転炉スラグ羽口吹込みによる高炉下部通気改善機構と効果の定量化

加藤 嗣憲^{1)*}・笠井 昭人¹⁾・唯井 力造¹⁾・野澤 健太郎¹⁾

Gas Permeability Improvement Mechanism at the Lower Part of Blast Furnace by Converter Slag Injection from Tuyere and Quantification of its Effect

Tsugunori KATO, Akito KASAI, Rikizo TADAI and Kentaro NOZAWA

Synopsis : In order to improve gas permeability around the blast furnace bird's nest region during high pulverized coal injection rate operation, flux injection technology from the tuyere is surveyed with the purpose of decreasing slag hold-up. In this study, converter slag is focused on as the flux material. The advantages of converter slag as an inductant are its low melting point and its smaller endothermic quantity because it is a high FeO pre-melt slag. Results obtained by experiments and actual blast furnace tests are as follows:

- (1) Converter slag melted quickly during flight within the raceway and showed excellent assimilation properties with bird's nest slag.
- (2) Based on the results of slag dripping experiments, a scheme is established which estimates the improvement of gas permeability using the operational conditions for the blast furnace and the converter slag injection conditions.
- (3) A decrease in pressure drop at the lower part of the blast furnace was demonstrated by converter slag injection tests at Kobe No.3 blast furnace. The operational results showed fairly good agreement with those estimated by the scheme of the present study.

Key words : ironmaking; blast furnace; bird's nest; flux injection; converter slag; pressure drop; gas permeability; slag hold-up.

1. 緒言

神戸製鋼所の高炉操業は高価な外部コークスに全量依存しており、溶銑コストの低減を目的に、低コークス比・高微粉炭比操業（以下、PC:Pulverized Coal）を志向している。低コークス比・高PC比操業時は、スパーサーコークス量の低下と炉内ガス量の増大等により、炉内通気性が悪化する。

Fig.1に神戸製鉄所第3高炉でのPC比と高炉部位毎の通気抵抗指数の関係を示す。高PC比操業時には炉下部通気抵抗指数の増加が顕著であり、その原因として、融着帯領域でのコークススリットの薄層化に加え、鳥の巣の形成影響が考えられる。鳥の巣はレースウェイ先においてコークス、銑鉄粒、溶融スラグから形成される低空隙率領域であり、実高炉の解体調査¹⁾や試験燃焼炉の解体調査²⁾で確認され、高PC比操業時や高灰分PC使用時により強固に形成されることが報告²⁾されている。

ここで、レースウェイ高温反応場を活用した粉体吹込み技術の一つにフラックス羽口吹込み技術があり、1980年代には溶銑Si低減を目的として高塩基度フラックスである石灰石やドロマイトの羽口吹込みテストが多数実施³⁻⁵⁾されている。鳥の巣をポッシュスラグとPC灰分等で形成さ

Fig. 1. Relationship between PC rate and gas flow resistance index.

2019年6月13日受付 2019年7月30日受理 (Received on Jun. 13, 2019; Accepted on Jul. 30, 2019)

1) (株) 神戸製鋼所技術開発センター (R&D Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa Hyogo 675-0023)

* Corresponding author: E-mail: kato.tsugunori@kobelco.com

DOI: <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-065>

れる低塩基度・高粘性スラグの動的滞留域であると仮定すると、一連の羽口フラックス吹込みテスト時に平衡論的にはスラグ粘度低下によりホールドアップ量が低下するため、炉下部通気性の改善が期待できる。しかしながら、実高炉でのテスト操業では溶銑中Si濃度の低下は確認⁴⁾されたものの、炉下部通気改善の有無について明らかではなく、また、最終的にこの技術は実用化されていない。

一例として、2007年に神戸製鉄所第3高炉で実施した石灰石吹込みテストの結果をFig.2に示す。石灰石5.0 kg/tpの吹込みで、溶銑中Si濃度の低下は確認できたものの、石灰石の滓化不良により炉下部圧損が上昇し、吹込みテストは短時間で中止となった。

同様に、Takedaら⁵⁾は粉鉱石と石灰石およびマグネシアクリンカーの混合粉の吹込みテストを実施し、レースウェイ斜行ゾンデによる炉内観察を実施している。ゾンデ挿入推力が増大したことから、吹込んだ混合粉はレースウェイ周辺部に滞留し、高強度の緻密層を形成したと推定している。

以上より、フラックス羽口吹込み技術が実用化されていない理由は、吹込んだフラックス材と鳥の巣スラグの同

化・滓化性が遅れ、鳥の巣が肥大化し、通気性が悪化したためと推定される。したがって、鳥の巣領域の通気改善を目的にフラックス羽口吹込みを実用化するには、フラックスはレースウェイ内で速やかに昇温溶融し、鳥の巣に滞留するスラグと速やかに同化・滓化し、滴下する必要がある。しかし、本課題に着目した研究例は見当たらない。

本研究では、高PC比操業時における鳥の巣領域の通気改善を目的として、フラックス吹込み材として転炉スラグに着目した。羽口吹込み材のレースウェイでの溶融性および鳥の巣スラグとの同化・滓化性を定量的に評価する手法を導入し、フラックス材として転炉スラグの適性を確認した。スラグ滴下実験から転炉スラグ吹込み条件に応じた通気改善効果の推定スキームを確立し、最後に、神戸製鉄所第3高炉での実証試験の結果について報告する。

2. 羽口吹込みフラックス材としての転炉スラグの適性見極め

2・1 転炉スラグの性状

鳥の巣領域は低塩基度スラグの動的滞留場であり、従来は羽口吹込みフラックス材として塩基度 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = \text{C/S}$) が高い石灰石やドロマイトが用いられていた。本開発では製鉄所内発生スラグ (プリメルトスラグ) の内から、ある程度の塩基性成分を含み比較的低アルミナである転炉スラグに着目した。

転炉スラグ (A, B) の性状を従来羽口吹込み材 (石灰石、ドロマイト) と比較して、Table 1に示す。既往フラックス材である石灰石やドロマイトと比較すると、転炉スラグの特徴 (メリット) は、高FeOのプリメルト材であるため分解熱がなく融点と融解熱が低いこと、所内発生品であるため入手コストが低いこと、が挙げられる。ただし、転炉スラグは磁選後も0.01~2 mm程度の金属鉄を少量含有している。

2・2 移流場での微粉炭の着火性

転炉スラグは磁選後も少量の金属鉄を含有しており、粉碎時や移送時に金属鉄の発火によるPCへの着火が懸念される。PC着火性に関しては、滞留場については多くの知見^{6,7)}が報告されているものの、移流場については検討例がない。そこで、移流場でのPC着火性に関してラボ検討を行った。

Fig. 2. Results of limestone injection test from tuyere.

Table 1. Properties of flux materials.

	CaO (mass%)	SiO ₂ (mass%)	Al ₂ O ₃ (mass%)	MgO (mass%)	FeO (mass%)	M.Fe (mass%)	CaO/SiO ₂ (-)	Melting point (°C)	Decomposition heat (kJ/kg)	Heat of fusion (kJ/kg)
Converter slag A	41.8	17.2	5.2	6.8	7.9	3.3	2.43	1352	0	63.4
Converter slag B	44.8	11.5	1.3	6.6	15.3	1.8	3.90	1417	0	193.0
Lime stone	54.8	0.6	0.0	0.6	0.0	0.0	91.33	2572 (CaO)	1720	-
Dolomite	30.2	1.1	0.3	20.5	0.0	0.0	27.45	2800 (MgO)	1529	-

(1) 実験方法

実験装置図をFig.3に示す。横型空塔燃焼炉で加熱した混合ガス（空気＋酸素＋窒素の混合ガス）を所定量流通しながら、PCを上方より所定速度で供給した。火花放電装置で強制的に火花を発生させ、PCに着火するか否か、排ガス分析とビデオ観察で判定した。

雰囲気温度は、火花放電装置の制約より120℃である。固気比は滞留場でPC着火リスクが最も高い条件(0.2 kg/m³)^{6,7)}である。混合ガスは空気／酸素／窒素の比率を調整し、酸素濃度とガス流速を変更した。

(2) 実験結果と考察

酸素濃度と流速を変更して、移流場でのPC着火実験を行った。Fig.4に着火可否結果をプロットし、着火領域と着火しない安全領域との境界線を求めた。また神戸製鉄所第3高炉の操業条件（コールビン、粉碎ミル、羽口への圧送）を併記した。滞留場（流速＝0 m/s）の場合、300℃では酸素

Fig. 3. Experimental apparatus for PC ignitability.

濃度13%⁶⁾で、室温では酸素濃度15%^{6,7)}でPCへ着火する。一方、移流場の場合、流速1.4 m/sなら酸素濃度48%まで未着火であり、高酸素濃度でないとPCへ着火しない。流速を増加すると、境界線がさらに高酸素濃度側へ移行している。これらは、火花が一部のPCに着火しても吹消され、火炎が伝播し難いためと推定される。したがって、金属鉄を含有する転炉スラグ使用時は、酸素濃度を制御すればPCへの着火を回避可能である。

2・3 フラックス材のレースウェイでの溶解性

レースウェイ内でのフラックスの昇温・熔融挙動は、レースウェイ1次元数学モデル⁸⁾を用いて検討した。フラックス材の物性値は、Table 1の値を使用した。

フラックス材を10 kg/tp吹込んだ条件での計算結果をFig.5に示す。プリメルトで分解吸熱量が小さく低融点

Fig. 4. Experimental results of PC ignitability at advection field.

Fig. 5. Calculation results on combustion and melting behavior of flux material in raceway.

(1352℃)である転炉スラグAは、レースウェイ内で急速に昇温され、レースウェイを飛翔する極短時間の間に熔融開始し、レースウェイ先端位置までに熔融率は100%に達している。一方、石灰石はレースウェイ内の昇温で CaCO_3 から CaO へ分解されるが、 CaO は高融点(2572℃)のためレースウェイ先端位置に到達した時点でも未熔融である。したがって、レースウェイ飛翔中における熔融性の観点から、プリメルトで低融点である転炉スラグはフラックス材として好適である。

2・4 鳥の巣スラグとフラックス材の同化・滓化性

(1) 実験方法

鳥の巣スラグとフラックス材の同化・滓化性を評価するため、Fig.6に示す単一円筒ローター型トルクメータを試作した。るつぼ(内径=φ48 mm, 高さ=70 mm)とローター(φ16 mm, 高さ=20 mm)は高温場で使用するため、白金製である。

鳥の巣スラグは、成分が実高炉の休風時炉芯サンプリングでレースウェイ先端位置より採取されたTable 2の値となるよう、試薬を配合・混合したものである。フラックス材はTable 1の転炉スラグA, 石灰石およびドロマイトであり、粒度は75 μm以下の割合が100 mass%である。

鳥の巣スラグ0.3 kgを白金るつぼに充填し、電気炉内で1520℃に昇温した。スラグ浴の温度を均一にするために30分保持した後、ローターをスラグ浴に浸漬し、10 rpmで回転した。底が開閉可能なアルミナ製のフラックス添加治具にフラックス材 5×10^{-3} kgを充填し、スラグ浴の直上にて予熱した。フラックス材が所定温度に達した時点でスラグ浴に添加し、フラックス添加後のトルク値の変化を連続測定した。この方法により、最終到達粘度(粘度とトルク値

は比例関係)でなく、フラックス材添加直後の鳥の巣スラグとの同化・滓化性を速度論的視点で評価した。

(2) 実験結果と考察

鳥の巣スラグのトルク値を1.0とした相対トルク値 θ のフラックス添加後の推移をFig.7に示す。石灰石とドロマイトを添加した場合、添加直後に分解にともなう吸熱、および同化・滓化遅れによって一時的に固液共存状態となり、 θ が増加している。その後、フラックスと鳥の巣スラグの同化により、 θ は変動しながら緩やかに低下している。一方、転炉スラグAを添加した場合、 θ は添加直後から速やかに低下し、石灰石やドロマイトより小さくなっている。転炉スラグは石灰石やドロマイトに比べて融解熱が小さいため融解にともなう θ の上昇ピークが現れず、同化・滓化が短時間で速やかに進行して θ が低下したと考えられる。

各フラックス材ともに同質量(5×10^{-3} kg)を添加しており、理想的に鳥の巣スラグと同化・滓化した場合の最終的なスラグ浴の到達粘度は「石灰石, ドロマイト<転炉スラグA」となるはずである。しかし、360 s時点での θ は「ドロマイト, 石灰石>転炉スラグA」であり、ドロマイトと石灰石添加時の θ はまだ低下途中で定常状態には達していない。すなわち、本トルク測定実験の結果は、実操業の鳥の巣領域における限られた温度・混合動力・時間の下でフラックス材として機能するには、同化・滓化性に優れていることが重要な要件であることを示唆している。

以上より、炉内通気改善に向けた羽口吹込みフラックス材として、熔融性と鳥の巣スラグとの同化・滓化性の観点から転炉スラグは好適である。

3. 転炉スラグ吹込み条件に応じた通気改善効果の推定スキーム

3・1 鳥の巣領域の圧損評価方法

転炉スラグ羽口吹込みによる炉下部通気改善効果を定量評価するため、以下の方法で鳥の巣領域の圧損変化量を

Fig. 6. Experimental apparatus of single-cylinder-rotor-type torque meter.

Table 2. Chemical compositions of bird's nest slag sampled around raceway.

FeO (mass%)	SiO ₂ (mass%)	CaO (mass%)	Al ₂ O ₃ (mass%)	MgO (mass%)	C/S (-)
0.0	48.1	29.9	17.0	5.0	0.62

Fig. 7. Time changes in torque value by flux addition.

検討した。炉下部鳥の巣領域は、コークス充填層をガスが流通しスラグが滞留・滴下する領域なため、その圧損評価にはホールドアップの影響を加味できる Fukutake らの式 (1)^{9,10)} を採用した。

$$\frac{\Delta P}{L} = \left\{ k_1 \left(\frac{1-\varepsilon+h}{d_w} \right)^2 \mu_g V + k_2 \left(\frac{1-\varepsilon+h}{d_w} \right) \rho_g V^2 \right\} / (\varepsilon-h)^3 \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \frac{1-\varepsilon+h}{d_w} = \frac{1-\varepsilon}{d_p \phi} + \frac{h}{d_l}$$

ΔP : 圧力損失 (Pa) L : 充填層長さ (m) k_1, k_2 : 定数 (—)
 ε : 空隙率 (—) h : ホールドアップ (—) d_w : 固体粒子と液滴の調和平均径 (m) μ_g : ガス粘度 (Pa・s) V : ガス流速 (m/s) ρ_g : ガス密度 (kg/m³) d_p : 固体粒子径 (m) ϕ : 形状係数 (—) d_l : 液滴径 (m)

従来、充填層での液ホールドアップは、冷間実験で測定した液物性値を無次元化して整理⁹⁻¹¹⁾されている。一方、熱間実験での報告例¹²⁾は少なく、特にスラグ成分にFeOを含む場合、コークス充填層に対する接触角はFeOとCの反応 (FeO+C→Fe+CO) により経時的に変化する^{13,14)}ため、冷間実験の結果を適用できない。そこで本検討では、転炉スラグ吹込みによるホールドアップの変化を熱間実験より求めることにした。

転炉スラグ羽口吹込みによる鳥の巣領域でのスラグホールドアップの変化をFig.8のように模式図化した。炉下部圧損を規定する通気・通液領域の面積 S (m²)、高さ H (m) のコークス充填層とする。スラグが面積 S_d (m²) の領域を滴下する場合、ホールドアップ h (—) は式 (2) で表される。また、スラグ滴下面積 S_d (m²) はスラグ流入量 W (m³/s) と滴下線速度 u (m/s) に対して式 (3) の関係があるため、ホールドアップ h は式 (4) で表される。

転炉スラグ羽口吹込みを実施すると、スラグ流入量 W

Fig. 8. Schematic diagram for hold-up improvement by converter slag injection.

(m³/s) は転炉スラグ吹込み分だけ増加する。一方、転炉スラグ吹込みにより鳥の巣スラグの流動性が改善し、滴下線速度 u (m/s) は増加すると推測される。従って、転炉スラグ羽口吹込みによる鳥の巣領域でのスラグホールドアップの相対変化は、スラグ流入量 W と滴下線速度 u のそれぞれの変化量から求めることができる。

$$h = \frac{S_d \times H}{S \times H} \quad (2)$$

$$u = \frac{W}{S_d} \quad (3)$$

$$h = \frac{1}{S} \times \frac{W}{u} \quad (4)$$

h : ホールドアップ (—) H : 充填層高さ (m) S : 通気・通液領域の面積 (m²) S_d : スラグ滴下面積 (m²) W : スラグ流入量 (m³/s) u : 滴下線速度 (m/s)

3・2 鳥の巣領域へのスラグ流入量

鳥の巣スラグの量バランスをFig.9のように考え、鳥の巣領域へのスラグ流入量 W を求めた。鳥の巣スラグはPC灰分 (100 mass%) とボッシュスラグの一部 (α mass%) より形成されるとし、鳥の巣スラグの塩基度 C/S が実機炉芯サンプリングで求めた値 ($C/S=0.62$) となるよう、ボッシュスラグの流入割合 α (mass%) をバランス計算より求めた。PC灰分およびボッシュスラグの性状がTable 3の場合、 $\alpha=18$ mass%と算出された。

また、鳥の巣領域の熱バランス計算より、鳥の巣スラグの温度は1550℃と推定された。

3・3 鳥の巣領域でのスラグ滴下速度

(1) 実験方法

転炉スラグ吹込み時の鳥の巣領域のスラグ滴下線速度

Fig. 9. Slag quantity balance for bird's nest slag formation.

Table 3. Chemical compositions of PC ash and bosh slag used in balance calculation.

	(mass%)			
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
PC ash	8.3	0.1	2.9	0.1
Bosh slag	32.3	47.2	12.7	8.0

は、以下の熱間スラグ滴下実験で測定した。従来よりコークス充填層を模擬したスラグ滴下実験には黒鉛漏斗¹²⁾が用いられている。ただし、FeO含有スラグは昇温・溶融過程で黒鉛と反応しスラグ性状が変化するため、今回、昇温には黒鉛漏斗ではなくKumanoら¹⁵⁾と同様に鉄製漏斗を用いた。

Fig.10に実験装置図を示す。試料の昇温溶融は上段の純鉄るつぼ(内径=φ40 mm, 高さ=55 mm)で、滴下は下段の黒鉛るつぼ(内径=φ40 mm, 高さ=60 mm)で行った。黒鉛るつぼの穴径は炉芯コークス(平均サイズ23 mm)充填層の空隙に対する水力学的等価直径¹⁶⁾と等しくなるようφ4 mmとした。

試料はTable 2の鳥の巣スラグとTable 1の転炉スラグ(A, B)を所定の割合で配合したもので、転炉スラグ配合率は0~41 mass%である。試料性状として、転炉スラグ配合率と塩基度C/S、FeO含有率および1500℃での計算スラグ粘度¹¹⁾の関係をFig.11に示す。転炉スラグ配合率の増加にともない、塩基度とFeO含有率が増加し、計算スラグ粘度が低下する。

実験は以下の手順で実施した。スラグ試料0.03 kgを純鉄るつぼ内に設置し、所定温度(1300~1500℃)まで昇温した。スラグを溶融した後、アルミナ棒のストッパーを引き抜き、溶融スラグ試料を黒鉛るつぼに流下させた。黒鉛るつぼからアルミナるつぼへ滴下する試料質量をロードセルで連続測定した。滴下質量割合が20%から40%(滴下初期の装置特性影響等を排し、再現性の良い結果が得られた範囲)に要する時間から滴下質量速度(kg/s)を求め、試料密度(kg/m³)とるつぼ穴面積(m²)より単位換算して滴下線

Fig. 10. Experimental apparatus for slag dripping.

速度 u (m/s) を求めた。

(2) 実験結果と考察

スラグ滴下開始からのスラグ滴下量の経時変化をFig.12に示す。転炉スラグの増配により、滴下質量速度が増加している。

スラグ滴下実験結果は液体の管摩擦現象に類似していると考え、Fanningの式に着目して実験結果を整理した。管摩擦係数 f はレイノルズ数 Re の関数として、 $f = 16 \cdot Re^{-1}$ で表される。レイノルズ数は粘度に反比例するため、滴下質量速度より換算した滴下線速度 u と計算粘度¹¹⁾ μ_l の関係をFig.13にプロットした。上記関係より滴下線速度は計算粘度に反比例するとして係数 c を求めると、係数 $c = 25$ (kg/s²) となる実験式(5)を得た。したがって式(5)を用

Fig. 11. Bird's nest slag properties mixed with converter slag.

Fig. 12. Experimental results of slag dripping.

いて、スラグ成分と温度から求まる計算粘度より滴下線速度が推定可能となった。

$$u = 25 \cdot \mu_l^{-1} \quad (5)$$

u : 滴下線速度 (m/s) μ_l : 計算粘度¹¹⁾ (mPa・s)

3・4 鳥の巣領域でのスラグホールドアップ

これまでの検討より、転炉スラグ吹込み時のスラグ流入量 W と滴下線速度 u が導出可能となったが、式(4)でホールドアップ h を求めるには、通気・通液領域の面積 S が不明項として残る。そこで、転炉スラグ吹込みによるホールドアップの変化を、転炉スラグ吹込み比=0 kg/tpを基準値(=1.0)とした相対ホールドアップとして求めた。Table 4の条件における計算結果をFig.14に示す。転炉スラグ吹込みにより相対ホールドアップが低減可能であることが分かった。これは、この吹込み比の範囲において、滴下線速度 u の改善効果がスラグ流入量 W の増加影響より大きいためである。

4. 通気改善効果の実証と定量化

転炉スラグ羽口吹込みにより鳥の巣領域の相対ホールドアップが低下し、炉下部圧損が定性的には低減可能と推定

Fig. 13. Relationship between dripping linear velocity and calculated slag viscosity.

されたことを受け、神戸製鉄所第3高炉にて実機実証テストを行った。第一回テストの条件をTable 5に、テスト結果をFig.15に示す。転炉スラグの少量吹込みにより炉下部圧損が大きく低下しており、転炉スラグ吹込みによる通気改善効果を実機実証した。

ここで、転炉スラグ吹込み時の圧損変化量をFig.16に示すスキームから推定するには、3・4節に記載の通り、圧損

Fig. 14. Change in hold-up by converter slag injection.

Fig. 15. Changes in pressure drop at the lower part of blast furnace by converter slag injection from tuyere.

Table 4. Calculation conditions for hold-up.

PC rate (kg/tp)	PC (mass%)					Bird's nest slag (Calculated in Fig.9) (mass%)			
	Ash	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
220	12.5	8.3	0.1	2.9	0.1	46.4	29.4	17.1	5.3

Table 5. Operational test conditions at Kobe No.3 blast furnace.

	PC rate (kg/tp)	PC (mass%)					Bird's nest slag (Calculated in Fig.9) (mass%)			
		Ash	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
First test	238	12.5	8.3	0.1	2.9	0.1	46.6	28.3	17.1	5.1
Second test	195	10.6	7.1	0.1	2.2	0.1	43.6	32.0	15.3	5.7

を規定する重要な場である通気・通液領域の面積 S が不明項として残っている。そこで、圧損変化量 (Fig.15のフィッティングライン) が実機テスト結果と一致するよう唯一の不明項である面積 S をパラメータとしてパラメータフィッティングを行い、 $S=2.03\text{ m}^2$ と定量化した。さらに、面積 S は炉内ガス供給源であるレースウェイ面積と関連付けられると考え、衝風条件影響を加味できる計算レースウェイ深度¹⁷⁾ RW の関数として、面積 S を式 (6) で整理した。衝風条件を与えれば RW より面積 S を求めことが出来るので、式 (4) よりホールドアップ h が求まり、式 (1) より圧損を推定可能となった。

$$S = 2.40 \times RW^2 \quad (6)$$

S : 通気・通液領域の面積 (m^2) RW : レースウェイ深度¹⁷⁾ (m)

次に、第二回テスト実施前に圧損変化量を推定した。テスト条件をTable 5に示す。第二回テストは第一回テストに比べ、PC比とPC中の灰分および SiO_2 含有量が低い条件である。鳥の巣スラグ粘度が低くなるため、転炉スラグ吹込みによる鳥の巣スラグの粘度改善効果が小さくなり、圧損低減効果も小さくなると推定された。推定値と実機テスト結果をFig.15に示す。実測値と推定値が良く一致していることから本推定スキームの妥当性が証明され、本法で転炉スラグ吹込み条件と高炉操業条件に応じた圧損低減量の推定が可能となった。

Fig. 16. Estimation scheme for pressure drop change at the bird's nest by converter slag injection from tuyere.

5. 結言

高炉下部 (鳥の巣領域) の通気改善を目的に、フラックス羽口吹込み技術について検討した。吹込み材として転炉スラグの適性見極めを行い、通気改善効果の推定スキームを作成後、実機検証テストを行い、以下の知見を得た。

- (1) プリメルトで FeO を含有する転炉スラグは、レースウェイ内で速やかに溶融し、鳥の巣スラグとの同化・滓化性に優れるため、通気改善を目的とした羽口吹込みフラックス材として好適である。
- (2) 熱間スラグ滴下実験の結果を元に、高炉操業条件と転炉スラグ吹込み条件に応じて通気改善効果を推定可能なスキームを確立した。
- (3) 神戸製鉄所第3高炉で実機テストを行い、転炉スラグ羽口吹込みによる炉下部圧損低減効果を実証した。
- (4) 高炉下部圧損を規定する通気・通液領域の面積 S (m^2) をレースウェイ深度 RW (m) の関数として、 $S=2.40 \times RW^2$ で定式化した。

文 献

- 1) K.Kanbara, T.Hagiwara, A.Shigemi, S.Kondo, Y.Kanayama, K.Wakabayashi and N.Hiramoto: *Tetsu-to-Hagané*, **62**(1976), 535 (in Japanese).
- 2) T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, K.Miyagawa, K.Nozaawa and T.Kamijo: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1114 (in Japanese).
- 3) K.Tajima, Y.Juomoto, Y.Kanayama, Y.Okuno and N.Okamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **61**(1975), 2531 (in Japanese).
- 4) T.Haru, M.Saino, K.Okumura, Y.Sakaguchi and T.Inatani: *Tetsu-to-Hagané*, **71**(1985), 951 (in Japanese).
- 5) K.Takeda, Y.Sawa, S.Taguchi, N.Takashima, T.Matsumoto and H.Obata: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 1625 (in Japanese).
- 6) N.Tanaka and T.Abe: *Powder Sci. Eng.*, **24**(1992), No.2, 39 (in Japanese).
- 7) H.Enomoto: *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **98**(1989), 815 (in Japanese).
- 8) K.Nozaawa, A.Kasai, Y.Matsui, S.Kitayama, S.Kitano and K.Shibata: *ISIJ Int.*, **51**(2011), 1336.
- 9) T.Fukutake and V.Rajakumar: *Tetsu-to-Hagané*, **66**(1980), 1937 (in Japanese).
- 10) T.Fukutake and K.Okabe: *Tetsu-to-Hagané*, **66**(1980), 1947 (in Japanese).
- 11) T.Sugiyama, T.Nakagawa, H.Shibaike and Y.Oda: *Tetsu-to-Hagané*, **73**(1987), 2044 (in Japanese).
- 12) H.Ohgusu, Y.Sassa, Y.Tomita, K.Tanaka and M.Hasegawa: *Tetsu-to-Hagané*, **78**(1992), 1164 (in Japanese).
- 13) N.Siddiqi, B.Bhoi, R.K.Paramguru, V.Sahajwalla and O.Ostrovski: *Ironmaking Steelmaking*, **27**(2000), 367.
- 14) T.W.Kang, S.Gupta, N.S.Chaudhury and V.Sahajwalla: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 1526.
- 15) A.Kumano, K.Shimizuno, T.Nagasaka and M.Hino: *CAMP-ISIJ*, **13**(2000), 132 (in Japanese).
- 16) M.Shimizu: *Handbook of Iron and Steel*, 5th ed., Vol.1, ISIJ, Tokyo, (2014), 132 (in Japanese).
- 17) M.Hatano, B.Hiraoka, M.Fukuda and T.Masuike: *Tetsu-to-Hagané*, **62**(1976), 505 (in Japanese).