

(68) 高炉の生産能力について

(高炉操業条件の解析—II)

八幡製鉄, 東京研究所

工博 瀬川 清・○石川 英毅

On the Productivity of the Blast Furnace.

(Analysis on the conditions of the blast furnace operation—II)

Dr. Kiyoshi SEKAWA and Hidetaka ISHIKAWA.

1. 緒 言

前報¹⁾において, 高炉の安定な操業条件を与える諸式を導いたが, 本報ではこれらの結果を用いて, 高炉の生産能力について総合的に検討してみる. また, これらの

結果は酸素富化操業, 高圧操業, 低炉操業などの特殊操業における炉の能力を検討する場合にも有用であると考えられるので, その基本的な考え方について報告する.

2. 装入物の粒度と出銑能力の関係

前報¹⁾で導いた安定な操業のための諸条件をまとめると次のようになる.

- 1) 棚吊りを起こさないための条件
 $d_c > 0.057(W/D^2)^2$ (1)
- 2) 吹抜けを起こさないための条件
 $d_c > 0.6(W/D^2)^{1.3}$ (2-1)
 $d_o > 0.2(W/D^2)^{1.3}$ (2-2)
- 3) 炉内の伝熱に必要な条件
 $74 > (W/D^2)^{0.7} d_c (0.8 + 1/\eta) / H > 40$ (3-1)
 $30 > (W/D^2)^{0.7} d_o (0.8 + 1/\eta) / H > 10$ (3-2)
- 4) 銑石を十分還元するに必要な条件
 $(W/D^2)(100 + R d_o) / H [(Ore) / (Coke)] < 84$ (4)

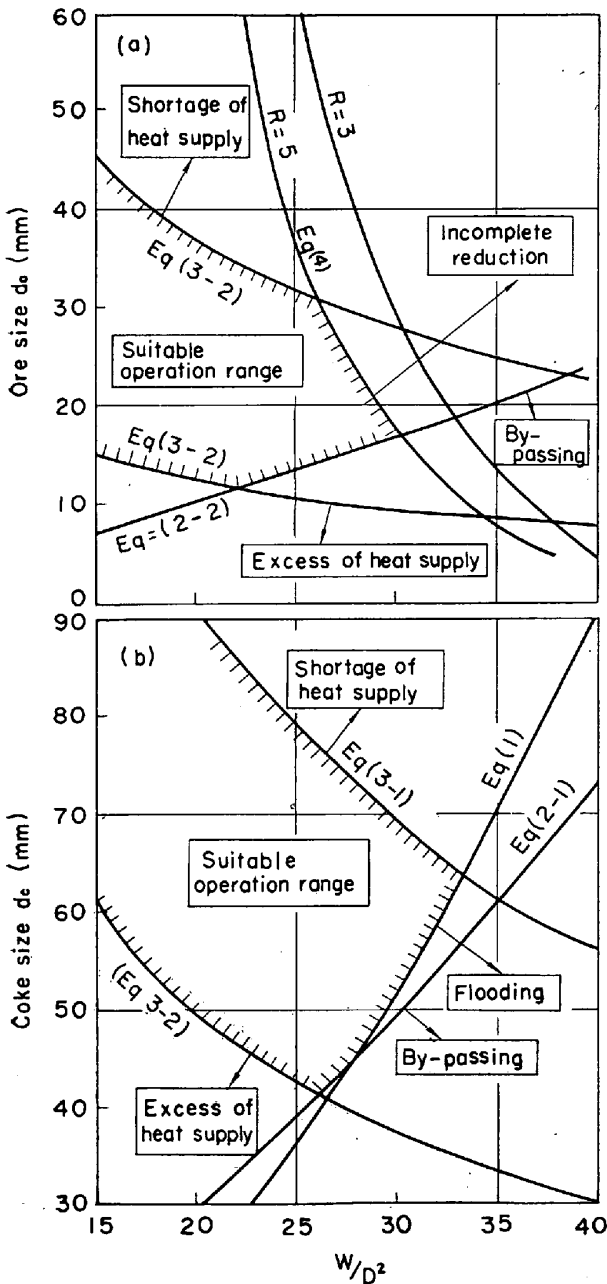
d_c, d_o : コークスおよび銑石粒度 mm

W : 送风量 Nm^3/min η : コークス比

D : 炉床直径 m H : 炉高 m

R : 係数で, 磁鉄銑で 5, その他で 3

これらの諸関係から一例として, $H=25m$, $(0.8 + 1/\eta) = 2.5$, $(Ore)/(Coke) = 2.7$ において, d_c および d_o と W/D^2 との関係調べてみると Fig. 1 のごとくなり,



a) d_o vs. W/D^2 b) d_c vs. W/D^2
 Fig. 1. Suitable operation range.

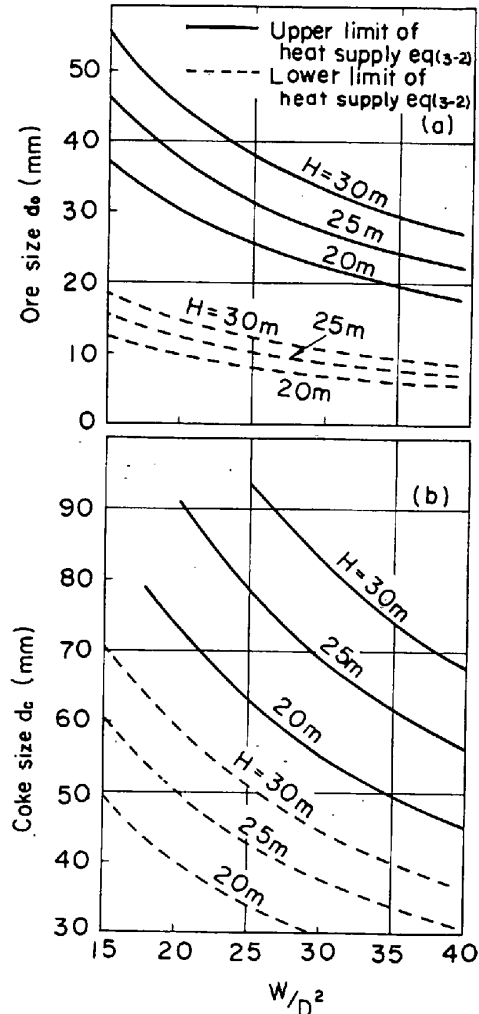


Fig. 2. Effect of bed height.

図中の斜線部分が適正な操業範囲となる。高炉の出鉄量はほぼ送風量に比例することが知られており、図の横軸の W/D^2 は高炉の能力を表す値と考えてよい。

斜線部分以外の領域ではそれぞれ図中に示されているように、溢流現象による棚吊り、ガスの吹抜け、ガスから鉱石への伝熱過多による溶融帯の過昇、または伝熱不足による溶融帯の過降、および還元不足などを起こす。Fig. 1 (a) には (4) 式の $R=5$ (磁鉄鉱系) と $R=3$ (赤鉄鉱系) の場合をともに示したが、 R が小さくなると適正範囲が鉱石粒度の大きいほうへ拡がることになる。

また、炉高 H の影響は Fig. 2 に示すように、 H が小さいときは伝熱による制限が粒度の小さいほうに移動し、 H が大きいときは逆になる。図は省略したが、鉱石の還元による制限についても同様である。

これらの諸関係はあくまで、現状の炉の操業条件を基準にして計算したものであつて、各式の定数は今後さらに検討してゆく必要がある。

3. 特殊操業への適用

3.1 酸素富化操業

いままでの考え方を酸素富化操業に適用してみる。(1)(2)(3)式の棚吊り、吹抜け、伝熱の条件はすべて流体力学的な要因によつて決まるもので、酸素富化によつてガスの物性はごくわずかしかわらないから、これらの条件はほとんど変わらないと考えて差し支えないであろう。

(4) 式の還元についても同様であるが、還元速度が CO 濃度に比例して変わると想定すれば、Fig. 1 の (4) 式の曲線は W/D^2 が $\alpha = (\text{酸素富化時の } O_2\%) / (\text{空気中の } O_2\%)$ 倍だけ右に移動することになる。

一方、酸素富化したときは同じ W/D^2 でも、炉の出鉄能力は α 倍だけ増加することになる。たとえば 1% 酸素富化すれば、22/21 倍すなわち約 5% 出鉄量が増加することになる。さらに (4) 式の曲線が右に移行することから、5% 以上の増加が期待できるわけであるが、他の諸条件によつておさえられ、5% 前後の出鉄能力の増加になるものと考えられる。

最適粒度については、酸素富化することによつて Fig. 1 の (4) 式の曲線が右に移行するわけであるが、図からわかるようにほとんど変わらないものと思われる。

コークス比に対する影響は直接今までの推論からは回答は得られないが、熱収支から考えて、あまり大きな影響はなく、出鉄量の増加が間接的にコークス比の低下にひびくものと考えるのが妥当であろう。

以上の結果を実操業データについて確かめてみる。内容積 $500 m^3$ 程度の高炉で酸素富化操業した結果は Fig. 3 のとおりで、異なる 2 つの炉でほぼ類似の結果になり、酸素を 1% 増加することによつて出鉄量は約 5% 増加している。コークス比は酸素の使用量とともに減少しているがその差は小さい。

このように実際の結果と推論した結果は良く一致していて、以上の推論はおおいに役立つものと考えられる。

3.2 高圧操業についての考察

炉内の平均圧力 (絶対圧) を P 倍すればガス流速は $1/P$ に、ガス密度 ρ_g は P 倍になる。まず棚吊りについ

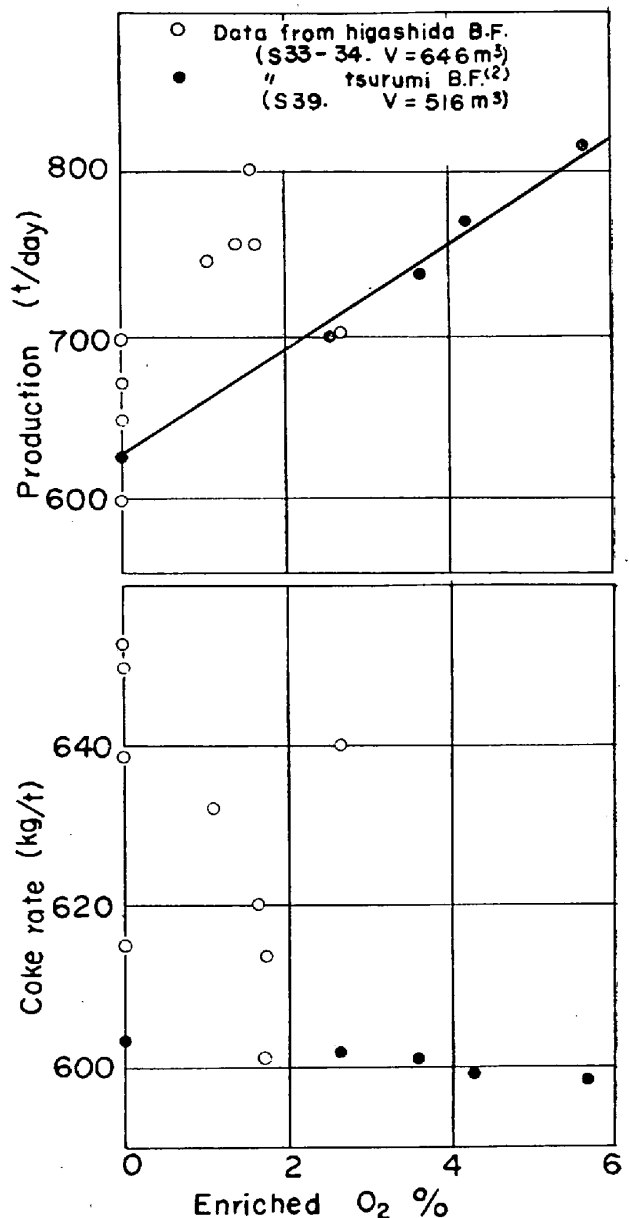


Fig. 3. Effect of O_2 enrichment on the productivity and coke rate.

ては、前報¹⁾(2)式の f は $\rho_g^{0.75}$ に比例しているの、 f は $P^{-0.75}$ 倍になる。一方 $(W/D^2)^2$ が一定ならば、ガス中の酸素量は P^2 倍になり、したがつて出鉄能力は P^2 倍になる。この 2 つから炉内平均圧が P 倍になれば、出鉄能力は $P^{2-0.75} = P^{1.25}$ 倍になると考えられる。

吹抜けに関しても、前報(5)(6)式の ρ_g, V_0 に高圧による補正をしてゆけば、平均絶対圧が P 倍になれば、出鉄能力は $P^{0.6}$ 倍になることがわかる。

炉内の伝熱に影響する因子は前報(10)式における v_g, h_g および k に含まれる ρ_g などであるが、圧が P 倍になれば v_g は $1/P$ に、 ρ_g, h_g はいずれも P 倍になる。しかるにこれらの因子はかならず、 $h_g v_g$ および $\rho_g v_g$ のように積の形で関係している。この両者ともに炉内圧に無関係であるから、伝熱に関するかぎり高圧操業しても理論的には差がないことになる。

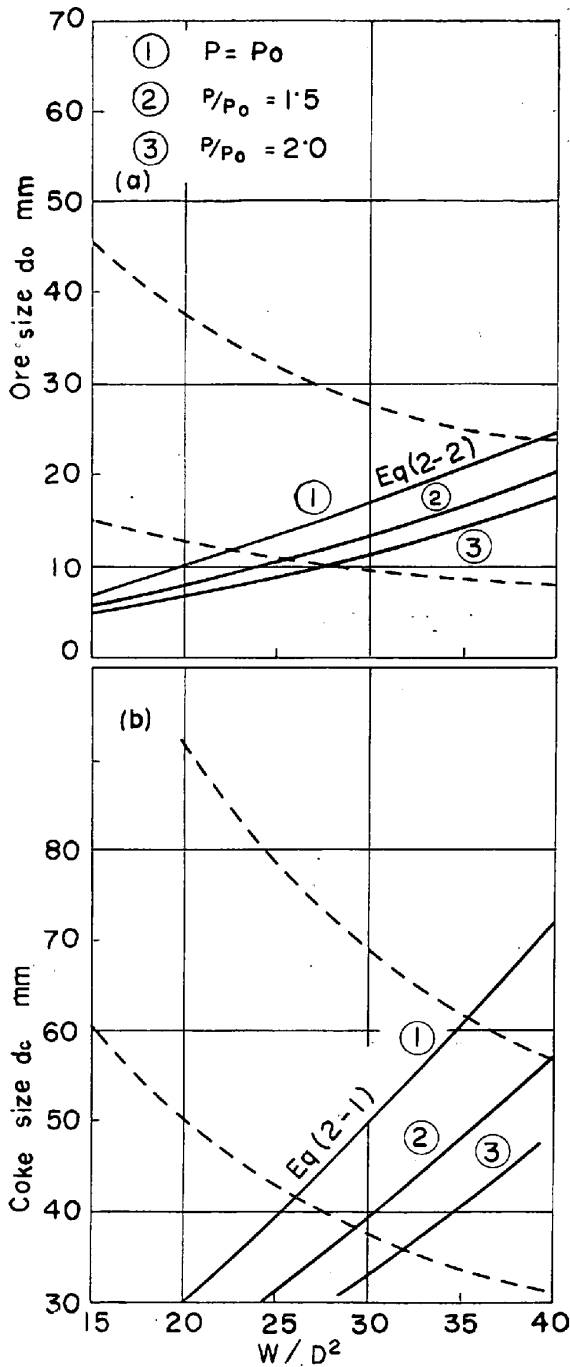


Fig. 4. Effect of gas pressure on by-passing.

高压における還元速度の実験はほとんど例がないが、炉内のCO分圧は圧の増加に比例するから、一応還元能力も炉内圧に比例するものと仮定して推論すると、出鉄能力は炉内圧に比例して増加することになる。しかし、一方ではガス流速の低下による反応速度の低下が考えられ、その定量的関係はほとんどわからないが、これらが相殺し合うものとすれば、還元反応についてはあまり圧力の影響を受けないと考えた方が無難であろう。

以上を総合して考えると酸素富化のときと同様に、コークス比にはあまり直接的な影響はないが、出鉄能力の増加は大きく期待できることになる。

高压にしてゆくと Fig. 1 の (1), (2) 式の曲線が

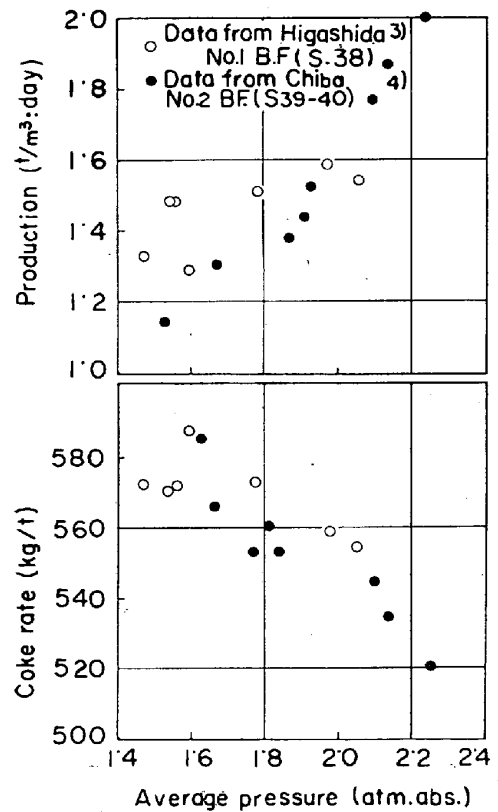


Fig. 5. Effect of furnace gas pressure on the productivity and coke rate.

寝てゆくことになり、装入物を細粒にしてよいことになる。棚吊りの点では、前記のように能力が $P^{1.25}$ 倍になり、吹抜けでは $P^{0.6}$ 倍になるから、高压にすると棚吊りよりも吹抜けのほうが起こりやすくなると想像される。炉高 $H=25m$ として、吹抜けの線が炉内圧の上昇とともに、普通圧 ($P=P_0$) の場合と比較してどのように変わるか示すと Fig. 4 のようになる。

図からわかるように高压操業にするほど粒度を細かくしてよいことになり、出鉄能力は平均炉内圧(絶対圧)を1.5倍にすると約20%近く上昇できることが予想される。

参考までに、実際の高炉の高压操業データを文献 3), 4) よりひろつて、出鉄量およびコークス比の変化をしらべてみると Fig. 5 のようになり、上記の推論がほぼ妥当なことが知れる。

3.3 低炉操業についての考察

低炉に関しても高炉と同様に推論できる。炉内の圧損失は炉高に比例して減少するが、溢流現象による棚吊りや吹抜けに関しては、装入物の粒度と送風量の関係は炉高にはよらないものと考えられる。

炉が安定に操業されるためには、ガスから装入物への熱交換が適正でなければならぬことは、低炉の場合も同じであつて、炉高が低い場合はそれだけ短時間に熱交換が行なわれる必要がある。すでに推論したように、炉高が1/2になれば適正粒度が1/2になるべきであり、したがって伝熱に関する上限、下限の曲線は炉高に比例して修正してゆく必要がある。

還元についても同様であるが、(4)式より考えれば、同じ粒度のものを用いれば、炉高に比例して出鉄能力が変化することになる。

以上のことから、炉高が低くなれば、ほぼ炉高に比例した粒度にすることが望ましく、出鉄能力も炉高が低くなるにつれて減少することが考えられる。

4. 結 言

高炉の能力を炉の寸法や操業条件、とくに装入物粒度から推定するために、出鉄能力を制限する諸要因をとりあげて、化学工学的、かつ定量的な方法で検討し、操業および炉の設計に利用できる関係式を導いた。

得られた諸関係式を酸素富化操業、高圧操業、低炉操業などに適用して考察をすすめたが、これら特殊操業の操作設計にも有用な知識が得られることが知れた。

文 献

- 1) 瀬川, 石川: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1404
- 2) 長谷川, 根本, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 4, p. 628
- 3) 岩村, 菊地, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1728
- 4) 白石, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 353

(69) 高炉における送風量とコークス比の関係についての理論的考察

八幡製鉄, 八幡製造所

光井 清・斧 勝也・○池田 稔

Effect of Wind Rate on the Coke Consumption in Blast Furnace.

Kiyoshi MITSUI, Katsuya ONO and Minoru IKEDA.

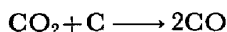
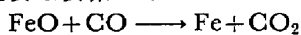
1. 結 言

従来より送風量とコークス比の関係は送風量を下げるとコークス比は低下するが、送風量があるレベル以下になると逆に上昇するということが経験的に知られている。しかしながら、送風量とコークス比の関係についての理論的考察および同一操業条件による実操業の裏付はまだなされていない。そこで東田6高炉の試験操業データに基づいて、その間の関係を熱力学面から数式により解析を行なった。

2. 操業アクションに関する考え方

高炉操業に必要な熱量バランスに関しては、一般に羽口上部の燃焼帯(1000°C以上)において熱バランスが崩れなければ鉄鉄成分変動も少なく順調に操業できると考えられる。高炉の操業アクションとしては ore/coke, 送風量, 送風温度, 送風湿度および重油添加量があげられる。

熱バランスからこの関係を解析すると、まず高炉において 1000°C 以上の反応帯では、羽口上部のソリューションロス反応は次式に示すように吸熱反応であり、熱バランス上重要な要素となる。



そこで操業アクションのうち、送風温度, 湿度, 重油濃度および原料品位を一定にして操業した場合のソリ

ーションロス量と送風量の関係を調べる。いま, ore/coke を一定にしたまま送風量をあげていくと装入物の降下速度が早くなり、鉱石のガス還元反応時間が短くなってガス利用率が低下する。そうすると羽口上部のソリューションロス反応が増加し熱量が不足気味の炉況となつてくる。そこで ore/coke を下げて鉱石当りの相対的ガス量を多くしソリューションロス量を減少させて熱バランスを保つ。この考えは鉱石を直接還元する割合を、ほぼ一定にして熱バランスを保つようにアクションをとつているのである。さらにいけば、単位送風量当りの熱バランスでは、入熱は一定に定められる。出熱で変動する大きな要素は単位送風量当りのソリューションロス量であり、この変動をなくするように ore/coke でアクションをとつていことになる。

以上からコークス比と送風量の関係は次のように考えられる。すなわち、送風量をあげてゆくと単位送風量当りの鉱石量(出鉄量)は低下する。一方コークス燃焼量はほとんど一定である。

3. 送風量とコークス比の関係についての熱力学的解析

熱バランスおよび還元反応速度などを考慮して送風量とコークス比の関係を数学的に解析する。

3.1 送風量とコークス消費量の関係

送風量 1 Nm³ についての熱バランスは次式で与えられる。

$$q_1 T + q_2 T \frac{dH_2O}{dx} + q_3 \frac{dz_1}{dx} - q_4 \frac{dH_2O}{dx} - q_5 \frac{dOil}{dx} = q_6 \frac{dz_2}{dx} + q_7 \frac{dy}{dx} + q_8 \frac{dy}{dx} + Q \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- T : 送風温度 °C
- q₁ : 空気比熱 kcal/°C Nm³
- H₂O : 送風湿分 kg/min
- q₂ : 蒸気比熱 kcal/°C kg H₂O
- z₁ : 羽口前 O₂ による燃焼 C kg/min
- q₃ : 2C+O₂ → 2CO 反応熱 kcal/kg C
- q₄ : C+H₂O → CO+H₂ 反応熱 kcal/kg H₂O
- q₅ : Oil 分解熱 kcal/kg oil
- Oil : 重油添加量 kg/min
- z₂ : ソリューションロス C kg/min
- q₆ : ソリューションロス反応熱 kcal/kg C
- q₇ : 鉄鉄+スラグ熱容量 kcal/kg 鉄鉄
- q₈ : Si, Mn, P 直接還元熱 kcal/kg 鉄鉄
- Q : 熱損失+1000°C の熱収支でシャフト部へ逃げる熱量 kcal/Nm³

x : 送風量 Nm³/min y : 出鉄量 kg/min

(1)式より鉄鉄成分[Si][Mn][P], 送風温度, 湿分および重油添加率を一定にすると(1)式の左辺は常数Kで与えられるため次式が求まる。

$$z_2 = \frac{K-Q}{q_6} \cdot x - \frac{q_7+q_8}{q_6} \cdot y \dots\dots\dots (2)$$

ゆえに、コークス消費量 z (kg/min) は次式のように送風量と出鉄量の関数で与えられる。

$$z = \frac{1}{(C)} \left\{ 0.225x + \frac{K-Q}{q_6} \cdot x - \frac{q_7+q_8}{q_6} \cdot y + [C]y + F \cdot y + H \cdot x + (H_2O) 12/18 x - 0.86(oil) x \right\} \dots\dots (3)$$