

高炉炉下部における ブラックボックス解明の試み

山口一良

新日本製鐵(株) プロセス技術研究所
主幹研究員

Kazuyoshi Yamaguchi

Approach to Elucidate Black Box in Lower Part of Blast Furnace

1 はじめに

ブラックボックスといわれる高炉内で、その色彩の強い炉下部、中でももっとも色彩の濃い「炉芯」と呼ばれる固・気・液体共存高温域での物理化学現象の制御技術を開発し、高炉制御性向上の結果としての生産弾力性向上・極限操業への接近・資源対応弾力性向上・CO₂排出抑制等の効果を狙うことは、製鉄技術部門に残された大きな課題の1つである。これは鉄鋼協会「製鉄技術検討会」(1991.6～1993.11)における活動の結果として提案された諸課題の1つでもあり、その課題解決に向けた検討を行うことは喫緊の要望であった。この要望に応えるために、鉄鋼各社の技術者・研究者と、製鉄関係の研究に携わっている大学の先生とを合わせた20名程度が集まり、産学のパワーをもっとも効果的に結合した検討を行い、判明した知見を取り纏めることにより、極めて有益度の高い成果を得ることができた。

本解説では、検討した結果に基づいてかなり断定的な記述をしているが、これらの事項は鉄鋼各社・大学の技術者・研究者間で必ずしも統一された見解ではないことを付け加えて、今後のさらなる研究・開発に期待したい。

2 高炉の「炉芯」とは?

高炉の「炉芯, Deadman」とは、高炉炉下部の中心部に存在する入れ替わりの遅いコークス充填領域であり、溶鉄・スラグはこの高温領域を滴下して出鉄口より排出される(Fig.1¹⁾)。近年、溶鉄製造コスト低減を目的として、羽口部から熱風とともに微粉炭(粉の石炭)を多量に吹込む技術が実施され、炉芯の役割がさらに重要であると認識されるようになった。

現在、高炉炉下部における現象に起因すると考えられる操業上の問題点は、主として2つ存在する。その1つは「炉

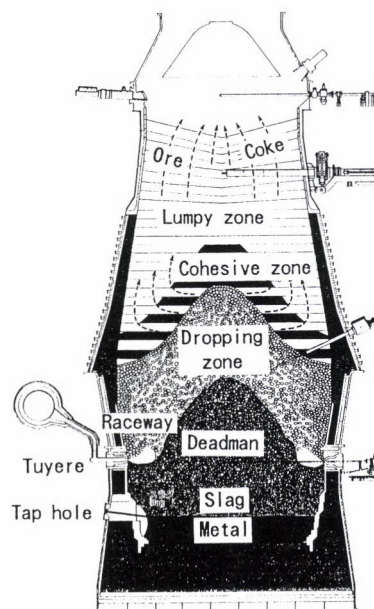


Fig.1.General view of the inner state of blast furnace¹⁾.

芯不活性」と呼ばれ、炉芯内の温度が低下し通気・通液性が悪化して生産量が低下する現象であり、もう1つは、炉床側壁部における溶鉄流が発達してレンガ浸食を促進するため、レンガ残存厚みが減少して高炉の寿命を縮める原因となり、結果として生産量が低下する現象である。

これらの問題点を解決するための操業上のアクションは基準化されているものの、炉下部における現象が未解明のため、対症療法にならざるを得ないことと、アクションの効果が常に同一ではないため、過剰なアクションにより結果として生産量低下、燃料比上昇の幅が大きくなってしまいう欠点をもっている。

炉芯内の通気・通液性の制御、炉床側壁・炉底部の溶鉄流の制御技術を開発し、制御精度を向上させるために解決

すべき課題とその解決方法を提示するのが、本検討の大きな目的である。

3 高炉操業における炉芯の役割の明確化

炉芯の機能として、①高炉炉熱のバッファー、②中心部融着層降下時の受け皿、③微粉炭由来の未燃チャーの消費等が挙げられるものの、充填構造の変化および温度レベルによってはスラグが流下しない、あるいは入れ替わりが遅いためコークス燃焼領域としての役割を果たさないといった不具合な点も合わせもっている。

そこで、高炉操業における炉芯の役割を明確にし制御上の基礎的知見を得るために、炉芯充填構造が炉芯内ガス流れ・粉の移動・伝熱、および炉床側壁・炉底部における溶銑の流動・伝熱に及ぼす影響を解明すべく、数学モデルシミュレーションを実施した。

3.1 炉芯内ガス流れ・粉の移動・伝熱に及ぼす炉芯充填構造の影響

鉄鋼協会製銑部会「4流体の移動現象研究会」の研究成果として、『高炉の流動・伝熱シミュレーションにおける4流体モデリング』²⁾が提出され、炉芯を含む高炉内における4流体(固・気・液・粉体)の流動・伝熱解析が可能な数学モデルが開発された。このモデルを用いて、炉芯充填構造を変化させたときの炉芯内ガス流れ・粉の移動・伝熱におけるクリティカルな変化(単調な増加・減少ではない不連続的な変化)を検出するケーススタディを試みた。その結果を次に述べる。

(1) 炉芯内コークス粒径、炉芯内空隙率の影響

炉芯内空隙率がほぼ一定で、コークスの平均粒径を40~15mmの範囲で変更すると、粒径減少に伴い炉芯内へのガス侵入割合は減少するが、炉芯内ガス温度分布でみる

限りクリティカルな変化はない。次に、粒径30mm一定で空隙率を0.45~0.15の範囲で変更した。これは、コークス中へのスラグ・メタル・粉等の堆積による空隙率低下に対応する。空隙率低下により炉芯内へのガス侵入割合は減少し、炉芯内ガス温度分布でみると、空隙率0.20以下で炉芯内に2073K以下の低温領域(横線)が生じ炉芯不活性を示唆する(Fig. 2³⁾)。

この結果から、炉芯不活性防止のためにはコークス粒径よりも空隙率を確保するほうが効果的であり、空隙率の下限は0.30と推定される。

(2) 未燃チャー粒径の影響

微粉炭吹込み量150kg/t-pig、燃焼効率75%の条件で、25%の微粉炭由来未燃チャー(密度100kg/m³)がレースウェイ奥で発生するとし、未燃チャー粒径を0.1~3.0mmの範囲で変更した。チャー粒径増大とともに炉芯内でのチャー存在密度は高くなり炉内圧損が増加する。これは、粒径増大とともに粉自身の運動量およびガス流との相互作用力が増加するためであるが、粒径0.5mmでの増加に比較してそれ以上の変化は小さい。したがって粒径の上限は0.5mmであると推定されるが、現在一部の高炉を除いて微粉炭粒径は0.1mm程度であり、今後の微粉炭粗粒化時に留意すべき項目である。

本モデルでは、粉体の動的ホールドアップのみを考慮し層中への蓄積を表現できず、レースウェイ奥で発生した未燃チャーは炉芯内を通過しすべて炉上部に移行する。しかし炉芯内におけるチャー存在密度の増加は、実際にはチャーの炉芯内への蓄積増加に繋がると考えられ、微粉炭粒径の上限管理は必須である。

(3) 粉コークス粒径の影響

未燃チャーの代わりに、同量の粉コークス(密度500kg/m³、発生量に換算して10.7%)がレースウェイ奥で発生するとし、粒径をチャーと同様に変更した。粒径0.5mmでの炉内圧損上昇はチャーと同じであるが、チャーと異なる挙動は粉コークスの流動に現われ、粒径0.5mmの場合レースウェイ奥で発生した粉は炉芯内を通過し、すべて炉上部に移行するが、粒径1.0mmを超えると粉は炉芯内の弱いガス流に同伴されずほとんどが炉底部へ流入する(Fig. 3³⁾)。発生量を変化させてもクリティカルな現象の生じる粒径0.5mmの値は変わらない。

炉底部に流入した粉は炉芯内下部に蓄積すると考えられ、この領域の不活性を生じる可能性がある。一方羽口レベルより上部の炉芯内は粉がほとんど存在しないため活性状態が維持される。現在、実炉のレースウェイで発生した粉コークスは1.0mm以下のものが多いが、1.0~3.0mmの部分も相当量存在し、上述した現象が実炉で起こっている

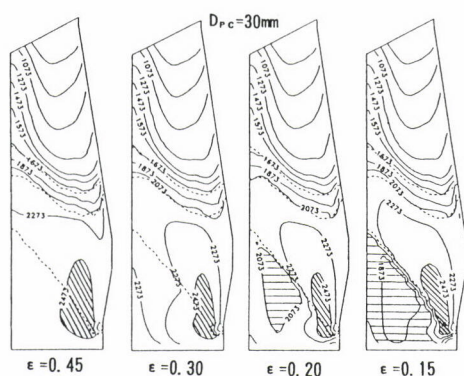


Fig. 2. Estimated results of gas temperature distribution with change of coke void (ϵ) in the deadman³⁾.

可能性は十分考えられる。

すなわち、羽口レベルより上部の炉芯充填構造が良好でも下部の充填構造が悪いケースが想定され、両領域の検出・制御が必要となるとともに管理を困難にする。このような状態を招かないように、コークス粉化抑制、とくに1.0 mm以上の粉発生抑制は極めて重要である。

3.2 炉床側壁・炉底部における溶鉄の流動・伝熱に及ぼす炉芯充填構造の影響

『高炉炉床部 3 次元流動・伝熱モデル』⁴⁾を用いて、炉芯充填構造を変化させたときの炉床側壁・炉底部における溶鉄の流動・伝熱におけるクリティカルな変化を検出するケーススタディを試みた。

炉芯を含む炉床側壁・炉底部充填構造として、①コークス粒径を30～15mm、空隙率を0.4～0.2の範囲で変化させた場合、②空隙率0.4一定で炉芯部(中心部)と周辺部のコークス粒径に差をつけた場合、③炉底コーナー部にコークスフリースペース(溶鉄単味層)形成、あるいはさらに炉芯浮上(炉底全体にフリースペース形成)の場合を設定したが、

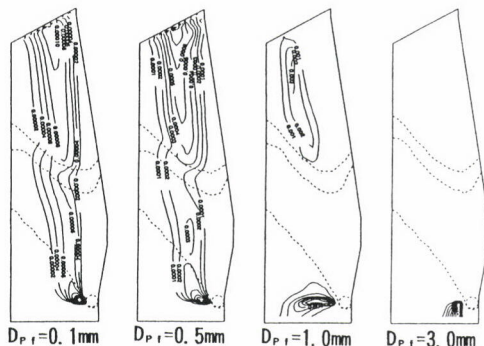


Fig. 3. Estimated results of fines volume fraction with change of fine coke diameter (D_{Pf})³⁾.

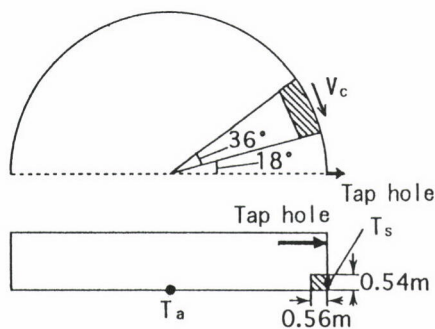


Fig. 4. Region in the hearth bottom for estimating the molten iron flow rate (V_c) and the hearth brick temperature (T_s)⁵⁾.

溶鉄の流動・伝熱にクリティカルな現象は生じなかった。

炉床側壁・炉底部の現象はもっと極端な充填構造により変化することを示唆している。なおFig. 1 に示すように、炉床側壁・炉底部ではコークス充填層中に溶鉄・スラグの存在するのが一般的であるが、炉底部でコークスが浮上し(炉芯浮上と称する)溶鉄単味層が形成されることがあり、これをコークスフリースペースと称している。

次に、炉床側壁・炉底部全域のコークス粒径30mm、空隙率0.4を基に、炉芯部(中心部)にコークス粒径5mm、あるいは溶鉄がまったく流下しない溶鉄不透過層を設定し、実炉での炉床側壁部れんが温度上昇の部位に対応する領域(Fig. 4⁵⁾、斜線)の溶鉄平均流速(V_c , mm/s)とれんが内面温度(T_s , °C)を算出した。実炉でみられる出鉄口下部の炉床側壁部の温度上昇は、この領域を流れる溶鉄流速が極端に速くなり、休風等により溶鉄停滞層を形成しても送風時にすぐに破壊されてしまうことによると考えた。

Fig. 5 (a)⁵⁾に示すように、炉芯部に溶鉄不透過層を設定しても、炉芯が完全に炉底に接地しているときは炉床側壁部に V_c の極端に速い(>10 mm/h)領域は生じないが、フリースペース形成・炉芯浮上の場合は $V_c > 10$ mm/hの領域が炉床側壁部に生じる{Fig. 5 (b), (c)⁵⁾、斜線}。Fig. 6⁵⁾に V_c と T_s の関係を示す。炉芯が完全に炉底に接地している場合は、炉芯不活性にかかわらず V_c および T_s はそれほど増加しない(●印、1.0mm/s, 1000°C程度)。これに対してフリースペース形成・炉芯浮上のときは、活性炉芯(コークス粒径30mm)の場合、 T_s は増加するが(1050°C程度) V_c 増加は小さい(1.5mm/s程度)。不活性炉芯(コークス粒径5mm, 溶鉄不透過層形成)の場合、 T_s 増加は同程度であるが V_c が極端に増加し(3.0mm/s程度)、れんがが浸食増大を示唆する(○、●印)。

炉芯が完全に炉底部に接地している状態では、たとえ炉芯不活性に陥っても炉床側壁部のれんがが浸食増大(温度上昇)を招くことはないが、フリースペース形成・炉芯浮上の状態になると、炉芯不活性を抑制しない限りれんがが浸食増

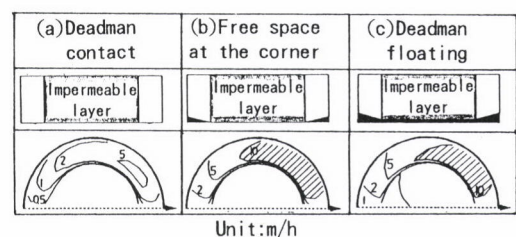


Fig. 5. Relation between the deadman structure and the estimated molten iron flow rate distributions in the hearth bottom⁵⁾.

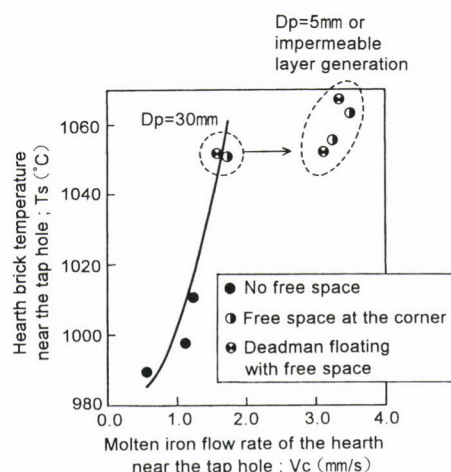


Fig. 6. Relation between the estimated molten iron flow rate and the estimated hearth brick temperature⁵⁾.

大の可能性は極めて高い。ただし、炉床側壁部の平均溶銑流速が溶銑停滞層の破壊に及ぼす影響の実験的検証が今後必要である。

4 実炉における炉芯充填構造の操業に及ぼす影響

4.1 炉芯不活性を表わす操業指標

現在、実炉操業中に炉芯状況を検知する代表的指標は、炉底中心部れんが背面温度(T_a)と出滓率(出銑口からの溶銑流出時間のうちスラグが同時に流出している時間の割合)であるが、炉芯内の温度が低下し通気・通液性が悪化して生産量が低下する現象(炉芯不活性)は、ある高炉の操業解析によると、 T_a ・出滓率が低いときと整理でき(Fig. 7⁶⁾、■印)、温度低下による炉底部温度低下、スラグ流動性悪化の結果と考えられる。

しかし T_a と出滓率の関係を示す図を鉄鋼各社の代表的な高炉のデータで作成すると、Fig. 7に示す関係は得られるが、図の左下の領域で通気・通液性が悪化して生産量が低下する事例はほとんどない。その事例のない高炉において、休風時の羽根部採取コークスの調査により、炉芯充填構造を表わすコークス粉率(−3mm)とスラグ・メタル含有率を測定したデータによると、粉率が高く含有率が多い場合(炉芯不活性徴候と判断できる)、 T_a ・出滓率が低いとは限らない。

これらの結果から、炉芯不活性を表わす操業指標は別に導出する必要のあることがわかる。

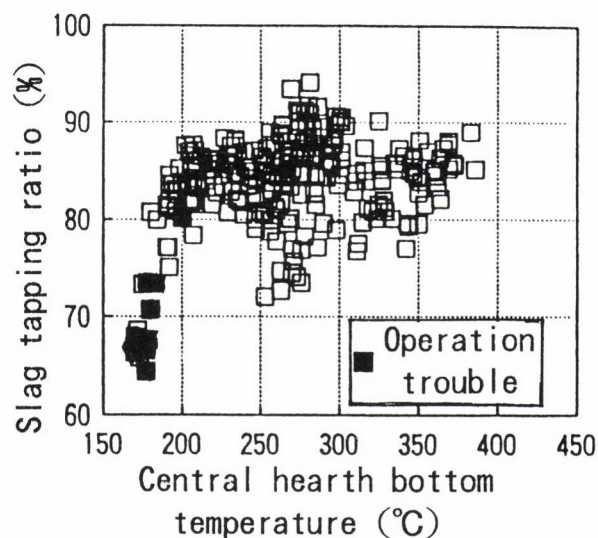


Fig. 7. Relation between the central hearth bottom temperature and the slag tapping ratio in the actual furnace⁶⁾.

4.2 炉芯充填構造を表わす新しい概念

鉄鋼各社の高炉において、炉芯不活性に至らないまでも複数の出銑口から流出する溶銑滓の量、品質(温度, [%Si])のアンバランスの程度が大きくなる現象にはかなり事例が多く、「出銑口間差の発生」としてその抑制に努めている。このアンバランスの程度が大きくなると通気・通液性悪化に至る。

この現象は、「炉床に溶銑滓の不透過層が部分的に存在する」という仮定を設定することにより合理的に説明できた(Fig. 8⁷⁾)。そこで鉄鋼各社の代表的な高炉において、出銑口間差が発生している操業を溶銑滓不透過層を設定して解釈すると、ほとんどの高炉で合理的な説明が可能であることがわかった。

3.2の数学モデルシミュレーションで設定した炉芯全体(中心部)の溶銑不透過層の概念は、実炉においてその層がアンバランスに存在し、炉床側壁・炉底部における溶銑滓の流動に大きな影響を及ぼすことが間接的に検証されたといえる。まだ実炉におけるこの層の検知例はないが、この概念は高炉解体調査で発見された「融着帯」に匹敵する重要な概念と考えられ、今後の高炉炉下部現象の解明・制御のための基本的概念として、その検知は今後の大きな課題の1つである。

5 炉芯不活性に及ぼす操業条件の影響の普遍化

5.1 炉芯内温度に及ぼす操業条件の影響

4.1で述べたように、炉芯不活性になりやすい高炉となり難い高炉が鉄鋼各社に存在する。その差の解明のために

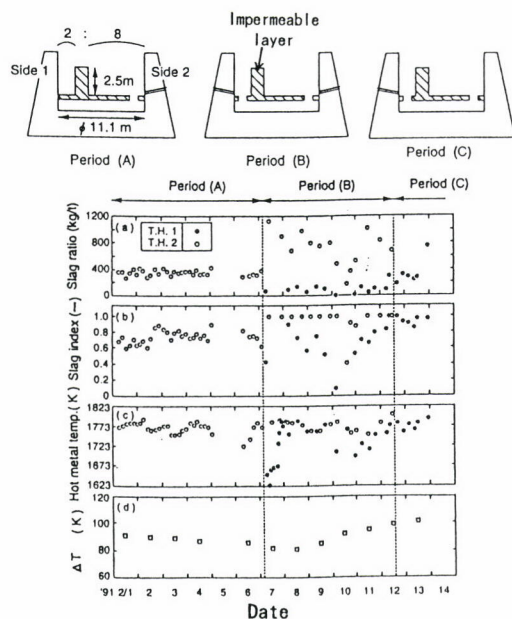


Fig. 8. Relation between the operating transitions and the estimated impermeable layer in the deadman⁷⁾.

『2次元軸対象の流動・伝熱・反応・原燃料粉化を考慮した融着帯モデル』⁸⁾を用いて、内容積がほぼ同じで炉芯不活性になりやすいA高炉となり難いB高炉を対象高炉として取り上げ、炉芯内温度に及ぼす高炉操業条件の影響の検討を試みた。

両高炉の出鉄比・微粉炭比がほぼ同じ期間のデータには、①燃料比はB高炉が高い(28kg/t-pig)、②中心部O/C(鉄鉱石とコークスの装入比率)はA高炉が高く、B高炉は低い、という2つの特徴がある。炉芯不活性を表わす指標となり得る羽口中心レベルの炉芯内溶融物温度とコークス粒径を比較すると、どちらもA高炉の値が小さく炉芯不活性になりやすい状態を表現している。

さらに燃料比と中心部O/Cの影響を分離するために、A高炉の操業条件(高中心部O/C, 低燃料比)を、B高炉(低中心部O/C, 高燃料比)に近づける操業設計を行い、再度シミュレーションを実施した。Fig. 9⁹⁾に炉芯内溶融物温度と燃料比の関係を示す。この図のプロットは中心部鉱石層厚比 $\{Lo/(Lo+Lc)\}$ で層別してあるが、溶融物温度は燃料比によらず $Lo/(Lo+Lc)$ の低いときに上昇する。ただし $Lo/(Lo+Lc)$ の低いときは、燃料比増加により溶融物温度はさらに上昇する。

すなわち、 $\{Lo/(Lo+Lc)\}$ によって炉芯不活性のなりやすさが変わり、 $Lo/(Lo+Lc)$ の低いほうがなり難く、燃料比によってなりやすさは変わらない。ただし、 $Lo/(Lo+Lc)$ の低い場合は燃料比増加によってさらになり難くなる。

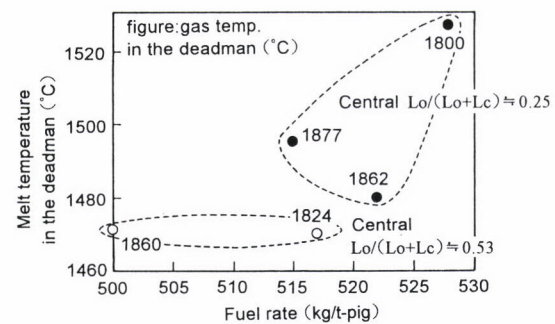


Fig. 9. Relation between the fuel rate and the estimated melt temperature in the deadman⁹⁾.

5.2 炉芯不活性状態からの回復操業の評価

前述した「4流体の移動現象研究会」の研究成果として、『高炉炉芯の伝熱機構とその支配要因』¹⁰⁾が提出され、高炉炉芯内の伝熱解析が可能な数学モデルが開発された。このモデルを用いて、炉芯不活性となり炉芯内温度が低下したときに、その状態を回復させる操業評価のためのケーススタディを試みた。FeOの吸熱領域を炉芯上部、炉芯内ガス流速を0.1m/sとし、スラグ中FeO含有量を13～1%の範囲で変更した。

Fig. 10¹¹⁾に示すように、定常状態に達したときの炉芯内固体温度分布における1350℃以下の領域(斜線)はFeO=4%(還元率=98.97%)まではあまり変化なく、FeO=1%(還元率=99.73%)で急激に縮小する。すなわち、炉芯不活性状態回復のためには炉芯上部のスラグ中FeO(鉱石還元率)を極端に低いレベルに維持する必要があることを示しており、実炉での大幅な燃料比上昇アクションに対応している。

また、①高炉炉芯温度低下の状態を回復させるためには炉芯内にガスを流すことが前提で、ガス流速0.1m/s程度でも効果が大きい、②ガス流れがなく熱伝導のみの伝熱しか期待できない炉芯では回復は不可能であることもわかった。

6 炉芯浮上を支配する要因の明確化

3.2で述べたように、炉底コーナー部のフリースペース形成・炉芯浮上は、炉床側壁部のレンガ浸食にとって好ましくない。そこで、フリースペース形成・炉芯浮上の起こる条件策定を、弾塑性理論を用いた高炉充填層内応力解析手法¹²⁾を用いて実施した。高炉3次元数学モデル¹³⁾を用いて羽口より上部の融着帯形状を含む充填状態・ガス抗力を推定し、そのデータを用いた充填層内応力解析により羽口レベルにおける半径方向の垂直荷重分布を推定した。羽口レベルより下の炉底部のコークス・スラグ・溶鉄の充填構

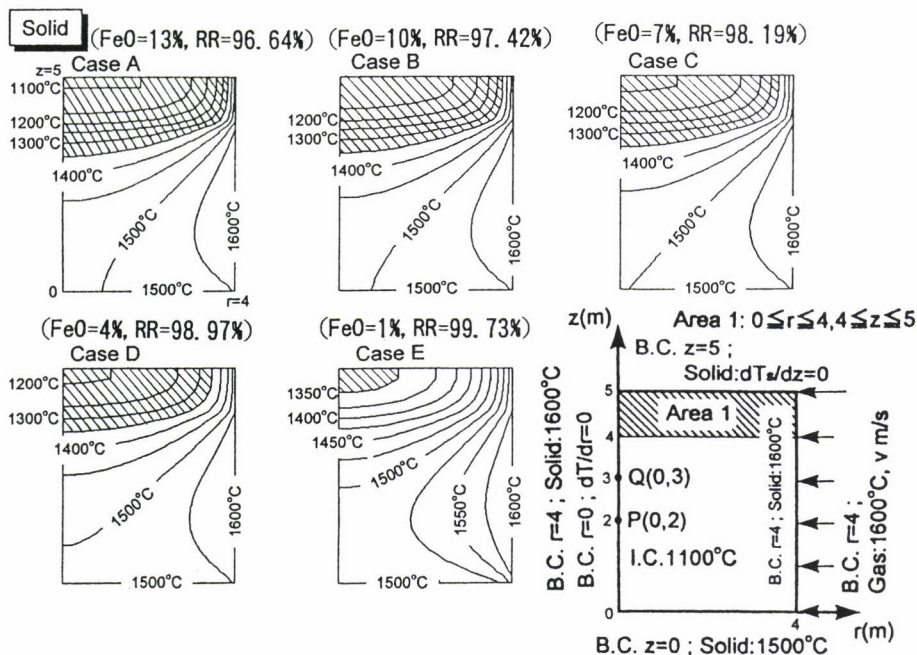


Fig. 10. Schematic diagram of the simulation model of blast furnace deadman and estimated results of solid temperature in the steady state¹¹⁾.

造を設定して、垂直方向の力学バランス計算により炉芯コークス沈下量分布(炉芯下面形状)を算出した。

Fig. 11¹⁴⁾に、出鉄口から炉底までの深さが無限であるときの炉芯下面形状の推定結果を示す。下面形状は力学バランスが取れた状態を示し、この形状(線)より下部が溶銑単味層、上部がコークス充填層(炉芯)である。炉芯内空隙率(ϵ)が低い(炉芯不活性に対応、破線)ほうが下面形状が上方にあり、炉芯が浮上しやすいといえる。また出鉄口から炉底までの深さが有限で下面形状より炉底深さが浅い場合は、炉芯が炉底に接地していることになる。解析対象高炉の建設時の出鉄口から炉底までの深さは1.83mであり、現在炉底れんが浸食により3.8m近くまで深くなっているとしても、図から炉底中心部で炉芯は炉底に接地していると考えられる。これに対して炉底周辺部はほとんど浮上状態にある。

本計算は垂直方向の力学バランスだけで、荷重の水平方向への分散、および溶銑中コークスの安息角の影響を考慮しておらずFig. 11はかなり極端な推定結果となっているが、炉底中心部で炉芯浮上は起こり難く、炉底コーナー部のフリースペースは形成されやすいといえる。また炉芯不活性は炉芯浮上を促進し、通気性不良による送風圧力上昇も炉芯浮上促進要因となることもわかった。

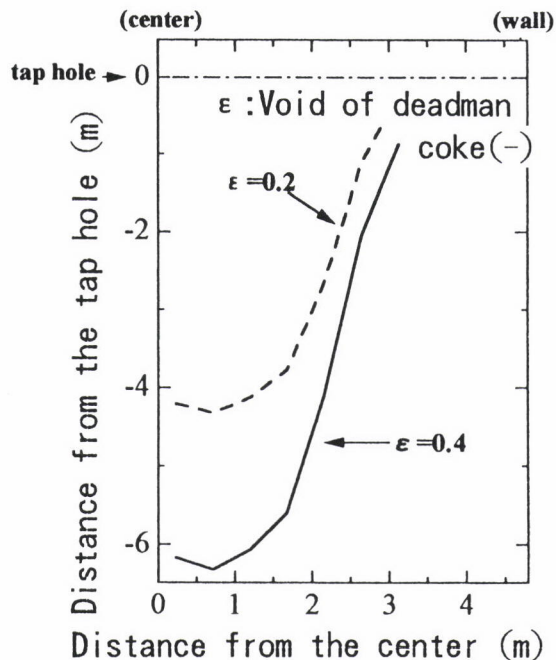


Fig. 11. Estimated results of the lower surface of hearth coke¹⁴⁾.

7 高炉内におけるコークス粉化機構と粉化抑制

炉芯不活性を助長する要因の1つとして、粉の増大はいうまでもないが、とくにコークス粉の影響は大きい。本検

討において、高炉内におけるコークス粉化機構と粉化抑制のレビューとそれに基づく考察を行った。レビュー項目として、①高炉内における主たるコークス粉発生領域と粉化機構、②粉発生領域においてコークスが受ける衝撃力、③実炉におけるコークス粉測定例、④高炉操業に影響を及ぼすコークス粉存在領域、⑤微粉炭多量吹込み時のコークス粉発生量変化とその原因、⑥コークス粉の移動・蓄積挙動、⑦コークス粉の消費挙動、⑧コークス粉発生抑制策、⑨コークス品質評価の試みにわたっている。

今後のコークス粉発生抑制策として、コークス反応性(Coke Reaction Index ;CRI)向上が有効であることがモデル実験で明らかにされ¹⁵⁻¹⁷⁾、実炉試験では、CRI向上により粉(−3mm)低下・小粒(3~15mm)増加となるが装入物降下性はそれほど悪化しない結果が得られており¹⁸⁾、冷間強度を保持した反応性向上の性状を具備したコークス製造が、今後の課題として提示された。

8 おわりに

鉄鋼各社・大学の技術者・研究者による検討の結果、得られた成果について述べたが、これらの成果は、鉄鋼各社のより詳細な高炉操業データを提示した議論(同一概念による鉄鋼各社の操業評価、共通の数学モデルを用いた各社の高炉操業成績入力による高炉の操業評価)、および大学・鉄鋼各社で開発した数学モデル適用において、高炉炉下部現象解明のために汎用的・効果的なケーススタディの前提を提示し、その結果を検証したことにより達成できたものである。得られた成果を纏めて次に示す。

- 1) 高炉炉芯内空隙率および発生粉コークス粒径が、炉芯内ガス流れ・粉の移動・伝熱を支配する要因である可能性が高い。
- 2) 高炉炉底コーナー部におけるコークスフリースペース形成および炉芯コークス浮上、炉床側壁・炉底部における溶銑の流動・伝熱を支配する要因である可能性が高い。
- 3) 一般的に、フリースペースは形成しやすく炉芯は浮上し難いが、炉芯不活性状態では炉芯は浮上しやすくなる。
- 4) 炉床側壁・炉底部における溶銑の流動・伝熱を支配する炉芯充填構造の新しい概念として、「溶銑不透過層」が提示された。
- 5) 炉芯不活性を支配する操業条件、炉芯不活性状態からの回復時の操業条件の1例を提示した。
- 6) コークス粉発生抑制を支配する要因の1つは、コークス反応性である。

本検討におけるシミュレーション主体の結果は半定量的

なレベルに止まっており、今後定量的な形にするための研究・開発が必須であるとともに、実炉における検証を含む検討が必要である。

本検討の結果を受けて、高炉炉下部制御のための基礎的現象の学術的観点からの研究として「高炉炉下部機能強化研究会」が学会部門高温プロセス部会の中にスタートした(1997.4~)。また今回の試みは、産学共同研究の新しい形として、リストラ後の少数精鋭のパワーをもっとも効果的に活用できる先駆的な例になると思われる。

参考文献

- 1) NKK福山製鉄所：製鉄部概要，20.
- 2) 日本鉄鋼協会生産技術部門製鉄部会4流体の移動現象研究会：高炉内における4流体の流動と伝熱(4流体の移動現象研究会成果報告書)，(1996)，204.
- 3) P. R. Austin, 埜上 洋, 八木順一郎(東北大学素材工学研究所)：私信.
- 4) 富田幸雄, 大楠 洋, 福田富也：日新製鋼技報，56 (1987)，1.
- 5) 富田幸雄(日新製鋼(株))：私信.
- 6) 熊岡 尚(新日本製鐵(株))：私信.
- 7) 澤 義孝, 武田幹治, 田口整司, 松本敏行, 渡辺洋一, 鎌野秀行：鉄と鋼，78 (1992)，1171.
- 8) 佐藤 健, 野内泰平, 木口 満：川崎製鉄技報，29 (1997)，30.
- 9) 武田幹治(川崎製鉄(株))：私信.
- 10) 日本鉄鋼協会生産技術部門製鉄部会4流体の移動現象研究会：高炉内における4流体の流動と伝熱(4流体の移動現象研究会成果報告書)，(1996)，188.
- 11) 村山武昭(九州大学)：私信.
- 12) 片山賢治, 若林 悟, 稲田隆信, 高谷幸司, 山岡秀行：鉄と鋼，83 (1997)，91.
- 13) 高谷幸司, 宇治澤優：材料とプロセス，5 (1992)，1144.
- 14) 稲田隆信(住友金属工業(株))：私信.
- 15) 山口一良, 鶴野建夫, 山本哲也, 上野浩光, 今野乃光, 松崎真六：鉄と鋼，82 (1996)，641.
- 16) 笠井昭人, 宮川一也, 上條綱雄, 木口淳平, 清水正賢：鉄と鋼，83 (1997)，239.
- 17) 武田幹治：材料とプロセス，10 (1997)，793.
- 18) 倉重一郎, 中村文夫, 波多野道春, 岩永祐治, 野見山寛, 小島正光, 網永洋一：日本学術振興会製鉄第54委員会提出資料(54委-1689)，(1984.7.19-20).

(1998年2月2日受付)