

.....
 論 文

高炉プロセスにおける酸素富化送風時の 現象とその限界について*

宮 下 恒 雄**・大 槻 満**

Phenomena of Oxygen Enrichment in a Blast Furnace Process and its Limit

Tsuneo MIYASHITA and Mitsuru OHTSUKI

Synopsis:

An investigation was made on the oxygen enrichment to blowing gas up to 40% by using an experimental blast furnace. The oxygen ratio in this experiment was increased under the condition of constant bosh gas volume per unit time. Coke rate was slightly decreased with increasing the oxygen content up to 25%. In further increase of oxygen content beyond 25%, the coke rate was increased to about 2.5 kg/tHM for each 1% of oxygen enrichment, but increase of productivity of iron of 5% was obtained.

Gas temperature distribution was measured to make clear the heat exchange phenomena between gases and solids, and the temperature of solids was estimated by simulation calculation. From this result, it was deduced that the oxygen enrichment blowing operation was limited due to the shortening of the length of thermal reserve zone with increase of oxygen enrichment.

The main reason for the increase of the coke rate could be explained by calculated results of decreasing indirect reduction rate of ores which was influenced by the above temperature distribution change.

This became another commercial limit of oxygen enrichment blowing.

(Received Feb. 17, 1971)

1. 緒 言

高炉への酸素の使用は古くて新しい技術であるが、最近の原料炭事情の悪化により、高炉に重油を多量に吹込むために酸素の併用が一般的となり、経済的にも成立する目途が立つてきた。高炉の炉容の拡大と超高压などの技術的發展により、高炉用送風機への技術的要求はますます厳しくなり、操業度の上昇による通気障害もひとつの限界となることも考えられる。原子力発電などの進展による電力費の低下は酸素価格の低下をもたらすと考えられる。また高価な高炉用コークスを安価な炭化水素源に置換し、しかも操業度を向上させてゆくためにも、酸素の高炉への適用は今後有望になると考えられる。

従来の高炉への酸素富化送風の研究は、理論的な検討^{1),2)}のみか、または酸素富化率を増加させた試験操業的³⁾なもので、酸素富化の限界にいたるまでのプロセスを定量的に解明したものは少ない。実際高炉では、試験のために専用の酸素工場を必要としたり、精密な測定が

困難であることによるものと思われる。

酸素やコークス以外の炭化水素を多量に使用する将来の高炉操業法を開発するために、酸素を高炉プロセスに適用したときの現象をその限界にいたるまで定量的に解明しておく必要がある。日本鋼管では、通気障害の面からこれ以上送風量を増加できない高炉の場合を想定してボッシュガス量一定という条件で、試験高炉を最高40%の送風中酸素で操業し、再現性ある炉況不調を引き起こさせ、またゾンデにより炉内温度分布やガス組成分布を測定し、必要に応じて実験室での測定結果も用い、操業線図や段階別熱精算のような総括的な見方と、ガスと固体間の熱交換や温度分布変化による間接還元反応の進行の定量的な解析結果を結びつけて、高炉プロセスへの酸素富化の影響を基礎的に解明したので報告する。

* 昭和45年10月本会講演大会にて発表
昭和46年2月17日受付

** 日本鋼管(株)技術研究所

2. 実験方法

2.1 実験設備

本実験に用いた試験高炉設備は、昭和42年4月に完成したもので、内容積 0.63m^3 (現在は 3.2m^3)、湯溜り径 500mm (現在 800mm)、高さ 2.9m (現在 5.5m) で、プロフィールを Fig. 1 に示す。 $15\text{Nm}^3/\text{min}$ で 1000°C の送風可能なペブル熱風炉、コンベヤー装入設備、出銑滓設備をもち、原料の秤量、装入、熱風炉の切替は自動化され、小数の要員にて運転できる。通常の高炉計装設備一式のほか、炉内測定用のゾンデ設備も設置してある。酸素富化送風設備として、液酸タンクを用い、とくに吹込み流量を正確に管理するため、高低2系統の流量制御系統と、高圧で送油できる設備、緊急遮断設備もそなえ自動化してある。

2.2 試験高炉の相似性とメリット

試験高炉は、実際高炉にくらべ熱損失が大きく、幾何的相似、流体、反応、伝熱面の相似を一挙にみたすことは困難で、試験目的に応じた相似条件⁴⁾がとられる。われわれは、試験高炉を使う場合に、操業試験の種類をあらかじめ選び、得られた結果については高炉プロセスと

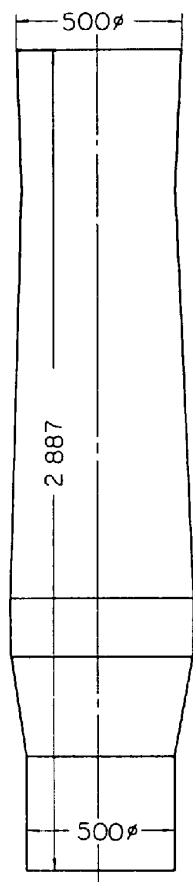


Fig. 1. Experimental blast furnace profile.

しての原理的な解明を行ない、数式モデルなどを用いて実際高炉での結果を推定している。試験高炉の利点は、

- (1) 還元ペレット使用試験⁵⁾のように、試験段階の原料の評価を、比較的少量の試料で実施できる。
 - (2) 重油多量吹込み、酸素高富化などの思いきつた試験を生産に無関係に、小規模な装置で試みる。
 - (3) 比較的安い開発費用で測定機器の開発ができる。
 - (4) N_2 ガスクエンチをして、炉全体を樹脂で固め、プロセス自体の基礎的解明⁶⁾が可能である。
 - (5) 実験高炉の適用範囲をこえた試験ができる。
- などで、試験高炉による実験を実験室的な基礎研究や数式モデルと結びつけて検討することが大切だと考える。

2.3 試験方法

この試験高炉の出銑量と熱損失の関係が Fig. 2 に示され、出銑量を 3.5t/day 以上とすれば、熱損失の変動が比較的小さくなるので、これに基づき試験計画をきめた。

- (1) 試験は、ボッシュガス量 7.2Nm^3 一定で行なう。
- (2) 原料は、自溶性焼結鉱100%装入で、 $6\sim 15\text{mm}$ の粒度とする。塩基度調整は橄欖岩で行なう。コークスは高炉用コークスを、 $9\sim 18\text{mm}$ に整粒して用いた。
- (3) 送風温度は 700°C 、送風中湿分は大気とする。
- (4) 溶銑中 Si 目標は 0.9% 、スラグの塩基度は 1.15 とし炉熱変動は ore/coke で調整する。
- (5) 原料性状を Table 1 に示す。原料の水管理を重視し、屋内貯蔵を行ない、水分測定を直1回実施した。
- (6) 高温部分の炉内温度測定は、非水冷型の W-Re

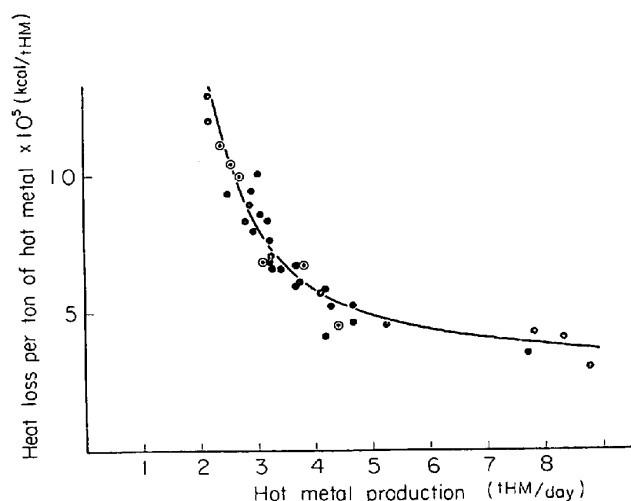


Fig. 2. Relation between production and heat loss.

Table 1. Chemical analysis of raw materials.

	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	MnO	Av. Size		
Sinter I	56.0	8.29	5.91	1.82	10.89	0.69	0.072	0.022	0.70	10.08 mm		
II	56.4	8.00	6.17	2.02	10.46	0.68	0.070	0.019	0.66	10.08		
III	56.6	11.10	5.82	1.92	10.27	0.63	0.063	0.017	0.43	10.19		
IV	55.8	10.23	6.09	1.88	11.13	0.75	0.073	0.027	0.66	10.44		
V	56.1	10.76	6.08	1.85	10.75	0.64	0.069	0.021	0.69	10.10		
橄 欖 岩	5.05		40.52	0.58	0.20	48.50						
	C	H	Ash	V. M	T. S	Ash						
						SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	
Coke I	88.47	0.34	9.80	1.00	0.54	49.8	10.7	24.53	3.71	2.82	0.35	12.57
II	85.14	0.40	11.50	1.40	0.50	46.76	12.14	21.14	8.00	2.34	0.29	12.40
III	86.73	0.45	11.10	1.20	0.57	46.68	15.97	21.91	5.86	2.02	0.31	12.01
IV	87.82	0.44	11.00	1.10	0.56	44.36	17.89	21.65	7.14	2.26	0.34	12.75
V	85.61	0.30	11.70	1.20	0.57	43.67	17.73	23.12	6.57	2.46	0.39	12.42

I-V indicated test periods.

Table 2. Results of the test operation.

	Standard	Perd. I	II	III	IV	V
Production (kg/day)		3 142	4 252	4 496	4 909	5 887
Coke rate (kg/tHM)		845	742	750	753	743
Slag rate (kg/tHM)		490	431	457	502	466
Blast volume (Nm ³ /min)		5.95	1.51	5.18	4.92	4.65
O ₂ % in hot blast (%)		21	24.7	27.8	28.9	35.1
Bosh gas volume (Nm ³ /min)		7.20	7.21	7.24	7.08	7.30
Blast temperature (°C)		697	678	515	730	716
Humidity (g/Nm ³)		7.4	5.2	7.1	7.7	8.7
Blast pressure (kg/cm ²)		0.090	0.094	1.21	0.077	0.077
Si % in hot metal		1.09	1.09	1.26	0.95	1.00
S % in hot metal		3.033	1.035	0.033	0.035	0.040
Slag basicity CaO/SiO ₂		1.20	1.21	1.20	1.17	1.22
Hot metal temperature (°C)		1 377	1 391	1 411	1 398	1 403
Molten slag temperature (°C)		1 565	1 553	1 561	1 529	1 540
CO ₂ % in top gas (%)		9.94	13.14	14.58	13.25	14.60
CO % in top gas (%)		27.97	30.89	32.90	36.10	46.60
H ₂ % in top gas (%)		1.19	1.38	1.49	2.15	2.53
Top gas temperature (°C)		224	235	244	185	142
Dust rate (kg/tHM)		11.1	8.0	11.9	7.5	5.0
Furnace condition				hanging 6		

熱電対を用い、低温部は、CA 熱電対を用いた。

3. 実 験 結 果

試験操業期間全般の推移は、Table 2 と Fig. 3 に示す。基準期間のコークス比は、845 kg/tHM で当試験高炉では再現性ある値⁵⁾で、出鉄量は 3 142 kg/day であった。送風中酸素含有率を、25% から 31% まで増加させたところ、出鉄、出滓の直前にはかならず風圧の急上昇をきたし、再現性のある棚吊りを引き起こしたので 29% まで戻したら炉況は回復した。炉況不調期間の推移を Fig. 4 に示す。送風圧が一定値以上になれば出鉄または出滓をしたり、埋尺に注意をはらって、送風中酸素を

31, 32, 33, 34, 35, と漸増させついに 40% まで増すことができたがコークス比を増加させないと溶銑、溶滓温度の低下や溶滓の流動性が悪化して操業が困難になった。とくに酸素富化率の増加により銑滓がたまと棚吊りスリップ気味になり、溶銑中 Si% も 1.10% の次に 0.40% になるなど変動が大きくなり、溶銑中 S% も上昇してきて、安定した操業は困難になった。

4. 考 察

4.1 物質収支と熱収支をもとにした考察

ボッシュガス量一定で、送風中酸素を富化したときの酸素富化率 1% 増に対する出鉄増加率は、熱損失の影響

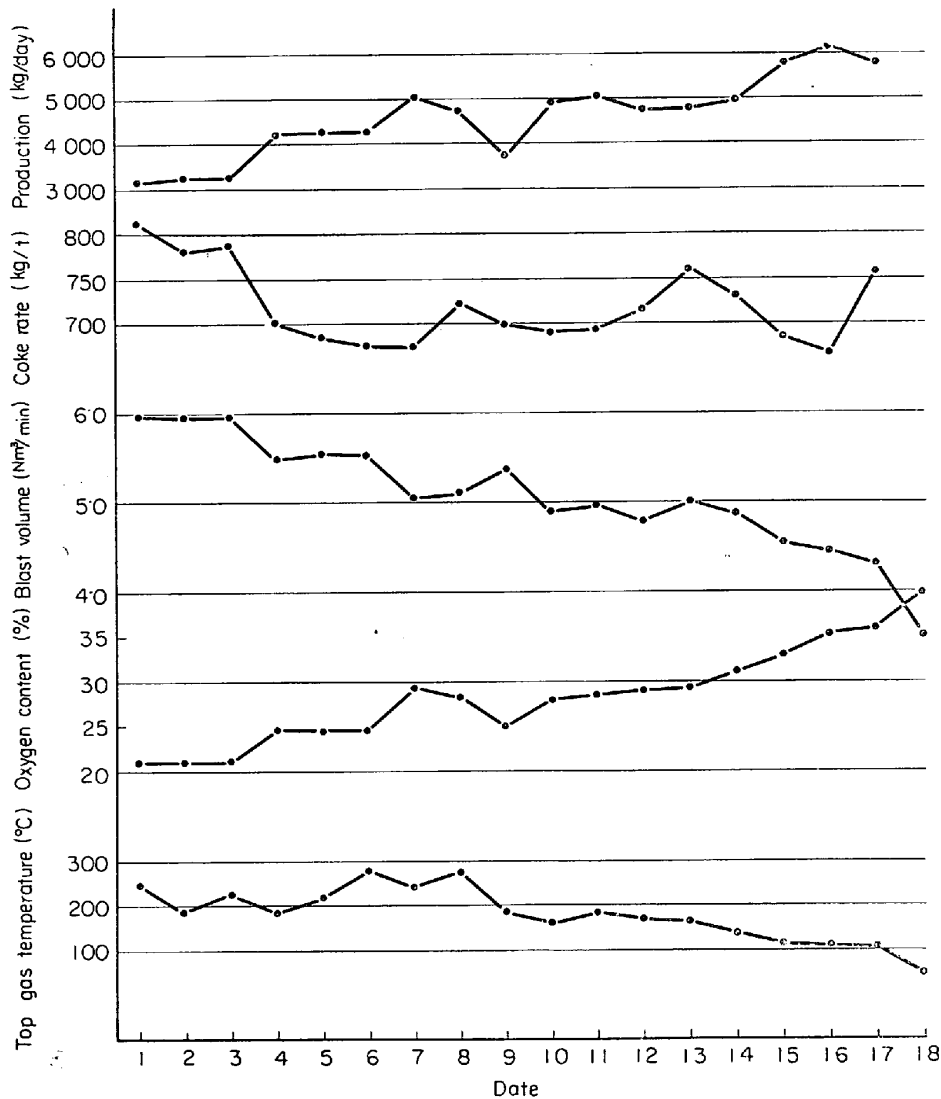


Fig. 3. Results of the test operation.

のないところをとり、5% 増であつた。コークス比は、熱損失の影響を補正すると、送風中酸素含有率 25% 以下では、酸素富化率 1% 当たりほとんど低下しないか 2.5 kg 程度の低下、25% 以上では 2.5 kg 以上増加し Fig. 5 からこの増加の主要因は、ソリューションロスカーボン量の増加によるものであり、この原因は次のように考えられる。

(1) N_2 含有率の低下により、銑鉄 t 当たりのガス量が減少、ガスから装入物への移動熱量が減少して、間接還元領域の温度が低下し、間接還元反応速度が遅くなり間接還元量が減少、高温部での直接還元量が増加する。

(2) 酸素富化率増加により、操業速度が速くなり、間接還元が起こる領域での装入物の滞留時間が減少する。Rist らが報告した操業線図を、本試験結果に適用したのが Fig. 6 で、酸素富化率の増加につれて酸化

鉄の直接還元により奪われる酸素量 y_d (O atm/atm Fe) が増加している。数式モデルでの計算の一部を Table 3 に示すが、炉下部高温領域での必要熱量が増し、還元ガス量過多によりシャフト効率 η が低下している。出銑量増加による銑鉄 t 当たりの熱損失量の減少を差引いても、さらに供給熱量が減少しているのは、 N_2 の顕熱の減少によるが、Fig. 3 での炉頂温度低下または Table 3 の炉頂ガス顕熱の減少からうかがわれるように、炉内装入物温度の低下をきたし、これが間接還元率の低下、すなわちシャフト効率の低下の根本的原因になっている。

4.2 伝熱工学的な面からの考察

シャフト部におけるガスと装入物の熱交換を調べるため、ゾンデを用いた温度分布実測値を Fig. 7 に示す。酸素富化率の増加により、羽口先火焰温度は 2047°C から 2810°C まで上昇し、シャフトのガス温度は低下す

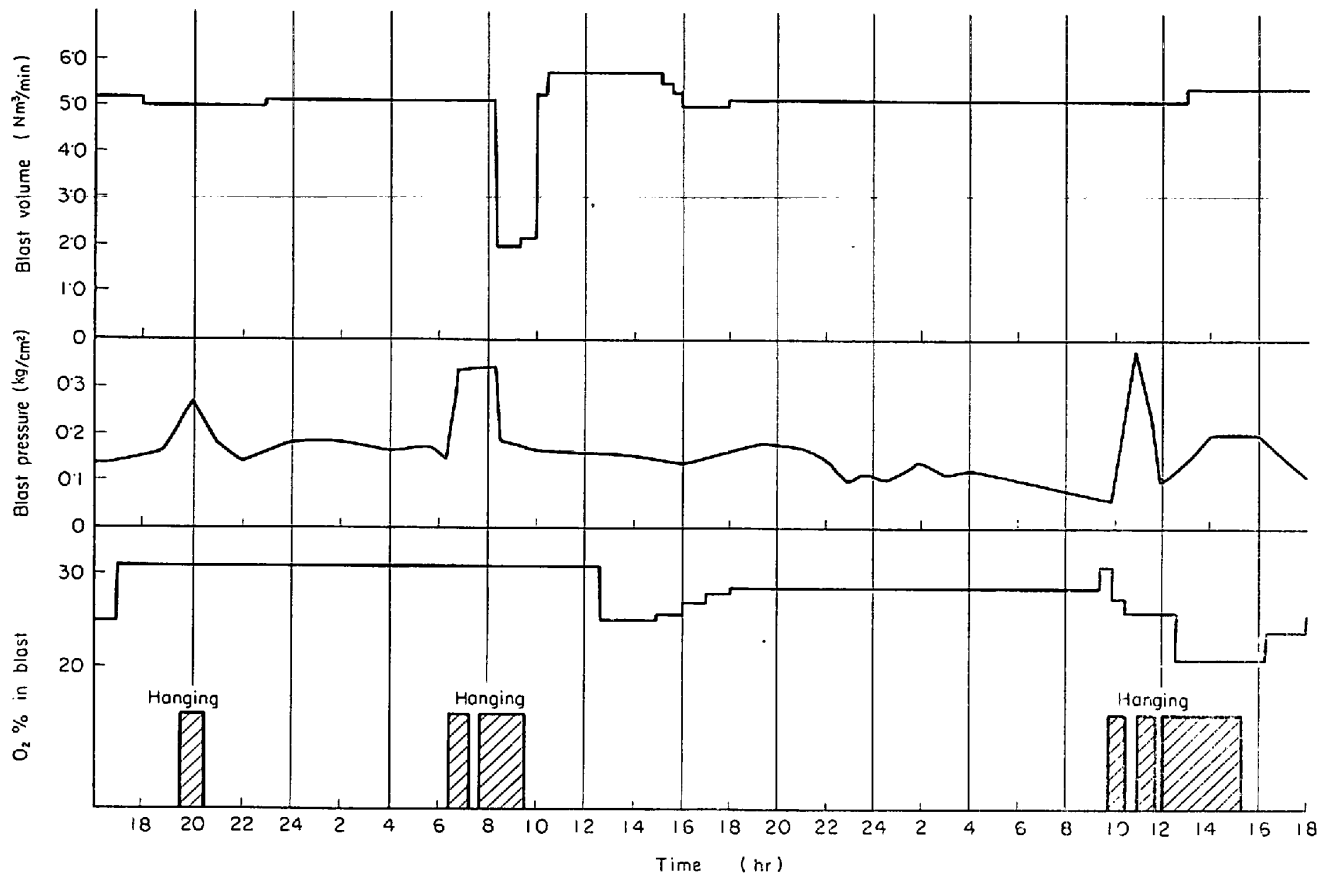


Fig. 4. Reproducible hanging brought by sudden increase of oxygen enrichment at more than 31% oxygen content in hot blast.

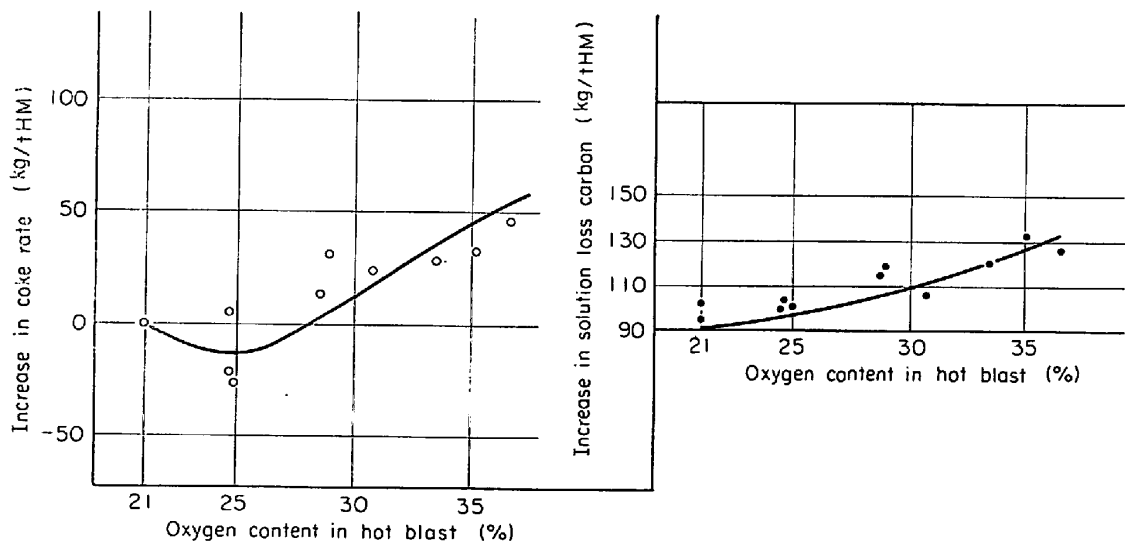


Fig. 5. Effect of oxygen enrichment on the coke rate and the amount of solution loss carbon.

る。酸素含有率が30%以上になると、熱保存帯の温度が低下して、36%近傍では消滅する傾向があり、36~40%では下部熱交換帯の温度さえ低下する傾向がみられ高炉プロセスとしては限界に近い温度プロフィールを認め

た。

酸素富化率の増加につれて、ガスと固体間の熱交換の面から高炉プロセスとしての限界をきたすことは、各水準ごとに計算した段階別熱精算¹⁾結果と、温度プロフ

Table 3. Calculated results for the test operation.

	I	II	III	IV	V
Indirect reduction rate	67.2	65.1	65.1	58.6	56.4
Oxygen removed by direct reduction (kg/tHM)	124.0	132.9	131.2	157.2	167.5
Shaft efficiency	0.612	0.661	0.658	0.593	0.556
Necessary heat above 900°C (kcal/tHM)	546 562	564 985	584 234	623 235	646 103
Total heat supplied (kcal/tHM)	2 334 230	1 877 419	1 930 714	1 816 625	1 714 902
Sensible heat of top gas (kcal/tHM)	256 453	203 904	196 420	141 755	86 948
Theoretical flame temperature (°C)	2 047	2 264	2 483	2 520	2 810

ルの実測値を対比したFig. 8よりさらに明確にわかる。臨界点Rは、しだいに温度の低い方向に移動し、低温部分すなわちシャフト部での余剰熱量が減少し、装入物が十分予熱されないで炉下部高温部に降下して、直接還元

による必要熱が増加している。

高炉プロセスでのガスと装入物間の熱交換は、ガスと固体の流れが均一押し流れて、径方向の不均一性を無視し、総括熱伝達係数 h が各部分で一定だと仮定して、高さ方向の各部分で起こる反応や熱損失を考慮し、充填塔の熱交換の式より、高炉のシャフトでの熱交換の式を導入できる。Fig. 9 にモデルの構成を示し、その基礎式は、(1)~(5)式ようになる。

$$dT/dZ = \alpha(T-t) + \beta \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = Sh/Gk \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta = q_e/Gk \dots\dots\dots (3)$$

$$dt/dZ = (\alpha/u)(T-t) \dots\dots\dots (4)$$

$$u = mc/Gk \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 T : ガス温度 (°C)

t : 固体 (液体) 温度 (°C)

Z : ストックラインよりの距離 (m)

S : 炉平均断面積 (m²)

h : 総括熱伝達係数 (kcal/bed m³ deg hr)

q_e : 熱損失 (kcal/hr·m)

k : ガスの比熱 0.27~0.30(kcal/ kg·deg)

C : 固体の比熱 (kcal/ kg deg)

G : ガス流量 (kg/hr)

m : 固体 (液体) 流量 (kg/hr)

ここで(5)式の u は熱流比という熱交換の程度をあらわす重要なパラメーターである。境界条件として炉頂部 ($Z=0$) で装入物温度 $t=t_0$ 熱保存帯 ($Z=Z_R$) でガス温度を $T=T_R$ とすると、任意の位置 Z でのガス温度 T と装入物温度 t は(6)と(7)式で求められる。

$$T = T_0 + (u/1-u)(1-e^{BZ})(T_0-t_0+A) + CZ \dots\dots\dots (6)$$

$$t = t_0 + (1/1-u)(1-e^{BZ})(T_0-t_0+A) + CZ \dots\dots\dots (7)$$

ここで A , B , C , は(8)~(10)式で与えられる。

$$A = (\beta/\alpha)/(1-1/u) \dots\dots\dots (8)$$

$$B = \alpha(1-1/u) \dots\dots\dots (9)$$

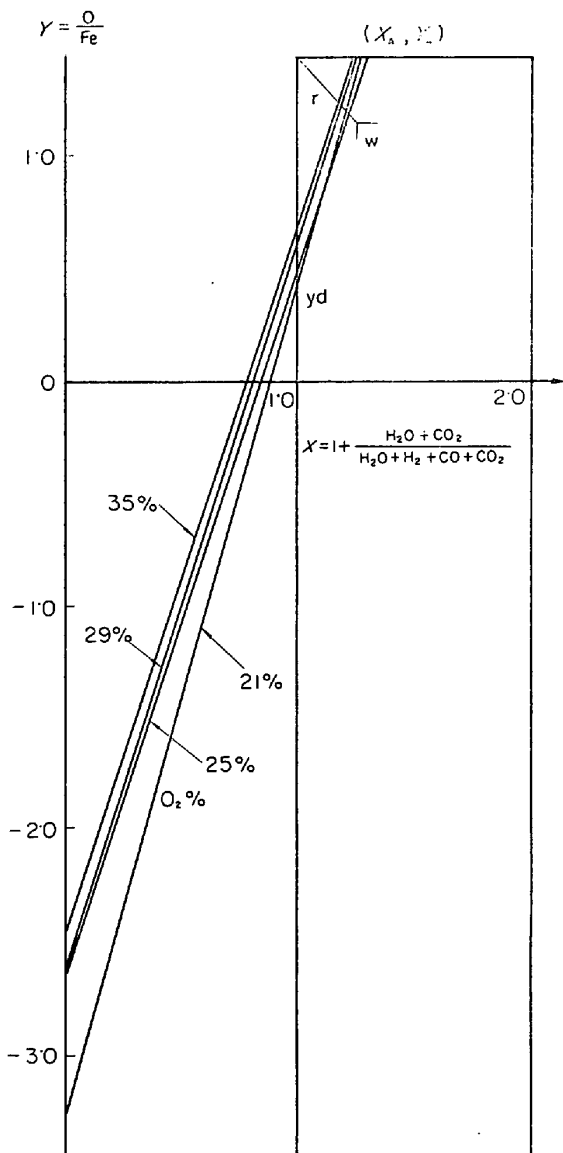


Fig. 6. Effect of oxygen enrichment on the amount of direct reduction (y_d) and shaft efficiency (r).

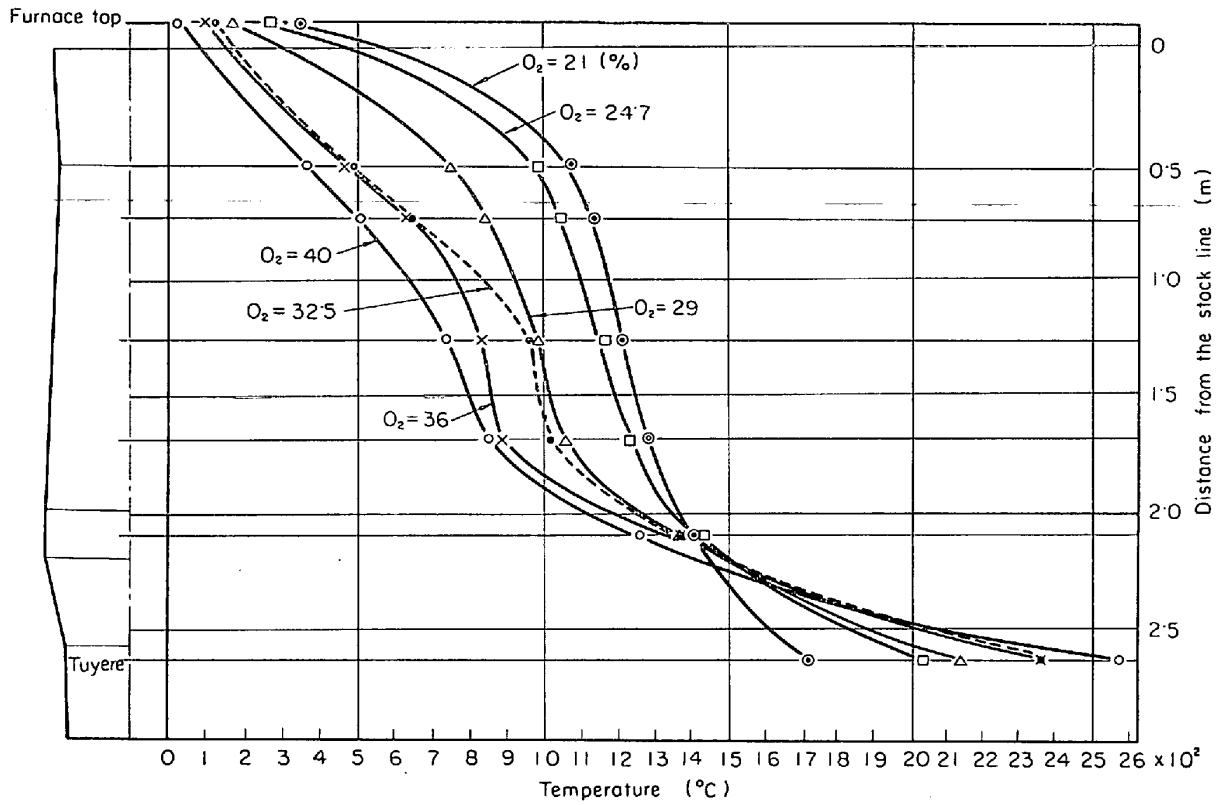


Fig. 7. Effect of oxygen enrichment on the gas temperature profile.

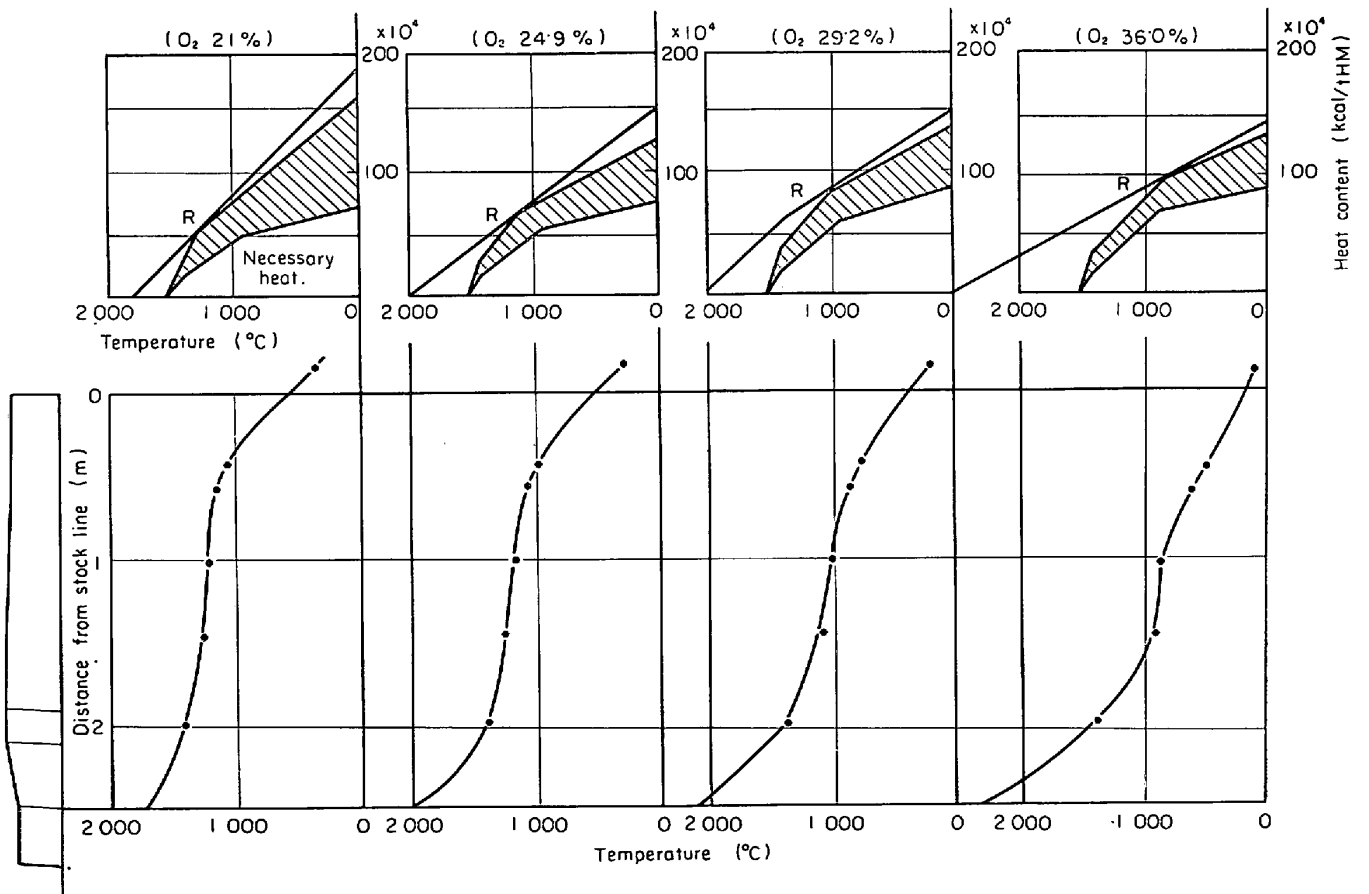


Fig. 8. Staged heat balances and observed temperature profiles at different amount of oxygen enrichment.

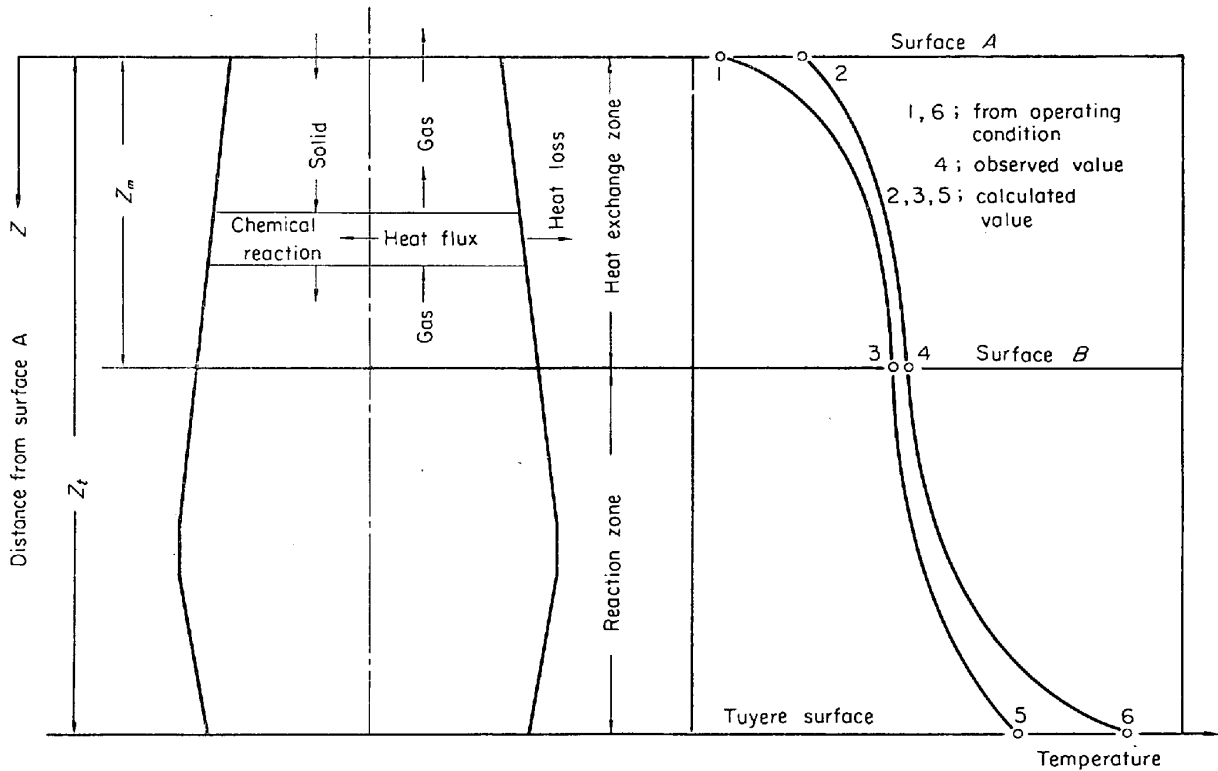


Fig. 9. Counter current heat exchange model for a blast furnace.

$$C = \beta / (1 - u) \dots\dots\dots (10)$$

シャフト部で固体は鉱石とコークスであり、その熱容量 mc は、コークスと鉱石の流量を m_{coke} , m_{ore} 、コークスの比熱を $0.22^{9)}$ 、鉱石の比熱を $0.20^{9)}$ [kcal/kg·deg] とすると、

$$mc = 0.22m_{\text{coke}} + 0.20m_{\text{ore}} \dots\dots\dots (11)$$

以上はシャフト部についての式であるが、境界条件として熱保存帯の下限 ($Z = Z_R$) での装入物温度 $t = t_R$ 羽口先 ($Z = Z_t$) でのガスの火焰温度 $T = T_t$ をとり、

$$T = T_t + (T_t - t_t + A') (e^{B'(Z-Z_t)} - 1) / (1 - 1/u) + C(Z - Z_t) \dots\dots\dots (12)$$

$$t = t_t + (T_t - t_t + A') (e^{B'(Z-Z_t)} - 1) (u - 1) + C'(Z - Z_t) \dots\dots\dots (13)$$

ここで液体の熱容量は、

$$mc = m_{\text{pig}} \cdot C_{\text{pp}} + m_{\text{slag}} C_{\text{ps}} + m_{\text{coke}} \cdot C_{\text{pcoke}} + \Delta H / \Delta t \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta H = \Delta H_{\text{sol}} - \Delta H_{\text{Si}} + \Delta H_{\text{Mn}} + \Delta H_P + \Delta H_C \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta t = t_l - t_R \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 m_{pig} , m_{slag} : 溶鉄、溶滓の流量 (kg/hr)
 C_{pp} , C_{ps} : 溶鉄、溶滓の比熱¹⁰⁾ (kcal/kg·deg)
 ΔH_{sol} : ソリュージョンロス反応熱¹¹⁾ (kcal/hr)
 ΔH_{Si} : Si の還元反応熱¹¹⁾ (kcal/hr)
 ΔH_{Mn} : Mn の還元反応熱¹¹⁾ (kcal/hr)

ΔH_P : P の還元反応熱¹¹⁾ (kcal/hr)
 ΔH_C : C の溶鉄への溶解熱¹²⁾ (kcal/hr)
 t_l : 溶鉄と溶滓の実測平均温度 (°C)
 t_R : 熱保存帯の粒子温度 (°C)

以上の式に、実験的に求められた伝熱物性値⁹⁾ を入れ酸素富化率を変えたときの炉の高さ方向の炉内ガス温度と装入物温度の計算値と実測値をプロットした実例を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。総括熱伝達係数は 2000 として計算しており、報告⁹⁾¹³⁾ によつても大きくばらついている値であるが、COCHERY¹³⁾ により高炉の通常の操業条件では 1000~3000 が妥当だとしている。Fig. 10, 11 で酸素富化率を増加してゆくと温度分布が急勾配になつてゆくことがわかり、実測結果が理論的に裏付けられた。

酸素富化率の変化と、熱保存帯より上の上部熱交換帯の熱交換と熱保存帯の長さの変化について、理論的に計算した値と実測値を Fig. 12 に示す。この部分での熱損失 q_e は全熱損失の 15% として、総括熱伝達係数を 2000 として計算したもので、実測値と理論値はよく一致している。Fig. 12 から、酸素富化率の増加につれて熱保存帯の長さが減少してゆくことが理論的にも示され、すでに推測を加えた実験的事実を裏付けることができた。熱交換の面から高炉プロセスの限界を示す重要なパラメータである熱流比は、酸素富化率の増加により大

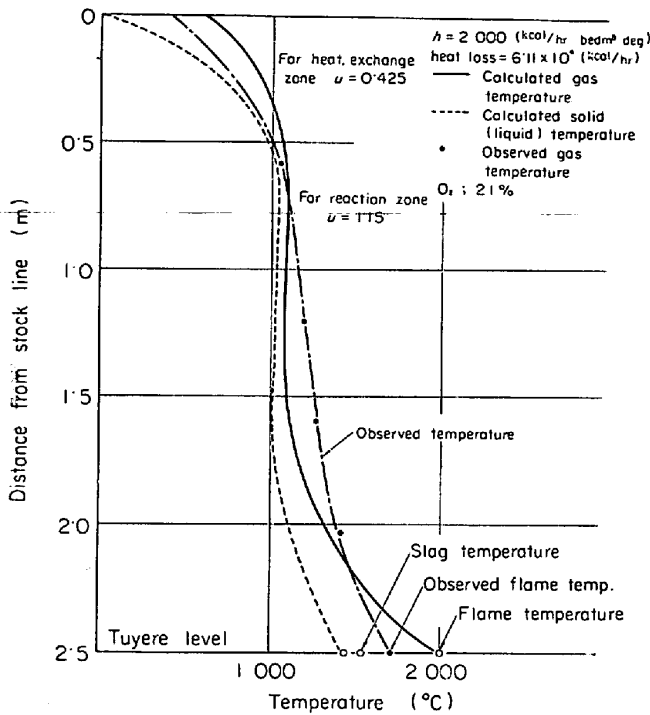


Fig. 10. Temperature profile calculated and observed to the test operation at 21% oxygen content in hot blast.

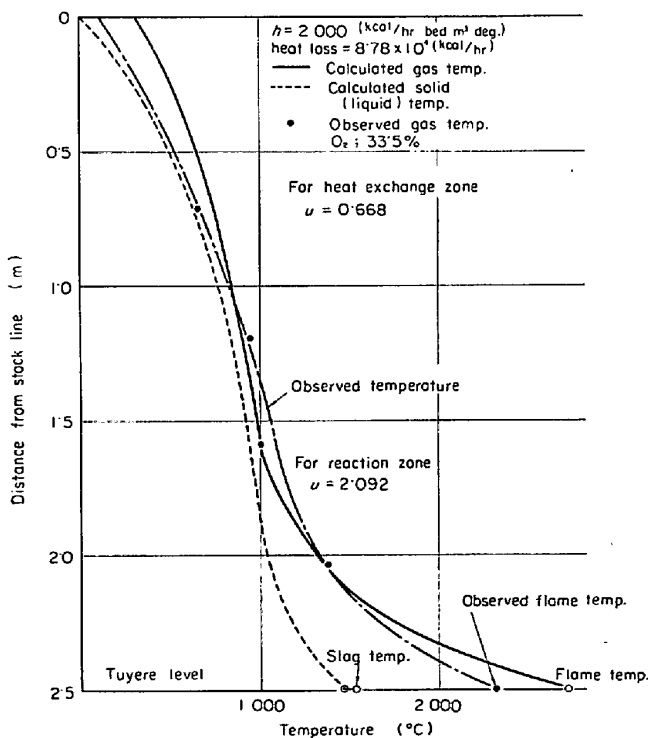


Fig. 11. Temperature profile calculated and observed to the test operation at 33.5% oxygen content in hot blast.

きくなり、限界付近では 0.75 になった。実際高炉では炉頂温度からの推定で 0.82 くらいが u の限界値¹³⁾とさ

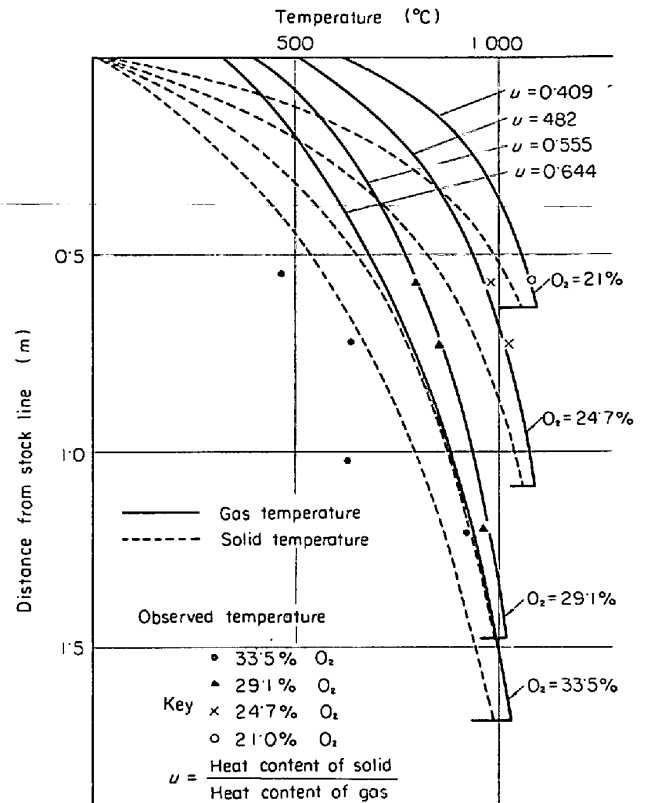


Fig. 12. Effect of oxygen enrichment on the length of thermal reserve zone and on u from calculated and observed results.

れているが、試験高炉では熱損失が実際高炉より大きい
ため低い値を示している。

4.3 反応工学的な面からの考察

酸素富化率の増加により上部熱交換帯が下部に伸び、熱保存帯の長さが短くなり、酸素含有率 36% 以上では上部熱交換帯と下部熱交換帯がくつついて熱保存帯が消滅する。この限界を越えると装入物は十分予熱されずに下部熱交換帯に入るとともに、未還元の鉱石が降下し、直接還元により還元されることを総括的にはFig. 6にて説明した。下部熱交換帯での熱交換か反応の一実際に両者は不可分ではない—影響で銑滓の性状悪化が起これば、高炉操業は不可能となる。本実験で酸素含有率36%以上で、銑中 Si% 低下、滓中 FeO 増加、銑中 S% 増加、滓の流動性悪化、銑滓温度の低下などの現象がみられたことは、熱交換不足の影響が下部高温部での冶金反応にまで及んだものと考えられる。酸素富化による炉下部直接還元量の増加を定量的に調べるため、各期での温度分布とガス組成分布を用い、モデル計算にて高さ方向の還元率分布を求めた。操業中採取した鉱石試料を顕微鏡で調べた結果トポケミカルに進行しており、境膜拡散抵抗と収支抵抗を無視した基本式(17)¹⁴⁾を用いて炉の高さ方向にそつて鉱石の還元率分布を調べた。

$$\frac{df}{dt} = \frac{(C_0 - C_A^*)/R_0q}{R_0(f - f^2)/D + 1/k(1 + 1/K)} \dots\dots (17)$$

$$f = 1 - (1 - F)^{1/3} \dots\dots\dots (18)$$

(18)式を用いて(17)式を変形すると、

$$\frac{dF}{dt} = \frac{3}{R_0q} \cdot \frac{(C_0 - C_A^*)}{\frac{R_0}{D} \cdot \frac{1 - (1 - F)^{1/3}}{(1 - F)^{1/3}} + \frac{1}{k(1 + 1/K)(1 - F)^{2/3}}} \dots\dots\dots (19)$$

$$C_0 = C_{CO} = (P/82 \cdot 06T) [CO] \cdot 10^{-2} \dots\dots\dots (20)$$

$$C_A^* C_{CO}^{(g)} = (C_{CO} + C_{CO_2}) / (1 + K) \dots\dots\dots (21)$$

$$C_{CO_2} = (P/82 \cdot 6T) [CO_2] \cdot 10^{-2} \dots\dots\dots (22)$$

$$K = \exp\{-(-5450 + 5 \cdot 8T) / 1 \cdot 987T\} \dots\dots (23)$$

ただし、 f : 鉄鉱石を球と仮定した場合の還元層の還元開始前の鉱石径に対する比率

F : 鉄鉱石を球と仮定した場合の還元層体積の還元開始前の鉱石体積に対する比率

C_0, C_{CO} : 還元ガス中のCO濃度

$C_A^*, C_{CO}^{(g)}$: 温度TでFeO-Feとの平衡ガス組成
[CO], [CO₂] : 還元ガス中CO, CO₂ vol%

q : 鉄鉱石中の酸素濃度 (mol/cm³)

D : 粒内拡散係数 (cm²/sec)

k : ガス-固体面での反応速度定数 (cm/sec)

P : ガス電圧 (atm)

T : 温度 (°K)

R_0, R : 鉄鉱石の半径(代表径) (cm)

K : 平衡定数¹⁵⁾

反応速度定数 k と粒内拡散係数 D を求めるため、試験高炉の操業中に貯鉱槽から採取した焼結鉱を、800~1000°Cの範囲で、CO-CO₂-N₂系の組成を変えたガスで還元実験を行ない、活性化エネルギーとして8.35 kcal/molが得られ、 $D=2.49$ 、 k としては(24)式の値とした。

$$k = 40 \cdot 4 \exp(-4200/T) \dots\dots\dots (24)$$

試験高炉の高さ方向にそつて測定した温度分布とガス分布を用いて、(24)式と拡散定数 D の値を(19)式に入れ、差分方程式の形に変形し、滞留時間を導入し、シャフトでの間接還元率、間接還元反応速度を推定した。

Fig. 13 に炉の高さ方向にそつての鉱石の間接還元率を送風中酸素含有率をパラメーターとして示した。酸素富化率の増加により、間接還元率が減少、しかも間接還元領域が炉下部に移行し、残留したFeOの直接還元が炉下部で大量に起こることがわかる。たとえば、酸素含有率36%以上では、45%以上が未還元状態で、ストック

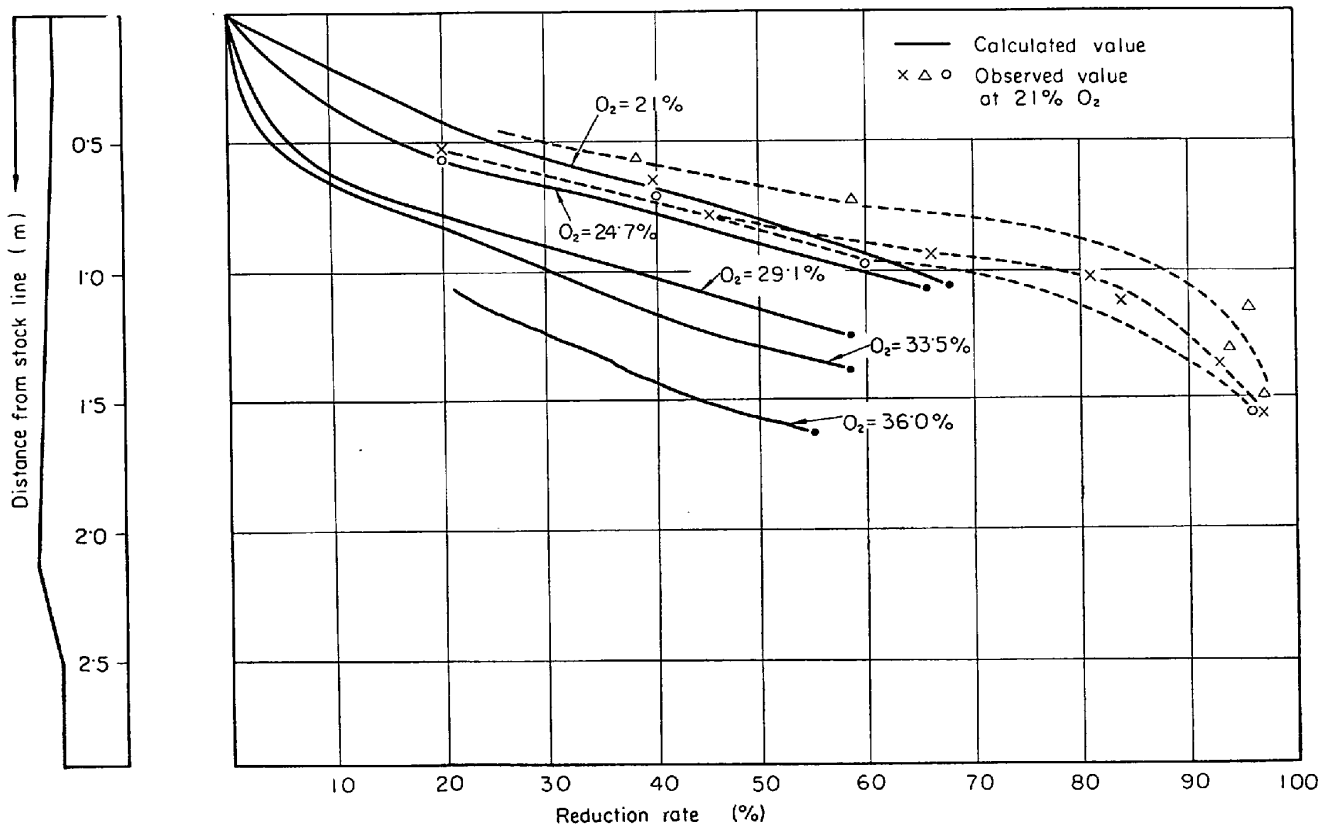


Fig. 13. Effect of oxygen enrichment on the progress of iron ore reduction in the furnace shaft.

ラインから 1.6m 以上のシャフト下部に降下し、直接還元により還元されることになる。その後の解体調査¹⁰⁾によると通常状態では95%以上還元されている点であり、溶融が開始する領域に近く、温度の低い未還元鉱石が多量に混入したため、シリカの還元や脱硫反応など炉下部での冶金反応にまで悪影響が及んだと考えられる。試験高炉のように小型の炉でも、径方向の還元率分布は不均一¹⁰⁾であり、実際高炉のように滞留時間が長い場合でも、酸素富化率増加により温度プロファイル変化をきたせば、局部的にでも本実験結果に類似した現象が起こると推定される。

4.4 酸素富化率増加と炉況不調について

酸素富化率を増加させ炉況不調をきたしたことを、Fig. 4 に示した。ポッシュガス量一定で酸素富化率を増すと生産速度が速くなるうえ、Fig. 7 に示したように熱保存帯の長さが短くなり、予熱不十分な未還元鉱石が溶融帯に降下する機会が増して、溶融物の粘性を瞬間的に著しく上昇させる可能性がでてくる。これは圧力損失を増す原因ともなり、抵抗の少ない部分のガス通過量増大を招き、スリップ、棚吊りなどを引き起こすことが考えられる。単純に気液の均一分布を仮定して、各期ごとに Hanging Factor¹⁰⁾ と Fluid Ratio¹⁰⁾ を計算してフラディング条件からの偏り傾向を定性的に示したのが Fig. 14 で、溶融物の粘性が悪化すると、矢印のように定常状態を仮定しても炉況不調を引き起こしやすくなる。

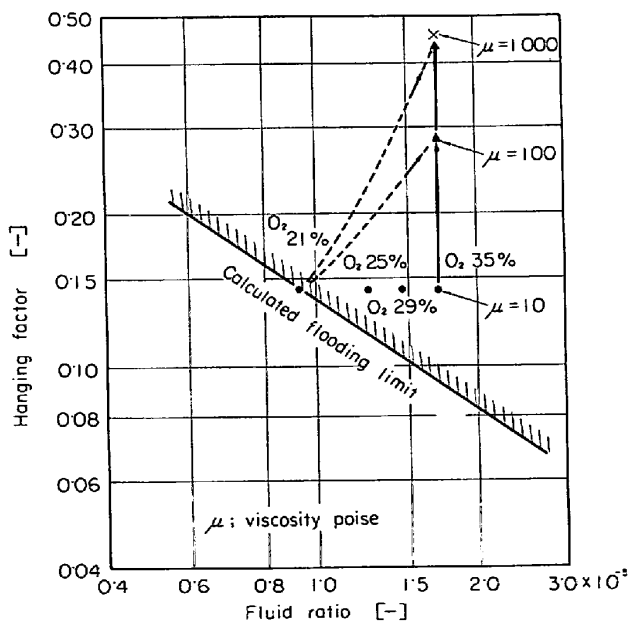


Fig. 14. Influence of oxygen enrichment in hot blast on the flooding condition with different liquid viscosity.

酸素含有率 31% で炉況不調に陥入りながら、注意深い操業でさらに富化率を増加できた理由は、結果的に局部的なガス量過多や装入物の不均一な降下を未然に防いだためと考えられる。棚吊りのきつかけに対しては、さらに高炉プロセスの動特性を深く研究しなくては説明がつかず、計測法の開発も含めて今後研究する必要がある。

通常高炉に酸素富化送風を適用する場合に、水蒸気や重油を併用して羽口先火焰温度を制御しないと、炉況不調を誘発することが経験されている。この点について高炉プロセスの本質的な面から解明すると、シャフトでのガスと固体の熱交換を行なわせるのに、一定量のガス量を維持する必要があり、高温部での直接還元を増加させないためにも、水蒸気や重油の添加は H_2 の生成を伴うので有利である。酸素富化率に対する適切な添加量は、本実験から推測されるように、高炉の燃料比—鉄鉄 t 当たりのガス量—の水準、操業度—温度プロファイルと鉄滓流量—の水準、装入物の粒度や、炉内での分布の適正度合、ガス分布の均一性などの条件や、高炉の操業条件により個々にきまる問題だといえよう。

5. 結 言

試験高炉を用いて、高炉プロセスに酸素富化送風を適用したときのプロセスの限界にいたるまでの変化を、伝熱工学、反応工学的に解明し、以下の結論を得た。

(1) 試験高炉でポッシュガス量一定で、送風中酸素量を 40% まで富化して操業したら、31% を越すあたりから鉄鉄や滓がたまると風圧の急上昇が起こり、再現性のある強固な棚吊りを生じた。

(2) 酸素富化率 1% 増に対し、出鉄増加率は 5%、コークス比は、送風中酸素含有率 25% 以下で、富化率 1% に対し 0~2.5 kg 低下、25% 以上で 2.5 kg 以上増加した。増加の主原因はソリューションロスカーボンの増加による。これらの数値は、高炉のコークス比、操業度、装入物条件の水準により異なる。

(3) 酸素富化率の増加に伴い、炉内温度プロファイル変化がみられ、とくに 30% 以上で熱保存帯の温度が低下し、36% 以上で熱保存帯が消滅する。酸素富化率と熱保存帯の長さの関係を理論的に求め、実測値とよく適合するところを示した。36% 以上では、温度プロファイルと段階別熱精算の対比から、シャフトの熱交換による高炉プロセスの限界が認められた。

(4) 酸素富化率の増加に伴う高炉の高さ方向の鉱石の還元の進行状態を計算により推定し、ソリューションロスカーボン増加を定量的に裏付けた。とくに送風中酸

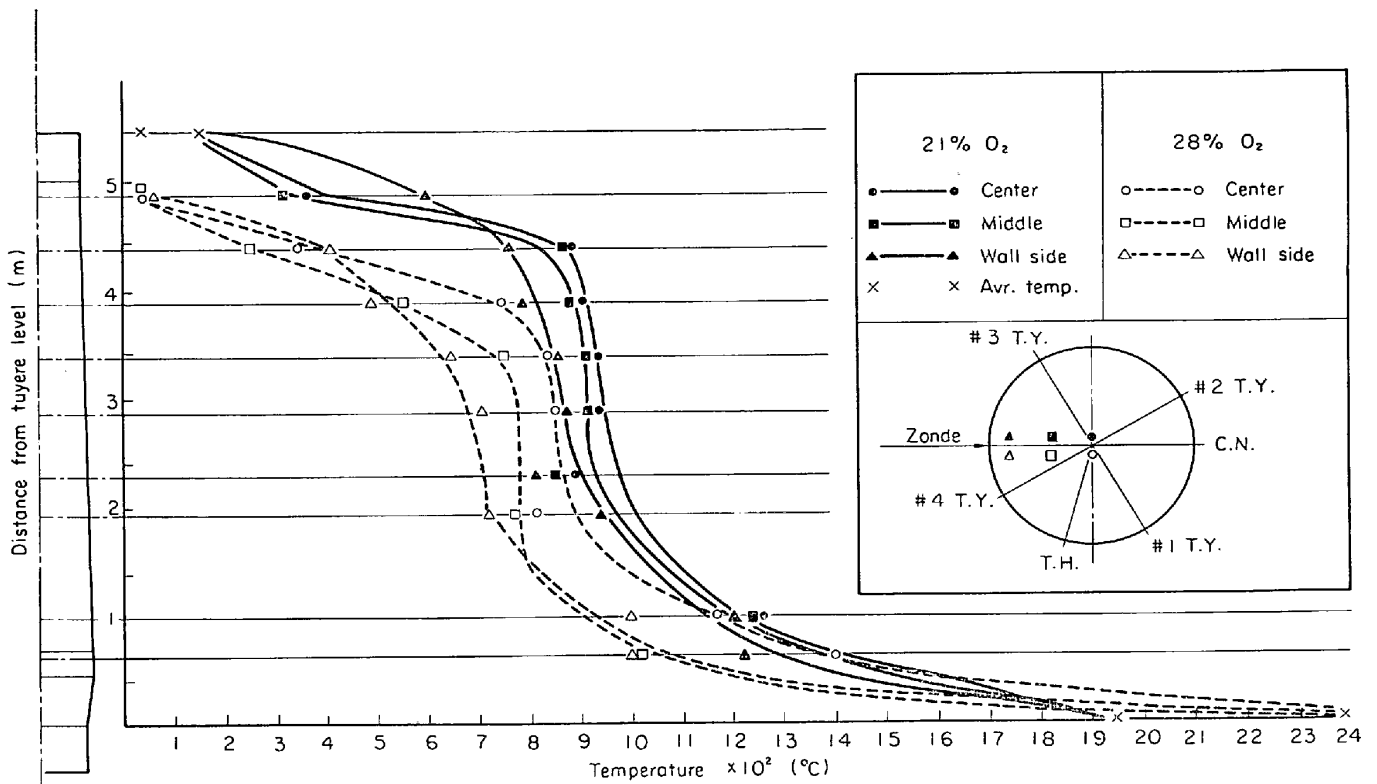


Fig. 15. Temperature distributions with or without oxygen enrichment.

素含有率36%以上で、45%以上未還元鉱石が炉下部高温部に降下し、滓中に多量の FeO が入りシリカ還元や脱硫など炉下部冶金反応に悪影響を与え、反応面からの高炉プロセスの限界が認められた。

(5) 酸素高富化時の炉況不調の原因については、熱保存帯の長さの減少に伴う予熱不十分の装入物降下のため定常状態でも炉況不調をきたしやすくなるが、原因の解明は高炉プロセスの動特性を解明しないと説明できず、今後の研究課題といえよう。

終わりに本研究を遂行するにあたってご支援をいただいた日本鋼管株式会社技術関係首脳部をはじめ、技術研究所幹部、技術部、京浜製鉄所製鉄部、設備部の関係各位に深甚な謝意を捧げます。試験高炉の操業と測定に協力された製鉄研究室の福島勤、遠藤恵治の両君、物理研究室の下間照夫氏、佐野和夫、山田健夫の両君、京浜製鉄部の大関彰一郎、吉田弘の両君に心から感謝いたします。

文 献

- 1) P. REICHARDT: Arch. Eisenhüttenw., 1 (1927) 2, p. 96~97
- 2) J. MICHARD and Y. BOUDIER: Rev. Metall., 17 (1963) 6, p. 513~531
- 3) 住金和歌山: 製鉄部会報告, 鉄-34-13-講

- 4) J. J. BOSLEY and M. B. ROYER: Blast Furn. Coke Oven & Raw Mat. Comm.Proc., 17 (1958), p. 256~265
- 5) T. MIYASHITA and M. OHTSUKI: ICSTIS (Tokyo) 1970 Proc. p. 104~108
- 6) 鋼管技研: 学振製鉄 54 委-1157 (1970)
- 7) A. RIST and N. MEYSSON: Rev. Metall., 19 (1965) 11, p. 995~1039
- 8) B. I. KITAEV, et al.: Heat Exchange in Shaft Furnaces, (1967), p. 184, p. 62 [Pergamon Press]
- 9) H. BEER and H. KRÄINER: Techn. Mitt. Krupp Forschungsber, 24 (1966) 3, p. 25~47 BISI Translation 5341 Sept. 1967
- 10) 日本学術振興会: 鉄鋼熱計算数値 (1966), p. 24~25 [日刊工業新聞社]
- 11) G. F. ELLIOT and M. GLEISER: Thermochemistry for Steelmaking, vol. 1 (1960) [Addison-Wesley]
- 12) A. RIST, et al.: Rev. Metall., 18 (1964) 2, p. 142
- 13) J. C. COCHERY: Rev. Metall., 21 (1967) 11, p. 955
- 14) 八幡東研: 学振製鉄 54 委-1087 (1967)
- 15) O. KUEASCHIEWSKI, et al.: 丹羽, 横川, 中村, 訳 金属熱化学 (第4版) 産業図書 (1968), p. 345, 347
- 16) Von K. PORTHIER: Stahl u. Eisen, 90 (1970) 5, p. 240~241

討 論

【質問1】 京都大学工学部 小門純一

酸素富化した場合の高炉炉高方向の温度分布のほか横断面上での温度分布の変化を測定しておられたら教えて下さい。特に羽口上部での温度分布のピークが酸素富化により、炉壁側によるか、炉芯側によるか。

【回答】

本実験では測定していませんが、最近の測定結果では Fig. 15 のようになり、いずれも炉中心の温度が高くなっている。羽口レベルでの温度分布は精密な測定はしていないが、羽口レースウェイの温度の実測値を示した。

【質問2】

送風中の $O_2\%$ を 21% から 31% に急にあげた場合には、再現性のある棚吊りが生ずるが、21%から40%ま

で徐々に O_2 富化をした場合、良好な操業（出鉄比の順調な増加）が行なえたのはどのような理由によるとお考えですか。たとえば急激な O_2 増加は熱的な平衡をくずすが、緩慢に増加すれば熱的な平衡を持続できるからということもひとつの理由でしょうか。

【回答】

酸素富化率を急激に増したときの棚吊りは、熱的な平衡がくずれることによるものと推察している。40%までの酸素富化操業を継続できた理由は、本文4.4項で述べているように、温度分布が悪化し予熱不十分な未還元鉄石を局部的にも急激に降下させないように、風圧上昇荷下りをみて、注意深い操業をしたことと、過渡期に熱的平衡を急激に変化させないようにした結果だと推察している。