

コークス押出力影響要因の解析

Analysis of Factors Influenced on Coke Pushing Force

愛澤 禎典*
Sadayoshi AIZAWA

杉浦 雅人
Masato SUGIURA

境田 道隆
Michitaka SAKAIDA

抄 録

乾留後のコークス押出力が高位になると、押し詰まり等の操業トラブルを誘発するだけでなく、過大な炉壁荷重が炉壁を損傷させることで炉体の損傷が進行する。また、押し詰まりコークスの掻き出しや炉壁補修が必要となるため、炉の生産能力が低下しコークスの安定生産が困難となる。日々の操業において押出力を管理しているが、その影響要因は多岐にわたるため、それらの要因を解明して操業管理を行うことが必要となる。

Abstract

Excessive pushing force of discharging coke from oven chamber causes operation troubles for example pushing clogging, and excessive load toward oven wall progresses oven wall damage. Scraping clogged coke and repair of oven wall reduces productive ability of coke oven and stable production of coke became difficult. Pushing force is controlled in daily operation of commercial coke oven, but there are many factors influencing pushing force, operation controlling based on discovering those factors is needed.

1. 緒 言

日本製鉄(株)では、老朽化したコークス炉のリプレースを進めているが、それでも稼働40年超の老朽化したコークス炉もまだ多く存在しており、炉命延長や炉体管理はコークス製造工程における重要課題である。特に、コークスを炭化室から押し出す際の押出力の極端な上昇や押し詰まりが発生すると炭化室の炉壁に過大な負荷が作用し、炉壁の損傷を誘発する。したがって、コークス押出力に影響を及ぼす要因の解明は非常に重要である。

炭化室内のコークスは“コークスケーキ”と称される、炉壁に垂直あるいは水平な亀裂により分断されたコークス塊の集合体である。押出が開始するとコークスケーキは炉長方向に圧縮されると同時に炉幅方向に膨張し、それにより炉壁へ荷重が作用する。すなわち、コークス押出力は基本的には、炭化室内における炉壁摩擦力と炉底摩擦力の和で表される。

$$F = 2F_w \cdot \mu_w + F_s \cdot \mu_s \quad (1)$$

ここで、 F_w ：炉壁に作用する荷重、 F_s ：炉底に作用する荷重、 μ_w ：炉壁摩擦係数、 μ_s ：炉底摩擦係数である。 F_s は

概ねコークス自重であるため、炭化室容積と石炭の装入密度でほぼ決まる。

各摩擦係数は、炉壁あるいは炉底の損傷度合が影響するが、老朽炉においては炉壁損傷の影響のほうが著しい。また、炉壁に作用する荷重は、圧縮された際にコークスケーキがどれだけ炉壁側に変形するかに加え、乾留過程でコークスが収縮することにより生ずる、終了時の炉壁とコークスケーキ間の間隙量(以下、水平焼減りと称す)により決定される。すなわち、コークス押出力の影響要因は、乾留条件、石炭性状、炉体状況に起因するものに大別される。本報では、これらの要因が押出力に及ぼす影響の実験室検討に加え、実際に老朽化が進行した炉における乾留中の炉壁変位挙動について実機測定を行った結果について報告する。

2. 本 論

2.1 乾留条件や石炭性状が押出力に及ぼす影響

2.1.1 ランキン係数に影響する因子

(1) 実験方法

コークスケーキ圧縮試験には、可動壁乾留試験炉(炭化室寸法：炉幅450mm、炉高1100mm、炉長1050mm)を用

* プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

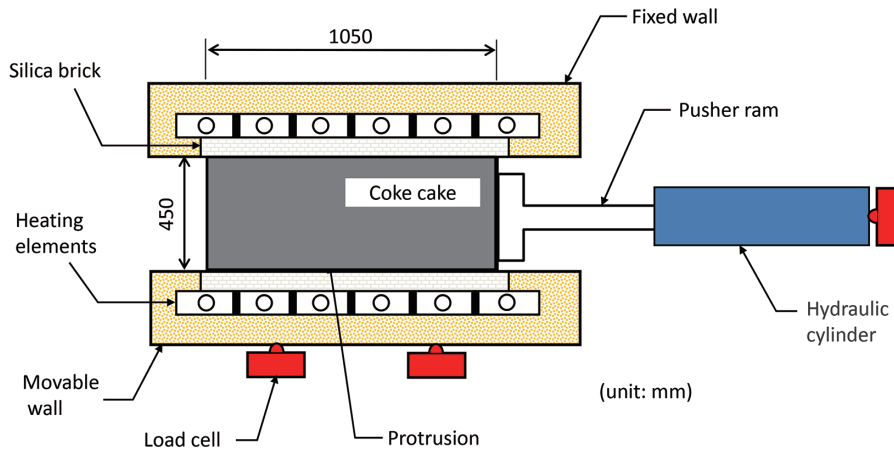


図1 コークスケーキ圧縮試験装置概要
Experimental apparatus for coke cake compressing test

いた。乾留終了後、CS (反押し機側) 炉蓋を後ろから支えた状態で、押し機でコークスケーキに荷重をかけていき、押し力、可動壁、CS 炉蓋への荷重を連続的に測定した。図1に試験概要を示す。石炭は、平均反射率1.18%~1.21%、流動度 log (MF/ddpm) 2.4 ~ 2.6 の配合炭を用い、炉温は1100℃~1350℃とした。

(2) 実験結果

(2)-(i) 圧縮時のコークスケーキ挙動

コークスケーキ圧縮時の挙動の一例を図2に示す。押し圧力が作用し始めると、コークスケーキは直ちに圧縮され始め、炉壁にも荷重が作用した。コークスケーキと炉壁の間には乾留中のコークス収縮により生成する間隙が存在しているが、コークス表面の凹凸にはばらつきがあるため、最初から炉壁に接触している箇所も存在するためと考えられる。

炉壁圧力は押し圧力にほぼ比例して増加した。そこで、押し圧力を P 、炉壁圧力を P_w としたとき、(2) 式で定義されるランキン係数 K を、図2の炉壁圧力と押し圧力の関係から求めた。

$$K = P_w / P \quad (2)$$

ランキン係数は、側圧転換率とも称され、その値が大きいほど炉壁への圧力が大きく、ひいては押し圧力が高くなることを意味する。圧縮初期にはばらつきの大きな区間があるがその後はほぼ一定となり、図2の例では $K \approx 0.08$ である。

(2)-(ii) ランキン係数に及ぼす炉温と炭中温度の影響

乾留終了時の炭中温度を 420℃~1000℃の間で変化させたときのランキン係数を、炭中温度に対してプロットしたものを図3に示す。炭中温度が低いことは炉幅方向中央部の収縮が十分でないことを意味し、水平焼減りの量は小さくなる。図3の結果を水平焼減りにより整理したものを図4に示す。炉温一定の場合、亀裂生成あるいはコークス粒度に著しい差はないと考えられ、水平焼減りの減少によりランキン係数が増大している。炉温によるランキン係数の差は水平焼減りのみで整理した関係から外れる傾向にあ

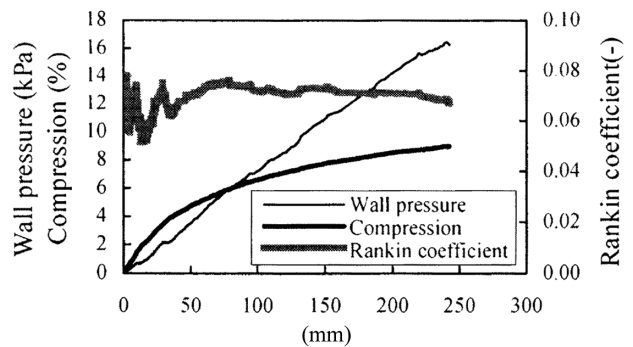


図2 コークスケーキ圧縮挙動
Behavior of coke cake compressing

り、同じ水平焼減り量の場合、炉温が高いとランキン係数が高い傾向にある。炉温が高いと亀裂がより多く生成し、圧縮時にコークスケーキが炉幅方向に変形しやすくなるためと考えられる。炭中温度一定条件で炉温を変化させた際のコークスケーキみかけポアソン比 (冷間で水平焼減り=0mm の条件でのランキン係数に相当する物性) 測定試験でも、同様の結果が得られている。

水平焼減りだけの影響を調べるため、圧縮試験時に片側の可動壁を 1~3mm 移動させてコークスケーキと炉壁の間隙を大きくした条件での測定を行った結果を、図4の炉温 1200℃データとともに図5に示す。圧縮時に炉幅を拡大することでランキン係数は低下しており、炭中温度の低下によるランキン係数の増大は、主に水平焼減りの減少に起因していると考えられる。したがって、特に老朽炉においては乾留不足に伴う炭中温度の低下が起こらないような操業管理、炉体管理、例えば十分な置時間の確保や燃焼室損傷の回避などを確実に行うことが重要となる。

2.1.2 老朽炉における乾留中の炉壁変位挙動

先述したように、水平焼減りは乾留時の炉幅方向コークス収縮により生ずる。コークスの収縮に影響する要因としては石炭の揮発分量や装入嵩密度等があり、揮発分量が少

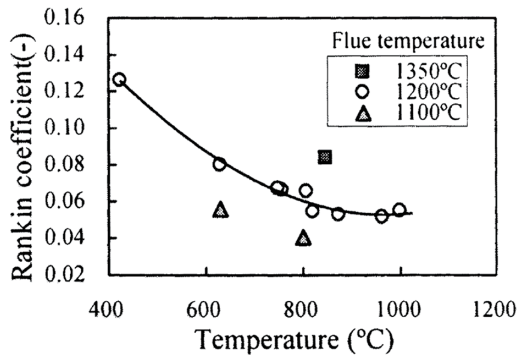


図3 ランキン係数の炭中温度影響
Effect of coke temperature on Rankin coefficient

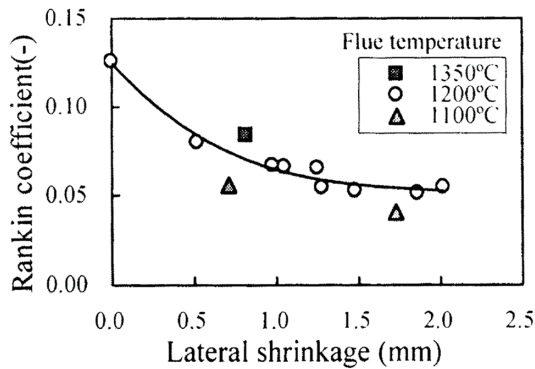


図4 ランキン係数の水平焼減り影響
Effect of lateral shrinkage on Rankin coefficient

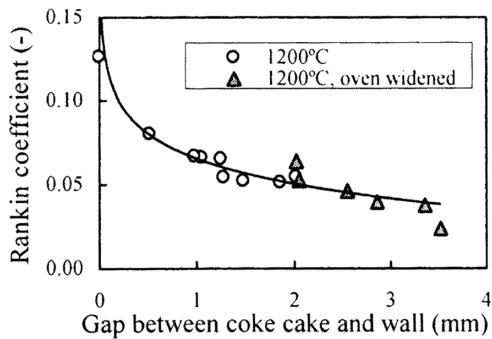


図5 ランキン係数のコークス - 側壁間隙量影響
Effect of gap between coke cake and wall on Rankin coefficient

ないほど、また嵩密度が高いほど収縮量が小さくなることは試験コークス炉を用いた乾留試験²⁾にて示されている。しかしこの結果は炉壁が完全に固定され変位しない条件のもとでの測定であり、実コークス炉においては状況が異なると考えられる。

炭化室内で石炭を乾留すると、軟化溶融層が発生ガスを内包することにより生ずる圧力（以後、ガス圧）がコークス層を介し炉壁に力を作用させる。この力は膨張圧と呼ばれている。軟化溶融層のガス圧は使用石炭の性状や嵩密度等により変化するが、膨張圧が高いと煉瓦構造体である炉壁は撓むように変位する。隣窯の膨張圧による炉壁変位は水

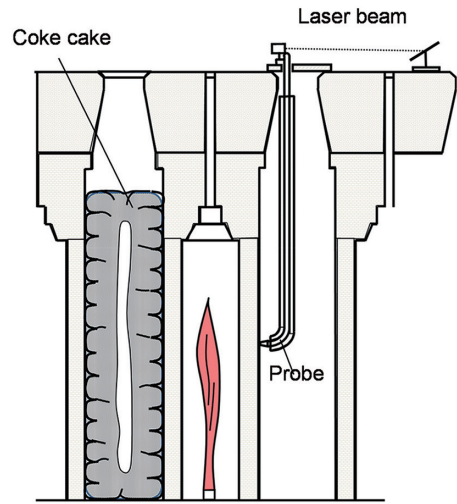


図6 実炉炉壁変位測定法概要
Side view showing determination of wall displacement

平焼減りを減少させ、前項で述べたようにランキン係数を増大、ひいては押出力を増大させると考えられている。

老朽化した炉の炉壁は、炉縮力の低下や炉長方向への炉体膨張により荷重に対する剛性が低下しているため、同じ膨張圧が作用したとしても新しい炉に比較して変位しやすく、押出力に及ぼす影響が異なると考えられる。そこで、実炉において石炭乾留中の炉壁変位を連続的に測定し、膨張圧による炉壁変位と押出力との関係の評価した⁴⁾。

(1) 実験方法

炉壁変位の測定は、北海製鉄（現 日本製鉄室蘭製鉄所）の第6コークス炉において、全炉壁煉瓦積替後1年の#46炭化室と、稼働26年の#72炭化室を対象に行った。測定の概要は図6に示すように、先端が炉高中央部に位置するように設計した水冷プローブを測定対象窯の隣窯に装入、プローブ全体がピボット方式で懸垂するようにした。乾留が進行している隣窯からの変位は、プローブ上部部に設置したレーザー発振器からの光線が受光板上に示す輝点の位置を読み取ることで求めた。また、炉壁変位と同時に乾留中のガス圧を、内径1mm／外径2mmのステンレス鋼管を炉幅方向中央部に装入することで測定した。

石炭配合は、炉壁の倒壊限界とされている8～10kPaまで炭中ガス圧を上げることを狙い、測定期間（1週間）中に高膨張圧炭の配合比率を変化させた。測定は、炉壁煉瓦積替後1年の#46炭化室で2水準、稼働26年の#72炭化室で3水準行った。

(2) 実験結果

乾留中の炉壁変位および炭中ガス圧の測定結果の一例（#46炭化室）を図7に示す。図7の上図、炉壁変位測定において変位がプラスの値であることは、隣窯（装炭窯）からの変位により測定対象窯の炉壁が炉幅方向中央に向かってせり出していることを示す。炉壁は隣窯装炭時に大きく変位し、その後徐々に復元するが装炭後約9時間後に再び

プラス側に転じてピークを示す。装炭開始後約9時間の点は、炭中温度が石炭の軟化溶融温度域であること、また炭中ガス圧が最大値をとることから、このときの炉壁変位を膨張圧による変位と判断される。

乾留中、炭中部が軟化溶融温度となる点の炭中ガス圧ピーク値とそこに対応する炉壁変位量の関係を図8に示す。炉壁変位量は炭中ガス圧に対しほぼ直線的に増加しており、直線の傾きから求めた単位ガス圧あたりの炉壁変位量は#72炭化室(老朽窯)で0.67mm/kPa、#46炭化室(健全窯)で0.14mm/kPaであり、老朽窯のほうが約5倍大きかった。先述のように老朽炉の炉壁は、炉縮力の低下や炉長方向への炉体膨張により荷重に対する剛性が低下していることが示された。

ガス圧が押出抵抗に及ぼす影響を図9に示す。ここでは、コークスの押出抵抗に相当する押出機モーターの電流値の最大値で示している。押出電流の絶対値は#72炭化室(老朽窯)のほうが大きいとともに、ガス圧の増加に対しては#46炭化室(健全窯)はほとんど影響を受けないのに対し、#72炭化室(老朽窯)は著しく増加している。これは、先述したように隣窯からの炉壁せり出しが水平焼減りを減少さ

せる影響度が老朽炉のほうが大きいことに加え、膨張圧消失後の自窯の収縮開始点が初期位置よりも外側に位置するため、そのぶん水平焼減りが減少することも影響していると考えられる。いずれにせよ、老朽炉においては水平焼減りを十分に確保するため、膨張圧を低位に保つ石炭配合や嵩密度設計等の適切な操業管理が求められる。

2.2 炉体状況が押出力に及ぼす影響

前項では、乾留条件や石炭性状が押出力に及ぼす検討について述べたが、炉体状況も押出力に大きく影響する。“炉体状況”と言ってもコークス炉においてはその項目は非常に多岐にわたるが、ここでは炉壁状況のことを意味する。老朽化したコークス炉は、炭化室炉壁表面に損傷が多く存在するのに加え、煉瓦の損耗部にカーボンが付着し突起となるため、炉壁の平滑度は失われ凹凸が増大する傾向にある。そのような凹凸はコークス押出時の抵抗となって押し詰まり等のトラブル要因となるばかりでなく、炉壁方向に作用する荷重を増大させ、さらに炉壁の損傷を進行させる。炭化室炉壁の補修技術については他稿⁵⁾に譲るとして、ここでは炉壁凹凸がコークス押出力に及ぼす影響や、凹凸部

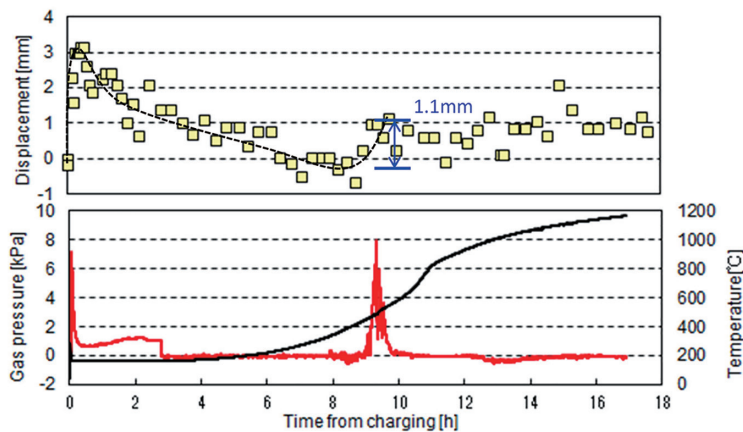


図7 乾留中の実炉炉壁変位および炭中ガス圧の変化
Profile of gas pressure, temperature and wall displacement during carbonization (Chamber #46)

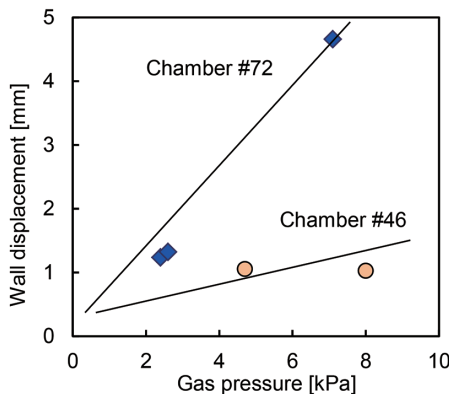


図8 ガス圧ピーク値と炉壁変位量の関係
Relationship between maximum gas pressure and wall displacement

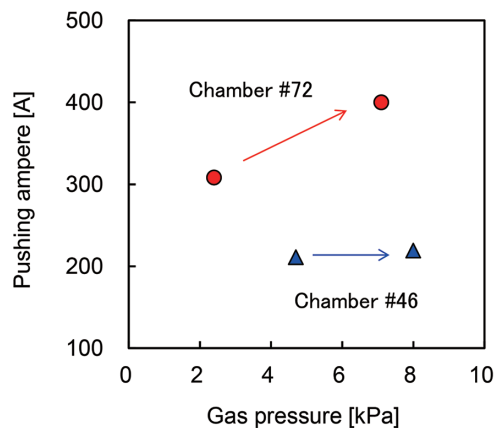


図9 ガス圧ピーク値と押出電流値の関係
Relationship between maximum gas pressure and pushing ampere of coke cake

を通過する際のコークスケーキ挙動について、実験室試験により定量的に検討した結果^{6,7)}について述べる。

2.2.1 炉壁面凹凸形状がコークス押出力に及ぼす影響

(1) 実験方法

試験装置の概略を図10に示す。幅420mm、高さ400mm、長さ610mmの焼成缶内に石炭を充填し乾留して製造したコークスケーキの前後に油圧シリンダーを配置し、一定の反力を加えた状態で押出力を測定した。炉壁面の凹凸を模擬するため、装置側壁の片面に図11に断面形状を示す突起を取り付けて狭小部を構成した。断面の台形上底部に相当するテラス面の長さは220mmで一定とし、突起厚Hあるいは傾斜角度 θ を表1に示すように変更した。突起の高さはコークスケーキと同じ400mmとした。押出速度は140mm/s、最大ストロークは500mmとした。

(2) 実験結果

押出量に対する各荷重の変化の一例(突起厚40mmの例)を図12に示す。押出量100mm超から荷重が発生し始め、

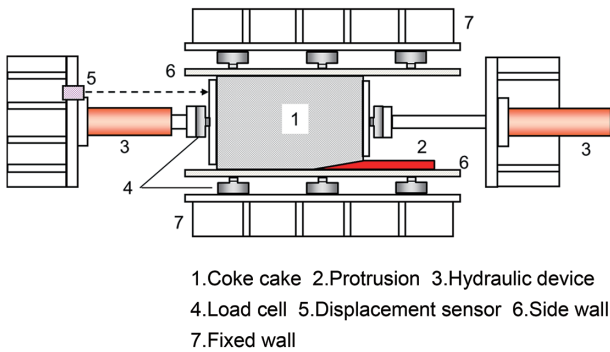


図10 冷間コークス押出力測定試験装置概要(上面図)
Experimental apparatus for pushing force measurement

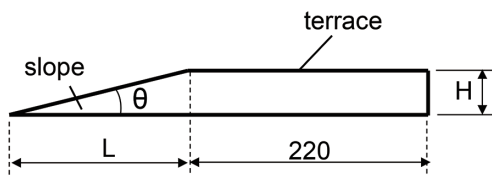


図11 炉壁突起断面形状
Profile of protrusion

表1 突起形状条件
Protrusion profile conditions for pushing test

H [mm]	L [mm]	θ [deg]
0	180	0
10	180	3.2
20	180	6.3
30	180	9.5
40	180	12.5
50	180	15.5
30	90	18.4
30	45	33.7
30	30	45.0

反力は20kN一定で推移するが押出力と側壁荷重は増加し続け、約430mmで一定となる。この値が、コークスケーキが突起による炉壁狭小部を通過するのに必要な力であると考えられる。図13には突起厚Hを変化させた場合の押出力測定結果を示す。押出力は突起厚の増加に伴って指数関数的に増加し、その影響が大きいことがわかる。また、突起厚H=30mm一定で突起の斜面角度を変更したときの押出力と側壁荷重の測定結果を図14に示す。斜面角度が増加すると押出力は直線的に増加するが、逆に側壁にかか

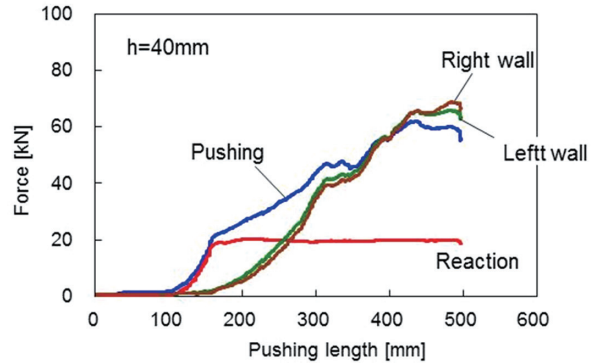


図12 コークス押出時の荷重変化
Profiles of pushing force, load on wall and reaction force

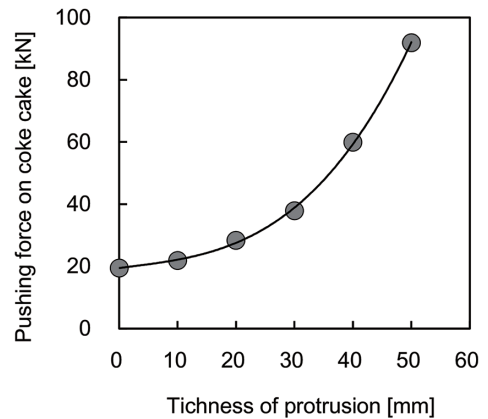


図13 突起厚が押出力に及ぼす影響
Influence of protrusion thickness on pushing force

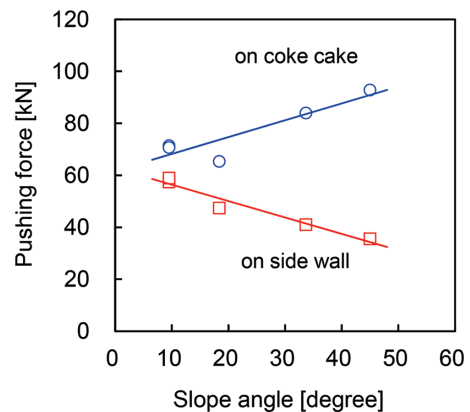


図14 突起斜面角度が押出力に及ぼす影響
Influence of protrusion slope angle on pushing force

る力は減少した。これは、突起斜面に垂直に作用する荷重が、突起斜面角度が小さいほど側壁側に分配されることに加え、スロープ長さLが大きくなるため、コークスと斜面が接する範囲が広がることも影響した結果であると推察される。

2.2.2 炉壁突起がある場合の押出力に及ぼす炉幅方向間隙量の影響

(1) 実験方法

コークスケーキが突起による炉幅狭小部を通過するときの状況を、図15に模式的に示す。炉幅方向に対して存在する間隙は、コークスケーキ表面と炉壁間の間隙、すなわち水平焼減りと、コークスケーキ内部の炭化室中央部に炉長方向に存在する大亀裂に大別される。緒言でも述べたように、水平焼減りは炉幅方向のコークス採取により生成するものであるため、石炭性状あるいは操業条件に影響される。炭化室中央部の亀裂も同様である。炉幅狭小部を通過する際には、コークスケーキは突起を“乗り越える”挙動をするため、炉幅方向へのコークス塊移動しやすさ、すなわち間隙の量が突起の乗り越えやすさ、ひいては押出力に影響すると考えられる。

そこで、図10に示す試験装置を用い、突起厚を0mm～50mmに変更した条件で押出力測定を行った。テラス長さは220mm、斜面長さは180mmで一定とした。石炭性状を変更、あるいは試験装置の側壁間距離を変更して、幅方向の炉幅方向の間隙量を種々変化させた。幅方向の間隙量は、図16に示すようなコークスケーキのX線CT画像をもと

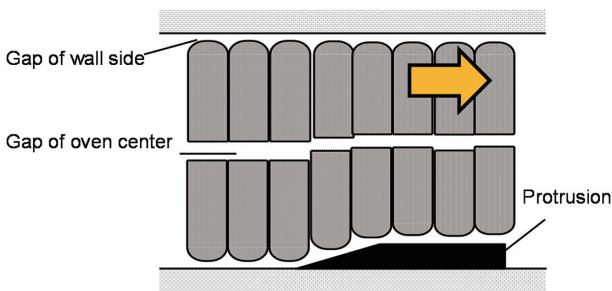


図15 狭小部通過時のコークスケーキ模式図
Schematic view of coke cake passing the narrow district

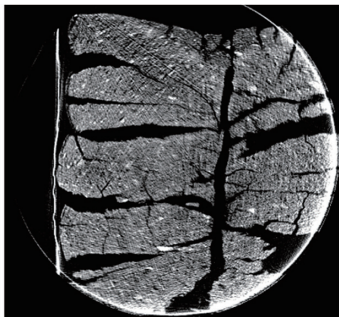


図16 コークスケーキのX線CT像
X-rays CT image of the coke cake

に算出した。

(2) 実験結果

図17に、突起厚H=30mmの条件における、突起乗り越えに必要な力に及ぼす幅方向の総間隙量の影響を示す。突起乗り越えに必要な力は、押出力から反力を減じた力で表される。突起乗り越え、すなわち狭小部通過に必要な力は、炉幅方向の全空隙量とよい対応関係がみられた。なお、コークスケーキ中央の空隙量と側壁側の空隙量の割合はまちまちであるが、総空隙量で一義的に整理できたことは、中央と側壁側の空隙の影響はほぼ等しいことを意味していると考えられる。図17に示すデータは突起厚H=30mmで一定であったが、突起厚Hの量を変化させた結果を加えると、同一の幅方向全間隙量において突起厚Hの値が大きいほど押出力が高くなり、一義的に整理できない。そこで、突起乗り越えは突起厚Hとともに増加し、全間隙量wとともに減少するとの考えから、以下の指数Qnを規定した。

$$Q_n = \{100(H - w) / L\} \quad (3)$$

図18に、H、w、Lを種々変更した試験における指数Qnと突起乗り越え力の関係を示す。指数Qnと押出力は良好な対応がみられた。突起厚Hおよび炉壁間距離Lは炉体要因、全間隙量wは石炭あるいはコークスケーキ要因で

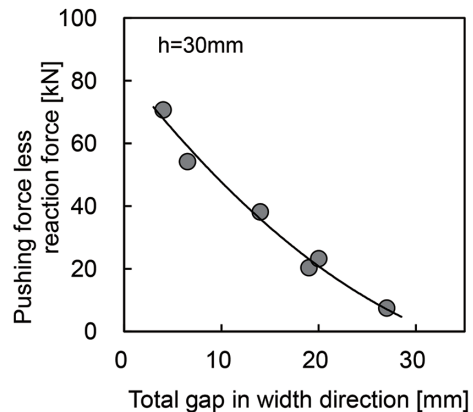


図17 炉幅方向総間隙量が突起乗り越え力に及ぼす影響
Influence of total gap in width direction on pushing force less reaction force

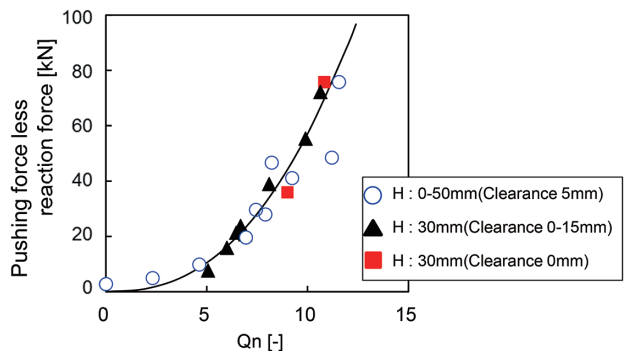


図18 指数Qnと突起乗り越え力の関係
Relationship between index Qn and pushing force less reaction force

あるため、突起乗り越え力に影響する各要因から構成される指数 Q_n で概ね整理できたものと考えられる。

3. 結 言

本報では、コークスケーキの押出力に影響する要因として、乾留条件、石炭性状、炉体状況に起因するものについて、その影響度をそれぞれ定量的に評価した結果について述べた。これらの知見をもとに、実機においては水平焼減りの確保の観点から膨張圧に上限値を設定し、石炭配合および操業管理を行っている。また、炉壁の凹凸に関しては、その補修を的確に実施することに加え（詳細は他稿に譲る）、コークスケーキの全空隙量を保つことを念頭に操業管理を実施している。また、X線CTの適用は従来決して見ることができなかったコークスケーキ内部の形状を観察可能にし、コークスケーキの特性をより定量的に評価することを可能にした。しかしながら、押し詰まりなどの押出トラブルの原因については全て明確になったとは言い難いことも

あり、今後とも現象の理解とメカニズムに立脚したコークス押出挙動の解明を推進していく。

参考文献

- 1) 有馬孝, 福田耕一, 加藤健次: 鉄と鋼, 90 (9), 130 (2004)
- 2) Aizawa, S., Uebo, K., Yoshida, S., Miyahara, M.: 5th ECIC Proceedings, Tu2:5, 2005
- 3) 野村誠治, 有馬孝: 鉄と鋼, 85 (4), 1 (1999)
- 4) 中川朝之, 窪田征弘, 有馬孝, 福田耕一, 加藤健次, 阿波靖彦, 杉浦雅人, 三樹賢治, 岡西和也, 杉山勇夫: 鉄と鋼, 96 (3), 1 (2010)
- 5) 杉浦雅人, 境田道隆, 藤懸洋一, 入江敬介: 計測自動制御学会論文集, 47 (10), 435 (2011)
- 6) 中川朝之, 有馬孝, 福田耕一, 加藤健次, 杉浦雅人, 境田道隆, 内藤誠章: CAMP-ISIJ, 22, 153 (2009)
- 7) 中川朝之, 有馬孝, 福田耕一, 野村誠治, 杉浦雅人, 境田道隆: CAMP-ISIJ, 25, 971 (2010)



愛澤禎典 Sadayoshi AIZAWA
プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



境田道隆 Michitaka SAKAIDA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 首席主幹



杉浦雅人 Masato SUGIURA
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員 博士(理工学)