

- Compt. Rend., 236 (1953) 2064
- 11) *N. K. Adam*: The Physics and Chemistry of Surfaces, Oxford Univ. Press (1941)
- 12) *J. J. Bickerman*: Surface Chemistry for Industrial Research, Academic Press, New York, (1948)
- 13) *F. Bashforth and S. C. Adams*: An Attempt to Test the Theories of Capillarity, Cambridge Univ. Press, (1883)
- 14) *G. Heidtkamp, K. Endell*: Glasstech. Ber., 14 (1936) 80
- 15) 日本化学会編: 化学便覧, p. 373
- 16) *O. A. Esin, Y. P. Nikitin and S. I. Popel*: Doklady Akad. Nauk SSSR, 83 (1952) No. 3, 431
- 17) *M. Humenik, W. D. Kingery*: J. Amer. Ceram. Soc., 37 (1954) 18
- 18) *W. D. Kingery*: J. Amer. Ceram. Soc., 37 (1954) 42
- 19) *K. M. Goldman, G. Derge and W. O. Philbrook*: J. Metals, 6 (1954) 534

酸素製鋼の基礎条件について*

勝 藤 昌 伸** · 丹 羽 貴 知 蔵***

ON THE FUNDAMENTAL CONDITIONS OF THE STEELMAKING PROCESS BY OXYGEN BLOWING

Yoshinobu Katsufuji and Kichizo Niwa

Synopsis:

The authors reported the results concerning the mechanism of the decarburization reaction of molten Fe-C alloys. The author's results being compared with the rate of the carbon removal on the practical operation, the fundamental conditions necessary to the operation of oxygen blowing was considered.

The results obtained were as follows:

(1) As the reaction was shown to take place on the interface between gaseous and liquid phases, the rate of the carbon removal depended upon the weight of iron, the area of interface and the oxygen pressure at a given carbon content. When the area of interface was maintained to be constant, the rate depended only on the partial pressure of oxygen and in case of lower carbon contents up to 1%, the rate became constant at higher oxygen pressures above 2/5 atm.

(2) However in the practical operations the area of interface varied with the amounts of the bubbles produced by oxygen blowing, and the oxygen pressure in the phase of bubbles was approximately 1 atm.

Consequently the reaction rate depended upon the area of interface and the amounts of oxygen introduced.

As the differences of the rate was due to those reasons, it was necessary to flow the suitable oxygen gas to the furnace in such a way that enlarged this area as possible.

(3) In order to promote the reaction taking place on the interface, it desirable to accelerate the diffusion of carbon, the coefficient of which was slow in molten iron, by the method of the physical turbulence.

(4) As the activity coefficients of the reactants increased with the diminution of the carbon content, the beginning of oxygen blowing was more effective at the lower carbon concentrations.

* 昭和 28 年 6 月本会北海道支部に於て講演

** 北海道大学理学部無機化学教室, 理

*** 北海道大学教授理博

I. 緒言

製鋼反応の主反応は熔鉄に溶解した炭素と酸素との間の反応すなわち所謂脱炭反応である。酸素ガスによる脱炭反応は酸素製鋼として種々の利点を有し実際操業の方面からも広く用いられ、その有用性が認識されている。しかして実際操業に於いては銹滓の共存、炉内雰囲気の変化、吹精方法などにより異つた結果を与えているため反応の機構については本質的に検討すべき点が多い。著者らはさきに Fe-C 系の熔融合金の酸素ガスによる脱炭反応を行つたので、その結果を用い実際操業の現場値と比較して酸素製鋼の基礎条件に対する 2, 3. の問題について検討した。

II. 脱炭速度の現場値との比較

著者等の実験で各酸素圧の下で得られた結果¹⁾に 2, 3 の現場値を加え $\log d[C]/dt$ (%C/mn) と $\log[C]$ (%) との関係を示すと Fig. 1 のごとくなる。

Table 1 には Fig. 1 に示された諸種の値に関する諸条件を示した。

Fig. 1 より明らかなことは現場値の中には著者等の値に比して可成り大きな脱炭速度を示すものと認められるが、大部分が 1 気圧の酸素を用いているにも拘らず著者等の 1/5 気圧酸素 (空気) を用いて得られた曲線よりも下位にあることである。又著者等の場合には既に報告せるごとく 1% C 以下の炭素濃度に於いては酸素圧約 2/5 気圧以上で脱炭速度がほぼ一定値に止り、約 0.2% C 以下では 1/5 気圧のときの値に近づいている。

現場値が一般に低いこと及び条件によつて脱炭速度に差のあることは次の諸原因に基くものと推定される。

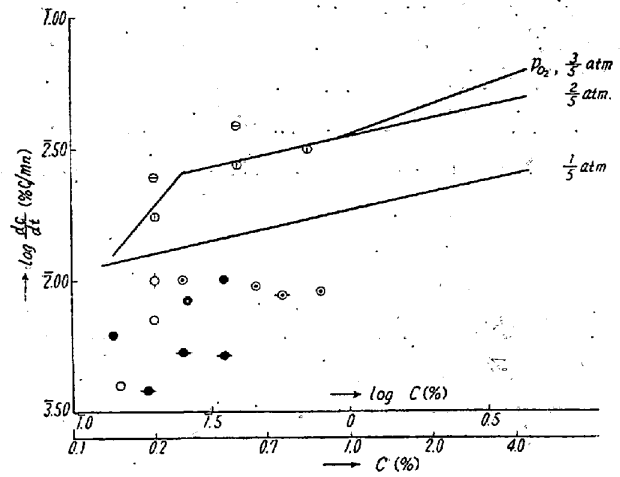


Fig. 1. Comparison of the decarburization reaction rates on various conditions.

i) 脱炭速度と脱炭反応の不均一性との関係

酸素ガスによる脱炭反応に於いては反応の起る場所によつて次の 3 種の反応が考えられる。その 1 つは熔鉄内に於いて起る均一液相反応、その 2 は気相と熔鉄相との界面に於ける界面反応、その 3 は両者の併起する反応である。著者等の結果によると該系の反応は界面反応であるとみなすことができる¹⁾。

若しも均一液相反応であるとする、脱炭速度は試料の重量及び界面積に無関係で炭素と酸素濃度によりのみ依存すべきである。しかるに界面反応のごとき不均一反応の場合には脱炭速度は炭素及び酸素濃度の外に試料の重量及び界面積によつても変化する。Fig. 1 に示す著者等の値は試料重量 40g, 界面積 3.14 cm² のときの脱炭速度を表わしているが、同じ試料重量で界面積を大きくすると脱炭速度は更に増大する¹⁾。同様にして界面積を一定にしても試料の重量によつて脱炭速度は異つた値をと

Table 1. The conditions of the various values plotted in Fig. 1.

	Method	Gas flow cc/g mn	React. temp. °C	Furnaces	Steel products	Lance pipe	Signs in figure
The author	Oxygen { air proc. } 1/5, 2/5 atm. O ₂	1.25	1580	15KW high-fr. induct. furnace	Fe-C alloy 40g interface area (3.14cm ²)	—	—
Cakushin* 24-commit	Oxygen Air proc. 1atm. O ₂	0.2~0.6 0.5~1.0	> 1580	Electric	JIS G5101	3/4" ~ 1/2" φ 1 pipe	○ ○
A Firm	Oxygen proc. 1atm. O ₂ Ore proc.	0.075 —	1580 1550	O. H. (195t)	Dead mild steel	3/4" φ 2 pipes	• -•
B Firm	Oxygen proc. 1atm. O ₂ Ore proc	0.15	1400 ~ 1600	O. H. (50t)	Wire rod	3/4" φ 1 pipe	⊙ ⊙
C Firm	Oxygen proc. 1atm. O ₂	1.0~0.8	1580 ~ 1650	Basic arc (5~10t)	Spec. steel	3/4" φ 1 pipe	(5t) ⊖ (10t) ⊕

* Cakushin (Japan Soc. Prom.Sci) 24th committee, 29th subcommittee (Oct. 1952): The standard melting practice with an oxygen or air-blown electric furnace for steel castings.

りうる。従つて厳密には単位重量、単位界面積、単位酸素圧に於ける脱炭速度を比較しなければならない。このことは現場値との比較に於いて困難であるので異つた条件の下に於ける値をそのまま用いて考察を行つた。脱炭速度が条件によつて異つた値を示すのは上述のごとく脱炭反応の不均一性の特異な点にその主なる原因が存在する。

ii) 酸素ガスの流速

試料の重量、炭素濃度及び酸素圧などの条件が同一のときには該系の反応が界面反応であるから脱炭速度は界面積の大きさに左右される¹⁾。界面積が一定のときにはある流速以上で脱炭速度は一定値をとり流速の影響がなくなる²⁾。このような流速の下では脱炭速度は酸素圧のみによつて左右される。上記の条件を満足せしめるような流速は界面積を一定にしても酸素圧及び炭素濃度によつて異つた値をとる¹⁾。以上の結果から知られることは試料重量一定の条件の下で脱炭速度を比較するときには正確には単位面積あたりこれと接する気相ガスの単位圧力の下に於ける脱炭速度を以て示さなければならない。すなわち脱炭速度を表わす実験式として次式が成立する¹⁾。

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_1 \cdot A \cdot p_{O_2}^{1/2} \cdot f[C] \dots\dots\dots (1)$$

ここで A は界面の全表面積、 p_{O_2} は気相の酸素圧、 f は成分元素間の活動濃度係数を表わす一つの因数である。

現場値に於ける酸素消費量を調べると挿入した酸素が殆んど全部脱炭に消費されていて、しかも流速の増大と共に脱炭速度も増大していることから、現場に於ける吹精作業では酸素の流速が脱炭速度に著しい影響を与えていることが明らかである。現場では鋳滓下溶鋼内に酸素を挿入するので酸素圧はほぼ1気圧とみなすと酸素の流量の増加は溶鋼と気相との接する界面積すなわち(1)式における A が大となることであり従つて脱炭速度も増大することになる。使用した溶鋼の単位重量あたりのガス流速を求めてみると Table 1 に示したごとく一般に現場においては可成り低い値を示している。すなわち使用した溶鋼の t 数(重量)に比して気相と接する界面積の割合が小さいものと言ひ得る。(i) に述べたごとく界面積の変化によつて Fig. 1 の著者等の値は更に十分大きな値をとりうるが現場値の中でも適当な条件の下において可成り大きな脱炭速度を示しているものもある。特に酸素流量一定の場合には使用炉の小さいもの、従つて溶鋼 t 数の小なるもの程脱炭速度が大きくなる傾向が認

められる。

iii) 拡散について

脱炭反応に与る酸素は気相の酸素と平衡する¹⁾。従つて酸素の拡散は考慮外に置くことが出来、界面への炭素の拡散係数は可成り小さい値である²⁾。渦流、対流その他による溶鉄の攪拌が不十分なときには炭素の拡散に基づく濃度勾配を無視することが出来ない。界面における反応を取扱う場合には拡散量は炭素濃度及び溶鋼の深さに依存する。

iv) 炉内雰囲気中の酸素圧の影響

炉内ガス相には発生炉ガスの燃焼による CO_2 , H_2O 及び過剰酸素(空気)などの酸化性ガスが存在する。吹込酸素の大部分は溶鋼内脱炭反応によつて消費されているものと見做してよいが³⁾、酸素流量及び吹込方法などによつては吹込酸素の一部は炉内の気相に逸出して炉内酸素圧を高くする原因となる⁴⁾。又鋳滓が共存するときには挿入した酸素ガスが溶鋼と鋳滓との界面に存在する場合も考えることが出来る。このような場合には溶鉄の酸化と同時に鋳滓の酸化も起る。また鋳滓は炉内雰囲気からもその酸素圧に応じて酸化を受ける。気相から溶滓中に吸収されたこれらの酸素は溶滓中を拡散して溶鋼との界面で反応に関与する。気相の酸素による溶滓中の FeO の酸化の割合は既に J. Chipman⁵⁾ によつて

$$j = \frac{Fe^{+3}}{Fe^{+2} + Fe^{+3}}$$

と p_{O_2} との関係として与えられている。 j は p_{O_2} に依存する量である。条件によつては酸素吹込により溶滓中の FeO 濃度が高くなり⁴⁾、これに基づく脱炭速度の増大も考慮されねばならない。炉内雰囲気中が溶鋼と直接に接しているときには脱炭速度が気相の酸素度に依存することは既に示した通りである¹⁾。

v) 温度効果について

酸素の吹込によつて溶鋼の温度は上昇する⁶⁾。反応温度の上昇と共に脱炭速度は増大する²⁾。

vi) 溶解酸素について

脱炭過程に於ける溶解酸素は気相酸素圧(従つて脱炭速度)に無関係ではほぼ平衡値に近く炭素濃度に特有な値を持つものである¹⁾。

III. 考 察

以上の結果から酸素製鋼に於ける現場値相互間の脱炭速度を比較する際に考慮しなければならないことは、溶鋼の使用 t 数に対する溶鋼の高さ並びに表面積及びこれに対応する酸素ガスの流速、炉内ガス相に於ける酸素分

圧の局部的変化である。著者等の場合には気相と溶鉄とが接している界面の表面積を一定とみなすことが出来て単位面積あたりの脱炭速度は酸素圧に依存するという結果を得ている。しかるに現場に於いては溶鋼内に酸素ガスを挿入するのであるから溶鋼内で気相酸素と溶鉄との平衡が成立する。すなわち溶鋼内で酸素ガスによる気泡の生成が考えられる。ある単位時間に於ける両者の状態を考えて、これを模型的に示すと Fig. 2 のごとくである。

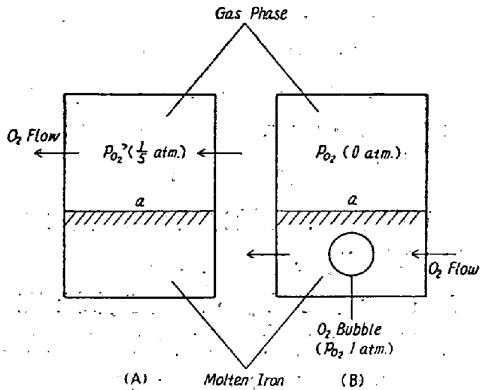


Fig. 2. Comparison of the models of our experimental methods and practical operations.

溶鋼内に酸素を挿入したときの気泡内の酸素圧はほぼ1気圧とみなすことが出来る。前述の理由により気泡内の気相と気泡の界面で反応が起るものとする、生成した気泡の数(あるいは気泡の容積)によつて界面積及び気相酸素の量が増大し、従つて脱炭速度も大きくなる。気泡の生成する数(あるいは容積)はガス流量に依存するものと考えられる。そこで著者等の場合(Fig.2-A)と現場の酸素吹込の場合(Fig.2-B)とを比較してみると、

(A)では酸素ガスの流速が変化しても界面積並びに酸素圧は不変であり、脱炭速度は酸素圧に依存する。すなわち気相の単位容積を V_G とし、この中に酸素ガス N モルが存在するものとし、この系内に外部から酸素ガスが単位時間に dN モル流入すると dN は流速の変化に対応する量となる。今単位時間に N モル中 N_C モルの酸素が脱炭反応に消費されるものとする V_G の全圧が反応の前後に同圧である限り、系外に移行する酸素の量は $(dN - N_C)$ モルにならなければならない。従つて反応前後に於ける V_G 中酸素のモル数は

$$(N - N_C) + dN - (dN - N_C) = N \dots \dots \dots (2)$$

しかして V_G の全圧が反応の前後に同圧であるための条件は

$$N_C \leq dN \dots \dots \dots (3)$$

すなわち V_G 中の酸素のモル数は (3) の条件を満足

せしめるところでは流速(従つて流量)により不変であり酸素圧は一定となる。従つて(2)及び(3)式の条件を満足せしめるような流速の下では流速の影響がなくなり、脱炭速度は酸素圧のみに依存するようになる。故に単位時間に反応によつて消費される酸素 N_C モルの容積を $V_G^{O_2}$ とすると次式が成立する¹⁾。

$$V_G^{O_2} = \alpha a_1 p_{O_2}^{1/2} = \alpha a_1 \left(\frac{N}{V_G} RT_G \right)^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

ここで α は比例恒数、 R は気体恒数、 T_G は絶対温度、 a_1 は単位界面積を表わす。今流速の変化に反応して V_G 中を単位時間に流れる酸素の容積増加を $dV_G^{O_2-f}$ とすると、反応に与らずにその系を流れる酸素の全容積 dV は

$$dV = dV_G^{O_2-f} + (V_G - V_G^{O_2}) \dots \dots \dots (5)$$

しかして $dV_G^{O_2-f}$ は酸素圧、温度一定のときは

$$dV_G^{O_2-f} = dN \frac{RT_G}{p_{O_2}} \dots \dots \dots (6)$$

従つて(3)式が成立する流速の下では酸素圧が一定となるから $V_G^{O_2}$ は流速により不変であるが、 $dV_G^{O_2-f}$ は dN に依存し、 dN は流速(流量)と共に変化するから dV も又流速と共に変化する。しかるに(B)では流速によつて気泡の数(又は容積)が変化するので界面積も変化する。1つの気泡内でのAの反応が個々に独立に起つているものとみなすことが出来る。ただし気泡が一度生成すると(A)のごとき気相に於ける酸素の流れがないので当初酸素圧が1気圧でも反応によつて逐次減少してゆき酸素圧零になるまで酸素は気泡内で全部消費される。すなわち気泡内の反応は(A)に於ける気相の酸素の出入りのない1つの独立系とみなしてよい。(A)では反応時間に無関係に近似的に dV は一定(ただし炭素濃度の変化により $V_G^{O_2}$ は時間と共に多少変化するが近似的に一定とみなした)になるが、(B)の場合には dV は単位時間について

$$dV = V_L - V_L^{O_2} \dots \dots \dots (7)$$

しかして dV は反応時間と共に減少し最後には $dV = 0$ となる。上式の V_L 、 $V_L^{O_2}$ は気泡内で V_G 、 $V_G^{O_2}$ に相当する容積を表わすものとする。

以上の関係から両者の関係を較べるために、今(B)を(A)の状態に持つて来た状態を考えてみる。(B)に於いて溶鋼の界面に於ける単位表面積に注目すると、単位表面積あたり溶鋼内に存在する酸素濃度は気泡の大きさを一定とすると気泡の数により定まる。ここで気泡を球と仮定して、その半径を r とするとその体積は

$$V_L = \frac{4}{3} \pi r^3 \dots \dots \dots (8)$$

又球の表面積は $S = 4\pi r^2 \dots\dots\dots (9)$

しかるときは 1 つの気泡中の酸素ガスのモル数は

$$n = \frac{P_{O_2}^L V_L}{RT_L} \dots\dots\dots (10)$$

ただし $P_{O_2}^L$ は熔鋼中気泡内の酸素圧, V_L は球の体積, T_L は熔鋼温度を表わすものとする, 従つて注目している単位表面積を a とすると, これに対応する熔鋼内酸素の全モル数は

$$\sum n = \frac{P_{O_2}^L}{ST_L} \sum V_L \dots\dots\dots (11)$$

又気相の単位容積を V_G とし a に対応する高さを l で表わすと気相の酸素圧 $p_{O_2}^G$ は

$$p_{O_2}^G = \frac{NRT_G}{V_G} \dots\dots\dots (12)$$

初めの V_G 中の酸素圧を零とみなし熔鋼内酸素の全モル数を気相の V_G 中に移すとすると, $\sum n = N$ と置くことが出来るので (11) 及び (12) 式から

$$p_{O_2}^G = \frac{P_{O_2}^L \sum V_L}{V_G} \dots\dots\dots (13)$$

又は $V_G = l \cdot a$ であるから

$$p_{O_2}^G = \frac{P_{O_2}^L \sum V_L}{l a} \dots\dots\dots (14)$$

すなわち (14) 式によれば $p_{O_2}^L$ 及び l が一定なときは $p_{O_2}^G$ は単位面積あたりの熔鋼内気泡の全容積, $\sum V_L / a$ (あるいは気泡の球の体積を一定とすると気泡の数) によつて定まる. (A) の場合と異り孤立系とみなすと流量によつて (14) 式の $p_{O_2}^G$ はいくらでも変化する値をとり従つて (4) 式より知られるごとく単位面積あたりの $V_G^{O_2}$ は流量と共に増大する. しかるに (A) では流量によつて $p_{O_2}^G$ は不変であり従つて $V_G^{O_2}$ は一定する. この関係を Fig. 3 に一例をとつて示す. 同一条件で酸素ガスを吹込んだ場合には Fig. 3 (a) に示すごとく炉の小なるもの程酸素の熔鋼内分布が均一に近くなり, 従つてこれに対応して単位面積に注目した場合の酸素分圧の変化 (高さ h で示した) が少くなる. しかるに (b) に示すごとく炉が大きくなると, ガス吹込部を離れた部分程吹込酸素の熔鋼内分布が稀薄になる. これは表面積を一定としたときの単位面積あたりの酸素分圧が吹込部を離れた部分程低くなることに対応するものである.

以上は (A) と比較するために (B) の場合の流量と酸素分圧との関係を単位面積を基準にとつて, すなわち (4) 式の a_1 を一定として求めたものであるが, 実際の熔鋼内に於ける反応は酸素圧, 表面積ともに一定では

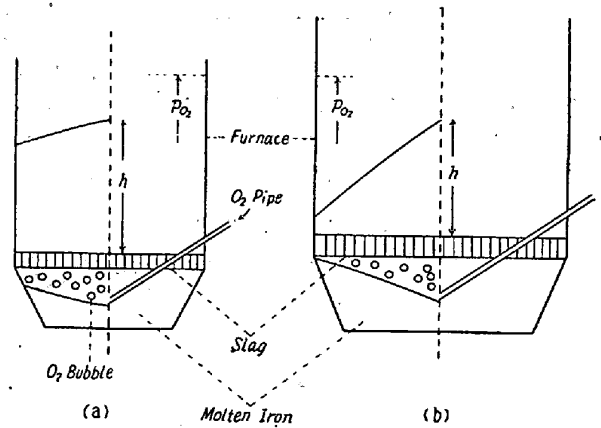


Fig. 3. Change of the oxygen concentrations per unit surface area of molten iron with the flow of oxygen gas.

ない. すなわち (A) では流量によつて (4) 式の表面積 a_1 は不変であり又 p_{O_2} も一定であるが, (B) では流量によつて a_1 が変化し又 p_{O_2} は反応時間と共に変化する. ガスの流量による表面積の変化は気泡の球の大きさを一定とみなすと (8) 及び (9) 式から

$$S = \beta V_L^{2/3} \quad (\beta, \text{恒数}) \dots\dots\dots (15)$$

従つて単位重量の試料中の気相と接する熔鋼の全表面積 $\sum S$ は $\sum V_L$ に比例する.

$$\sum S = a_2 \dots\dots\dots (16)$$

今 $\sum S = a_2$ とするとガス流量と $\sum V_L$ とは比例するから気相と接する熔鋼の全表面積は流量と共に大となり, $a_2 > a_1$ の状態になると (4) 式に明らかなように酸素圧一定のときは脱炭速度は増大する. このことは要するに酸素圧が一定のときには脱炭速度が気相と熔鋼の表面積に依存することであり表面積は炉の大きさ, 従つて使用 t 数に対応した酸素流量によつて異つた値を取り得ることを意味するものである.

著者等の場合には表面積一定の条件で酸素圧 2/5 気圧以上のところでは約 0.2% C 以下で脱炭速度は酸素圧 1/5 気圧のときとほぼ同一となる. これは炭素濃度が約 1% C 以下で酸素圧 2/5 気圧以上のときに脱炭速度が一定値になることと同様の意味を持つものであり, これらの点で脱炭反応に与る酸素は炭素に対して飽和するものと考えられる. 現場に於いては上述の例に示したように流量によつて表面積が変化し又酸素圧も一定でないので著者等の条件と異なるものであるが約 0.2~0.1% C 位から脱炭効率が著しい減少を示している⁷⁾.

上に示した諸点よりみると現場の酸素吹込作業は酸素ガスの流量によつて表面積を増大せしめること及び挿入した酸素の殆んど大部分を脱炭反応に利用し得ることに

特に重要な意義があるのであつて酸素圧は挿入時には 1 気圧であつても反応の進行と共に必然的に減少してゆくような過程をとるものである。

気相中に窒素が共存するときには脱炭速度は酸素圧のみに依存し窒素は直接には反応に影響を及ぼさないが、熔鋼中に溶解する窒素量は可成り著しくなる。

以上の考察から現場の酸素吹精作業に対して推奨されることは熔鋼の使用 t 数、表面積及び深さに相応した酸素吹込方法を考慮することである。すなわち

i) 同一使用 t 数のものでは出来る丈熔鋼の深さを小とし表面積を大にする。

ii) 酸素吹込パイプを他の事情の許す限り小となし、且つその数を増加せしめ、その位置を熔鋼内に出来る限り平均に分布せしめると共にパイプを揺動するごとくする。

iii) 気相と熔鋼との界面積を出来る丈大きくするように炉の構造を考慮して酸素流量を調節する。

iv) 熔鋼中炭素と酸素両成分の活動濃度係数を表わす f なる値は前述のごとき諸条件が満足されているときは炭素濃度の低下と共に増大する。特に 1% C 以下でこの傾向は著しいので、酸素吹込の開始は炭素濃度の低い範囲で行つた方が有効である。

v) 脱炭反応は界面で起り易いので熔鋼中炭素の界面への拡散を促進させるような物理的操作が望ましい。

vi) 界面積が一定で、しかもガス流速の影響を考慮する必要のないような反応系では脱炭速度は酸素圧に依存する。しかして炭素濃度約 1% C 以下では酸素分圧約 2/5 気圧以上で脱炭反応に与る酸素は炭素に対して飽和するから、これ以上の酸素分圧にする必要はない。しかるに現場の酸素吹精に於いてはガス流速によつて界面積が変化すると共に挿入した酸素の大部分が脱炭反応に消費され、反応の進行と共に酸素分圧が減少してゆくような過程をとるものであるから吹込酸素の圧力はむしろ 1 気圧とした方が効果的である。

IV. 結 言

酸素吹精による脱炭速度を著者等の結果と比較しその

主たる相異点を示して現場に於ける酸素製鋼に必要な諸条件を指摘した。

酸素ガスによる脱炭反応は界面反応であるから、脱炭速度は試料の重量、界面積、炭素濃度及び酸素圧によつて支配される。現場に於いてはこの中で特に使用 t 数に対する酸素流量と界面積との関係に留意すべきである。

現場値の脱炭速度が一般に低く且つ条件によつて可成りの差異が認められる原因が主として熔鋼の使用 t 数に対する有効酸素量の不足にあること及び酸素の界面への拡散も考慮すべきことを指摘した。

以上の結果から現場の酸素吹精に対して考慮されるべき諸点に関し考察を行つた。

本研究に際し多大の御援助を受けた日本學術振興會第 19 委員会に深謝し、終始御懇篤なる御激励を賜つた前委員長侯國一博士に厚く御礼申上げる。

(昭和 29 年 10 月寄稿)

文 献

- 1) 勝藤, 丹羽: 鉄と鋼, **40** (1954) No. 10 熔融鉄炭素合金の脱炭反応に関する研究 (第 2, 3 報)
- 2) 丹羽, 勝藤: 日本金属学会誌, **17** (1953) 271
- 3) *E. B. Hughes, F. G. Norris: T.A.I.M.E., 173* (1948) 52
市田: “鉄と鋼”, **35** (1949) 1
高橋: 同 上 **39** (1953) 97
石原, 安藤, 田坂: 同上 **40** (1954) 211
月本, 服部: 同 上 **40** (1954) 213
- 4) 市田: 同 上, **35** (1949) 1
月本, 服部: 同 上 **40** (1954) 213
- 5) *H. Larson, J. Chipman: J. of Metals 5* (1953) 1089
- 6) *E. B. Hughes: Blast F'ce and Steel P1. 35* (1947) 677
- 7) *Linde Air Product Co.: Blast F'ce and Steel P1. 35* (1947) 949
石原, 安藤, 田坂: “鉄と鋼”, **40** (1954) 211