

(解説)

# 高炉への微粉炭吹き込み技術の進歩

伊藤良二\*・吉田康夫\*・星野剛一\*\*・野間文雄\*\*\*・鈴木富雄(工博)\*\*\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・製鉄部 \*\*鉄鋼部門・神戸製鉄所・製鉄・製鋼部 \*\*\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター  
\*\*\*\*都市環境・エンジニアリングカンパニー・開発部

## Blast Furnace High Pulverized Coal Rate Injection at Kobe Steel

Ryoji Ito・Yasuo Yoshida・Koichi Hoshino・Fumio Noma・Dr. Tomio Suzuki

The theory and methods required to achieve high PC rates injection in blast furnaces are described. The paper begins with historical developments of burden distribution control with center coke charging to achieve stable cohesive zone shaping, and then discusses double-lance raceway combustion techniques for complex blasts combining coal and oxygen. Following these techniques improved furnace performance for start-up coal injection after blow-in is shown to be progressive and highly advantageous. The paper ends with a discussion of the future of blast furnace technology.

まえがき = 近年、高炉操業においては、安価な補助燃料として、微粉炭（以下 PC と略す）の吹き込みが注目されている。PC 吹き込み操業は、1970 年代の石油危機を契機とした石油価格の高騰と供給不安による脱石油対策として導入された。その後、PC 吹き込みは急速に普及し、現在わが国で稼働している 31 基の高炉すべてで実施されている。

当社は、コークス炉能力不足の解消およびエネルギーコストの低減を目的として、1983 年にいち早く PC 吹き込み操業を導入するとともに、PC 多量吹き込みに常に先駆的役割を担って挑戦してきた<sup>1)2)</sup>。また、1998 年 3 月には、加古川 1 高炉において、月間 PC 比 254kg/thm<sup>注</sup>の当時の世界記録を達成している。本稿では、当社における高炉 PC 吹き込みに関する要素技術の開発および高炉操業技術の開発状況について紹介する。

### 1. 高炉 PC 吹き込み設備

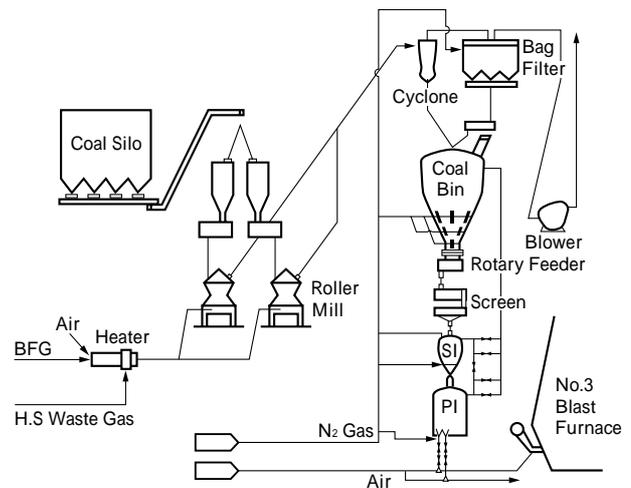
実高炉へ PC 吹き込み技術を適用するにあたっては、原炭や PC の流動性、燃焼性、発火・爆発性などの基本特性を見極めたいうで、対応技術を付与することに加え、高炉の機能を十分に発揮させることが不可欠である。

当社では石炭の受入れから羽口への吹き込みに至るプロセスすべてについての要素技術を開発し、当社独自の KOBELCO PCI SYSTEM を構築した<sup>3)</sup>。

神戸製鉄所と加古川製鉄所に導入された PC 吹き込み設備は基本的には同じものであるため、ここでは、神戸 3 高炉の PC 吹き込み設備フローを第 1 図に示し、その概要を説明する。

貯蔵サイロから定量切出しされた原炭は、ローラミルに供給され、PC に粉砕、乾燥される。その後、バグフィルタに捕集される。粉砕から捕集までのプロセスは系内負圧方式であるため、防爆の観点から系内への大気流入を防ぐため、要所にシール強化が施されている。

次に、PC はコールビンにいったん貯留された後、ストレージインジェクタとプライマリインジェクタに移送され、高炉に吹き込まれる。各羽口ごとの PC 吹き込み量  
脚注) 鉄鉄 1 トンあたりの微粉炭吹き込み量

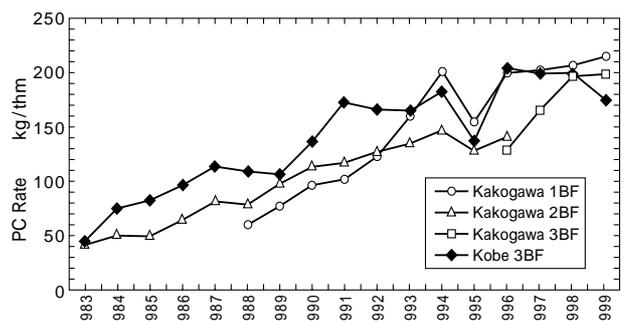


第 1 図 神戸 3 号高炉の PC 吹き込み設備フロー  
Fig. 1 Schematic diagram of PCI on Kobe No.3 blast furnace

は、吹き込みエア量によって調整可能であり、その均等分配精度は ±3% 以内である。

### 2. 高炉 PC 吹き込み操業技術の開発

第 2 図に 1983 年以降の当社各高炉における年間 PC 比の推移を示す。1983 年にまず加古川 2 高炉および神戸 3 高炉において PC 吹き込み操業を開始した<sup>4)</sup>。当初は、経験のある重油吹き込み操業を踏襲するとともに、初めて取扱う PC に対するハンドリング技術、重油にくらべて劣る燃焼性<sup>5)</sup>を確保することに注力した。その結果、約



第 2 図 当社における PC 比の推移  
Fig. 2 Transition of PC rate on Kobe Steel

6年で設備能力の100kg/thmレベルの操業に到達した。

また、炉内に装入する鉱石量とコークス量の比（以下O/Cと略す）の増加とともに、炉中心部のO/C増加が顕著となり、炉況悪化傾向が見られた。この炉中心部のO/C制御手段としてコークス中心装入法<sup>6)</sup>を開発し、PC増量に大きく寄与した。

1990年以降は、PC比100kg/thmレベルでの安定操業を継続しつつ、設備増強を実施した。設備増強後の目標をPC比200kg/thmと設定したが、PC増量とともに熱負荷が増大したため、装入物分布制御技術の開発を優先した。この開発により1994年には、年間PC比200kg/thm以上を達成した<sup>7)</sup>。その後は、PC比200kg/thm以上の安定操業を継続しつつ、PC比の上限にトライして現在に至っている。以下に高炉PC吹込み操業に関する特徴的な技術について説明する。

### 2.1 コークス中心装入法の開発

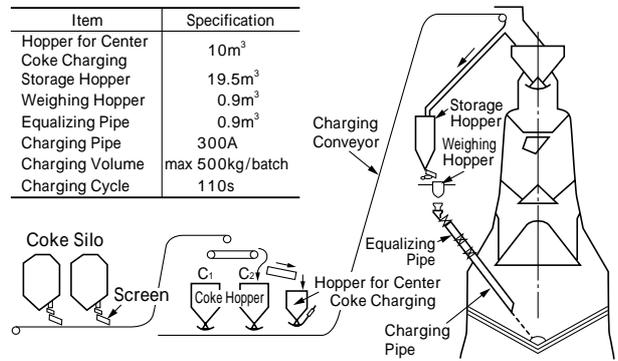
PC吹込み操業時にはO/Cが増加するためとくに炉中心部のO/Cが増加しやすい傾向にある。さらに、ペレット使用比率の高い加古川製鉄所では炉中心部のガス流れが障害され、安定操業の維持が困難なときがあったため中心ガス流れの確保を緊急課題として取上げた。

一般に、高炉の安定操業を継続させるためには、逆V型の融着帯を形成させることが必要であり、炉中心部のO/Cを低く抑えてガス流れを発達させ、炉中心部の温度を他の領域より高く維持する必要がある。そこで、炉内に装入するコークスの一部を炉口中心部に装入（コークス中心装入<sup>6)</sup>）して中心領域のO/Cを局所的に低下させ、融着帯の形状を制御する方法を開発した。

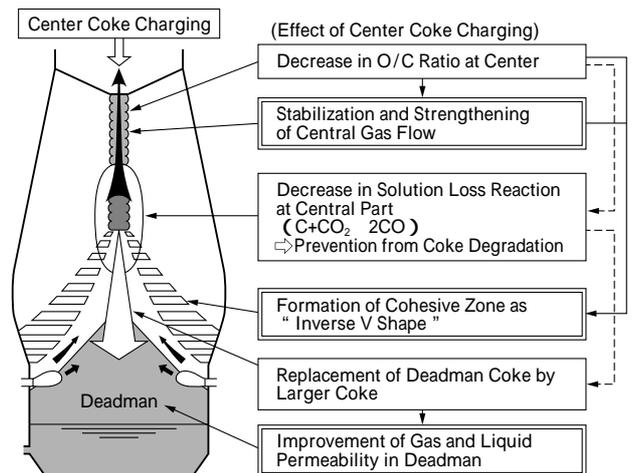
第3図に加古川2高炉に導入したコークス中心装入システムを示す。中心装入用コークスは、炉頂部へ通じるチャージングコンベア先端からバイパスさせ、いったんストレージホッパに蓄えた後、必要量が装入用パイプから炉中心部へ装入される。本システムの採用による高炉プロセス変化を第4図に示す。通常、炉内に装入されたコークスはその降下過程で鉱石の還元反応によって生じたCO<sub>2</sub>ガスによりソリューションロス反応を受け、多量の粉を発生する。この発生粉により通気性・通液性が悪化し炉況悪化状態に陥る。しかしながら、コークス中心装入によって炉中心部の鉱石量を減少させた場合には、炉中心部でのCO<sub>2</sub>ガスの発生が減少し、ソリューションロス反応が抑制され、発生粉の少ない健全な炉芯が形成される。この結果、炉況が安定化されるものと考えられる。この技術を背景に、従来にくらべて有利な条件でPC比の増量が可能となった。

### 2.2 PC多量吹込み操業時の装入物分布制御

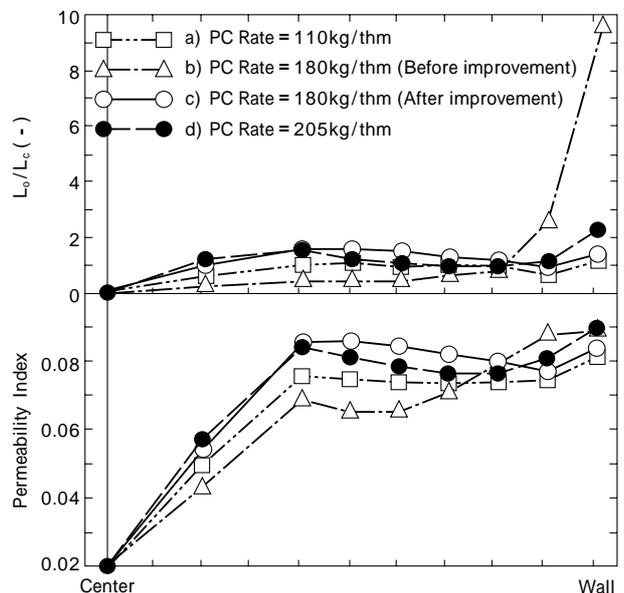
PC多量吹込み操業では、圧力損失の増加や熱負荷の増大といった炉況不安定を回避するため、最適な装入物分布に制御する必要がある<sup>7)</sup>。第5図は、加古川1高炉の炉口径方向での鉱石層厚L<sub>o</sub>とコークス層厚L<sub>c</sub>の比（以下L<sub>o</sub>/L<sub>c</sub>と略す）と通気抵抗指数の分布を示したものである。PC増量に対しては、炉下部での周辺ガス流を抑制するうえで周辺O/Cを高めることが有効であるが、周辺部のO/Cを高め過ぎた場合、中間部のO/Cが相対



第3図 加古川2高炉のコークス中心装入システム  
Fig. 3 Center coke charging system at Kakogawa No.2 BF



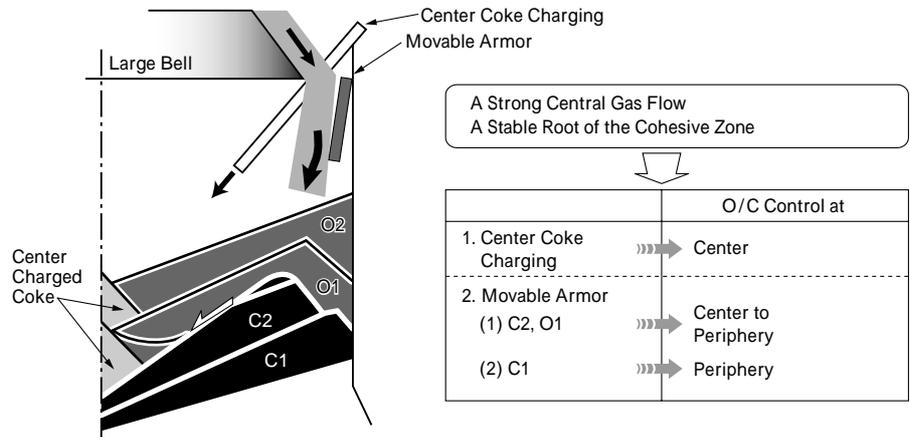
第4図 コークス中心装入による高炉内プロセスの制御  
Fig. 4 Control of in-furnace process by using center coke charging method



第5図 径方向L<sub>o</sub>/L<sub>c</sub>分布と通気抵抗指数  
Fig. 5 Relationship between L<sub>o</sub>/L<sub>c</sub> and permeability index in radius distribution

的に低くなり（第5図中のb））、圧力損失の増加や炉下部熱負荷の増大といった悪化状態を示す。したがって、局所的な高O/C域をつくらないように周辺部だけでなく、中間から周辺部にかけてのO/C分布に留意する必要がある。

第6図 高炉装入物分布制御の概要 (加古川)  
 Fig. 6 Philosophy of burden distribution control on Kakogawa Works



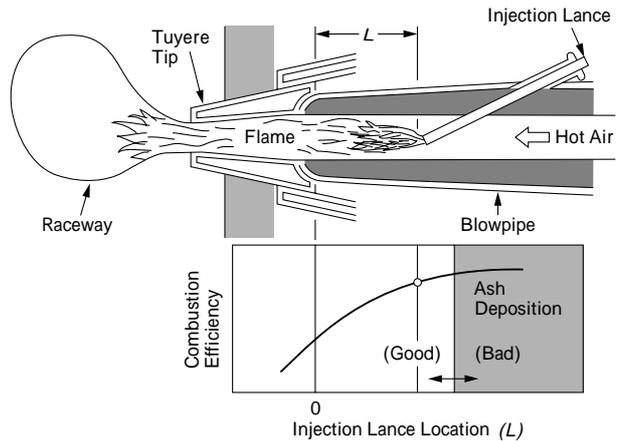
PC 多量吹込み操業に対応した装入物分布制御の基本的な考え方を第6図に整理した。従来、周辺ガス流はC2アーマを押し出し、周辺部 $L_0/L_c$ を高めることで制御できたが、C2堆積層の稜線(ピーク)での低O/C域を形成する。これを防止するためにO1アーマを押し出し、C2およびO1の組合せによってコークス削り取り量を調整することで、中間から周辺部にかけてのO/C分布が制御できる。その結果、炉況の安定がえられ、PC200kg/thm以上の安定維持が可能となった。周辺部 $L_0/L_c$ に対するC2アーマの制御性は、周辺のC2層厚がなくなり、C1層が露出する時点でなくなる。後述のPC比250kg/thm試験操業では主に、C1アーマでの直接制御を採用した。

2.3 PCの燃焼性制御

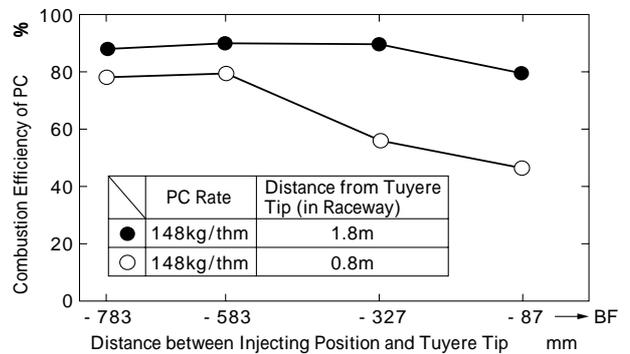
当初、高炉PC吹込みの場合は、重油吹込みにくらべて燃焼率が低下することが懸念された。そこで、燃焼実験および理論解析により、PCの燃焼特性を解明するとともに、PC最適吹込み技術の確立のために、PC吹込み位置と燃焼率および灰分付着の関係を調査した<sup>8)~10)</sup>。その実験結果の一例を第7図に示す。PC吹込み位置を炉外側へ移動するほど、すなわち $L$ を大きくするほど燃焼率は向上する。しかし、 $L$ を過大にするとブローパイプや羽口内面に灰分が付着して高炉操業に支障をきたすことが確認された。したがって、灰分の付着しない燃焼性の良好な吹込み位置を把握し、ランス設計にその結果を反映させた。つまり、PC吹込み開始当初は、羽口部で重油と同等のPC燃焼率を確保することが重要であると考えていた。

しかし、その後の操業結果よりPC燃焼にともなう羽口部圧力損失の増加が顕在化してきた。燃焼炉において、羽口先端からレースウェイ方向0.8mおよび1.8mの位置におけるPC燃焼率を第8図に示す。羽口先端から1.8m(レースウェイ端)でのPC燃焼率は、PC吹込み位置の影響は少ない。したがって、PC吹込み位置を極力炉内側へもってこることによって羽口内燃焼にともなう圧力損失を低減することが有効であるとの結論をえた。

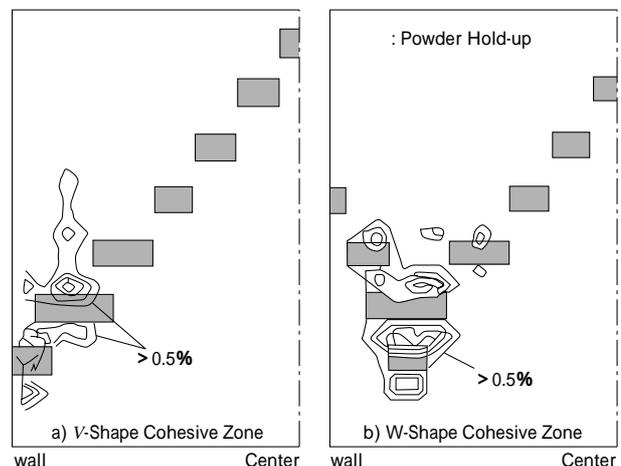
いっぽう、PC量の増加にともない、未燃焼PC(以下、UPCと略す)の発生が懸念される。UPCの炉内挙動について、充てん層内固気2層流の数学モデル<sup>11)</sup>をもちいた計算結果を第9図に示す。UPC高濃度領域は融



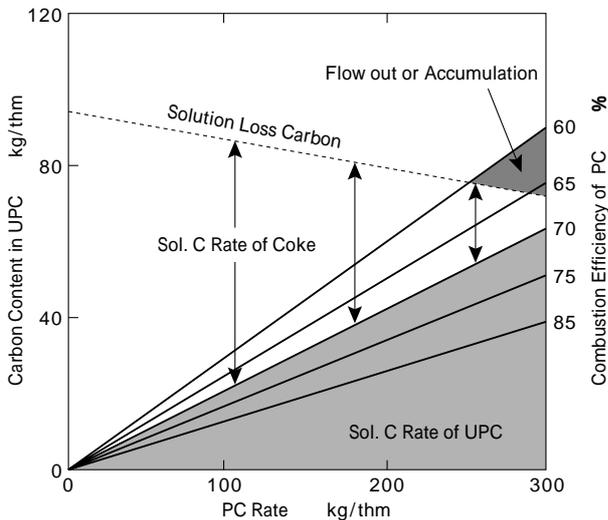
第7図 PC燃焼率と灰分付着に及ぼすランス位置の影響  
 Fig. 7 Effect of lance location on combustion efficiency and ash deposition



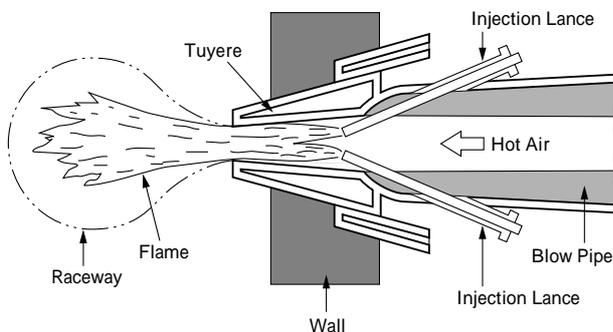
第8図 PC燃焼率と吹込み位置の関係  
 Fig. 8 Relationship between combustion efficiency and injection position



第9図 高炉内における粉体の滞留量分布  
 Fig. 9 Distribution of powder hold-up in blast furnace



第10図 未燃PCのソリューションロス反応による炉内消費バランス  
 Fig. 10 Mass balance of carbon consumed by solution loss carbon reaction



第11図 ダブルランス概略図  
 Fig. 11 Schematic diagram of double lances

着帯最下端で高く、融着帯がW型を呈する場合(第9図b))には炉壁から離れた場所に形成されるため、周辺ガス流はより助長される。したがって、炉内でのUPC滞留量の管理が重要である。

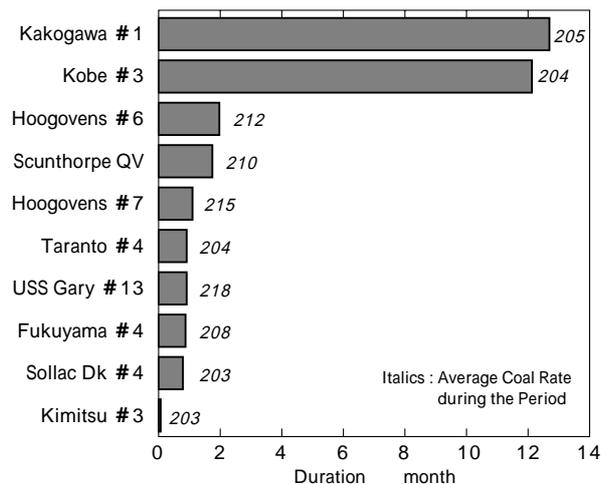
以上より融着帯近傍に蓄積すると推定されたUPCは、CO<sub>2</sub>ガスとの反応により、コークスよりも速く消費されることが知られている。そこでPCの燃焼率をパラメータとして炉内に流入するUPCに含まれる炭素量を第10図に示す。PC比の増大とともにソリューションロス反応量は減少し、いっぽうでUPCは増大していく。したがって、両者を考慮してPC燃焼率を設定すること

が重要である<sup>12)</sup>。

とくに、PC比200kg/thm以上の作業時においては、レースウェイ内燃焼においても酸素拡散律速であるためPC燃焼率は低下する。これに対してPC燃焼率制御手段としてダブルランス方式<sup>13)</sup>を開発した。これは、一つの羽口にPCランスを2本配置するものであり、概略図を第11図に示す。従来のシングルランス方式との燃焼シミュレーションによる燃焼率比較を第12図に示す。ダブルランス方式の採用によってレースウェイ内でのPCの分散が強化され、衝風との接触が良好となり、燃焼速度が向上することが確認され、PC多量吹き込みランスとして実機に採用した。

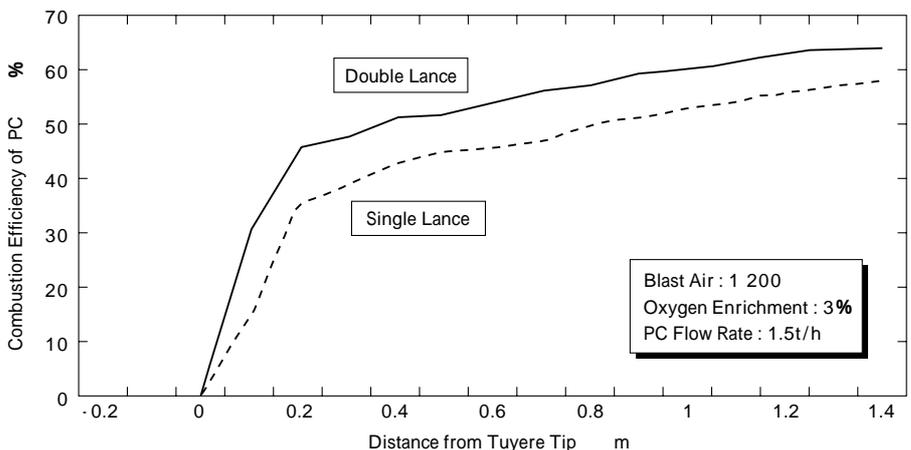
### 3. 長期PC吹き込み作業実績

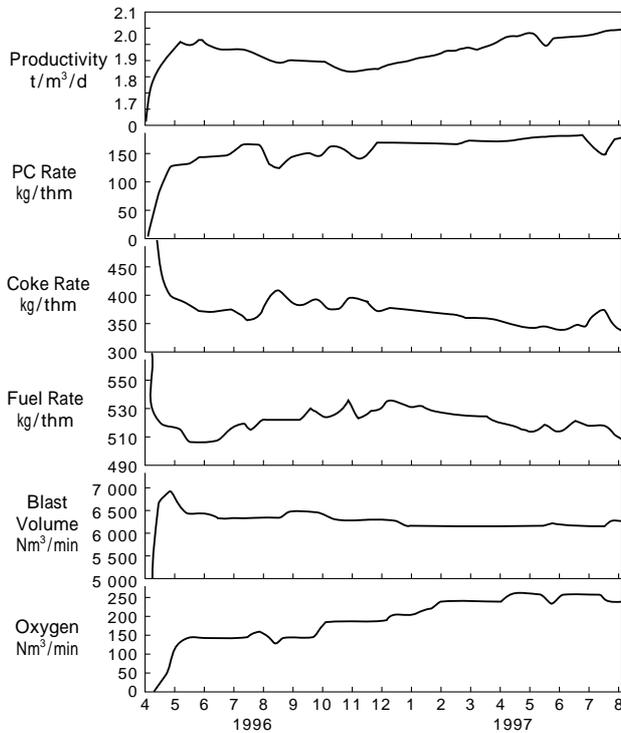
前述したように、当社では、PC比200kg/thmレベルでの安定作業技術を確立した。高PC比作業を安定して継続するためには、装入物分布制御の精度向上をはじめ衝風条件の最適化・炉内残鉄滓管理強化など高炉作業全般にわたっての技術開発が必要である。当社は、着実にこれら技術開発を推進してきた。第13図には、1994年当時に高炉ごとの200kg/thm以上のPC比を継続した月数が比較されている<sup>14)</sup>。加古川、神戸製鉄所の高炉は、1年程度の継続実績があり、世界においても他社を凌駕



第13図 PC比200kg/thm以上の継続期間比較  
 Fig. 13 Duration of long term continuous operation at coal rate in excess of 200kg/thm

第12図 レースウェイ内PC燃焼率に及ぼすダブルランスの効果  
 Fig. 12 The effect of double injection on PC combustion rate in raceway by simulation model





第14図 加古川3高炉火入れ後の操業推移  
Fig. 14 Operational results of Kakogawa No.3 BF after blow-in

した記録である。

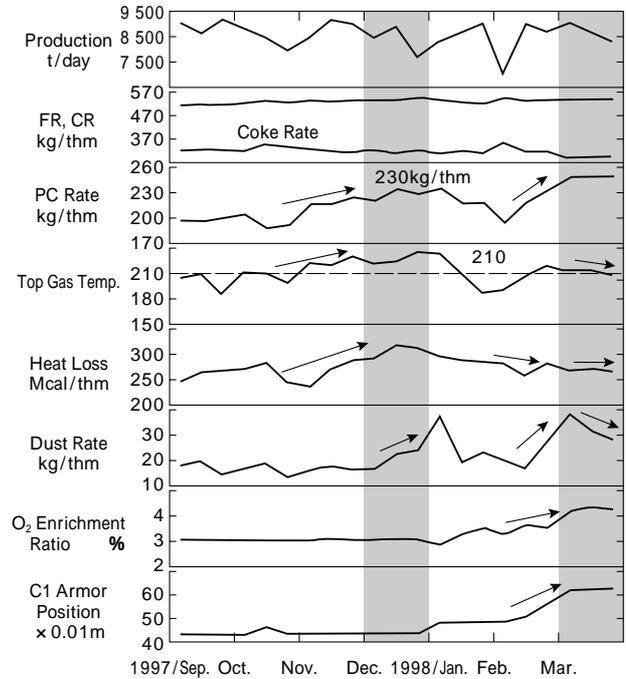
加古川3高炉(2次)は1996年4月に火入れしたが、その直後の操業推移を第14図に示す。当高炉は、これまで開発してきたPC吹込みに関する操業技術をすべて装備した状態で火入れを迎え、迅速な高PC比操業への移行を目標とした。火入れ15日後よりPC吹き込み操業を開始し、装入物分布制御などの調整を実施し、1カ月後にはPC比125kg/thmを記録するなど垂直立上げを達成した<sup>15)</sup>。

#### 4. PC比250kg/thm 試験操業結果

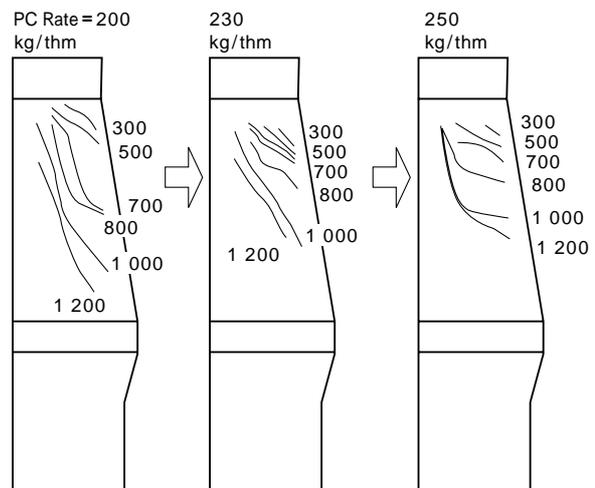
加古川1高炉では、PC比200kg/thm以上の安定操業実績を背景に、PC比の上限について燃料の約半量に相当するPC比250kg/thmをターゲットに実炉試験<sup>16)</sup>にチャレンジした。試験操業では、炉内現象変化に加えて、とくに設備保護の観点も含め、熱流比(降下する装入物の熱容量/炉頂ガスの熱容量)の低下にともなう炉頂温度上昇への対策が重要であった。トライアルにあたっては、炉頂ガス温度上限210に相当する熱流比0.83を下限として維持できる酸素富化率を設定した。

いっぽう、炉体熱負荷については、前述のC1アーマによる装入物分布制御を採用した。第15図に操業推移を示す。1997年10月下旬以降、順次PC比を増加し、1998年3月にPC比250kg/thmまで増加し、約1カ月に及ぶPC超多量吹込み操業を実施した。操業結果としては、炉頂からのダスト排出量を十分に低下させることができず、コークスとの置換率の低下を招いた。

第16図に垂直水平ゾンデによる炉内温度分布の測定結果を示す。PC比の増量過程においても安定した中心ガス流が維持されているが、1000以上の等温線が上昇しており、融着帯レベルが上昇した。したがって、融



第15図 加古川1高炉操業推移  
Fig. 15 Operational results of Kakogawa No.1 BF in ultra high coal injection trial



第16図 炉内温度分布変化  
Fig. 16 Change of temperature distribution in Furnace

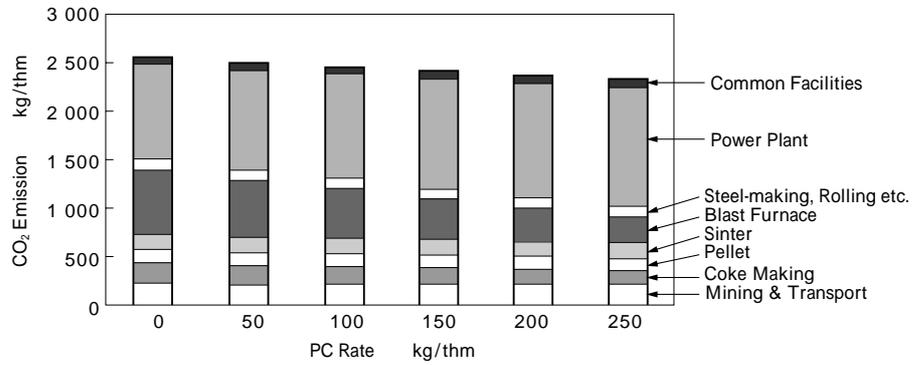
着帯のレベル制御に関しては、装入物分布制御では限界があり、さらなる酸素富化増などの熱流比管理が重要と考えられる。試験操業で顕在化した炉頂からのダスト排出量の増加も塊状帯でのガス温度上昇にともなう、層内平均ガス流速が増大したことに起因していると考えられる。したがって、熱流比管理によってコークスとの置換率の悪化も改善できる可能性がある。

#### 5. 21世紀に向けた将来技術の展望

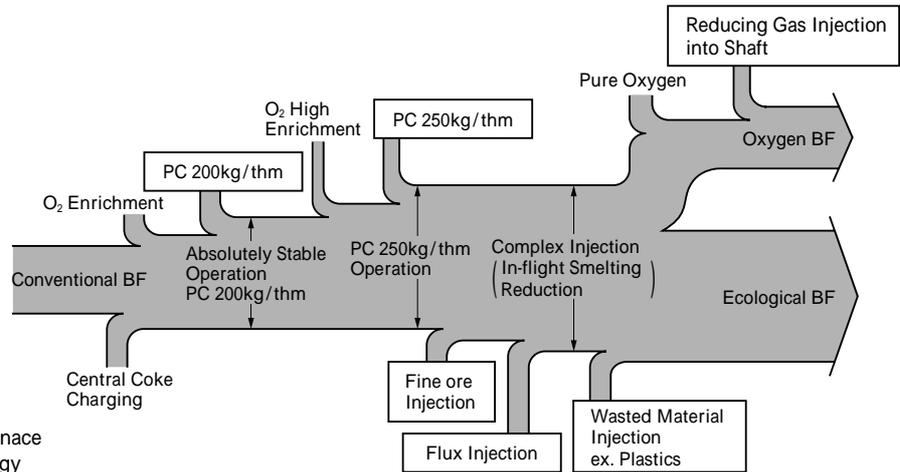
PC吹込み操業は、安価な石炭使用にともなうエネルギーコストの低減ばかりでなく、CO<sub>2</sub>排出量の削減など地球環境保全に寄与することもわかってきた。

高炉へのPC吹込み操業についてライフサイクルインベントリ(LCI: Life Cycle Inventory)分析の観点から考察した結果を第17図に示す<sup>17)</sup>。高炉PC吹込み操業によって製鉄所としてのCO<sub>2</sub>排出量は減少している。PC

第17図 PC 吹込み増大にともなう CO<sub>2</sub> 発生量のシミュレーション結果  
 Fig. 17 Simulation of CO<sub>2</sub> emission at various PC rate



第18図 吹込み技術の変遷  
 Fig. 18 Development of blast furnace based on injection technology



比 200kg/thm で約 190kg/thm の CO<sub>2</sub> 排出低減となり、製鉄所全 CO<sub>2</sub> 排出量の約 7.5% に相当している。

21 世紀における課題は、限られたエネルギーと資源の有効活用に加え、地球温暖化防止に代表される環境への取り組みである。当初、PC 吹込み操業は、エネルギーコスト削減を目的に導入された技術であるが、コークス炉の負荷低減などにより、結果的には環境負荷軽減に貢献している。また、本技術を応用して廃プラスチック吹込みも開始しており、廃棄物対策としても大きく貢献できる目処をえている。したがって、21 世紀には、PC 多量吹込み技術を基盤に創資源・創エネルギー型の高炉操業に進化していくものと予想している。第 18 図に吹込み技術を基盤とした 21 世紀への潮流を示す<sup>18)</sup>。

むすび=当社の PC 吹き込み操業に関する技術開発状況について紹介した。PC 比 254kg/t を達成するなど PC 吹込み操業技術は、ほぼ完成の域にあると考えている。今後は、PC 吹込み技術を活用して高炉の機能拡大を図っていく。

参 考 文 献

- 1) 田中孝三ほか：R&D 神戸製鋼技報 ,Vol.34 ,No.4(1984) p.36 .
- 2) 矢場田武ほか：R&D 神戸製鋼技報 ,Vol.41 ,No.4(1991) p.16 .
- 3) Y. Kotorii et al. : AISE/Coal Injection Symposium (1994) .
- 4) T. Uenaka et al. : Iron Making Conference Proceedings(1985), p.417 .

- 5) 鈴木富雄ほか：日本機械学会論文集 ,Vol.50, No.452 (1984) p.1067 .
- 6) H. Miyatani et al. : Iron & Steel Maker, November (1988) p.34 .
- 7) K. Shibata et al. : ISIJ/The First International Congress of Science and Technology of Ironmaking ,(1994) p.553 .
- 8) T. Suzuki et al. : 20th Symp. (International) on Combustion, (1984) p.1419 .
- 9) T. Suzuki et al. : Combustion Science and Technology ,Vol.45, No.3 (1986) p.167 .
- 10) T. Suzuki et al. : Iron Making Conference Proceedings ,(1990), p.465.
- 11) 柴田耕一朗ほか：鉄と鋼 ,Vol.77 (1991) p.1267 .
- 12) 松井良行ほか：CAMP-ISIJ Vol.12 (1999) ,p.632 .
- 13) 特許 ,第 2523918 号
- 14) J-M . Steiler : Iron Making Conference Proceedings (1998) , p.161 .
- 15) S. Sakano et al. : La Revue de Metallurgie-CIT Mars (1998) , p.353 .
- 16) K. Nozawa et al. : METEC Congress (1999) p.87 .
- 17) 草道龍彦ほか：R&D 神戸製鋼技報 ,Vol.47, No.3(1997) ,p.17 .
- 18) S. Inaba et al. : The Seventh China-Japan Symposium of Science and Technology of Iron and Steel ,(1995) p.56 .