



熱間成形が高温炭装入時のキャリーオーバーに及ぼす影響

松浦 慎*・中居 裕貴*・佐々木 正樹*・加藤 健次*²

Effect of Hot Briquetting of Preheated Coal on Carry-over during Charging

Makoto MATSUURA, Hiroki NAKAI, Masaki SASAKI and Kenji KATO

Synopsis : Carry-over during coal charging is a significant factor in the increase of the carbon deposition in the coke oven chamber. Therefore, the technology of hot briquetting of fine coal has been developed in the SCOPE21 project, and the pilot scale test has been made in 2002. The main results of this study are shown below.

- (1) The ratio of particle 100 μm or less in coal charge could be decreased by hot briquetting of fine coal. As a result, it was confirmed that the amount of carry-over during coal charging could be reduced about 60% compared with the case of non-briquetting.
- (2) The gas velocity that passes through the free space of coke oven chamber affects carry-over particle size. In 75% period during coal charging, the gas velocity in the coke oven was 1 m/s or less. On that condition, it was hard that coal particle of 100 μm or more disperse.
- (3) The hot briquetting technology developed in this study was shown to be a valuable one even in commercial operation to reduce amount of carry-over on the during coal charging.

Key words : coal; cokemaking; hot briquetting; carry-over; SCOPE21.

1. 緒言

室炉式コークス製造プロセスでは、炉頂部の装入口から炭化室へ石炭を装入する際に炭化室内から上昇管を經由してコークス炉ガスとともに流出するような粉塵をキャリーオーバーと定義し、キャリーオーバーがコークス炉操業に及ぼす影響について検討されている^{1,2)}。

石炭装入時の石炭のキャリーオーバーはコークス炉炭化室の炉壁カーボン付着量の増加を招き操業の支障となるばかりかタール中に不純物が混入してタール品質を低下させる原因の一つとなっている。

以上のことから、コークス炉の安定操業を阻害する要因であるキャリーオーバーを極力低減させることが必要であると認識されてきた。

従来の知見³⁾では冷間実験で基礎的な検討を行った結果として、石炭装入時のキャリーオーバー量と装入炭中の0.1 mm以下の微粉炭量の割合（以下、-0.1 mm割合と略す）との関係には良好な直線関係が認められ、-0.1 mm割合を減らすことで、キャリーオーバー量を抑制出来ることが報告されている。しかしながらキャリーオーバー量に影響を及ぼす炭化室ガス流れ挙動を把握し、キャリーオーバー炭の発生理由を検討することは、実炉での測定が設備構成上難しいため十分に実施されていないのが現状である。

SCOPE21 プロセスのように石炭を予熱して装入するプ

ロセスでは石炭の擬似粒子の崩壊により、-0.1 mm割合が増加しキャリーオーバー量が増加する可能性がある。そこで、SCOPE21 プロセスでは微粉炭を熱間成形するプロセスを考案し開発を行ってきた⁴⁾。SCOPE21 プロセスの熱間成形の目的は、キャリーオーバー量の抑制と装入炭嵩密度向上の2点である。本報では、微粉炭の熱間成形がキャリーオーバーに及ぼす影響と炭化室内のガス流れがキャリーオーバー炭の粒径に及ぼす影響について、パイロットプラント試験で実機規模の検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 石炭試料

実験には非微粘結炭と粘結炭を1種類ずつ各々50%配合した試料を使用した。非微粘結炭 (Coal A) と粘結炭 (Coal B) の工業分析値とギーセラー流動性を Table 1 に示す。石炭は、最大粒径が 6 mm になるように粒度の調整を行った。

Table 1. Analyses result of the sample.

Coal	Proximate analysis		Gieseler Plastometer
	VM	ASH	MF
	(daf%)	(dry%)	log(ddpm)
Coal A	38.0	9.2	1.70
Coal B	26.8	9.0	2.70

平成 16 年 1 月 5 日受付 平成 16 年 6 月 21 日受理 (Received on Jan. 5, 2004; Accepted on June 21, 2004)

* 新日本製鐵 (株) 名古屋製鐵所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp., 5-3 Tokaimachi Tokai 476-8686)

* 2 新日本製鐵 (株) 環境・プロセス研究開発センター (EPC, Nippon Steel Corp.)

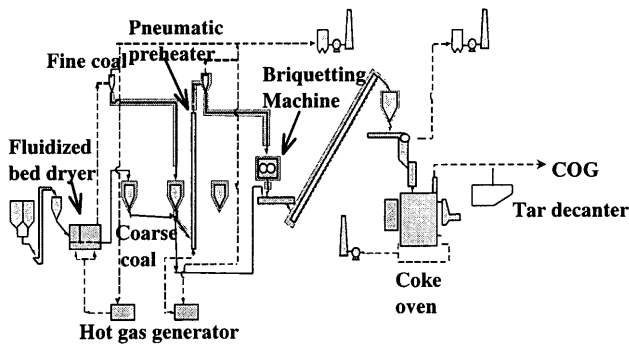


Fig. 1. Schematic diagram of the pilot plant.

Table 2. Specification of coal pretreatment facility.

Fluidized bed dryer	coal throughput	6.0t/h
	fluidized bed size	(W)0.5m×(L)7m×(H)5.5m
Pneumatic preheater	coal throughput	6.0t/h (coarse coal) 2.4t/h (fine coal)
	preheater size	(φ)0.77m×(H)25m
Hot briquetting machine	capacity	2.4t/h
	briquetting roll size	(φ)1.2m×(W)0.085m
	mold size	18cm ³

2.2 試験方法

2.2.1 パイロットプラント試験装置と石炭の事前処理方法

試験装置の模式図を Fig. 1 に示す。また、主な設備仕様を Table 2 に示す。

Fig. 1 に示すように、本試験装置は流動床乾燥分級機、気流加熱塔、熱間成形機、乾留炉、および付帯設備から構成されている。石炭の事前処理は以下の手順で実施した。初めに、流動層乾燥分級機にて石炭の乾燥と250°Cまでの予熱を行い、0.5mmを分級点として微粉炭と粗粒炭を分離した。次に、微粉炭と粗粒炭を気流加熱塔に供給し、気流加熱塔内で所定の温度に急速加熱処理した。パイロットプラントでは気流加熱塔が1基のため、粗粒炭を全量処理した後に、微粉炭の急速加熱処理を行った。

続いて、急速加熱処理を行った微粉炭（以下、加熱微粉炭）を熱間成形機により塊成化し、成形炭（以下、熱間成形炭）を製造した。

急速加熱処理した粗粒炭（以下、加熱粗粒炭）と熱間成形炭はチェーンコンベアで高温炭搬送装置に搬送され、装入装置を経て乾留炉に装入しコークスを製造した。

装入炭は装入装置に設けたサンプリングシュートから約200kg採取した。装入時間は約4分間で平均試料となる様に装入開始から2分後にサンプリングを実施した。縮分した試料は、篩い分け法で粒度分布を測定した。0.3mm以下の石炭については、レーザー回折・散乱法にて粒度分布を測定した。

2.2.2 微粉炭の熱間成形条件

熱間成形機の模式図を Fig. 2 に示す。成形ロールの寸法

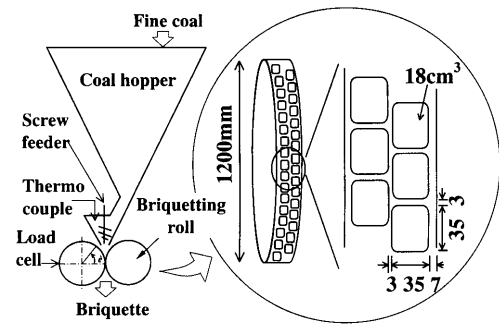


Fig. 2. Experimental apparatus for the hot briquetting of coal.

は直径1200mm、幅87mmである。ロールポケットは18mm³のマセック型であり、ロール幅方向に2列設置した。

試験条件は、5t/cmの線圧で加熱微粉炭を成形した場合（以下、成形あり条件）と、成形を行わない場合（以下、成形なし条件）の2条件とした。

2.2.3 キャリーオーバー量の測定方法

石炭装入時のキャリーオーバーは安水やタールに混入してタールデカンターに捕集される。そこでデカンターでサンプリングしたタールを対象にキノリンで溶媒抽出を行い、キノリン不溶分（QI成分）のタール中に占める重量割合を測定した。成形あり条件と成形なし条件のタール中のQI成分の割合を比較することで、熱間成形によるキャリーオーバー抑制効果を評価した。

さらに、上昇管に設置したサンプリングノズルから、乾留期間中に発生するガスを等速吸引し、インピンジャーでタールを捕集し、サンプリングしたタールからQI成分を抽出した。サンプリング時間は、装入開始から1時間までとした。得られたQI成分の粒度分布をレーザー回折散乱式粒度分布測定装置（堀場製作所製LA-700型）で測定した。

2.2.4 乾留炉上部空間ガス流れ挙動の推定方法

キャリーオーバーは石炭装入時に炭化室内で発生する粉塵であり、キャリーオーバーを伴する発生コークス炉ガスが炭化室内を通過するときのガス流速がキャリーオーバー粒子の終末速度よりも大きい場合に発生すると考えられる。そこで、乾留炉の上部空間を通過するガス流速を次のように推算した。石炭装入中の乾留炉の模式図を Fig. 3 に示す。発生したCOGはすべて断面積Aに対して垂直に通過すると仮定をおき、(1)式でガス流速を求めた。 V_{COG} はCOG配管に設置したオリフィス流量計で測定した。Aを推定するための前提条件は、パイロットプラント試験での作業結果を参考にして次のように定めた。(1) 石炭装入重量は16,500kg、装入速度は66.7kg/sとする。(2) 炭化室内の石炭嵩密度は800kg/m³とする。

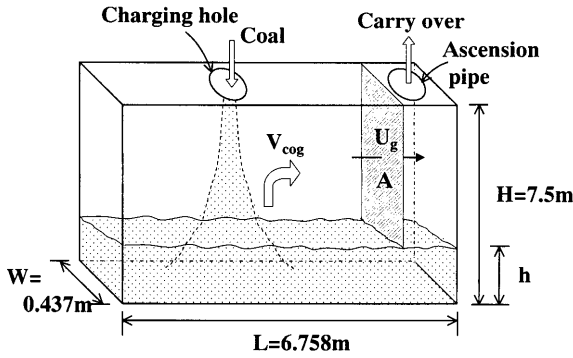


Fig. 3. Illustration of gas flow in the test coke oven during coal charging.

$$U_g = \frac{V_{cog}}{A} \dots\dots\dots(1)$$

U_g : 断面積 A を通過するガス流速 [m/s]
 V_{cog} : 発生ガス速度 [m³/s]
 A : 上部空間の断面積 [m²]

2・2・5 石炭粒子の終末速度測定試験

球形粒子の終末速度は、レイノルズ数が30~300の範囲での抵抗係数ではアレンの法則に従い、その終末速度は(2)式で表される。一方、石炭のような球形以外の粒子では(3)式で表されるが、係数 k は実験的に求める必要がある。

$$u_p = \left\{ \frac{4g^2}{225} \right\}^{1/3} \left\{ \frac{(\rho_p - \rho)^2}{\mu\rho} \right\}^{1/3} D_p \dots\dots\dots(2)$$

$$u_p = k \left\{ \frac{(\rho_p - \rho)^2}{\mu\rho} \right\}^{1/3} D_p \dots\dots\dots(3)$$

u_p : 終末速度 [m/s]
 ρ_p : 石炭粒子密度 [kg/m³]
 ρ : ガス密度 [kg/m³]
 μ : ガス粘度 [Pa・s]
 g : 重力加速度 [m/s²]
 D_p : 石炭粒子径 [m]

そこで、Fig. 4 に示すような試験装置を用いて冷間試験を行い係数 k を求めた。試験は以下の手順で実施した。まず、篩い分けした石炭粒子をアクリルパイプ内に装入しておき、下部から空気を吹込み、空気に同伴して飛散する石炭粒子の重量を測定した。初期重量の50%が飛散するガス流速を、その試料の50%平均径の粒子に対する終末速度として求めた。測定は、粒径を0.3~0.6 mm, 0.6~1 mm, 1 mm~1.5 mm, 1.5~2 mmとした試料について実施した。

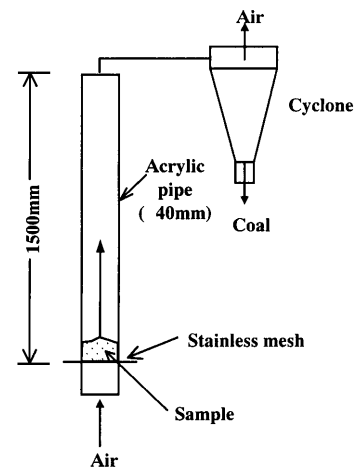


Fig. 4. Experimental apparatus for terminal velocity measurement.

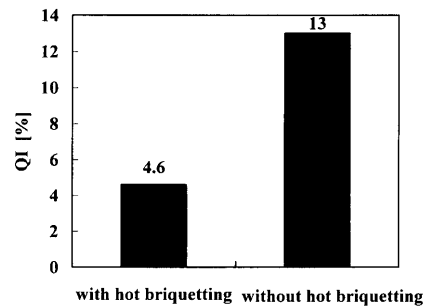


Fig. 5. Effect of hot briquetting on Quinoline insolves: QI in decanter tar.

3. 結果と考察

3・1 キャリーオーバーに及ぼす熱間成形の効果

(1) キャリーオーバー量

デカンタータール中のQIの測定結果を Fig. 5 に示す。成形なしのQIは13%であるのに対して、成形ありのQIは4.6%であった。このように、微粉炭を熱間成形することでキャリーオーバー量が減少することを、実機レベル試験設備での測定結果で確認することができた。

(2) キャリーオーバー炭の粒度

成形なし条件および成形あり条件におけるキャリーオーバー炭の粒度分布をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。成形あり条件の場合には、30~100 μmの区間に存在するキャリーオーバーの割合が大きく減少している。また、キャリーオーバー中には100 μm以上の粒子は存在しないことが明らかとなった。

次に、熱間成形によりキャリーオーバー量が減少する理由について、キャリーオーバー炭と装入炭の粒度分布の測定結果から考察した。

装入炭の粒度分布を Fig. 8 に示す。成形あり条件での500 μm以下の割合は36%であり、成形なし条件での43%と比較して約7ポイント低い値である。これは成形なし条

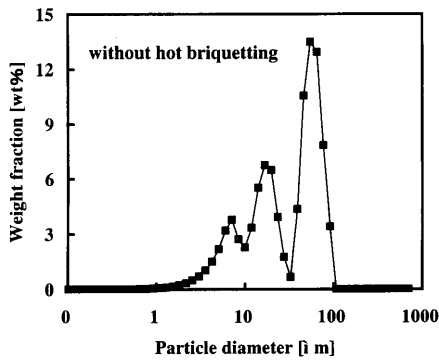


Fig. 6. Size distribution of carry-over sampled at ascension pipe (without hot briquetting).

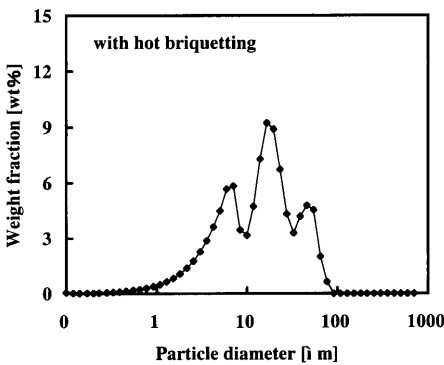


Fig. 7. Size distribution of carry-over sampled at ascension pipe (with hot briquetting).

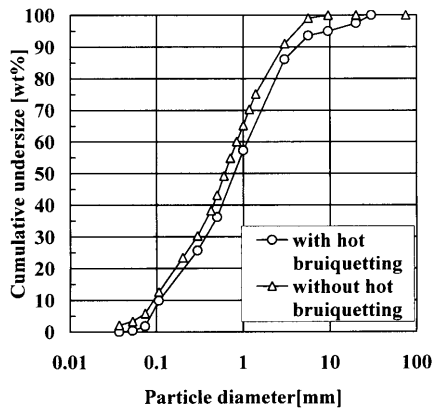


Fig. 8. Size distributions of charged coal.

件の 500 μm 以下の微粉が成形により 16% 減少したことを意味する。さらに 74 μm 以下について比較すると、成形あり条件では 1.8% であり、成形なし条件の 5.8% と比較して 4 ポイント低い。これは 74 μm 以下の微粉が成形により 68% 減少していることを示している。

以上より、熱間成形を行うことで、装入炭中の 500 μm 以下の微粉割合を減少させることができ、特に 100 μm 未満の粒子の減少が大きいことが明らかとなった。

前述のようにキャリーオーバー炭の粒度は 100 μm 以下であることから、熱間成形による装入炭中の 100 μm 未満の粒子割合の減少が、キャリーオーバー量の抑制の大きな

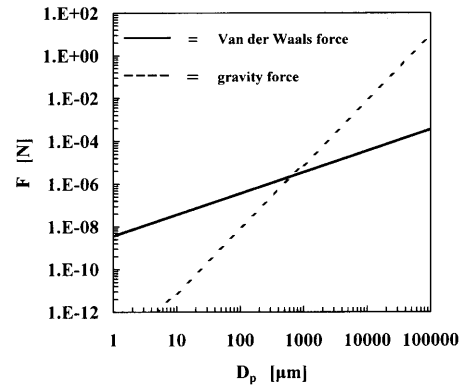


Fig. 9. Variation of Van der Waals force and gravity force with coal particle diameter.

要因であると推察できる。

(3) 成形炭の粉化の影響

SCOPE21 プロセスでは、500 μm 以下の微粉炭 43% を全量成形しており、成形直後では成形されずに装入炭中に存在する割合は 15% 程度である。したがって成形あり条件の装入炭中に 500 μm 以下の粒子が 36% 存在しているのは、搬送過程の衝撃で成形炭が再び粉化したためであると考えられる。一方、100 μm 未満の粒子割合は、1.8% と低いまま維持されていることから、成形炭の粉化による影響の程度が小さいといえる。

そこで、粒子間に作用する付着力と粒子径との関係について検討し、熱間成形された 100 μm 以下の粒子が搬送時の衝撃を受けても完全には初期の粒度構成に戻らない理由について考察を加えた。

Fig. 9 に石炭粒子に作用するファンデルワールス力による付着力と粒子に作用する重力を推定した結果を示す。なお、ファンデルワールス力は (4) 式で表される。

$$F_v = \frac{A}{24a^2} D_p \times [a/(a+b)]^2 \dots\dots\dots (4)$$

A : van der Waals 定数 [-]

a : 粒子間距離 [Å]

D_p : 粒子径 [Å]

b : 粒子表面粗さの平均値 [Å]

小さい粒子になるほどファンデルワールス力による付着力が大きくなり、700 μm 付近を境に、粒子同士の付着力が重力よりも大きくなることが分かる。この結果から、100 μm 以下の石炭粒子は粒子同士の付着力が十分大きく、このことが輸送過程で受ける衝撃力で容易に粉化しない原因であると推察される。

以上より、微粉炭を熱間成形することで、装入炭中の 100 μm 以下の割合を減少させることができ、その結果、石炭装入時のキャリーオーバーを約 40% 抑制できることを実機レベルで検証した。

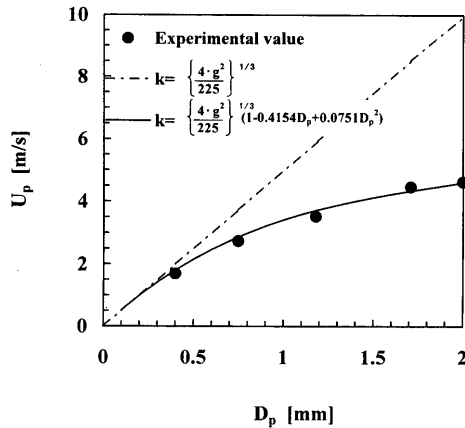


Fig. 10. Relation between diameter of coal particle D_p and measured terminal velocity U_p .

3.2 キャリーオーバー粒子径に及ぼす炭化室内ガス流れ挙動の影響

ここでは、 $100\mu\text{m}$ 以上の粒子がキャリーオーバーしなかった理由を明らかにすることを目的として、発生コークス炉ガス流量の実測結果に基づき、発生コークス炉ガスが炭化室を通過するときのガス流れがキャリーオーバー粒子径に及ぼす影響について考察した。

Fig.10 に冷間試験で求めた石炭粒径と終末速度の関係を示す。石炭の終末速度の実測値は、 0.1mm 以下の粒子径については球形近似の終末速度とほぼ等しいといえるが、粒径が大きくなるにつれて、終末速度は球径近似した終末速度よりも小さくなる。これは石炭粒子が一般に扁平な形状をしており、大きな粒子ほど面積の広い部分の条件に支配されやすいためと考えられる。今回、実測値に合うように係数 k をフィッティングさせ、粒径をパラメータとする近似式(5)を求めた。

$$k = \left\{ \frac{4 \cdot g^2}{225} \right\}^{1/3} (1 - 0.4154D_p + 0.0751D_p^2) \dots\dots\dots(5)$$

(3)式および(5)式を用いて、炭化室内の発生ガスのガス流速とキャリーオーバーする粒径との関係について求めた結果をFig.11に示す。 0.1mm 以上の粒子を飛散させるためには 1m/s 以上のガス流速が必要であることが分かる。

Fig.12に、発生ガスが炭化室内を通過する際のガス流速を推定した結果を示す。図には発生ガス量と石炭装入レベルの経時変化も合わせて示す。

発生ガス量は装入開始1分後に最大となるが、上部空間の面積が十分に広いためガス流速は 0.8m/s 程度である。その後、石炭が装入されるにつれて上部空間面積は減少するが、発生ガス量も少なくなるので装入開始3分後まで $0.8\sim 1\text{m/s}$ の範囲でほぼ一定のガス流速を示す。このように全装入期間の75%については、炭化室の上部空間を通

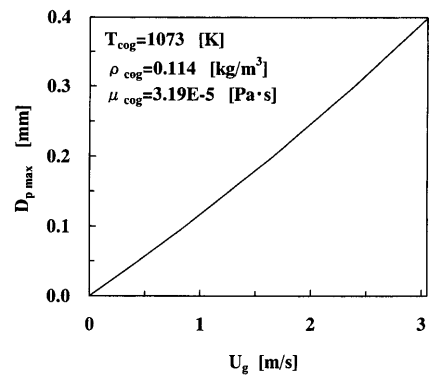


Fig. 11. Relation between generated gas velocity U_g and maximum diameter of carried-over particle $D_{p\text{max}}$ in the test coke oven.

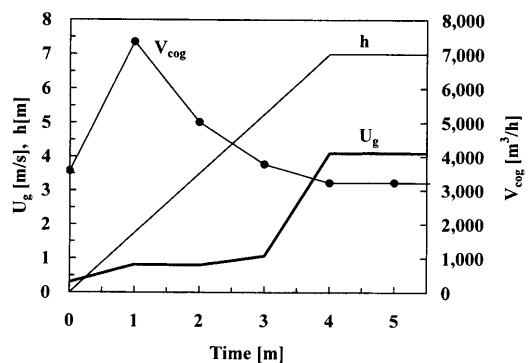


Fig. 12. Estimate results of gas velocity from h and V_{cog} in the test coke oven during charging.

過するガス流速が 1m/s 以下になっており、 $100\mu\text{m}$ 以上のキャリーオーバー粒子が飛散しにくい状況であることがわかる。また、装入が完了するまでの残りの25%についてはガス流速が 1m/s 以上であるが、装入期間中の石炭装入レベルの上昇が落下衝撃を緩和する作用となって発塵が抑制されていると考えられる。このため全体のキャリーオーバー量に占める割合が少なく今回の測定では検出できない程度であったと考えられる。

以上より、石炭装入中に発生するキャリーオーバーは炭化室内上部空間を通過するガス流速の影響を受け、装入期間の75%は、ガス流速が 1m/s 以下であり、 $100\mu\text{m}$ 以上の石炭粒子が、キャリーオーバーとして飛散しにくい状況であることが明らかになった。

4. 結言

(1) 微粉炭を熱間成形することで、装入炭中の $100\mu\text{m}$ 以下の割合を減少させることができ、その結果石炭装入時のキャリーオーバーを抑制できることを実機レベルで確認した。

(2) 石炭装入中に発生するキャリーオーバーは、炭化室内上部空間を通過するガス流速の影響を受け、装入期間の75%は、ガス流速が 1m/s 以下であり、 $100\mu\text{m}$ 以上の石

炭粒子がキャリーオーバーとして飛散しにくい状況であることが明らかになった。

(3) 以上のことから、コークス炉への石炭装入時のキャリーオーバー抑制には、装入炭中の100 μm 以下の粒子の割合を減少させることが必要であり、そのためには、微粉の成形が有効な手段の一つであることが検証できた。

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) A.Furusawa, T.Nakagawa, Y.Maeno and I.Komaki: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1320.
- 2) T.Nakagawa, T.Suzuki, A.Furusawa, Y.Maeno, I.Komaki and K.Nishikawa: *Fuel*, **77** (1998), 1141.
- 3) T.Nakagawa, K.Kato, M.Naito and T.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 133.
- 4) K.Nishioka: Proc. 1st Int. Cong. on Science and Technology of Iron-making (ICSTI '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 378.