

# コークスケーキのランキン係数への乾留条件の影響

有馬 孝\*・福田 耕一\*・加藤 健次\*

Effect of Coking Conditions on Rankin Coefficient of Coke Cake

Takashi ARIMA, Koichi FUKUDA and Kenji KATO

**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). As a cokemaking process, it is important to guarantee safe and stable pushing. Coke pushing behavior was studied by using a pilot-scale coke oven and influence of coking conditions on the Rankin coefficient was investigated. It was found that Rankin coefficient was dependent on lateral shrinkage and fissure density in coke cake and that it can be controlled by controlling the fissure density in SCOPE21 process.

**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) の開発が日本鉄鋼連盟参加企業により進められている<sup>1,2)</sup>。このプロセスは、(1) 石炭嵩密度上昇や石炭急速加熱などによる非微粘結炭 50%使用、(2) 石炭高温予熱、高熱伝導率薄壁炉壁煉瓦および中低温窯出しによる生産性約3倍への向上、(3) NOx 30%削減、密閉化などの環境改善、および(4) 高効率化による省エネルギー20%を目標としている。

一方、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排出できることが最低限の必要条件である。押し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、押し詰りが発生することが懸念される。

例えば、Hortonら<sup>3)</sup>は、コークスの押出力の一部が炉壁に伝達されて生じる摩擦力が押出力上昇の原因と考え、押出力の炉壁への伝達を可動壁炉実験により検討しているが、石炭嵩密度の上昇と乾留速度の上昇により炉壁に伝達される圧力(以下、炉壁圧と称す)が増加するという結果を得ている。なお、その原因はコークスケーキの亀裂の増加であると推察している。その後、Tuckerら<sup>4)</sup>も同様の報告を行っている。SCOPE21プロセスでは、石炭予熱による高嵩密度下でかつてない高速乾留を狙っており、押出力

上昇が危惧される。

西岡ら<sup>5)</sup>も250 kg試験炉を用いて押出力の炉壁側への伝達を冷間で検討し、炉温上昇あるいは押し出し時の炭中温度(炭化室中心部のコークス温度)低下により、押出力による炉壁圧が増加することを見いだしている。Isler<sup>6)</sup>も可動壁炉実験により同様の結果を得、炭中温度を1050°Cから850°Cに低下させると押出力は1.5倍~3倍になると予測している。SCOPE21プロセスではコークス炉での炭中温度を低下させる中低温窯出しを計画しており、この点からも押出力上昇の可能性がある。

また、渡壁ら<sup>7)</sup>は、石炭配合の押し出し性への影響をHortonらと同様の可動壁炉実験により検討し、配合炭の流動度または石炭化度を低下させると、押出力による炉壁圧が増加し押し出し性が悪化するという結果を得ている。SCOPE21プロセスでは、非微粘結炭を多量配合する結果、配合炭の石炭化度および流動性が低下するため、渡壁らの結果からも、押し出し性悪化の可能性があると見える。ただし、Isler<sup>6)</sup>は、微粘結炭100%の場合について押出力による炉壁圧は減少するという結果を得ており、必ずしも一致した結果が得られているわけではない。

また、渡壁らは、Hortonらと異なり、コークスの亀裂の増加が押出力を低下させると考察している。すなわち、石炭流動度が高い場合、コークスの横亀裂(炉壁に平行な亀裂)が増加しており、これが炉壁への押出力の伝達を阻害していると述べている。この場合、SCOPE21プロセスでは押し出し性が改善される可能性があることになる。

本論文では、コークスの押し出し性に影響するコークス

ケーキ構造検討し、さらに、SCOPE21プロセスのコークス押し出し性を検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

可動壁乾留試験炉を用いて Hortono<sup>3)</sup>と同様のコークスケーキ圧縮実験を行った。炭化室寸法は、炉幅450mm、炉高1100mm、炉長1050mmであり、実コークス炉炭化室内の炉幅方向伝熱とコークス化現象をシミュレートするため、炉幅は実炉と同一とし、炉高と炉長とを縮小している。加熱は、垂直に取り付けた炭化珪素製のU字型発熱体による電気加熱である。

加熱壁には実コークス炉同様、珪石煉瓦を使用した。珪石煉瓦としては、既設炉の珪石煉瓦(熱伝導率2.3 W/mK at 1000°C, 厚み100mm)およびSCOPE21で開発された超高密度珪石煉瓦USDB(熱伝導率3.1 W/mK at 1000°C, 厚み70mm)とを使用した。

乾留終了後、反押し機側の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掛けていき、押し力および可動壁と反押し機側の炉蓋への荷重をロードセルにより測定した。押し機は油圧装置により最大100kNの荷重を掛けることができる。押し圧に対するコークスケーキの過渡的ではない平衡状態での応答を検出するため、押し速度は5mm/sあるいはそれ以下とした。

石炭は、平均反射率1.18%~1.21%, log(MF/ddpm) 2.4~2.6の配合炭を主に用いた。非微粘結炭としては平均反射率0.75%, log(MF/ddpm) 1.9の石炭を用いた。

装入炭水分は5%または3.5%とし、装入炭の嵩密度は、水分5%の場合760 kg/m<sup>3</sup>、水分3.5%の場合850 kg/m<sup>3</sup>であった。

SCOPE21乾留条件の影響を検討するためには、炉壁煉瓦をSCOPE21で開発された超高密度珪石煉瓦USDBに変更し、石炭を350°Cに予熱して乾留してコークスケーキ圧縮試験を行った。石炭の予熱は、電気加熱外熱式ロータリーキルンを使用し、乾炭ベースで約350kgの石炭を窒素気流中で約6時間かけて350°Cまで昇温した後、一旦石炭ホッパーに移し、試験炉炭化室に装入した。装入時の石炭温度は約320°Cであった。また、装入炭嵩密度は820 kg/m<sup>3</sup>であった。

コークスを分断する亀裂において押し圧力の分散が起り、分断していない亀裂においては圧力の分散は起らないと考え、押し力の炉壁への伝達に寄与する亀裂として、コークスケーキ内のコークスを塊に分断している二種類の亀裂を評価した。ひとつは、炉壁に垂直な縦亀裂のうちコークスケーキを塊に分断している主亀裂であり、もう一つは、炉壁に平行な横亀裂のうち主亀裂で分けられた塊を分断しているものである。炉壁単位面積当りの主亀裂密度は炭化室中心部の塊の粒度を篩分けにより測定し、その平

均粒度の2乗の逆数により定義した。主亀裂で分散した押し出力がさらに塊を分断する横亀裂で分散すると考え、塊1個当りの横亀裂数として横亀裂密度を定義した。具体的には、炭化室の表面、炉底および炉蓋近傍を除く全コークス塊について塊を分断する横亀裂数を数え、その平均値を算出した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 圧縮試験時のコークスケーキの挙動

#### 3.1.1 炉壁圧力

圧縮の際のコークスケーキの挙動の例をFig. 1に示す。ラムがコークスケーキに当たるまでの押し力は押し機の摩擦などでありコークスには作用していないと考えられるので、横軸の押し圧力の算出からは差引いている。

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、また炉壁にも荷重が作用した。水平焼減り(コークスケーキと炉壁の間隙)が存在しているが、水平焼減りにはばらつきがあり、水平焼減りが最初から全くない部分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上昇した。そこで、押し圧力を $P$ 、炉壁圧力を $P_w$ とするとき(1)式で定義されるランキン係数 $K$ をFig. 1の炉壁圧力と押し圧力の関係の直線の傾きから求めた。なお、各時点における $K$ を求めても、Fig. 1に示すように、初期にはばらつきが大きい場合もあるが、押し圧力250kPaまでの範囲でほぼ一定の値を示した。

$$K = \frac{P_w}{P} \dots\dots\dots(1)$$

Tucker<sup>4,8)</sup>は圧縮試験中にコークス塊に横亀裂からの破壊が発生することを報告している。このことから圧縮試験中にランキン係数が次第に上昇する可能性が考えられる。しかし、Isler<sup>6)</sup>も押し圧力100kPaまでの範囲でランキン係数はほぼ一定であったと報告しており、コークス塊の炉壁側への移動量の変化などの影響も総合された結果としてランキン係数がほぼ一定となったものと考えられる。

#### 3.1.2 炉蓋荷重および力の釣合い

反押し機側の炉蓋への荷重も押し力が作用し始めると直

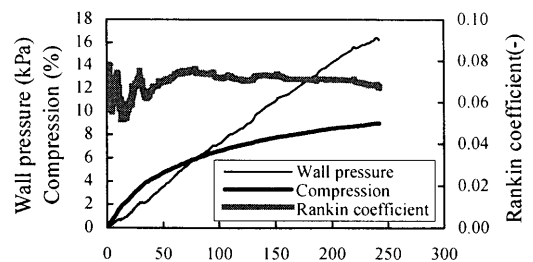


Fig. 1. Pushing behavior.

ちに作用し始めた。コークスケーキ内には亀裂が空隙として残っている。すなわち、石炭は500°C前後で再固化してから1000°Cに昇温する間に、炭種により異なるが、11~16%程度収縮する<sup>9)</sup>ので、炉長方向にはこれに相当する空隙が存在している。しかし、垂直焼減り（炉高方向の収縮）が、石炭層の乾燥による沈下を除くと、4%程度しかない<sup>9)</sup>にも拘らずコークスの自重が支えられていることから分るように、コークス塊は互いに絡み合っており、多くの空隙が存在しながらもいくつかの点で接触していると考えられる。このため、またこの圧縮試験では炉長が1.05 mと短いため、早い時期から押出力の一部が炉蓋に伝達されたものと考えられる。

押出力  $F$ 、炉蓋荷重  $F_D$  および炉壁荷重  $F_W$  の釣合いは、(2)式で表される。

$$F = F_D + 2\mu F_W + \mu g W \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $W$ はコークス質量、 $\mu$ はコークスと煉瓦の間の摩擦係数、 $g$ は重力加速度をそれぞれ表す。右辺第二項は炉壁との摩擦力を、右辺第三項は炉底との摩擦力をそれぞれ表す。今回の圧縮実験結果にこの式を適用すると、摩擦係数を0.5とした場合、 $\pm 5\%$ の範囲内で釣合いが取れていた。

### 3.2 炉温と炭中温度の影響

#### 3.2.1 炉温と炭中温度によるランキン係数の変化

Fig. 2に炭中温度によるランキン係数の変化を示す。ここで、炭中温度とは押出直前の炭化室中心部の温度である。実験条件としては、炉壁は従来の珪石煉瓦、装入炭水分5%、嵩密度760 kg/m<sup>3</sup>であり、石炭は平均反射率1.18~1.21%、log(MF/ddpm) 2.4~2.6の配合炭を用いている。炭中温度の低下に伴いランキン係数は上昇した。また、炭中温度が同一でも炉温が高い方がランキン係数は大きい。

この結果を水平焼減りにより整理した結果をFig. 3に示す。水平焼減りはコークス塊の収縮中心の位置により変化するためばらつきを持つ<sup>9)</sup>。収縮中心が炉幅方向の各位置にある場合の水平焼減りをセミコークスの収縮係数と炭化室内の伝熱計算とから算出し<sup>9,10)</sup>、収縮中心はランダムに分布すると考えて、それらの平均値を用いた。

炉温によるランキン係数の差は、水平焼減りで整理しても残っており、コークスケーキ中の亀裂の違いのためと考えられる。炉温一定の場合、コークス粒度に有意差は見られず亀裂に差はないと考えられるが、水平焼減り減少によりランキン係数が上昇している。

水平焼減りのランキン係数への影響を調べるため、平均反射率1.18~1.21%、log(MF/ddpm) 2.4~2.6の配合炭を用いた炉温1200°Cの乾留実験で、圧縮試験時に片側の可動壁を1~3 mm移動させて炉幅を拡大し、コークスケーキと炉壁の間隙を大きくした測定を行った。その結果を通常の炉幅を拡大していないデータとともにFig. 4に示す。押し

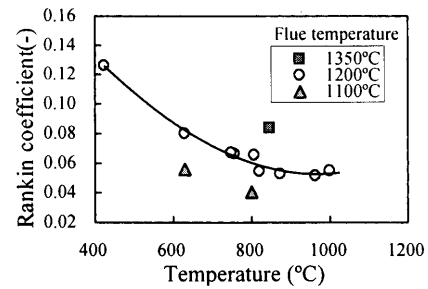


Fig. 2. Effect of coke temperature on Rankin coefficient.

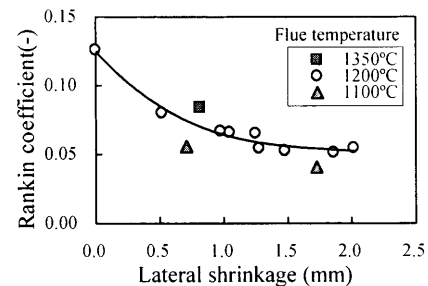


Fig. 3. Effect of lateral shrinkage on Rankin coefficient.

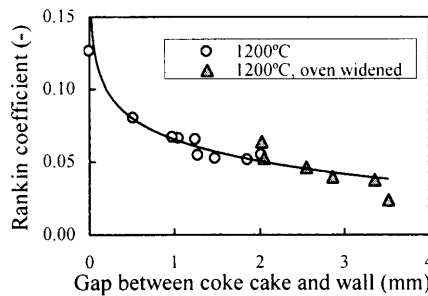


Fig. 4. Effect of gap between coke cake and wall on Rankin coefficient.

時に炉幅を拡大することによってもよりランキン係数は低下しており、炭中温度低下によるランキン係数の低下は、主に水平焼減り（コークスケーキと炉壁の間隙）の減少に起因していると考えられる。

#### 3.2.2 水平焼減りのランキン係数への影響

押出圧力により炉壁圧力が発生するのは、コークスケーキが押出圧力により炉壁側に移動して炉壁と接触するからである。この接触が起る原因として、Hortonら<sup>3)</sup>は直方体の煉瓦の列を押しした場合に蛇行して炉壁に接触することを指摘している。Gibsonら<sup>11)</sup>は、さらに、コークス塊の形状がくさび状になることの影響を指摘している。また、西岡ら<sup>5)</sup>は、コークスケーキは押されると炭化室中心部を境として炉壁側に膨らみ、炉壁に圧力を及すと述べている。また、その原因として、押出力により何らかの回転モーメントがコークス塊に作用することを想定している。

そこで、コークスケーキの圧縮挙動を冷間圧縮試験により調査した。炉幅420 mm、炉高400 mm、炉長620 mmの試験コークス炉で平均反射率1.14%、log(MF/ddpm) 3.1の単

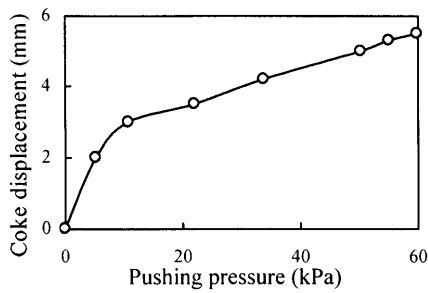


Fig. 5. Effect of pushing pressure on coke displacement.

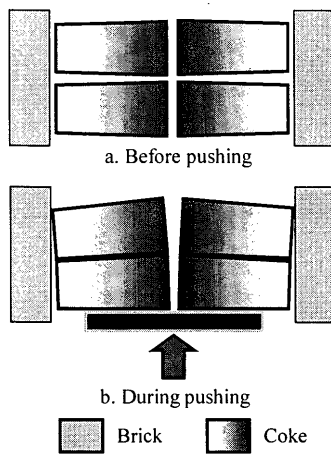


Fig. 6. Movement of coke during pushing.

味炭を炉温 1250°C 相当で乾留したコークスを、炉から取出して周囲に障害物のない状態で冷間で圧縮し、ラムから 100 mm の部分の炉壁側への移動量（片側）を測定した。その結果、Fig. 5 に示すように、コークスは押されるやいなや炉壁側に移動し始め、押出圧力 60 kPa で 5.5 mm 移動し、この時点でもまだ移動は収まっていない。

このようにコークスが押出圧力により炉壁側に移動するのは、コークス塊が煉瓦のように直方体ではないためと考えられる。すなわち、コークス塊は炉壁側が温度が高くより収縮しているため寸法が短く、炭化室中心側は逆に長い。例えば、炉壁側が 1100°C、炭化室中心側が 1000°C と十分乾留された状態でも 1% 前後の寸法差があり、炭化室中心側温度を 800°C に低下させると寸法差は 4% 前後に拡大する。主亀裂が炉壁に垂直とは限らないので、当然塊ごとにばらつきはあるが、平均的にはこのような状態になっている。このため、Fig. 6 に模式的に示すように、押されるとコークス塊は炉壁側に回転していくことになる。

従って、炭中温度低下によるランキン係数上昇には、水平焼減り減少の影響だけでなく、炉壁側と炭化室中心側のコークス寸法差の拡大により炉壁側に移動しやすくなることの影響も寄与している可能性も考えられる。

### 3.3 石炭嵩密度と石炭配合の影響

炉温 1350°C、水平焼減り 1.5 mm の条件で石炭嵩密度と配合を変えたときのランキン係数の変化を Fig. 7 に示す。

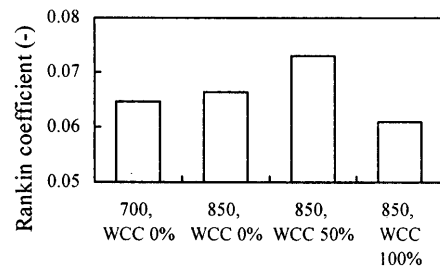


Fig. 7. Effect of coal bulk density and blending on Rankin coefficient.

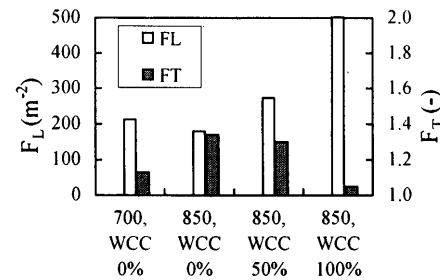


Fig. 8. Effect of coal bulk density and blending on coke fissure.

石炭嵩密度を 700 kg/cm³ から 850 kg/cm³ に上昇させてもランキン係数への影響は比較的小さい。非微粘結炭（図中では WCC と表記）を 50% 配合すると、ランキン係数は上昇したが、非微粘結炭 100% ではランキン係数はむしろ低下した。

この時のコークスを分断する亀裂の密度の変化を Fig. 8 に示す。石炭嵩密度上昇により主亀裂密度  $F_L$  は低下しているが、横亀裂密度  $F_T$  は増加しており、その結果ランキン係数は大きくは変化しなかったものと考えられる。乾留初期の炉壁近傍コークスの温度勾配が低下するため主亀裂は減少するが、塊寸法増加により塊内歪エネルギーが増加するため塊内亀裂は増加するものと解釈される<sup>12,13)</sup>。

非微粘結炭 50% 配合により、横亀裂密度  $F_T$  はやや低下しているものの主亀裂密度  $F_L$  が上昇しており、このためランキン係数が増大したと判断される。非微粘結炭は再固化後の収縮係数が大きいため多量配合すると亀裂が増加する。しかし、主亀裂増加による塊内歪エネルギー減少のため、また 600°C 程度以上での収縮係数は炭種による差は小さい<sup>10)</sup> ため、塊内亀裂は大きくは増加しなかったものと考えられる。

一方、非微粘結炭 100% の場合は、主亀裂密度  $F_L$  は増加しているが、横亀裂密度  $F_T$  が大きく減少しており、この効果が大きいためランキン係数が低下したものと解釈される。非微粘結炭は再固化後の収縮係数が大きいため主亀裂が増加するが、その結果、塊内歪エネルギーが減少するため塊内亀裂は減少する。また、コークスのヤング率が低い<sup>10)</sup> ため、熱歪に対する応力が小さい可能性もある。

Isker<sup>6)</sup> は、可動壁炉での圧縮試験を行い、石炭化度が高

い石炭の場合ほどランキン係数が大きいという結果を得ており、高石炭化度炭は膨脹圧が高く、水平焼減りが小さくなるためと考察している。膨脹圧により可動壁炉の炉壁が、強固に支えられているとはいえ、乾留中にmmオーダーで変位するため、その分水平焼減りが減少し、ランキン係数が上昇すると考えられる。今回使用した配合炭の膨脹圧は3kPa以下と低く、乾留中の炉壁変位は無視できる程度であった。従って、非微粘結炭の場合に膨脹圧が低いためにランキン係数が低下したのではないと判断される。

渡壁ら<sup>7)</sup>は石炭の流動度の上昇によりランキン係数が低下するという結果を得、同時にコークスの横亀裂の増加を観測している。粘結性の高い石炭のコークスに横亀裂が多いのは、Hortonら<sup>3)</sup>も指摘しており、よく観察される事実であるが、必ずしも塊を貫通していない。渡壁らの横亀裂密度測定はコークスケーキの垂直断面の写真により行われているので、貫通していない亀裂も測定されている可能性があると考えられる。

### 3.4 SCOPE21 乾留条件の影響

SCOPE21 乾留条件のランキン係数への影響を検討するため、炉壁煉瓦をSCOPE21で開発された超高密度珪石煉瓦USDBに変更し、非微粘結炭を50%配合した石炭を350°Cに予熱して乾留してコークスケーキの圧縮試験を行った。その結果を、既設炉条件での結果とともにFig. 9に示す。

この図の横軸は推算された水平焼減りである。SCOPE21条件では、煉瓦の伝熱抵抗が小さいため煉瓦の炭化室側表面温度が上昇し、実質的に炉温を上昇した効果が得られ、その結果、コークス内の温度勾配が大きくなり、水平焼減りが減少する傾向がある。しかし、一方で石炭を高温に予熱して装入することは、コークス内温度勾配を低下させる効果がある。これらが総合される結果、SCOPE21条件の水平焼減りは、既設炉で同一炉温で乾留する場合と比較して0.1~0.2mm小さい程度と計算された。

なお、粉コークスを添加した場合、厳密には、セミコークスの収縮係数が低下し、水平焼減りも減少すると考えられる。しかし、粉コークスの添加率が少ないためこの影響は小さいと考え、Fig. 9の横軸の計算においては無視した。ただし、特に、再固化直後の温度域では、粉コークス粒子と周囲との収縮係数の差により微小クラックが発生してセミコークス全体の収縮係数の低下がより大きい可能性もあり、さらに検討を要する。

SCOPE21条件では、水平焼減り一定でも、ランキン係数が上昇する。これはFig.10に示すように、主亀裂、横亀裂ともに増加するためである。粉コークスなどの添加により亀裂生成を抑制すれば、ランキン係数は既設炉並に低下した。

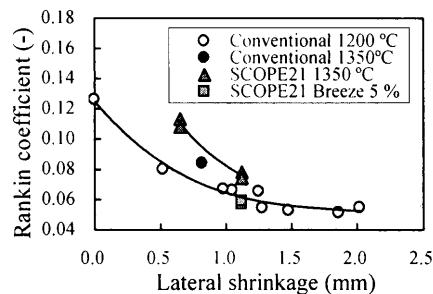


Fig. 9. Effect of lateral shrinkage on Rankin coefficient.

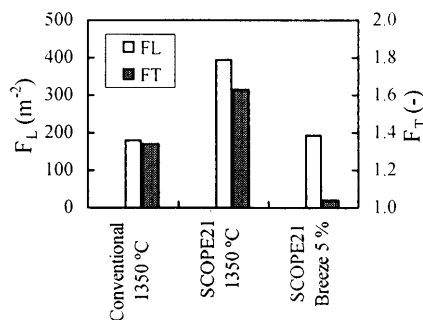


Fig. 10. Effect of SCOPE21 coking conditions on coke fissure.

## 4. 結論

可動壁乾留試験炉によりコークスケーキの圧縮実験を行い以下の結果を得た。

(1) コークスは押出圧力を受けると炉壁側に移動する傾向を持つ。これはコークス塊の形状が、炉壁側が寸法が短く中心側が長いという特徴を持つためと考えられる。

(2) コークスケーキ中には亀裂空間があるが、塊コークスは互いにいくつかの点で接触していると考えられ、コークスケーキに押出圧力が作用し始めると速やかに圧縮が起り、炉壁および反押し機側炉蓋への圧力も作用する。炉壁圧力と押出圧力の比で定義されるランキン係数は、押出圧力250kPaまでの範囲でほぼ一定であった。圧縮中の亀裂発生と炉壁側への移動量変化などの影響が総合された結果と考えられる。

(3) 押し出し時の炭中温度を低下させるとランキン係数は上昇した。これは、主として、水平焼減りの減少によるものと考えられる。炉壁を移動させて人為的に水平焼減りを増大させた場合も、最終温度変化による水平焼減りとランキン係数の関係線の延長上でランキン係数は変化した。

(4) 押し出し時の炭中温度が一定でも炉温が高いとランキン係数は高い。また、非微粘結炭配合によりランキン係数は上昇した。これらの場合、コークスの主亀裂密度と塊コークスを貫通する横亀裂密度とが変化しており、その結果押し出し時の炉壁側への伝達に変化したものと解釈される。

(5) SCOPE21 乾留条件では亀裂密度の上昇によりランキン係数が上昇する。この対策として、粉コークス添加などにより主亀裂密度と横亀裂密度を制御することによりランキン係数を低下させることが可能である。

本研究の一部は石炭生産・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 Iron-making (ICSTI '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 378.
- 2) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liege, (1996), 285.
- 3) 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.
- 4) J.Tucker and G.Everitt: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 48, ISS-AIME, Chicago, (1989), 599.
- 5) K.Nishioka, H.Ueda, S.Ogawa and S.Yoshida: *Coke Circular*, **35** (1986), 21.
- 6) D.Isler: *Rev. Metall., Cah. Inf. Tech.*, **88** (1991), 895.
- 7) S.Watakabe, K.Takeda, H.Suginobe and H.Itaya: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 165.
- 8) J.Tucker, G.Everitt and G.Hall: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 50, ISS-AIME, Washington DC, (1991), 211.
- 9) S.Nomura and T.Arima: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 955.
- 10) C.Meyer, D.Habermehl and O.Abel: *Glückauf-Forschungshefte*, **42** (1981), 233.
- 11) J.Gibson and D.H.Gregory: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 38, ISS-AIME, Detroit, (1979), 52.
- 12) K.Fukuda and T.Arima: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 116.
- 13) K.Fukuda and T.Arima: Proc. 12th Int. Pittsburgh Coal Conf., University of Pittsburgh, Pittsburgh, (1995), 887.