

# 新型成形コークスの装入分布特性

一田 守政\*・山本 哲也\*<sup>2</sup>・古牧 育男\*・織田 博史\*<sup>3</sup>・松永 伸一\*<sup>3</sup>  
松崎 眞六\*・出野 正\*・今野 乃光\*

Basic Characteristics of New Shape Formed Coke in Burden Distribution

Morimasa ICHIDA, Tetsuya YAMAMOTO, Ikuo KOMAKI, Hiroshi ODA, Shin-ichi MATSUNAGA,  
Shinroku MATSUZAKIO, Tadashi DENO and Norimitsu KONNO

**Synopsis :** Basic characteristics in burden distribution and charging pattern of new shape formed coke developed in order to improve the properties of small size and low void fraction that pillow-type formed coke has were conducted by 1/3 scale charging model and mathematical model of blast furnace. Basic characteristics, those are, inclination angle, coke-collapse and trajectory of new shape formed coke are almost the same as those of conventional coke. In the case of wall charging of new shape formed coke, until 60% of total charged coke, new shape formed coke is able to be charged without it's rolling to the center. It is possible to apply RABIT model<sup>7)</sup> to new shape formed coke charging without it's major modification. In the case of new shape formed coke wall charging, the fluctuation in furnace is supposed to be smaller than that in the case of pillow-type formed coke wall charging. Moreover, it's center charging is supposed to be applied to actual blast furnace. More accurate estimation of in-furnace phenomena by mathematical model considering coke reactivity is a subject to be worked out in future.

**Key words :** blast furnace ; new shape formed coke ; inclination angle ; coke-collapse ; trajectory ; charging pattern.

## 1. 緒言

成形コークスの高炉使用試験は1970年代から80年代にかけて行われ、成形コークス使用量10,000tを越える大規模試験も約10例ある。しかし、そのほとんどの試験で成形コークスの有する低磨耗強度、内部クラック発生等の品質上の問題に起因した通気圧損の上昇が報告されている<sup>1-3)</sup>。1980年代に日本鉄鋼連盟方式として開発された枕型形状の成形コークスでは、上記の問題点が改善され、戸畑4高炉での実炉使用試験において、周辺装入による成形コークスの使用割合20%の長期間安定操業を達成した<sup>4)</sup>。しかし、室炉コークスに比べて粒径が小さい、高嵩密度のためコークス層厚が薄い、枕型の形状のため低空間率で傾斜角が小さく中心部へ流れ込みやすい等に起因する通気抵抗増大の問題が残っており、成形コークスの使用限界は30%程度と考えられている。

上記の問題点に鑑み、粒径を大きくすると同時に表面にU字溝を有する形状にして空間率を大きくして通気抵抗を改善した新型の成形コークスが開発された<sup>5)</sup>。そこで、実炉の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>を用いてその新型成形コークスの装入分布特性を評価すると同時に、新型成形コークス周辺装入時の装入比率の上限を検討した。さらに、装入物分布モデル<sup>7)</sup>(以降、RABITモデルと呼ぶ)を組み込んだ

高炉トータルモデル<sup>8)</sup>(以降、BRIGHTモデルと呼ぶ)を用いて新型成形コークスの新しい装入方法を検討した。

## 2. 実験方法

新型成形コークスの装入分布特性、すなわち傾斜角、コークス層崩れと落下軌跡の測定に用いた実験装置をFig. 1に示す。本装置は君津3高炉のベルレス式装入装置の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>であり、送風条件下でサージホッパーから装入ベルトコンベア、炉内シュートまでの装入物の挙動をシミュレートできる。実験に用いた試料は、室炉コークス、日本鉄鋼連盟により開発された成形コークス<sup>4)</sup>を模擬した枕型形状の擬似成形コークス(以降、枕型成形コークスと呼ぶ)、表面を凹ませて異形化した擬似成形コークス(以降、新型成形コークスと呼ぶ)、および新型成形コークスを破砕した細粒の擬似成形コークス(以降、細粒新型成形コークスと呼ぶ)の4種類である。なお、擬似成形コークスとした試料は石炭にバインダーを加えて圧縮成形したもので乾留されていない。枕型成形コークスと新型成形コークスの形状をFig. 2に示し、上記4種類の試料の物性値をTable 1に示す。枕型成形コークスの粒径の上限値は30mmと室炉コークスの上限値25mm、新型成形コークスや細粒新型成形コークスの上限値20mmに比べて大きく、その平均粒径は23.6

平成8年5月8日受付 平成8年9月9日受理 (Received on May 8, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)TSセンター (Technical Service Center, Nippon Steel Corp.)

\* 3 新日本製鐵(株)君津製鐵所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

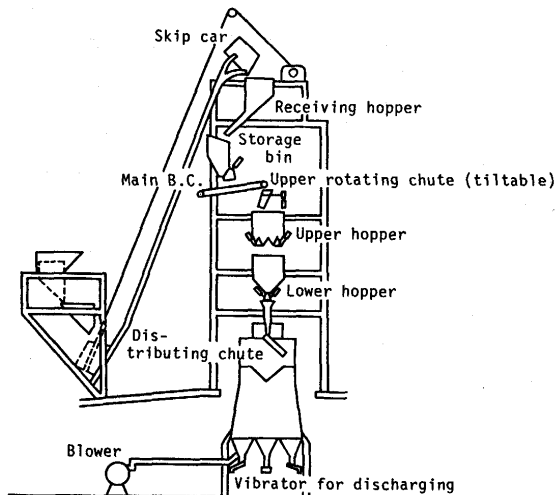


Fig. 1. Schematic diagram of Kimitsu 1/3 scale charging model.

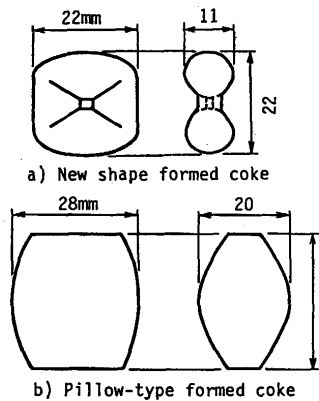


Fig. 2. Shape and size of formed coke.

Table 1. Physical properties of charged materials.

	Size distribution (%)						Mean size (mm)	Apparent density (t/m <sup>3</sup> )	Bulk density (t/m <sup>3</sup> )	Minimum fluidized velocity U <sub>mf</sub> (Nm/s)
	30-25mm	25-20mm	20-15mm	15-10mm	10-5mm	<5mm				
Conventional coke		22.5	44.7	20.4	10.5	1.9	16.3	1.02	0.53	2.34
Pillow-type formed coke	57.3	30.0	4.2	1.9	0.9	5.7	23.6	1.34	0.78	3.21
New shape formed coke			52.3	39.1	4.2	4.4	14.4	1.17	0.71	2.35
Small-sized new shape formed coke			30.0	43.4	9.2	17.4	11.7	1.17	0.73	2.11

mmと室炉コークス(16.3mm)の1.4倍であり、実炉での粒径の大小関係とは逆である。そして、擬似成形コークスは乾留した成形コークスと摩擦抵抗などの表面特性が異なる。しかし、この粒径の範囲では、傾斜角やコークス層崩れ等の装入分布特性には粒子形状の影響が支配的と考えられること、および、見掛け密度、嵩密度を乾留した成形コークスの値(見掛け密度=1.16t/m<sup>3</sup>, 嵩密度=0.65t/m<sup>3</sup>)<sup>4)</sup>にできるだけ一致させることにより、擬似成形コークスを用いても乾留した成形コークスの装入分布特性を再現できると考えた。傾斜角測定時およびコークス層崩れ測定時の実験条件をTable 2に示す。送風量については、実炉の炉頂と1/3縮尺の装入物分布実験装置でのフルード数がほぼ一致するように求めたガス流速より決定した。

傾斜角の測定時には、送風量は0,253Nm<sup>3</sup>/min(空塔速度

Table 2. Experimental conditions of inclination angle of charged materials and coke-collapse volume measurements by 1/3 scale model.

	Inclination angle	Coke collapse
Blast volume(Nm <sup>3</sup> /min)	0,253	253
CB(t/ch)	25.0	28.6
O/C(-)	-	3.0
Charging pattern	C <sup>9</sup> / <sub>18</sub>	C <sup>1</sup> / <sub>16</sub> , O <sup>5</sup> / <sub>12</sub>
Frequency of experiments	2	1

Table 3. Measured results of electric resistance of burden at 0.4m from wall and distinction of layer.

Depth from burden surface (m)	Electric resistance (kΩ)	Distinction of layer
0.05	50	Sintered ore layer
0.10	460	
0.15	590	
0.20	980	
0.22	Over 2000	New shape formed coke layer
0.25	Over 2000	
0.30	Over 2000	
0.35	Over 2000	
0.39	400	Sintered ore layer
0.40	407	
0.45	510	
0.50	460	
0.55	603	
0.57	Over 2000	
0.60	Over 2000	
0.65	Over 2000	
0.67	300	Sintered ore layer
0.70	250	
0.75	210	
0.80	270	
0.85	180	
0.88	0	
0.90	0	
0.95	0	
1.00	0	

で0, 0.54Nm/s)の2水準とした。試料装入量は0.9t/ch(実炉換算値25t/ch)とし、装入パターンは9ノッチ(傾斜角(炉内シュートと鉛直線のなす角度)=42°)とした。各試料装入後の堆積プロフィールについては、釣竿式プロフィールメーターにより炉半径方向で100mm毎に測定した。傾斜角については、各測定点毎に幅500mmの区間を設定し、その区間内の堆積プロフィールを直線近似して各測定点毎に求めた。そして、各区間の傾斜角の最大値を傾斜角の代表値とした。

鉬石装入時のコークス崩れの測定時には、送風量は253 Nm<sup>3</sup>/min(空塔速度で0.54Nm/s)とした。コークス装入量は1.1t/ch(実炉換算値28.6t/ch)とし、鉬石装入量は3.2t/ch(実炉換算値85.8t/ch, ore/coke=3)とした。装入パターンは、コークス装入時の堆積プロフィールがV字型となるように1ノッチ(傾斜角(炉内シュートと鉛直線のなす角度)=52°)とした。

鉬石装入時のコークス崩れ後のプロフィールについては、

Table 4. Relationship between notch number and tilting angle.

Notch number	1	4	7	10	13	16
Tilting angle(deg)	52.0	44.6	41.5	37.8	33.3	26.9

電極式層厚計により測定した。電極式層厚計による鉍石層とコークス層の判定については、電極式層厚計による電気抵抗値により決定した。Table 3の測定例に示すように、室炉コークス層では鉍石層に比べて電気抵抗が小さく、電気抵抗値が100~1000kΩの場合を鉍石層、20kΩ以下の場合を室炉コークス層とした。新型成形コークス層では未乾留の石炭ブリケットのため電気抵抗が高く、2000kΩ以上の場合を新型成形コークス層とした。本測定では、電気抵抗値から混合層と判断される場合にはコークス層とみなした。

落下軌跡測定時には、送風量は253Nm<sup>3</sup>/min(空塔速度で0.54Nm/s)とした。試料装入量は0.5t/ch(実炉換算値13.5t/ch)とし、装入パターンは4, 7, 10, 13, 16ノッチの5水準とした。各ノッチでの炉内シュートの傾動角をTable 4に示す。各ノッチでの試料装入時に、高さ方向2点(ストックライン, ストックライン下1.5m)に挿入した表面に白色の紙とカーボン紙を巻いた金棒についた落下痕跡より決定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 新型成形コークスの装入分布特性

##### 3.1.1 傾斜角

実炉の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>により測定した各種コークスの傾斜角とガス流速の関係をFig. 3に示す。無風時の条件では、枕型成形コークスの傾斜角は37.4degと室炉コークス(39.7deg)に比べて2.3deg小さいが、新型成形コークスの傾斜角は39.6degと室炉コークスとほぼ同じレベルである。細粒新型成形コークスの傾斜角も39.1degである。

枕型成形コークスの傾斜角が室炉コークスに比べて小さいのは、枕型成形コークスの表面形状が室炉コークスに比べて滑らかで、コークス粒子間の摩擦抵抗が小さいためと推定される。新型成形コークスの傾斜角が室炉コークス並みに上昇したのは、新型成形コークスの場合には表面形状を異形化してコークス粒子間の摩擦抵抗が室炉コークス並みに上昇したためと推定される。

無風時の傾斜角に対する送風時の傾斜角の低下幅は、室炉コークスの場合には1.5deg(39.7deg→38.2deg)、枕型成形コークスの場合には1.3deg(37.4deg→36.1deg)、新型成形コークスの場合には1.6deg(39.6deg→38.0deg)とほぼ同じであったが、細粒新型成形コークスの場合には2.5deg(39.1deg→36.6deg)と大きい。これは、細粒新型成形コークスの場合には-5mmの比率が17.4%と大きく、他のコークスに比べてガス流速の影響を強く受けたものと推定される。

従来の知見<sup>9,10)</sup>によれば、室炉コークスや焼結鉍の送風時

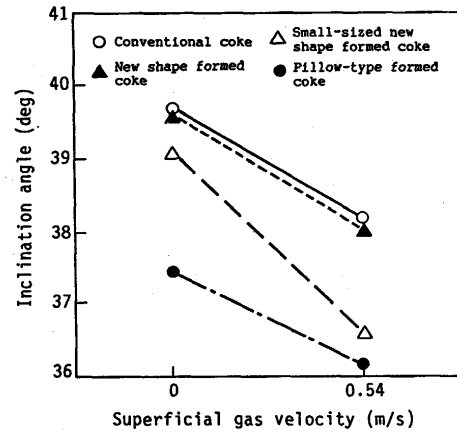


Fig. 3. Relationship between superficial gas velocity and inclination angle of charged materials.

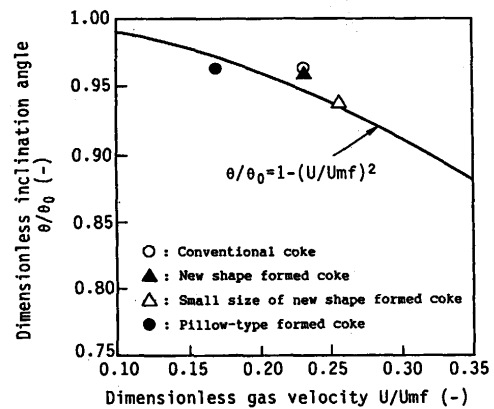


Fig. 4. Relationship between dimensionless gas velocity and dimensionless inclination angle.

の傾斜角を無風時の傾斜角で除した無次元傾斜角 $\theta/\theta_0$ はガス流速をそれぞれの装入物の流動化開始速度で除した無次元ガス流速 $U/U_{mf}$ の2次式である(1)式で整理される。

$$\theta/\theta_0 = 1 - (U/U_{mf})^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$U_{mf} = 0.12(3.0g(\rho_s - \rho_f) D_p / \rho_f)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4に示すように、今回測定された送風時の各種コークスの傾斜角も(1)式で整理されており、枕型成形コークス、新型成形コークス、細粒新型成形コークスの送風時の傾斜角が(1)式により室炉コークスと同様に取り扱える。

##### 3.1.2 コークス層崩れ量

実炉の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>により測定した各種コークスとコークス層崩れ量の関係をFig. 5に示す。ここで、コークス層崩れ量を、焼結鉍により崩されたコークス層の体積と定義し、崩れ前の堆積プロフィール(Fig. 5の点線)と崩れ後の堆積プロフィール(Fig. 5の○印)で囲まれた炉壁側の体積から求めた。なお、図中では実炉換算値(27倍)で示した。

コークス層崩れ量の実炉換算値は、新型成形コークスでは6.4m<sup>3</sup>、室炉コークスでは5.3m<sup>3</sup>、室炉コークスと新型成形コークスの50%混合物では6.2m<sup>3</sup>である。新型成形コーク

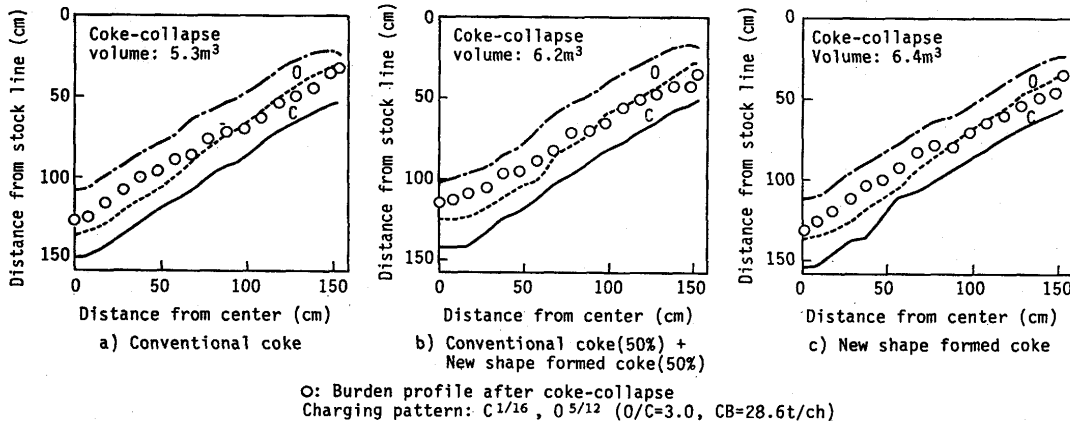


Fig. 5. Coke-collapse volume in ore charging.

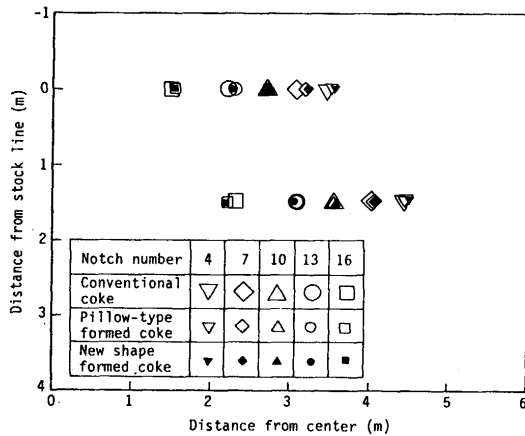


Fig. 6. Comparison of trajectories between in conventional coke charging and in formed coke charging.

スのコークス層崩れ量と室炉コークスのコークス層崩れ量の差異は $1.1\text{m}^3$ と小さく、RABITモデル<sup>7)</sup>における従来のコークス層崩れの考え方が適用できる。コークス層崩れ量の精度については、混合層をコークス層とみなしていることに起因する誤差があり、今後の検討課題である。

3.1.3 落下軌跡

実炉の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>により測定(2点: ストックライン, ストックライン下1.5m)した各種コークス使用時の落下点の測定値をFig. 6に示す。新型成形コークス, 枕型成形コークス, 室炉コークスの落下点の測定値の差異は通常0.1m(最大0.15m)の範囲内にあり, 新型成形コークス, 枕型成形コークス, 室炉コークスの落下軌跡の差異は小さい。

3.1.4 新型成形コークスのRABITモデル<sup>7)</sup>への適用性

上記の知見より, 新型成形コークスの装入分布特性, すなわち, 傾斜角, コークス層崩れ量, 落下軌跡が室炉コークスの装入分布特性とほぼ同じであり, 新型成形コークス使用時も大幅な修正をせずにRABITモデル<sup>7)</sup>を適用できることが判明した。

3.2 装入物分布実験による新型成形コークスの周辺装入量の検討

緒言で説明したように, 戸畑4高炉での実炉使用試験<sup>4)</sup>

Table 5. Experimental condition of formed coke wall charging experiment by 1/3 scale model.

Blast volume (Nm <sup>3</sup> /min)	253
CB (t/ch)	25
O/C (-)	5.0

は, 周辺装入による枕型成形コークスの使用限界は30%程度であった。その主要因のひとつは, 粒径の小さい枕型成形コークスの傾斜角が小さく, 周辺部に装入しても枕型成形コークスの使用割合30%以上では中心部への流れ込みが発生し中心流が抑制されるためである。

実炉の1/3縮尺の装入物分布実験装置<sup>6)</sup>を用いて, 傾斜角が室炉コークスとほぼ同じである新型成形コークスの周辺装入実験を行い, 周辺に装入できる新型成形コークスの上限量を検討した。実験条件をTable 5に示す。装入方式はC↓C↓O↓装入とし, 新型成形コークスをコークスの2バッチ目に装入した。鉬石とコークスの装入量の比O/Cは微粉炭多量吹き込みを想定して5.0とし, 1チャージあたりのコークス装入量CBは実炉換算値で25t/chとした。具体的な装入パターンについては, 君津3高炉で採用されている装入パターンC↓O↓O↓のガス流分布指数との差異が小さいC↓C↓O↓の装入パターンを, RABITモデル<sup>7)</sup>を用いた検討により決定した。

ベース条件のC↓O↓O↓装入の場合, C↓C↓O↓装入で新型成形コークスをコークスの2バッチ目に全コークス量の50%, 60%を周辺装入する場合の実験結果をFig. 7に示す。ここで, コークス層崩れ後の堆積プロフィールについては室炉コークスの場合を○印で示し, 新型成形コークスの場合を●印で示した。図中で示したC, I, Wはそれぞれシャフト部でのガス流の中心流指数, 中間流指数, 周辺流指数である。粒径分布, 層厚分布に関する分布実験データをピストンフローを仮定したErgun式に代入して求めたガス流速を相対化した指数である。なお, 半径を3等分して中心部, 中間部, 周辺部のガス流速分布指数をそれぞれ中心流指数, 中間流指数, 周辺流指数とした。

新型成形コークスをコークスの2バッチ目に全コークス

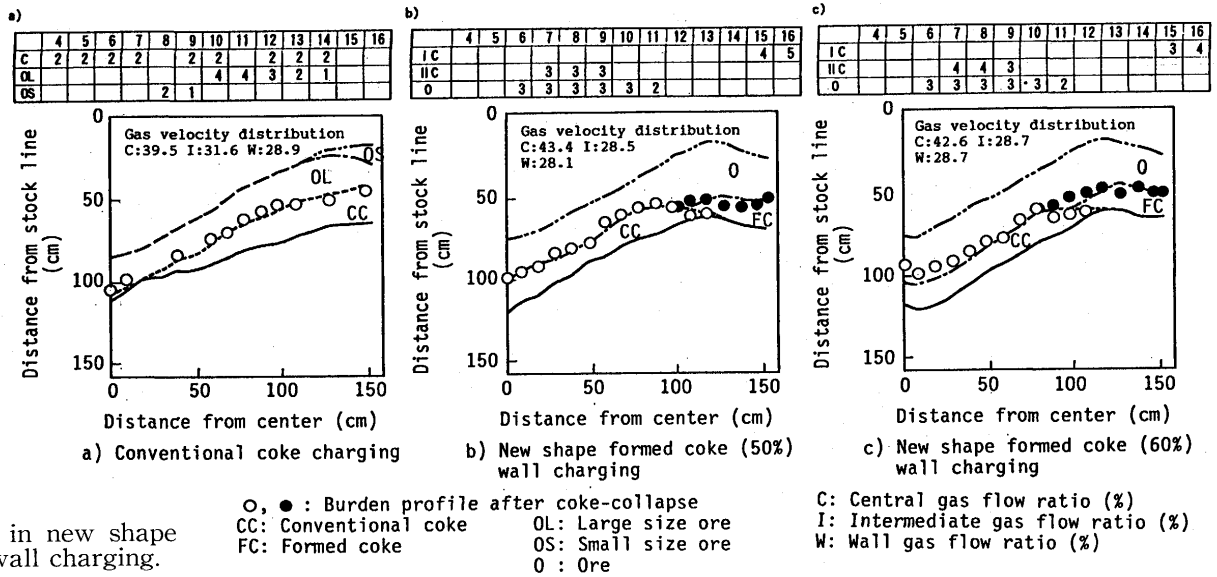


Fig. 7. Burden profile in new shape formed coke wall charging.

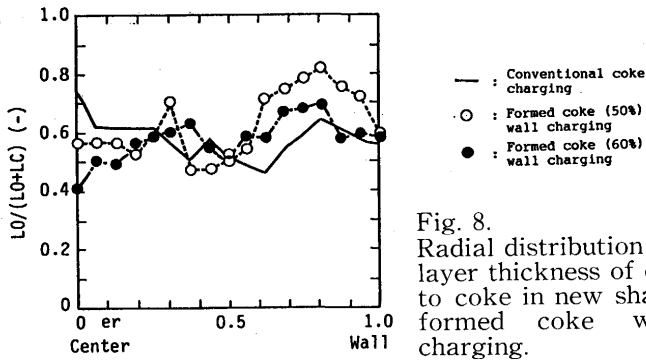


Fig. 8. Radial distribution of layer thickness of ore to coke in new shape formed coke wall charging.

量の50%、60%を周辺装入する場合でも、新型成形コークスは室炉コークスで形成されたテラス上に装入され、焼結鉍装入によるコークス層崩れ後にも室炉コークステラス上に堆積しており、全コークス量の60%までは中心部への流れ込みをさせずに装入できることが判明した。しかし、ガス流分布指数に着目すると、新型成形コークスをコークスの2バッチ目に全コークス量の50%、60%を周辺装入した場合の中間流指数が28.5%、28.7%とベース条件の31.6%に比べて大幅に低下している。新型成形コークスをコークスの2バッチ目に全コークス量の50%、60%を周辺装入する場合には、コークスをほぼ均等に2分割装入することになる。したがって、コークス層表面の堆積プロファイルが不連続になりやすく、Fig. 8に示すように、鉍石の層厚比 $Lo/(Lo+Lc)$ が炉中心から100cm(相対半径で0.67)近傍で0.6~0.8とベース条件の0.5に比べて大きい。この鉍石層厚比の上昇により中間流指数が低下したものと推定される。上記の鉍石層厚比上昇抑制のための装入方法については、今後の検討課題である。

### 3.3 BRIGHTモデル<sup>8)</sup>による新型成形コークスの装入方法が炉内状況に及ぼす影響の検討

新型成形コークスは室炉コークスとほぼ同等の通気性と装入分布特性を有しており、従来の枕型成形コークスでの

装入方法にこだわらず、新しい装入方法を検討することができる。そこで、新型成形コークスを多量使用した場合に装入方法が炉内状況に及ぼす影響をBRIGHTモデル<sup>8)</sup>により検討した。本計算では、微粉炭多量吹込み(PCR=200kg/t)時での使用を想定し、燃料比(FR)=516kg/t、コークス比(CR)=316kg/t、O/C=5.0とした。平均粒径については、従来の知見<sup>11)</sup>とコークス炉から高炉までの輸送過程におけるコークスの破壊を考慮して、室炉コークス50mm、枕型成形コークス38mm、新型成形コークス50mmとした。無風時の傾斜角については、3.1節の知見に基づき、新型成形コークスの傾斜角は室炉コークスの傾斜角(35deg)と同じとした。枕型成形コークスについては30degと、室炉コークスの傾斜角(35deg)に比べて、5 deg低い値に設定した。空間率については、従来の知見<sup>11)</sup>に基づき、室炉コークス0.52、枕型成形コークス0.44、新型成形コークス0.49とした。

成形コークスの装入量は全コークス装入量の50%とした。成形コークスを周辺部に装入する場合にはC↓C↓O↓装入の2バッチ目に装入し、中間部から中心部に装入する場合にはC↓C↓O↓装入の1バッチ目に装入した。成形コークス使用時と比較するベースとしての室炉コークス使用時の装入方法としては、実炉での実績のあるC↓O↓O↓装入とした。

上記条件での計算結果をFig. 9に示す。成形コークスを周辺部に装入する方式では、枕型成形コークスの場合には粒径と空間率低下の影響が大きく、ベースに比べて、周辺流指数が低下し融着帯根部が低下した。粒径、傾斜角、空間率が室炉コークスとほぼ同等である新型成形コークスの場合には、周辺流指数がベースとほぼ同じレベルに回復し融着帯根部も上昇している。

つぎに成形コークスを中間部から中心部に装入する方式では、枕型成形コークス、新型成形コークスのいずれの場合にも、ベースに比べて融着帯根部の炉壁近傍での跳ね上がりがある。枕型成形コークスの場合には、周辺装入時に比べて、中心流指数の低下(41.5%→38.8%)と周辺流指数

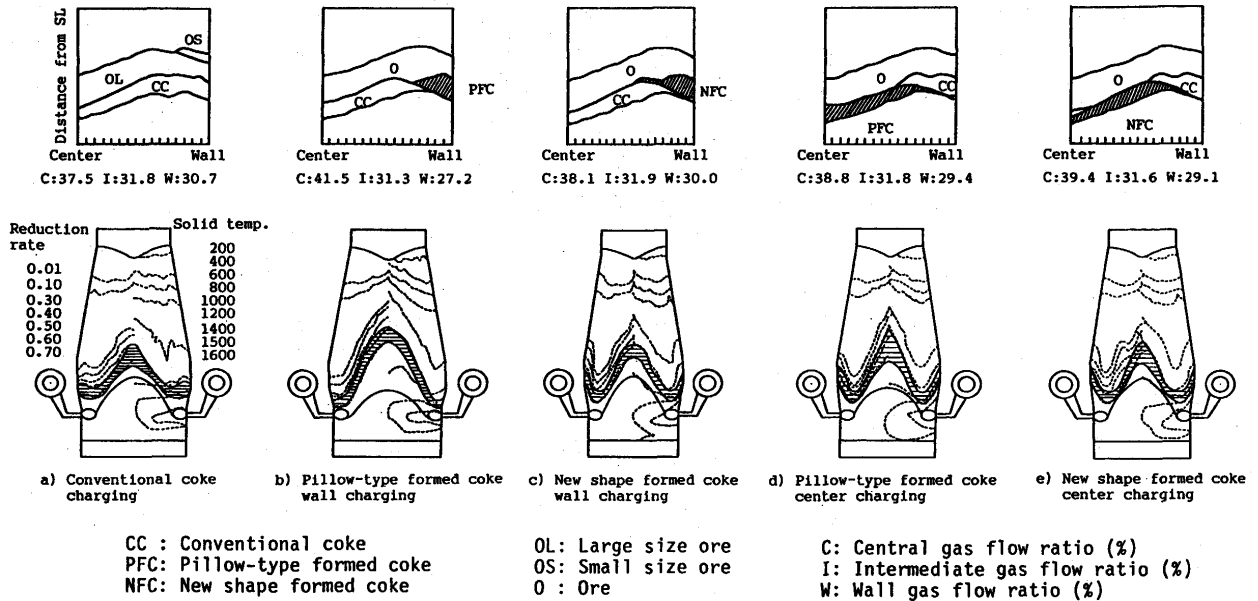


Fig. 9. In-furnace condition in wall charging and center charging of formed coke simulated by BRIGHT model<sup>8)</sup>.

の上昇(27.2%→29.4%)が認められる。しかし、新型成形コークスの場合には、周辺装入時に比べて、中心流指数の上昇(38.1%→39.4%)と周辺流指数の低下(30.0%→29.1%)が認められ、新型成形コークスの有する大粒径、高空間率の特性がガス流分布指数に反映されている。

以上の結果より、粒径、空間率、傾斜角が小さく中心部へ流れ込みやすい枕型成形コークスを周辺部に装入する場合には、中心部への流れ込みの状態により、炉内状態が大幅に変動する可能性がある。新型成形コークスを周辺部に装入する場合には、傾斜角が大きくて中心部への流れ込みが少ないこと、および、中心部へ流れ込んだとしても流れ込まない場合のガス流分布指数との差異が小さいことから、炉内状態の変動が小さいと推定される。

以上の計算結果はいずれもコークスの反応性の差異を考慮しておらず、成形コークスを周辺部あるいは中間部から中心部へ多量装入する場合の炉内状態を高精度に推定するためには、コークスの反応性を組み込んだ高炉トータルモデルでの検討が必要である。

#### 4. 結言

従来の枕型成形コークスのような小粒径、低空間率の問題を解消するために開発された新型成形コークスの装入分布特性および装入方法を、1/3縮尺の装入物分布実験装置および高炉トータルモデル、すなわちRABITモデルを組み込んだBRIGHTモデルを用いて検討し、以下の知見を得た。

(1) 異形化した新型成形コークスの装入分布特性すなわち傾斜角、コークス崩れ、落下軌跡は室炉コークスとほぼ同じである。

(2) 新型成形コークスを周辺装入する場合には、全コークス量の60%までは中心への流れ込みをさせずに装入する

ことができる。

(3) 新型成形コークス使用時も大幅な修正をせずにRABITモデル<sup>7)</sup>を適用でき、新型成形コークスを多量に周辺装入する場合には、枕型成形コークスに比べて、炉内変動が小さく、中間部から中心部へ装入する方式も実用化の可能性があると推定された。今後の課題は、コークスの反応性を組み込んだ高炉トータルモデルでの高精度な炉内状態の推定である。

#### 記号

$D_p$  : 粒子の粒径(-),  $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ ),  $U$  : ガス流速 ( $m/s$ ),  $U_{mr}$  : 流動化開始速度 ( $m/s$ ),  $\theta$  : 送風時の装入物の傾斜角 (deg),  $\theta_0$  : 無風時の装入物の傾斜角 (deg),  $\rho_f$  : ガスの密度 ( $kg/m^3$ ),  $\rho_s$  : 粒子の見掛け密度 ( $kg/m^3$ )

#### 文献

- 1) E.Teichert, V.N.Gupta and W.Hermann: Stahl und Eisen, **94** (1974), 1330.
- 2) J.A.Cordier and R.Rochas: Proceedings of 2nd International Symposium on Agglomeration, (1997), 996.
- 3) P.K. Strangway and M.O. Holowaty: Proceedings of 2nd International Symposium on Agglomeration, (1997), 1012.
- 4) S.Kubo, H.Ono, K.Inoguchi, T.Nishi and H.Haraguchi: Proceedings of 49th Ironmaking Conference of AIME, Detroit, (1990), 405.
- 5) I.Komaki, K. Kato, M.Ichida, T.Yamamoto, H.Oda and S. Matsunaga: Proceedings of ICSTI'94 of ISIJ, Sendai, (1994), 438.
- 6) 柿内一元, 松井 章, 中山正章, 山口一成, 天野 繁: 材料とプロセス, **4** (1991), 104.
- 7) 奥野嘉雄, 松崎真六, 国友和也, 磯山 正, 草野祥昌: 鉄と鋼, **73** (1987), 91.
- 8) 杉山 喬, 林 洋一, 須賀田正泰, 芝池秀治, 鈴木信邦: 材料とプロセス, **2** (1989), 70.
- 9) 杉山 喬, 中村正和, 鶴野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, **62** (1976), S39.
- 10) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, **65** (1979), A1.
- 11) 古牧育男, 池田耕一, 加藤健次, 一田守政, 森寺弘充: 鉄と鋼, **82** (1996), 442.