

論 文

669.162.227: 669.162.224.4: 669.162.281

高圧操業および酸素富化操業の理論的解析*

若林敬一**・藤浦正己***・森 孝***・井上展夫***

Theoretical Analyses on the High Pressure Operation and Oxygen Enriched Operation of Blast Furnace

Keichi WAKABAYASHI, Masami FUJIURA, Takashi MORI and Nobuo INOUE

Synopsis:

Mathematical models are proposed for analyzing blast furnace performance.

High pressure operation and oxygen enriched operation are studied with the proposed models. The production rate and the fuel ratio predicted from the models agreed very well with the operation data. Also, possibility of predicting production limit is discussed.

(Received Jan. 7, 1969)

1. 緒 言

高炉は過去 100 余年、装置および操業上の多年にわたる改良工夫によつてすぐれた生産性と経済性を誇り、製鉄プラントとして不動のものとなつており、すでに内容積が 3000 m³ のマンモス高炉が稼動しようとしており、近い将来 10000 t/day の高炉の出現も夢でなくなりつつある。

生産性の指標である出鉄比（1 日出鉄量 t / 炉内容積 m³）は一昔前の 1.0 くらいから、ここ十数年来飛躍的に伸び 2.0～2.5 に達した。このために大きな役割をはたしたものは、古くは整粒、自溶性焼結鉱などの事前処理、高温送風であるが、最近では高圧操業と酸素富化といえる。

しかしながら、この高圧効果や酸素富化の限界は必ずしも明確にされておらず実績が先行している感じががある。そこで実操業データをベースに新しく作成した数式モデルを用い計算機解析を行なつた結果、実績に近い定量的な取扱いが可能になつたので報告する。

2. 計 算 方 法

縦型向流反応器である高炉の入力は、装入物と送風であり、出力は炉床部の出鉄と炉頂ガスである。

したがつて、いまある所定の高炉に対し、ある装入物と送風条件が与えられた場合、最終製品である鉄鉄の温度組成を決めれば高炉を全収支的に扱うことによつて炉

頂ガス条件（流量、組成、温度）が計算できる。

このための数式モデルを以後“全収支 (Total Balance) モデル”，略して TB という。

モデルの概要を Fig. 1 に示す。

しかし、与えられた装入と送風条件の操業が可能かどうかの保証はないので、速度論的な検討が必要である。

このために、与えられた装入と送風条件から求まる炉頂条件を初期値にして、微分的に高炉炉内で起こる主要反応を考慮した熱および物質収支から、軸方向に炉内圧力、ガス流量、ガス組成 (CO, CO₂, H₂, H₂O)、粒子およびガス温度、還元率、石灰分解率の 10 個のプロセス変数の変化を追い、速度論的に操業の可否を検討する。

各速度式についてはすでに鞭らりの開発したものを用いた。

この計算用の数式モデルを以後“逐次計算 (Step Wise) モデル”，略して SW というモデルの概要を Fig. 2 に示す。これらの数式モデルの耐用性は実操業の解析によつて検証することができる。

さて計算は解の実用性を増すために計算ベースを実操業にとり、それにある操作 (Action)、この場合炉頂圧の変更とか O₂ 富化率の変更などを加え (基準操業に Action を加えたものを机上操業 Model Operation とい

* 昭和43年4月本会講演大会にて発表

昭和44年1月7日受付

** 富士製鉄(株)本社

*** 富士製鉄(株)名古屋製鉄所

う), その結果として考えられる出鉄量およびコークス比を仮定し, Fig. 3 の flow chart にしたがって計算し CHECK によつて仮定した値が正しければ, それを操作 (Action) の効果と考える。

このように考えると, いま対象にしている高炉に対し与えられた条件下では, ある送風条件と装入物の組み合わせのみが操作の可能性を示すことがわかる。

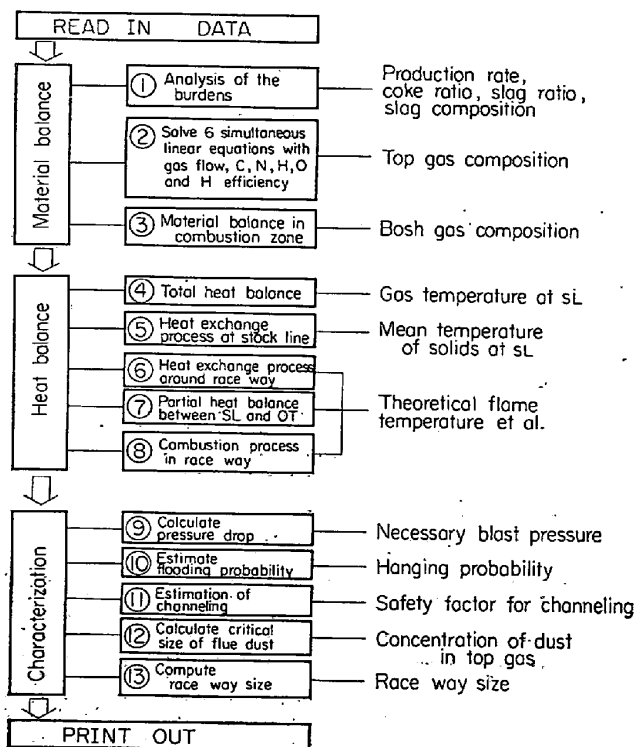


Fig. 1. Construction of "Total balance".

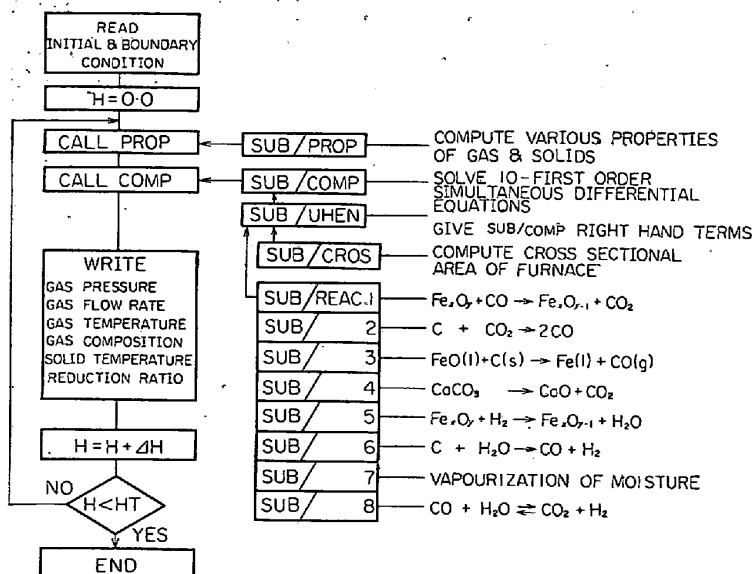


Fig. 2. Construction of "STEP WISE"

3. 高圧操業について

3.1 基準操業

計算ベースにする基準操業は, 広畑 2BF 1966 JUNE に取る。

読入データ

炉プロフィール Fig. 4

炉頂圧力 0.45 kg/cm²-G

送風条件 送風量 2650 Nm³/min

湿分 35.5 g/Nm³

送風温度 1020°C

重油 36.1 kg/t-pig

装入条件 装入回数 162 CH/day

装入物分析 Table 1

計算結果と実操業データの比較を Table 2 に示す。

計算値は実測値にほぼ一致していると考えられ, この程度の誤差は計算過程における種々の仮定から生ずると推察される程度のものであるから, モデルの耐用性は十分であるとして以後の計算を進める。

3.2 炉頂圧の生産性および CR におよぼす影響

先に述べた計算方法にしたがって, 風量一定で炉頂圧力を基準の 0.45 から 1, 2, 3, 4, 5 kg/cm² および常圧に変化させて試行計算した結果を Table 3 に示す。その結果次のことがわかる。

(1) 効果的な炉頂圧の限界は, 出鉄の伸び, CR のいずれに対しても約 3 kg/cm² である。

(2) 炉頂圧が大となると, ガスの利用率がよくなるのでシャフト部の温度は全般的に低くなり, 炉頂温度も下がる。

(3) 圧力損失, は同一風量であれば炉頂圧力が大になるとともに小さくなる。

3.3 送風量の影響

次に生産限界に与える高圧操業の効果を考えるために, 送風量の影響について考えてみよう。

炉頂圧力を 0.45 kg/cm² 一定として, 送風量を 2300, 2650, 3000 Nm³/min に変化させた結果を Table 4 に示す。

その結果, 送風量が増すと

(1) ガスの滞留時間すなわち反応時間が短くなりガスの利用率が悪くなる。(吸熱反応量が減る) ので, 炉頂温度が上がる。

(2) したがって, コークス比も上がる。

(3) 圧力損失は当然増大する。

3.4 高圧効果

3.2, 3.3 で求めた炉頂圧, 送風量の影響を,

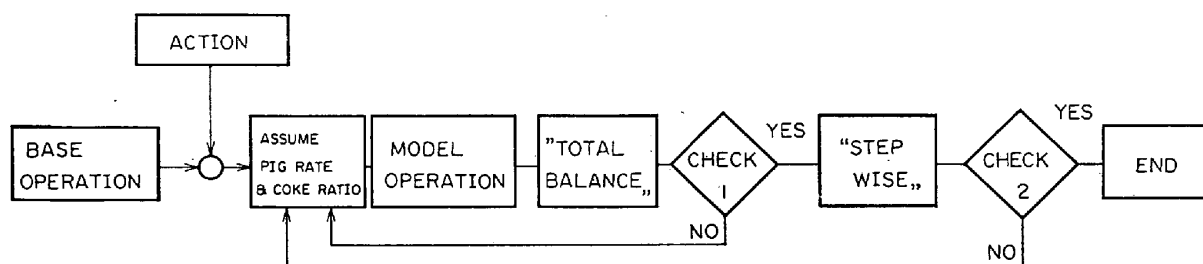


Fig. 3. Calculation flow chart.

Table 1. Condition of burdens.

Item Burdens	Charge t/ch	Bulk density kg/m ³	Average diameter mm	Chemical composition (wt%)									
				T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Mn	TiO ₂
1 Sinter	6.2	1763	19.0	58.30	7.77	72.81	5.94	1.94	8.22	0.93	0.014	0.31	0.65
2 "	16.7	1749	19.3	58.74	7.27	73.99	6.16	2.00	8.04	0.80	0.012	0.34	0.15
3 Ore	3.9	2360	12.3	63.33	1.90	89.64	5.53	2.77	0.31	0.13	0.007	0.25	0.10
4 "	2.0	2360	13.9	63.19	7.05	79.78	5.07	1.05	1.54	1.20	0.077	0.08	0.15
5 "	0.20	1740	17.0	31.92	—	—	7.46	1.48	2.07	0.45	0.016	24.44	0.07
6													
7 LD slag	0.25	1910	17.0	22.10	—	—	12.50	1.38	41.57	1.10	0.016	5.57	0.86
8 Lime stone	0.30	1460	16.8	—	—	—	—	—	54.85	—	—	—	—
9 Coke	8.5	433	47.3	—	—	0.94	5.07	3.55	0.22	0.12	0.55	—	—

Table 2. Calculated and observed values of base operation.

Item		Unit	Calculated	Observed	
Production rate		t/day	2960	2940	
Slag ratio		—	295	304	
Coke ratio		—	466	469	
Top gas	Temperature		°C	185·3	173
	Compo- sition	CO ₂	vol %	20·4	19·8
		CO	dry	21·2	22·1
		H ₂		3·1	3·8
		N ₂		56·3	54·1
Slag composition	SiO ₂	wt%	36·4	34·2	
	Al ₂ O ₃		16·6	15·0	
	CaO		40·6	42·0	
	MgO		4·4	5·2	
Theoretical flame temperature		°C	1862		

さらに広範囲に計算を行なつて出銑量およびコークス比に与える高圧操業の特性をBV(送風量)－FR(燃料比)平面に出銑量および炉頂圧をパラメーターにしてFig. 5に求めることができた。炉頂ガス温度とCO/CO₂を書込んである。高圧効果を、さらにわかりやすく炉頂圧に対し求めたものがFig. 6である。

さらにこの結果から、圧力損失、炉頂飛散粒子径、フラッキング(溢沓現象)、吹抜けに関する炉頂圧の影響

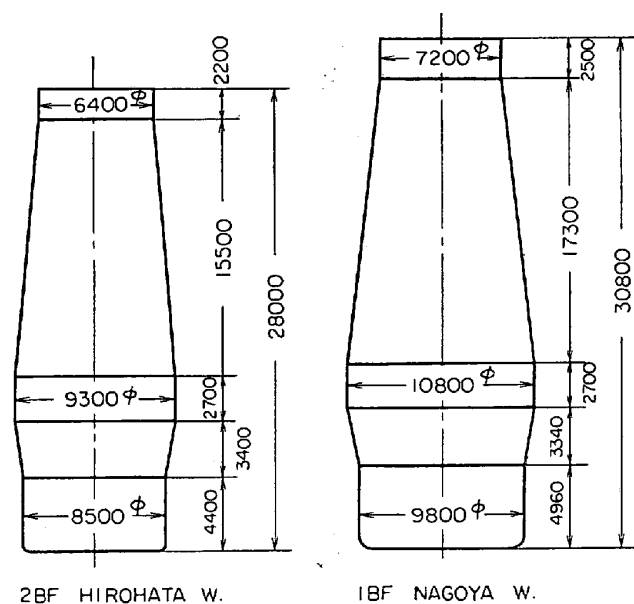


Fig. 4. Profile of model furnaces.

を計算したものをFig. 7～10に示す。

ここで吹抜け安全率とは、装入物の自重圧をストックライン(SL)と送風羽口(OT)間圧力損失で割つたものであり、溢沓危険とはT. K. SHERWOOD²⁾の提唱した無次元修正液ガス比と溢沓数でまとめる考えにもとづいたH. M. Жаворонкова³⁾の実験データより求めた溢沓限界点にいまだどれくらい近いかという割合を示すものである。

これらの結果から

Table 3. Effects of top gas pressure on production rate and coke ratio.

Top pressure	Production increase	Production rate	Fuel ratio	Coke ratio	Top gas temp.	Top gas composition		
						CO	CO ₂	H ₂
kg/cm ²	%	t/day	kg/t-pig		°C	wet vol%		
0.43	0	2960	502	466	185	19.94	19.32	2.92
1	3.1	3052	489	453	158	19.16	20.11	2.96
2	7.0	3167	474	438	124	18.15	21.11	3.00
3	9.2	3233	465	429	111	17.41	21.79	3.03
4	10.5	3271	462	426	92	17.35	21.93	3.04
5	11.2	3292	460	424	84	17.25	22.06	3.05

Table 4. Effects of blast volume on production rate and coke ratio.

Blast volume	Production increase	Production rate	Fuel ratio	Coke ratio	Top gas temperature	Top gas composition		
						CO	CO ₂	H ₂
Nm ³ / min	%	t/day	kg/t-pig		°C	wet vol %		
2300	— 12·3	2595	498	462	134	19·78	19·52	
2650	0	2960	502	466	185	19·94	19·32	
3000	12·3	3325	505	469	227	20·14	19·12	

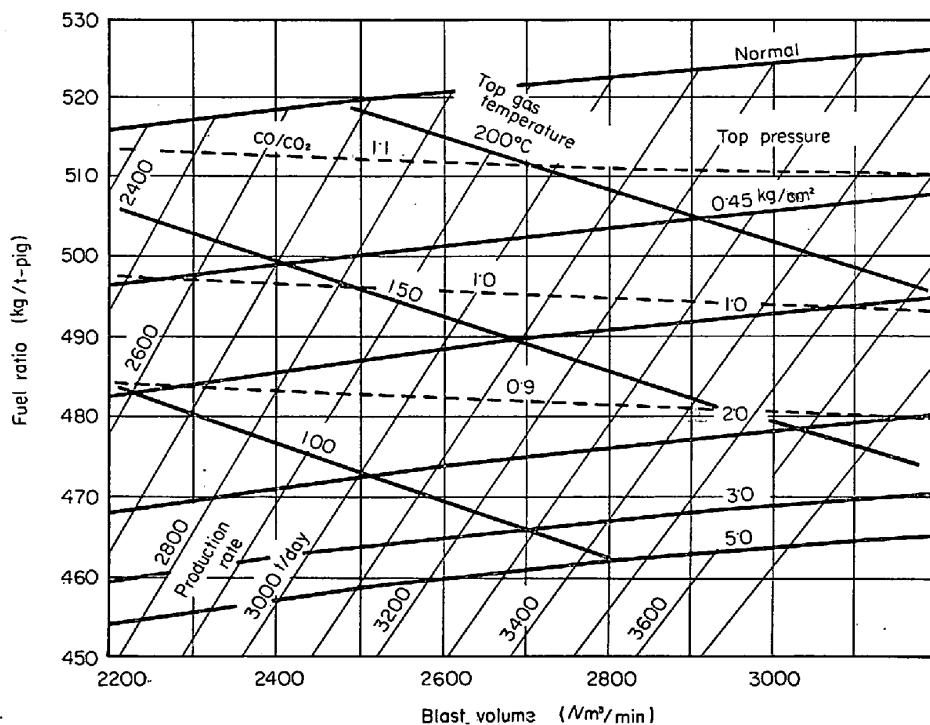


Fig. 5. Characteristic diagram shows effects of top gas pressure.

(1) 炉頂圧を高めることは、溢沓限や吹抜け限の特に溢沓限を改善する

(2) 溢沓現象は吹抜けよりも送風量の影響を受けやすい。

(3) 送風量が、ある限界 (3200Nm³/min. 以上) になってくると、送風量に対し等溢沓線、等吹抜け線 (Fig.

10) とともに立つてくる、つまり炉頂圧力を増してもあまり効果がない、すなわち、生産限界点に近い。

(4) 高压化により、炉頂飛散ダストの限界径は小さくなるので、炉頂ガス中のダスト量は少なくなる。基準授業のダスト粒度分布がわかればダスト減少量が求まる。

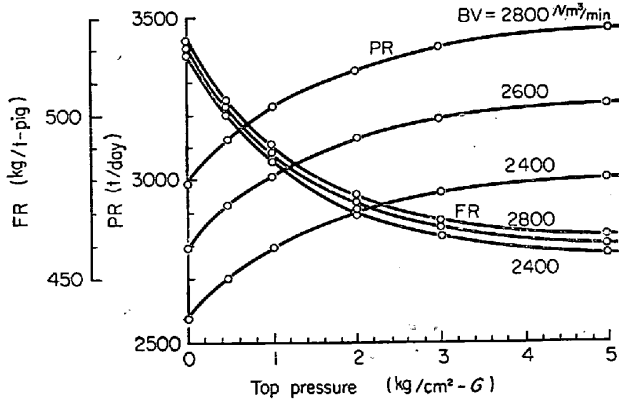


Fig. 6. Drawing shows effects of top pressure on production rate and coke ratio.

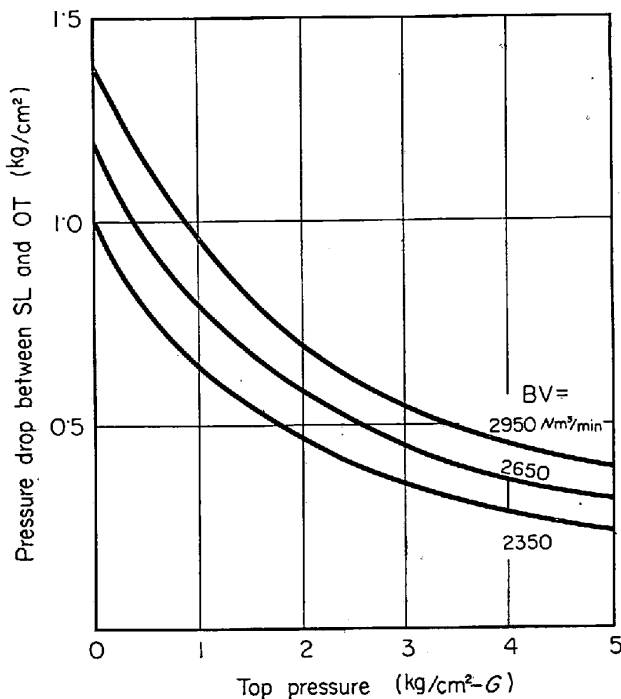


Fig. 7. High top pressure decrease pressure drop.

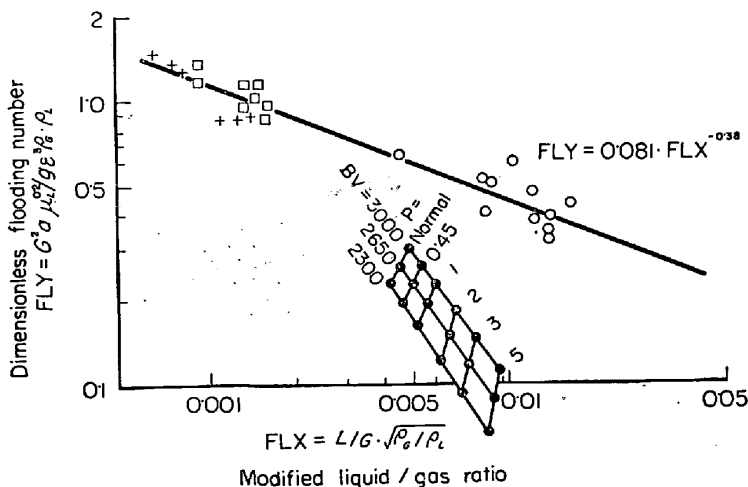


Fig. 9. High top pressure stabilizes furnace condition.

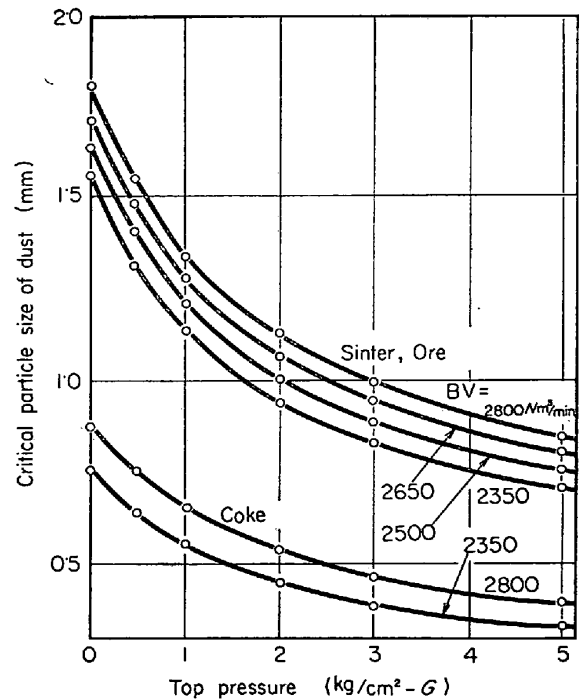


Fig. 8. High top pressure decrease dust concentration.

(5) 同一風量であれば、高圧化とともに圧力損失が減るので高圧炉用送風機計画にあたっては吐出圧力を過大にせぬ配慮が必要である。

3.5 高圧操業についての総括的検討

高炉に高圧操業を適用する目的は、高炉の生産増および燃料の低下にあることはもちろんである。Fig. 10においてこの計算の基準にした広畑 2BF 1966 年 6 月の操業は A 点に相当する。この A 点を起点として、同じ吹抜け安全率および溢沓限の線を引くと BAC の曲線が得られる。この線にそつて高炉の送風量および炉頂圧を変化

させると、Channeling および Slip に対し A 点と同じ条件で操作したことになる。すなわち換言すれば棚およびスリップが A 点で起こらなければこの線にそつた点でも理論的には起こらない。

Fig. 11-a にこの BAC 線を高炉の出鉄比（高炉内容積 1m³ 当たり 1 日出鉄量 t）と燃料比との関係で示した。図中に 1967 年 8～11 月の全国高炉操作実績を点で、また広畑 1BF および 2BF（同容積）の操業実績を X 点で示した。この図から判断すると A 点はかなり高度な操業成績で普通はもつと下の線 A'C にあるが、傾向的には同様であるといえる。

以上述べた点をまとめると、(Fig. 11-b 参照)

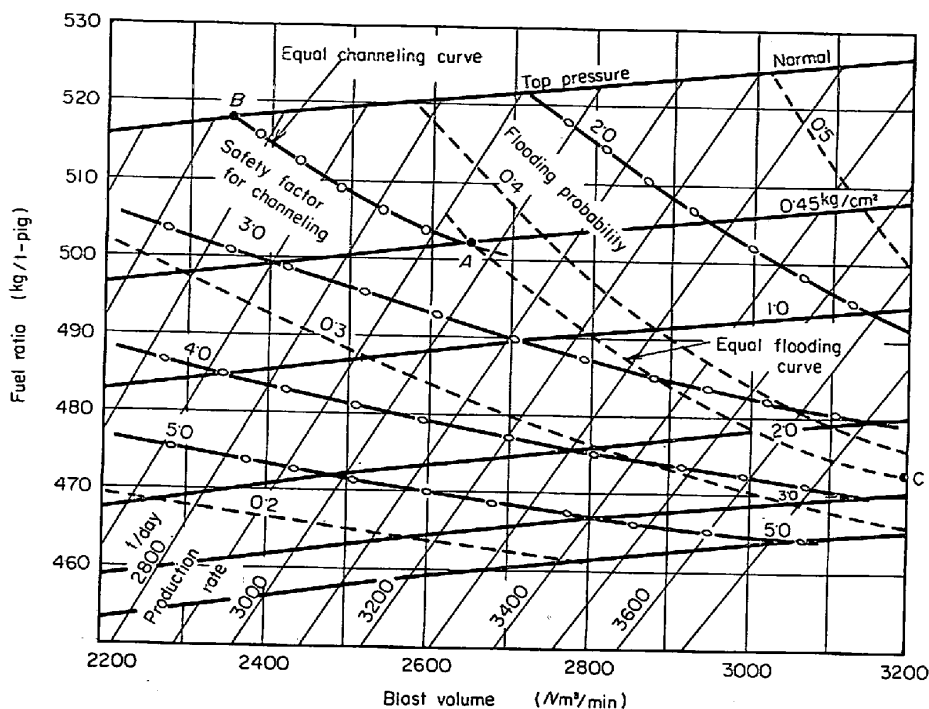


Fig. 10. Effects of top pressure on channelling and flooding.

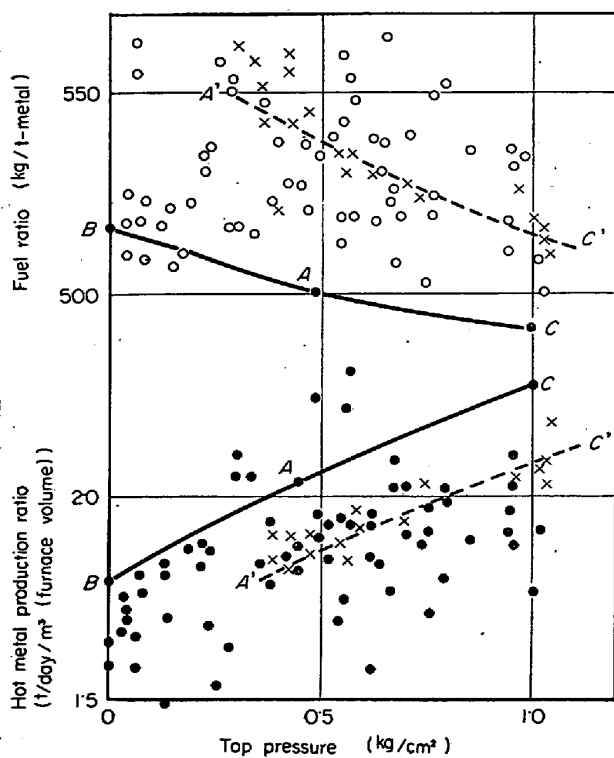


Fig. 11(a) Effect of top pressure on production ratio and fuel ratio.

(1) 高压操業の高炉出鉄量増加におよぼす効果は、炉頂圧 2 kg/cm² 程度までは大体 0.1 kg/cm² 当たり 2%増である。

(2) 高压操業の高炉コーコス比の減少におよぼす効

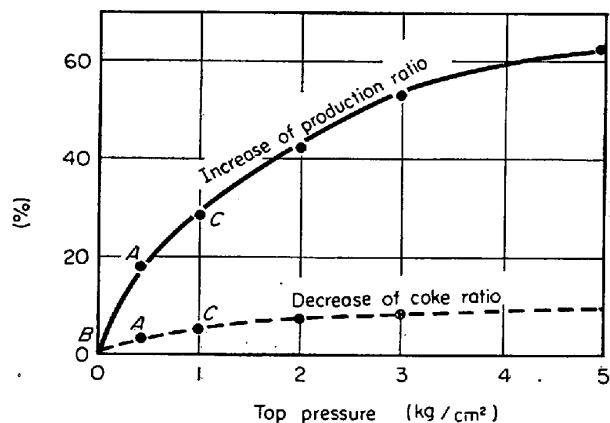


Fig. 11(b) Effect of top pressure on increase of production and decrease of fuel ratio.

果は風量一定の場合 0.1 kg/cm² 当たり 2.2 kg/t 程度である。(Fig. 10)

(3) 高压操業を行なつて送風量を増加するとき、炉内の Channelling および Flooding 現象によりその増加が制限を受けるので、その制限内ではコークス比も低下する。その割合は 0.1 kg/cm² 当たり約 1.7 kg/t である。

(4) 高炉の炉頂圧を 2~3 kg/cm² に上げるいわゆる超高压操業はやはり有効で、その効果的な限度は、3 kg/cm² くらいと思われる。

Table 5. Condition of burdens.

Item Burdens	Charge t/ch	Bulk density kg/m ³	Average diameter mm	Chemical composition									
				T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Mn	TiO ₂
1 Sinter	4.0	1780	17.9	57.6	7.68	71.01	5.29	1.61	8.19	1.50	nd	0.13	0.13
2 "	16.7	1780	17.9	57.4	11.70	nd	5.76	1.83	7.49	1.36	"	2.00	0.14
3 "	10.1	1780	17.9	58.1	11.70	nd	5.66	1.81	7.39	1.43	"	0.13	0.14
4 Ore	5.0	2420	14.1	62.3	0.29	88.64	1.28	3.01	0.11	0.10	"	0.02	0.09
5 "	4.0	2920	15.3	63.0	9.28	79.78	4.45	0.78	0.56	0.51	"	0.07	0.19
6 "	0.15	1900	17.4	18.0	0.14	25.58	9.82	5.42	0.69	0.12	"	29.97	0.12
7 LD slag	0.30	2350	26.8	20.7	0.0	—	13.1	10.4	46.2	3.08	"	5.34	0.0
8 Lime stone	0.25	1930	20.6	0.12	0.15	—	0.91	0.30	53.9	0.65	"	0.0	0.0
9 Coke	12.6	433	48.2	0.57	0.0	3.85	5.13	2.81	0.04	0.20	"	0.0	0.19

4. 酸素富化操業

4.1 基準操業

計算ベースにする基準操業は、名古屋 I B F 1968 年 1 月に取る。

Table 6. Calculated and observed values of base operation.

Item		Unit	Calculated	Observed	
Production rate		t/day	4037	4058	
Slag ratio		—	0·271	0·242	
Coke ratio		—	0·488	0·492	
Top gas	Temperature		°C	180	205
	Compo- sition	CO ₂	vol	19·9	18·9
		CO	%	21·1	22·1
		H ₂	dry	2·1	3·2
		N ₂		57·0	55·3
Slag composition	SiO ₂	wt%	34·7	32·9	
	Al ₂ O ₃		16·1	16·0	
	CaO		38·9	40·1	
	MgO		7·3	8·1	
Theoretical flame temperature		°C	1953		

読入データ

炉プロフィール Fig. 4

炉頂圧力 0.65 kg/cm²-G送風条件 送風量 3700Nm³/min湿分 24.2 g/Nm³

送風温度 990°C

重油 24.3 kg/t-pig

装入条件 装入回数 162 CH/day

装入物分析 Table 5

計算結果を実操業データとともに Table 6 示す。
高圧操業の場合と同じく、ほぼよい一致を見ているので
以後の計算を進めることにする。

4.2 O₂ 富化の生産性および CR におよぼす影響

O₂ 富化をすれば当然炉口温度が上昇するが、炉況安定（溶融帯を不当に上方に上げない、Si の安定など）のために理論火焰温度は約 2000°C に保つことが望ましい。

ここでは、O₂ 富化しても火焰温度が基準操業の 1953°C 一定に保たれるように、自動的に重油と水蒸気が調節できる機能を数式モデルに与えた。（ただし、この計算では重油と水蒸気は同じ割合で増すようにした。）

さて基準操業に O₂ 富化を 0~24,000m³/hr (O₂ 含有最大 28.7% まで) の範囲で行ない、Fig. 3 の flow

Table 7. Effects of O₂ enrichment on production rate and coke ratio.

O ₂ enrichment	Production increase	Production rate	Fuel ratio	Coke ratio	Heavy oil injected	Moisture content	Top gas temperature	Top gas composition		
								CO	CO	H ₂
Nm ³ /hr	%	t/day	kg/t-pig	kg/t-pig	kg/t-pig	g/Nm ³	°C	wet vol %		
0	0	4037	512.3	488	24.3	24.2	180	20.31	19.20	2.02
1,500	3.35	4172	511.7	484	26.7	26.6	176	20.40	19.63	2.21
3,000	6.5	4299	511.6	479	31.7	31.5	173	20.50	19.90	2.56
6,000	12.5	4540	511.4	475	36.4	36.3	167	20.98	20.37	3.00
12,000	22.6	4948	521	473	48.6	48.4	162	22.49	20.52	3.87
18,000	32.0	5328	532	472	60.7	60.5	160	24.05	20.38	4.70
24,000	41.2	5699	543	472	70.5	70.2	157	25.59	20.20	5.33

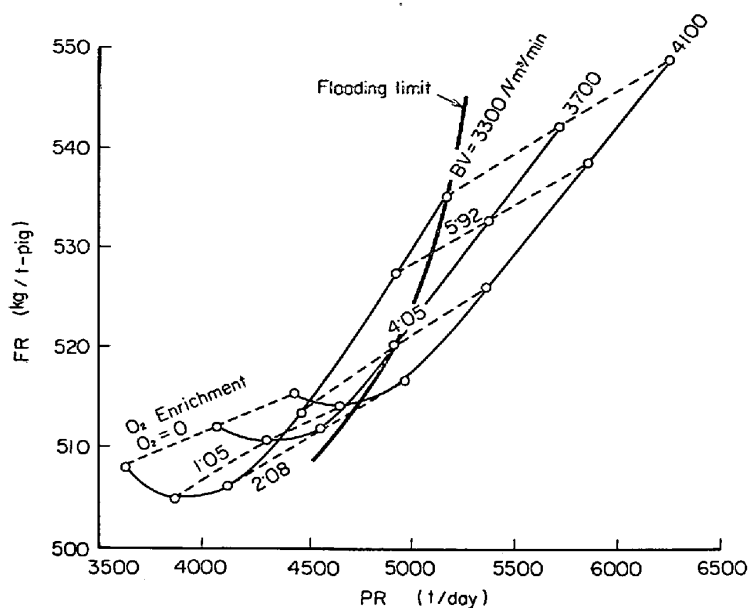


Fig. 12. Characteristic diagram shows effects of O_2 enrichment.

chart にしたがって試行計算すると Table 7 に示す結果が得られた。

これからわかることは

(1) 反応ガス濃度が大きくなり、反応量が大となるのでシャフト部および炉頂ガス温度は下がる。

(2) 出鉄量は、 O_2 富化に比例して増大する。

(3) CRは下がるが、燃料比FRは2%くらいまで少し下がり以後増大する。

4.3 酸素富化の効果

次に送風量および O_2 富化の両者を変数に、同様の計算を行なうことにより、 O_2 富化操作の静特性を求めた。計算結果を Fig. 12 に示す。

O_2 富化の出鉄量およびCRへの効果を、さらによくわかるように O_2 富化率に対して最くと Fig. 13 のようになる。出鉄量は、 O_2 富化することにより直線的に1%富化で約5.5%の割で伸び、燃料比は O_2 富化1~2%で最低値を示した

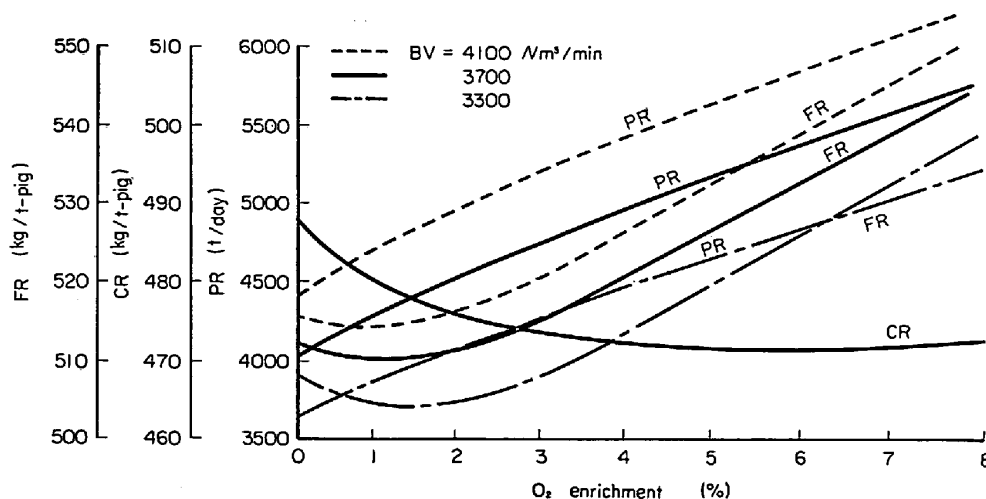


Fig. 13. Effect of O_2 enrichment on production rate and CR.

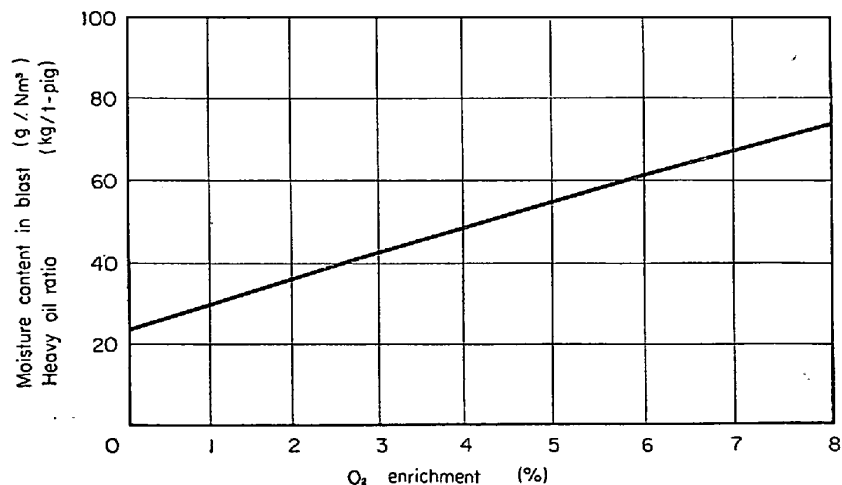


Fig. 14. Moisture and heavy oil ratio for controlling combustion zone temperature

後大幅に増加する。

コークス比は漸進的に約 15 kg 減少するが、以後ほぼ一定値を取る。

O₂ 富化による重油および水蒸気の増加割合は Fig. 14 に示すごとくである。

炉頂温度、CO/CO₂ にどのような変化を与えるか計算した結果を Fig. 15 に示す。

O₂ 富化量を増すにつれ、熱搬送体としての N₂ の相対的割合が小さくなり、また朝顔部以下に熱量が集中し上部レベルへの熱の流入が少なくなつて炉頂温度が下がる。

ガスの利用率も、O₂ 富化率 3% 以上では徐々に悪くなる。これは炉下部における還元ガス濃度が大きくなり、吸熱還元反応が著しく進行するので、上部ではガス温度が下がり反応速度が小さくなる。

この両者のバランスがシャフト部の温度の下がる方にずれ、炉全体としての利用率が下がること、および生産速度が速くなるため固体側の滞留時間が短くなるからであろう。

溢沓現象におよぼす影響を Fig. 12, Fig. 16 に示す。これにより現状の操業は限界に近いことがわかる。

吹抜けに関しては、十分安全側である。

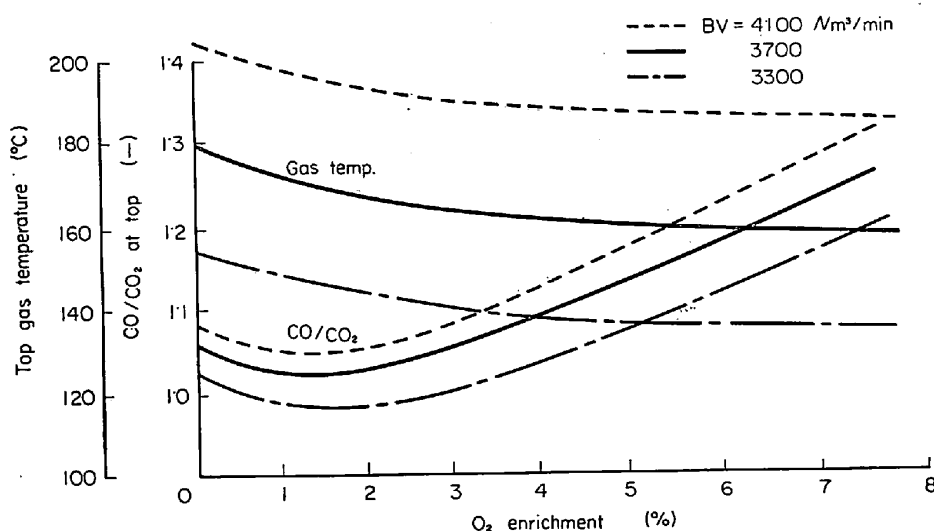


Fig. 15. CO/CO₂, temperature of top gas vs O₂ enrichment.

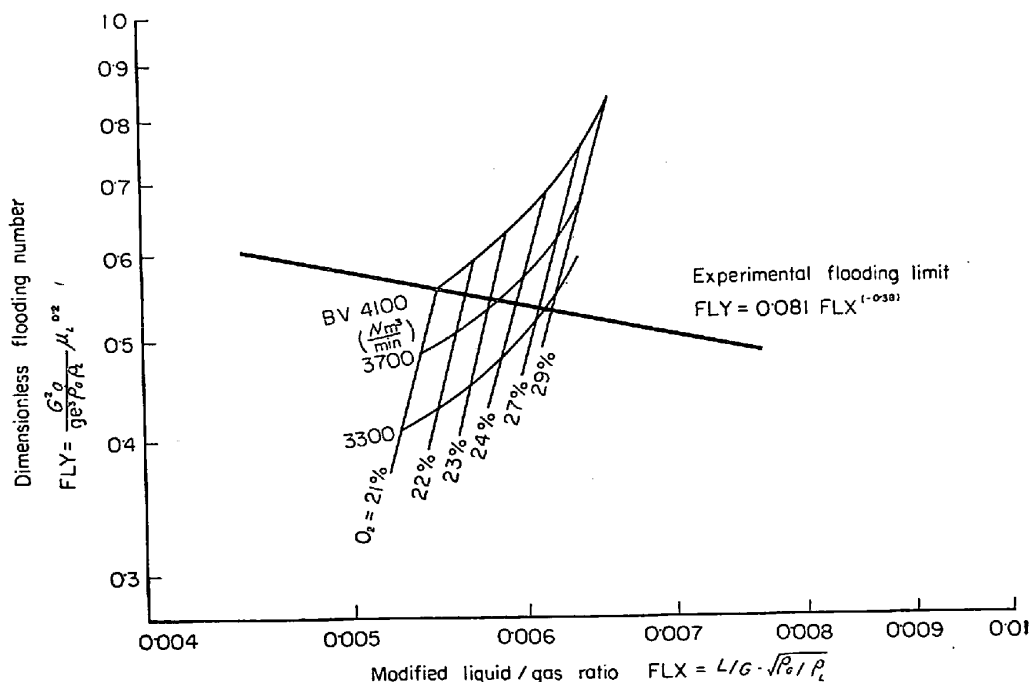


Fig. 16. O₂ enrichment increase hanging probability.

4.4 酸素富化操業についての総括的検討

(1) O_2 富化は出鉄量を富化率 1%につき約 5.5% 伸ばす。燃料比は富化率 2%前後で 3~5 kg 減の最低値を示した後、約 6 kg/%の割合で増す。コークス比は漸進的に約 15 kg 下がる。

ただし、この計算では羽口温度を、重油と蒸気両者を基準値に対し同一の割合で増加させて調節したが、これを蒸気のみ、または、他の燃料吹込によつて調節する場合には、少し結果が変わってくる。

すなわち、水蒸気のみによる場合には



の反応により、コークスのソリューションがあるので見かけ上 O_2 富化に近い効果があり、出鉄増には役立つがコークス比は上がる。

一方、燃焼性のよい液体燃料や LDG, COG, LPG などのガス燃料の吹込により調節すれば、出鉄量の伸びは少し下がるが、燃料比はもつと減ずることができるであろう。

(2) したがって本計算の重油および蒸気による調節の場合には、効果的な O_2 富化は約 2%である。ただし燃料比の経済性にとらわれず生産を求める場合はこの限りでない。

(3) 大幅な O_2 富化によつて生産量を確実に上げることができるが、溶融帯を降下する液量が増大するため溢汪数が急に大きくなるので、高圧化によつて溢汪限界を引上げるようにしなければならない。

5. 結 言

高圧および酸素富化操作の効果について、理論的に検討した結果、ほぼ実績に近い定量的な取扱いができることを確めた。

また、効果的な限界を明らかにすることができた。すなわち、経済的見地から炉頂圧力は $3 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$ の酸素富化は約 2%である。

今後、このような数式モデルに動的要素を組み込んで、炉況安定制御のための制御モデルの開発を考えている。

最後にご指導を賜わった名古屋大学専教授に厚く感謝します。

文 献

- 1) I. MUCHI: Trans. ISIJ, 7 (1967), p. 223
- 2) T. K. SHERWOOD: Ind. Eng. Chem., 30 (1938), p. 765
- 3) H. M. Жаворова: Теплообмен В Доменной пещи, (1966), p. 151