

(討1) 高炉の燃焼帯に関する諸問題について

新日鐵 広畑 技術研究室 下村泰人

1. 緒言

高炉の羽口先のいわゆる燃焼帯と呼ばれる限られた空間において、高炉に装入された大部分のコークスと羽口より噴射された重油などの燃料が燃え、炉内で還元、溶解のために必要な大部分の還元ガスと熱の供給が行なわれる。又、この部分が鉄成分の決定や炉内のガス流れのコントロールに大きな影響を及ぼしているといわれる。更に高炉下部の唯一の開口部で、羽口視えよりの観察が今日でも炉況判定の重要な手段である。したがって高炉の炉況制御、生産性向上などの問題において、燃焼帯の状況やこの周辺の状況の解明がいかに重要であるか論をまたない。

高炉の操業解析や改善において、燃焼帯や炉床の問題が、古くよりかなりの研究がありながらも最後まで残されてきているのは、その測定の困難さにある。しかし最近高炉を操業状態のまま吹止めての炉内調査、精密な羽口先の測定などが盛んになり、研究のスピードが高まってきている。又、古くより多くの燃焼帯のモデル実験があり、理論的解析と共に羽口先のコークスの運動、燃焼帯の広がり、燃焼帯内の反応などについても確認されてきている。

以上の様に色々な重要な問題をかかえているが、ここでは燃焼帯の高炉操業における意味を考察すると共に、これまでの研究を概観し、今後の問題を提起した。但し羽口からの燃料噴射、羽口そのものの設備的問題、高炉の熱バランスについては、燃焼帯に関係はするがここでは採り上げなかった。ここでは、1) 燃焼帯の状況、2) 燃焼帯の広がり、3) 燃焼帯の変化に及ぼす諸要因の影響、4) 燃焼帯での反応、5) コークスの燃焼量と出鉄能率 について詳述した。

なおここでは一部の文献のみしか引用記述しなかったが、参考文献1)、2)に燃焼帯の問題が綜説的にまとめられており、主な文献がのせられているので利用していただきたい。

2. 燃焼帯の状況について

高炉の下部の状況を観察出来れば如何に有益かは論をまたないが、唯一の開口部である羽口より燃焼帯の状況を観察し、炉況の推定、判断をし、それを参考に高炉操業が行なわれている。一応燃焼帯の状況について最初に概観してみるが、十分な言葉の定義づけが行なわれていないので、ここでは図1に示したような使い方をした。燃焼帯としてCO₂が2%になった所と定義している文献もあるが、これが、rod testによるコークスの運動しているレースウェーと一致するものかどうか不明である。

羽口先の状態を定量化出来れば非常に有用である。测温、ガスサンプリングについては後述するが燃焼帯の重油の燃焼、生鉱下りによる微圧の発生などの測定による羽口情報を定量化する試み³⁾がなされ操業に役立ってきている。羽口先のコークスの運動については、十分に観察出来れば、コークスの燃焼速度や温度分布などの解析が

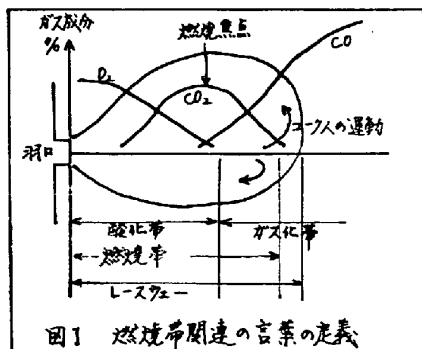


図1 燃焼帯関連の言葉の定義

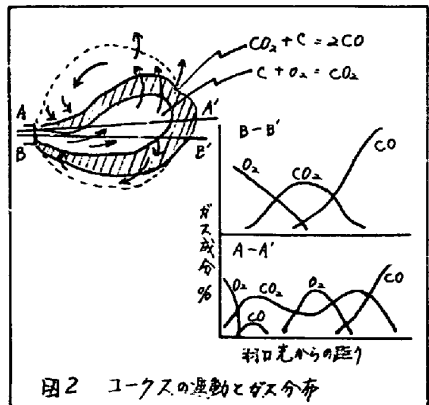


図2 コークスの運動とガス分布

可能で、高速撮映機によるコークス塊の運動過程が調べられている。Wysocki⁴⁾のコークスの運動の観察や、Bardin等⁵⁾の見解より一般的に図2の様なレースウェー中のコークスの動きを推定している。この状況からサンプリング管の位置によって色々な炉内ガス分布状況の得られる可能性があることがわかる。

羽口からのrod testなどで、燃焼帯の炉心方向への深さは確認出来るが、上方及び側面への広がりについては推定の域を出なかった。しかし最近の高炉解体結果⁶⁾より、ある程度正確に羽口の広がりか推定出来るようになり、各羽口先ごとに色々な形状が見られるが、となり同志の燃焼帯は互に独立して存在していることがわかった。

3. 燃焼帯の深さに関する検討

燃焼帯の深さを検討することの意味は、コークス燃焼のある空間を維持することの他に、生成ガスの炉内ガス流れ状況の制御に関係することによって重視されている。後述するように装入物分布と関係し、燃焼帯の深さを制御し炉内ガス流れを制御することが操業の重要問題となっている。

燃焼帯の深さに関しては多くの実測とモデル実験が行なわれている。最も簡単には羽口より棒を突込んで、図1に示したレースウェーの深さを調べることで、押込む力によって棒の止まる深さがやや異なる。通常ややコークスの層が所まで押込んで1500~2000mmの深さが得られる。又、上述した様に運動コークスに焦点を合わせて撮映することで、間接的に深さを求める事も試みられているが、どれ位正確な値がえられたのか不明である。

実炉で操業条件を変えて多くのrod testをくり返すのは困難なので、多くのモデル実験が行なわれ実測値と対比させてレースウェーの広がり及び諸要因の影響が解析されてきた。大部分は非燃焼モデルだが、1件のみ燃焼モデル⁷⁾があり、より実際に近い値が得られたといわれている。図3にモデル実験⁷⁾及び実測値⁸⁾の燃焼帯深さと風量との関係の一例を示した。

燃焼帯は羽口前のコークスが主として送風によって運動させられることによって形成されるので、第1に羽口の大きさと送風に最も関係深いことがわかる。Beer地⁹⁾によれば、送風と発生ガスの揚力と装入物の重力とが釣り合って球状の空間の天井壁を形成していると考えており、Wagstaff¹⁰⁾によれば、同様の考え方であるが力学的機械的には羽口からの送風の運動エネルギーが失われる速度によって関係づけられるか又は送風のジェットモメンタムが周辺から受ける圧力と対比されることで解析されるとしている。したがって燃焼帯の広がりの実測値及びモデル実験値は、1) 関係すると思われるいくつかの要因で、データに最も適合する式を求める、2) 送風の運動エネルギーで、3) 燃焼帯の揚力と重力(圧力)で、3つの考え方で取扱われ、夫々導出過程は省略するが、以下の2~3の例の様にまとめられている。

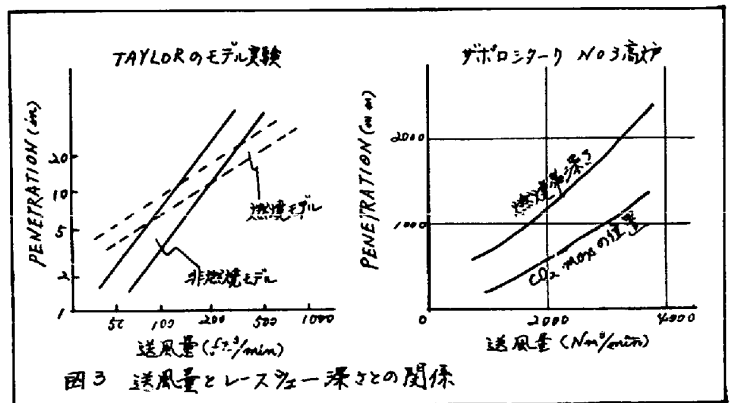


図3 送風量とレースウェー深さとの関係

Taylor 等
$$P(\text{in}) = C \frac{(\sqrt{V/m})^{0.7}}{R^{0.2} D^{0.4} d^{0.5}}$$

Bardin 等
$$P(\text{m}) = 0.118 \times 10^{-3} E R + 2.77$$

Gardner 等
$$(P/b)/N_0^{0.29} = f(\sqrt{m/A} \cdot P) \quad \text{ここで、} N_0 = \left\{ \rho v^2 / g s^{0.5} (p_0 - p) \right\}$$

式中、 P ：燃焼帯深さ〔in, m〕, C ：常数, D ：送風量〔 Nft^3/min , Nm^3/min 〕 n ：羽口数〔本〕, P_R ：標準状態の空気に対する送風空気の密度の比〔-〕, D ：羽口内径〔in, mm〕, d ：羽口先コークスの平均粒径〔in, cm〕, E_R ：送風の運動エネルギー〔 $kg \cdot m/sec$ 〕, A ：炉床面積〔 ft^2 , m^2 〕, ρ ：送風の密度〔 lb/ft^3 , kg/m^3 〕, ρ_s ：コークスの密度, v ：羽口先の空気流速〔 ft/sec , m/sec 〕, S ：コークスの表面積〔 ft^2 , cm^2 〕, f ：函数を示す。

最近住金でモデル実験を行い⁴⁾ Wagstaff 等の解析と同様にデータを図4の如く Penetration factor と Raceway factor と良く整理しうることを示している。

これらの関係式は、いずれも類似のモデル実験から得られたデータや実測値の解析なので、式の適合性については大差がないことが次の計算からわうかがえる。表1に同じデータで各式より燃焼帯深さを求め比較してみた。ただこれまでの実測は小型高炉のもので、最近の大型高炉の値がないので、これらの式が大型高炉まで拡張しうるかどうか不明であり、レースウェイ深さの理論解析と大型炉の実測が今後の課題となろう。

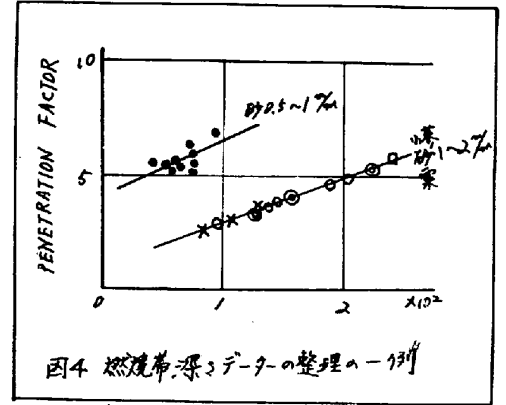


図4 燃焼帯深さデータの整理の一例

次に燃焼帯の幅が、力学的な意味での深さの他に、化学反応的に活性な部分が考えられるが、両者の関係について殆んど解析がなされていない。

以上の様に燃焼帯が主として送風エネルギーによって変化することから、増減風で羽口径を変えて燃焼帯の大きさを一定に維持したり、逆に燃焼帯の大きさを覚えてガスの流れを積極的に調節することが試みられている。燃焼帯の奥はいわゆる炉心となっており、燃焼帯の大きさによってガスがどのように流れるのか、ガスの流れに対し炉心の役割は何かなど不明の点も多い。又炉頂のガス分布の制御を装入方法によっても調節しているが、装入方法の変更による炉内ガスの流れが、逆に燃焼帯の大きさを制御しているともいえる。今後更に詳細な操業上の問題説明が希まれる。

表1 各種計算法による燃焼帯深さの比較

工場名	炉床径	羽口数	羽口径	送風量	E_R	ROD TESTによる実測値	Toplovic計算式(コークス粒径40 μ)	E_R より求めた燃焼帯深さ	CO ₂ 2%となる羽口先からの距離
住金	8.0	16	180	2600	3670	-	1260	1200	1330
住友	7.35	16	150	1500	2120	-	905	1100	900
住友	-	-	165	3230	6000	約1200	1140	1730	-
住友	-	20	145	2460	8100	-	880	1065	-
住友	-	14	154	1230	2500	-	-	-	-

4. 燃焼帯の状況に及ぼす各種要因の影響

前項では送風量による燃焼帯深さの変化について概観したが、それ以外の送風エネルギーに影響する諸因子の効果について調べた。まず温度分布とガス分布であるが、これを調べるには水冷のガスサンプラーや熱電対を羽口覗穴より突込んで、羽口先からの距離に応じて測定する。ノ連で多くの測定が行われ、大部分57mm径の水冷管を使用している。最近の川鉄の例¹³⁾では48.6mm径のパイプが用いられている。測定データの一例を図5に示す。この分布で酸素やCO₂の増減傾向、CO%のレベルなども重要で、後者はガスの炉心への浸透深さ、炉内ガスの流れ状態など判断するのに大切だといわれている。燃焼帯を一つの熱源と見え、その平均的な温度を羽口に取付けた輻射高温計で測定した例がある。わ

が国でも実施され、この目的は主として連続测温で炉床の熱レベルを掴み、炉況を判断するにある。

送風温度を高めると一般に反応速度が増大し、燃焼帯が浅くなるといわれているが、逆にガス量増による運動エネルギー増で、両者のバランスで燃焼帯の変化が決まるといわれる。

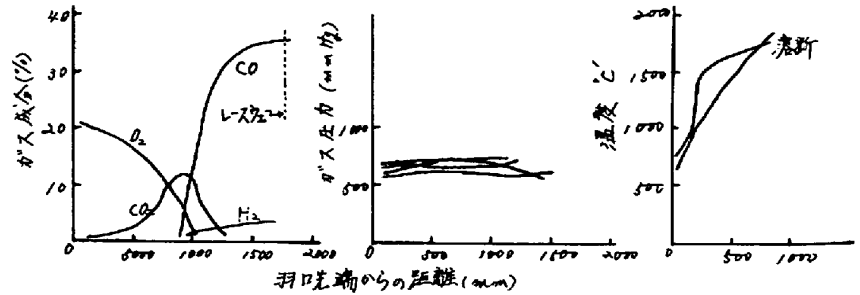


図5 燃焼帯の測定

酸素高化の場合はガス量減、温度上昇で燃焼帯は短くなる傾向にあるといえる。酸素高化で同時に燃焼帯の最大温度も上昇する。

燃料噴射の効果として重油添加の影響の測定例がないが、ソ連では天然ガス噴射の場合の燃焼帯ガス分布の変化が多く実測されている。一般に温度の低下とCO₂最大点が奥に移り、燃焼帯が広がる傾向が見られる。

上述の温度やガス分布を理論的に求めた例がある。Hynert¹⁹及び日本鋼管¹⁴ではコークスのガス化反応速度式を用い、反応はガス境界膜拡散律速として反応による酸素濃度低下を計算した。後者は更にガス分布より各場所の発熱量、反応量がわかるので、微小部分の熱バランスを行うことで温度分布を求め実測値と良い一致を示したとしている。

5. 燃焼帯での反応

高炉の発展は、シャフト還元と燃焼帯を含む溶融鉄の組み合わせによって効率良く溶鉄が得られる反応装置として完成された点にあり、炉床の溶融帯の反応が重要である。高炉下部でのSiの還元反応については別の討論会で採り上げられているので、ここでは燃焼帯との関連の点にのみ触れた。とわいえ、これまでの研究は非常に限られた量の羽口からのサンプリングや解体調査からのもので、今後の問題の完全な解明のためには、より完全な形で炉内調査が必要である。

まず燃焼帯における諸元素の直接の反応であるが、1500~2000°C以上にもなる領域を、コークス、溶鉄、スラグが通過することで、Fe, Si, Mn, Zn, K, Na, などが酸化又は気化され、特にZn, Na, K, は上昇ガスと共にシャフト上部に行き、低温部で鉱石、コークスに付着し、炉内を循環している。炉内の解体調査でもこの炉内循環は明らかにされている。

次に鉄中成分で重要なSiの挙動に関する燃焼帯の役割として、高温においてコークス中Si₂O₃がSiO₂として気化することと、燃焼帯を通過することによる鉄中成分の変化の点がある。前者については、榎谷等¹⁶やLéger¹⁷の実験があり、SiO₂が溶鉄に吸着し、Siが鉄に移行することで、鉄中Siの大部分がこれによるものとしており、羽口レベル以下のスラグからのSi移行は20~30%にすぎないとしている。解体結果では羽口レベルのSiが鉄成分のそれより高い結果が出ているが、これは吹止め後の反応もあって、必ずしも正しい評価とはいえない。羽口先の鉄中のサンプリングに2つの結果がある。ソ連の例では酸化帯でSiが酸化され、燃焼帯を通過するものよりSiが低くなるとし、川鉄の例では高温還元によりSiが非常に高くなっているとしている。いずれもこの問題は、燃焼帯を通過するものとそうでないものはSi値が異なり、炉床でそれらが混合するとしている。

この様に鉄中Siに対する燃焼帯の役割は大きいことがわかるが、必ずしも十分な実験や試料による実証、理論的解明が終ったとはいえず、今後の研究がのぞまれる。この点の追求は、鉄中Siのバラン

キ、Si コントロールなどの問題解決にもつながるわけである。

燃焼帯でのコークスの変化については、解体結果より一般的には細粒化が見られ、又羽ロレベル付近では装入コークスに比し反応性が高く強度が低下している。この原因として、コークス中にアルカリ、過基性成分が侵入しており細粒化を助長する。これほどの程度操業に影響しているのが不明だが、反応性の増大を出来るだけさけるようにコークスの性状改善がのぞましい。

6. コークスの燃焼量と高炉の生産性について

同じ操業条件であれば出鉄量は送風量即ち燃料燃焼量に比例して増大する。したがって、如何に多くの送風で燃料を多く燃やせるかが出鉄を高める方法である。送風を大にすることは、高炉の通気性、炉内ガス速度の問題でもあり、燃料を多く燃やすことは羽口先空間、コークスの反応の問題である。したがって高炉の出鉄限界については、他の問題もあるが、上述のどちらかが制限条件になるかということにもなる。古くはRICE¹⁾が6.5 ftの環状帯の面積に出鉄量が比例するとしたのも上述の考え方によるものである。この値では図6に示すように、今日ではわが国の高炉のデータは合わなくなっている。その後10 ft説とか、炉床径の何乗に比例するとかの解析がなされているが、これらはその時のデータには合うが、理論的裏付けに薄い。

それでは現在の燃焼帯での程度のコークスが燃やせるのか計算してみると、まだ燃焼能力には余裕があり、上記の問題は、羽口先の燃焼能力と云うよりは、高炉全体でいかに多く送風しようかということになろう。

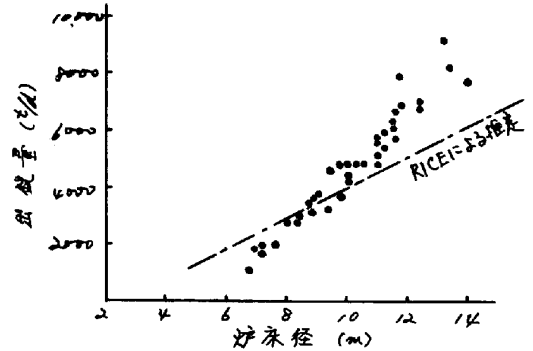


図6 出鉄量と炉床径の関係

7. 結 言

これまでの主な研究を概観することによって、ほぼ燃焼帯でのコークスの動き、塩分が及ぼす要因の影響、特に深さは送風の運動エネルギーと関係していること、温度、ガス分布など一般的な状態や傾向を掴むことが出来た。又最近の解体調査より、燃焼帯相互の関係、羽ロレベルの炉内の状況もはつきりしてきている。しかしながら、これら燃焼帯の状況が、炉の上部とのガスや装入物の動きとの関係、鉄成分の決定に如何に関連しているかということになると、これまでの研究ではまだ統一された方向は得られず、色々な推測の域を出ないといえる。いわゆる燃焼帯の状況は掴めたが、その高炉操業との重要なのかかわりあいの点は研究が不十分であるといえる。又、これまでの測定データの大部分は中、小型高炉によるもので、大型高炉でこれが同じ様に解釈出来るのかどうかという点については今の所断定出来ない。

したがって今後の研究方向として次の事があげられる。即ち、1) 燃焼帯のコントロールとガス流れのコントロールの関係を十分に解析し、装入のコントロールとあわせて高炉のガス流れのコントロール方法を確立すること、2) 燃焼帯の鉄成分決定に果た役割を完全に解明し、成分コントロールを確立すること、である。この他に大型炉での測定、コークス性状の改善、コークスの燃焼速度の測定などの課題もある。

8. 参考文献

- 1) Gotlib 「高炉製鉄法の理論」 館 訳 日本鉄鋼協会 (1965)
- 2) 下村泰人 学振製鉄 54 委, 才 1, 2, 3 回 化工小委資料 (1966~1967)

'74-A 6

- | | |
|--------------------|--------------------------------------|
| 3) 新日鉄基礎研 | 学振製鉄54委 化工50 (1972) |
| 4) H. Wysocki 他 | S. U. E 86 (1966) 761~770 |
| 5) I. P. Bardin 他 | Izv. Ak. SSSR OTN No1 (1955) 85~90 |
| 6) 児玉惟彦 | 学振54委 化工31 (1970) |
| 7) 日本鋼管坂研 | 同上 化工29 (1970) |
| 8) J. Taylor 他 | JISI 87 (1957) 330~341 |
| 9) A. D. Gotlib | 「高炉製鉄法」 (1958) |
| 10) H. Beer | S. U. E. (1964) 1353~1365 |
| 11) J. B. Wagstaff | Proc. Blast Furnace 15 (1965) 95~105 |
| 12) 住友金属中研 | 才働回製鉄部会資料 (1973) |
| 13) 川崎製鉄坂研 | 学振54委 化工27 (1970) |
| 14) G. Heymert 他 | S. U. E. 72 (1959) 1545~1554 |
| 15) 日本鋼管坂研 | 学振54委 983 (1965) |
| 16) 樋谷 他 | 鉄と鋼 58 (1972) 1927~1939 |
| 17) R. Vidal 他 | "Blast Furnace Technology" (1972) |
| 18) O. R. Rice | Blast Furnace 32 (1944) 114~118 |