

(解説)

当社における高炉操業技術の進歩とコークス中心装入法としての中心流操業思想

Blast Furnace Operational Technology and Central Gas Flow Intension for Center Coke Charging at Kobe Steel



松井良行^{*}(工博)
Dr. Yoshiyuki Matsui



柴田耕一郎^{**}(工博)
Dr. Koichiro Shibata



吉田康夫^{**}
Yasuo Yoshida



小野玲児^{***}
Reiji Ono

The high pellets ratio operation forced by burden material restrictions at Kobe Steel resulted in the development of the central gas flow intension and center coke charging processes. This methodology produced a novel approach to burden distribution, coal combustion and pellets operation where these processes were viewed as part of a chain reaction. As a result of these developments, furnace performance improved dramatically. This paper also describes future developments in blast furnace iron making.

まえがき = 当社は、1959年神戸第1高炉の火入れ¹⁾をもって、銑鋼一貫製鉄所として操業を開始した。最後発である当社の置かれた原料事情を背景としたペレット多配合操業における中心流操業志向を振り返れば、『中心流操業思想の歴史²⁾』が思い起こされる。1994年に館²⁾は、「中心流操業思想は、当初は、炉芯の活性化から端を発生し、装入物全体の通気性を問題視することとなり、大型高炉における装入物の半径方向分布の課題と逆V型融着帯に関する知見のもとでその骨格を形成した。こうして、今日、中心流操業はいわば常態化³⁾し、その思想は、完全に定着した。コークス中心装入法³⁾は、直接には、装入物の炉内での運動に関する研究を契機として生まれたが、その開発は、中心流の直接制御手段に対する強い指向を駆動力とするものである。そこには、ペレット多配合操業に関する神鋼技術者の経験の反映をみる」と技術史観を残している。

本稿では、前世紀からの発展を継承したコークス中心装入法を基盤とした中心流操業志向が、高炉機能強化にどのように作用してきたのかを俯瞰し、当社の高炉操業を歴史的・技術的に鳥瞰視し、来るべき高炉操業技術に向けた視点の一助としたい。

1. 当社の高炉操業技術の変遷

田村⁴⁾は、1984年の本技報「原料・製鉄技術特集」において、当社製鉄部門の変遷を以下の3期に分類している。

- ・第 期；創業期（炉内容積 600～1 000m³：1959～1970年）
- ・第 期；成長期（炉内容積拡大期：1970～1978年）

- ・第 期；成熟期（エネルギー危機以降の低成長期：1979～1982年）

図1に、当社の高炉操業技術の歩みを示す。第 期は、神戸3高炉に続いて建設された加古川1・2・3高炉が、炉内容積を逐次1 000m³ずつ拡大させていった期間である。その先鋒を切った加古川1高炉は、国内初導入とほぼ同時期にムーバブルアーマを導入し、国内初の炉内ガスサンプリングを活用し、ペレット多配合操業下での装入物分布制御技術の基礎的な解明を行っている。技術は大型に成長するに従って学問へと昇華する、これは原理的通性であると言われるなかで、炉容拡大にともない高炉操業技術が、総合工学としての体系化⁵⁾へと歩み始めた時期が、第 期に相当する。

その後当社は、1970年代までに確立された酸素富化送風と燃料吹込みとの複合吹込みの概念とその理論を受けて、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標として、1983年から加古川2高炉および神戸3高炉において微粉炭（以下、PC）吹込み操業を導入した。その後、ペレット多配合下における大型化にともなう操業課題を克服することを目的とし、装入物の炉内での運動に関する研究が進められるとともに、中心流の直接制御手段に対する強い指向を契機としてコークス中心装入法が、萌芽する第 期（黎明期：1983～1987年）を迎える。したがって、第 期に続く過去20年間の当社高炉技術の変遷は、以下の3期に分類できる。

- ・第 期；黎明期（PC多量吹込み操業への移行期：1983～1987年）
- ・第 期；革新期（コークス中心装入技術の開始：1988年～1999年）

^{*}鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ^{**}鉄鋼部門 加古川製鉄所 製鉄部 ^{***}鉄鋼部門 神戸製鉄所 製鉄部

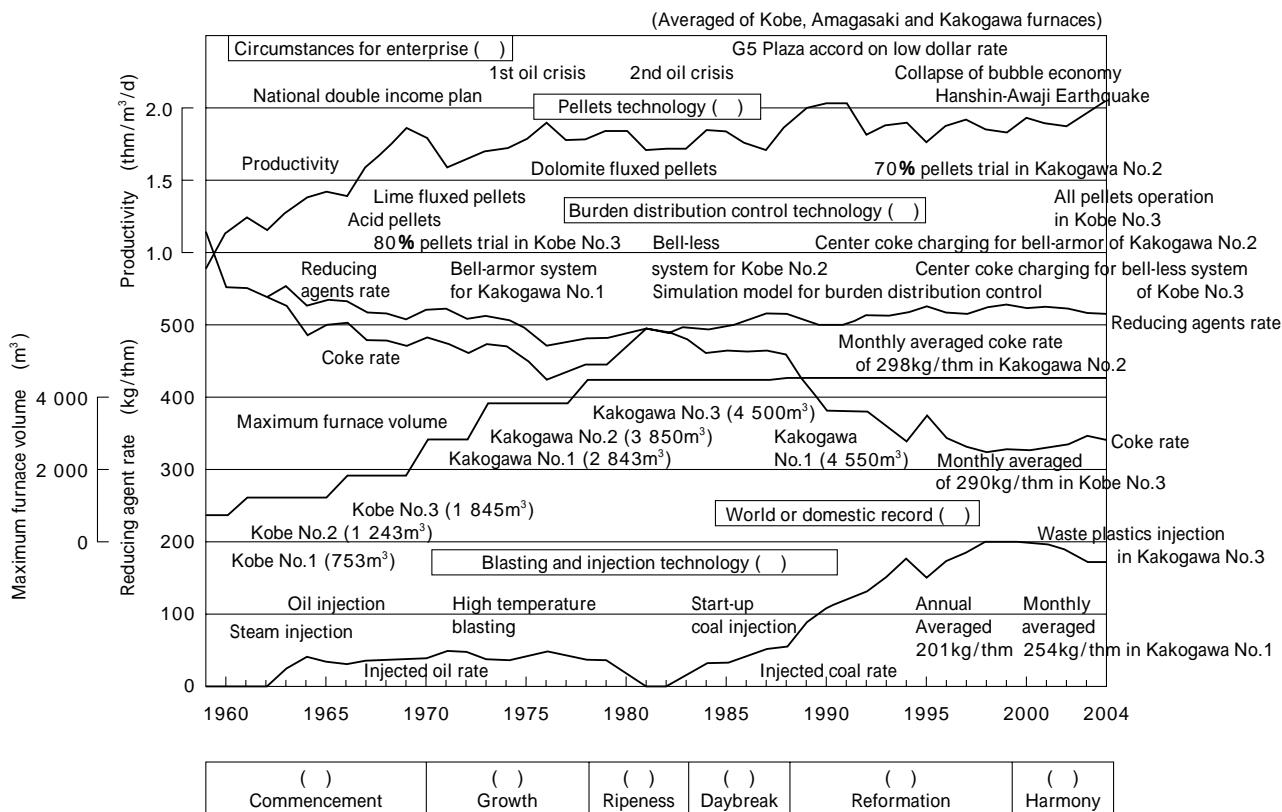


図1 当社の高炉操業技術の歩み
Fig. 1 Progress of blast furnace iron-making technology in Kobe Steel

・第 期；環境調和移行期（塵プラ吹込み 2000 年～，オールペレット操業 2001 年～現在）

燃料吹込みの経済性を論じる上で最も重要な要素は、コークス比の代替燃料に対する置換率である。1970 年当時は、重油吹込みに関して物質収支と平衡の条件、熱収支の基本的考えに立った理論が、明解に展開された。当時は、燃料添加量を 0.3 (kg/Nm³・乾風量) 程度まで上げることによって、コークス比を 300kg/thm 近くまで下げうるが、実際にそれが可能であるとは必ずしも言えないとされていた。

続く第 期（革新期：1988～1999 年）においては、コークス中心装入による装入物分布制御とダブルランスによる PC と重油の混合燃焼技術を駆使して、1990 年 4 月加古川 2 高炉において世界で初めて、300kg/thm を切る月間コークス比 298kg/thm (PC 比 123kg/thm、重油比 62kg/thm) が達成された⁶⁾⁷⁾。当月末においては、最低コークス比は 289kg/thm (PC 比 128kg/thm、重油比 65kg/thm) であり、コークス比 290kg/thm の壁をも突破したことが特筆される。

以上の第 期から第 期（環境調和移行期：2000 年～）に至るまでの 20 年を振り返れば、第 2 回欧州製鉄会議における『概念から実用に向けたコークス比 300kg/thm 以下への駆動力』⁸⁾ が思い起こされる。1991 年 R. Nicolle は、「コークス比 300kg/thm の壁が、初めて 1990 年に日本とフランスにおいて破られた。したがって、我々は、来る将来においてコークス比 250kg/thm 以下、PC 比 200kg/thm 以上からなるニューフロンティアが期待される」と記している。この 20 世紀末のニューフロンティア開拓志向が、CO₂ 排出低減に代表される環境の世紀とし

ての時代の要請を背景に、低還元材比操業への願望に転化し、今世紀初頭の潮流として現在に至っている。

2. コークス中心装入技術の背景と意義⁹⁾

図 2 (a) に、高炉内状況の模式図を示す。高炉を安定で、しかも経済的に操業するには、高炉中心部のガス流を局所的に強化し、高温部に逆 V 型の軟化融着帯を形成させることが最も重要とされている。このためには、炉頂部からコークスと鉱石を装入する際に炉半径方向における両者の堆積割合を調整し、中心部の鉱石のコークスに対する重量比（以下、O/C）を局所的に低く抑える必要がある。

しかし、従来の制御では、中心部の O/C は鉱石装入時におけるコークスの流れ込みや鉱石の粒度変化などに影響され、常に安定して低く抑えることが困難であった。例えば、炉中心部の鉱石量が增大して通気性が悪化した場合には、中心ガス流が弱まり軟化融着帯形状は W 型となる。その結果、炉壁熱損失の増大や炉内容物の異常降下現象が現れ、炉況は不調に陥る。通常多くの高炉では、炉口周辺部に設置したアーマプレートや旋回シュートの傾動角度の変更によって、原料の装入位置を調節して O/C 分布を制御しているが、その制御範囲は周辺部に限られ、中心ガス流を容易かつ確実に制御できる方法が強く望まれていた。

一方、高炉下部には炉芯コークス層が形成されており、その通気性や通液性は高炉の操業状態と炉体寿命に極めて大きな影響を及ぼしている。この炉芯コークス層は、とくに炉下部のガス流れと溶銑流れを決定するという二つの重要な役割を有しており、その通気性が悪化す

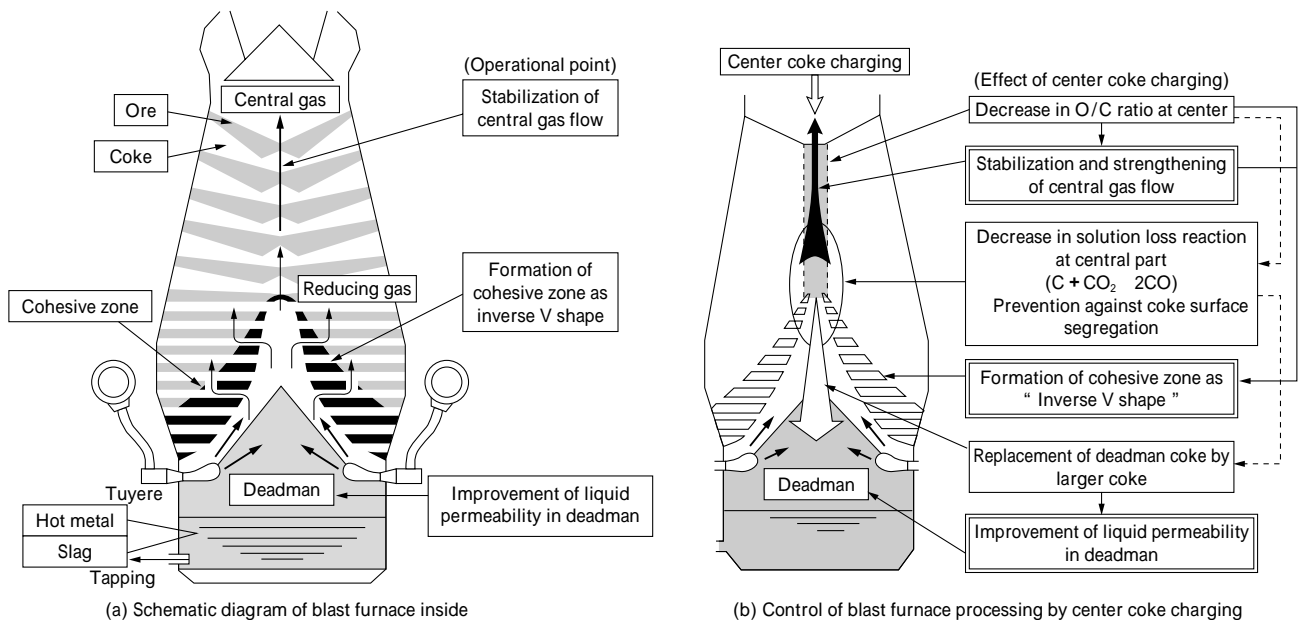


図2 コークス中心装入による高炉内プロセスの制御
 Fig. 2 Control of blast furnace processing by center coke charging

ると炉壁ガス流が発達してW型の軟化融着帯が形成され、上述したような炉況不調を招く。

さらに、溶けた溶銑が溜まる炉床部では、溶銑中に浸漬したコークス層中央部の通液性が悪化し、出銑時に炉壁部に沿った溶銑環状流が発達して炉床壁耐火物を侵食し、炉体寿命を短縮する原因となる。高炉の寿命を延長するには、炉芯コークス層中央部の通液性を高めることが特に重要とされているが、炉芯が1500以上の高温の高炉下部にあることから、従来、制御が不可能と考えられていた。

図2(b)に、コークス中心装入による高炉内プロセスの制御を示す。コークス堆積層の通気抵抗は鉱石堆積層の約1/10で、通気性がきわめて良好である。高炉中心部にコークスが相対的に多量に存在すると、羽口で生成したCOを主体とする高温のガスは中心部に集中し、軟化融着帯のコークス層を通して周辺部に分配される。また、炉内のコークスは、その降下過程で鉱石の還元反応によって生じたCO₂ガスによりカーボンソリューションロス反応(CO₂ + C → 2CO)を受ける。この反応を著しく受けたコークスは気孔が増大して強度が低下し、多

量の粉を発生する。とくに、炉芯を形成する中心部のコークスがこの反応を受けると、炉芯内に大量の粉を持ち込み、炉芯の通気性・通液性を悪化させる。

しかしながら、コークス中心装入によって中心部の鉱石量を減少させた場合には、中心部でのCO₂ガスの発生量が減少し、カーボンソリューションロス反応が抑制され、粉発生の少ない健全なコークスが炉芯に供給されることとなる。その結果、炉床の通液性が良好となり、出銑に際して溶銑は炉床の中心部を通して流出する。すなわち、炉床における環状流が抑制されて、炉床側壁温度の上昇を防止できる。

3. 装入物分布制御技術における中心流操業思想の作用と成果

第期(黎明期)においては、PC比の増大に際して、シャフト上部において炉中心から中間部におけるガス温度が低下し、ソリューションロスカーボン量が急増する現象が見られた。図3に、この中心流抑制現象を示す。炉口ガス温度分布は、炉熱の変化に6~10時間前に先行して現れることが特徴である。これは、PC比の増大に

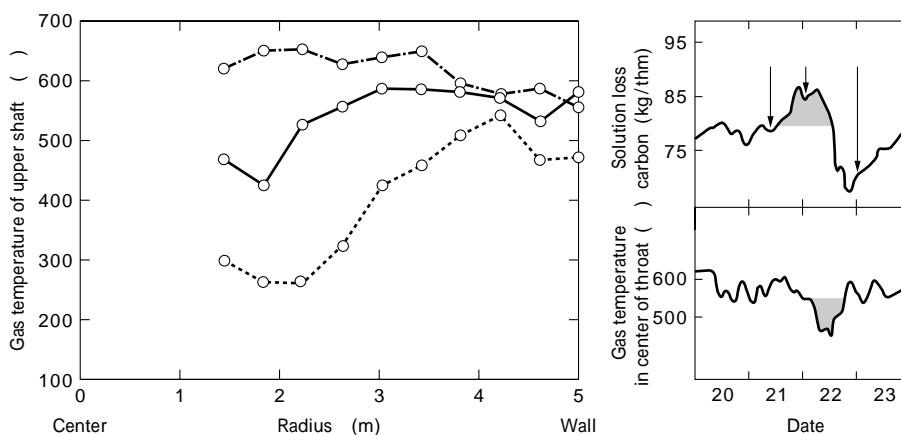


図3 ソリューションロスカーボン量急増時の中心流抑制現象
 Fig. 3 Losing central gas flow before changing of solution loss reaction

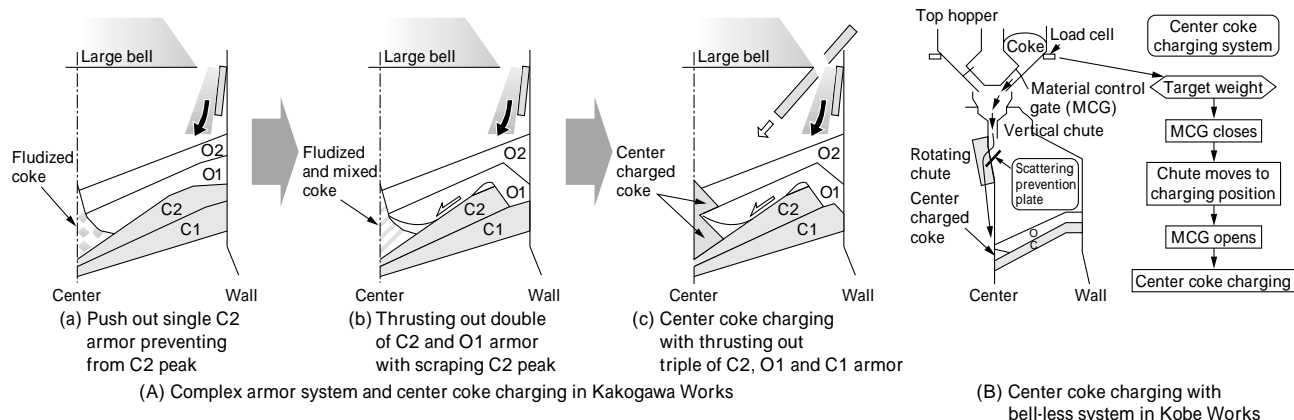


図4 当社におけるPC多量吹込み操業に対応した装入物分布制御技術の進化
 Fig. 4 Progress of burden distribution control for intensive coal injection at Kobe Steel

対応してO/Cが大きく、炉壁部での降下速度が低下⁶⁾することによって、ペレット配合下における炉中心部への鉱石の流れ込みが助長されるためである。火入れ前充填時¹⁰⁾における高O/C装入時の鉱石層構造の層高と層径方向での調査結果では、炉壁から炉中心に向かって鉱石とコークスの層境界での混合層の形成領域が拡大することが確認されている。ペレットは装入時の偏析を受け、鉱石層の底部に浸透し、炉中間から中心部近傍では、コークス層にまで貫通する。したがって、PC比の増大にともなう高O/C化に対しては、混合層の形成および潜り込みを制御し、径方向および層高における装入物分布の安定化が重要である。

図4に、PC多量吹込み操業に対応した装入物分布制御技術の進化を示す。加古川製鉄所のベルアーマ方式(4バッチ装入; C1 C2 O1 O2)(図4(A))においては、第 期(黎明期)では、C2アーマの押し出しによって周辺部の鉱石のコークスに対する層厚比(以下、LO/LC)を高め、相対的に中心部のLO/LCを低下させ、中心部の流動化コークスの形成を促進することによって中心ガス流を維持していた(図4(a))。続く第 期(革新期)初期においては、C2アーマのさらなる大きな押し出しによってC2堆積層の稜線(以下、ピーク)を形成し、次のO1アーマの押し出しによって装入O1によるC2ピークを削り取る。その結果、中間から周辺部にかけてのLO/LC分布の平滑化とともに、混合層を中心部へ供給し、中心部流動化コークスを補強するというアーマの複合制御時期に入る(図4(b))¹¹⁾。

この第 期(革新期)において、流動化コークスあるいは混合層によらない中心流の直接制御手段に対する強い指向を駆動力として、コークス中心装入法³⁾が開花する(図4(c))。その適用は、C2装入後およびO1装入後に、専用シュートによってコークスを中心部に別装入を行うことによって中心ガス流を直接制御することによる。その結果、アーマの制御性は、周辺部のみによって機能できるという操業概念[]に進展したことが特筆される。したがって、C2およびO1アーマの複合使用による周辺部制御は、C2アーマの大きな押し出しにおいて、周辺部のC2層厚がなくなり、C1層が露出する時点で限界となる。後述のPC比250kg/thm試験操業¹²⁾では、

さらに、C1アーマによる周辺部LO/LCの直接制御を採用している。

神戸製鉄所でのベルレス方式(2バッチ装入; C O)(図4(B))においては、第 期(黎明期)では、コークスの平坦部(以下、フラット)を形成させ、周辺部LO/LCの調整が主眼に置かれた。その後、第 期(革新期)初期においては、ベルアーマと同様に、鉱石装入時のコークス崩れに着目し、コークスフラットおよび鉱石フラットの形成という複合制御時期に入る¹³⁾。その分布制御は、コークス崩れを抑制させるという、一見ベルアーマ制御とは逆行する経緯を辿る。これは、当初焼結鉱操業であったため、高O/C下においても比較的中心流が得やすいこと、また、旋回シュートの傾動によってコークスピーク形状を滑らかにできること、さらに、固定ホッパ容量の制約からコークスの装入量(以下、コークスペース)に上限があるため、炉内でのコークス層厚確保を優先させたことによる。したがって、コークス表面を削り取るベルアーマ方式とコークス表面を滑らかに作り込むベルレス方式において、その手段は異なるものの、中間から周辺部にかけてのLO/LC分布を平滑化させるという制御方法が、両方式が緊密な連携をもって発展した。

第 期(革新期)において、神戸製鉄所では、過去の低コークス比操業時において炉芯粉率が増加し、出鉄滓の悪化を経験しており、炉芯の直接制御手段としての、より高次の中心流志向を駆動力としてベルレスコークス中心装入法¹⁴⁾が開花したことが特筆される。上述のコークスペースの制約から、ベルレス方式におけるコークス中心装入法では、コークス装入終盤に、必要量を計測し、流調ゲートを閉鎖し、旋回シュートをほぼ垂直に傾動させ、コークス中心装入を行うベルレスコークス中心装入システム¹⁴⁾が開発された。

4. 微粉炭燃焼技術における中心流操業思想の作用と成果

PC吹込み開始当初の第 期(黎明期)では、重油吹込みに比べてPCの燃焼率が低下することが懸念され、PC吹込み位置は、ブローパイプ内に置かれた。図5に、PC多量吹込み操業に対応したPC燃焼制御技術の進化を

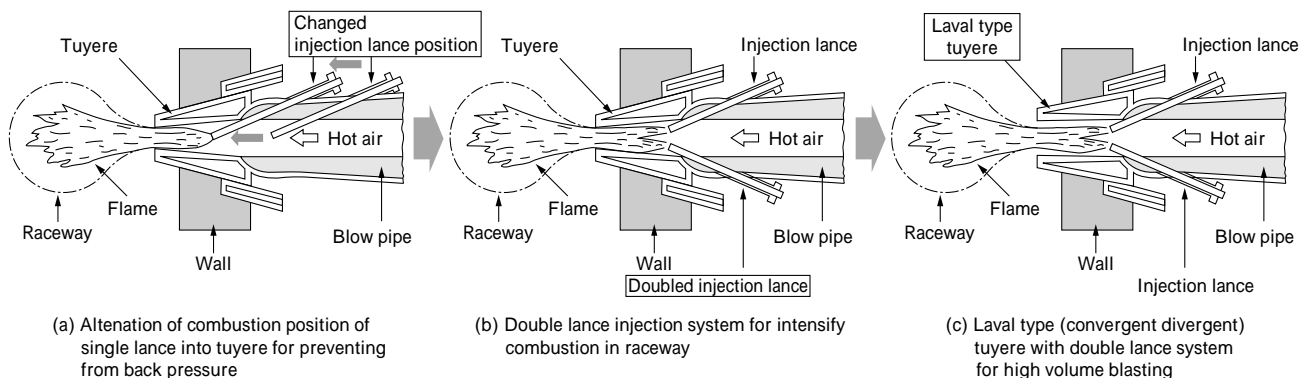


図5 当社におけるPC多量吹込み操業に対応したPC燃焼制御技術の進化
 Fig. 5 Progress of coal injection system for intensive coal injection at Kobe Steel

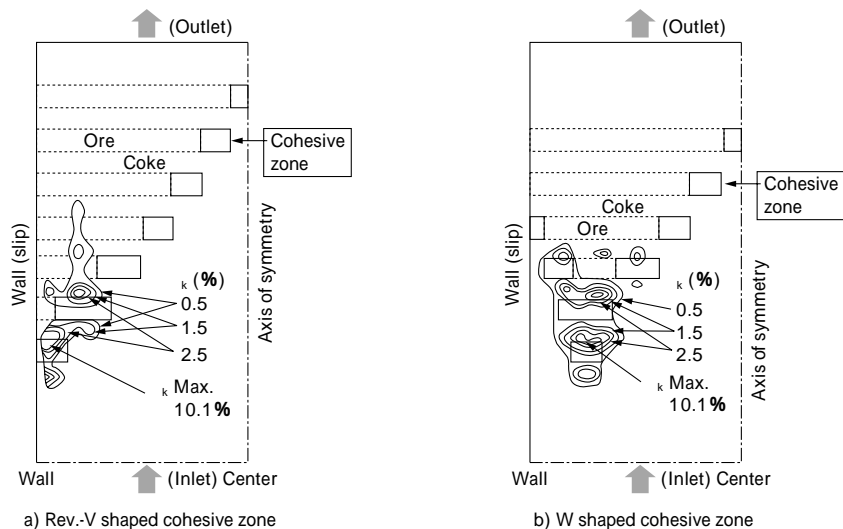


図6 充填層内固気二層流モデルによる未燃チャーの炉内蓄積シミュレーション結果
 Fig. 6 Calculated results in total hold up of unburnt char around cohesive zone

示す。その後、羽口部圧損とその変動を低減させるため、PC吹込み位置は羽口先端近くに置かれるようになってきた¹⁵⁾(図5(a))。PC多量吹込みでは、レースウェイ内燃焼においてもPCの拡散律速であるため燃焼率は低下することから、これに対しての燃焼率制御手段としてダブルランス方式¹⁶⁾が、国内で初めて導入された(図5(b))。現在では、羽口部圧損とその変動の防止とレースウェイ内燃焼の確保を背景として、ラバール型新羽口とダブルランスによるPC燃焼制御¹⁷⁾へと発展し、現在に至っている(図5(c))。

レースウェイで発生する未燃焼微粉炭(以下、未燃チャー)は、カーボンソリューションロス反応により炉内で消費されると考えられているが、未燃チャーは炉内のガス流れを大きく変える可能性がある。図6に、充填層内固気二層流モデル¹⁸⁾による未燃チャーの炉内蓄積シミュレーション結果を示す。未燃チャーはガス流れが大きく変化すると、とくに、融着帯部の下部で多く堆積し、W型の融着帯の場合には周辺流化を助長するため逆V型の融着帯形状の管理が、より一層重要である。すなわち、融着帯形状を逆V型に制御することによって、レースウェイからの未燃チャーを炉内で捕捉し、炉内で発生するCO₂によって二次的にガス化できる。このことから、中心流操業による融着帯形状制御は、PC燃焼場としてのレースウェイ機能を未燃チャーのガス化反応場とし

て、融着帯を補完的に機能させようという操業概念[]に進展したことが特筆される。

以上のコークス中心装入による装入物分布制御とダブルランスによるレースウェイ内燃焼強化技術を駆使して、1990年4月加古川2高炉において、PCと重油の混合吹込みによって世界で初めて300kg/thmを切る月間コークス比298kg/thm(微粉炭比123kg/thm、重油比62kg/thm)が達成された。

このように、PC多量吹込み操業自体は、第1期(革新期)を経て、1990年台末にほぼ確立されたと言える。さらに、加古川1高炉において1998年3月PC比254kg/thmの記録を達成するまでになった¹²⁾。しかしながら、このPC比200kg/thmから250kg/thmの増量過程では置換率の低下が認められ、その結果、コークス比は、291kg/thmに止まっている。これは、シャフト部での摩擦などによって発生したコークス粉が、シャフトガス流速の増大によって炉外に排出されたためと推定されている。この置換率の低下が、冒頭のR. Nicolleらの記述によるニューフロンティアに到達するための当社の高炉操業の課題であり、第7章に詳述する。

5. 長寿命化技術および再立上げ操業における中心流操業思想の作用と成果

当社においては、安定生産を維持しつつ長寿命化を図

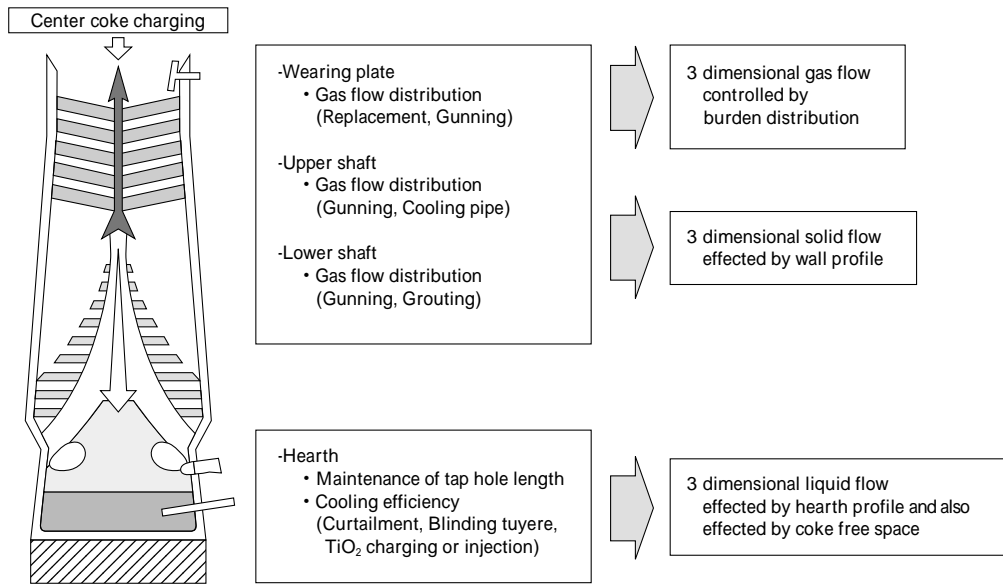


図7 当社における炉部位別の長寿命化対応
Fig. 7 Countermeasures and repair for elongating furnace life of Kobe Steel

BF (IV)	#2 -1st (3 850m ³)	#3 -1st (4 500m ³)	#2 -2nd (3 850m ³)
Ope. period	5Y - 2M	10Y	16Y - 2M
Production	13 207kt (3 430t/m ³)	28 998kt (6 444t/m ³)	41 790kt (10 855t/m ³)
Initial hearth profile			
Hearth profile blown out			
Minimum wall thickness	500mm	835mm	1 000mm

図8 当社における吹止め高炉の火入れおよび炉底プロフィールの比較
Fig. 8 Comparison of between hearth profile blown in and blown out of Kobe Steel

るため、炉体については炉体熱負荷およびその変動防止の観点から、コークス中心装入による中心ガス流制御を基本としている。図7に、当社における炉部位別の長寿命化対応を示す。炉底についてはコークス中心装入による炉芯コークスの通気性・通液性の確保に加えて、フリースペース形成挙動¹⁹⁾から溶鉄環状流を防止するため出鉄口深度の維持を基本としている。緊急避難として、もっとも効果が大いなのは、減産・長時間休風であるが、生産量への影響が大きい。装入TiO₂量の増加、羽口閉塞は、フル生産への障害となる。補修としては、固体流れ解析からのシャフト補修指針²⁰⁾を重視したシャフト補修技術、炉底局部溶損に対しては羽口TiO₂吹込み²¹⁾を採

用している。一方で、炉底補修が不可能であることから、炉寿命律速の部位は炉底部であることは変わり得ない。

図8に、当社における吹止め高炉の火入れおよび炉底プロフィールの比較を示す。1996年に吹止めた加古川2高炉(二次)は、炉代終盤においても低コークス比330kg/thm(PC比150kg/thm, 小中粒コークス比55kg/thm)の操業を継続し、吹止められた。残存煉瓦厚さは、加古川3高炉(一次)の835mmに比較して2高炉(二次)は、1000mmと炉底は健全であった。また、普通ステーブの冷却パイプの破損は皆無であり、コークス中心装入による中心ガス流制御を主体とした長寿命化技術の成果であ

ると評価している²²⁾。

高炉の不測の停止からの再火入れについては、1995年阪神・淡路大震災後の神戸3高炉の再火入れが記憶に新しい。国内では、停止した高炉の操業に向けての火入れの例はないため、当社技術陣の真価が発揮された。1993年8月からベルレス装入によるコークス中心装入法を確立しており、震災立上げ操業は順調であったため、震災前から推進してきた低コークス比操業が進められた。その結果、震災復旧後7カ月目の1995年10月には、コークス比296kg/thmの国内記録を達成し、さらに、1996年1月には自己記録を更新する290kg/thm(1995年10月～1996年3月の半年平均で、コークス比294kg/thmの国内記録)を樹立した¹⁴⁾。再火入れまでの75日は、「復興の祈りと満ちる力」として、2090tonの炉内容物の掻き出し状況も含めてレポートされている²³⁾。

6. ペレット使用技術における中心流操業思想の作用と成果

軟化融着帯の制御は、装入物分布制御とならんで、鉱石の軟化性状および溶落ち性状が重要となる。できるだけ高温まで塊状充填構造を保つ、すなわち荷重軟化性状が良好で、軟化開始から溶落ちまでの温度範囲の狭い装入物がよい。ペレットは焼結鉱に比べて熱間性状において還元停滞という難点があるため、当社ではペレットの品質面の改善としてドロマイトの添加による熱間性状の向上を図り、ドロマイトペレットを開発した²⁴⁾。ペレット熱間性状の管理においては、高温までの塊状充填構造保持の観点から、1100荷重還元収縮率を用いている。

図9に、各種実用ペレットの成分および荷重還元収縮率との関係を示す。自社製のドロマイト添加自溶性ペレット(図中K)は、輸入ペレット(図中A、B、C)に比べて収縮率が低く、高温まで塊状充填構造を維持できる。

当社におけるペレット多配合実績は、1967年神戸3高炉(一次)での80%配合試験操業²⁵⁾および1991年加古川2高炉(二次)での微粉炭多量吹込み操業下での70%

配合試験操業²⁶⁾がある。とくに、加古川2高炉(二次)での70%ペレット配合試験操業は、コークス中心装入法の適用下であり、ペレット操業概念の進展をみた。すなわち、還元停滞現象は、コークス中心装入による中心ガス流の形成および微粉炭吹込み操業による低熱流比下においては、周辺部において熱保存帯が形成でき、還元停滞の改善の可能性が提示されたことである。したがって、中心流操業による融着帯形状制御は、ペレットの原料劣性である還元停滞を、周辺部熱保存帯の形成による還元機能強化によって受容するという操業概念[]に進展したことが特筆される。

1995年震災復旧立上げ後の神戸3高炉(三次)(内容積1845m³、火入れ1983年4月5日)は、1999年5月末の焼結工場の休止にともない、事前処理鉱を全面外部品に切替えるとともにペレットの使用を開始し、2001年9月末にオールペレット操業(ペレット73%、塊鉱石27%)²⁷⁾に移行した。ペレットの増配にともない、鉱石堆積角が低下するため中心部に鉱石が流れ込み、中心ガス流が抑制される。また、鉱石堆積角の低下にともない鉱石平坦部が縮小するため、荷下がりが不順となることが予想された。これらの変化に対して、中心部は、中心装入コークス量の増量および周辺部は、鉱石・コークスの平坦部を維持し、オール焼結鉱操業時の逆V型の融着帯形状を維持することが可能となった。

本オールペレット操業においては、低塩基度ペレットを混合併用するため融着帯根部の肥大化を防止することが必要である。上述のコークス中心装入によるペレット還元停滞の改善効果を考慮すると、ペレット配合率50%までは、周辺部のペレット濃度を30%以下にすること、また、ペレット配合率50%以上では、軟化溶融特性から周辺部の低塩基度ペレット濃度を30%以下にすることが必要と判断され、ペレット時系列排出制御²⁷⁾が開発された。

図10に、代表的な高炉の鉱石配合率において、神戸3高炉(三次)のオールペレット操業への移行過程を示す²⁷⁾。低焼成鉱配合率を維持しつつオールペレット操業に移行できた。本内容は、国内の製鉄所で唯一となるオールペレット操業への移行に対して、コークス中心装入法と炉内ペレット品位別操業技術の開発によって、移行後の安定好成绩を可能にしたこと、また、その成果として、都市型製鉄所としての環境調和の観点から評価されている²⁸⁾。

7. 中心流操業思想を基盤とした高炉操業技術の将来展望

鉄鋼一貫製鉄所として最後発である当社の置かれた原料事情を背景としたペレット多配合操業における中心流操業思想は、コークス中心装入法として結実した。その結果、発祥の地である神戸の3高炉においてオールペレット操業を可能とし、その本来の志向が達成されたと言える。しかしながら、新世紀の今日においても、高炉操業者、技術者および研究者にとっては、なお、「炉況」というこの上もない愛着のある直感的な経験に裏付けられ

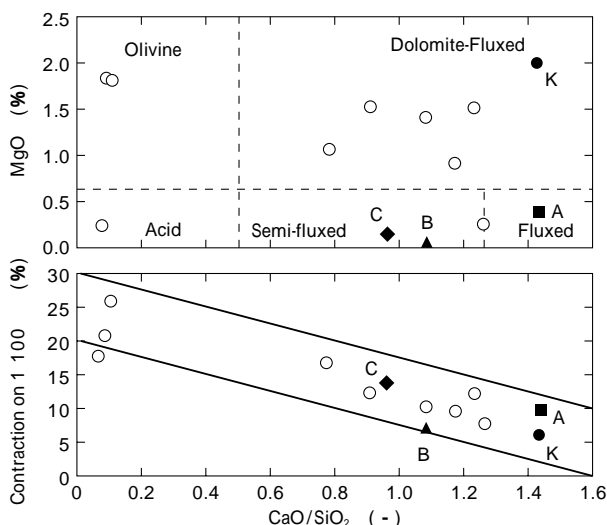


図9 各種実用ペレットの成分および荷重還元収縮率との関係
Fig. 9 Correlation between composition of various commercial pellets and reduction contraction under load

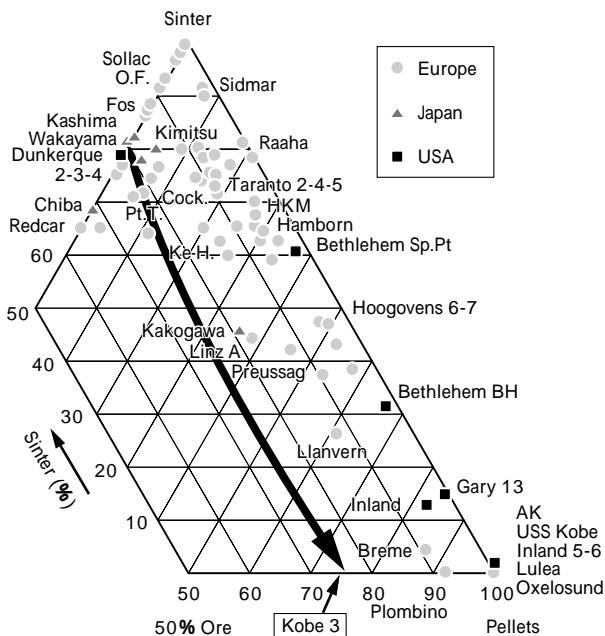


図10 代表的な高炉の鉱石配合率における神戸3高炉（三次）のオールペレット操業への移行過程

Fig.10 Transition of Kobe No.3 blast furnace on ferrous burden constitution in selected blast furnaces from Europe, Japan and USA

た判断が残っている。

冒頭の館は、中心流操業において解決されるべき課題²⁾を以下のように看破している。「中心流操業の基本思想は、『炉況』の安定を前提とし、この前提が確保されるかぎりではガス利用率向上を可能とするガス・装入物分布を追及するというにあり、したがって、もともと幅のある概念であること。そのため、その指標である中心にピークをもつ炉頂ガス温度分布に一義性がない理由のひとつもこの点にある。さらに、炉況の安定のために許される周辺流の強さを規定するのは何かという、古典的命題が解明されていないという点にある」この古典的命題である周辺流制御において、当社の高炉操業課題は、以下の2点に集約される。

第1には、現稼働の加古川1高炉（三次）は、火入れ初期よりPCI操業に移行しており、とくに高PC比操業に移行した1999年以降より朝顔部（B2）およびシャフ

ト下部（S3）の局所的なステープパイプの破損が顕在化していることである²⁹⁾。これは、高PC比操業での融着帯レベルの上昇にともなうシャフト部の高熱負荷化と、原料粒度変化に対するガス流変化の感度の増幅（不安定化）に起因していると考えられ、より厳格な周辺流制御が必要となっている。

第2には、今後の低還元材比操業に向けてコークス使用技術が、より厳格化されねばならない点である。図11(a)に、PC比250kg/thm試験操業¹²⁾における、単位コークスあたりのカーボンソリューションロス反応負荷量（以下、コークス反応負荷量）と炉芯コークス中間部粉率との関係を示す。コークス中心装入によって炉芯を形成するコークスの反応劣化は抑制できるものの、炉径方向での中間および周辺部の反応コークス由来の粉が炉芯表層から浸透作用³⁰⁾によって炉芯内に流入する。その結果、PC比が一定の場合では、コークス比の低下にともなわないコークス反応負荷量は増加し、炉芯粉率は増加する（図11(b)）。したがって、今後さらに低還元比操業を指向した場合には、炉芯粉率が増加するため、炉芯の通気性・通液性の確保がより一層重要となる。

以上のことから、現在の高炉操業は、「コークス中心装入一つにあり、かつ唯一つに限る」といった類ではない。すなわち、たんなる炉中心部への鉱石の流れ込みの問題のみではなく、より厳格な周辺流制御と原料使用技術の課題が顕在化してきたのが、現在の第1期（環境調和移行期）と言える。これに対して、冒頭のR. Nicolleらの記述によるニューフロンティアにいち早く到達したのは、粗鋼生産の拡大が続く中国あるいは韓国である。その要因としては、ダイヤモンドのような原燃料との指摘もあるが、これは、アジアを中心とする鉄鋼中進国の台頭によって、アジアにおける日本の製鉄原料購買独占の妙味が薄れてきていることの必然性にほかならない。高品位原料というハードパワーに対して高炉操業技術というソフトパワーが、どこまで対峙できるか、あるいはその両者の最適化を図るスマートパワーの確立が、次の突破されるべき高炉操業の壁と言える。

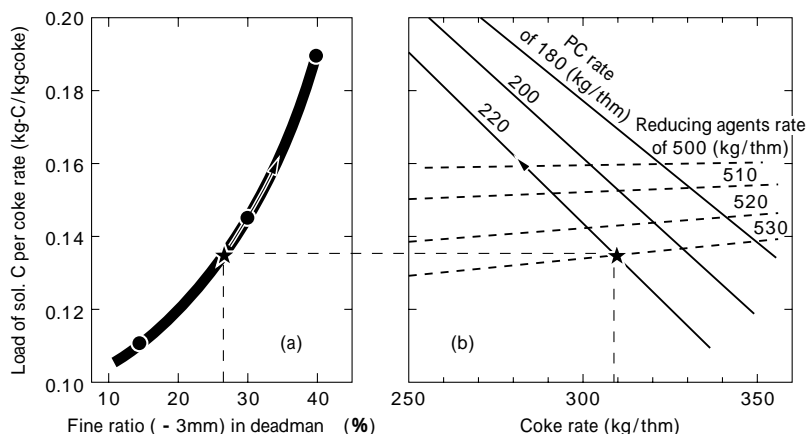


図11 単位コークスあたりのソリューションロス反応負荷量および炉芯コークス粉率に及ぼすコークス比および微粉炭比の影響
Fig.11 Effect of coke and coal rate on solution loss reaction load and coke fine generation in deadman of blast furnace

むすび=コークス中心装入による中心流操業思想は、発展し、完全に定着したと言えるが、中心流操業思想は、環境変化のもと時代の要請を受けながら、自己変化を遂げた近代工業の発展過程と同じく、統一された意思として展開されたものではない。したがって、本稿は、当社高炉技術の雲上を走る稜線を辿ったにすぎず、ましてや、高炉操業技術の未来に関する展望は、到底筆者が描写できるものではない。しかしながら、中心ガス流思考であるソフトパワーが、コークス中心装入法であるハードパワーを創出し、その実用を受けて炉内制御に対する認知を変え、操業概念 [] - [] をあらたに構築するという思考連鎖こそが、高炉操業機能をダイナミックに、かつ、多面的に強化させてきたことを、マクロとミクロの両面から描き出したかった。

今後、鉄鋼産業としては、高付加価値の製品をさらに目指す「高付加価値主義」が第一義である。そのためには大量生産の溶銑製造システムとして、高付加価値の鉄鋼製品を下支えするための鉄源の確保、すなわち「炉況」の安定化、さらには、CO₂ 排出低減に代表される環境調和に向けた低還元材比操業を両極として、中心流操業思想を進化させなければならない。

参 考 文 献

- 1) 松尾英一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.9, No.4 (1959) p.225.
- 2) 羽田野道春：高炉製鉄法，(1999) p.81, 地人書館(東京)。
- 3) T. Uenaka et al. : Iron & steelmaker, November, (1988) p.34.
- 4) 田村節夫：R&D 神戸製鋼技報，Vol.34, No.4 (1984) p.36.
- 5) 小島勢一：ふえらむ，8 (2003) p.175.
- 6) Y. Matsui et al. : 6th International Iron and Steel Congress, ISIJ, (1990) p.468.
- 7) T. Goto et al. : La Revue de Metallurgie-CIT April (1991) p.345.

- 8) R. Nicolle et al. : 2ND European Ironmaking Congress, Glasgow (1991) p.233.
- 9) 稲葉晋一：ふえらむ，9 (2004) p.721.
- 10) S. Sakano et al. : La Revue de M., Mars (1998) p.353.
- 11) 堀 隆一ほか：鉄と鋼，78 (1992) p.1330.
- 12) K. Nozawa et al. : METEC Congress, (1999) p.87.
- 13) 吉田康夫：日本鉄鋼協会 生産技術部門 技術部会 第81回製鉄部会資料(1992年11月)。
- 14) T. Matsuo et al. : 56th Ironmaking Conference Proceedings, Chicago (1997) p.203.
- 15) K. Matsunaga et al. : CAMP-ISIJ, 3 (1990) p.30.
- 16) 伊藤良二ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000) p.6.
- 17) 野澤健太郎：日本鉄鋼協会 生産技術部門 技術部会 第91回製鉄部会資料(2001年6月)。
- 18) 柴田耕一朗ほか：鉄と鋼，77 (1991) p.1267.
- 19) K. Shibata et al. : 6th International Congress, (1990) p.422.
- 20) 清水正賢ほか：鉄と鋼，73 (1987) p.1996.
- 21) T. Okada et al. : Ironmaking conference proceeding, (1991) p.307.
- 22) 北野新治ほか：材料とプロセス，11 (1998) p.215.
- 23) 山根一真：「メタルカラーの時代4」，(1998年7月1日)，小学館。
- 24) 西田礼次郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.34, No.4 (1984) p.28.
- 25) 藤井成美ほか：鉄と鋼，54 (1968) p.1241.
- 26) 小野玲児ほか：鉄と鋼，78 (1992) p.1322.
- 27) Y. Matsui et al. : ISIJ Int., 43 (2003) p.166.
- 28) 松尾 匡：日本鉄鋼協会 生産技術部門 技術部会 第93回製鉄部会資料(2003年5月)。
- 29) 西口昭洋：日本鉄鋼協会 生産技術部門 技術部会 第91回製鉄部会資料(2001年6月)。
- 30) 笠井昭人ほか：鉄と鋼，83 (1997) p.551.