

## DH 真空脱ガスプロセスの理論解析\*

70617

三 沢 啓 典\*\*・ 鞭

巖\*\*\*

## Theoretical Analysis of the DH Degassing Process

Akinori MISAWA and Iwao MUCHI

## Synopsis:

In order to get useful informations for improving operating conditions in DH degassing process, a mathematical model is developed in this work.

In this model, the suction period when molten steel flows up into vacuum vessel from ladle and the discharge period when molten steel flows down into ladle from vacuum vessel have been analysed theoretically, and variations of gas pressure in vacuum vessel during degassing process have been considered.

On the basis of the model, the effects of the operating variables, namely, volume flow rate of exhaust gas, suction rate of molten steel and suction ratio of the volume of molten steel in vacuum vessel to the total volume of molten steel, on the degassing rate have been calculated with the aid of digital computer.

(Received Apr. 3, 1970)

## 1. 緒 言

脱ガスプロセスの操業方法の改善には、操業時間の経過に伴って起こるプロセス変数の変化を表わした数学的モデルの展開が望まれる。最近、操作条件と関連づけた脱ガス速度の数学的モデルとして RH 真空脱ガス装置に関する研究<sup>1,2)</sup>が発表されているが、RH 真空脱ガス装置と並んで主要な脱ガス装置である DH 真空脱ガス装置における脱ガスプロセスの理論解析については、従来ほとんど発表されていない現状である。

本研究では、DH 真空脱ガス法における合理的な操業条件の決定および装置の設計に有用な基礎資料を得るために溶鋼の吸上げ、排出過程、真空容器内でのガスの圧力変動を考慮した数学的モデルを展開し、電子計算機(京都大学大型計算機センター、FACOM 230-60)を利用して数値計算を行なった。

## 2. 数学的モデル

## 2.1 基礎式

DH 真空脱ガスプロセスの任意の1サイクルを模式的に Fig. 1 に示したが、1サイクルを3種類の期間に分けて考える。すなわち(a)は真空容器内に溶鋼が残留していない場合に吸い上げられた溶鋼が真空容器底面を広がっていく期間である。(b)は、(a)に続く吸い上げ期間であり、真空容器内に残留溶鋼がある場合には、サイクルは(b)の期間から始まることになる。(c)は、真空容

器内の溶鋼を取鍋にもどす排出期間である。

基礎式の誘導に当たって次の仮定を設ける。

- (1) 取鍋内および真空容器内の溶鋼はいずれも完全混合の状態である。
- (2) 脱ガスプロセスは液側での物質移動によつて律速され、気液界面での溶鋼成分の濃度は気相中のその成分の分圧と平衡している。
- (3) Fig. 1 の(a)の期間において、吸い上げられた溶鋼が真空器の底面を広がる際、溶鋼の深さは一定に保たれる。

つぎに、これら仮定の妥当性について検討する。まず仮定(1)については、真空容器内では溶鋼が非常に激しく混合されることが推察されるので、完全混合とみなすことが許されよう。取鍋内での溶鋼の混合については、ラジオアイソトープや合金成分を添加して混合状態を調べた研究<sup>3,4)</sup>が発表されているが、これらの報告によると、4~6回の昇降後には濃度がほぼ均一になつている。これら報告の実測値で、合金鋼の溶解時間や真空容器内の残留溶鋼の影響を考慮すると、実際の取鍋内混合は完全混合と仮定しても大胆な近似にはならないであろう。

仮定(2)についてはガス・溶鋼間の総括的な反応プロセスでは、(i)気液界面への液相内物質移動、(ii)気液界面における化学反応、(iii)気液界面から気相への物質

\* 昭和44年3月29日日本会講演大会にて発表  
昭和45年4月3日受付

\*\* 名古屋大学大学院(現在、川崎製鉄(株))

\*\*\* 名古屋大学工学部 工博

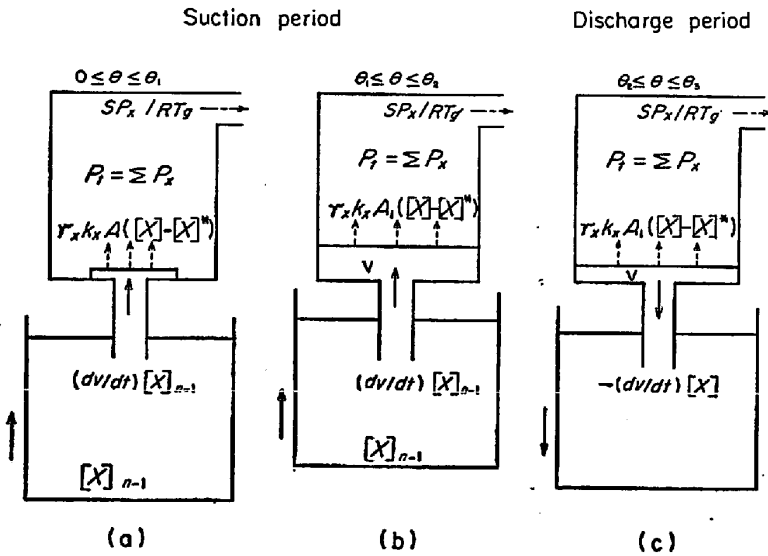


Fig. 1. Model of DH degassing process.

移動の3段階が考えられるが、真空脱ガスのような高温のプロセスでは、(ii)は十分に速く(i)が律速段階と考えられている<sup>9)</sup>。ただし、C-O間の反応では化学反応律速として扱っている報告<sup>6),7)</sup>もあるが、Cの濃度がおよそ0.1%以上であれば、脱ガス処理中の炭素の濃度変化はわずかであるから、化学反応律速としても物質移動律速とした場合とほぼ同じ結果が得られるものと推察される。

仮定(3)については、気液界面濃度が一定で真空容器内に残留溶鋼がない場合には、溶鋼の吸い上げ速度と排出速度をそれぞれ(19)式、(20)式で与えるとき、吸い上げられた溶鋼が真空容器の底面を広がる期間を考慮することによって(1)式の解析解が(29)式として得られるが、その計算結果から、溶鋼が広がるときの深さδの値の違いによる脱ガス量の変化はほとんど起こらないことがわかった。

上述の仮定のもとで基礎式を誘導する。被脱ガス成分として酸素、炭素、水素、窒素が考えられるが、これらを一般に成分Xで代表して表わすと、第nサイクル目の真空容器内溶鋼のX成分濃度[X]、および、X成分の気相分圧p<sub>X</sub>を与える方程式として(1)~(4)式が得られる。

吸い上げ期

$$d[X]/dt = \{([X]_{n-1} - [X])dv/dt - k_X A([X] - [X]^*)\} / v \dots\dots\dots (1)$$

$$dp_X/dt = \{[RT_g \rho_{Fe} / (100M_X)] \gamma_X k_X A([X] - [X]^*) - p_X(S + dV_g/dt)\} / V_g \dots\dots\dots (2)$$

排出期

$$d[X]/dt = -k_X A([X] - [X]^*) / v \dots\dots\dots (3)$$

$$dp_X/dt = \{[RT_g \rho_{Fe} / (100M_X)] \gamma_X k_X A([X] - [X]^*) - p_X(S + dV_g/dt)\} / V_g \dots\dots\dots (4)$$

脱ガス操作を開始してからt秒後におけるX成分の脱ガス量G<sub>X</sub>および脱ガス率η<sub>X</sub>はそれぞれ(5)、(6)式で示される。

$$G_X = \{\gamma_X \rho_{Fe} / (100M_X)\} \int_0^t k_X A([X] - [X]^*) dt \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta_X = \Delta[X] / [X]_0 = \int_0^t k_X A([X] - [X]^*) dt / V[X]_0 \dots\dots\dots (6)$$

$$d\eta_X/dt = k_X A([X] - [X]^*) / V[X]_0 \dots\dots\dots (7)$$

nサイクル終了時の真空容器内の残留溶鋼濃度を[X]<sub>n</sub>、残留溶鋼容積をv<sub>0,n</sub>とすると、nサイクル終了後の取鍋内濃度[X]<sub>n</sub>は(8)式で示される。

$$[X]_n = \{(V - v_{0,n-1})[X]_{n-1} + v_{0,n-1}[X]_{n-1}' - v_{0,n}[X]_n' - \int_{t_{n-1}}^{t_n} k_X A([X] - [X]^*) dt\} / (V - v_{0,n}) - v_{0,n}[X]_n' - \int_0^{t_n} k_X A([X] - [X]^*) dt / (V - v_{0,n}) \dots\dots\dots (8)$$

(2)、(4)式中の気相容積V<sub>g</sub>は、真空容器内部の容積をV<sub>R</sub>とすればV<sub>g</sub> = V<sub>R</sub> - vで与えられる。したがって(1)、(2)式および(3)、(4)式を解くには、物質移動係数k<sub>X</sub>、有効気液界面積A、気液界面濃度[X]<sup>\*</sup>、吸い上げ溶鋼容積vを与える必要がある。

2.2 気液界面積と物質移動係数

DH真空脱ガス法では、真空容器内の溶鋼成分の濃度、なかでも酸素の濃度が高いとき、あるいは鋼浴深さが浅いときには、おもにC-O反応に帰因する気泡生成を伴う激しい沸騰現象が起こり、脱ガスに有効な気液界面積と気液界面の更新速度が増加するものと考えられる。しかし、本研究では解析の簡単化のために、生成気泡によるこれらの効果を見無視して、真空容器内に残留溶鋼がない場合(Fig. 1(a))に、吸い上げ開始後真空容器底面を広がるときの気液界面積は、A = v/δで与えられるものとし真空容器底面を広がり終わったあと、あるいは残留溶鋼がある場合の吸い上げ期および排出期における気液界面積は、真空容器の断面積A<sub>1</sub>に等しく、A = A<sub>1</sub>で与えられるものとする。このように気液界面積を定めると、ここで用いる物質移動係数k<sub>X</sub>は、1サイクル中にも、サイクルが進むにつれても変化することが報告<sup>6),9)</sup>されているが、これらの効果を考慮してk<sub>X</sub>を定量的に表わした報告は見あたらないのでここでは便宜

的に、 $k_x$  は脱ガスプロセスを通じて変化しないとみなし一定として扱った。

2.3 気液界面濃度

被脱ガス成分が水素、窒素の場合には、気液界面での溶鋼内各成分の濃度が気相中の各成分の分圧と平衡していると考え、SIEVELTS の式から (9), (10) 式が書ける。

$$[H]^* = K_H \sqrt{p_H} \dots\dots\dots (9)$$

$$[N]^* = K_N \sqrt{p_N} \dots\dots\dots (10)$$

酸素の場合には酸素の除去が、気液界面で



の反応だけで進行すると考えれば、(11) 式は溶鋼内での  $C$  と  $O$  が界面へ移動するモル流束が等しいことから、(12) 式が書ける。

$$(k_o/16)([O] - [O]^*) = (k_c/12)([C] - [C]^*) \dots\dots (12)$$

さらに、スラグや耐火レンがからの酸素の供給を無視すると、脱ガス操作開始後における酸素、炭素の減少モル数は等しくなるので、(13) 式が書ける。

$$([O]_0 - [O])/16 = ([C]_0 - [C])/12 \dots\dots\dots (13)$$

また、気液界面で気相と液相とが平衡しているとする

$$[C]^* \cdot [O]^* = K_{CO} p_{CO} \dots\dots\dots (14)$$

(12)~(14) 式より、酸素の気液界面濃度  $[O]^*$  は、2 次方程式の根として (15) 式のように示される。

$$[O]^* = -\frac{1}{2} \left\{ \frac{k_c}{k_o} \left( \frac{16}{12} [C]_0 - [O]_0 \right) + \left( \frac{k_c}{k_o} - 1 \right) [O] \right\} + \sqrt{\frac{1}{4} \left\{ \frac{k_c}{k_o} \left( \frac{16}{12} [C]_0 - [O]_0 \right) + \left( \frac{k_c}{k_o} - 1 \right) [O] \right\}^2 + \frac{16 k_c p_{CO}}{12 k_o K_{CO}}} \dots\dots\dots (15)$$

とくに、 $k_c = k_o$  の場合には、初期の酸素濃度  $[O]_0$  と初期の炭素濃度  $[C]_0$  と  $CO$  分圧  $p_{CO}$  から、 $[O]^*$  が (16) 式のように決定される。

$$[O]^* = -\frac{1}{2} \left( \frac{16}{12} [C]_0 - [O]_0 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{16}{12} [C]_0 - [O]_0 \right)^2 + \frac{16 k_c p_{CO}}{12 k_o K_{CO}}} \dots\dots (16)$$

このようにして  $[O]^*$  が決まると、炭素の界面濃度  $[C]^*$  は (14) 式から求められる。

2.4 吸い上げ溶鋼容積

吸い上げ溶鋼容積  $v$  は、真空容器または取鍋の昇降幅、昇降速度、あるいは、真空容器、吸い上げ管、取鍋の各内径、真空容器内のガスなどの諸条件によつて変化することが推察されるが、脱ガス速度に及ぼす吸い上げ比、すなわち、全処理溶鋼容積  $V$  に対する最大吸い上げ時の真空容器内溶鋼容積  $v_{max}$  の比、真空ポンプの排気

速度、溶鋼の吸い上げ速度、および、排出速度などの効果を調べるために、ここでは、 $v$  をサイン曲線で近似して (17) 式のように与えてみる。

$$v = \{(v_{max} - v_0)/2\} \{ \sin(2\pi\theta/\theta_3 - \pi/2) + 1 \} + v_0 \dots (17)$$

ここで、 $\theta_3$  は 1 サイクルの周期である。脱ガス操作を開始してからの経過時間  $t$  は、吸い上げ開始からの経過時間を  $\theta$  とすれば (18) 式で示される。

$$t = (n-1)\theta_3 + \theta \dots\dots\dots (18)$$

また、平均の吸い上げ速度  $q_{in}$  と排出速度  $q_{out}$  は、それぞれ、(19), (20) 式で表わされる。

$$q_{in} = (v_{max} - v_0)/\theta_2 \dots\dots\dots (19)$$

$$q_{out} = (v_{max} - v_0)/(\theta_3 - \theta_2) \dots\dots\dots (20)$$

吸い上げ、排出速度をそれぞれ (19), (20) 式で与える場合には、吸い上げ期 ( $0 \leq \theta \leq \theta_2$ ) に吸い上げられた溶鋼の容積は

$$v = v_0 + q_{in}\theta \dots\dots\dots (21)$$

で示され、排出期 ( $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ ) における真空容器内の溶鋼の容積は

$$v = v_{max} - (\theta - \theta_2)q_{out} \dots\dots\dots (22)$$

で示される。

一方、 $v$  は上述のように種々の諸条件によつて影響を受けるが、次にこれらの影響について検討する。ここでは、大久保ら<sup>9)</sup>と同様に溶鋼はピストン流れと仮定し、上向きの流れを正とする。Fig. 2 に示したような記号を

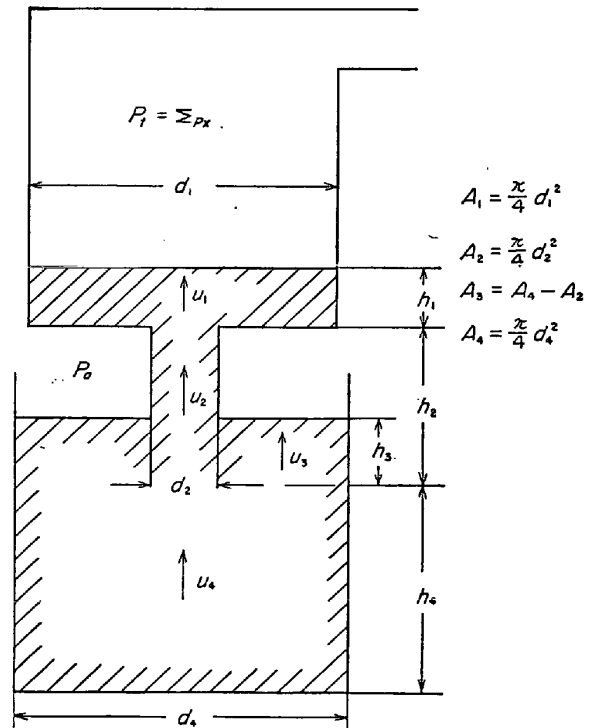


Fig. 2. Schematic profile of DH degassing plant for mechanical energy balance.

採用して吸い上げ管下端より上方の溶鋼についてエネルギー収支を行なうと、

$$du_2/dt = [(u_2^2/2) \{1 - (A_2/A_1)^2\} - g(h_1 + h_2 - h_3) + (P_a - P_t) \beta / \rho_{Fe} + h_3 d^2 h_3 / dt^2 \mp F] / \{(A_2/A_1) h_1 + h_2\} \dots (23)$$

が得られる。ここで、右辺分子中の  $F$  の前の符号は、吸い上げ期では負号を、排出期では正号とする。また、連続の式として(24)、(25)式が書ける。

$$dh_1/dt = (A_2/A_1) u_2 \dots (24)$$

$$dh_3/dt = -(A_4/A_3) dh_4/dt - (A_2/A_3) u_2 \dots (25)$$

ただし、 $u_1 = dh_1/dt$ ,  $u_3 = dh_3/dt$ ,  $u_4 = -dh_4/dt$  で表わされ、 $P_t$  は真空容器内のガス圧力で分圧  $p_X$  の和として、 $P_t = \sum p_X$  で示される。なお、 $F$  は、 $A_1 \gg A_2$ ,  $A_4 \gg A_2$  であるから、近似的に(26)式で表わされる。

$$F = (1.5 + 4fh_2/d_2) u_2^2 / 2 \dots (26)$$

ここで、吸い上げ管内の粗さ  $e$  としては、よれんが積の場合<sup>10)</sup>の  $e = 0.12 \sim 0.25$  を使用すると、吸い上げ管の内径  $d_2 = 25 \sim 50$  cm の範囲では乱流域における摩擦係数  $f$  はレイノルズ数によらずほぼ一定の値  $f = 0.01$  となり、層流域では  $f = 16/Re$  で示される。計算に当たっては、(25)式中の取鍋と真空容器の接近速度 ( $-dh_4/dt$ ) を時間の関数として与えなければならない。ここでは、取鍋、または、真空容器の上下端での停止時間を無視し、昇降幅を  $z_0$  として(27)式で示した。

$$-dh_4/dt = z_0 \pi / \theta_3 \cos(2\pi t / \theta_3 - \pi/2) \dots (27)$$

なお吸い上げ溶鋼の容積  $v$  は(28)式から求められる。

$$v = A_1 h_1 \dots (28)$$

一般に、操業開始後の数サイクルを除けば、真空容器内のガス圧力  $P_t$  の変動幅は大気圧  $P_a$  に比べて十分小さいので、 $(P_a - P_t)$  を一定とみなして(23)~(28)式から  $v$  を算出した結果を Table 1 に示す。ただし  $P_t = 10$  mmHg,  $h_2 = 150$  cm,  $A_1 = 3$  m<sup>2</sup> で計算を行なつた。なお Table 1 中の  $m_0$  は  $t = 0$  で真空容器内に存在する溶鋼質量を表わし、 $m_{min}$ ,  $m_{max}$  は1サイクルを通じて真空容器内に存在する溶鋼質量の最小値および最大値を表わす。Fig. 3 に吸い上げ溶鋼質量の時間的な変化を示したが、取鍋または真空容器の昇降運動に伴って真空容器内への溶鋼の流入や、真空容器からの溶鋼の流出に時間的遅れが生ずることがわかる。なお、Table 1 をみると、吸い上げ

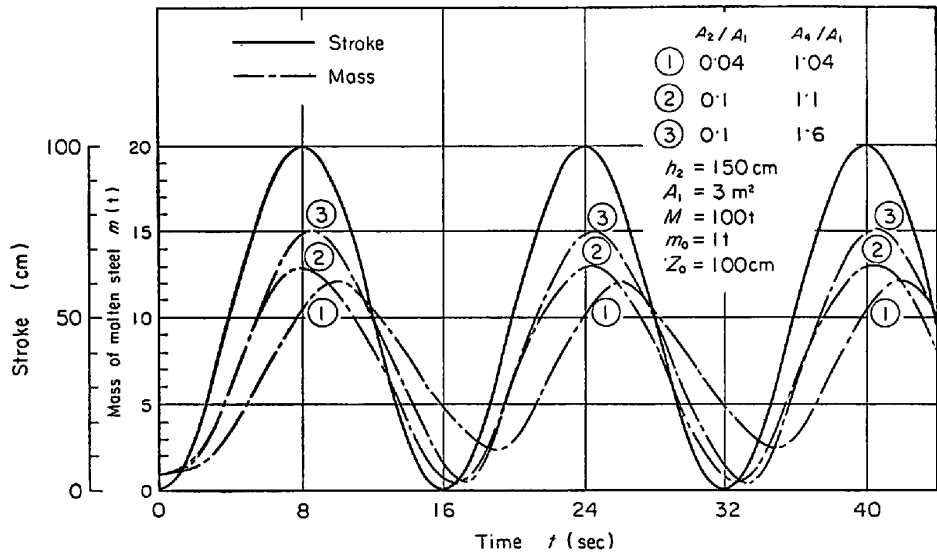


Fig. 3. Transitional variation of the mass of molten steel.

Table 1. Results calculated on the transitional variation of the mass of molten steel and on the time lag.

No	Data for calculation					Results			
	$\theta_3$ (sec)	$Z_0$ (cm)	$A_2/A_1$ (-)	$A_4/A_1$ (-)	$m_0(t)$ at $t=0$	Mass of molten steel in vacuum		Time lag (sec)	
						$m_{min}$ (t)	$m_{max}$ (t)	at $m = m_{min}$	at $m = m_{max}$
(1)	16	100	0.04	1.04	1.0	2.45	12.5	3.2	2.2
(2)	16	100	0.04	2.04	1.0	4.36	15.0	3.8	2.8
(3)	16	100	0.1	1.6	1.0	0.33	15.4	1.4	0.7
(4)	16	100	0.1	2.1	1.0	0.38	16.9	1.5	0.8
(5)	16	200	0.04	1.04	1.0	6.46	21.6	3.6	2.6
(6)	16	200	0.04	2.04	1.0	10.5	25.9	4.0	3.2
(7)	16	80	0.1	1.1	0.0	0.0	10.2	0.76	0.42
(8)	16	140	0.1	1.1	0.0	0.0	17.6	1.1	0.44
(9)	16	200	0.1	1.1	0.0	0.0	24.8	1.38	0.44
(10)	30.0	100	0.1	1.1	1.0	0.83	12.5	0.2	0.0

// : double prime means the same value as upper one

管の断面積  $A_2$  と真空容器の断面積  $A_1$  の比 ( $A_2/A_1$ ) の値が吸い上げ溶鋼質量に及ぼす効果が、表中の(2)と(4)、(5)と(9)を比較することによつて推察できる。

すなわち、( $A_2/A_1$ ) の値が小さいときには、取鍋または真空容器の昇降に対して溶鋼の流入や流出の時間的な遅れが大となり、また、残留溶鋼量も多くなる。取鍋と真空容器の断面積比 ( $A_2/A_1$ ) の値の効果は、Table 1 の(1)と(2)、(3)と(4)、(5)と(6)の比較によつてわかる。すなわち、( $A_2/A_1$ ) の値が2倍になつても上記の時間的遅れは、( $A_2/A_1$ ) の場合ほど大きな増加はないが、最大吸い上げ溶鋼質量と残留溶鋼質量が増加する。しかし、取鍋または真空容器の1回の昇降に伴つて出入する溶鋼質量にはほとんど変化がないことがわかる。また、Table 1 で(1)と(5)、(2)と(6)、(7)と(8)と(9)を比較すると、取鍋または真空容器の昇降幅  $z_0$  が増加しても時間的遅れにはあまり大きな影響を与えないが、おもに  $z_0$  の増加に伴つて最大吸い上げ溶鋼質量  $m_{max}$  が増加すること、さらに、( $A_2/A_1$ ) の値が0.1以下の場合には残留溶鋼質量  $m_{min}$  が増加することがわかる。

なお、 $v$  をより厳密に求めるには、(1)、(2)式または(3)、(4)式と(23)~(28)式とを連立させて計算しなければならない。

### 3. 計 算 法

気液界面での溶鋼の濃度が変動する場合には、基礎式が非線形になつて解析解が得られないので、解法は数値計算法によらなければならない。ここでは、 $v$  を厳密に求める場合の計算法について述べる。被脱ガス成分  $X$  のそれぞれについて、吸い上げ期には(1)、(2)式の基礎式が、排出期には(3)、(4)式の基礎式が得られ、(1)(3)式中の  $v$  は(28)式から得られる。(23)式の  $P_i$  は分圧  $p_X$  を使用して表わされるから、結局、 $[X]$ 、 $p_X$ 、 $u_2$ 、 $h_1$ 、 $h_3$ 、 $\eta_X$  に関する連立常微分方程式を解く問題になる。

これら  $[X]$ 、 $p_X$ 、 $\eta_X$ 、 $u_2$ 、 $h_1$ 、 $h_3$  の初期条件および ( $dh_4/dt$ ) を与えて、(1)、(2)式、または(3)、(4)式と(7)、(23)~(25)式を RUNGE-KUTTA GILL 法により数値計算する。吸い上げ期から排出期へ移る時点は、 $u_2$  が正から負に変わるときでもつて判定し、排出期を終わつて次のサイクルに移る時点は、 $u_2$  が負から正に変わるときでもつて判定する。このときに(8)式で次のサイクルの吸い上げ溶鋼の成分濃度を計算し、以後は前サイクルと同様な計算を繰り返す。なお、 $v$  として、(17)式を用いた場合は  $[X]$ 、 $p_X$ 、 $\eta_X$  に関する連立常微分方程となる。

## 4. 計算結果と考察

### 4.1 解析解

界面濃度  $[X]^*$  が一定で、溶鋼の吸い上げ速度、および、排出速度がそれぞれ(19)、(20)式で与えられる場合には、(1)、(3)式を吸い上げ開始時、すなわち、 $\theta=0$  において  $[X]=[X]_{n-1}$  の初期条件のもとで解いて以下に示すような解析解が得られる。

(1) 残留溶鋼がない場合

吸い上げ期間 (Fig. 1 (a)), ( $0 \leq \theta \leq \theta_1$ )

$$\frac{[X]-[X]^*}{[X]_{n-1}-[X]^*} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\theta_1}{\theta} \right) (1 - e^{-\alpha\theta/\theta_1}) \dots\dots (29)$$

この解(29)式は  $\theta \rightarrow 0$  で  $[X] \rightarrow [X]_{n-1}$  となり、初期条件を満足する。

吸い上げ期間 (Fig. 1 (b)), ( $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ )

$$\frac{[X]-[X]^*}{[X]_{n-1}-[X]^*} = \frac{1}{1+\alpha} + \left( \frac{1-e^{-\alpha}}{\alpha} - \frac{1}{1+\alpha} \right) \left( \frac{\theta_1}{\theta} \right)^{1+\alpha} \dots\dots (30)$$

排出期間 (Fig. 1 (c)), ( $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ )

$$\frac{[X]-[X]^*}{[X]_{n-1}-[X]^*} = \left\{ \frac{1}{1+\alpha} + \left( \frac{1-e^{-\alpha}}{\alpha} - \frac{1}{1+\alpha} \right) \left( \frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^{1+\alpha} \right\} \left( \frac{v}{v_{max}} \right)^\alpha \dots\dots (31)$$

ここで、 $\theta_1 = A_1 \delta / q_{in}$ 、 $\alpha \equiv k_X A_1 / q_{in}$

$n$  サイクル終了後と ( $n-1$ ) サイクル終了後の取鍋内の溶鋼の濃度の関係は

$$\begin{aligned} \frac{[X]_{n-1}-[X]_n}{[X]_{n-1}-[X]^*} &= \frac{v_{max}}{V} \left[ \frac{\theta_1}{\theta_2} (\alpha + e^{-\alpha} - 1) / \alpha \right. \\ &+ \alpha \frac{1-\theta_1/\theta_2}{1+\alpha} + \left. \left( \frac{1-e^{-\alpha}}{\alpha} - \frac{1}{1+\alpha} \right) \right. \\ &\frac{1}{\alpha} \left\{ 1 - \left( \frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^\alpha \right\} \frac{\theta_1}{\theta_2} + \frac{\alpha}{1+\alpha} \left\{ \frac{1}{1+\alpha} \right. \\ &\left. + \left( \frac{1-e^{-\alpha}}{\alpha} - \frac{1}{1+\alpha} \right) \left( \frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^{1+\alpha} \right\} \frac{q_{in}}{q_{out}} \left. \right] \dots\dots (32) \end{aligned}$$

で示される。(32)式の右辺の各項はどのサイクルにおいても一定となる。そこで、(32)式の右辺を  $\xi$  と置き、なお、(32)式で  $\theta_1$  は  $\theta_2$  に比して十分小さいのでこれを無視し、吸い上げ比  $a \equiv v_{max}/V$  と置くと、 $q_{in} = q_{out}$  の場合には、 $\xi$  はよい近以度で次のように表わすことができる。

$$\xi \doteq a\alpha(2+\alpha)/(1+\alpha)^2 \dots\dots (33)$$

さらに、 $[X]_n$  を  $[X]_0$  と  $\xi$  を用いて表わすと(34)式が得られる。

$$([X]_n - [X]^*) / ([X]_0 - [X]^*) = (1 - \xi)^n \dots\dots (34)$$

(2) 残留溶鋼がある場合

$n$  サイクル終了時の残留溶鋼の容積  $v_{0,n}$  は, サイクルによらず一定値  $v_0$  であるとする

吸い上げ期間 (Fig. 1 (b)), ( $0 \leq \theta \leq \theta_2$ )

$$\frac{(1+\alpha)[X] - ([X]_{n-1} + \alpha[X]^*)}{(1+\alpha)[X]'_{n-1} - ([X]_{n-1} + \alpha[X]^*)} = \left(\frac{v_0}{v}\right)^{1+\alpha} \dots\dots\dots (35)$$

排出期間 (Fig. 1 (c)), ( $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ )

$$\frac{[X] - [X]^*}{[X]_{n,\theta_2} - [X]^*} = \left(\frac{v}{v_{max}}\right)^\alpha \dots\dots\dots (36)$$

ここで,  $[X]_{n,\theta_2}$  は, (34)式で  $v=v_{max}$  と置いて得られる。

$$[X]_{n,\theta_2} = \left(\frac{v_0}{v_{max}}\right)^{1+\alpha} \cdot ([X]'_{n-1} - [X]_{n-1} - \frac{\alpha}{1+\alpha}[X]^*) + \frac{1}{1+\alpha}([X]_{n-1} + \alpha[X]^*) \dots\dots\dots (37)$$

$n$  サイクル終了時の残留溶鋼濃度  $[X]'_n$  は, (36)式で  $v=v_0$  と置いて (38)式のように示される。

$$[X]'_n = [X]^* + (v_0/v_{max})^\alpha ([X]_{n,\theta_2} - [X]^*) \dots (38)$$

$n$  サイクル後の取鍋内の溶鋼濃度  $[X]_n$  は

$$[X]_n = [X]_{n-1} + \{v_0([X]'_{n-1} - [X]_{n-1}) - \int_0^{\theta_3} k_X A ([X] - [X]^*) d\theta\} / (V - v_0) \dots\dots\dots (39)$$

で表わされる。なお, ここで(40)式の関係が書ける。

$$\int_0^{\theta_3} k_X A ([X] - [X]^*) d\theta = (v_{max} - v_0)[X]_{n-1} + v_0[X]'_{n-1} - v_{max}[X]_{n,\theta_2} + \{\alpha/(1+\alpha)\}([X]_{n,\theta_2} - [X]^*)v_{max}\{1 - (v_0/v_{max})^{1+\alpha}\} \dots\dots\dots (40)$$

残留溶鋼がない場合には, (34)式のように  $n$  サイクル後の取鍋内の溶鋼濃度  $[X]_n$  が簡単に初期濃度で表わされるが, 残留溶鋼がある場合には  $[X]'_n$  がサイクルによつて異なるため, 逐次計算法で求めなければならない。

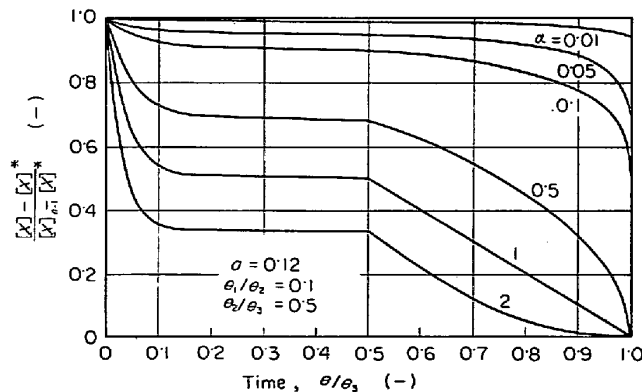


Fig. 4. Variations of the concentration of X-component of molten steel in vacuum vessel during one cycle. (X=C, H, N, O)

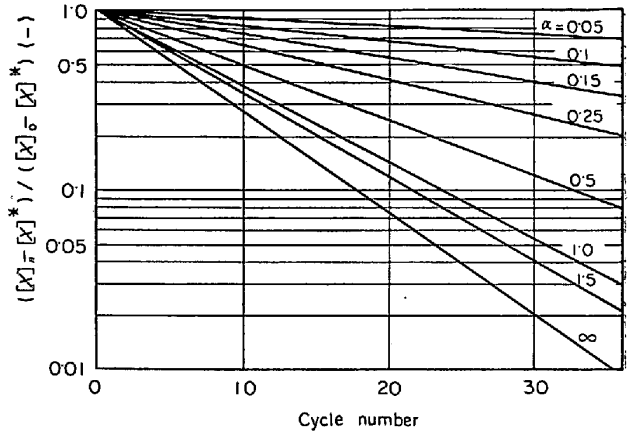


Fig. 5. Effect of the value of  $\alpha$  on degassing rate.

(29)~(31)式で示される1サイクル中の真空容器内溶鋼濃度変化を Fig. 4 に種々な  $\alpha$  に対して示す。吸い上げ比  $a$  を固定した場合の(34)式の関係を生種々の  $\alpha$  に対して示したのが Fig. 5 である。Fig. 4, Fig. 5 はともに  $q_{in} = q_{out}$  の条件下で計算した結果である。

Fig. 5 から, 吸い上げ速度と排出速度を大きくすることは脱ガスに有利になることが推察される。すなわち,  $\alpha \equiv k_X A_1 / q_{in}$  であるから, たとえば,  $q_{in}$  を2倍にしたときに  $k_X$  が変化しなければ  $\alpha$  の値は1/2になる。取鍋または真空容器の昇降運動において, 上下端での停留時間を考えなければ, 同じ脱ガス操作時間内の昇降回数はたとえば,  $\alpha=0.5$  の場合には  $\alpha=1.0$  の場合の2倍となり, 濃度低下が大きくなることが Fig. 5 からわかる。

次に, 吸い上げ速度と排出速度は変化させずに吸い上げ比  $a$  を変化させた場合の脱ガス速度に及ぼす効果を検討してみる。  $a$  を変化させても, もしも,  $k_X$  が変化しなければ  $\alpha$  は不変となるが,  $a$  の変化に対して ( $\theta_1/\theta_2$ ) は反比例の関係にあるが, (32)式の代わりに, よい近似度で成立する(33)式を用いると,  $\epsilon$  は  $a$  に比例することがわかる。たとえば, 吸い上げ比  $a$  のもとで操作が  $n$  サイクル行なえる場合には, 吸い上げ比を  $la$  にしたとき, 同じ脱ガス操作時間内に ( $n/l$ ) 回の昇降を繰り返すことができる。その場合, 吸い上げ比  $a$ , および,  $la$  に対して, 同じ操作時間後の取鍋内溶鋼の濃度は, それぞれ(41), (42)式で示される。

$$\frac{([X]_n - [X]^*)}{([X]_0 - [X]^*)} = \{1 - a\alpha(2+\alpha)/(1+\alpha)^2\}^n \dots\dots\dots (41)$$

$$\frac{([X]_{n/l} - [X]^*)}{([X]_0 - [X]^*)} = \{1 - la\alpha(2+\alpha)/(1+\alpha)^2\}^{n/l} \dots\dots\dots (42)$$

ただし,  $0 < a < 1, 0 < la < 1$  である。

吸い上げ比を増加した場合 ( $l > 1$ ), 常に(41)式 > (42)

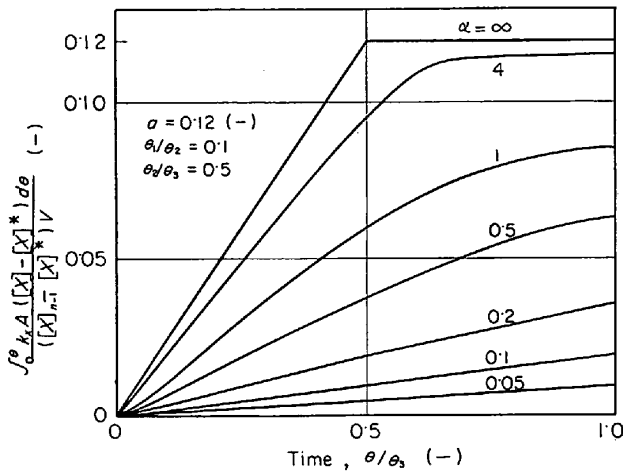


Fig. 6. Progress of degassing during one cycle.

式である。この差は吸い上げ比が大きく、 $\alpha$ が大きいほど著しい。しかし、脱水素では $\alpha$ が大きいと、かなり吸い上げ比を大きくする効果が期待できるが、脱酸、脱窒ではその効果は小さいと考えられる。

次に、1サイクル中の脱ガスの進行状況を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から、 $\alpha$ が小さいほど1サイクルの期間全域にわたってほぼ均等に脱ガスされる傾向があるが、 $\alpha$ が大きくなるにつれて、吸い上げ期における脱ガスが大部分を占め、排出期はあまり脱ガスに寄与しなくなることがわかる。なお、図中の  $\alpha = \infty$  は、溶鋼が常に平衡になつていていることを示している。このように解析解から、DH 真空脱ガスプロセスの特性をある程度知ることができる。

4.2 数値解

気液界面濃度に変化する場合には、基礎式が非線形となるため数値解法によらなくてはならないが、まず、計

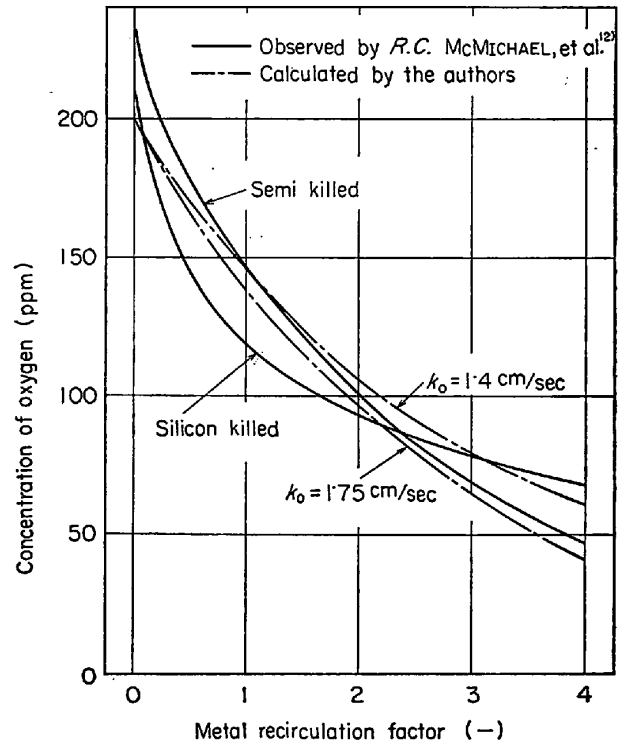


Fig. 7. Estimation of the value of mass transfer coefficient  $k_0$ .

算に用いたおもな値を Table 2 に示し、以下、脱ガス速度に及ぼす諸因子について考察する。

(1) 物質移動係数

物質移動係数  $k_X$  は、脱ガス速度に直接影響するが、 $k_X$  は気泡の発生状況や溶鋼の流動状態など複雑な因子によつて影響を受けるため、 $k_X$  を合理的に推算することは困難である。ここでは  $k_X$  の値の概略値を知るために、松田ら<sup>9)</sup>が脱酸速度式として採用している化学反応律速の場合の(43)式

Table 2. Data for calculation.

Period of one cycle	$\theta_3$ (sec)	8, 16, 24, 32, 48
Volume flow rate of exhaust gas	$S$ (m <sup>3</sup> /sec)	1, 4, 8, 10, 16, 20, 24, 30
Suction ratio	$a$ (-)	0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.36
Mass of molten steel in vacuum vessel at $\theta=0$	$m_0$ (t)	0.1
Initial concentration	$[X]_0$ (ppm)	$[O]_0=634, 200, [C]_0=475, 1500, [H]_0=0, 6, [N]_0=0, 50$
Mass transfer coefficient	$k_X$ (cm/sec)	$k_O=0.35\sim 1.75, k_H=0.9\sim 4.5, k_N=0.2\sim 0.5$
Value of $(k_C/k_0)$	(-)	0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 5

Total mass of molten steel :  $M=100$  t, Diameter of vacuum vessel :  $d_1=190$ cm  
 Volume of vacuum vessel :  $V_R=8$ m<sup>3</sup>, Gas temperature :  $T_g=1873$ °K, Density of molten steel :  $\rho_{Fe}=7.2$  g/cm<sup>3</sup>  
 Equilibrium const. (at 1600°C) :  $K_{CO}=0.0024^{11)}$ ,  $K_H=0.00247^{11)}$ ,  $K_N=0.048^{11)}$

Table 3. Values of  $k_o$  calculated from the results observed by MATSUDA et al.<sup>8)</sup>

Cycle number	1~3	5	10	15	20	30
$k_o$ (cm/sec)	0.93~8.1	0.93~2.3	0.23~1.4	0.23~0.93	0.23~0.93	0.23~0.46

$$d[O]/dt = (K'A/m_{max})([C][O] - K_{CO}p_{CO}) \dots (43)$$

を, ここでは, 液側の物質移動律速の場合に書き変えた次の(43)式

$$d[O]/dt = (k_o A_1 / v_{max})([O] - [O]^*) \dots (43)'$$

に基づいて, 彼らの実測データから  $k_o$  を計算した結果を Table 3 に示した. Table 3 から,  $k_o$  の値には大きなばらつきはあるが,  $k_o$  の値は気泡が発生しない状態で KNÜPPEL ら<sup>9)</sup>が実験から得た  $k_o$  の値の十数倍ないし数十倍になっている.

$k_o$ の値として 1.4 cm/sec, 1.75 cm/sec を採用した場合の計算結果を Fig. 7 に示し,  $k_H$  として 1.8 cm/sec, 3.6 cm/sec, 4.5 cm/sec を採用した場合の計算結果を Fig. 8 に示して, それぞれ実測値<sup>12)</sup>との比較を行なった.  $k_o = 1.75$  cm/sec の値は KNÜPPEL ら<sup>9)</sup>が実験から求めた値のほぼ 40~50 となり,  $k_H = 3.6$  cm/sec の値は約 40 倍となっている. なお, Fig. 7 で実測値<sup>12)</sup>との比較から, 脱ガス初期には  $k_o$  はさらに大きな値になり, 脱ガス末期には逆に  $k_o$  がさらに小さくなることが推察される.

次に, 物質移動係数により脱ガス速度がどの程度の影響を受けるかを検討してみる. 酸素の界面濃度を与える(15)式中には, 酸素および炭素の物質移動係数が  $(k_c/k_o)$  の形で入っている.  $[C] > 0.1\%$  の場合には, もしも,  $(k_c/k_o)$  の値が 1 よりも非常に小さくないならば, ほぼ,

酸素の移動が律速となるが, 酸素と炭素のモル濃度がほぼ等しい場合には,  $(k_c/k_o)$  の値が脱ガス速度にかなり大きな影響を及ぼすようになる. これらの効果を Fig. 9 に示した.

ところで, 物質移動が HIGBIE の非定常拡散モデルに従うとすれば,  $k_c/k_o = \sqrt{D_c/D_o}$  となるが,  $D_c, D_o$  の拡散係数の値には測定者<sup>13), 14), 15)</sup>によつてかなり大きなばらつきがある. したがつて,  $(k_c/k_o)$  の妥当な値を推定することは困難であるが, ここでは,  $(k_c/k_o) = 1$  として計算することにする.

Fig. 10 は  $k_o$  を, Fig. 11 は  $k_H$  と  $k_N$  を, それぞれ種々変化させた場合に各物質移動係数が脱ガス速度に及ぼす影響を調べた結果を示した図である.

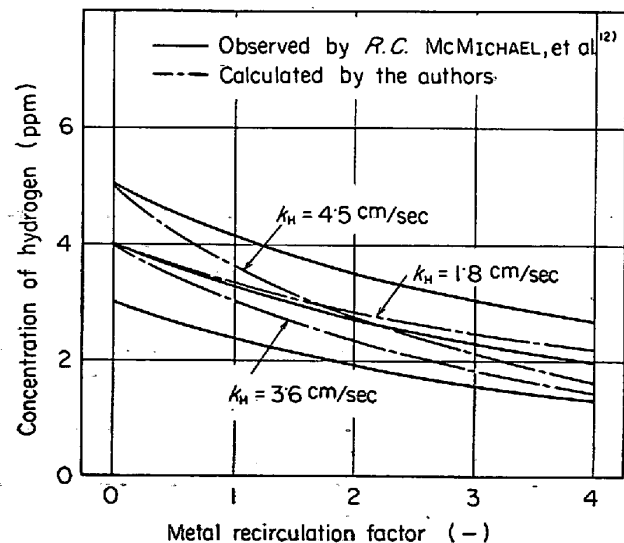


Fig. 8. Estimation of the value of mass transfer coefficient  $k_H$ .

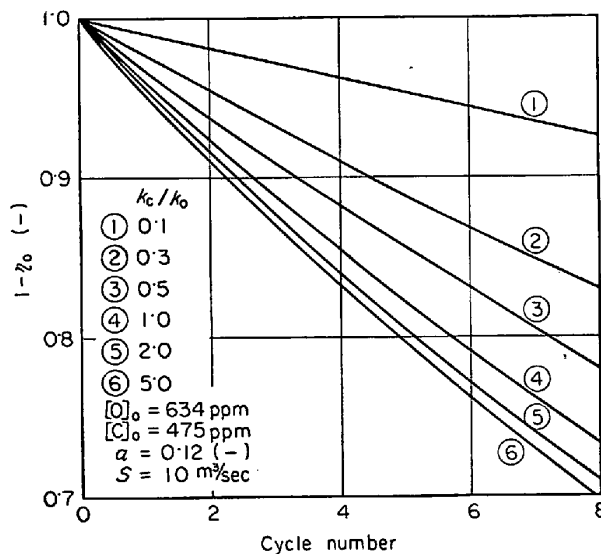


Fig. 9. Effect of  $(k_c/k_o)$  on deoxidation rate.

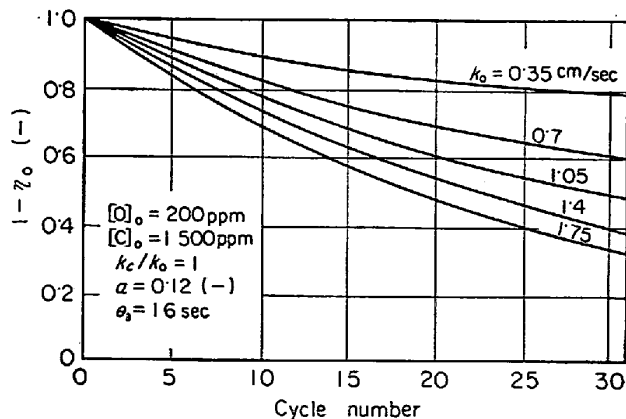


Fig. 10. Effect of mass transfer coefficient on degassing rate.



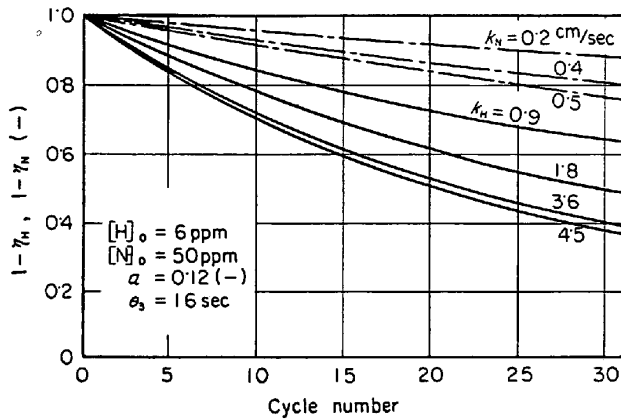


Fig. 11. Effect of mass transfer coefficient on degassing rate.

なお、以後の計算では、各物質移動係数の値を  $k_C = k_O = 1.75 \text{ cm/sec}$ ,  $k_H = 4.5 \text{ cm/sec}$ ,  $k_N = 0.5 \text{ cm/sec}$  とし、各成分の初期濃度として、 $[O]_0 = 0.02\%$ ,  $[C]_0 = 0.15\%$ ,  $[H]_0 = 6 \text{ ppm}$ ,  $[N]_0 = 50 \text{ ppm}$  を標準の値とし  $a$  の効果を調べる場合には  $S = 10 \text{ m}^3/\text{sec}$  として設定しておき、 $S$  の効果を検討する際には  $a = 0.12$  と固定した。なお、後述の(6)の計算結果を除いて吸い上げ溶鋼容積  $v$  は(17)式で与えた。

(2) 脱ガスの濃度推進力

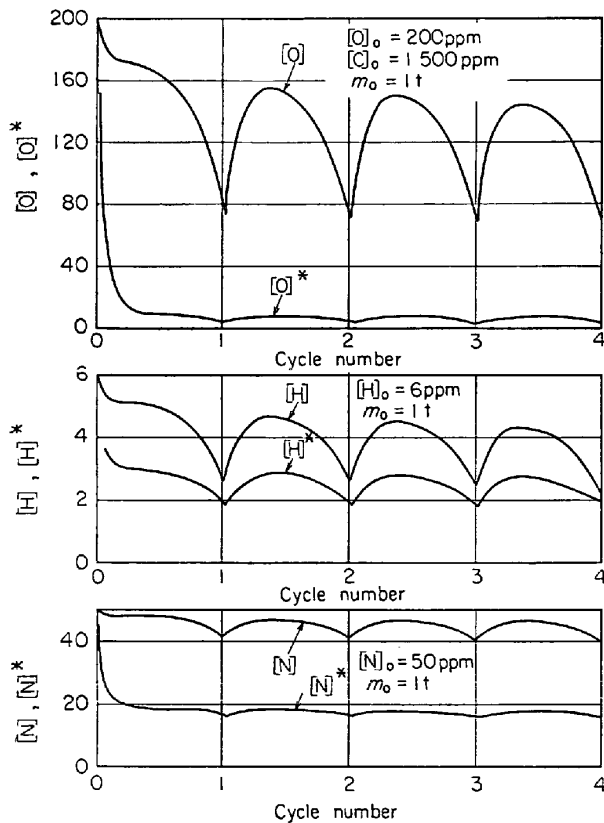


Fig. 12. Variation of driving force for degassing with the progress of cycle.

水素、酸素、窒素の真空容器内溶鋼の濃度とそれらの気液界面濃度の時間的変化を Fig. 12 に示した。とくに、水素の気液界面濃度の変化は酸素や窒素のそれに比べて著しく、脱ガスに有効な濃度推進力（真空容器内溶鋼の濃度と気液界面の濃度との差）に大きな影響を持っているが、酸素や窒素の気液界面濃度の変化は相対的に小さいことがわかる。一方、真空容器内の溶鋼の成分濃度は窒素を除いて1サイクル中に大きく変化していることがわかる。

(3) 排気速度

排気速度  $S$  を変えた場合の真空容器内ガス圧力の時間的変化を Fig. 13 に示す。排気速度を大きくするにつれて圧力ピークの位置がしだいに吸い上げ初期に移つていく。曲線は上から、 $S = 1, 4, 16, 24 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。

排気速度を変えた場合の脱酸率の変化を Fig. 14 に、

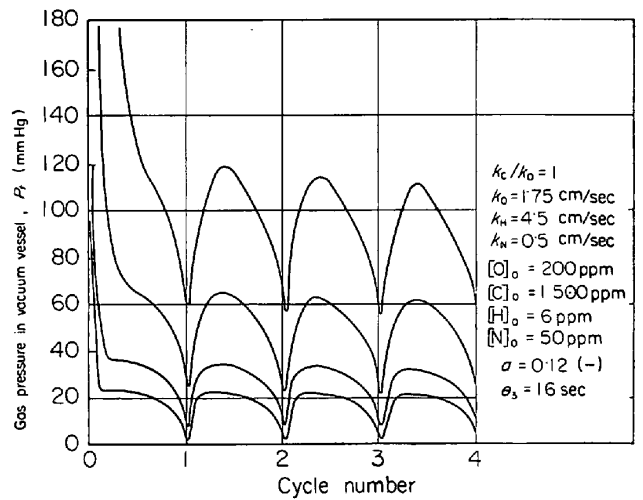


Fig. 13. Relations between the volume flow rate of exhaust gas and the pressure in vacuum vessel.

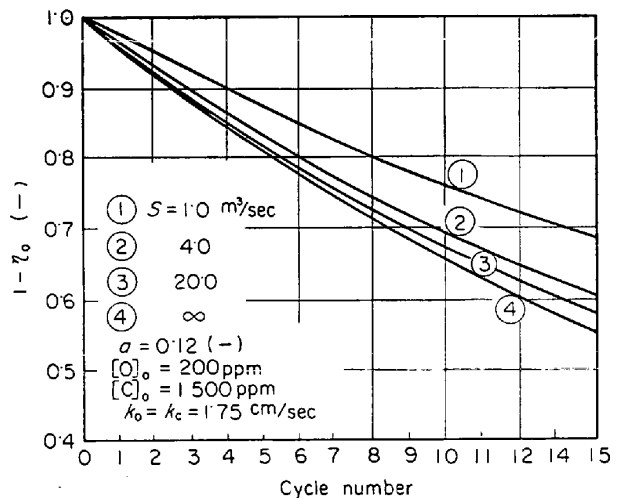


Fig. 14. Effect of the volume flow rate of exhaust gas on deoxidation rate.

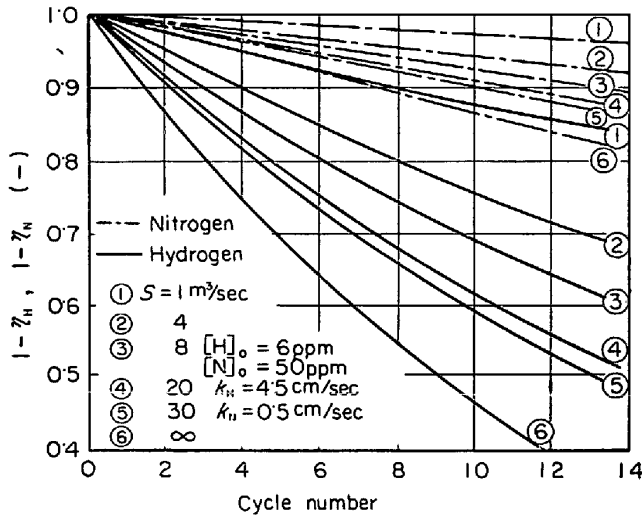


Fig. 15. Effect of the volume flow rate of exhaust gas on dehydrogenation or denitrification.

脱水素率, 脱窒率の変化を Fig. 15 に示す. Fig. 14 と Fig. 15 を比較すると, 脱酸の場合よりも, 脱水素, 脱窒の場合には排気速度の影響が大きいことがわかり, 特に, 排気速度を増加すること, すなわち真空容器内の気液界面濃度を下げることが脱水素に対して有効であることが推察できる. なお, これらの結果は Fig. 12 から推察できる.

しかし, Fig. 14 で見られるように, 図中の③と④とは, それぞれ,  $S=20\text{m}^3/\text{sec}$  と  $S=\infty$  であり, 両者の間に非常に大きな差があるにもかかわらず脱ガス速度にはほとんど差がないこと, すなわち,  $S$  がある程度大きな値になると, 脱ガス速度の増加はほとんど期待できなくなる. このことから, むやみに  $S$  を増加させることは実際操作では得策でないことが推察できる.

(4) 吸い上げ速度

Fig. 16 には, 吸い上げ速度が脱ガス速度に及ぼす効果を示してある. すなわち, 吸い上げ比  $a$  を一定に保つた場合には, 1 サイクルの周期  $\theta_s$  を短くすることが吸い上げ速度を大きくすることに対応するが, 図中の破線で示した等操作時間線から, 1 サイクルの時間が短いほど脱ガスがより一層進行しており, 吸い上げ速度を大きくすることが脱ガスに有利になることがわかる.

(5) 吸い上げ比

$q_{in}=q_{out}$  で  $q_{in}$  の値が一定に保たれている場合には, 吸い上げ比  $a$  の変化に伴って 1 サイクルの周期  $\theta_s$  が変わることになるが, 吸い上げ比  $a$  を 0.06 から 0.36 まで変化させた場合の脱酸率の変化を Fig. 17 に示す. 図中の等操作時間線から吸い上げ比の大きい場合のほうがわずかではあるが, 脱ガスに有利になつている.

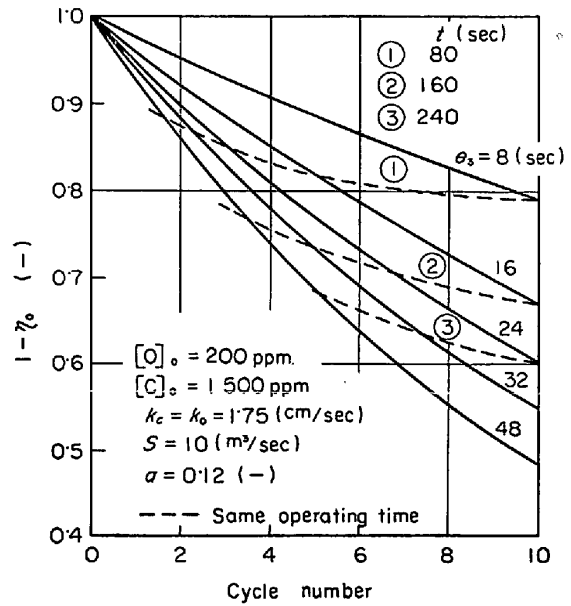


Fig. 16. Effect of suction speed on degassing rate.

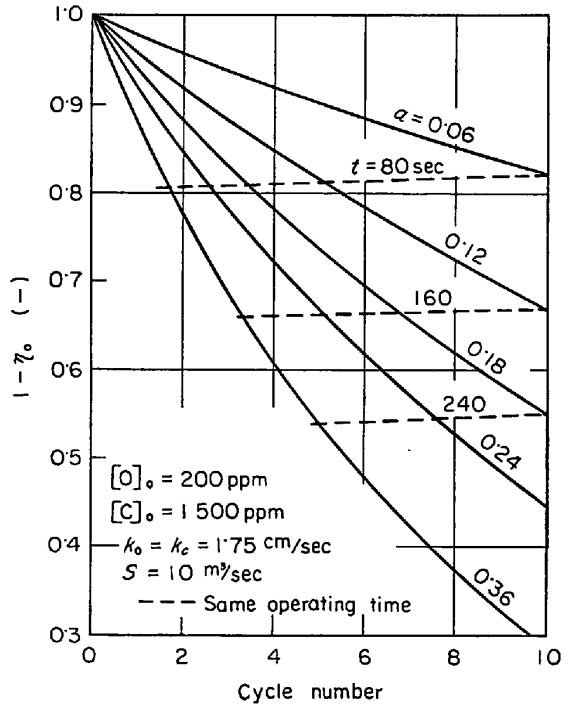


Fig. 17. Effect of suction ratio,  $a$ , on degassing rate.

本研究では, 物質移動係数は吸い上げ量によらず一定として解析している. KNÜPPEL<sup>4)</sup>は, 真空容器内の脱酸反応を, 直接, 容器内の溶鋼をサンプリングすることにより調べ, 脱酸速度式

$$d[O]/dt = (k_o A/v) \cdot ([O] - [O]_s) \dots \dots \dots (44)$$

にしたがつて, あるサイクルの排出期の  $(k_o A/v)$  の変化を示している. また,  $k_o$  として実験的に得られた値を用いて  $k_o$  と  $A$  を分離して取り扱っているが, KNÜPPEL

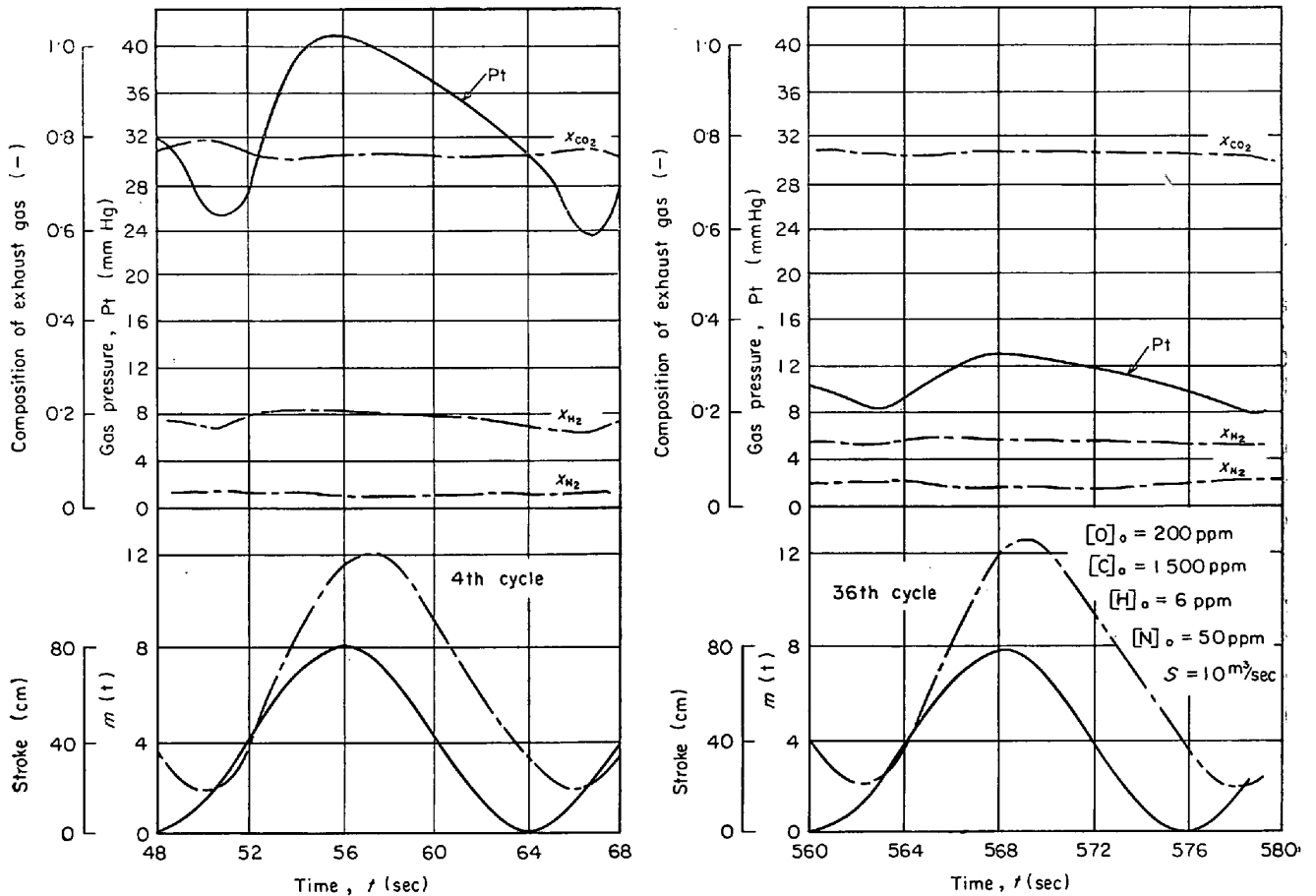


Fig. 18. Results calculated by adding mechanical energy balance.

らは、サイクルが進むにつれて、有効気液界面積は減少するが、あるサイクルの排出期に限って考えればAはあまり大きな変動はないことを報告している。KNÜPPELらのこの結果は、本研究で用いた  $k_0$  があるサイクルの排出期には大きく変化しないことを意味している。

(6) 吸い上げ溶鋼容積について正弦曲線近似しない場合

上述の計算では  $v$  を(17)式に基づいて与えたが、ここでは、(1)、(2)式あるいは、(3)、(4)式と(7)、(23)、(24)、(25)式を連立させて数値計算した場合について述べる。脱ガス操作の初期と末期の吸い上げ溶鋼質量、真空容器内のガス圧力、排ガス組成の変化のようすをみるために、計算結果のうち4サイクル目と36サイクル目の結果を Fig. 18 に示す。この図から排ガス組成は1サイクル中でも、さらに、サイクルが進んでも大きな変化はないが、わずかに水素が減少し、それに対応して窒素が増加していること、また、吸い上げ溶鋼質量は脱ガス末期では、真空容器内のガス圧力の低下のためにわずかに増加していることがわかる。また、残留溶鋼がかなり存在すること、溶鋼の真空容器内への流入、真空

容器からの流出に時間的な遅れが生ずること、吸い上げ期が約 7sec で排出期が約 9sec であり、排出期に時間がかかることがわかる。ただし、 $A_1=3m^2$ ,  $A_2/A_1=0.05$ ,  $A_4/A_1=1.25$ ,  $h_2=150cm$ , 初期条件は  $h_1=0$ ,  $u_2=0$ ,  $\eta_x=0$   $[O]_0=200ppm$ ,  $[C]_0=1500ppm$ ,  $[H]_0=6ppm$ ,  $[N]_0=50ppm$ , また、 $h_3$  は  $P_t$  を与えれば圧力のバランスから

$$h_3 = h_2 - 76(1 - P_t)(13.6/7.2) \dots \dots \dots (45)$$

で求められる。初期の  $P_t$  としては  $P_t=0.131 atm(100 mmHg)$  を使用した。

### 5. 結 言

DH 真空脱ガスプロセスの数学的モデルを展開し、このモデルで唯一のパラメータである物質移動係数を実測データから検討し、排気速度、吸い上げ速度、吸い上げ比などが脱ガス速度に及ぼす影響について解析した。さらに、この数学的モデルに基づいて、吸い上げ溶鋼質量が取鍋あるいは真空容器の昇降幅、昇降速度、および、真空容器、吸い上げ管、取鍋の各断面積の比率などによりどのように影響されるかを示した。

本研究で得られた DH 真空脱ガスプロセスの特性についての計算結果は、実操業における脱ガスプロセスの操業条件の改善に有用な基礎資料となるものと推察される。

## 記 号

$a$  : 吸い上げ比, (-)  
 $A$  : 気液界面積,  $\text{cm}^2$   
 $A_1, A_2, A_4$  : 真空容器, 吸い上げ管, 取鍋の各断面積,  $\text{cm}^2$   
 $[C], [C]^*$  : 真空容器内の溶鋼の炭素濃度, 気液界面の炭素濃度, wt %  
 $d_1, d_2, d_4$  : 真空容器, 吸い上げ管, 取鍋の内径, cm  
 $e$  : 吸い上げ管内表面の粗さ, cm  
 $f$  : 摩擦係数, (-)  
 $F$  : 単位質量の溶鋼のエネルギー損失量, erg/g  
 $g$  : 重力加速度,  $\text{cm}/\text{sec}^2$   
 $G_X$  : 脱ガスされた  $X$  成分のモル数, mol  
 $[H], [H]^*$  : 真空容器内の溶鋼の水素濃度, 気液界面の水素濃度, wt %  
 $h_1, h_2, h_3, h_4$  : 吸い上げ溶鋼の深さ, 吸い上げ管の長さ, 吸い上げ管の浸漬深さ, 吸い上げ管下端と取鍋底部間の距離, cm  
 $K'$  : 脱酸の速度定数,  $\text{t}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$   
 $K_{\text{CO}}, K_{\text{H}}, K_{\text{N}}$  : 平衡定数  
 $k_X$  :  $X$  成分の物質移動係数, ( $X = \text{C}, \text{H}, \text{N}, \text{O}$ ),  $\text{cm}/\text{sec}$   
 $m, m_{\text{max}}, m_{\text{min}}, m_0$  : 吸い上げ溶鋼質量, 最大吸い上げ溶鋼質量, 残留溶鋼質量, サイクルによらず一定な場合の残留溶鋼質量, t  
 $M$  : 全処理溶鋼質量, t  
 $M_X$  :  $X$  成分の原子量 ( $X = \text{C}, \text{H}, \text{N}, \text{O}$ )  
 $[N], [N]^*$  : 真空容器内の溶鋼の窒素濃度, 気液界面の窒素濃度, wt %  
 $[O], [O]^*, [O]_s$  : 真空容器内の溶鋼の酸素濃度, 気液界面の酸素濃度, 1 サイクル中の気液界面平均酸素濃度, wt %  
 $P_a, P_t, p_X$  : 大気圧, 真空容器内のガス圧力,  $X$  成分の分圧 ( $X = \text{CO}, \text{H}_2, \text{N}_2$ ), atm  
 $q_{\text{in}}, q_{\text{out}}$  : 平均吸い上げ速度, 平均排出速度,  $\text{cm}^3/\text{sec}$   
 $R$  : 気体定数,  $\text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}$   
 $S$  : 排気速度,  $\text{cm}^3/\text{sec}$   
 $t$  : 脱ガス操作開始からの経過時間, sec  
 $T_g$  : ガス温度,  $^\circ\text{K}$   
 $u_1, u_2, u_3, u_4$  : 溶鋼の流速 (Fig. 2 参照),  $\text{cm}/\text{sec}$

$v, v_{\text{max}}, v_0, v_{0,n}$  : 吸い上げ溶鋼の容積, 最大吸い上げ溶鋼容積, サイクルによらず一定の場合の残留溶鋼容積,  $n$  サイクル後の残留溶鋼容積,  $\text{cm}^3$   
 $V$  : 全処理溶鋼容積,  $\text{cm}^3$   
 $[X], [X]_n, [X]^*$  : 真空容器内の成分の濃度,  $n$  サイクル終了後の取鍋内での  $X$  成分の濃度, 気液界面での  $X$  成分の濃度, ( $X = \text{C}, \text{H}, \text{N}, \text{O}$ ), wt %  
 $z_0$  : 取鍋または真空容器の昇降幅, cm  
 $\beta = 1.03 \times 10^6$ , 圧力の換算係数, (-)  
 $\gamma_X$  : 量論係数,  $\gamma_{\text{H}} = \gamma_{\text{N}} = 1/2, \gamma_{\text{O}} = 1$ , (-)  
 $\delta$  : 真空容器底面で溶鋼が広がる際の深さ, cm  
 $\eta_X$  :  $X$  成分の脱ガス率, (-)  
 $\rho_{\text{Fe}}$  : 溶鋼の密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  : 吸い上げ開始からの経過時間, 真空容器底面を溶鋼が広がり終わるまでの時間, 最大吸い上げ時の時間  $\theta$ , 1 サイクルの周期, sec

## 文 献

- 1) 渡辺, 浅野, 佐伯: 鉄と鋼, 54 (1968) 13, p. 1327
- 2) 藤井, 鞭: 鉄と鋼, 56 (1970) 9, p. 1165
- 3) 森, 谷沢, 松田, 田中: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1898
- 4) H. KNÜPPEL, F. OETERS, and S. VARDAG: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966) 8, p. 621
- 5) H. KNÜPPEL, and F. OETERS: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962) 11, p. 729
- 6) H. KNÜPPEL, A. DREVERMANN, and F. OETERS: Stahl u. Eisen, 79 (1959) 7, p. 414
- 7) F. D. DELVE, G. C. DUDERSTADT, and R. F. KOWAL: J. Iron Steel Inst., 206 (1968) 12, p. 1218
- 8) 松田, 田中: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, S. 325
- 9) 大久保, 坂田, 長, 若林: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, S. 121
- 10) 化学工学協会編: 化学工学便覧, (1968), p. 106 [丸善]
- 11) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編: 製鋼反応の推奨平衡値, (1968), p. 1, p. 148, p. 158 [日刊工業新聞社]
- 12) R. C. McMICHAL, R. M. SMAILER, and D. Y. EDWARDS: Blast. Furn. Steel Pl., 57 (1969) 3, p. 225
- 13) D. W. MORGAN and J. A. KITCHENER: Trans. Farad. Soc., 50 (1954) 1, p. 51
- 14) R. E. GRACE and G. DERGE: Trans. Met. Soc. AIME, 212 (1958) 6, p. 331
- 15) K. SCHWERDTFEGER: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967) 2, p. 134