

コークス炉乾燥炭操業における石炭配合技術

Coal Blending Theory for Dry Coal Charging Processes

野村 誠治^{* (1)}
Seiji NOMURA

有馬 孝^{* (2)}
Takashi ARIMA

加藤 健次^{* (3)}
Kenji KATO

山口 幸一^{* (4)}
Kouichi YAMAGUCHI

抄 録

新日本製鐵ではこれまでに生産性向上、省エネルギー、および非微粘結炭増使用を目的としてCMCやDAPS等のコークス炉用装入炭の乾燥システムを開発導入してきた。乾燥炭操業において、膨張圧を抑制しながら、高強度コークス製造を可能とする石炭配合技術について検討した。その結果、コークス強度(DI)は石炭の空隙充填能力(充填密度および石炭粒子の膨張性)に依存し、装入密度に応じて適切な配合炭の膨張性を維持する事により、高強度コークス製造が可能である事、および非微粘結炭の適切な配合により膨張圧は抑制可能である事を明らかにした。本配合技術は製造現場に適用され、安価な非微粘結炭多量配合下での高強度コークス製造を支えている。

Abstract

Nippon Steel has successfully developed dry coal charging processes such as CMC and DAPS for cokemaking. In this report the fundamental aspects of the coal blending theory for dry coal charging processes are investigated. The investigation has made it clear that even in cases of high coal bulk density due to dry coal charging processes, it is possible to control coking pressure by adjusting the blending ratio of a low rank and slightly caking coal; and it is also possible to produce high quality coke by adjusting the total dilatation of the blended coal at a suitable level. This blending theory has been applied to cokemaking plants and helps to increase the blending ratio of cheap slightly caking coals.

1. 緒 言

新日本製鐵ではこれまでにコークス炉用装入炭の乾燥システムを開発し、1983年に大分製鐵所で調湿炭装入法(CMC: Coal Moisture Control)の実機操業¹⁾を、また、1992年に大分製鐵所で微粉塊成炭配合法(DAPS: Dry-cleaned and Agglomerated Precompaction System)の実機操業^{2,3)}を開始した。コークス炉装入炭の水分は、CMCプロセスでは約5~7%、DAPSプロセスでは約2~4%であり、装入炭水分の低下により、生産性向上および省エネルギーが達成されるとともに、コークス品質が向上し、新日本製鐵の各製鐵所で順次実機化され、現在は新日本製鐵のほぼ全てのコークス炉の装入炭が乾燥炭となっている。

コークス品質が向上する理由は、水分が低下することにより装入密度が増加する(図1)ためであるが、一方で装入密度が増加するとコークス炉の膨張圧が増加し、押出トラブルを引き起こす危険がある。このため、乾燥炭操業においては、配合炭の膨張圧管理が極めて重要である。

これまで、冶金用コークス製造のための石炭配合技術⁴⁾や、石炭乾留過程における膨張圧⁵⁾については多くの報告がなされている

が、いずれも世界的に広く普及している湿炭装入が前提であり、装入密度が極めて高い乾燥炭操業における石炭配合技術および膨張圧管理技術についてはほとんど知見がなかった。

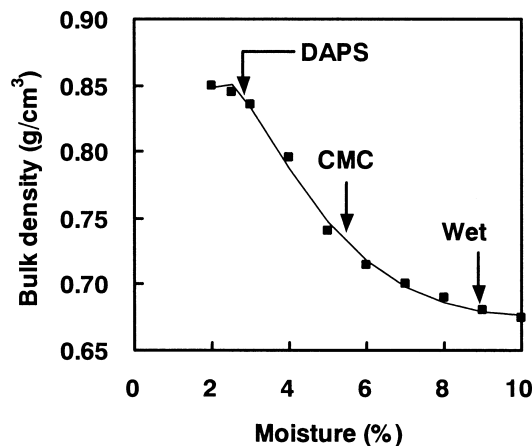


図1 装入炭水分と装入密度の関係
Relationship between moisture and bulk density

* (1) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 Ph.D. 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-3053

* (2) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 工博

* (3) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主幹研究員 工博

* (4) 大分製鐵所 製鉄工場 マネジャー

そこでここでは、乾燥炭操業において、膨張圧を抑制しながら、高強度コークスを製造する石炭配合技術について述べる。

2. 実験方法

2.1 膨張圧(軟化溶融層内ガス圧)

実験には表1に示すようなA～Eの5種類の石炭を用い、高膨張圧炭のA炭にその他の石炭を所定比率で配合した。ここでD, E炭は、石炭化度が低く(ピトリニットの平均反射率が0.8以下)、かつ粘結性も低い(最高流動度2.5以下)石炭である。今後この範囲の石炭を低炭化度非微粘結炭(low rank and slightly caking coal: 略称 SCC)と呼ぶことにする。石炭試料は水分3%に調整後、装入密度0.85 g/cm³で電気加熱式試験コークス炉(図2、炉幅420mm; 炉長600mm; 炉高400mm)に装入し、実コークス炉におけるフリー温度1250℃での炭中昇温パターンに合うように電気発熱体の温度を調整し、18.5h乾留した。さらに、表1に示すような3種類の石炭F, G, Hを用い、低炭化度非微粘結炭Hの配合比率がそれぞれ10%, 22%, 35%と異なる3種類の配合炭B1, B2, B3を調整した(表2)。

表1 石炭性状
Characterization data for the coals used

Coal	Proximate analysis (mass% db)		Dilatometry Total dilatation (vol %)	Gieseler plastometry Maximum fluidity (log MF/ddpm)	Reflectance (ave.) (%)
	VM	Ash			
A	18.6	10.0	50	1.65	1.48
B	28.7	8.5	298	4.14	1.02
C	27.2	7.9	88	3.03	0.97
D	36.2	8.1	32	2.34	0.68
E	36.3	8.8	27	1.60	0.72
F	20.7	9.8	102	2.56	1.41
G	23.8	8.9	104	2.93	1.28
H	35.7	9.1	29	2.08	0.79
I	18.5	9.7	65	1.71	1.57
J	20.9	9.6	28	1.45	1.42
K	25.8	9.0	260	3.84	1.14
L	25.7	8.0	108	2.53	1.15
M	34.4	6.9	189	4.31	0.89
N	36.4	9.7	65	2.57	0.76
O	36.1	10.2	19	1.96	0.74
P	36.6	10.4	30	2.39	0.72

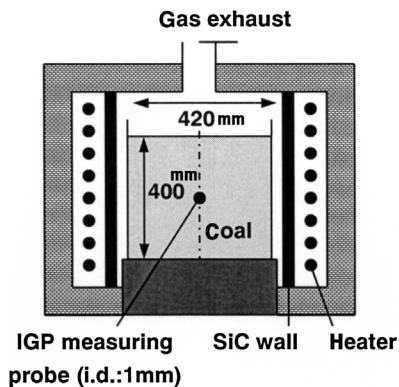


図2 試験コークス炉
NSC pilot coke oven

表2 配合炭B1, B2, B3の配合
Blending composition of coal blends B1, B2 and B3

Coal	Blend		
	B1	B2	B3
F	20%	20%	20%
G	70%	58%	45%
H	10%	22%	35%

の水分は3~10%に調整し、装入密度0.68~0.88 g/cm³で装入し、乾留した。

軟化溶融層内ガス圧(internal gas pressure) (以後、単にガス圧(IGP)と称する)は、内径1 mm, 外径2 mmのステンレスパイプを用い⁶⁾, 炉幅方向中央(炉壁から210mm)かつ炉底から120mmの位置で測定した。なお、軟化溶融層内ガス圧は可動壁炉で測定した膨張圧と相関があることは事前に確認済みであり、以下、軟化溶融層内ガス圧と膨張圧は同義として扱う。

2.2 コークス強度

表1に示すようなI~Pの8種類の石炭を所定の装入密度(0.70, 0.80, 0.90 g/cm³)で装入して試験炉で乾留し、乾留後コークスのドラム強度指数(DI¹⁵⁰₁₅ (150回転後の15mm篩上重量百分率), DI¹⁵⁰₆ (150回転後の6mm篩上重量百分率))を測定した。この時石炭水分はそれぞれ9, 5, 3%に調整した。また、各種配合炭を装入密度0.70 g/cm³および0.83 g/cm³で装入して試験炉で乾留し、ドラム強度指数を測定した。さらに、配合炭B1, B2, B3については、それぞれ装入密度0.68, 0.75, 0.82 g/cm³で装入して乾留したコークスについてはドラム強度指数を測定した。

2.3 粘結性

実験に使用した石炭については、全膨張率および最高流動度を測定した(JIS M 8801)。また全膨張率測定時には、試験に用いる成型した石炭試料の重量も測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥炭操業における軟化溶融層内ガス圧

図3および図4に、A炭とB, C炭, A炭とD, E炭の2銘柄配合炭のガス圧を示す。図より、高膨張圧のA炭に揮発分27~29%前後の粘結炭(B炭, C炭)を配合した場合、配合炭のガス圧は両者のほぼ加算平均となることわかる。一方、A炭に、低炭化度非微粘結

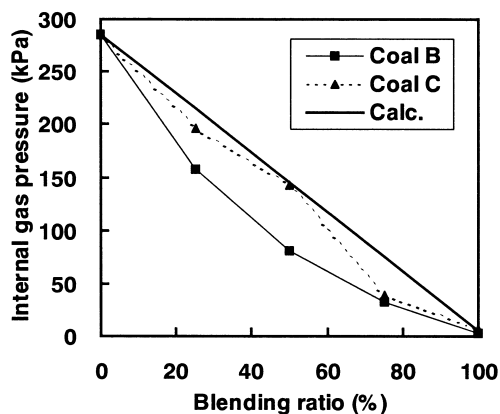


図3 高膨張圧炭(A)と粘結炭(B, C)の二銘柄配合炭の軟化溶融層内ガス圧
Effect of blending ratio of a caking coal, B and C, with coal A, on internal gas pressure

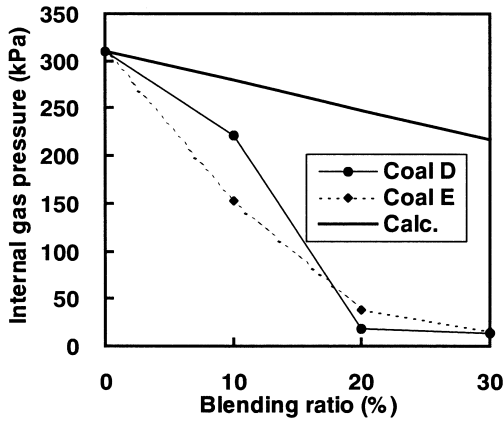


図4 高膨張圧炭(A)と低炭化度非微粘結炭(D, E)の二銘柄配合炭の軟化溶融層内ガス圧
Effect of blending ratio of a low rank and slightly caking coal, D and E, with coal A, on internal gas pressure

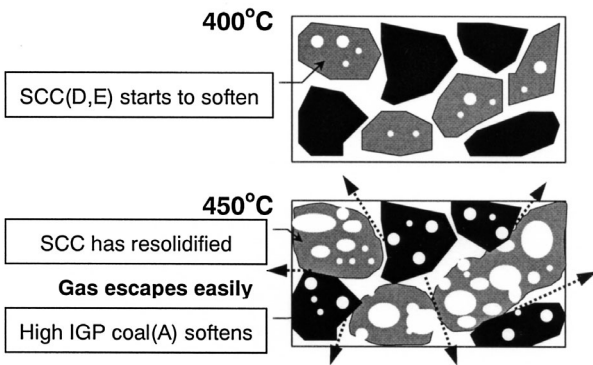


図5 低炭化度非微粘結炭配合による軟化溶融層内ガス圧の抑制機構
Suppression of internal gas pressure by blending low rank and slightly caking coal

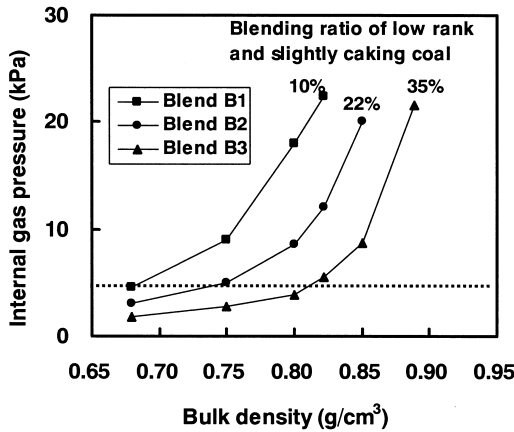


図6 軟化溶融層内ガス圧に及ぼす装入密度の影響
Effect of bulk density on internal gas pressure

炭(D, E炭)を配合した場合、ガス圧は加成平均よりも大きく低下することがわかる。

D, E炭は石炭化度が低いためA炭よりも低温で軟化溶融を開始する。そして、再固化温度が低く、膨張圧の高いA炭が軟化溶融している時に既に再固化するため、膨張圧が高いA炭の軟化溶融層からガスが抜ける通路として作用し、軟化溶融層内ガス圧を低下させると考えられる(図5)。

図6に、装入密度とガス圧の関係を示す。図より、これまで報告されているように、装入密度が高いとガス圧は急激に増加することがわかる。一方で、低炭化度非微粘結炭の配合比が高いほどガス圧は低下し、配合B1, B2, B3はそれぞれ装入密度0.68, 0.75, 0.82 g/cm³でのガス圧がほぼ等しいことがわかる。したがって、乾燥炭操業で装入密度が上昇しても、低炭化度非微粘結炭配合比率を増加させることにより、膨張圧を湿炭レベル(装入密度0.68g/cm³)に維持することは可能であるが、次の問題はコークス強度が維持できるかどうかである。

3.2 乾燥炭操業におけるコークス強度

3.2.1 装入密度および全膨張率とコークス強度の関係

図7に装入密度と各種単味炭のコークス強度の関係を示す。ここでコークス強度としては、コークスの表面破壊強度を示すと考えられているDI¹⁵⁰₆を用いて評価した⁷⁾。装入密度が増加するとDI¹⁵⁰₆は向上するが、炭種によりその影響は大きく異なることがわかる。また図8、図9に、全膨張率および最高流動度とDI¹⁵⁰₆の関係を示す。従来から言われているように、最高流動度が高いとDI¹⁵⁰₆が向上する傾向にあるが⁸⁾、全膨張率の方がDI¹⁵⁰₆との相関が高く、全膨張率がある値を下回るとDI¹⁵⁰₆が急激に低下することがわかる。また、装入密度が高いほど、この低下点は低膨張率側にシフトすることがわかる。

このように全膨張率がDI¹⁵⁰₆に影響を与える理由は下記のように考

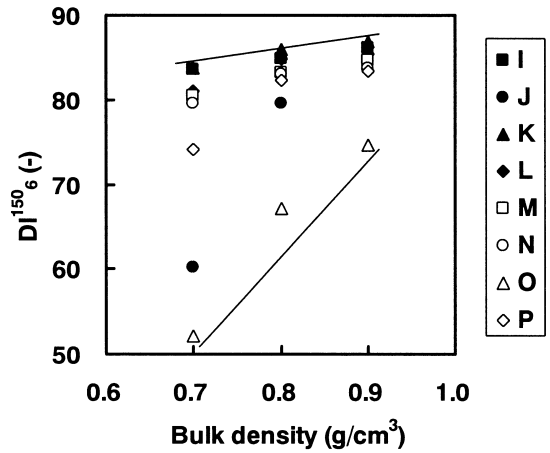


図7 DI¹⁵⁰₆に及ぼす装入密度の影響
Effect of bulk density on DI¹⁵⁰₆

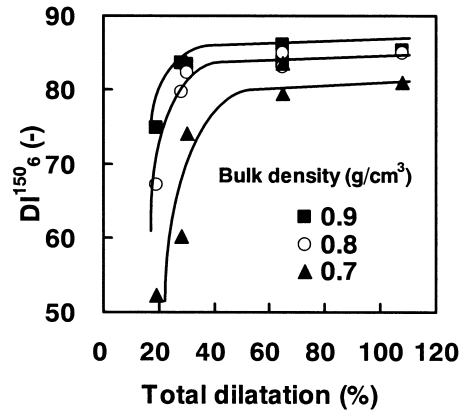


図8 DI¹⁵⁰₆に及ぼす全膨張率の影響
Effect of total dilatation on DI¹⁵⁰₆

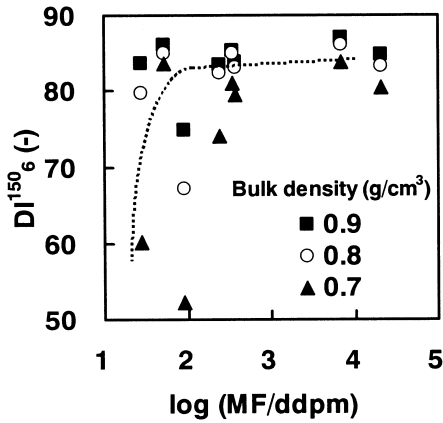


図9 DI₁₅₀₆に及ぼす最高流動度の影響
Effect of maximum fluidity on DI₁₅₀₆

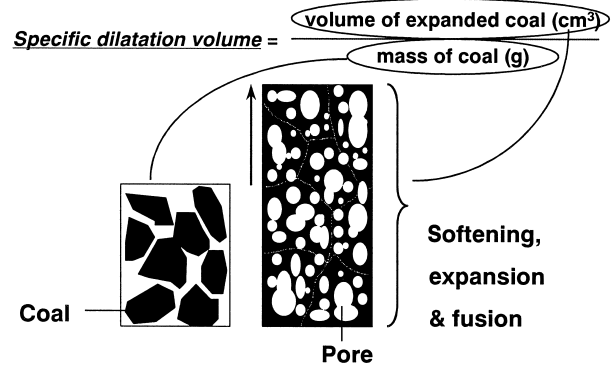


図11 膨張比容積の定義
Definition of specific dilatation volume

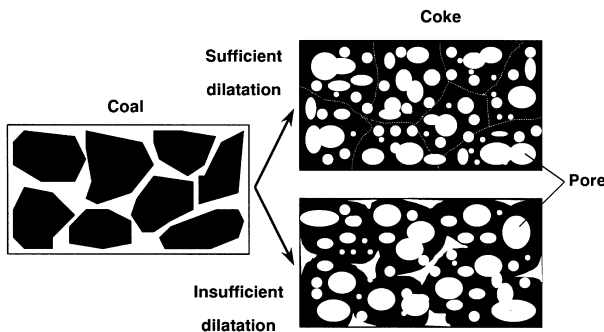


図10 石炭粒子の膨張と気孔形成
Coal expansion and pore formation

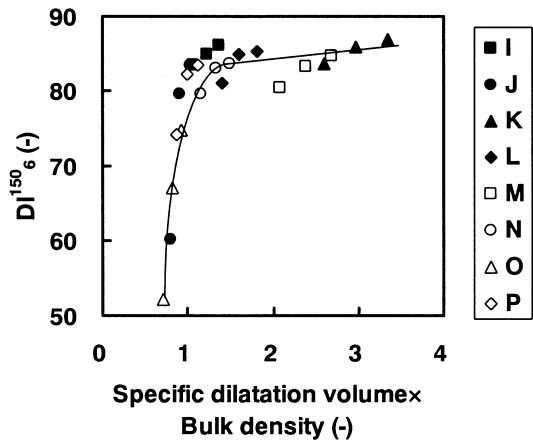


図12 装入密度と膨張比容積の積とDI₁₅₀₆の関係
Relationship between the product of specific dilatation volume by bulk density and DI₁₅₀₆

えられる。コークスの気孔構造の形成過程を模式的に図10に示す⁸⁾ (石炭は粒度分布を持ち、実際には大きな粒子の空隙をより微細な粒子が充填しているが、この図においては、簡略化のため微細な粒子は省略した)。石炭を炭化室に装入した時点においては、石炭粒子同士は部分的に接触しているのみである。400℃前後になると、石炭は軟化、膨張し、石炭粒子は粒子間空隙に膨張していく。石炭粒子間の空隙率よりも石炭粒子の膨張率の方が大きい場合には、石炭粒子同士は十分に接着し、強固な結合を形成する。一方、石炭粒子間の空隙率よりも石炭粒子の膨張率の方が小さい場合には、石炭粒子同士は十分に接着することができず、脆弱なコークス構造が形成される。このように、石炭の粒子同士の接着には初期の石炭装入密度と石炭の膨張性が重要であると考えられる。

3.2.2 石炭の空隙充填能力とコークス強度

そこで、石炭の膨張性と装入密度は、両者とも空隙を充填するか否かという点で等価に評価されるべきであると考え、石炭の膨張性と装入密度がコークス強度に及ぼす影響を定量的に評価するため、“膨張比容積”という新たな概念を考案した。ここで膨張比容積は、図11に示すように単位質量あたりの石炭の膨張後の体積で定義し、ジラトメーター試験における膨張後の石炭試料体積(試料高さ×レトルト断面積)の成形試料重量に対する比で求めた。装入密度(g/cm³)と膨張比容積(cm³/g)の積は無次元数となり、いわば石炭粒子の膨張による空隙の充填度を示すパラメーター(空隙充填能力)といえる。

装入密度と膨張比容積の積とDI₁₅₀₆の関係を図12に示す。図より、膨張比容積という概念を導入する事により、コークス強度に及

ぼす石炭の膨張性と装入密度の影響が一本の線で表せることがわかる。DI₁₅₀₆を十分に高く維持するには、装入密度と膨張比容積の積をある値以上にすればよい。すなわち、目標のコークス強度(DI₁₅₀₆)となるような、装入密度×比容積の値を維持する範囲で、膨張圧を抑制する低炭化度非微粘結炭を配合すれば、膨張圧を抑制しながら、高強度コークスを製造することが可能であると考えられる。

図13に各種配合炭を用いた場合の、全膨張率と装入密度0.70, 0.83 g/cm³におけるDI₁₅₀₆の関係を示す。この場合も同様に、配合炭の全膨張率が低下するとDI₁₅₀₆は低下し、ある一定値以上の全膨張率を確保すればDI₁₅₀₆を維持できることがわかる。また装入密度が向上

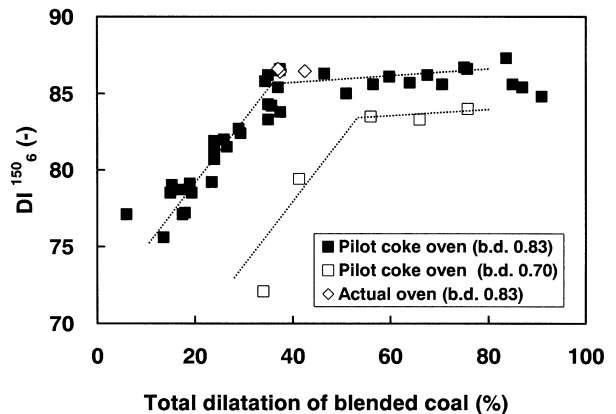


図13 各種配合炭の全膨張率とDI₁₅₀₆の関係
Relationship between total dilatation of blended coals and DI₁₅₀₆

すると、屈曲点(DIが大きく低下する点)が低全膨張率(TD)側にシフトする事がわかる。

3.2.3 実操業への石炭配合理論の適用例

上記の空隙充填能力に基づく石炭配合理論を製造現場に適用した例を図13に示す(大分製鐵所コークス工場の操業データ(石炭装入密度0.83g/cm³)を◇でプロット)。実操業では、DIを一定以上に維持する中で、製造コストを極力少なくするために粘結性の低い(全膨張率が低い)安価な非微粘結炭を最大限に配合する事が求められている。装入密度×比容積(空隙充填能力)に基づく石炭配合理論によりコークス品質を設計した結果、図に示すように、DIが急に低下する屈曲点の限界まで、安価な非微粘結炭の増配合により配合炭の全膨張率を低下させつつ、DI¹⁵⁰₁₅が維持できている事がわかる。

3.2.4 乾燥炭操業での膨張圧抑制と高強度コークス製造の両立

図14に示すように、配合B1, B2, B3は低炭化度非微粘結炭配合割合が異なるが、それぞれ装入密度0.68, 0.75, 0.82 g/cm³におけるDI¹⁵⁰₁₅および軟化溶融層内ガス圧がほぼ等しいことがわかる。すな

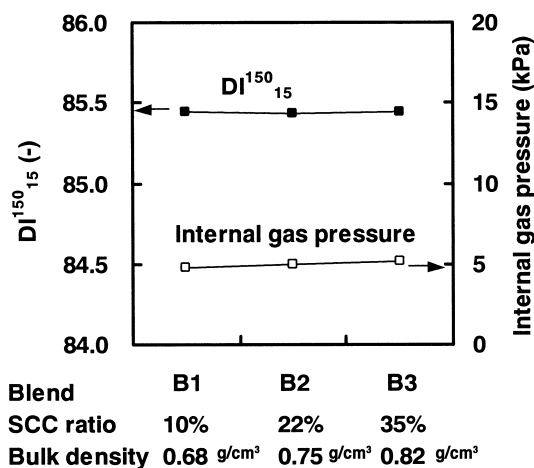


図14 高装入密度・高非微粘結炭比条件におけるDI¹⁵⁰₁₅と軟化溶融層内ガス圧

Effect of bulk density and the blending ratio of low rank and slightly caking coal on DI¹⁵⁰₁₅ and internal gas pressure

わち、装入密度増加による膨張圧増加は、低炭化度非微粘結炭配合比増加により抑制され、かつコークス強度を維持することが可能である。この結果はある配合による一例であり、高装入密度下においてコークス強度を維持あるいは向上し、かつ膨張圧を抑制するような配合調整も可能である。

乾燥炭装入による高装入密度操業を実施している製造現場においても、非微粘結炭を適切に配合する事により、膨張圧を抑制し、かつ高強度コークス製造を達成している。

4. 結 言

乾燥炭操業において、膨張圧を抑制しながら、高強度コークスを製造する石炭配合技術について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 乾燥炭装入による高装入密度条件においても、低炭化度非微粘結炭を適切に配合することにより、膨張圧を抑制し、かつ高強度コークスの製造が可能である。
- (2) 低炭化度非微粘結炭配合時には、配合炭の膨張性管理が重要であり、装入密度に応じて適切な配合炭の膨張性を維持することにより、高強度コークス製造が可能である。

本配合技術は、安価で劣質な非微粘結炭増使用技術として操業現場に適用されており、着実に成果をあげつつある。今後も、さらなる非微粘結炭増使用によるコークス製造コストの低減および石炭資源対応力の向上に貢献するため、本石炭配合技術をより発展させるための研究開発を推進していく。

参考文献

- 1) Wakuri, S. et al.: AIME 45th Ironmaking Conference Proceedings. 1986, p.303
- 2) Nakashima, Y. et al.: 2nd Int. Cokemaking Congr. London, UK, 1992, p.518
- 3) Tanaka, S. et al.: AIME 56th Ironmaking Conference Proceedings. 1997, p.139
- 4) Miura, Y. et al.: Trans. ISIJ. 21, 518(1981)
- 5) Tucker, J. et al.: 2nd Int. Cokemaking Congr. London, UK, 1992, p.40
- 6) Nomura, S. et al.: Fuel. 75, 801(1996)
- 7) Arima, T. et al.: Tetsu-to-Hagané. 78, 1101(1992)
- 8) Arima, T.: Tetsu-to-Hagané. 87, 274(2001)