

討 4 高炉プロセスのスケール効果について

富士製鉄 金石製鉄所

下村 泰人

1. 緒言

最近の高炉の大型化には著しいものがある。今後の高炉技術の発達のためには、パイロットプラント的、小型高炉から大型高炉に至るプロセスのスケール効果（操業条件と高炉諸元との間の法則）をはっきりさせておかなければならない。これに関連した商業高炉の化学工学的解析の代表的例は Beer¹⁾、瀬川²⁾ があげられ、スケール効果については Ostrowski³⁾ や Cohér⁴⁾ がすぐれた研究を發表している。

ここでは Cohér 他⁴⁾ の考え方を参考にして、高炉プロセスのスケール効果をより定量的に扱ってみる。

2. 高炉の性能とスケール効果の考え方

ここでは高炉で最大の出鉄量をあげる事を前提として、この出鉄量を制限する条件として高炉の性能を扱う。そのスケール効果を考え、後述の操業データの比較を行ったものは、米田鉱山局の試験高炉、ベルギー CNRM の試験高炉（過去に於て低炉と呼ばれたもの）及び国内の大小の日本の商業高炉である。

高炉の性能は、還元、溶解、装錬及び補助的に燃焼帯での還元ガスの生成であるが、これを1つの設備で能率良く実施するためには、これらに伴う多様の化学的、物理的条件を考慮せねばならない。この中で鉄鉄の生産を支配する要因は、1) 熱交換、2) 酸素の移動、3) 炉内のガス流に伴う物理現象、及び4) コークスの燃焼である。

上記の要因の中で1)2)については、現在の商業高炉の装入物、滞留時間では十分な熱交換と酸素の移動が行われ、しかも大小の高炉について後述の様に相似の条件が得られる。しかし3)については、羽口から送風すると言う条件や炉型が相似でないために、大小の高炉でガス流の物理的条件について相似の関係が得られない。又後述のように大型炉では圧損失の増大や flooding 現象が制限条件になりつつあると考えられる。したがって高炉の性能の中には、装入物の炉内滞留時間に関連する要因と、主として断面あたりのガスの流量に関する要因との二つの異種の相似条件を有するものが同居しているわけで、プロセス全体としてのスケール効果の解析が困難にしている。

3. 個々の要因の比較検討

1) 酸素の移動（還元） 高炉内の還元過程については、最近になり炉内の計測やサンプリングが行われ、装入物の被還元性の測定などが行われることにより、徐々に解明されていくが、何といっても眼に見えない炉内のことを完全に解明されるに至っていない。ここでは炉内の状況の解明とややよりも、還元過程に因りて大小の炉で相似が得られているのかどうかという点について、文献からの実測値、当社の最近の炉内試料サンプリング結果を比較検討してみた。

図1に CNRM 試験炉⁴⁾、当社の測定値、文献からの実測値^{5,6,7)}

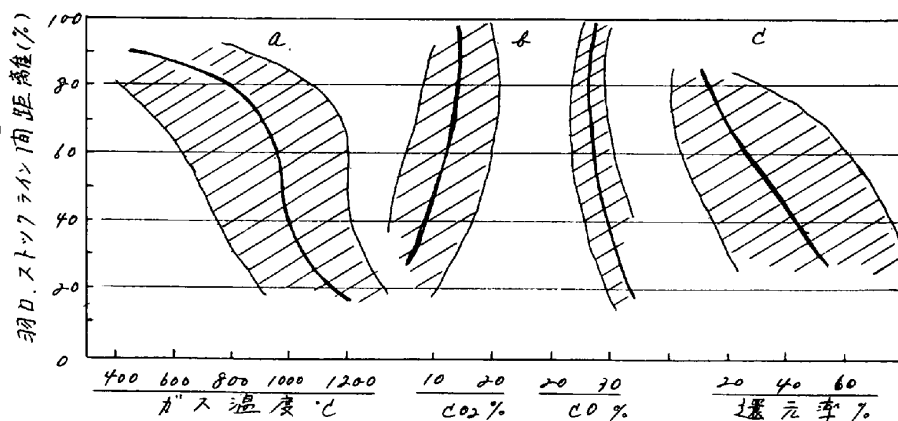


図1 炉内測定結果（太線は平均的な値を示す）

まとめ、炉内の高さ方向のガス温度、ガス成分、及び還元率の分布を示した。図の様に羽口レベルからストフライン間の高さの割合で表示すれば、操業速度に差があるにも拘らず大小の炉で各分布のプロファイルに大きな差はない。即ち熱交換と還元過程に関しては相似の関係が得られているといえる。測定値に中のあるのは垂直プローブの位置の差、水平プローブによる炉壁と炉心部の差、ガス流の炉内分布の差などによるもので、当然起りうるものである。

次に実測及び計算によって炉内の還元平衡条件との関係をしらべてみた。どの様な図でもよいが例として IRSID で使っている除去すべき酸素量と還元ガス中の CO_2 の分圧との関係に Fe-Wustite 平衡及び図 1 も、この実績を記したのが図 2 である。平衡温度としては一応ガス還元の進行する $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ を考慮した。測定値の中を考えた場合は、平衡ガス濃度を割る場合が起っているが、これはありうる事で、平均的な値を見れば理論通りの過程を示しているし、縦軸との交点は直接還元率 70% で実績に合致する。

鉱石の CO-CO_2 混合ガスによる還元試験例はあまり多くないが、Beer⁹⁾ の実験値を用い、装入物の降下時間として CNRM 試験高炉で 2.5 時間、商業高炉で 6~8 時間、各高さレベルで装入物が遭う還元ガスの CO_2 分圧を 25, 20, 10% と仮定して、大小の高炉における高さ方向の還元率分布を計算してみた。その結果を図 2 に併記したが、仮定による概算にも拘らず実績と良く一致し、又大小の炉で相似の還元過程が見られる。

商業炉では酸素の移動の条件にはまだ余裕があるが、CNRM 炉ではほぼ限界となっており、出銑率の上昇は直接還元の増加によって達成されているといえる。したがってこの様な限界に近い操業では直接還元の機構や速度が問題となって来る。

2). 炉内の圧損失⁹⁾ 高炉の装入物充填層の圧損失が増大して行くと、最終的には炉頂での粒子の流動化、シヤフトでの吹抜け現象を起し、高炉の経済的な操業を不能にする。吹抜けに至るまでは送風量の増加に伴って出銑量が増する仮定して、限界の送風量を検討してみた。

吹抜けの限界圧損は次式で求められるが、装入物の平均的な値を使用すれば、この値は $1000 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ となる。

$$\Delta P/L \div (1 - \varepsilon) \rho_s$$

ここで、 ΔP : 送風圧 - 炉頂圧 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, L : 羽口レベルからストフラインまでの炉高 m , ε : 充填層の空隙率, ρ_s : 装入物の密度 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ である。

図 3 に $\Delta P/L$ と送風量 Nm^3/min の関係を実績についてプロットし、高炉の内容積で層別し、グループごとに一応実績を直線的に延長して吹抜けの限界送風量を求めた。この送風量が限界出銑量を推定出来るが、現在の送風量に対して吹抜けの起る送風量にはまだかなり余裕があり、これは高圧操業によっても緩和されることが出る。圧損の相似条件としては炉内の平均ガス流速があげられるが、図 3 の実績でもわかる様に CNRM の試験高炉では一段と低い所にあり、吹抜けによる制限条件が他に優先する事はないと考えられる。

3). 溶融帯での FLOODING 現象 シヤフト下部からボツレユ部に於いて、コークスを主とする充填層を通して還元ガスが上昇し、溶融スラグと落銑が下降し反応が行われるが、この気液の性状(粘度 μ , 密度 ρ_g, ρ_L)、速度(質量速度 G , L , 空塔基準のガス速度 W_g) が不適正になると液体の均一な降下が妨げられ吹抜け状態にも至る。

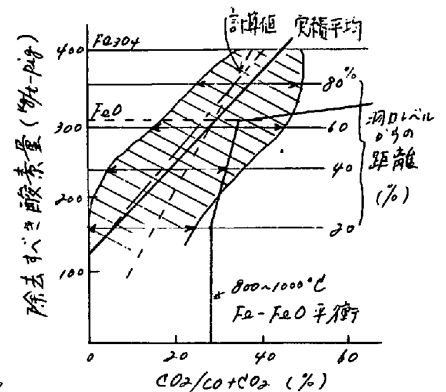


図 2. 炉内ガス濃度と還元過程の関係

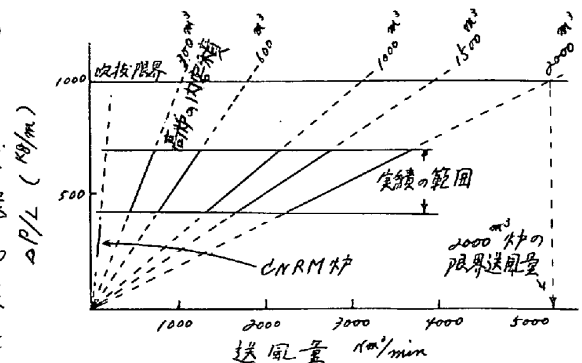


図 3. 吹抜け限界送風量の推定

このFlooding現象が起れば、高炉の経済的な操業が不能となり出鉄の制限条件となりうる。

大小の高炉で気液の性状の差はないので、この場合の相似係項は気液の質量速度となる。Floodingの限界についてはSherwoodがFLUID RATIOとHANGING FACTORを導入して、実験的に求めたのでそれを使用して大小の炉の状況を計算してみた。CVRMの

$$HANGING FACTOR = \frac{\bar{u}_G}{gC} \cdot \frac{\rho}{\varepsilon d^3} \cdot \frac{\rho_L}{\rho} \cdot \mu_L^{0.2}$$

$$FLUID RATIO = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho}}$$

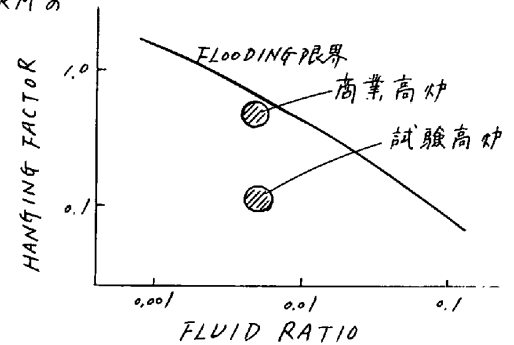


図4. FLOODING 限界との比較

試験高炉と商業高炉の操業成績より上記を計算し図4に示した。商業高炉の操業は非常にFlooding限界に近い所で行なわれており特にスラグ量の多い場合には一層この事が強く出でる。したがって試験高炉では高操業率にも拘らずFloodingに因しては限界よりほど遠い所で操業されていることがわかる。即ち炉内ガス流速の図係でHANGING FACTORの方がずっと小さいわけである。

4). 羽口先燃焼帯について⁽¹⁰⁾ この部分の性能の生産性との結びつきは、主として燃焼帯の大きさとその中のコープスの燃焼量にあるといえる。即ちコープスの燃焼速度が不十分であれば、還元には十分なガスが供給されない事になるが、計算による推定では十分なコープスの燃焼量を確保することが出来るが、むしろそのため送風量の増大が先述の様に物理的な制約的な事になると考えられる。

燃焼帯の大きさについてはその深さで代表されるが、これまでに多くの実測、実験にも拘らず、深さに及ぼす要因の影響が必ずしも明らかにされてない。羽口先の風速にもとづく運動エネルギーに因する様だが、高炉では羽口数、羽口径によって羽口先風速をほぼ似た値にしているの、燃焼帯深さには大きな差はないと考えられる。したがって大小の炉で比較条件となるのは、総ガス量に対する燃焼帯の容量の割合であろう。即ち大型炉ほど炉床面積の燃焼帯として利用される割合が小さくなって、生成ガスの炉内の分佈効果が悪くなる。したがって同じ内容積でも炉床径を大にし、炉高を低くして上昇ガス流の条件を緩和する方策に対して限界が生じると考えられる。

4. 操業データの比較によるスケール効果の検討

最初に述べた5基の大小の高炉について出鉄能率に及ぼすスケール効果を操業データより検討してみた。操業データと諸比較指標と操業速度の異なる2期について表1に示した。試験高炉ではほぼ限界に近い

表1 比較高炉の寸法と操業指標

	米口鉦山局		CVRM		商業高炉A		同左 B		同左 C	
炉床径 m	1.22		2.2	****	4.9		8.4		10.3	
炉床面積 m ²	1.17		3.81		18.85		55.5		82.5	
内容積 m ³	8.6		22.0		32.6		134.8		216.0	
羽口 SL 間高 m	6.1		4.7	***	14.4		22.6		25	
高さ/炉床径	5.0		2.14		2.94		2.69		2.43	
出鉄量 噸	16.8	25.3	88.5	139	540	900	1580	2630	3260	4300
燃料比 %A-P	61.5	59.2	50.5	53.9	59.0	51.7	52.0	52.0	55.0	52.5
送風量 Nm ³ /min	22	31	89	118	590*	1250*	1460	2360	3170	3600
" Nm ³ /A-P	1550	1760	1140	1220	1570	2000	1325	1290	1400	1210
CO/CO ₂	1.8	N.A	1.09	1.26	1.62	1.14	1.18	1.18	1.34	1.2
出鉄率 t/m ² /d	14.4	21.6	22.6	36.5	28.8	47.8	28.5	47.4	38.0	51.5
" t/m ³ /d	1.95	2.85	2.95	6.3	1.67	2.76	1.18	1.95	1.5	1.99
空塔ガス速度 %	18.8	26.5	18	31	31.3	66.3	26.4	42.6	28	43.1
炉内滞留時間 分	8	5.2	4	2.5	8.4	5.7	13	8	10.5	7.8

* 酸素富化

** 送風量による概算値

*** 推定値

**** 円型換算

い操業速度になつてゐるが、商業高炉ではまだそこまでは行つてゐない。又、試験高炉では大型炉に比し熱損失割合が大であるが、ほぼ同じ燃料比で操業するため熱風温度を高めてこの熱を補償してゐる。

大小の炉で炉形の相似を比較しても出鉄能率にはあまり意味がなく、これで見えて来る様に、炉の絶対的な高さ、炉内の平均ガス速度などが意味がある。強いて炉形を比べるとCNRM炉は炉床径に比し炉高が低く、米口鉾山局炉はこの逆で、商業高炉はこの中間にある。表1で特徴的な事は小型炉では炉床面積が当りの出鉄量が低く、炉内容積が当りの出鉄量が非常に高い事である。又炉内のガス速度も小型炉ではずっと低い。すでに還元の所で述べた様に操業様式としては差がないので、銑鉄トン当り送風量や炉頂ガス成分などには大差がない。

なお参考までに伝熱の條件である固気間の伝熱係数を計算してみると大小の炉で差がなかった。

5. スケール効果にもとづく出鉄の制限條件の考へ方

すでに述べた様に、高炉の主要な機能としては、(1)固気間の熱交換、(2)還元による酸素の移動、(3)炉内のガス流に伴う物理現象及び(4)炉口先燃焼帯での還元ガスと熱の生成があげられる。高炉ではこれらがバランスして最大能率の達成されることを希望し、データを解析したCNRMの試験高炉では、炉高の奥で還元に必要な時間と装入物の降下時間とが一致する所が出鉄限界となる。炉高の高くなる商業高炉では還元時間は十分にあり、送風量の増大に伴つて圧損が増し、Flooding限界に近づき速には操業限界になるものといえる。なお内容積の増加を炉床面積で増して行くことは、(1)の機能の緩和にはよび、現在の送風方式では炉内のガス分布効率を低下させることになる。

故に極めて大さの異なる炉の操業を一律に比較することは無理である事がわかるが、これを例へば炉高などで分類すれば比較可能となる。この場合に高炉の制約機能がかり見て、操業速度の程度を比較するのには、小型炉では装入物の降下スピードや単位内容積当りの出鉄量であり、大型炉では炉内のガス速度が適切と考えられる。

この様な検討の結果から現在の商業高炉の操業速度を高めようためには、当然すでに各所で強力に推進されてゐる事ではあるが、装入物分布の調整、高圧操業、酸素富化送風、塵粒の強化、装入物の炉内での粉化防止などの炉内のガス流に伴う物理的條件を緩和する対策や、装入物の被還元性の向上に優先して重視されるべきである。

すでにCohour⁴⁾が指摘してゐる通りに、試験高炉の役割としては、出鉄能率や炉内ガスの条件の検討といった事ではなくて、特に米口鉾山局やCNRMで過去に実施されて来たような、大型高炉と相似の得られる燃料噴射、新しい装入物の使用など炉内の還元状況の解明を主とした、新しいプロセスの試験を大型高炉での実施に先立って行うことに最も意味のあることである。

参考文献

- 1) G. Heynert & H. Beer ; S. u. E. (1964) p. 135
- 2) 瀬川清 ; 日本鉄鋼協会第10回技術講座資料 Ang. (1967)
- 3) E. J. Ostrawski & J. H. Strassburger ; ISI Special Report 96 (1966) p. 184
- 4) P. Cohour & J. Michard ; ibid. p. 205
- 5) D. Bülter & A. von Klitzing ; S. u. E. (1968) p. 108
- 6) B. L. Lazarev et. al. ; Stal in English June (1965) p. 429
- 7) Stal in English Nov. 1966
- 8) H. P. Beer, et. al. ; Tech. Mitt. Krupp. Forsch.-Ber 23 (1965) p. 179
- 9) 下村泰人 ; 第72回学振54 委化工小委資料, May (1968)
- 10) " ; 第69, 70, 71 回学振54 委化工小委資料, (1966~1967)