

## 高炉への微粉炭吹き込み技術の現状

解説

稲葉 晋一\*・八木 順一郎\*2

## Outlook of Pulverized Coal Injection into a Blast Furnace

Shinichi INABA and Jun-ichiro YAGI

## 1. 緒 言

高炉へ微粉炭を吹き込むアイデアは 1840 年に S. M. Banks がコークスや無煙炭の吹き込みに言及したことに始まるといわれる<sup>1)</sup>。工業規模での適用は、このアイデアを基にフランスの Bologne-le-Haut の近くの製鉄所 Haut-Marne で 1840-45 年に行われたのが世界最初である<sup>1)2)</sup>。特許もすでに 1881 年に成立しており、現在では誰でも自由に使用できる技術である。

その後、1960 年代にアメリカで設備開発も含めて盛んに実施されたが、当時は微粉炭の供給設備にスクリュューフィーダーを使用していたために、今日ほどの大量吹き込みには至らなかった。その後、ニューマティック方式が開発され微粉炭の大量輸送が可能となったが、吹き込みの容易なオイルにとって代わられた。

日本での吹き込み技術は COM (Coal-Oil-Mixture) で始められたが、長い年月をへずに、やはりオイル吹き込みに移行した。

1973 年と 1979 年のオイル・ショックによるオイル価格の高騰にくわえ、コークス炉の老朽化への対策の重要性がクローズ・アップしてきた。すなわち、コークス炉の長寿命化のためには、炉の生産性を低下させることが有効であり、コークスの一部を石炭のまま高炉に吹き込む技術が 1980 年代半ばから再認識されてきた。

今次の微粉炭吹き込みは、石炭とオイルの価格差が大きく、銑鉄の製造コストを低下させるために、合理化によって立ち直ったヨーロッパと日本において精力的に実施されており、吹き込み量の熾烈な競争がなされている。

この微粉炭吹き込みは酸素との同時使用による高炉の生産性の改善、さらには排出 CO<sub>2</sub> 低減による環境への悪影響の低下等の長所がある。

そこで、まず本解説においては高微粉炭吹き込み時の

高炉内状況と操業状況を整理し、微粉炭吹き込み技術の現状を紹介すると共に将来を展望する。また、燃焼反応の速度論、羽口先での乱流燃焼挙動の解析、充填層内における微粉の挙動に関する研究等基礎的な研究の状況は次号に取りまとめる。

## 2. 高炉内における微粉炭の挙動

## 2-1 レースウェイ内での燃焼

微粉炭を多量に吹き込むためには、レースウェイ内で微粉炭を出来る限り燃焼させることが有効であると考えられており、多くの基礎実験により燃焼性を高める方策が検討されている。微粉炭の燃焼性は実験室的検討によれば、高揮発分、低流動性石炭が優れている<sup>3)</sup>。また、微粉炭吹き込み量の増加と共に燃焼率が低下する。これらの現象は実炉の斜行ゾンデを用いて確認されている。

このレースウェイ内での微粉炭の燃焼性は送風温度に依存し、高送風温度 (1305-1320°C) では、向上する。さらに、低送風温度の場合 (1200-1260°C) にも、水蒸気を添加することにより高温送風の場合と同程度まで燃焼性を向上できる<sup>39)</sup>。

さらに、燃焼性は微粉炭に CaCO<sub>3</sub> を 2% あるいはリグナイト 10% を添加することにより向上する<sup>4)</sup>。この結果を基に試算した結果では、低 C% のリグナイトでも 10% 添加することによって微粉炭吹き込み量を 155 kg/thm から 196 kg/thm へ高めることが出来る。

高炉のレースウェイ内条件で性状の異なる石炭のガス化状況を調べた結果が Table 1 である<sup>5)</sup>。高 VM 炭では重油とほとんど同じくらい燃焼し、レースウェイ境界部での燃焼率は 20~65% である。また、燃焼速度は吹き込みランスの太さや位置には影響されないことがわかる。

また、Fig. 1 に示すように多量の微粉炭を吹き込ん

平成 4 年 1 月 8 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Jan. 8, 1992; Accepted on Apr. 10, 1992) (依頼解説)

\* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所製銑研究室長 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675)

\*2 東北大学素材工学研究所教授 工博 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University)

Key words: blast furnace; pulverized coal injection; operation results; infurnace conditions; unburned pulverized coal.

Table 1. Test results IFRF : % gasification of oil and coals.

	Distance after tuyere		
	1 m	2 m	3 m
Oil	70	85	90
Coal SE, 38% volatile	65	70	80
Coal EC, 33% volatile	50	70	80
Coal NP, 18% volatile	45	55	75
Coal PR, 4% volatile	20	25	45

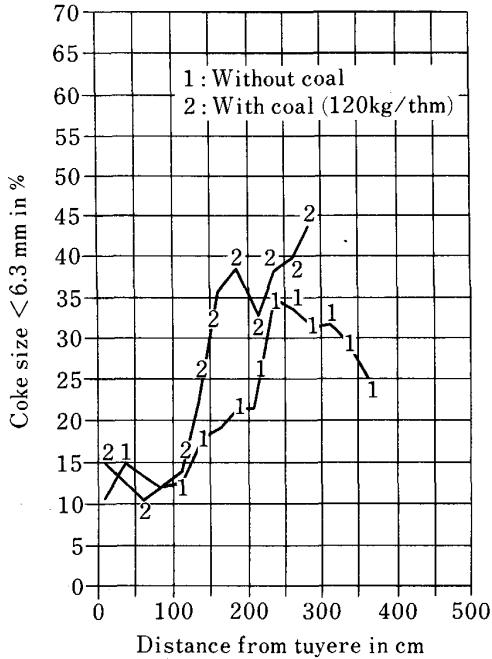


Fig. 1. Radial distribution of coke < 6.3 mm with and without coal injection.

だ場合にはコークスがレースウェイ部で長時間高温に曝されるため、粉化量が增大する<sup>6)</sup>。

2.2 適性吹き込み位置

微粉炭吹き込みが実施された初期には、吹き込みランス先端はブローパイプ内にある方がよいと考えられた<sup>7)</sup>。この理由は羽口先端部での吹き込みに比して微粉炭が熱風に長時間さらされ急速燃焼を起こし易いとの考えに基づいていた。

しかし、多量の微粉炭を吹き込んだ場合、吹き込み位置によっては羽口先端上部に付着物が生成する<sup>8)</sup>。これを防止するために吹き込み位置を羽口先端に近づけると、吹き込み量の増大と共に増加する送風圧力とブローパイプ内の微圧振動を低減することが出来る。また、吹き込み位置を羽口先端に近づけた場合には、ブローパイプ内の微粉炭の燃焼量が低下することにより、炉壁側コークスの消費量とその降下速度が増加するため、炉壁熱負荷が低下する<sup>9)</sup>。

この吹き込み位置と微粉炭粒子径との関係を Fig. 2 に示す<sup>10)</sup>。図は羽口先端温度を 1600°C 一定とする条件で求めたものであるが、吹き込み位置を羽口先端に近

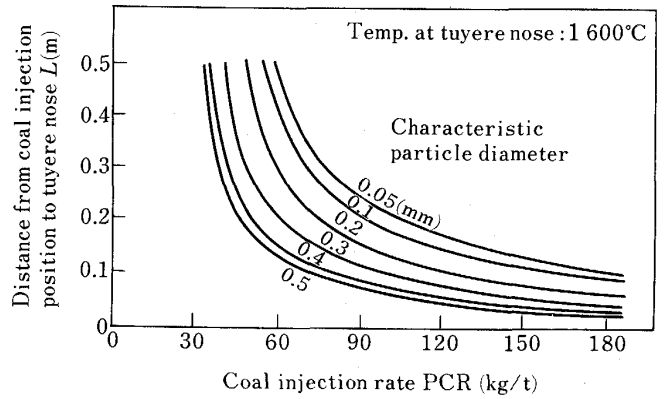


Fig. 2. Relation among optimum coal injection position, injection rate and particle diameter of coal.

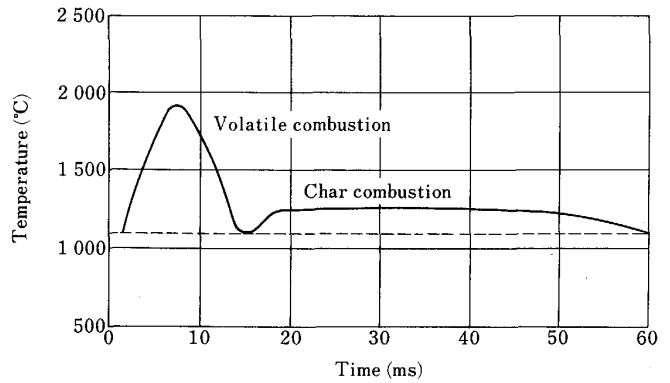


Fig. 3. Mechanism of pulverized coal combustion.

づけても微粉炭粒子径を適当に選べば、十分な微粉炭の燃焼性を確保できることを示している。

2.3 微粉炭の粗粒化限界

従来、微粉炭の粒度は気流輸送経路の摩耗を少なくし、高炉炉内で完全燃焼させるために、数 10 μm に粉碎されている。しかし、数 mm 径の粒子でも数 10 ms 以内に加熱着火され燃焼することが知られている<sup>11)</sup>。

この考え方を実際に採用したのが Scunthorpe の高炉であり、最大粒径 2 mm の粉炭を最高 117 kg/t・p 吹き込み、安定操業を確立した<sup>2)12)</sup>。この時のコークス置換率は羽口先温度を補正すればほぼ 1 であった。

2.4 未燃焼微粉炭の反応性

羽口へ吹き込まれた微粉炭は急速に加熱され燃焼する。特に高揮発分炭では微粉炭の流動化と揮発分の放射のために Photo. 1 に示すごとく、気孔の多いバルーン状のチャーを形成する<sup>13)</sup>。

1) CO<sub>2</sub> ガスとの反応

1)-1 羽口およびレースウェイ内での反応

羽口およびレースウェイ内における石炭粒子の燃焼状況を実験的に調べた結果を Fig. 3<sup>14)</sup> に示す。先ず約 10 ms で揮発分が蒸発し、次の 80 ms でチャーの不均質な燃焼が起る。この初期燃焼により生ずるチャーの燃焼は

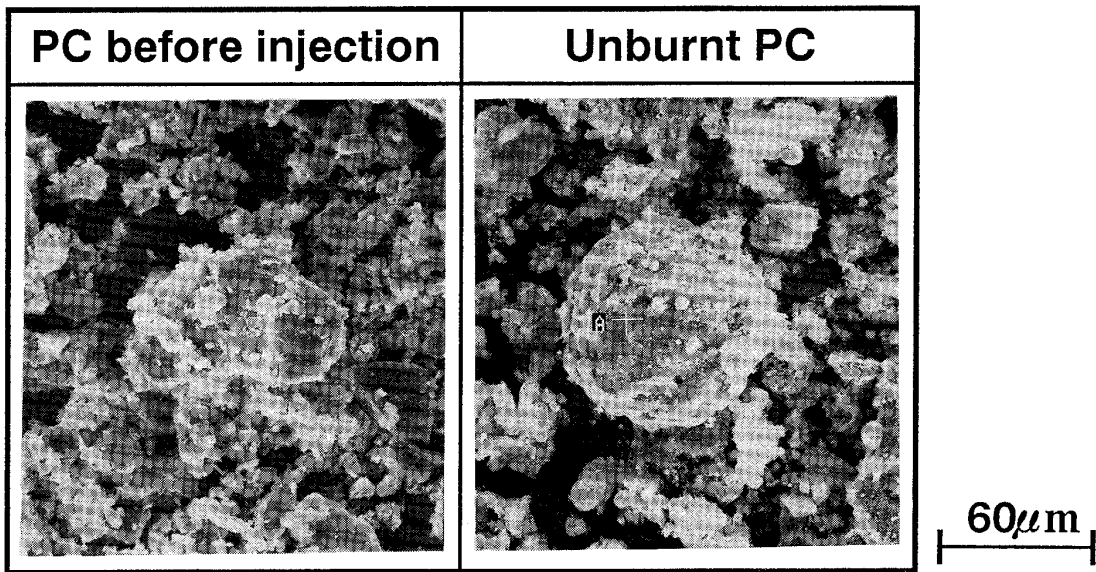


Photo. 1. Change of pulverized coal (PC) shapes with combustion.

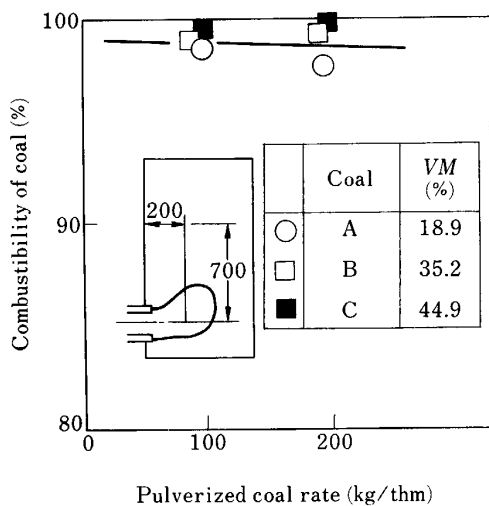


Fig. 4. Effect of coal type on combustibility of coal at 700 mm above tuyere level.

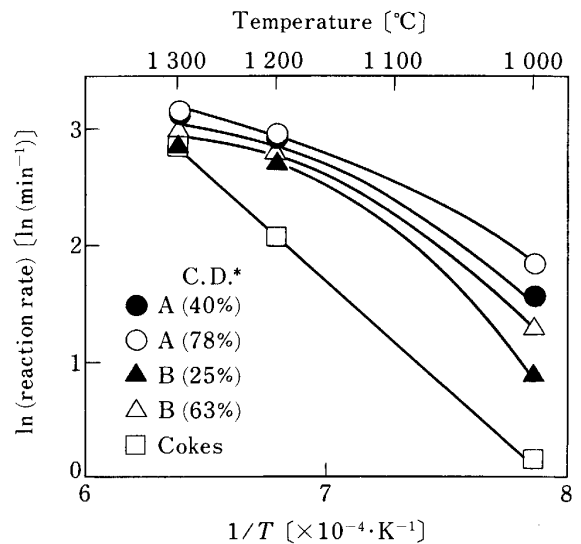
熱風の温度が高いほど速く、コークスより反応しやすい。

また、低揮発分炭は着火が遅く、レースウェイ内での燃焼が遅れるが、レースウェイ奥や羽口上 700 mm 位置では燃焼が進展して、炭種による差は少なくなる<sup>15)</sup>(Fig. 4).

1)-2 シャフト部での反応

シャフト部に到達した未燃焼微粉炭は Fig. 5 に示すごとく 1 000-1 200°C 領域での反応速度はコークスの反応速度に比較して著しく大きいので、優先的に消費される。しかし、1 300°C では炭種による差は現れていない<sup>15)</sup>。

灰分の異なる(揮発分量一定)未燃焼微粉炭のガス化速度を素反応速度式として次式を用いて決定することができる<sup>17)</sup>。



\* C. D. : Combustion Degree

Fig. 5. Relation between reaction rate and temperature of unburnt pulverized coal.

$$R = \frac{k_1 (P_{CO_2} - P_{CO_2}^e)}{1 + P_{CO}/k_2}$$

R: 反応速度 (1/s)

$k_1, k_2$ : 速度定数 (1/atm·s, atm)

$P_{CO_2}, P_{CO_2}^e$ : CO<sub>2</sub> の分圧, 平衡分圧

$P_{CO}$ : CO の分圧

その結果を Fig. 6 に示すが、未燃焼微粉炭のガス化反応速度を促進させるパラメーター  $k_1$  は灰分の異なる未燃焼微粉炭の種類によらず一定の値となり、ガス化反応速度を支配するのは CO ガスによる抑制パラメータ  $k_2$  である。

また、1 000°C 領域における CO<sub>2</sub> との反応は Fig. 7 のように揮発分の高い微粉炭から生成した未燃焼微粉炭

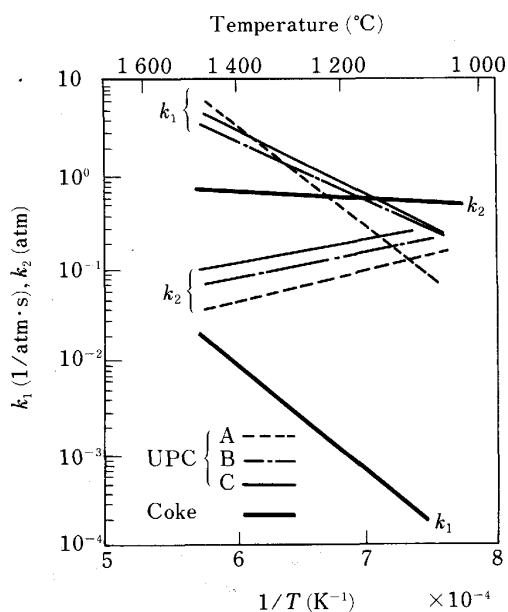


Fig. 6. Temperature dependence of rate constants.

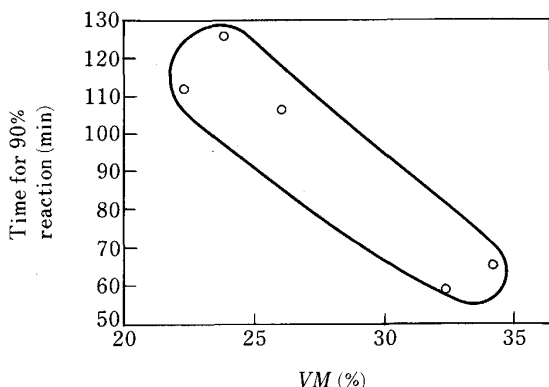


Fig. 7. Relation between VM and time for 90% reaction of char with CO<sub>2</sub>.

ほどガス化反応速度が大きい<sup>3)</sup>。

2) 未燃焼微粉炭のスラグ、メタルとの反応

未燃焼微粉炭から溶鉄への浸炭速度は Fig. 8 に示すようにグラファイトに比して著しく遅い。また、吹き込み量 (1.4 g/min が実炉での微粉炭吹き込み量 200 kg/t·p に相当する) の増大と共に浸炭速度は増大するが、C 濃度が約 3% 以上ではその速度は小さくなる。この浸炭速度は未燃焼微粉炭の供給律速と見なされ、微粉炭比 200 kg/t·p 程度の吹き込み条件では浸炭によって消滅する未燃焼微粉炭は非常に少ないと考えられている<sup>18)</sup>。一方、未燃焼微粉炭の灰分はスラグへ容易に吸収同化される (Fig. 9)。

堀尾ら<sup>19)</sup>は高炉滴下帯における微粉の蓄積と融液のホールド・アップを調べるため液-微粉-充填層三者を組み合わせた冷間模型実験を行っている。その結果、微粉-液間の濡れ性によりホールド・アップの状況が大きく

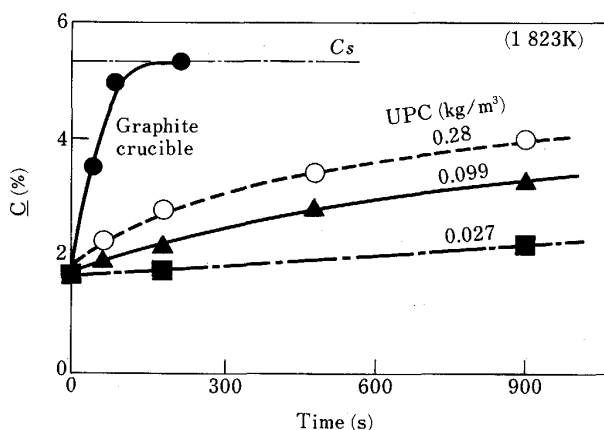


Fig. 8. Carburation rate of metal by unburned pulverized coal (UPC).

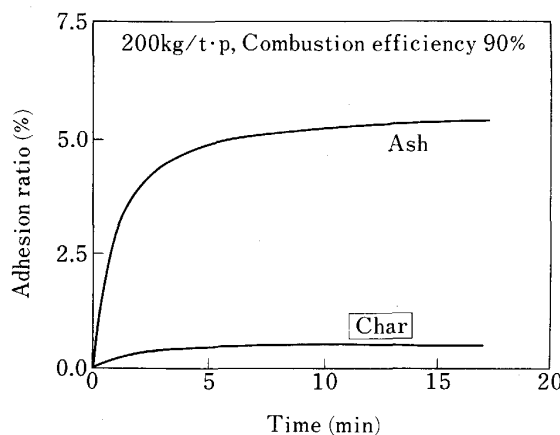


Fig. 9. Adhesion rate of unburnt pulverized coal onto slag.

異なり、高炉内での圧力損失が大きくなる可能性を示唆しているが、実炉との関係は今後の検討を待たねばならない。

3. 微粉炭吹き込みによる高炉内状況の変化

微粉炭吹き込み量を増加した場合には Fig. 10 に示すような炉内状況の変化が生じ、その結果操業上次の問題点の発生することが考えられる<sup>20)</sup>。

- ①微粉炭増加にともなう羽口および炉内における圧損の上昇
- ②ガスの周辺流化と熱流比の低下にともなう放散熱の増加
- ③燃焼率低下による未燃焼微粉炭の発生

これら、炉内状況を的確に把握し、確実に対処することによって一層の微粉炭多量吹き込みが達成される。

3.1 装入物分布

F. グラフィユら<sup>21)</sup>は Dunkerque No. 2 高炉でのコークス比低下過程で、コークス比が大きく変化しても通気性が一定であった事実を踏まえ、通気性制御には装入方

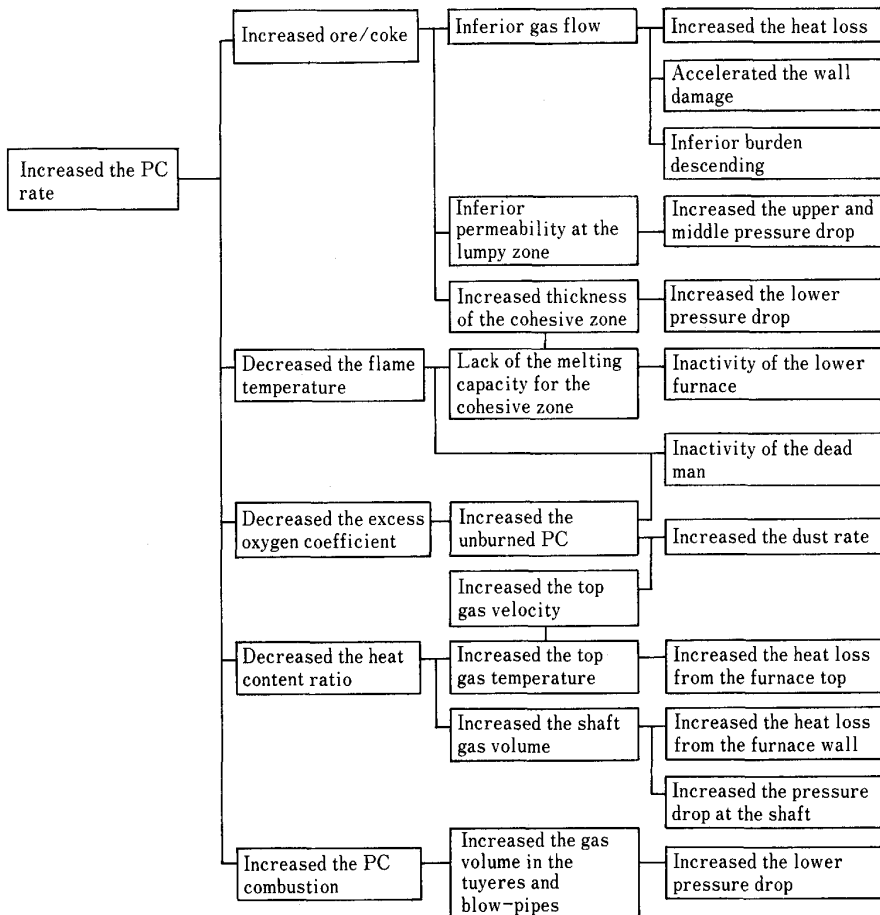


Fig. 10. Technical problems with increasing PC rate.

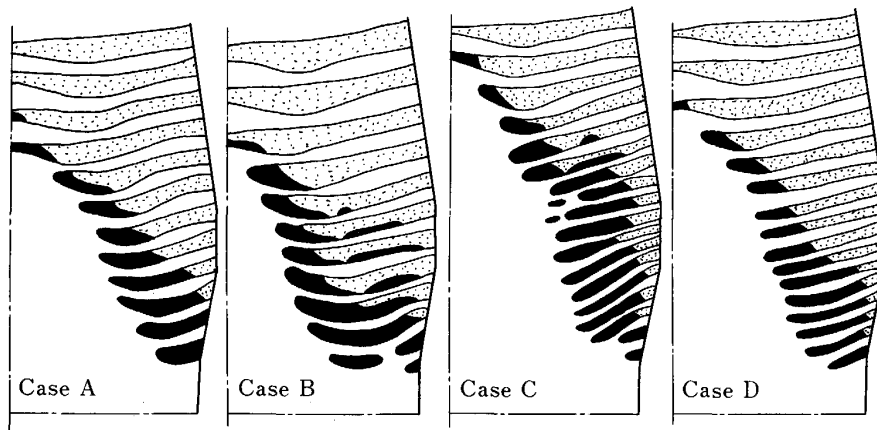


Fig. 11. Changes of cohesive zone shape with increase of ore/coke.

法が大きな役割を果たしている」と推測している。

高炉熱間模型による調査結果から<sup>22)</sup>高鉱石/コークス比時の炉内圧力損失を最も低くする装入物分布は炉内軟化融着帯との関係 (Fig. 11) から Fig. 12 の Case C を指向すべきである。すなわち、高微粉炭比操業時には周辺部の鉱石層厚/コークス層厚の比を大きくすることが有効である。加古川 No. 2 高炉では、この結果を用いて、コークス中心装入とムーバブル・アーマー制御の併用により微粉炭と重油の吹き込みによる月間平均コークス比 298 kg/t・p (補正微粉炭比 220 kg/t・p) を達成し

た<sup>28)</sup>。この操業では、コークス中心装入で中心部のコークス量を制御して中心ガス流を確保し、ムーバブル・アーマーで周辺部の鉱石/コークスの量比を的確に制御することが有効に作用した。

このように微粉炭比増大につれて周辺部の鉱石/コークス比を高める装入物分布は Thyssen Schwelgern No. 1 高炉に関する報告<sup>4)</sup>水島 No. 4 高炉のオールコークス操業から微粉炭 70 kg/t・p 吹き込み操業への変化<sup>23)</sup>においてもみられている。

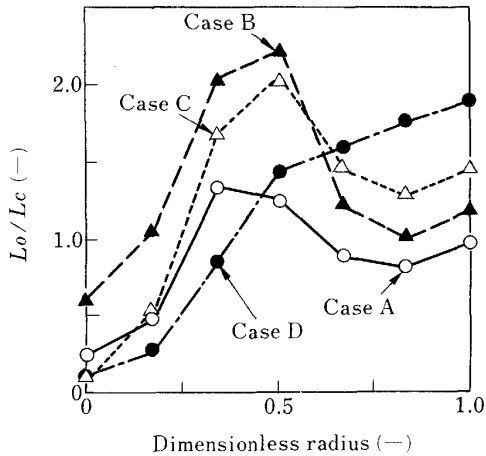


Fig. 12. Changes of burden distribution with increase of ore/coke.

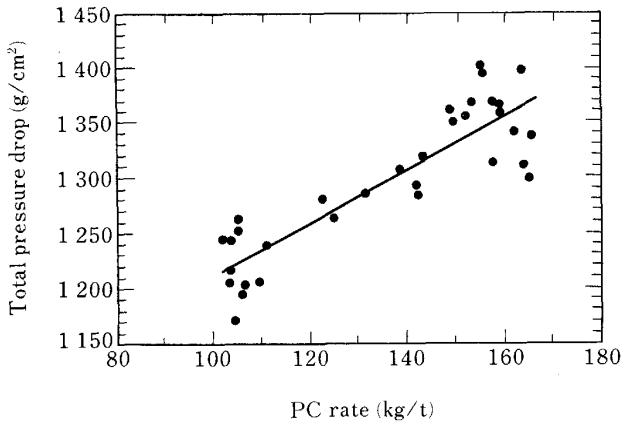


Fig. 13. Relation between PCR and total pressure drop.

3.2 圧力変動

Sollac 社 Dunkerque No. 4 高炉 (内容積 3 648 m<sup>3</sup>) では 1990 年 7 月に月間平均値で微粉炭比 180 kg/t·p (出鉄比 2.42 t/m<sup>3</sup>) の世界記録を樹立した。この際の操業上の問題は①炉内圧力損失の増加と②炉頂ガス温度の上昇であった<sup>21)24)</sup>。

大鈴ら<sup>20)</sup>はこの炉内圧損の増加原因を神戸 No. 3 高炉の高微粉炭吹き込み操業結果をベースに解析した。彼らは微粉炭比を 100 kg/t·p から 160 kg/t·p に増加する過程で生じた全圧損の増加分約 0.15 kg/cm<sup>2</sup> (Fig. 13) の原因を

- ① 鉱石/コークス比増大による通気抵抗の増加
- ② 微粉炭の燃焼量増加による羽口内圧損の上昇
- ③ 炉内ガス温度上昇による実ガス量の増大

の 3 項に分けて解析し、炉内圧損の上昇の主因は③炉内ガス温度上昇に起因すると判断した。①の鉱石/コークス比増大にともなう圧力損失の増加量は大鈴らの報告では 0.03 であり、また、オールコークス操業と微粉炭 70

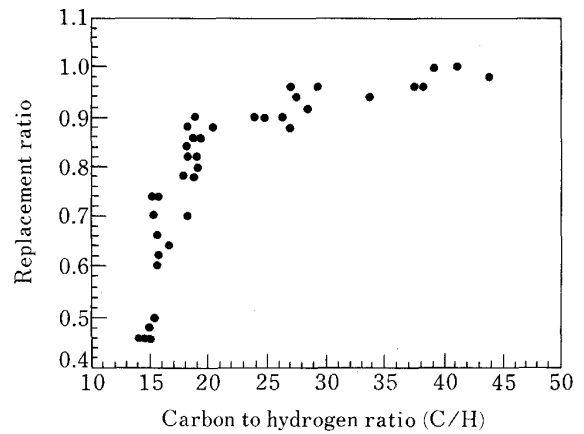


Fig. 14. Coke replacement ratio as a function of the coal's C/H ratio.

~100 kg/t·p 吹き込み操業結果を比較解析した中島ら<sup>25)</sup>の結果でも 0.05 kg/cm<sup>2</sup> となっており比較的小さい。

圧力損失増大の原因としてレースウェイでの未燃焼微粉炭が炉内に堆積することも考えられる。しかし、オールコークス操業から微粉炭吹き込み操業へ移行する過程では圧損が急激に増大するが、微粉炭吹き込み量を一定で操業した場合に、その変化量があまり大きくないことから、圧力損失の増大に及ぼす未燃焼微粉炭の炉内蓄積の影響は小さいと考えられている<sup>25)</sup>。また、微粉炭吹き込み操業における通気性の劣化は熔融帯根位置の低下との関連もありうるとの考えもある<sup>21)</sup>。

3.3 置換率

一般に微粉炭のコークスとの置換率 (残留水分を含む微粉炭 1 kg で置換される乾コークスの kg) は微粉炭中の灰分や揮発分が低いほど、また、置換されるコークスの灰分が高いほど、大きい値を示す。また、高炉の操業状況にも大きく依存する。すなわち、高炉の操業状況が微粉炭吹き込みによって改善されたような場合には、当然置換率は理論値より高い値を示すこととなるので、置換率が 1 より大きい場合にはその内容を十分検討することが重要である<sup>12)</sup>。

W. P. Hutny ら<sup>26)</sup>は 52 基の異なる高炉の操業結果を基に、石炭比 (CR: kg/thm)、送風温度 (BT: °C)、石炭中灰分 (ASH: %)、石炭/空気比 (Co/A: kg/m<sup>3</sup>) とコークス置換率 (RR) との関係の回帰分析を行い、次式†を導いた。

$$RR = 0.677 + 0.000943 CR + 0.000311 BT - 0.010905 ASH - 0.014862 Co/A$$

その結果、置換率を高めるためには①低揮発分炭 (高 C/H) (Fig. 14)、②高空気比 (酸素比) (Fig. 15)、③高送風温度が望ましいことを確認している。

† 式中の係数の有効桁数には問題があると考えるが、原著を尊重し、そのまま引用した。

加古川 No. 2 では微粉炭 128 kg/t·p に重油を加えて低コークス比操業を行った際の微粉炭+重油の置換率を発熱量をベースに検討している<sup>27)28)</sup>。Fig. 16 に示すよ

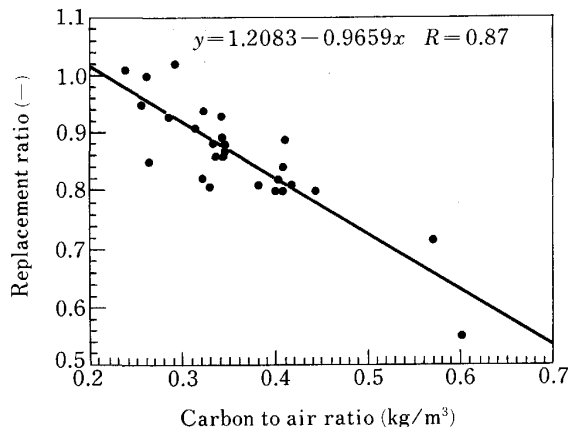


Fig. 15. Coke replacement ratio vs. the carbon-to-air ratio.

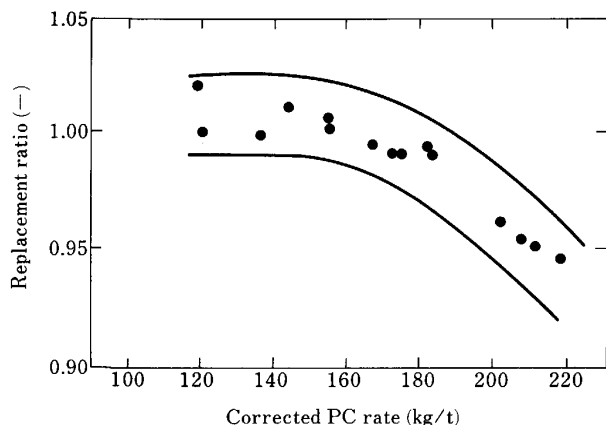


Fig. 16. Relationship between replacement ratio and corrected PC rate.

うに、重油を発熱量換算（微粉炭：7 400 kcal/kg, 重油：10 400 kcal/kg）した補正微粉炭比が 160 kg/t·p までの置換率はほぼ 1 であるが、それ以上の微粉炭比ではほぼ直線的に低下し、補正微粉炭比 220 kg/t·p では 0.94 となっている。この原因は高炉下部の炉壁からの熱損失をムーバブルアーマー操作と中心コークス装入により低いままに抑えることが出来たけれども、炉頂ガス温度の上昇によって高炉からの持ち去り熱が増大したことによると解析している。

#### 4. 代表的な微粉炭多量吹き込み高炉の操業状況

1990 年の統計では Fig. 17<sup>29)</sup> に示すように、世界で 84 基の高炉が微粉炭吹き込み操業を実施中であり、さらに 20 数基が吹き込み設備の建設を計画中である。

日本においては 1991 年 5 月現在 31 基の高炉が稼働しているが、その約 80% が微粉炭吹き込み装置を設備している。ヨーロッパにおいても微粉炭の多量吹き込みがなされており、Dunkerque, Arbed Belval, Hoogovens Ijmuiden, HFAS Uckange, Thyssen Hanborn & Schwelgern が特に積極的に吹き込み量の増大に挑戦している。また、BSC Scunthorpe では微粉炭ではなく -2 mm 粒子 98% の粉状石炭を大量に吹き込んでいる。Arbed Belval では、炭種拡大をねらいとして低灰分・高揮発分のリグナイト、高灰分・中揮発分の石炭、低揮発分・中灰分のリグナイト・コークス等の吹き込み試験が積極的に行われている。

次に、これら高炉のうち比較的高出鉄比を維持しつつ多量吹き込みを実施している主な高炉の操業概要を示す。

##### 1) Dunkerque No. 4 高炉<sup>21)</sup>

Dunkerque の高炉では、1983 年以来石炭吹き込みが開発されてきた。1985 年にすでに微粉炭 143 kg/thm,

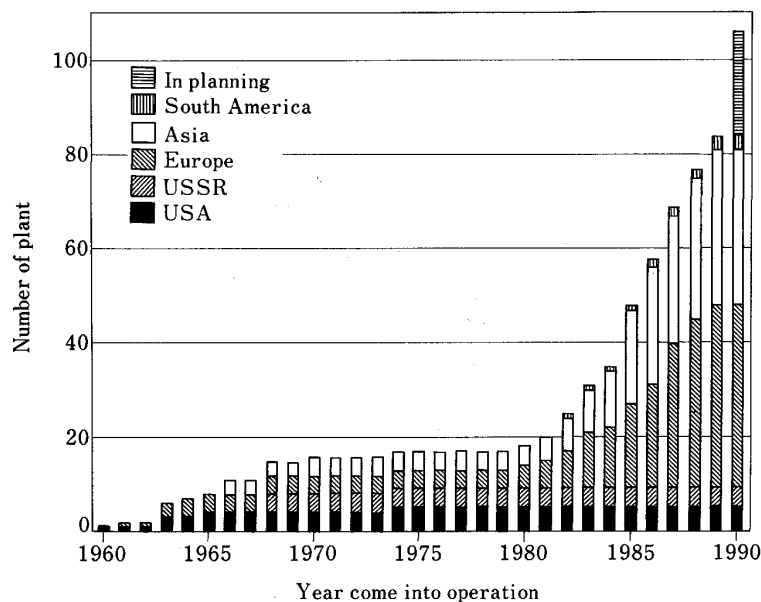


Fig. 17. Pulverized coal injection plants operated throughout the world.

塊コークス 313 kg/thm という当時最高の吹き込み率を実現していた。最近では IRSID との共同技術開発を積極的に進めており、1990 年 7 月には炉床径 14 m の No. 4 高炉で、微粉炭吹き込み 180 kg/thm、コークス比 295 kg/thm (大塊コークス比 270 kg/thm+小塊コークス比 25 kg/thm) を達成した (Table 2)。このレベルの操業はその後数か月継続された。

この場合の熱風の酸素含有量は 25% で、羽口先温度は 2050°C 以上に維持されていた。また、小塊コークス 25 kg/thm は焼結鉱と混合して装入された。操業は Si = 0.208,  $\sigma$ Si = 0.065 で、非常に安定しており、還元効率も優良であった。

2) Arbed Belval A 高炉<sup>12)30)</sup>

Arbed Belval A 高炉では Table 3 に示すように酸素富化なしで種々の炭材を吹き込み、いずれの石炭も十分使用可能であることを示した。装入物の降下状況はいずれの操業においても変わらず、オールコークス操業でみられたスリップや棚吊りは認められなくなっている。装入 S 量はオールコークス操業時に比してしばしば多く

Table 2. Industrial results in Dunkerque.

	May	June	July	August	September
Production (t/24h)	8 716	8 669	8 814	8 476	8 683
Productivity (t/m <sup>3</sup> /day)	1.9	1.9	2	1.9	1.9
<b>Fuel rate</b>					
Coke rate (kg/thm)	294	286	270	272	274
Small coke (10-25 mm)	23	24	26	26	26
Coal (kg/thm)	156	167	180	170	178
Total fuel rate (kg/thm)	447	449	445	449	447
<b>Blast</b>					
Volume (m <sup>3</sup> N/h)	356 350	355 223	356 785	346 931	351 239
Temperature (°C)	1 188	1 187	1 193	1 190	1 194
Pressure (bar)	3.21	3.23	3.28	3.24	3.32
Moisture (g/m <sup>3</sup> N)	9.67	11.14	11.57	15.29	11.42
O <sub>2</sub> (%)	21.97	22.42	22.48	22.41	22.61
Flame temperature (°C)	2 090	2 061	2 071	2 098	2 073
<b>Top gas</b>					
Temperature (°C)	168	180	185	197	184
Eta CO	0.515	0.513	0.51	0.506	0.509
Omega (at O/kat Fe)	-5	-3	-3	1	1
Pressure (bar)	1.98	1.99	2	1.96	1.96

なったにもかかわらず、吹き込み時の銑鉄中 S はむしろ若干低下していると報告されている。また、置換率は、リグナイトで 0.54、石炭で 0.7~0.8、リグナイト・コーク

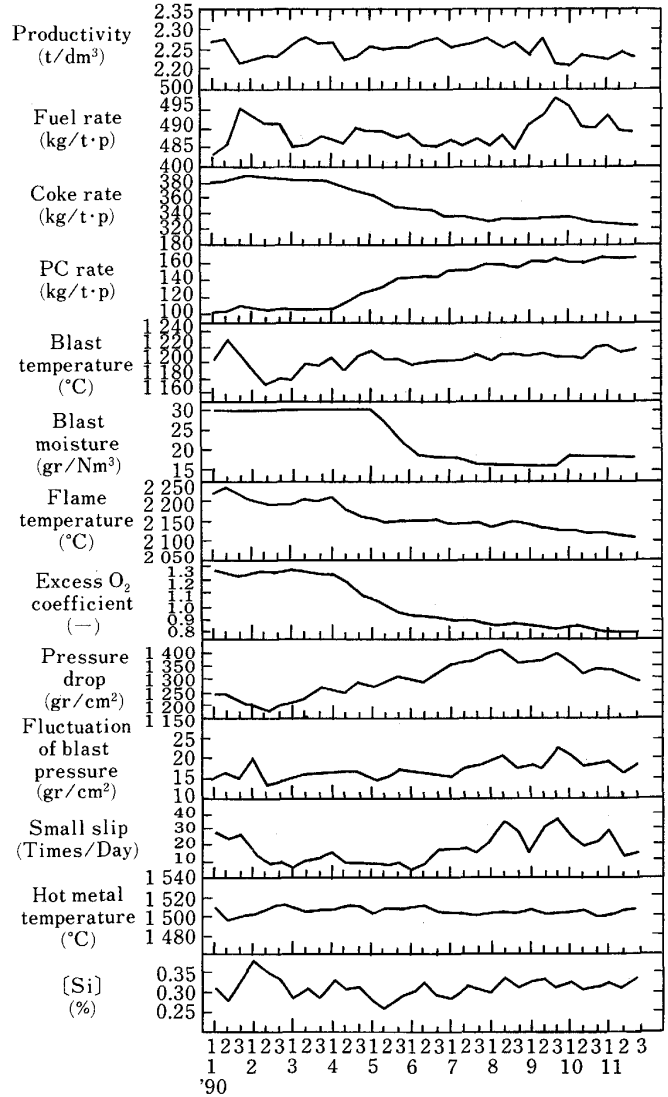


Fig. 18. Operation results of Kobe No. 3 blast furnace.

Table 3. Operation results of Arbed Belval A-blast furnace with different coals.

	Lignite	Hard coal I	Hard coal II	Hard coal III	Lignite coke
Coke rate (kg/t)	500	515	516	495	467
Auxiliary fuel (kg/t)	83	69	62	82	84
Replacement ratio (kg drycoke/kgPC)	0.54	0.81	0.70	0.70	0.84
Moisture in blast (g/Nm <sup>3</sup> )	10	8	9	5	
Temperature blast (°C)	1078	1054	1054	1044	1041
Topgas temperature (°C)					
Production (t/24 h)	87.8×24	82.3×24	80.2×24	77.5×24	85.2×24
Hot metal Si (%)	0.54	0.74	0.62	0.65	0.60
Hot metal T (°C)	1459	1472	1471	1474	1476
Sinter in burden (%)	69	96	88	89	88
Pellets in burden (%)	9				
Slag volume (kg/t)	563	662	629	613	574
Coke ash (%)	8.8	8.6	8.6	8.9	8.9
Coal ash (%)	4.5	13	16.8-17.4	18.2	8.9



クスで 0.84 であった。

### 3) 神戸 No. 3 高炉

神戸 No. 3 高炉 (内容積 1843 m<sup>3</sup>) は微粉炭比 100 kg/t·p 台の操業を 42 か月間継続した後、1990 年 4 月に微粉炭吹き込み設備を増強し 1990 年 11 月には 162 kg/t·p の吹き込み量を達成した。

Fig. 18 は 1990 年 1 月から 11 月までの操業推移である。微粉炭比の増加に際しては、①圧損上昇を抑制する目的から吹き込みランス位置を炉内側へ変更し、②低圧損型で炉体放散熱を低減できる装入物分布を指向した。さらに③酸素富化率は一定にしている。

微粉炭比増加の当初は、圧力損失の増大はあるものの炉況を安定に維持でき、1990 年 6 月には月間平均で微粉炭比 140 kg/t·p を達成した。しかし、その後小スリップ回数の増加、圧力損失の増加および送風圧力変動の増大が顕著となり、棚吊りが発生して一時的に炉況が悪化した。装入物分布を調整し、周辺ガス流を抑制することによって炉況を改善している。その結果、11 月には微粉炭比 162 kg/t·p まで増大させることが出来た。さらに、1991 年 6 月以降は出銑比 2.2~2.3 t/dm<sup>3</sup> を確保しながら 180 kg/t·p 以上を安定して吹き込んでいる<sup>31)</sup>。

Table 4. Operational data of "Blast furnace Schwelgern".

	Without coal 1986	Test-period 87.5-8	High inject. rate 88.6-11	Ultra high inject. rate 90.2
Coal (kg/thm)	—	106	149	173
Coke (kg/thm)	482	376	334	305
Total fuel (kg/thm)	482	482	483	478
Productivity (t/24 h·m <sup>2</sup> )*	59.4	59.2	61.1	58.8
Blast temp. (°C)	1129	1141	1159	1177
Humidity (g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> )	30	16	10	6
Oxygen (%)	21.0	21.0	22.4	22.4
Gas utilization (%)	49.2	50.6	51.0	48.2
HM-temp. (°C)	1487	1475	1478	1482
Si-content (%)	0.24	0.27	0.28	0.33

\* Confirmed that the unit of productivity is not t/24 h·m<sup>2</sup> but t/24 h·m<sup>2</sup>

Table 5. Operation results of Scunthorpe's blast furnaces.

	Queen Victoria May 1985	Queen Anne March 1986
Coke rate (kg/t)	459	411
Auxiliary fuel (kg/t)	(granular coal) 49	(granular coal) 97
CO utilisation top (%)	50.3	49.1
Blast oxygen (%)	22.81	24.16
Blast moisture (g/Nm <sup>3</sup> )	27.1	12.3
Blast temperature (°C)	980	942
Topgas temperature (°C)	131	184
Production (t/24 h)	3200	3430
Hot metal Si (%)	0.54	0.77
Hot metal T (°C)	1495	1488
Sinter in burden (%)	65	45
Pellets in burden (%)	35	51
Coke ash (%)	11.3	10.2
Coal ash (%)	6.5	6.2

この微粉炭比増加の過程で 1990 年 12 月から O<sub>2</sub> 富化率を 1.8% から段階的に 3.1% まで増加させている。この結果、炉内圧力損失は微粉炭比 160 kg/t·p 時とほぼ同じレベルで推移した。

### 4) Thyssen Schwelgern No. 1 高炉<sup>4)</sup>

Thyssen Stahl AG では 1985 年以來 Hamborn No. 4, Schwelgern No. 1, Ruhrort No. 6 高炉での吹き込み操業を精力的に実施してきている。Table 4 に Schwelgern 高炉の操業状況を示す。微粉炭吹き込み操業では、微粉炭の燃焼によるガス量の増加にともなって羽口先ガス速度が増加することを極力抑制するために羽口径を 125 mmφ から 140 mmφ に変更している。また、この高炉では 1990 年末までに 170 kg/t·p の吹き込みを実施しているが、装入時のコークス層厚は 70 cm 一定のままである<sup>6)</sup>。

### 5) BSC Scunthorpe 高炉

1982 年に開始した Simon-Macawber の吹き込み装置でのテストを経て技術を確立した。Scunthorpe の高炉で吹き込む石炭粒度は -2 mm 粒 98% (-63 μm 粒 20% 以下) である。粉粒炭吹き込みの最大のメリットは水分の乾燥費用が節約できることで、実際に 1~6% 水分で吹き込まれている。また、粗い石炭粒子はレースウェイ内の滞留時間 5~10 ms 内で急速に分解すると考えられている。操業結果は Table 5 に示す通りであるが、これまでの最大吹き込み量は 117 kg/t·p である。各高炉の全体の通気性はほとんど一定のままであったが、多量吹き込み時にはシャフト部の通気性がわずかに低下し、ボッシュ部の通気性が若干向上した。

## 5. 微粉炭吹き込みの将来への発展

### 5.1 高炉への吹き込み量の増加

現在微粉炭吹き込み量の増大に最も熱心なのは日本とヨーロッパであるが、その当面の吹き込み量の目標は 250 kg/t·p に置かれている。ここに至るまでのハードルのひとつが吹き込み量 200 kg/t·p を越えることにある。この目標にむかって実験室的検討に加え、試験操業がなされているが、未だ長時間の安定吹き込み実績は報告されていない。

K. H. Peters ら<sup>26)</sup>は吹き込み量を 200 kg/thm 以上に増大させたときの高炉内の問題点を Fig. 19 の様に総括した。①微粉炭の燃焼率をさらに高める。このために、個々の石炭粒子への酸素供給量を増加すると共に、燃焼を助長するための添加剤 (例えば CaCO<sub>3</sub> やリグナイト) を微粉炭に混合する。②コークス層厚が減少した場合の軟化融着帯の通気性を確保するために、鉍石類の被還元性を高めて高温で軟化を開始させ軟化~溶融領域を狭くする。③高炉下部では強度の高いコークスによって通気・通液性を確保すること。

また、フランスの高炉では微粉炭とコークス炉ガスを

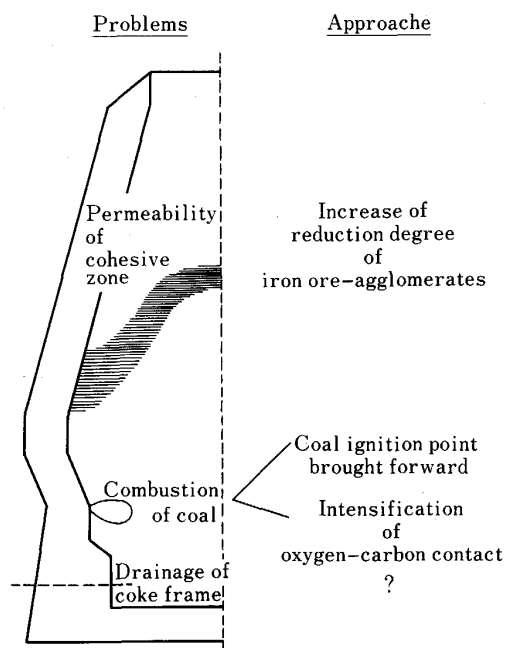


Fig. 19. Limits of coal injection.

同時に吹き込むことによって、石炭吹き込み量をさらに増大できること、また、コークス比は 270 kg/t·p まで低下できるという操業結果を得ているとの情報がある<sup>21)</sup>が、操業結果の詳細は明かではない。

このコークス炉ガスの混合により微粉炭の燃焼性が改善される理由はコークス炉ガスが①急速に燃焼温度に達して急激に燃焼するため、②微粉炭の分解と燃焼を促進することによると考えられている<sup>32)</sup>。

### 5.2 微粉炭吹き込みを活用した新しい製鉄技術

微粉炭を大量に吹き込むための根本的解決法のひとつは、微粉炭の反応温度を高めることである。既存の熱風炉では 1250°C 以上の熱風を安定して供給することが難しいために、その方策として多量の酸素の使用とプラズマの活用が検討されている<sup>33)34)</sup>。特にプラズマを利用した方法は電力コストの安いフランスを中心に熱心に研究されている。

#### 1) 酸素使用による微粉炭多量吹き込み

ソ連では熱風中酸素濃度を 35% にまで高めた操業を行い、理論解析の結果、酸素 334 Nm<sup>3</sup>/thm で微粉炭吹き込み量 486 kg/thm が可能であり、この場合のコークス比は 109 kg/thm となることを示した<sup>35)</sup>。

British Steel は Teesside の試験高炉 (装入量 20 kg/h) で微粉炭を酸素と同時に吹き込み、コークス比 150 kg/thm の操業を試みている<sup>35)</sup>。また、NKK は酸素高炉用に開発した酸素-微粉炭同時吹き込みバーナーを扇島 No. 2 高炉の羽口 1 本に適用して 2.5 か月操業した<sup>36)</sup>。この操業では微粉炭吹き込み量 3500 kg/h で、酸素濃度を段階的に 85% まで高めた。その結果、このバーナーの摩耗は極めて少なく寿命は 5 か月と評価さ

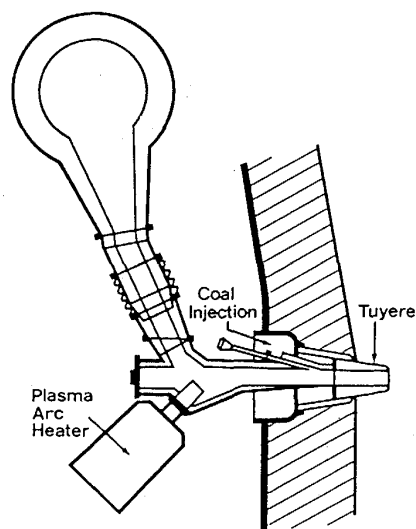


Fig. 20. Plasma assisted coal injection.

れた。

British Steel の Scunthorpe 高炉 (炉床径 8.9 m) では酸素吹き込みと共に 300 kg/thm 相当の石炭吹き込み試験を 1 本羽口で実施したのち、26 本羽口の内 12 本に 220 kg/thm 相当の吹き込みを数週間継続した<sup>35)37)</sup>。

また、British Steel/Hoogovens/Italsider の共同プロジェクトでは 50% 酸素と石炭 400 kg/thm を同時に吹き込む 1000 t/d の鋳物鋅溶鋳炉の開発を計画している<sup>35)37)</sup>。

#### 2) プラズマを活用した多量吹き込み

CRM はプラズマを活用した PIROGAS プロセスを開発し、炉床径 0.5 m の小型試験高炉で試験を実施した。この結果、コークス比は 105 kg/thm であった<sup>35)</sup>。また、CRM と IRSID は共同して Uckange の鋳物鋅高炉の 14 本羽口の内 6 本にそれぞれ 1.6 MW のプラズマ・バーナーを Fig. 20 のように設備し、微粉炭吹き込み量を 80~100 kg/thm から 200 kg/thm へ高めることを計画した。この操業では送風温度は 1180°C から 1750°C へ高められ、プラズマ羽口では 160 kg/thm の石炭吹き込みがなされている<sup>37)</sup>。

## 6. 結 言

最初のアイデアから 150 年を経て、高炉への微粉炭吹き込み技術は世界的にようやく本格的な開花の時期を迎えようとしている。概略的な把握では微粉炭の 100 kg/t·p 程度の吹き込みは、従来の高炉操業技術を大きく変更することなく達成されている。しかし、180~200 kg/t·p の吹き込みは装入物分布を初めとするきめ細かな技術的検討に成功したいくつかの高炉で十分達成可能であることが示されている。さらに、250~300 kg/t·p の吹き込み技術は最新の技術的ブレークスルーなくしては成し得ないようである。この場合、高炉技術者は未だ

十分解明されていない高炉下部の状況を変更させねばならないこともありうる<sup>38)</sup>。

本稿では、あくまでも高炉への微粉炭吹き込み技術開発の現状に重点を置き、コークスを必要としない溶融還元製鉄法などの新しい製鉄技術は除外した。高炉技術にたずさわる者として、溶融還元の助けを借りることなく、高炉の長所を最大限に活かした新技術の開発こそが来世紀においてなお高炉製鉄を製鉄法の主流としうるものであると確信している。

## 文 献

- 1) G. Trömel and W. Zishkale: *Metallurgie des Eisens* Band 3, 277a [GMELIN-DURRER]
- 2) D. S. Gathergood and G. Cooper: *Steel Technology International* (1988), p. 83
- 3) 妹尾義和, 丸島弘也, 国分春生, 武田幹治, 田口整司: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 92
- 4) K. H. Peters, M. Peters, B. Korthas, K. Mülheims and K. Kreibich: *Proceedings of the 6th Inter. Iron Steel Cong., Nagoya* (1990), p. 492
- 5) W. Koen, R. B. Vogel, H. L. Toxopeus and G. A. Flierman: *Iron Steelmaking* (1986) Jan., p. 29
- 6) K. H. Peters, E. Beppler, B. Korthas and M. Peters: *2nd European Ironmaking Cong. Proceedings* (1991), p. 247
- 7) J. H. Strassburger: *Blast Furnace & Steel Plant* (1963) June, p. 447
- 8) 田村健二, 上野浩光, 林 洋一, 田中繁三: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 67
- 9) 出口幹郎, 柴田耕一朗, 福岡正能: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1045
- 10) K. Tamura, H. Ueno, K. Yamaguchi, M. Sugata, S. Amano and K. Yamaguchi: *Proceedings of the 6th Inter. Iron Steel Cong., Nagoya* (1990), p. 476
- 11) L. V. Bogdandy and H.-J. Engell: *Die Reduktion der Eisenerze* (1971)
- 12) M. Guili, G. Hanniker, J. Koster, K. Kreibich, J. M. van Langen, Y. de Lassat de Pressigny and A. Poos: *European Ironmaking Cong. Proceedings, Aachen, Vol. 2-IV* (1986)
- 13) 出口幹郎, 柴田耕一朗, 福岡正能: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 49
- 14) Y. de Lassat, G. Prado and O. Simonin: *49th Ironmaking Conf. Proceedings, AIME* (1990), p. 473
- 15) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅, 小松周作, 紫富田浩, 網永洋一: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 84
- 16) 森岡耕一, 杉山 健, 稲葉晋一: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1048
- 17) 岩永祐治, 高田幸司: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 64
- 18) 木村吉雄, 柴田耕一朗, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 140
- 19) 堀尾正毅, 浜中光治, 伊東 宏: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1069
- 20) 大鈴克二, 北山修二, 矢場田武, 清水正賢, 野間文雄: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 100
- 21) F. グラフィユ, N. ジュッソー, F. モセール, R. ニコル: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 96
- 22) 木村吉雄, 清水正賢, 稲葉晋一: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 80
- 23) M. Ohgami, H. Sugawara, M. Yamazaki and S. Tamura: *Proceedings of the 6th Inter. Iron Steel Cong., Nagoya* (1990), p. 484
- 24) F. Graffeuille, R. Capelani, Ph. Delabre, J. L. Bouttement, D. Pair and J. M. Libralesso: *Journées Siderurgiques ATS, Paris* (1990), Session 3 (7)
- 25) 中島龍一, 岸本純幸, 山口 篤, 平岡英伸: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 66
- 26) W. P. Hutny and J. T. Price: *Iron Steelmaking* (1989) Sep., p. 38
- 27) 小野玲児, 牧 剛司, 松井良行, 宮谷仁史, 堀 隆一, 矢場田武: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1016
- 28) T. Goto, R. Hori, K. Kuwano, T. Yabata, H. Miyatani and R. Ono: *Journées Siderurgiques ATS, Paris* (1990), Session 3 (7)
- 29) H. W. Gudenau, B. Korthas, R. Kiesler and L. Birkhäuser: *Stahl Eisen*, **110** (1990) 11, p. 35
- 30) J. Koster and R. Limpach: *Ironmaking Steelmaking*, **10** (1983) 3, p. 104
- 31) 日本鉄鋼協会共同研究会第 79 回製鉄部会提出資料 鉄 79-11-自
- 32) T. Suzuki, T. Uehara and H. Akedo: *49th Ironmaking Conf. Proceedings, AIME* (1990)
- 33) A. Poos: *Proceedings of the 6th Inter. Iron Steel Cong., Nagoya* (1990), p. 395
- 34) A. Poos and N. Ponghis: *49th Ironmaking Conf. Proceedings, AIME* (1990), p. 443
- 35) D. S. Gathergood: *Technical Update*, p. 47 [British Steel Technical-British Steel plc]
- 36) T. Furukawa, H. Mitsufuji, M. Matsuura and Y. Ohno: *Rev. de Metallurgie-CIT* (1990) Juin, p. 549
- 37) D. S. Gathergood: *Applied Energy Research Conf., Swansea* (1989 年 9 月), Session I
- 38) "Coal Injection: A Bright Future" at 39th Canadian Conf. on Coal (1991 年 9 月)
- 39) 山口一良, 上野浩光, 田村健二, 中山正章, 松井 章: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 88