

SCOPE21 パイロットプラントにおけるコークス押出力の乾留条件による変化

有馬 孝*・窪田 征弘*・加藤 健次*・松浦 慎*²・中居 裕貴*²
佐々木 正樹*²・杉山 勇夫*³・山本 雅章*⁴

Effect of Coking Conditions on Coke Pushing Force at the SCOPE21 Pilot Plant

Takashi ARIMA, Yukihiro KUBOTA, Kenji KATO, Makoto MATSUURA, Hirotaka NAKAI, Masaki SASAKI,
Isao SUGIYAMA and Masaaki YAMAMOTO

Synopsis : An innovative cokemaking process, SCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century), has been developed by JISF (The Japan Iron and Steel Federation) and CCUJ (Center for Coal Utilization, Japan). A test plant has been constructed in Nippon Steel's Nagoya Works as the final phase of the project. Coke pushing behavior was studied at the pilot plant and influence of coking conditions on the pushing force was investigated.

Key words : coke; pushing; fissure; lateral shrinkage; Rankin coefficient.

1. 緒言

近い将来のコークス炉リプレース対応技術としてSCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century)の開発が(財)石炭利用総合センター (CCUJ) と(社)日本鉄鋼連盟および参加企業により進められている^{1,2)}。このプロセスは、(1)非微粘結炭 50%使用、(2)生産性約3倍への向上、(3)環境改善、および(4)省エネルギー 20%を目標としている。

SCOPE21の開発は順調に進み、新日本製鐵(株)名古屋製鐵所内にパイロットプラントが建設され³⁾、2002年3月の初装入に始まり2003年3月の最終440チャージ押出しまで操業試験が行われた⁴⁾。

コークス製造プロセスとしては乾留されたコークスを安定して炭化室外に押出できることが最低限の必要条件であり、押詰りが頻発するとコークス炉の安定操業ができなくなるだけでなく、過度の炉壁荷重により炉体損傷を引起す危険性もある。SCOPE21の目標のうち、生産性向上の結果として、コークスケーキの亀裂増加などにより押出力が上昇し、押詰りが発生する懸念がある。コークスの押出しについては、小型試験炉による微分実験的な検討は数多く行われているが⁵⁻¹⁰⁾、炉長および炉高が実機規模の寸法での定量的な検討はほとんど見当らず、押出力発生機構は十分解明されていない。

本報告では、炉長が約1/2である以外は実機なみの寸法の炭化室を持つSCOPE21パイロットプラントにおいてコークス押出力とその分布およびコークスケーキ圧縮挙動の測定を行い、押出力の発生機構と制御方法を検討した結果を報告する。

2. 実験方法

SCOPE21パイロットプラントの乾留炉は1門であり、炭化室寸法は、炉幅450mm、炉高7.5m、炉長8mで、炉長が約1/2程度である他は実機並みである。炉幅テーパーは30mmと標準的な値である。空気3段、ガス単段の多段燃焼により炉高方向の温度分布を均一化している。炉壁煉瓦は珪石煉瓦であり、特に、ロイファー煉瓦については、乾留速度向上のため、SCOPE21で開発された超高密度珪石煉瓦(熱伝導率 3.1 W/m K at 1000°C)を厚さ70mmとして使用している。

非微粘結炭を50%配合された石炭は、流動床および気流塔で350°C前後に加熱され、炭化室に装入され乾留される。設備が小さいため放熱が比較的大きく、装入時の石炭温度は270°C前後であった。配合炭性状は平均値で、揮発分(daf) 32%、log(流動度/ddpm) 1.7、全膨張率22%であった。

一次操業試験は炉温平均1130°Cで行われ、第二次操業

平成16年1月9日受付 平成16年4月6日受理 (Received on Jan. 9, 2004; Accepted on Apr. 6, 2004)

* 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 新日本製鐵(株)名古屋製鐵所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

* 3 (社)日本鉄鋼連盟 (現:新日本製鐵(株)) (The Japan Iron and Steel Federation, now Nippon Steel Corp.)

* 4 (社)日本鉄鋼連盟 (現:JFEスチール(株)) (The Japan Iron and Steel Federation, now JFE Steel Corp.)

では平均1250°Cに上昇された。各時期において、乾留時間を短縮してコークス温度を低下させる試験を実施して押出力への影響を検討した。また、コークス亀裂の影響をみるため、無煙炭を配合して押出力への影響を調査した。無煙炭は揮発分(daf)6.0%のものを用いた。

コークス押出機はラックアンドピニオン機構で押出シラムを駆動しているが、Fig. 1(a)に示すように、そのピニオン軸受の後ろに2個のロードセルを設置し、押出力を測定した。また、Fig. 1(b)に示すように、ラム前面に高さ方向にならべて取付けた12個の治具に歪ゲージを貼付け、押出力の高さ方向分布を一部のチャージにおいて測定した。

パイロットプラントは炉長が短いため押出力は実機より小さくなる。実機の押し力は、基本的には、Hortonら⁵⁾やGibsonら⁶⁾の提案した解析方法により推算可能であるが、(1)実機に近い規模での解析方法の妥当性確認および、(2)押出圧力上昇の影響の有無の確認とのために、Fig. 2に示すような、コークスケーキ圧縮試験を行った。すなわち、CS(反押出機側)の炉蓋を装着したまま後ろから支持した状態で押出ラムで圧力を掛け、押出力と炉蓋に掛る荷重とをロードセルで測定した。

乾留状態の把握のために炭中温度(炭化室中心部のコークス温度)を数回にわたって測定した。測定は、押出機側から2.25mの位置の炭化室天井に設けられた計測孔から熱電対を挿入して実施した。测温位置は炭化室炉底から高さ1, 3, 6mの位置とした。しかし、全乾留について测温を実施することはできないので、炭中温度は、炉温、石炭装入温度、装入炭嵩密度および乾留時間からの推定式により推算した。推定式はコークス炉の一次元伝熱計算を元に作成したものをを用いたが、実測炭中温度とよく一致することを確認した。

3. 実験結果

3.1 押出力測定

押出力測定例をFig. 3に示す。ラムは停止位置から約5.5m進んだ地点でコークスケーキに当り、そこから300~800mm圧縮した所で押出力がピークとなり、コークスケーキ全体が移動し始める。この時点で静止摩擦から動摩擦に変るため押出力が急激に低下する。圧縮中、コークスケーキは完全に停止している訳ではなく、コークスケーキ中には亀裂の空間が多数あって、圧縮によって逐次この空間がなくなっていく過程で部分的に短時間の移動が起るが、大部分は停止状態にあり、静止摩擦が支配的であると考えられる。なお、コークスケーキ全体の移動開始後一旦下がった押出力が再び上昇に転じているのは、コークスが冷却用カセットに入り始めると抵抗が増加するためであり、このパイロットプラント特有の現象である。

押出ラムへの反力のピーク値を讀取って押出力とした

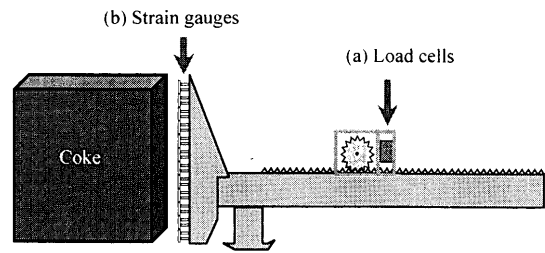


Fig. 1. Apparatus for measuring pushing force.

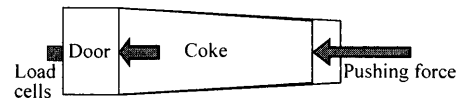


Fig. 2. Coke cake compression test.

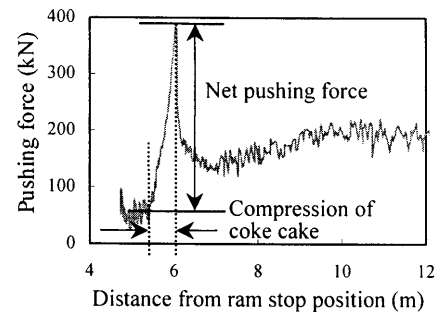


Fig. 3. Change in pushing force.

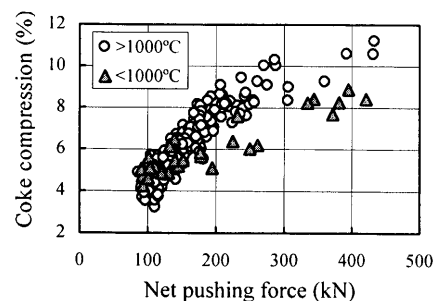


Fig. 4. Effect of pushing force on coke compression.

が、コークスに接触するより前の押出力は押出機自身の摩擦力であり、この値をピーク値から差引いたものが、コークスケーキ移動開始に使われた力であると考え、これを正味押出力と称して解析に使用した。

コークスケーキの圧縮率は3~11%であった。Fig. 4に示すように、押出力が大きいほど圧縮率が上昇した。コークスケーキ内にはセミコークスの収縮率(炭種によって異なるが再固化から1000°Cまでで11~16%程度)¹¹⁾に相当する亀裂空間があるが、塊コークス同士が互いに絡み合っているためケキ全体として押出圧力に対して抵抗を示し一種の弾性体のように挙動するので、押出圧力が増加するほど圧縮率が増加することになる。

Fig. 4では、押し時の炭中温度1000°Cを境に層別しているが、炭中温度が低い場合は圧縮率が低くなっている。

炭中温度が低いとコークスの収縮率が低くコークスケーキ内の亀裂空間が狭いためと考えられる。

コークスが圧縮される結果、コークスケーキと炉壁の間隙が炉幅テーパーにより増加するが、炭中温度が低いとこの効果が小さくなる。例えば、パイロットプラントの炉体寸法ではコークスケーキ圧縮率1%低下により、コークスケーキと炉壁の間隙が押出ラム近傍で0.15 mm減少する。このことも炭中温度の低下による押出力上昇の原因のひとつとなっている。

Fig. 4の炭中温度1000°C以上の場合で平均押出圧力約150 kPa（押出力400 kN）において圧縮率の値は10%以上になっている。この値は、炉長1.05 mの可動壁炉試験の場合¹²⁾の7~8%程度という値よりも大きい。これについて、可動壁炉では、炉長が短いため、押出圧力は反押出機側でも10~15%程度しか減衰しないのに対し、パイロットプラントでは反押出機側ではコークスケーキ全体の移動開始までは0になっているため、パイロットプラントの方が平均の押出圧力は低いので、平均の圧縮率は低くなるのではないかと考えられる。しかし、これは、後述するように、押出力には高さ方向分布があり、炉底近傍の押出圧力が非常に高いため、パイロットプラントでの圧縮率の方が高くなったのであろうと解釈される。

3.2 乾留条件の押出力への影響

炭中温度の押出力への影響を Fig. 5 に示す。炉温1130°Cレベル操業、炉温1250°Cレベル操業とも、期間平均炉温±20°Cのデータのみプロットしている。また、工事などの影響で、前チャージのコークス押しから石炭装入までの空窯時間が長くと押出力が上昇する傾向が見られたため、空窯時間1.5時間以上のデータは除いている。炭中温度の低下により押出力は上昇しているが、炉温が高い場合はより高い炭中温度で押出力が上昇し始めている。ここで、炉温と推算された炭中温度とから水平焼減り^{13,14)}（コークスと炉壁の間隙）を推算し、これを横軸としたものを Fig. 6 に示す。水平焼減りが2 mm程度を下回ると押出力が上昇し始めているが、さらに水平焼減りが減少したときの押出力上昇率は炉温が高い場合の方が大きい。この違いは炉温が高い方がコークスの亀裂密度が大きいためと考えられる。図中に黒丸で示した、炉温1250°Cレベルの操業において無煙炭を5%配合して亀裂を減少させた場合、押出力は低下している。

3.3 押出力の高さ方向分布

押出力の高さ方向分布の測定例を Fig. 7 に示す。12個の測定器具のコークスケーキへの当たり方がすべて理想的であったという保証はないので測定値にばらつきは見られるが、押出力は下部が高く、上部へいくほど低いという傾向があり、また、押出力が上昇した場合、最下部での上昇は小さく、それより上の部分で上昇している。

最下部の押出力が大きいのは、炉底との摩擦力の影響と

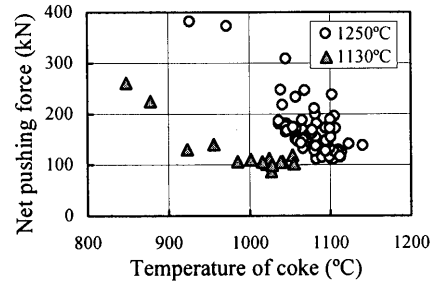


Fig. 5. Effect of coke temperature on net pushing force.

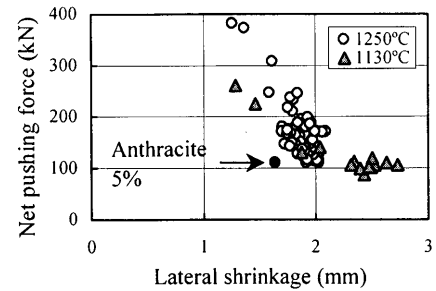


Fig. 6. Effect of lateral shrinkage on net pushing force.

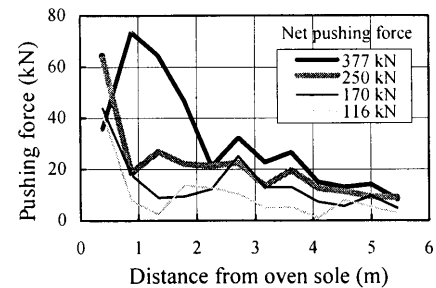


Fig. 7. Distribution of pushing forces.

考えられる。パイロットプラントではコークス質量が10~12 tであり、炉底摩擦力は50 kN前後の値となる。この力の大部分は最下部に掛ると考えられるので、最下部の押出力実測値40~60 kNは妥当な値と判断される。

押出力が上昇しても、炉底摩擦力は変化なく、炉壁摩擦力が上昇する。このため、最下部の押出力は大きくは変わらず、それより上の部分の押出力が上昇することになる。より上部の方が押出力が低いのは、コークスの自重の影響およびコークスの亀裂が少いことなどによるものと考えられる。

3.4 コークスケーキ圧縮試験

コークスケーキに押出力を作用させた際の押出圧力の伝達と炉壁圧力の発生をシミュレートする一次元モデルを Horton⁵⁾ や Gibson⁶⁾ の提案した解析方法により作成し、圧縮試験での押出力のCS炉蓋への伝達を推算した。このモデルには、炉幅テーパーの影響を織込んでいる。すなわち、コークスケーキの圧縮によりコークス塊はそれぞれより炉幅の広い位置に移動するため、水平焼減り（炉壁コークス

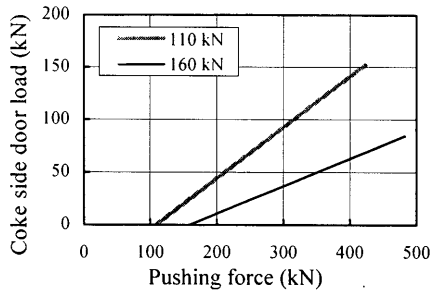


Fig. 8. Relation between pushing force and coke side door load.

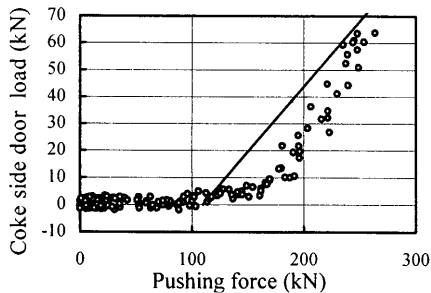


Fig. 9. Change in coke side door load with pushing force.

の間隙)が大きくなった効果を生じる。この影響を織込むため、可動壁炉実験¹²⁾により求めた水平焼減りとランキン係数の関係の実験式を用いてランキン係数を位置の関数として算出している。ここで、ランキン係数とはコークスケーキが炉壁におよぼす圧力と押出圧力との比で定義される値である。

推算結果の例として、パイロットプラントでの通常押出しの場合の押出力が110kNの場合と160kNの場合について、Fig. 8に示す。押出力が通常押出しの場合の押出力以上になって始めて圧縮試験においてCS(反押出機側)炉蓋に力が伝達される。押出力をさらに上げていくと、CS炉蓋への力は直線的に上昇していくが、炉壁との摩擦抵抗による減衰のため、押出力増加分の一部しかCS炉蓋までは伝達されない。ランキン係数の比較的低い通常押出力110kNの場合でも、押出力増加分の48%しか炉蓋荷重は増加しない。

圧縮試験結果の例をFig. 9に示す。これは通常押出しの場合の結果であるが、実線で示した推算値にほぼ近い推移を示した。押出力110kN付近でCS炉蓋荷重が発生し始めた際にCS炉蓋が後方に動いたため一旦荷重の上昇が止ったが、炉蓋が再び止ってから後は順調に直線的に炉蓋荷重が上昇した。可動壁炉試験¹²⁾の場合と同様、押出圧力による亀裂発生などでランキン係数が上昇して炉壁摩擦による押出圧力減衰が大きくなるような現象は見られなかった。

3.5 押出力の許容限界

パイロットプラント操業において、正味押出力で最大

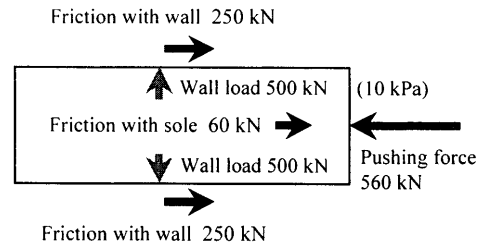


Fig. 10. Balance of pushing force and friction force.

430kNを記録した。押出力が上昇した場合においても、押出圧力としては、押出しラム付近最下部のもっとも高い部分で、250kPa程度である。ランキン係数は大きくとも0.1以下であるので、この部分でも炉壁圧は高々25kPaであり、ロイファー煉瓦の曲げ強度などが問題になるような水準ではない。実際、炉壁に異常は発生していない。もちろん、他の原因で炉壁に亀裂が発生し煉瓦の一部が容易に脱落するような状態になっていれば、押出圧力による炉壁圧で脱落が発生する可能性はある。

そのような損傷がなく炉壁が全体として弾性体として挙動している場合は、膨脹圧による損傷¹⁵⁾の場合と同様に、局所的な圧力ではなく、全荷重で生じる炉壁全体の湾曲による亀裂発生が問題になると考えられる。本パイロットプラントの場合について、炉壁荷重からの押出力許容限界を算出すると、Fig.10のようになる。炉壁強度を文献¹⁶⁾から10kPaと仮定すると炉壁面積から炉壁荷重の許容限界は約500kNになる。この値と摩擦係数から炉壁摩擦力を算出し、炉底摩擦力を加えると、560kNとなり、これが押出力の許容限界である。すなわち、押出力の釣合いを考えると、押出力にほぼ匹敵する力が炉壁に掛っていることになり、炉壁荷重の限界がほぼ押出力の限界であることになる。

3.6 実機押出力

炉長を2倍に延長した場合の押出力は、前述の一次元モデルにより推算でき、ランキン係数により異なるが、パイロットプラントの押出力の2.5~4倍に上昇する。従って、炉壁強度からの押出力許容限界を越える可能性があり、水平焼減りあるいはコークス亀裂の制御により、限界内に収めるよう操業設計を行う必要がある。

パイロットプラントは1門であり、隣接炭化室の影響を受けていない。実機では当該炭化室と隣接炭化室の膨脹圧差による炉壁のたわみが影響する：(1) 乾留中の当該炭化室の膨脹圧による炉壁の膨れによる水平焼減り減少および(2) 押出し時の隣接炭化室膨脹圧による炉壁凹みによるコークスと炉壁の間隙減少。この点も考慮して、石炭配合設計、操業設計を行う必要があると考えられる。

4. 結論

実機なみの炭化室寸法を持つSCOPE21パイロットプラ

ントにおいてコークス押出力とその分布およびコークスケーキ圧縮挙動を測定し以下の結果を得た。

(1) コークス押出力は押し出し時の炭中温度低下により上昇する。これは、炭中温度が低下すると水平焼減りが減少することと、一部は、コークスケーキ圧縮率が減少することによる。

(2) コークス炉の炉温が高いと、水平焼減り一定でも押出力が高い。これは亀裂密度が高くなるためと考えられ、無煙炭配合によりコークスの亀裂密度を減少させることにより、押出力を低下させることができた。

(3) 押出力は炉底摩擦力のため炉底近傍で大きく、上部に行くに従い低下する。しかし、押出力が上昇する場合、炉底摩擦力は変わらず炉壁摩擦力が増加するので、押出力は炉底近傍では増加せず、より上部で増加する。その結果、ある部分で極端に押出力が上昇するような現象は見られない。

(4) CS炉蓋を支えた状態でコークスケーキ圧縮試験を行い、押出力の摩擦力による減衰がほぼ予測どおりに起ることを確認した。また、押出圧力上昇によりランキン係数が変化するような現象は観測されなかった。従って、コークス炉押出力を、ランキン係数をもとに、その炉幅テーパーによる変化を考慮して、推算することが可能である。

(5) パイロットプラント操業において正味押出力は最大430kNに達したが、炉壁損傷は見られなかった。押出力の許容限界は、膨脹圧の場合と同様に、局所的な圧力ではなく、炉壁全体への荷重での湾曲で起る損傷により決められると考えられる。この考え方からの押出力許容限界を算出でき、その範囲内に押出力が収るように、コークス炉操業設計を行うことが必要である。

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. 1st Int. Cong. on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 378.
- 2) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liege, (1996), 285.
- 3) 西岡邦彦, 山田 猛, 大島弘信, 杉山勇夫, 須山真一, 藤川秀樹, 山本雅章, 笹原茂樹: 第12回石炭利用技術会議講演集, 石炭利用総合センター, 東京, (2002), p. 1-2-1.
- 4) H.Nakai, M.Sasaki, M.Matsuura, K.Nishioka, I.Sugiyama and S.Suyama: Proc. 3rd Int. Conf. on Science and Technology of Ironmaking, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, (2003), 550.
- 5) A.E.Horton and D.T.Freeman: The Year-book of the Coke Oven Managers' Association, C.O.M.A. (Year Book) Ltd., Mexborough, (1979), 209.
- 6) J.Gibson and D.H.Gregory: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 38, ISS-AIME, Warrendale, (1979), 52.
- 7) J.Tucker and G.Everitt: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 48, ISS-AIME, Warrendale, (1989), 599.
- 8) K.Nishioka, H.Ueda, S.Ogawa and S.Yoshida: *Coke Circular*, **35** (1986), 21.
- 9) D.Isler: *Rev. Metall., Cah. Inf. Tech.*, **88** (1991), 895.
- 10) S.Watakabe, K.Takeda, H.Suginobe and H.Itaya: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 165.
- 11) C.Meyer, D.Habermehl and O.Abel: *Glückauf-Forschungshefte*, **42** (1981), 233.
- 12) T.Arima, K.Fukuda and K.Kato: to be published.
- 13) J.Tucker, G.Everitt and G.Hall: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 50, ISS-AIME, Warrendale, (1991), 211.
- 14) S.Nomura and T.Arima: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 955.
- 15) J.F.McDermott and R.L.Rueckl: *Iron Steelmaker*, **13** (1986), 51.
- 16) Y.Suga and E.Shimokawa: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 29, ISS-AIME, Warrendale, (1970), 9.