{0.62} \dots\dots\dots (2)$$

$$Re_a = \frac{V_a X}{\nu} \dots\dots\dots (3)$$

である<sup>3)</sup>。ここで  $V_a$ は衝突速度、 $X$ はノズルのピッチ、 $\nu$ は

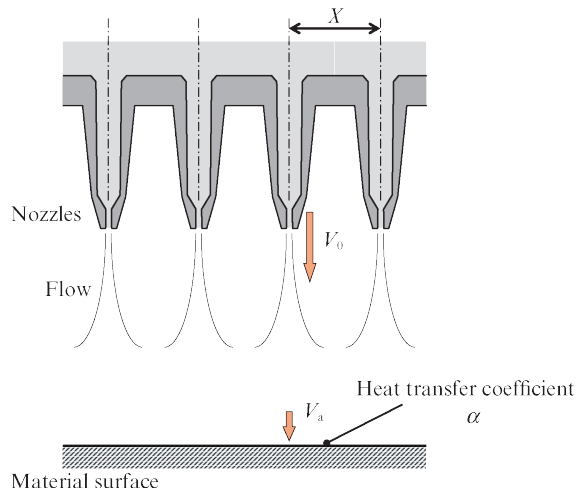


図6 二次元噴流ノズルのモデル

Fig. 6 Two-dimensional multiple jet impingement model

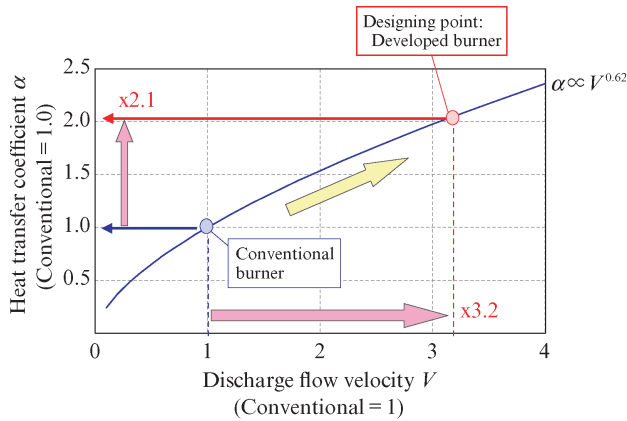


図7 流速設計ポイント

Fig. 7 Design point of developed burner

動粘度である。

$\alpha$  と  $Nu$  の関係は、

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

である。ここで  $L$  は代表長さ、 $\lambda$  は熱伝導率である。最後に、衝突速度  $V_a$  は、吐出速度  $V_0$  に比例し、

$$V_a \propto V_0 \dots\dots\dots (5)$$

となる。

式1~5より、伝熱量  $Q$  と吐出流速  $V_0$  の関係は次の式にまとめられる。

$$Q \propto V_0^{0.62} \dots\dots\dots (6)$$

したがって、吐出流速を増加させることで、伝熱量  $Q$  が増加することがわかる。今回の開発では、図7に示すように、従来比2倍以上の熱伝達率が得られるよう、吐出流速を従来比3.2倍となるように設計した。

### 3.2 2段燃焼式高流速バーナの開発

図8に、新しく開発したバーナの断面構造、および燃焼メカニズムを示す。

従来のバーナは、図8左に示すように、2系統の流路(1系統のガスと1系統の燃焼空気)から構成されている。ガスと燃焼空気はバーナ内部で混合され、スリット形状(紙面鉛直方向)のノズルから吐出される。混合気は吐出直後に燃焼し、帯状の火炎を形成することで原料を幅方向に均一に加熱する。前述のとおり、吐出流速と熱伝達係数は相関関係にあり、吐出流速の増加により加熱力が增大することは明らかであったが、実際にはある流速以上で火炎が不安定となり吹き消えが発生する。そのため、従来のバーナには吐出流速に上限があった。

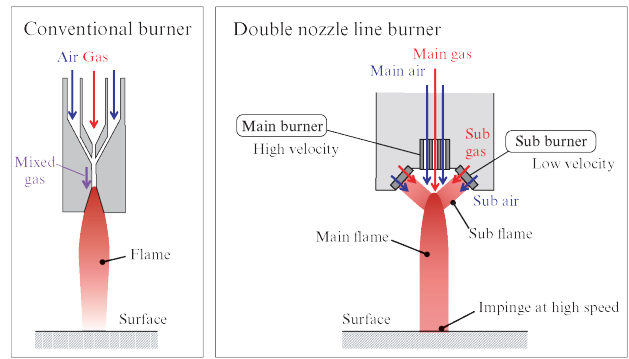


図8 バーナ断面模式図

Fig. 8 Composition of conventional burner and double nozzle line burner

これに対して今回開発したバーナは、図8右に示すように、高流速を達成するメインバーナのノズルが中央に位置し、そのメインバーナを挟むように両隣にサブバーナが配置された構造である。開発バーナは合計4系統の流路、すなわち2系統のガス(メインガス、サブガス)と、2系統の燃焼空気(メインエア、サブエア)を持ち、各流量はそれぞれ独立に制御される。

メインバーナからは従来の3.2倍の流速でガスとエアが吐出されるが、吐出直後は流速が大きく燃焼を継続できない。ノズルからある程度離れて減速したところに、サブバーナの火炎を連続的に供給することでメインバーナに着火する。着火したメインバーナの火炎は、高流速を保ったまま原料表面に衝突するため、原料に対して高い熱伝達率を得ることができる。以上が開発バーナの燃焼メカニズムである。

実際に、後述のオフライン実験では、メインバーナ単独では吹き消えを起こし、燃焼が継続できなかった。このことから、サブバーナの安定燃焼が大切であることが分かる。

## 4. 焼結工場への導入

### 4.1 オフライン実験

燃焼メカニズムおよび加熱力向上を確認するため、写真1に示すような点火炉を模したオフライン実験炉を製作し、従来バーナと開発バーナの燃焼実験を実施した。図9に示すように燃焼方向は上から下である。熱電対を挿入して火炎温度を直接測定するとともに、バーナ直下に設置した水冷チラーへの入熱量(給排水の温度差×流量×比熱)により加熱能力を評価した。

図10に両バーナの火炎温度分布を示す。従来バーナは、ノズルの内部(三角形の部分)に火炎が形成され、ノズルのすぐ近くに高温ポイントが存在していた。一方で開発バーナは、炉の中段からチラー面にかけて安定した火炎が存在し、高温ポイントが伝熱面近く(ノズルから遠く)に存在していた。これらの結果により、前述の燃焼メカニズムが確認

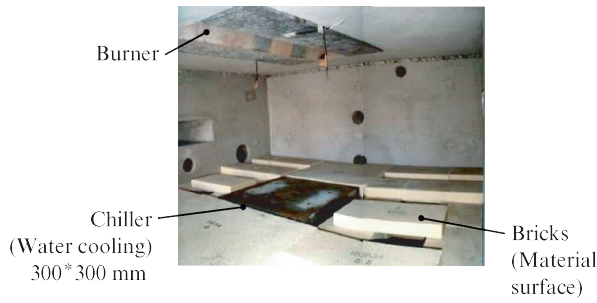


写真 1 オフライン実験炉  
Photo 1 Inside of experimental furnace

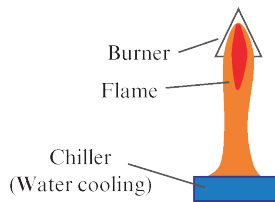


図 9 火炎模式図  
Fig. 9 Composition of fire

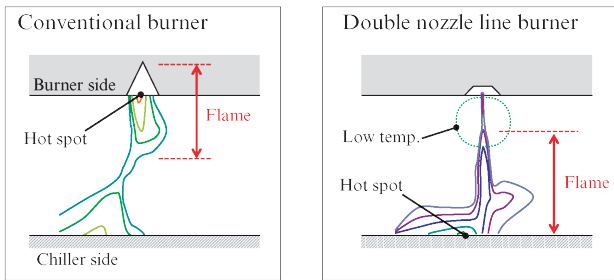


図 10 バーナ火炎温度  
Fig. 10 Temperature distributions of two burners

できた。

次に、図 11 に加熱力を測定した結果を示す。横軸は燃料ガス使用量、縦軸はチラーへの入熱量を示す。開発バーナの入熱量は従来に比べて 32% 増加しており、また、同じ入

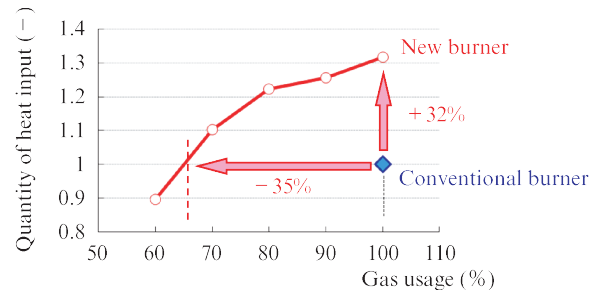


図 11 燃料ガス使用量と入熱量の関係  
Fig. 11 Gas usage vs. quantity of heat input to chiller

熱量を得るために 35% の燃料ガスを削減できることが確認できた。

## 4.2 実機導入

開発バーナは、2015 年 11 月に JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）の第 2 焼結工場を実機化され、燃料ガス使用量は導入前と比べて約 30% 削減できた。生産量や品質は導入前と同等である（品質＝強度、粒度、成分など）。

燃料ガス使用量の削減により、年間 2100 t の CO<sub>2</sub> 排出を抑制できた。

## 5. おわりに

燃料ガス使用量の削減を目的として、2 段燃焼式高流速バーナを開発した。開発バーナの特徴は以下である。

- (1) 吐出流速を増加させて、原料表面の熱伝達率を増加
- (2) 2 段燃焼構造により、高速火炎を安定的に維持

2015 年に実機に導入し、燃料ガス使用量を 30% 削減できた。

### 参考文献

- 1) GLOBAL NOTE web site, <http://www.globalnote.jp/post-3235.html>.
- 2) Based on the data from "National Institute for Environmental Studies".
- 3) 日本機械学会. 伝熱工学資料. 5 版, 丸善出版, 2009, 332p (p. 40).