

日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-3

高炉のコークス中心装入技術

Central Coke Charging Method of Blast Furnace

稲葉 晋一
Shinichi Inaba

(株)コベルコ科研 顧問

1 緒言

高度成長・発展期を経て、世界の頂点に立った日本の製鉄界は、著しい社会的、経済的な環境変化の中で、厳しい体質改善を求められ、限られた高炉基数の中で1基の高炉にかかる生産責任、すなわち計画された生産量を、長期間安定に維持していくことが、今日なお、特に重要な課題となっている。このような環境の中で、徹底した溶銑コストの低減を目指して、微粉炭やプラスチックなどの安価な原燃料の使い込みや高炉の炉体寿命延長技術の開発が最重要課題として精力的に推進し続けられている。

こうした大型高炉の課題を達成する上で解決すべき問題は、炉内の高温域に形成される軟化融着帯の形状と炉床部に形成される炉芯コークス層（1500～1800℃のコークス滞留域で、しばしばデッドマンと呼ばれる）の通気・通液性制御法の開発であった。中でも炉芯コークスの制御については2000℃近い高温の高炉下部にあることから、従来は制御は不可能と考えられていた。

この課題に対し、神戸製鋼の製鉄部門研究者・技術者は独自の研究手法によって軟化融着帯および炉芯の形成機構を基礎的に解明し、高炉史上初めて両者を容易にかつ確実に制御できる「コークス中心装入法」を開発した。この技術は軟化融着帯と炉芯の制御用コークスを炉口中心部に別装入するという、従来の操業法とは異なる新しい操業法¹⁾で、それまで高炉操業者が要望していた上記の課題を一挙に解決した画期的な技術と評価された²⁾。この技術を採用した国内外の大型高炉では、微粉炭の多量吹き込みを達成するとともに、操業の安定性と経済性が飛躍的に向上することを示した。

この技術の開発の経緯は既に「ふえらむ」³⁾に掲載されているので、本報告では技術的内容に限ることとする。

2 技術開発の背景と狙い

高炉を安定で、しかも経済的に操業するには図1に示すように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（鉱石が軟化熔融して互いに融着する領域）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ore/coke比（鉱石の通気抵抗はコークスの約10倍あり、この比は通気抵抗と見ることができる。以後O/Cと表記する）を局所的に低く抑える必要がある。

しかし、従来のいわば成り行き任せの制御¹⁾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、図2 (a) に示すように、炉中心部の鉱

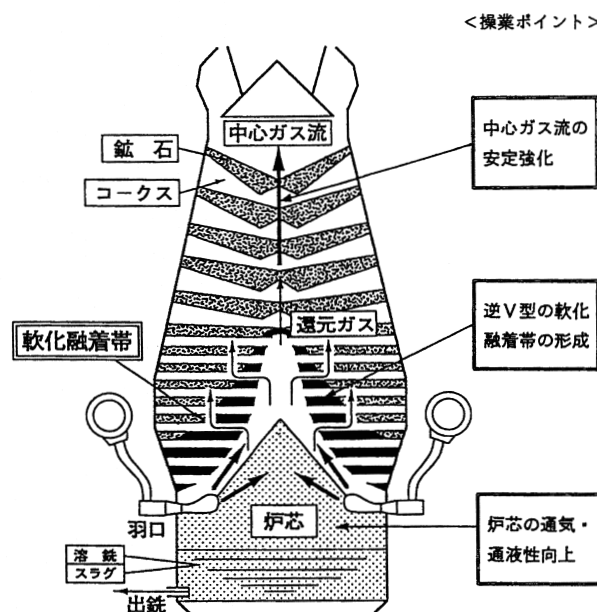


図1 高炉内状況の模式図

石量が増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ープレート（装入原料の反撥板）や旋回シュートの傾斜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、中心ガス流を容易に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、特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、図2 (b) に示すように、その通気性が悪化す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、図3に示すように、溶銑中に浸漬したコークス層中央部の通液性が悪化すると、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

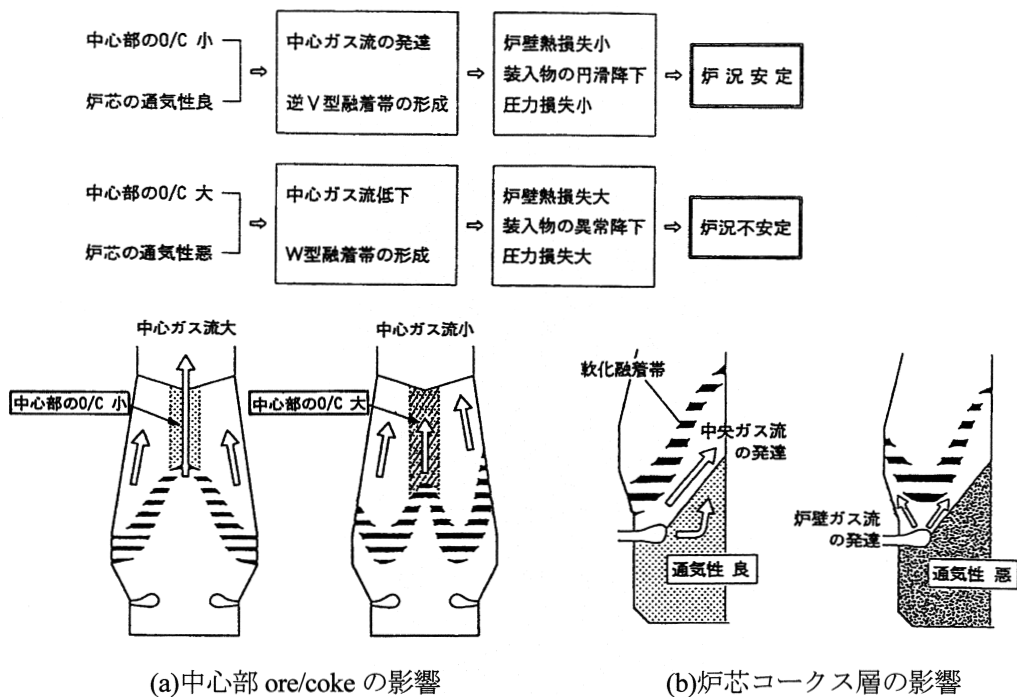
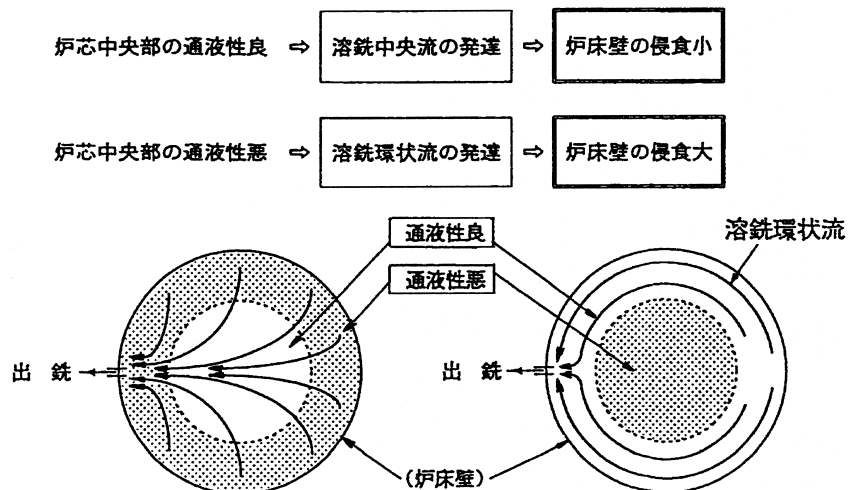


図2 軟化融着帯形状に及ぼす高炉中心部のore/cokeと炉芯コークス層の影響



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、従来より制御が不可能と考えられていた。

③ 軟化融着帯の制御

高炉内に逆V型の軟化融着帯を形成させるには、炉中心部のO/C比を低く抑える必要がある。通常の高炉操業では、図4に示すように装入する鉱石あるいはコークスを炉口壁部に設置したアーマープレートに反撥させて炉内での堆積位置を調整しているが、装入された原料の堆積角(安息角)は粒度分布や装入量によって変化する⁴⁾ため、中心部でのO/Cを一定に維持することが困難である。

筆者らは、図5に示すように、炉内に装入するコークスの一部②を炉口中心部に装入すること(コークス中心装入)によって、次に装入される鉱石③の中心部への流入を防いで中心部のO/Cを局所的に低下させ、軟化融着帯の形状をコントロールする方法を検討した。

図6は鉱石の代わりに低融点樹脂を用いて行った高炉熱間模型実験の結果である⁵⁾。炉内に形成される軟化融着帯の形状は中心部のO/Cに著しく依存し、中心部へのコークス装入量(RWc:全コークス量に対する中心コークス量の割合)の増加とともにM型→W型→逆V型へとドラスティックに変化する。同時に、軟化融着帯の形状は炉内の圧力損失と密接に関係しており、コークスの中心装入によって逆V型の軟化融着帯を形成させた場合には、炉内の圧力損失も低く保てることがわかる。

図7は、炉内の化学反応を考慮した高炉シミュレーション・モデル(数学モデル)によってコークス中心装入の影響を推算した結果であるが、モデル実験と同様に中心部の高温部分が上方へ移動しており、コークス中心装入が逆V型の軟

化融着帯を形成させた場合には、炉内の圧力損失も低く保てることがわかる。

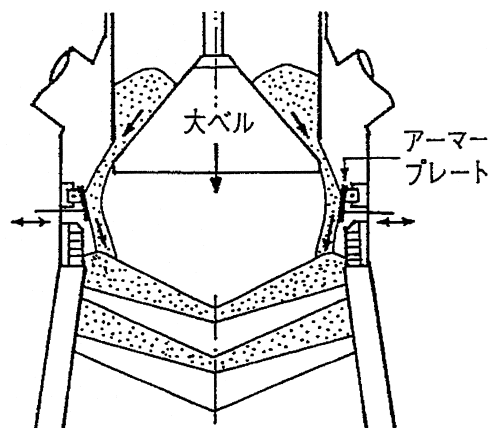


図4 大ベル式装入装置による通常の原料装入状況

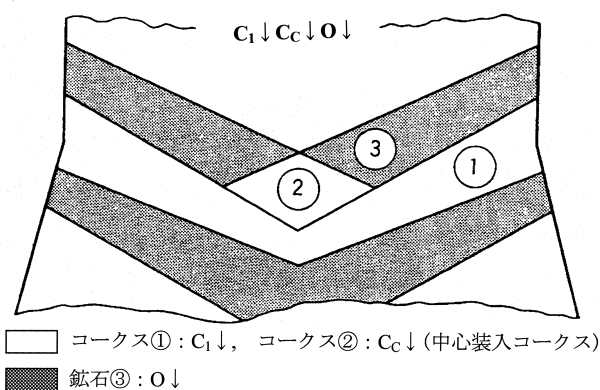


図5 コークス中心装入法を用いた原料装入の考え方

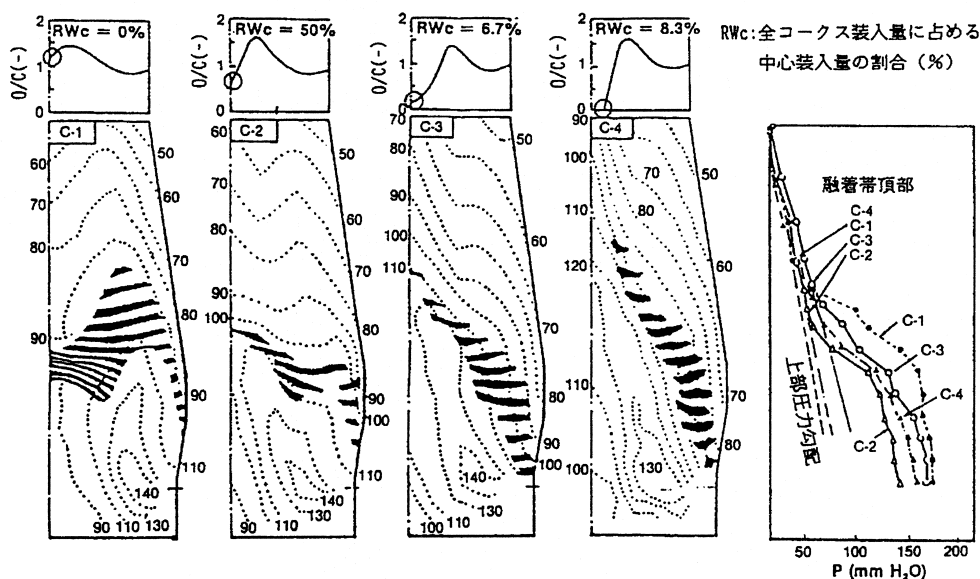


図6 炉内の温度分布、軟化融着帯形状および圧力分布に及ぼす中心部のO/Cの影響
(高炉模型の縦断面図中の点線は熱間模型実験における等温線(℃)を示す)

化融着帯を形成させる上で有効な手段であることが認められる。

これらの結果は、コークス中心装入法が軟化融着帯形状や圧力損失のコントロールに極めて有効な手段であることを示すとともに、高炉の制御性を飛躍的に向上させる上での制御ポイントを明らかにした点で非常に重要な知見といえる。とくに、このコークス中心装入法が従来のアーマープレートを用いた制御法に比べて優れている点は、中心部へ装入するコークス量を自由に調整することによって、中心部のO/Cを容易にかつ確実に制御できることである。さらに、実操業においても、高炉操業者はコークス中心装入法と従来のアーマープレートを併用することにより、軟化融着帯の形状はもとより高炉中心部および周辺部のガス流れをそれぞれ独立に制御することができ、高炉の反応効率や熱効率を最大限まで追究しうる可能性を提示したのといえる。

4 炉芯コークス層の制御

高炉の操業状態や炉体寿命を支配する炉芯コークス層の制御法を開発するには、炉芯の充填メカニズムを解明することが不可欠であり、この命題を達成することが新たな高炉操業の道を開く鍵ともされていた。この課題に対し、筆者らは、高炉内におけるコークスの降下特性を基礎的に究明し、「炉芯は高炉の中心部を降下するコークスによって形成される」という炉芯の充填メカニズムを明らかにした。

この成果は、「コークス中心装入」という手法を用いることによって、軟化融着帯だけでなく炉芯の通気・通液性をも同時に制御できることを示しており、従来、高炉操業者が熱望していた課題を一挙に解決したことになる。以下にその内容を解説する。

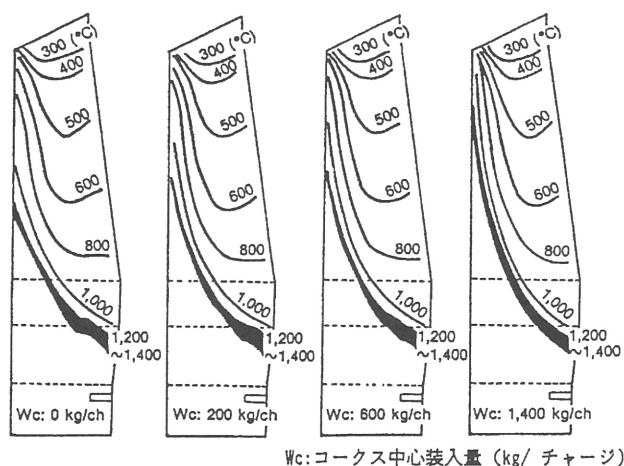


図7 炉内の温度分布に及ぼすコークス中心装入の影響 (シミュレーション計算結果)

4.1 高炉内装入物の降下挙動

図8 (a) に高炉内装入物の基本的な降下特性を示す。この図は、筆者らが独自に考案した固体流線可視化法による実験で捕らえたもので、炉芯制御法開発の基礎となったものである。ここで固体の流線に着目すると、装入物は炉頂部からレースウェイ部までほぼ定まった位置を降下しており、炉芯表層部を流れる粒子は図8 (b) に示すように炉頂部の中心領域に装入したものに限定されている。このような降下状態で炉芯がゆっくりと下方に降下すれば (コークスの運動は極めて遅く、その全体の入れ替わる期間は2~3週間といわれている¹⁾)、炉芯部へ供給される粒子はそのほとんどが炉中心部を降下してきたものに限定され、この粒子によって炉芯が更新されていることになる。このような炉芯充填のメカニズム (仮説) を立証するために高炉炉床模型が製作され、炉芯の更新および炉芯制御に関するモデル実験が行われた。

4.2 炉芯コークス層の充填機構

実高炉と同様な炉芯の降下がシミュレートできる図9に示す高炉炉床模型を用い、コークス中心装入法による制御法を検討した結果が図10である。炉口中心部に装入されたトレーサー・コークスは炉芯の頂部に至ると炉芯斜面に沿って羽口部へ放射状に降下するが、その過程でゆっくり降下する炉芯内に取り込まれ、炉芯が次第にトレーサー・コークスによって更新されている。また、トレーサー・コークスによる炉芯の更新領域は炉頂部におけるトレーサー・コークスの装入半径 (r_c/R_t 、ここで r_c : 装入半径、 R_t : 炉口半径) に大きく依存し、その増大とともに更新領域が拡大している。この図10の結果は、前述した炉芯の充填メカニズム (仮説) を実験的に立証したもので、コークス中心装入法が炉芯制御の最も効果的な手段であることを呈示している。

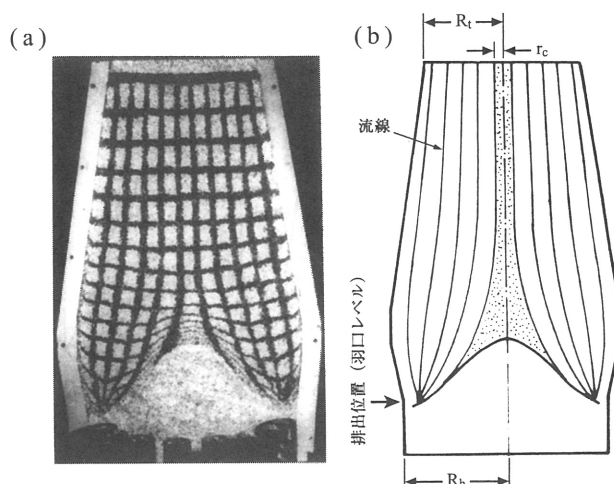


図8 高炉内における固体粒子の降下特性 (流線と等時間線)

さらに、図11は炉芯内に流入したトレーサー・コークスの半径方向における濃度分布を示したものであるが、ここで特に重要な知見は、 r_c/R_t が0.12程度の装入条件で炉芯のほぼ全域が80%以上の濃度まで更新されるという点であり、これは僅かなコークス中心装入量で炉芯の制御が可能であることを示している。

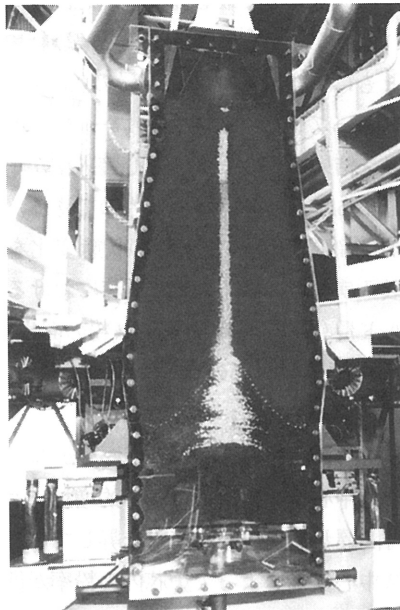


図9 高炉炉床模型実験装置の外観

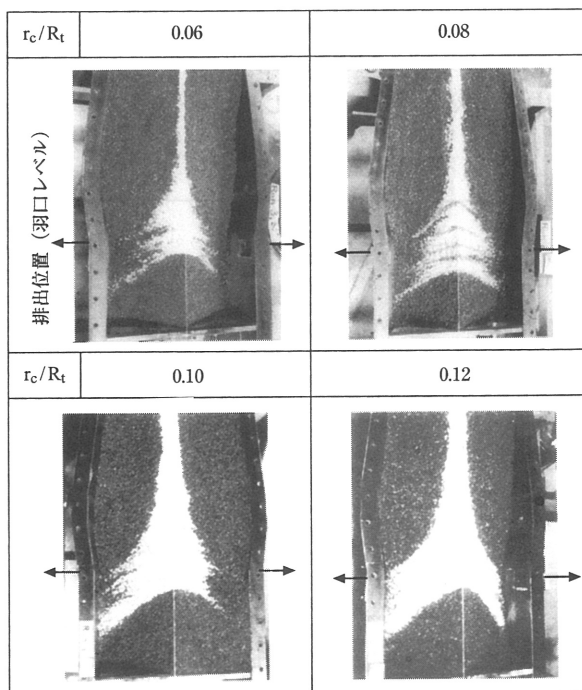


図10 中心部に装入されたトレーサー・コークスによる炉芯の更新状況
(r_c : コークスの中心装入半径、 R_t : 炉口半径)

この知見は、高炉操業上極めて重大な意味を持っている。操業上特に重要とされる炉芯コークス層の通気・通液性を良好に維持するために、目的に即したコークス（高品質コークス）を少量炉口中心部に装入するだけで目的が達せられ、その他の領域には低品質コークスが使用できるという可能性も期待でき、高炉の経済性を飛躍的に高めることができる。

5 実証試験と実用化

実証試験は加古川No.2高炉（内容積3850 m³）において1.5ヶ月にわたって実施された。炉中心部へのコークス装入は図12に示すような装入シーケンス $C_1 \downarrow C_2 \downarrow O_1 \downarrow O_2 \downarrow$ (C : コークス、 O : 鉱石、 $\downarrow$ は大ベルからの落下を示す) の $C_2 \downarrow$ の直後に行った。この方法は、次に装入される鉱石の炉中心部への流入を、中心装入したコークスの山でせき止め、中心部の O/C を局所的に低下させることを狙っている。

図13に、コークス中心装入量を30 kg / チャージから

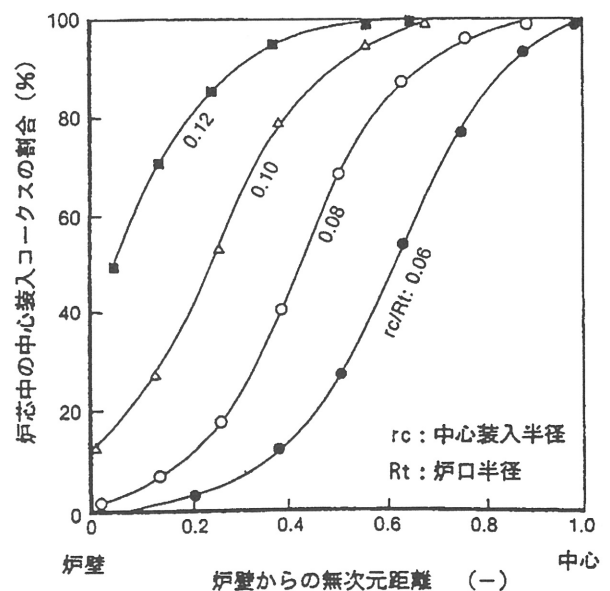


図11 炉芯内におけるトレーサー・コークスの濃度分布

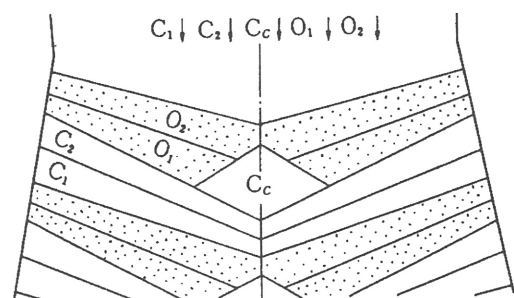


図12 実証試験操業における中心装入シーケンス

150 kg /チャージまで段階的に増大させたときの炉内状況指数の変化を示す。1チャージ当たりのコークス装入量(30ton)に対して極めて僅かな中心装入量であるにもかかわらず、すべての炉内状況を示す指数が低下し、特に風圧変動とスリップの減少が著しい。

図14は垂直水平ゾンデによって測定した炉内温度分布の変化である。軟化融着帯の形成温度に対応する1200℃の等

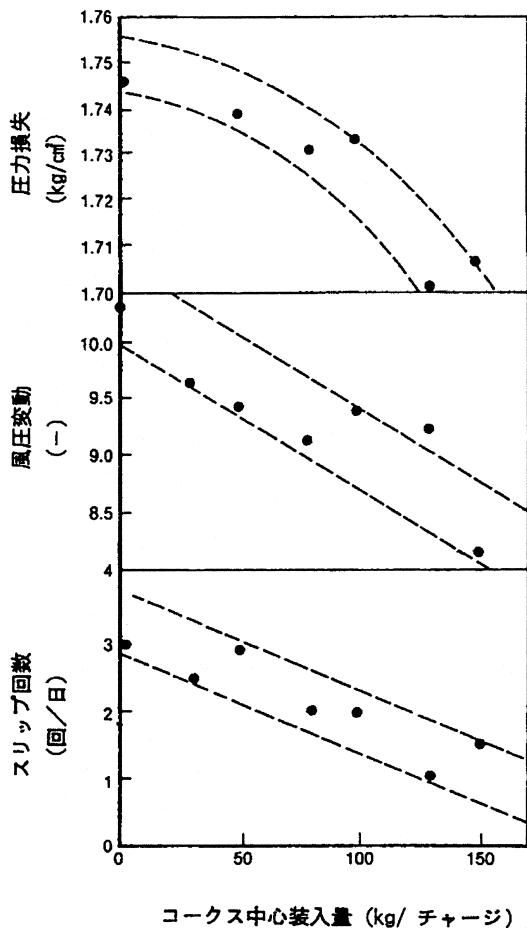


図13 実証試験操業における圧力損失、風圧変動およびスリップ回数とコークス中心装入量との関係

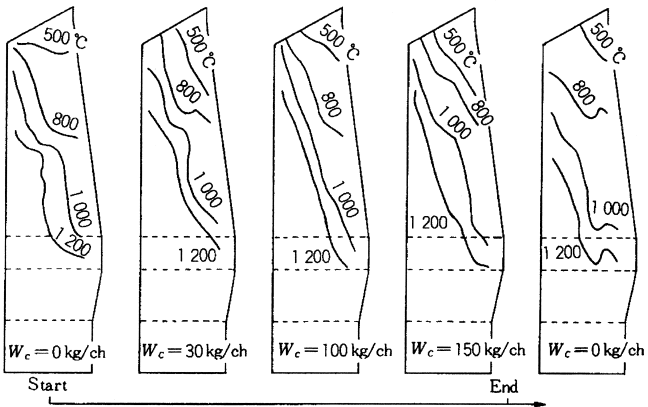


図14 コークス中心装入時の炉内温度分布の変化

温線は、コークスの中心装入量の増大とともに炉下部周辺部から炉頂に向かって直線的に伸びるようになり、軟化融着帯形状が典型的な逆V型に変化している。

一方、コークス中心装入による炉芯制御の可能性を検証するために、中心装入コークス中にトレーサーとしてPetroleum cokeを添加し、実証試験操業終了時に炉芯サンプリングを行って炉芯内への流入量を調べた。図15は炉芯内に流入したトレーサー・コークスの半径方向における濃度分布であるが、炉芯中心部で最も高く、周辺部に向かって急激に低下している。この分布形態は、模型実験結果とよく対応しているとともに、全コークス装入量の0.5%という僅かな中心装入量によって、炉芯中心部のコークスが10%以上更新されるという結果は、コークス中心装入法が炉芯制御の上で重要な技術であることを実証するものである。

また、図16には炉芯コークス層の状態変化を示すが、コークス中心装入実施時(●印)には炉芯におけるスラグとメタルのホールド量(図中(a))、コークス粉の発生量(図中(c))が低下し、逆に炉芯中央部のコークス温度が上昇している(図中(b))。

さらに、図17には、炉底中央部のれんが温度の推移を示すが、コークス中心装入量のステップ的增加に対応して、約7～10日の時間遅れで、炉床温度が上昇している。この結果は、コークス中心装入によって炉芯内の粉率が低下し、炉芯中央部の通液性が改善されたことを示している。

実証試験の結果を受けて、加古川No.2高炉への本格的導入が決定され、1988年8月よりコークス中心装入法を用いた新しい高炉操業が開始された。

図18はコークス中心装入システムのフローである。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

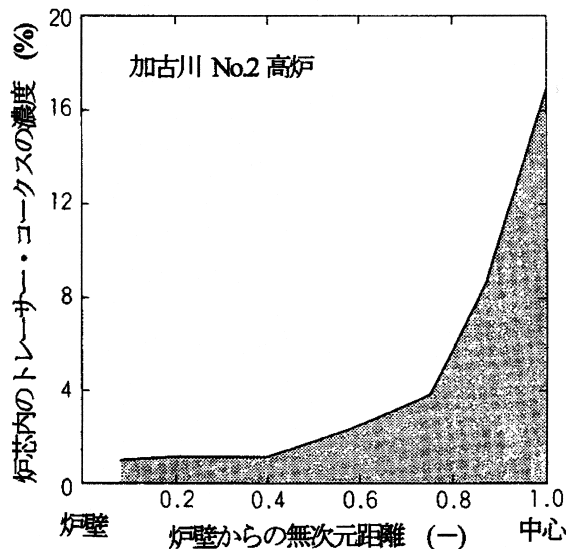


図15 実証試験後に測定された中心装入コークスの炉芯内濃度分布

先端からバイパスさせ、いったん貯蔵ホッパーに蓄えた後、必要量が装入用ランスから炉中心部へ装入される。

新しい高炉操業の開始後、中心ガス流が強化・安定し、スリップ回数や中心ガス温度の変動も減少して、炉況は極めて順調に推移し始めた。微粉炭吹き込み量も設備能力の限界まで増大でき、銑鉄中Si%を低位に安定させることができた。

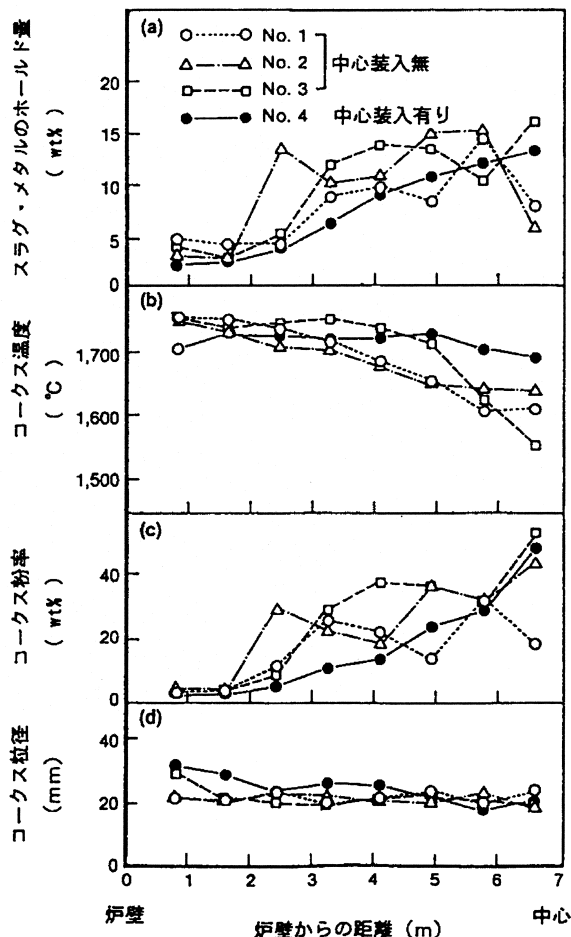


図16 コークス中心装入による炉芯内の状態変化

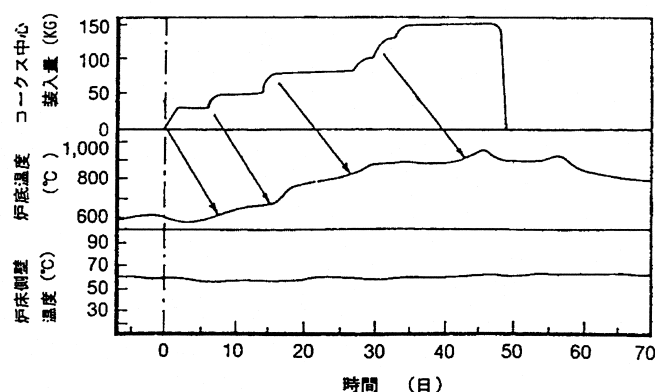


図17 コークス中心装入量の増大に伴う炉底れんが温度の変化

6 コークス中心装入技術の意義

コークス中心装入法による新しい高炉操業理論は図19のようにまとめることができる。

炉口部中心部に、大バレル装入とは別系統で、少量のコークスを装入することにより、高炉中心部のO/Cが減少して通気抵抗が低下する。その結果、中心ガス流が強化・安定し、逆V型軟化融着帯を形成しやすくする。また、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CO₂ガスにより、カーボン・ソリューション・ロス (CO₂+C→2CO) 反応を受ける。この反応を激しく受けたコークスは気孔が増大して強度が低下し、著しい粉の発生をもたらす。特に、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多量の粉を持ち込み、炉芯の通気・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

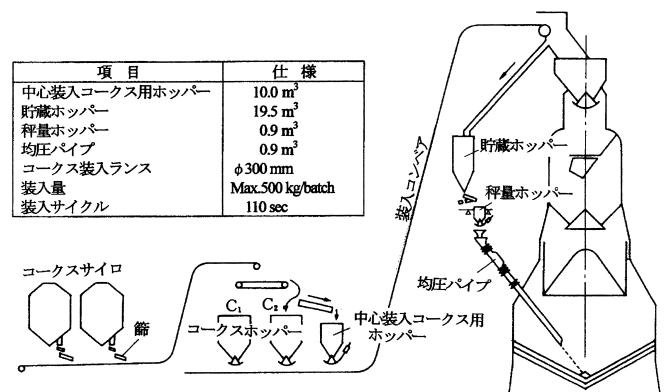


図18 加古川No.2高炉に装備されたコークス中心装入設備のフロー

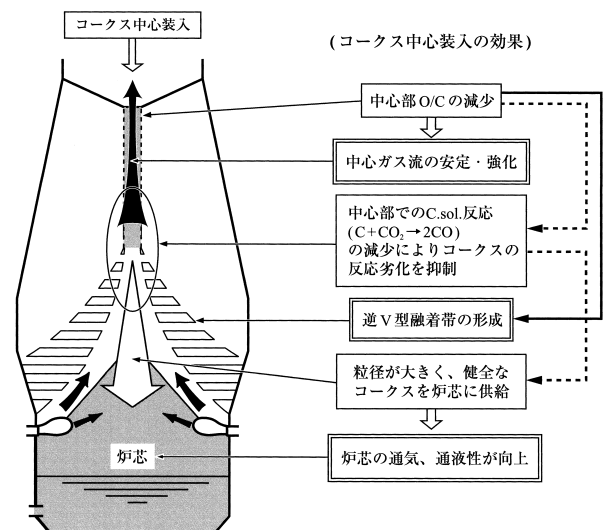


図19 コークス中心装入による新しい高炉操業理論

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、炉芯の通気・通液性が向上し、出銑に伴う炉床部の溶銑の流れは中心部を通過する流れとなり、環状流が抑制され、炉床壁の損傷を抑制できる。

7 結言

筆者らは高炉の安定性、制御性、経済性を一層高めるために、炉内現象を支配している装入物の基本的降下挙動やその役割について、長期にわたり精力的に研究を進めた。その結果、高炉の安定操業にとって最も重要とされる軟化融着帯形状や、従来制御困難とされてきた炉芯コークス層の通気・通液性を容易、かつ確実に制御できる技術「コークス中心装入法」の開発に成功した。

この技術は、新しい高炉操業への道を開く革新的技術として注目され⁶⁾、国内外の多くの高炉で採用された。また、「低廉原料の多量使用」や「高炉寿命の延長」、さらには「酸素高炉プロセスへの適用による次世代超高出銑比高炉の実現」など、今後の鉄鋼技術の発展に大きく貢献していくもの

と期待される。

なお、本研究・開発に対し、米国・AIMEより1988年度最優秀技術論文賞を、また、財団法人大河内記念会より1990年に大河内記念技術賞を授与されたことを付記する。

参考文献

- 1) 羽田野道春：叢書鉄鋼技術の流れ①高炉製銑法，日本鉄鋼協会，知人書館，(1999)
- 2) 稲田隆信：鉄と鋼，81 (1995)，270.
- 3) 稲葉晉一：ふえらむ，8 (2003)，389.
- 4) 成田貴一，稲葉晉一，小林 勲，沖本憲市，清水正賢，矢場田 武，玉田慎一：鉄と鋼，65 (1979)，358.
- 5) T.Uenaka，H.Miyatani，R.Hori，F.Noma，M.Shimizu，Y.Kimura and S.Inaba：I & SM，(1988) November，34.
- 6) 緒方 勲，讃井政博：ふえらむ，8 (2003)，818.

(2004年6月21日受付)