高炉微粉炭多量吹込み用収束－拡大型 分散強化ランスの開発

村井 亮太^{1)*}・柏原 佑介¹⁾・村尾 明紀¹⁾・佐藤 道貴¹⁾

Convergent-Divergent Injection Lance for the Enhancement of Combustion Efficiency of Pulverized Coal at Blast Furnace
Ryota MURAI, Yusuke KASHIHARA, Akinori MURAO and Michitaka SATO

Synopsis : To achieve a high rate injection of pulverized coal into a blast furnace, it is so important to increase a combustion efficiency of pulverized coal. Enhancement of particle dispersion is one of the measures to increase combustion efficiency by accelerating oxygen-coal particle mixture in blowpipe to tuyere region. To realize this, it is found that convergent - divergent injection lance designed on the basis of fluid dynamics has superior characteristics. Divergence angle of the lance is optimized as the maximum angle free from the flow separation phenomenon in the boundary layer and convergence angle of the lance is optimized considering the inertia of coal particle in the gas-solid two phase flow. Optimum divergence angle and convergence angle is found to be 7 and 5 degrees respectively. Direct observation results by offline apparatus, hot model experiments and even in the actual blast furnace proves that dispersion of pulverized coal particles is enhanced considerably. It is confirmed that permeability is improved at an actual blast furnace when the developed lances are installed. This result suggests that high combustion efficiency had been achieved by the enhancement of particle dispersibility. It is thought that the convergent - divergent lance can be one of the practical solutions for the stable operation with high rate injection of pulverized coal because the lance can be installed almost all blast furnaces easily by its simple configuration without a large amount of investment.

Key words : blast furnace; pulverized coal; injection; convergent; divergent; lance; combustion efficiency.

1. 緒言

高炉における微粉炭吹込みは、コークス使用量の削減に寄与することに加え、含有する水素が鉄鉱石を還元すると水素還元率が増大し、炭酸ガス排出抑制に資するため、これまでに広く普及してきた¹⁻⁴⁾。

高炉への微粉炭多量吹込みを安定して継続するためには微粉炭の燃焼率向上が重要とされてきた⁵⁻⁸⁾。従来から微粉炭吹込みによるコークス粉発生量の増大に関する研究、および発生粉の炉心への蓄積等が高炉の通気通液性に及ぼす影響に関する研究がいくつか報告されているが、たとえばSatoら⁹⁾は微粉炭燃焼率向上によりレースウェイ近傍におけるコークス粉生成が抑制され、これが高炉内通気性の改善に寄与すると報告した。

高炉における微粉炭の燃焼率の向上のためにこれまでに多様な吹込みランス、例えばダブルランス¹⁰⁾、偏芯ダブルランス¹¹⁾、ランス先端部を斜めに切断加工することで乱流拡散を強化したランス¹²⁾、旋回流形成ランス¹³⁾などが提案されてきた。これらの微粉炭吹込みランスの共通点は微粉

炭粒子の分散を強化することにある。ブローパイプや羽口においては熱風の流線方向の運動量が支配的であり、流れに垂直な方向への粒子分散は限定される傾向にある。多点からの吹込みや乱流による流れに垂直な方向への運動量輸送は流れに同伴される微粉炭粒子の分散強化に対し有効と考えられる。また、これらとは別に多重管を用いて純酸素と微粉炭を同時に吹込むオキシコールランスも提案されてきた^{13,14)}。このランスを用いると、微粉炭の燃焼場における酸素分圧を直接増加させることができる。このため微粉炭の燃焼率は大きく向上する。一方で、これらの微粉炭吹込みランスは改造のため多額の投資を伴うものであったり、多くの純酸素を必要とするものであった。

本研究では、ランス先端部に収束－拡大型構造を持つ分散強化型ランスを提案した。微粉炭粒子は収束部において搬送ガスと固体である自身の慣性力の差を利用して分散強化され、拡大部においては境界層での剥離現象を制御することによりブローパイプから羽口に渡る領域において分散強化されると推定された。このタイプのランスはランス先端部分を変更するだけで比較的簡便に燃焼率を向上でき、既

原著論文：ISIJ Int., Vol.56 (2016) , No.5, pp.770-776

平成29年5月11日受付 平成29年6月13日受理 (Received on May 11, 2017; Accepted on Jun. 13, 2017; originally published in ISIJ Int., Vol.56, 2016, No.5, pp.770-776)

1) JFEスチール(株)スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

* Corresponding author : E-mail : r-murai@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-054>

設のランスに容易に組み合わせることが可能である。

著者らは始めに境界層理論に基づいて収束-拡大型分散強化ランスの先端構造を設計した。次に、ランスの先端構造が微粉炭粒子の分散性に及ぼす影響を調査するため、大気雰囲気下で微粉炭粒子分散性を直接観察するオフライン試験を実施した。さらに小型燃焼試験炉（ホットモデル）試験において本ランスのブローパイプ内における微粉炭粒子の分散性およびコークス置換率等の優位性を確認した。以上のようにオフライン試験およびホットモデル試験において収束-拡大型構造を持つ分散強化型ランスの有効性を確認した後、実機高炉において収束-拡大型分散強化ランスの適用試験を実施した。その結果、通気性の改善効果が確認された。分散強化型ランスの適用により微粉炭粒子の分散が強化され微粉炭の燃焼率が向上したこと、および燃焼率の向上によりコークス劣化による粉化が抑制され高炉下部におけるコークス粉の蓄積が軽減されたことに起因するものと推定される。

2. 収束-拡大型ランスによる微粉炭粒子分散強化の概念

2・1 拡大管における流れの剥離現象

微粉炭の燃焼率改善のために微粉炭粒子の分散が重要であることが指摘されてきた。このために拡大管による固気2相流の制御が効果的と考えられる。

入口から出口にかけて流路断面積が拡大する構造を有するいわゆる拡大管は、流体を拡散させる効果を持つ。それゆえ気体に同伴される微粉炭粒子もまた分散される。しかしながら拡大管の広がり角が大きくなると流れの剥離を生じ、流体の拡散は制限されることが知られている。

Fig.1は境界層における流速と、流速の一階および二階微分値を模式的に表したものである。ここで流れの方向を x とし、流れに垂直な方向（厚さ方向）を y とした。境界層における流速、および境界層厚さはそれぞれ $u(x, y)$ 、 $\delta(x)$ と表される。ランス壁面（ $y=0$ ）においてはNavier-Stokesの式とBernoulliの式から

Fig. 1. Schematic diagram of velocity and differential velocity distributions in boundary layer.

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\rho U \frac{dU}{dx} \quad (1)$$

ここで μ 、 ρ および U は流体の粘性、密度、およびポテンシャルフローの流速（ $=u(x, \delta)$ ）である。拡大管の場合ポテンシャルフローの流速 U は x 方向に対して減速するから

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} > 0 \quad (2)$$

が成立する。さらに境界層の外周（ $y=\delta$ ）における境界条件は

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=\delta} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=\delta} = 0 \quad (3)$$

と書けるから、境界層内の流体の流速 u はFig.1に示すように流れに垂直な方向に対して変曲点をもつことになる。これは境界層内の流速 u が直管または収束管の場合に単調増加することと対照的である。

下流に向けて流速が低下すると速度勾配 $\partial u / \partial y$ もまた減少する。吹込みランス壁面で速度勾配がゼロになるとFig.2に示すように流れの剥離現象が生じる。

拡大管の広がり角が流れの剥離現象に及ぼす影響は、過去実験的に¹⁵⁾、あるいは数値解析等¹⁶⁻¹⁸⁾によって研究されている。それら既報告によれば流れの剥離を防止できる最大の拡大管の広がり角は5度から10度の間である。このことから本研究では、既往の研究を参考に最適な拡大管の広がり角を実験的に決定することとした。

2・2 収束管内における粒子挙動制御

Fig.3は搬送ガスに同伴される微粉炭粒子の流線を模式的に示したものである。単純拡大管と収束-拡大型構造を持つ分散強化型ランスを比較して示した。収束-拡大型構造のスロート部において、固気混相流は圧縮され、流線が密となる。固体粒子の慣性により粒子密度はスロート部の周辺部でより高密度化する。拡大管部において中心部分の固体粒子および気体はともに直進するのに対し周辺部の固体粒

Fig. 2. Schematic diagram of velocity distribution in boundary layer in the vicinity of inner wall of divergent lance.

子および気体は分散する。これにより収束－拡大型構造を持つランスの分散性は（収束部を持たない）単純拡大型の分散性に比較して向上するものと推定される。

3. 微粉炭粒子流れの直接観察

3・1 実験装置

Fig.4は微粉炭粒子の分散性を直接観察するためのオフライン実験装置を示す。本装置は気流輸送装置、微粉炭貯留槽、テーブルフィーダー、吹込みランスおよびビデオ撮像装置から構成されている。大気中への微粉炭粒子の分散挙動観察が可能で、分散角度はビデオ画像の画像解析により測定可能である。ここで基準条件としては吹込みランスの内径を12.7 mm、ランス出口におけるガス流速を15 m/sに設定した。ガス流速が分散角度に及ぼす影響を調査するためランス出口におけるガス流速を7.5 m/sとして比較を実施した。

Fig. 3. Schematic diagram of pulverized coal flow accompanied by carrier gas compared with a simple diffuser and convergent-divergent lance tip.

Fig. 4. Schematic diagram of offline apparatus for observation of pulverized coal dispersibility.

3・2 微粉炭吹込みランス先端構造の設計

前章で示したオフライン実験装置を用いて、微粉炭吹込みランスの先端構造が微粉炭粒子の分散挙動に及ぼす影響を調査した。ランス先端内部にスロート部を設けることで収束－拡大型ランスを形成した。

まずはじめに拡大管の広がり角度が拡散挙動に及ぼす影響を調査した。収束部の角度は5度、スロート部の径は8.7 mmに固定した。Gibsonによる既報を参考に拡大管の広がり角度は0から10度の間で変化させた。Fig.5にオフライン実験装置による微粉炭粒子分散挙動の測定結果を示す。微粉炭粒子が分散された領域はビデオカメラにより黒色部として撮影される。撮影された画像を解析処理することで分散角度 θ が測定される。拡大管の広がり角度 α が3度の場合、粒子分散角度 θ は2.9度と観察された。同様に α が7度するとき θ は7.1度であった。これらの場合では α の値はおおむね θ と一致した。 α が比較的小さい値では拡大管内での流れの剥離を回避できていることを示している。しかしながら、 α の値がさらに増加すると、 θ は α に追従せず、たとえば α が10度では θ は4.6に減少した。多数の α について実験を実施し、7度超の領域で流れの剥離を生じることが明らかとなった。これらの実験結果を考慮し、最適な拡大管の広がり角度を7度と決定した。

次に、同一の装置を用いて収束部の角度 β が拡散挙動に及ぼす影響を調査した。Fig.6に示すように拡大管の広がり角度 α 、スロート部径およびランス出口における径はそれぞれ7度、8.7 mmおよび12.7 mm一定とした。比較のため、直管（ $\alpha=\beta=0$ 度、ランス出口における径＝スロート

β	α	Lance tip	Dispersion behavior
0°	0°	Flow direction → 	 $\theta = 0.6^\circ$
5°	3°	Throat diameter 	 $\theta = 2.9^\circ$
5°	7°		 $\theta = 7.1^\circ$
5°	10°		 $\theta = 4.6^\circ$

Throat diameter = 8.7 mm (constant)
Inner diameter of outlet = 12.7 mm (constant)

Fig. 5. Effect of lance tip structure on the dispersion behavior of pulverized coal particle.

部径＝12.7 mm) 使用時の測定データを同時に示した。流速 (Reynolds数: Re) の影響を明らかにするため流速が7.7 m/s および15.0 m/sの結果について同図中に示した。これらはそれぞれReynolds数 4.3×10^3 と 8.6×10^3 に対応する。

直管に比較して分散性は収束部の角度 β が2～5度の比較的小さな角度で効果のあることが分かる。しかしながら β がさらに大きくなると、分散角度 θ は減少する傾向を示す。これは粒子がランス内壁と衝突することで散乱されるため粒子の流れに乱れが生じ、収束一拡大ランスの分散性を悪化させたものと推定される。実験結果からReynolds数の影響は小さい。 β の値が小さいとスロート形状を形成するため長さを要することから、ランス設計も考慮して最適な β の値を5度に決定した。

拡大管の広がり角度 α と収束部の角度 β の最適値が決定されたので、次にスロート部を形成する突起の高さ h の最適値について検討した。Fig.7に示すように α 、 β およびランス出口における径をそれぞれ7度、5度および12.7 mmの一定値とした。無次元高さ (スロート部径/ランス出口径) をFig.7中に同時に示した。

分散角度 θ は突起部高さ h が増加するに従って向上した。ここでもReynolds数の影響は大きくない。微粉炭粒子の分散のためには h を大きくすることが望ましいが、ランスの閉塞やランスにおける圧力損失の上昇など、負の影響も考えられることから、 h の最適値として2 mmを採用した。無次元高さ (スロート部径/ランス出口径) では0.7程度に対応する。

Fig. 6. Effect of convergence angle on the dispersion behavior of pulverized coal particle.

4. ホットモデルによる微粉炭の分散性と燃焼挙動調査

4・1 ホットモデル試験炉の概要

前章では微粉炭の大気中における分散挙動を調査した。本章では実高炉における微粉炭の吹込み条件を考慮して熱風気流中における微粉炭粒子の分散挙動を調査した。

Fig.8はホットモデル試験炉の模式図を示す¹⁹⁾。この試験炉はそれぞれ一つのブローパイプ、羽口およびコークス充填層から構成されている。羽口の内径は65 mmであり、ブローパイプの内径は90 mmとした。羽口先端部で1473 Kに調整された熱風がブローパイプを通過してコークス充填層へ供給される。熱風はLPGの燃焼排ガスに所定量の酸素を添加することで酸素濃度24 vol% (大気に対し酸素富化3 vol%) に調整された。ブローパイプにおける温度勾配はおおよそ 1.4×10^{-1} K/mmであった。ホットモデル試験炉の試験条件と本研究で使用した微粉炭の性状をTable 1に示す。

試験において2種類のブローパイプを使用した。微粉炭の分散挙動の観察のためにブローパイプAを用いた。このブローパイプは吹込みランスが熱風の流れ方向に対し平行に挿入されるため、軸対称の分散挙動を観察することができる。しかしながらブローパイプAの場合吹込みランスは1本に限定され、かつ高温の熱風に長時間さらされることから、コークス置換率の算出実験など測定に時間を要するものに適さない。したがって、物質収支 (コークス置換率) の算出実験の際にはブローパイプBを用いた。このブローパイプでは2本の吹込みランスがブローパイプを貫通して設けた穴から挿入される。吹込みランスの先端部をブロー

Fig. 7. Effect of height of peak - shaped projection on the dispersion behavior of pulverized coal particle.

パイプの内壁面にセットすることで熱風が直接吹込みランスに当たることなくブローパイプAに比較して熱負荷を低減できる。したがってブローパイプBを用いることで長期に渡り安定した微粉炭の吹込み実験が可能であり、より実高炉に近い条件での吹込みを実施することができる。

4・2 微粉炭粒子分散性の評価

Fig.9にホットモデル試験炉のブローパイプ内における微粉炭粒子分散挙動を直接観察した結果を示す。観察はブローパイプAを用いて実施した。左図は吹込みランスに直管を用いた場合、右図は収束-拡大ランスを用いた場合を示している。これらは微粉炭粒子と熱風の固気二相流を観察窓を通して流れに垂直な方向からビデオカメラで撮影したものである。分散角度 θ は直管の場合と収束-拡大ラ

ランスの場合それぞれ8.7度および12.4度と観察された。これらの値はオフライン装置で得られた結果に比較して大きい。これは高速気流中に設置されたランス自身により生じる乱流の影響が粒子の分散に大きな影響を与えることを示唆している¹²⁾。いずれにせよ収束-拡大ランスの分散角度 θ がオフライン試験時と同様直管の場合よりも大きいことは特筆に値する。以上のように収束-拡大ランスにおいて流れを制御し、剥離現象を生じないようにすることで微粉炭粒子の分散性を向上し得ることが確認された。

4・3 微粉炭粒子の分散性がホットモデルにおけるコークス置換率に及ぼす影響

微粉炭のコークス置換率を定量するためにブローパイプBを用いてホットモデル実験を実施した。ホットモデルでは複数のランスを使用可能であり、この実験では偏心ダブルランスを採用した¹¹⁾。吹込みランスの先端部分を交換することにより直管を用いた実験と収束-拡大ランスを用いた実験を容易に実施可能である。

微粉炭のコークス置換率はホットモデル実験の物質収支を考慮して次式で与えられる。

$$CRR = \frac{(W_{c0} - W_{c1}) \times C_c}{W_{pc} \times C_{pc}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで CRR , W_{C0} , W_{C1} , W_{PC} , C_C および C_{PC} はそれぞれ微粉炭の кокс置換率 (wt%), 微粉炭吹込みが無い場合の кокс供給質量流速 (kg/h), 微粉炭吹込み時の кокс供給質量流速 (kg/h), 微粉炭の質量流速 (kg/h), コークス中の炭素含有率 (wt%), および微粉炭中の炭素含有率 (wt%) を示す。

Fig.10に示すように収束－拡大ランスを用いた場合の微粉炭のコールス置換率は直管使用時に比べ3wt%程度向上した。収束－拡大ランスの分散性向上効果により熱風中の酸素が微粉炭の燃焼に有効に利用されたことで、コールスの消費速度が減少し、微粉炭吹込み時のコールス供給質量流速 W_{C1} が減少したものと推定される。

Fig. 8. Schematic diagram of hot model experimental furnace.

Table 1. Experimental conditions of hot model.

Experimental conditions of a hot model		
Gas volume		330 Nm ³ /h
Blast temperature		1473 K
Tuyere gas velocity		150 m/s
Coal injection rate		65 kg/h
Oxygen enrichment		3.0 vol%
Pulverized coal rate		200 kg/thm
Properties of pulverized coal		
Size distribution		−74 μm, 80 wt%
Proximate analysis (dry base)		
	V.M.	25.7 wt%
	F.C.	65.3 wt%
	Ash	9.0 wt%

Fig. 9. Observation results of dispersion behavior of pulverized coal in blowpipe of hot model.

5. 実高炉への収束－拡大ランスの適用

5・1 実高炉における粒子分散性の評価

オフライン実験装置およびホットモデル燃焼試験炉において良好な結果を得たことから、収束－拡大ランスを福山製鉄所の実高炉へ導入し、効果を確認した。Fig.11は観察装置の模式図を示す。微粉炭の燃焼挙動を画像処理法により分析した。羽口後方に設置された観察窓を通して高速度カメラ（撮影速度：毎秒13,500コマ）により微粉炭の燃焼挙動を撮影した。ホットモデルと同様実機においては偏芯ダブルランスが採用されている。撮影された画像はFig.12に示すように画像処理装置により加工された。すなわち輝度により画像を256階調に分割した。Fig.12において青の領域は低輝度（低温領域に対応）を示し、赤の領域は高輝度（高温領域に対応）を示している。輝度毎に0-25, 25-50, 50-170および170-255の4つのゾーンに分け、それらを吹込みランス、微粉炭流のうち未燃の領域（Fig.12のゾーンa）、微粉炭流のうち燃焼領域（Fig.12のゾーンb）および背景（Fig.12のゾーンC）と仮定した。これらの輝度データを用いて燃焼領域の比率 $[B/(A+B)]$ を定義した。ここでAおよびBはそれぞれゾーンaとゾーンbの面積（画素数）を表す。 $[B/(A+B)]$ の計算結果をFig.13に示す。また実高炉の操業条件をTable 2に示すが、直管のランスと収束－拡大

大ランスを用いた期間で操業条件、特に送風量、酸素富化率、羽口先理論燃焼温度および羽口先ガス流速等の送風条件は概ね同一であった。 $[B/(A+B)]$ の値が大きい場合、

Fig. 10. Effect of lance tip on coke replacement ratio measured by hot model.

Fig. 11. Schematic diagram of observation equipment for pulverized coal combustion behavior at an actual blast furnace.

Fig. 12. Analysis method of combustibility by the image processing.

Fig. 13. Combustibility index $[B/(A+B)]$ measured in actual blast furnace.

Table 2. Operation conditions of actual blast furnace.

	Straight lance tip	Convergent - divergent lance tip
Inner volume (m ³)	4664	4664
Blast volume (kg/thm)	7017	6928
PCR (kg/thm)	153	154
Oxygen enrichment (vol.%)	5.3	5.3
T.F.T. (K)	2486	2480
Coke Strength DI (-)	82.5	82.3
V _{tuy} (m/s)	221	218

T.F.T.: Theoretical flame temperature
DI: Drum Index (DI(150/15))
V_{tuy}: Gas velocity at tuyere

微粉炭の燃焼が進行していることを示し高燃焼率となっていると考えられる。Fig.13によれば収束一拡大型ランス使用時の $[B/(A+B)]$ の値は、直管型ランス使用時に比較して大きかった。このように、収束一拡大型ランスは実高炉適用時においても、微粉炭の燃焼性改善に優れた効果を持つことが確認された。

5・2 実高炉における収束一拡大型ランス適用時の通気性およびコークス置換率の変化

収束一拡大型ランスが高炉の通気性やコークス置換率に及ぼす影響を調査するため、操業データの解析を実施した。

高炉の通気性を評価するため、 K_L 値（炉下部通気抵抗指数）がしばしば用いられている²⁰⁾。この値の計算には一般に送風圧力が用いられるが、燃焼率の向上（これはブローパイプ内でのガス量増加につながる）は、 K_L 値を大きくする。これは送風圧力が羽口からブローパイプに至る領域の圧力損失の効果を含んでいるためと考えられる。Fig.14は実高炉の炉下部における圧力分布の例を示したものである。ここで P_b は送風圧力を示し、P1からP4は高さ方向の各レベルでの炉内圧力を示す。P1からP4の値は概ね直線近似することが可能である。その後、P1からP4の直線を外

Fig. 14. An example of pressure distribution in lower part of actual blast furnace.

Fig. 15. Effect of lance tip on lower part permeability resistance index (K_L).

挿し羽口レベルの線との交点の圧力を仮定の圧力 P_0 として定義する。この値を用いてブローパイプ内の圧力損失の影響を排除した正味の高炉内コークス充填層の通気性を算出することができる。このようにして修正炉下部通気性指数：修正 K_L 値を以下のように定義する。

$$K_L = \frac{P_0^2 - P_4^2}{V_{bosh}^{1.7}} \quad (5)$$

ここで V_{bosh} はボッシュガス量を示す。

Fig.15は微粉炭吹込みランスの先端構造が実高炉の炉下部通気抵抗指数に及ぼす影響を示す。修正 K_L 値が小さい方が通気性が良いことを示すが、概して修正 K_L 値は微粉炭吹込み比が増大するに伴い増加する傾向を示す。収束一拡大型ランスを適用すると修正 K_L 値（炉内の通気抵抗）は低下する傾向を示す。この現象は収束一拡大型ランスの使用により微粉炭の燃焼率が向上しレースウェイ内でのコークスの劣化抑制に寄与したため、コークス粉の炉心への蓄積が緩和されるなど高炉下部の充填条件が改善されたことによると考えることができる⁹⁾。

6. 結論

高炉における微粉炭の燃焼率改善とそれによる多量吹込みの実現を目的に、収束一拡大型ランスを開発した。オフライン試験装置、ホットモデル燃焼試験炉および実高炉を用いた実験を通じて以下の結果を得た。

- (1) オフライン試験装置による微粉炭粒子拡散挙動の直接観察により、収束一拡大型ランスにおける最適な拡大角は約7度であることが明らかとなった。この最適角度の存在は境界層理論における流れの剥離現象により説明される。
- (2) オフライン試験により観察した微粉炭粒子の拡散挙動から、収束一拡大型ランスにおける最適収束角度は約5度であることが明らかとなった。石炭粒子の持つ慣性力により、ランス内部のスロート部において、周辺部（ランス壁近傍）に粒子の偏流が生じると考えられ、この偏流現象が微粉炭粒子の分散性改善に大きな役割を果たすと推定された。
- (3) ホットモデル燃焼試験装置により高速高温気流中における微粉炭粒子分散挙動を観察した。その結果、収束一拡大型ランスによる微粉炭粒子分散性改善効果は高温高速気流中においても保存されることが明らかとなった。
- (4) ホットモデル実験により算出したコークス置換率は収束一拡大型ランスを用いた場合に高くなった。この結果は粒子の分散性改善により燃焼効率が增大したことに起因すると推定される。
- (5) 収束一拡大型ランスは通常直管による吹込みに比較し

て、微粉炭粒子の分散性向上、高燃焼率および高コークス置換率等が期待でき、実高炉における試験においてもその高い性能が確認された。

文 献

- 1) S.Hayashi, G.Suzuki and T.Kobayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **49**(1963), 655.
- 2) M.Kawabe, S.Wakuri, M.Baba, Y.Ishikawa and A.Hasegawa: *Tetsu-to-Hagané*, **68**(1982), 2393.
- 3) M.Chu, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **44**(2004), 801.
- 4) R.Murai, M.Sato and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **44**(2004), 2168.
- 5) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Konno and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82**(1996), 641.
- 6) K.Tamura, M.Ichida, H.Wakimoto, K.Ono and Y.Hayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **73**(1987), 1980.
- 7) M.Ichida, T.Nakayama, K.Tamura, H.Shioa, K.Araki and Y.Sugisaki: *Tetsu-to-Hagané*, **78**(1992), 1132.
- 8) A.Kasai, H.Iwakiri, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **83**(1997), 551.
- 9) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, A.Maki, A.Shimomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **85**(1999), 717.
- 10) R.Ito, Y.Yoshida, K.Hoshino, F.Noma and T.Suzuki: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **50**(2000), 6.
- 11) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, A.Maki, A.Shimomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **84**(1998), 37.
- 12) N.Ishiwata, T.Uchiyama and K.Takeda: *Kawasaki Steel Giho*, **29**(1997), 37.
- 13) J.W.Wikstom, B.E.Skold and K.Karsud: *Ironmaking Conf. Proc.*, AIST, Warrendale, PA, (1996), 61.
- 14) R.Murai, M.Sato and T.Ariyama: *CAMP-ISIJ*, **10**(1997), 121.
- 15) A.H.Gibson: *Proc. R. Soc. Lond. A*, **83**(1910), 366.
- 16) E.M.Sparrow, J.P.Abraham and W.J.Minkowycz: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **52**(2009), 3079.
- 17) R.W.Fox and S.J.Kline: *J. Fluid. Eng.*, **84**(1962), 303.
- 18) J.P.Johnston: *J. Fluid. Eng.*, **120**(1998), 6.
- 19) T.Ariyama, M.Sato, Y.Yamakawa, Y.Yamada and M.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **80**(1994), 288.
- 20) K.Ishii: *Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation*, Pergamon Press, Oxford, (2000), 149.