

実機 CDQ における空気吹込みによる 中低温乾留コークスの改質評価

武富 洋文*・山口 以昌*²・板垣 省三*³

Research on Upgrading of Low Temperature Coke by Air Blowing in Operating CDQ

Hirofumi TAKETOMI, Isho YAMAGUCHI and Shozo ITAGAKI

Synopsis : One of the targets in the SCOPE21 process was to enhance the productivity of coke ovens. For the high productivity, it was investigated to push the coke at a low temperature and to upgrade the low temperature coke by reheating in a CDQ. The coke reheating in this research, reheating of coke by air blowing was tested in an operating CDQ and some useful data were obtained by measurement probe. A three dimensional simulation model was developed based on those data, and this model could simulate the conditions of CDQ and upgrading effect of coke precisely.

Key words : SCOPE21; CDQ; reheating.

1. 緒言

石炭高度転換コークス製造技術では、高生産性を目的として、コークス炉から炭中温度 800°C で排出したコークスを CDQ のプレチャンバー内で再加熱処理し、改質することを目標としている。^{1,2)} 本調査研究では、中低温コークスの改質効果を均一かつ最大にする CDQ 上部構造の提言を目的として、実機 CDQ 内部調査と 3次元シミュレーションモデルの構築および数値解析を行った。実機 CDQ 内部調査では、再加熱ガスとして空気を使用した場合について、ゾンデを用いたガス流れ調査とコークスの改質調査を行い、プレチャンバー内のガス偏流およびコークスの改質を確認した。3次元シミュレーションモデルについては、既存のデータおよび前記の内部調査結果を反映し、精度を向上することで、空気を吹き込んだ場合のプレチャンバー内のガス流れ、温度分布および中低温コークスの改質効果を精度良く予測することが可能になったので以下に報告する。

2. 実機 CDQ 内部調査

2.1 調査時の試験条件

実機 CDQ 内部調査は、JFE スチール京浜 6号 CDQ で実施した。CDQ プレチャンバー内コークスの再加熱、ガス偏流状況の実態調査は、プレチャンバーに空気を吹込んだ状態で、炉内にゾンデを挿入し温度、圧力およびガス組成

を測定した。Table 1 にゾンデによる実機 CDQ 内部調査時の試験条件を示す。

2.2 CDQ の概要

Fig. 1, Fig. 2 に京浜 6号 CDQ の概要図を示す。空気の吹込みは、均一性と設備制約の面を考慮し 3ヶ所からの分散吹込みとした。ブロワーの最大能力は 3000 Nm³/h で 1ヶ所からの最大吹込み量は 1000 Nm³/h である。また、各吹込み箇所の流量は均一になるように調整弁で流量を調整した。ゾンデによる温度、圧力およびガス組成の測定は高さ方向 2水準、半径方向 5水準について測定を実施した。半径方向は壁側から中心 (P5→P1) に向かって連続で測定を実施した。また、ゾンデは設備制約の面から円周方向ではボイラーの中心に対して、ボイラー側から上段 61°、下段 66°として設置した。

3. 数値シミュレーション

3.1 熱・物質流れ解析

実機 CDQ の内部調査と併行して数式モデルによる 3次元熱・物質流れシミュレーションを実施した。また、シ

Table 1. Measurement condition of operating CDQ.

Item	Conditions
Charged coke temperature	925 °C
Charging rate of coke	40 t/h
Specific volume of cooling gas	1500 Nm ³ /t
Air volume	0,1500,3000 Nm ³ /t

平成 16 年 1 月 9 日受付 平成 16 年 4 月 26 日受理 (Received on Jan. 9, 2004; Accepted on Apr. 26, 2004)

* JFE スチール (株) 東日本製鉄所 (East Japan Works, JFE Steel Corp., 1-1 Ohgishima Kawasaki-ku Kawasaki 210-0868)

*² JFE エンジニアリング (株) エンジニアリング研究所 (Engineering Research Center, JFE Engineering Corp.)

*³ JFE スチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corp.)

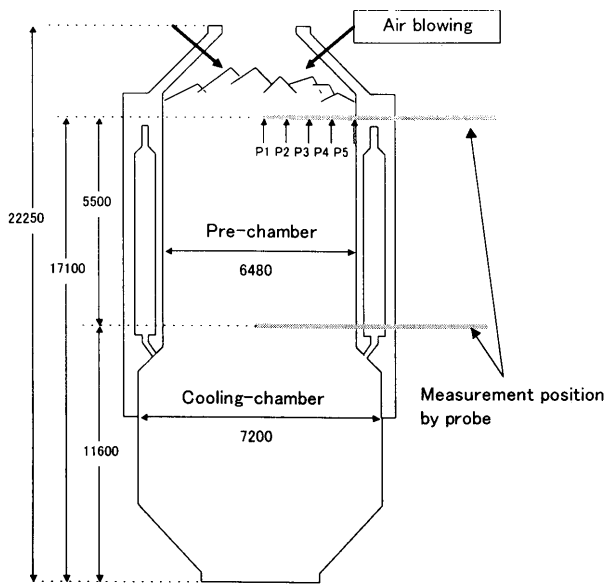


Fig. 1. Outline of the Keihin No6 CDQ and measuring positions by the probe.

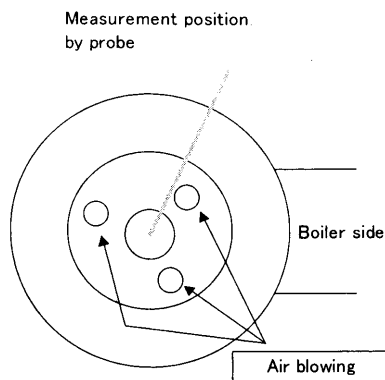


Fig. 2. Plan of CDQ and air blowing positions.

ミュレーションで得られたコークスのガス化反応量と降下時の温度履歴を用いて改質コークスの品質を推定した。本節では熱・物質流れ解析のモデルについて述べる。

熱・物質流れの基礎方程式は、以下ようになる³⁾。

(ガス)

・連続の式

$$\nabla \cdot (\epsilon \rho_g u_g) = R \quad \dots \dots \dots (1)$$

ϵ : 空隙率, ρ_g : ガス密度, u_g : ガス速度, R : 燃焼やコークスガス化による単位体積あたりガス発生速度。

・各ガス種の連続の式

$$\nabla \cdot (\epsilon \rho_g Y_i u_g) = R_i$$

$$(i=1\sim 7 : O_2, CO_2, CO, H_2, H_2O, N_2, CH_4) \quad \dots \dots \dots (2)$$

Y_i : 第*i*成分の質量分率, R_i : 第*i*成分の単位体積あたり発生速度。

・運動方程式

$$\epsilon \rho_g u_g \cdot \nabla u_g = -\epsilon \nabla \rho + \epsilon \nabla \cdot \tau + \epsilon \rho_g g + \epsilon F \quad \dots \dots \dots (3)$$

ρ : 圧力, τ : せん断応力, g : 重力の加速度, F : 抵抗力。なお, 抵抗力 F は Ergun の式³⁾ によって評価した。

・エネルギー方程式

$$\epsilon \rho_g C_g u_g \cdot \nabla T_g = \nabla \cdot (\epsilon \lambda_g \nabla T_g) - h_p a_p (T_g - T_c) + \alpha q_{\text{react}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

C_g : ガス比熱, T_g : ガス温度, λ_g : ガス熱伝導率, h_p : コークス表面熱伝達率, a_p : コークス比表面積, T_c : コークス温度, λ_c : コークス熱伝導率, q_{react} : 反応熱, α : 反応熱のガスとコークスへの分配比。

(コークス)

・エネルギー式

$$(1-\epsilon) \rho_c C_c u_c \cdot \nabla T_c = -h_p a_p (T_c - T_g) + (1-\alpha) q_{\text{react}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ρ_c : コークス密度, C_c : コークス比熱, u_c : コークス降下速度。

基礎式中の各項の取り扱いについて、以下に補足する。

- 1) コークスの降下速度や空隙率の分布については、実機データを基に設定し、シミュレーションの境界条件として与えた。
- 2) 中低温乾留コークスから発生する未燃ガスの発生パターンについては、実機データに基づいた推定式⁴⁾を用いて設定した。
- 3) プレチャンバーで起きる化学反応は、以下の7つを考慮した。各反応の反応速度についてはSCOPE21の支援研究として実施した評価試験の結果⁵⁾を用いた。

- ・ $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$ (水素燃焼反応)
- ・ $CO + 1/2 O_2 = CO_2$ (一酸化炭素燃焼反応)
- ・ $CH_4 + 1/2 O_2 = 2H_2 + CO$ (メタン燃焼反応)
- ・ $H_2O + CO = H_2 + CO_2$ (ガスシフト反応)
- ・ $C + 1/2 O_2 = CO$ (コークス燃焼反応)
- ・ $C + CO_2 = 2CO$ (ソリュションロス反応)
- ・ $C + H_2O = H_2 + CO$ (水性ガス化反応)

式(1)~式(5)を有限要素法によって離散化して解析を行った。解析領域はFig. 3に示すように、クーリングチャンバーの上部(ディストリビュータの上)からプレチャンバー頂部までとし、Fig. 4に示すように約7万個の要素に分割して解析を行った。下端での境界条件は、循環ガスの実測データを基に速度分布、温度分布、組成を推定して与えた。壁面については、外部への熱損失を考慮して200 kcal/m²/hの放熱境界とした。

3.2 改質コークスの品質推定

改質コークスの品質の指標はドラム強度(DI150/15)とし、以下に示すSCOPE21の支援研究で得られた推定式⁵⁾を用いて改質後の品質を推定した。

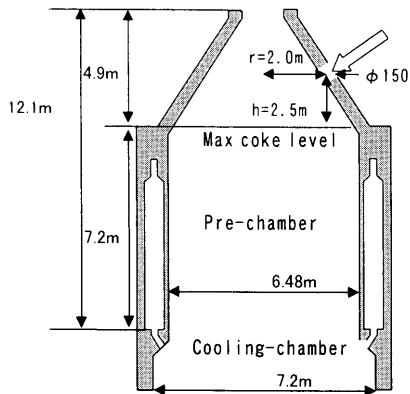


Fig. 3. CDQ model.

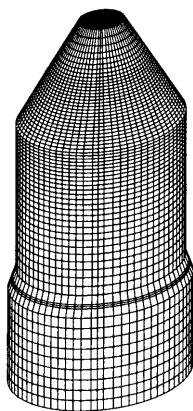


Fig. 4. Finite element model for CDQ.

$$\frac{d}{dt}(DI^*) = -0.05(DI^* - DI^e) \quad (\text{時間の単位は min}) \quad \dots\dots (6)$$

DI* : 反応劣化を無視したDI, DI^e : 飽和DI値

$$DI^e = 0.31(T_c - 800)^{0.5} + 76.0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

T_c : コークス温度(°C)

$$DI = DI^* - 0.4 \times \text{loss1} - 1.0 \times \text{loss2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

loss1 : 燃焼によるガス化量(wt%), loss2 : ソリュションロス・水性ガス化によるガス化量(wt%)

式(6)はDI強度が時間と共に飽和値DI^eに漸近して行くことを表している(1時間で飽和値の約95%の強度に達する)。また、式(7)は飽和値が再加熱によるコークス温度上昇によって増加することを表す。一方、式(8)はコークスのガス化による強度の低下を表している。

4. 結果と考察

4.1 コークス昇温の確認

プレチャンバー内での中低温コークス改質の可能性を確認するため、空気吹込み量を変化させた場合の炉内温度、コークス表面温度の測定を行った。ゾンデは、コークスの

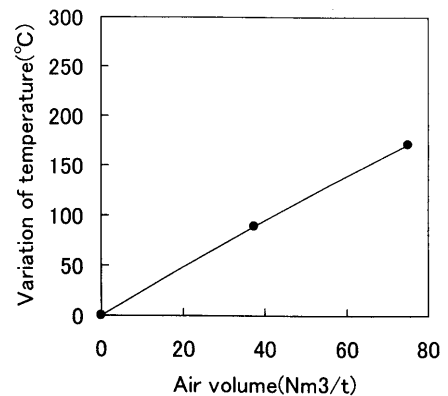


Fig. 5. Variation of coke surface temperature by air blowing.

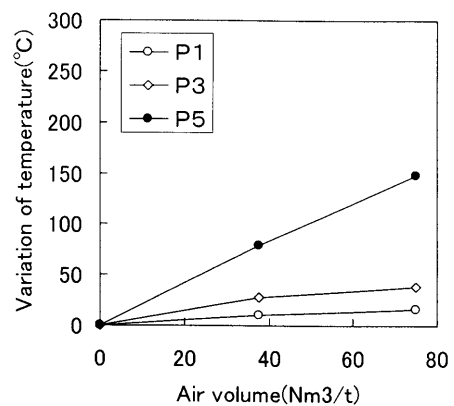


Fig. 6. Variation of coke bed temperature by air blowing.

装入後直ちに特定点まで挿入し、空気吹込み量を0→37.5→75 Nm³/tまで段階的に増加した場合の炉内温度の変化を測定した。空気吹込み量の増加に伴うコークスの表面温度、および上段の炉内温度の変化をそれぞれFig. 5, Fig. 6に示す。コークスの表面温度については、ベースの温度に対して空気吹込み量の増加に伴う温度の上昇が認められた。空気による再加熱の効果は、空気吹込み量を75 Nm³/tとした場合に180°C程度と認められる。これより空気吹込みによるコークス層の表面温度の上昇が認められ、空気を吹込むことによる再加熱効果が確認された。上段の炉内温度については、半径方向に差は認められるが、空気吹込み量の増加に伴い炉内温度が上昇することが分かった。また上昇の割合は、表面温度よりも低いことを確認した。さらに、半径方向においては、周辺部の方が中心部と比較して温度の上昇割合が大きいことが認められた。これは、各ゾンデ測定点上のコークス層の厚みが安息角の影響で異なることや、空気流量が中心部よりも周辺部の方が大きいためと考えられる。

4.2 CDQ内ガス偏流調査

4.2.1 実機調査結果

プレチャンバー内の空気およびガスの偏流状況を調査するために、ゾンデによる半径方向の連続測定を行った。Fig. 7, Fig. 8に実機CDQ内偏流調査の結果とそれに対応

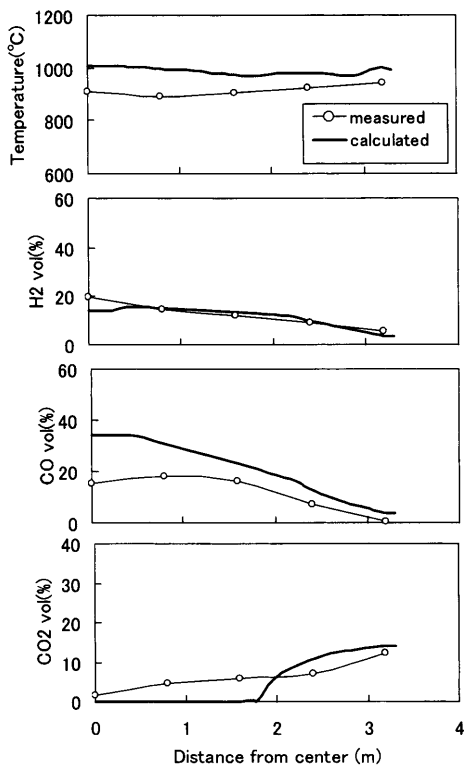


Fig. 7. Comparison of temperature and gas composition between measured and calculated results. (Air volume is 37.5 Nm³/t.)

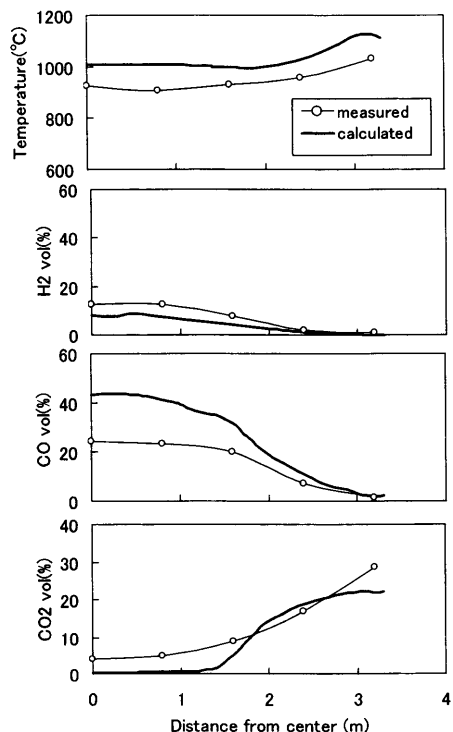


Fig. 8. Comparison of temperature and gas composition between measured and calculated results. (Air volume is 75 Nm³/t.)

するシミュレーション結果を示す。炉内温度については、空気吹込み量の増加に伴い上昇することが認められた。空気流量を変化させた場合の半径方向の昇温効果の較差は、

中心部よりも周辺部において特に顕著であることが分かった。その昇温効果は、75 Nm³/t吹込んだ場合に中心部で30°C、周辺部で150°C程度であった。H₂濃度については、空気との燃焼反応で減少し、水性ガス化反応で生成するが、燃焼速度の方が水性ガス化反応による生成速度よりも大きいいため、空気吹込み量の増加に伴い減少すると考えられる。CO濃度については、ソリューションロス反応と水性ガス化反応により増加すると考えられる。その傾向は、中心部で特に顕著であるが、周辺部では空気との燃焼によりCOはCO₂まで燃焼していると考えられる。空気を吹込んだ場合に、中心部よりも周辺部の方が昇温効果が大きいこと、およびCO、CO₂の半径方向の分布から、ガス流量は中心部よりも周辺部の方が大きく、プレチャンバーの上部では半径方向にガスの偏流が生じていることが認められた。

4.2.2 シミュレーション結果

次に、実機調査とシミュレーションを比較した結果について述べる。上段の炉内温度については、半径方向の傾向は両者で一致しているが、絶対値に関しては100°C程度計算値の方が高い。実機試験ではコークスを約40分に1窯(28 t) CDQに装入する(40 t/hに相当) バッチ装入であるのに対して、シミュレーションモデルでは時間当たりの処理量は同等だが連続的に装入するモデルになっている。実機試験においては1窯分のコークス層の下部では表面ほど昇温されていないと考えられ、そのため実測値の方が計算値よりも低くなるものと思われる。ガス組成については、実測値と計算値が各成分の絶対値について若干の差は認められるが、半径方向の傾向は良く一致している。H₂、COが中心部から周辺部にかけて低下していること、CO₂が周辺部で増加していることから、モデルでも空気の周辺部への偏流を良く表現できていると考えられる。H₂濃度については、実測値と計算値は半径方向で同一の傾向を示しているが、空気を75 Nm³/t吹込んだ場合には、実測値の方が計算値に対して若干高い。また、CO濃度についても実測値と計算値の半径方向の傾向は一致しているが、中心部で絶対値の差が認められる。これらはいずれも前述の実機試験とモデルの装入方法の違いによるものと考えられ、1窯分のコークス層の下部では表面ほどガス-ガスおよびコークス-ガス反応が進行していないことを示している。以上の結果より、シミュレーションモデルは空気の周辺部への偏流およびプレチャンバー内での中低温コークスの改質の可能性を実機内部調査に対して精度良くシミュレートできることが分かった。Fig. 9は計測ゾンデを通る断面内のガスの速度分布を示したものである。速度分布については計測値がないため、計算結果のみを示している。なお、Fig. 9は吹き込み量75 Nm³/tでの結果であるが、37.5 Nm³/tの場合も流れのパターンはあまり変わらない。反応ガスはコークス層内ではコークスの整流作用によってほぼ下向きの流れになっていることが分かる。また、炉の中心近傍ではフ

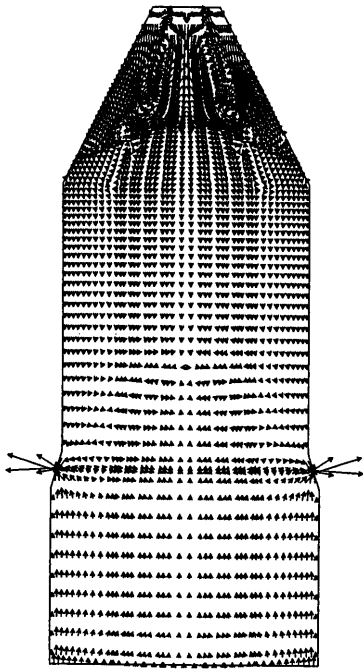


Fig. 9. Velocity vectors (Air volume is 75 Nm³/t.)

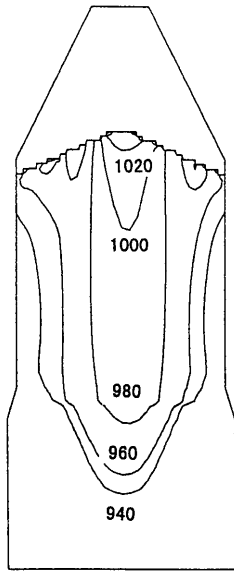


Fig. 10. Distribution of coke temperature. (Air volume is 37.5 Nm³/t.)

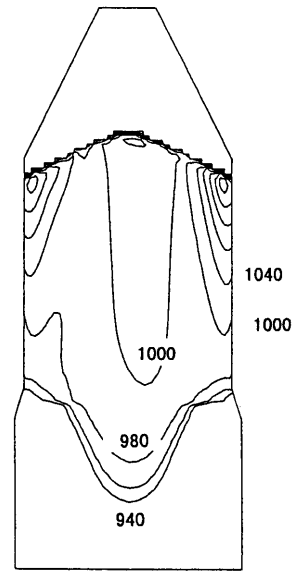


Fig. 11. Distribution of coke temperature. (Air volume is 75 Nm³/t.)

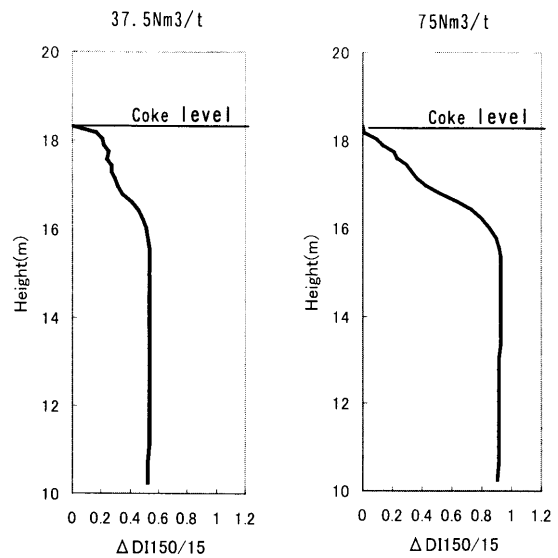


Fig. 12. Variations of coke upgrade effect with height for different air volume.

リユーの上方約2mまで上向きの流れになっているが、これは反応ガスに比べて流量が大きい循環ガスの影響がブリユー上部にまで及んでいるものと考えられる。また、炉内のコークス温度分布の計算結果をFig.10およびFig.11に示す。空気吹込み量に関わらず、プレチャンバーの上部から下部にかけてコークス温度が低下していることが認められる。これは、上部でのソリューションロス反応と水性ガス化反応の影響、および下部からの循環ガスの影響であると考えられる。空気吹込み量が37.5Nm³/tである場合に、周辺部においてコークス温度が低下していることは上部でのソルロスと水性ガス化反応によるものであり、75Nm³/tまで増加した場合に周辺部で温度が上昇しているのはソル

ロスと水性ガス化反応で生成したCOなどが周辺部で空気と反応し燃焼しているためと考えられる。これらより、シミュレーションによるコークス温度の分布からもガスの偏流が認められ、中低温コークスの改質効果が半径方向に分布を生じていると考えられる。また、空気吹込み量を増加することにより、周辺部の温度が上昇し、炉内のコークス温度の半径方向の分布が均一に近づく傾向があると認められる。

4.3 改質効果

本節では2.2.2で述べた品質推定モデルによる中低温コークスの改質効果の推定計算結果と、計算値を実測値と比較した結果について述べる。なお、計算におけるコークス改質効果は装入時の強度とプレチャンバー下部断面の平

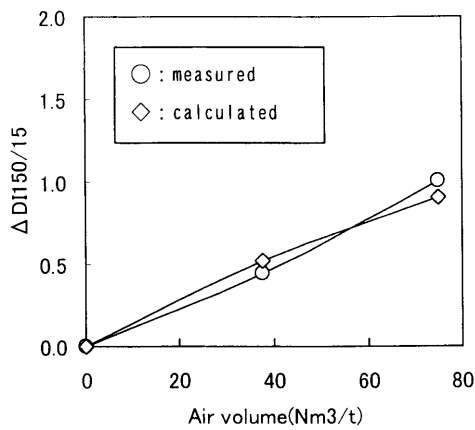


Fig. 13. Comparison of coke upgrade effect between measured and calculated results.

均強度の差で評価した。Fig.12に高さ方向のコークス強度変化の様子を示す。プレチャンバー上部において燃焼によるコークスの昇温により強度が急速に増加していることが分かる。また、空気吹込み流量を増加させた場合にはコークスのガス化量の増加によりプレチャンバー下部において強度が若干低下する傾向が見られるが、上部での向上効果の方が上回っているため、吹込み量の増加に伴い改質効果は増加し、吹込み量37.5Nm³/tの場合には平均で0.5ポイントの強度向上であるのに対し、75Nm³/tの場合には0.9ポイントの向上効果が得られている。Fig.13は空気吹込み量を変えた時のコークス強度向上の様子を、計算値と実測値とで比較したものである。なお、実測においては、空気吹込み量1水準に対して試験窯を8窯設け、8窯を連続して装入し、装入してからの経過時間と切出し量の関係から、8窯の真中でコークスのサンプリングを実施した。以上の作業を空気吹込み量1水準につき2回行い、採取したサンプルに対してドラム強度(DI150/15)を繰り返し2回ずつ測定した。実測値には多少のばらつきがあると考えられるが、空気を吹込んだ場合の改質効果は実測値と計算値でほぼ同等であると考えられる。これらより、前述の品質推定モデ

ルによってコークスの改質効果を定量的に把握できると考えられる。

5. 結言

(1) 実機CDQ内部調査

実機CDQ内部調査により、空気をプレチャンバーに吹き込むことにより炉内温度が上昇し、中低温コークスの改質の可能性があることを確認した。また、プレチャンバー内の高さ方向、半径方向の温度とガス組成を調査することによりプレチャンバーでのガスの偏流が確認された。さらに、空気吹込み量とコークス強度の関係を調査し、実機においても空気吹込み量の増加に伴いコークス強度が向上していることが確認された。

(2) シミュレーションによる炉内現象と改質挙動解析

シミュレーションモデルに関しては、コークスの連続装入を仮定していることに起因すると思われる実測値との定量的な差異が一部認められるが、プレチャンバーでのガスの偏流状況およびコークスの改質効果については概ね精度良く再現することができた。従って今後改質機能付きCDQ設備の適切な構造を検討する上で、有益な情報を与えるツールとなり得ると考えられる。

本研究は石炭生産・利用技術振興費補助金の石炭燃焼技術開発（石炭高度転換コークス製造技術）に係る研究の一環として実施されたものであり、ここに関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liege, (1996), 285.
- 2) H.Taketomi, K.Nishioka, Y.Nakashima, S.Suyama and M.Matsuura: 4th Int. Cokemaking Cong. Proc., ATS, Paris, (2000), 278.
- 3) 流体力学ハンドブック, 第2版, 日本流体力学会編, 丸善, 東京, (1998), 1053.
- 4) 三菱化学(株), 私信.
- 5) K.Uebo: Tetsu-to-Hagané, 90 (2004), 694.