

# アルミナ介在物の除去速度におよぼすArバブリングの効果

金 正湜\*・川上 正博\*<sup>2</sup>・谷田 幸司\*<sup>3</sup>

Effect of Ar Bubbling on Removal Rate of Alumina Inclusion in Al Deoxidized Steel

Jeong-Sik KIM, Masahiro KAWAKAMI and Kouji TANIDA

**Synopsis :** Effect of Ar bubbling on the deoxidation rate of molten steel with Al has been investigated in 20 kg scale induction furnace. The results are summarized as :

- (1) The deoxidation was completed within 5 to 15 min depending on experimental conditions. The final total oxygen content was 30 to 45 ppm.
- (2) The deoxidation model has been proposed in which deoxidation rate should be determined by the balance of removal and reentrainment rates of alumina inclusion.
- (3) The removal rate constant was obtained at each condition. The apparent activation energy was obtained as 284, 355, 368 kJ/mol, respectively with Ar flow rate of 0, 5, 10 l(STP)/min.
- (4) The removal rate constant was expressed as a function of total stirring energy density for induction stirring ( $\epsilon_{ind}$ ) and Ar gas stirring ( $\epsilon_{B/B}$ ), namely,  $k = k_1(\epsilon_{ind} + \epsilon_{B/B})^n$ . The value of  $n$  was obtained as 0.50 to 0.65.
- (5) The contribution of entrapment of inclusion in bubbles was estimated quantitatively. The transfer coefficient of inclusion migration to bubble was also estimated.

**Key words :** aluminum deoxidation of steel ; removal rate constant of inclusion ; Ar gas stirring ; stirring energy density ; inclusion entrapment in bubbles ; transfer coefficient of inclusion migration.

## 1. 緒言

近年、溶鋼の脱酸はAl脱酸が主流であるが<sup>1</sup>、鋼の清浄化や連铸ノズル詰まり防止の観点から、脱酸後の生成物をいかに除去するかが、重要な課題となっている<sup>1)</sup>。

この問題については基礎的研究、実機テスト等既にいくつかの報告がある<sup>2)~16)</sup>。その中で、脱酸速度に及ぼす攪拌効果に着目すると、理論解析とその実機への適用を試みたEngl and Linskog<sup>7)</sup>、誘導攪拌の効果を検討した川和ら<sup>23)</sup>および草川ら<sup>9)</sup>の報告、噴流攪拌の効果を検討した藤井ら<sup>9)</sup>の実機報告、ASEA-SKF攪拌の効果を検討したSandbergら<sup>6)</sup>、江本ら<sup>8)</sup>の報告、タンディッシュにおいてガス吹込みによる介在物浮上促進をねらった中島と川崎<sup>12)</sup>、佐伯ら<sup>13)</sup>、半明ら<sup>14)</sup>の報告、ガス攪拌とASEA-SKF攪拌の効果を比較した大西ら<sup>10)</sup>および小川ら<sup>15)</sup>の実機テストの報告、更に、加減圧精錬法とガス攪拌の効果を比較した伊吹らの報告<sup>16)</sup>がある。しかし、脱酸速度に及ぼす攪拌効果および攪拌方法の差異について統一の見解は得られていない。また、Al脱酸した溶鋼中で懸濁している介在物のArバブリングによる除去促進については意見が分かれている。

一方、水中に懸濁した粒子の気泡による付着浮上分離除

去速度に関する基礎研究は従来、数多く報告されている<sup>17)~20)</sup>。この中で、潘偉ら<sup>20)</sup>は水モデルを通して気泡と粒子との衝突挙動を直接観察することにより気泡への粒子の付着過程における気泡の表面抵抗および気泡への液体中粒子の物質移動速度を定量的に検討した。高温の熔融金属中の懸濁物の除去に関してはHirasawaら<sup>21)</sup>および奥村ら<sup>22)</sup>の溶鋼を用いたAr気泡による介在物の付着除去実験の報告があるのみである。

そこで、本研究では小型高周波誘導溶解炉内の溶鋼にArを吹込みながらAl脱酸を行い、アルミナ介在物の浮上速度に及ぼすガス攪拌の効果を明らかにし、そのうちの気泡による捕捉効果の寄与を明らかにすることを試みた。

## 2. 実験方法

### 2・1 実験装置

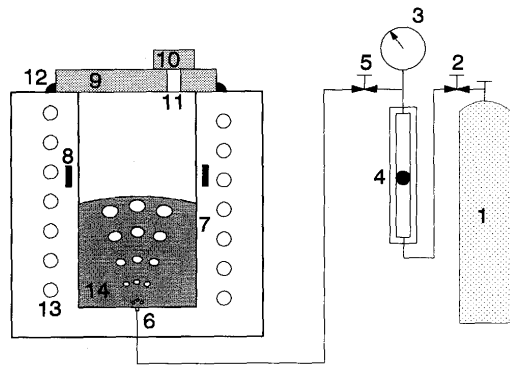
実験装置の概略図をFig. 1に示す。炉体として高周波誘導炉(30kW, 3kHz)を用い、坩堝底部中央にはAr吹込み用ノズル(内径1.5mmムライト製)を取り付けた。坩堝は内径150mmφ、深さ350mmにマグネシアをスタンプして作った。なお、実験に用いた溶鋼は市販の炭素鋼であり、その

平成6年9月5日受付 平成6年12月2日受理 (Received on Sep. 5, 1994; Accepted on Dec. 2, 1994)

\* 豊橋技術科学大学大学院生 (現: POSCO東京研究所) (Graduate Student, Toyohashi University of Technology, now Tokyo Research Laboratories Pohang Iron & Steel Co. LTD.)

\* 2 豊橋技術科学大学 (Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibi-rigaoka Tempaku-cho Toyohashi 441)

\* 3 豊橋技術科学大学大学院生 (現: 大同特殊鋼(株)) (Graduate Student, Toyohashi University of Technology, now Daido Steel Co., Ltd.)



- 1. Argon gas cylinder
- 2. Regulator valve
- 3. Pressure gauge
- 4. Float meter
- 5. Control valve
- 6. Blowing nozzle
- 7. MgO lining
- 8. Graphite ring
- 9. Refractory brick
- 10. Protection lid
- 11. Sampling hole
- 12. Alumina powder
- 13. Induction coil
- 14. Melts

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Chemical composition of used steel (S25C).  
(unit:mass%)

C	Si	Mn	P	S	sol.Al	tot.Al	Ni
0.25	0.19	0.47	0.024	0.006	0.014	0.019	0.01

組成をTable 1に示す。

### 2・2 実験操作

鋼材20kgを坩堝に入れ、底からArを2~3l(STP)・min<sup>-1</sup>吹込みながら溶解した。溶解後約30min保持して所定の浴温、所定の初期酸素濃度に調整した。初期酸素の調整は適宜酸化鉄粉末の添加により行ったが、生成したスラグあるいはアルミナはほぼ完全に除去した。また、大気による再酸化の影響を極力防ぐため炉上部に耐火煉瓦の蓋を取り付け、蓋と炉体の隙間をアルミナ粉末で埋めた。蓋にはサンプリングと測温のために直径25mmの穴を開け、実験中は耐火煉瓦を置いている。Ar(純度99.99%)は市販のものを無処理で用いた。

浴温はPt/Pt-13%Rh熱電対を用いて測定し、ガス流量を所定の流量に調整後、Al添加の直前に初期溶鋼サンプルを採取した。その後、上部蓋の穴から60g(試料重量比0.3%に相当)のAl棒を浴中に浸漬した。Al添加後、0.5~10min間隔でサンプリングを30min間行った。サンプルは内径3.5mmの石英管を用いて吸引採取し、水中に急冷した。

採取した溶鋼試料中の全酸素および窒素の分析は不活性ガス溶融法により行った。sol.Alの分析は酸溶解-原子吸光法により行った。

実験条件として、浴温は1550, 1600, 1650°Cとし、吹込みアルゴン流量は0, 5, 10l(STP)・min<sup>-1</sup>とした。

### 3. 実験結果

Fig. 2に各浴温における溶鋼中の全酸素(以下T.[O]で示す)の経時変化をガス流量をパラメータとして示す。初

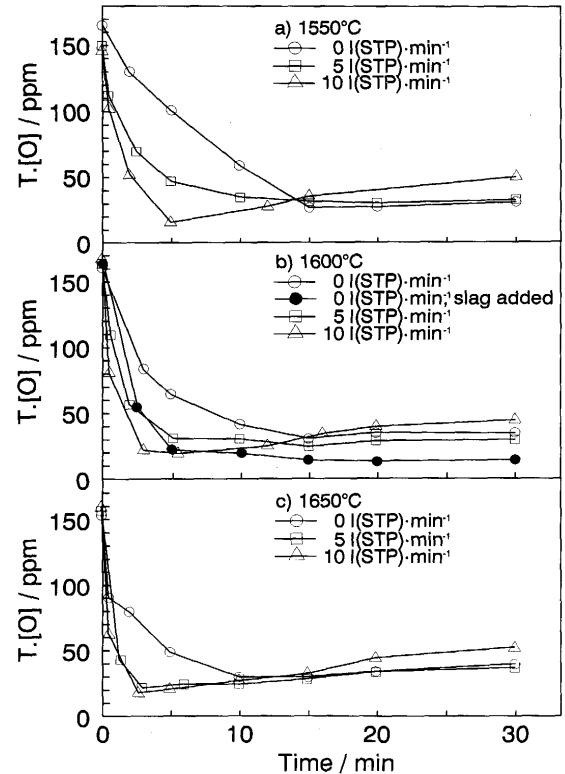


Fig. 2. Variation of T.[O] with time at different Ar flow rate at each melt temperature.

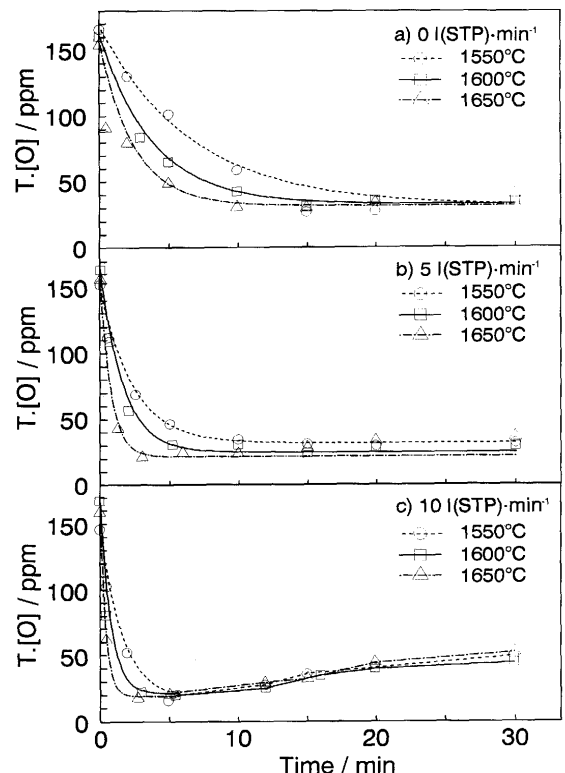


Fig. 3. Variation of T.[O] with time at different melt temperature in each Ar flow rate.

期T. [O] は150~170ppmであり、T. [O] はAl脱酸直後は急速に減少した。ガス吹込み無しの場合は10~15minで、5 l(STP)・min<sup>-1</sup>の場合は5分以内で、T. [O] は最小となり、以後30ppmでほぼ一定となった。ガス流量が10 l(STP)・min<sup>-1</sup>の場合には5分以内でT. [O] は最小値を示すが、以後徐々に約45ppmまで増加した。各浴温ともに、ガス攪拌の強化に従い、脱酸速度は早くなり、最小のT. [O]も小さくなった。

Fig. 3に各ガス流量における、T. [O]の経時変化を浴温をパラメーターとして示す。図中の曲線の前半部分は後に示す速度式による計算曲線である。この図より、いずれのガス流量においても、脱酸速度は浴温の増加にともない大きくなった。また、最小値に到達以後のT. [O]の値は一致しており再現性がよかった。Fig. 2, Fig. 3より、脱酸速度に及ぼす効果は浴温に比べてガス攪拌の効果が大きかった。

## 4. 考察

### 4.1 本実験における脱酸過程の考え方

本実験における脱酸過程の概念は以下の通りである。脱酸により生成した介在物は密度差による浮上、あるいは気泡による捕捉浮上で浴表面に到達する。本実験の大部分ではトップスラグを置いてないので浮上分離した介在物は最終的に浴面上の壁の付近に堆積するか、壁に付着する。したがって、この脱酸では広い意味でwall deoxidationのみが起こっている。しかし、一旦付着した介在物の一部は激しい流動により剥ぎ取られて鋼浴に戻る。実際に、実験終了後坩堝壁の溶鋼表面の位置にアルミナの付着が見られた。また、EPMAによる観察分析によれば、溶鋼中の介在物は平均径2~3μmの球形または多角形のアルミナであった。

ガス吹込み無しとガス流量5 l(STP)・min<sup>-1</sup>の場合はT. [O] は時間経過とともに最小値まで到達した後、30ppmでほぼ一定値となった。しかし、30ppmという値は平衡計算から得られる溶存酸素値の2~4 ppm<sup>23)</sup>と比べ桁大きい。また、ガス流量10 l(STP)・min<sup>-1</sup>の場合では、一旦T. [O] が最小となった後、再び増加した。これには

- ① 空気の巻き込みによる再酸化
- ② 吹き込んだAr中の不純物酸素による酸化
- ③ 耐火物中の酸化物のsol. Alによる還元
- ④ 浮上したアルミナ介在物の再巻き込み

などの溶鋼の酸素吸収過程を考えなければならない。

上記の①に対しては、実験中のT. [O]に影響を与えらると思われるsol. AlおよびT. [N]について検討してみた。Fig. 4に本実験の1600°C, 10Nl・min<sup>-1</sup>条件での典型的なsol. AlおよびT. [N]の経時変化を示す。sol. Alは、Al添加後約2min間で0.30mass%から0.245mass%まで減少するが、その以降はほぼ一定値となった。また、T. [N]はむしろ減少するので、空気による再酸化は考えられない。②に対するT. [O]

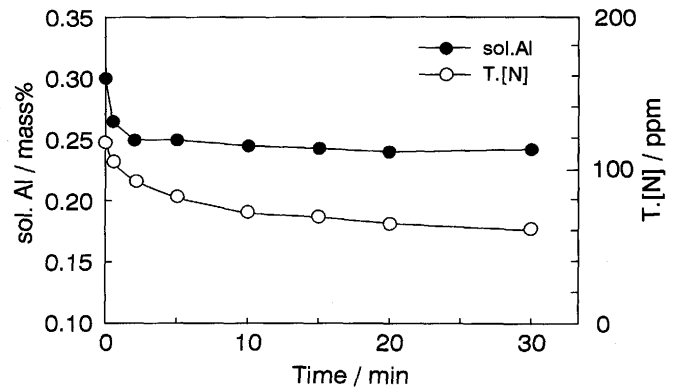


Fig. 4. Typical variation of sol. Al and T. [N] in steel with time under the condition of  $Q_{Ar} = 10 \text{ l(STP)} \cdot \text{min}^{-1}$ , 1600°C.

の上昇分は実験中の吹込んだArガス中の不純物の酸素量が全部入っても0.02ppmに過ぎない。③の影響は脱酸直後短い時間以内ではかなり大きいことも考えられるが(事実、Fig. 4に示すsol. Alのロス量はT. [O]の減少量に対応する量より多く、約370ppm分のsol. Alは酸化物の還元に使われていた)、最小値に到達後は殆どなくなると考えられる。上記のような脱酸過程の概念を考えると、結局、溶鋼の酸素吸収過程としては④の過程の寄与が大部分であると考えられる。横山と大井<sup>4)</sup>は脱酸生成物と坩堝材質の関係を調べ、マグネシア坩堝を用いたAl脱酸では、到達T. [O]は35ppm以下には下がらないことを示し、これはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とMgOが化合物を作りにくく、この2元系は1600°Cでは固相のみであり、アルミナが坩堝に付着しにくいと説明している。Fig. 2 b)には、表面にCaO-CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (55:22:23) スラグを置いた実験結果を示したが、脱酸速度は大きく、到達T. [O]も10ppmまでさがっている。このことからスラグなしの実験では、脱酸は上記概念のように進行しており、④の過程が無視できないことがわかる。ただし、ガス流量10 l(STP)・min<sup>-1</sup>の場合に、時間の経過と共に再巻き込み速度が増加する理由は不明である。

### 4.2 速度式の導出

上記の考え方により、脱酸速度は浮上速度と再巻き込み速度の差で与えられる。浮上速度はT. [O]<sub>t</sub>に比例し、再巻き込み速度は一旦溶鋼外へ出た酸素量、すなわちT. [O]<sub>1</sub> - T. [O]<sub>t</sub>に比例すると考えられるので、各々の速度は、

$$\text{浮上速度} = k \cdot T. [O]_t \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{再巻き込み速度} = k' \cdot (T. [O]_1 - T. [O]_t) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、kは浮上速度定数、k'は再巻き込み過程の速度定数、T. [O]<sub>t</sub>およびT. [O]<sub>1</sub>は時間tおよび初期のT. [O]である。脱酸速度=浮上速度-再巻き込み速度より、

$$-\frac{dT. [O]_t}{dt} = (k + k') \cdot T. [O]_t - k' \cdot T. [O]_1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

一方、T. [O]が最小の時点あるいは定常状態では脱酸速度=0となり、T. [O]<sub>t</sub>=T. [O]<sub>m</sub>(T. [O]の最小値)となる。

これより、kとk'の間の関係は、

$$k' = \frac{T \cdot [O]_m}{T \cdot [O]_i - T \cdot [O]_m} \cdot k = \alpha k \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\alpha = \frac{T \cdot [O]_m}{T \cdot [O]_i - T \cdot [O]_m}$

(3)式に(4)式を入れて整理し、積分すると、

$$\ln \frac{T \cdot [O]_i - T \cdot [O]_m}{T \cdot [O]_i - T \cdot [O]_m} = -(1 + \alpha) \cdot k \cdot t \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より求められたkの値の大小により溶鋼中の介在物浮上速度を定量的に評価した。

4.3 浮上速度定数

Fig. 5はFig. 2のデータを用い、各流量および各浴温での(5)式の左辺と時間tとの関係をプロットしたものである。この図より、いずれの実験条件においてもほぼ直線関係が得られた。Table 2に各条件における浮上速度係数、kを示す。これより、一定の吹込みガス流量では浴温が高くなるほど、また一定の浴温ではガス流量が増えるほどk値は大きいことがわかる。なお、 $\alpha$ は0.12~0.27の範囲にあった。このkの値を用いた計算曲線がFig. 3中の、T.[O]が最小値となるまでの部分の曲線である。実験値と計算曲線はよく一

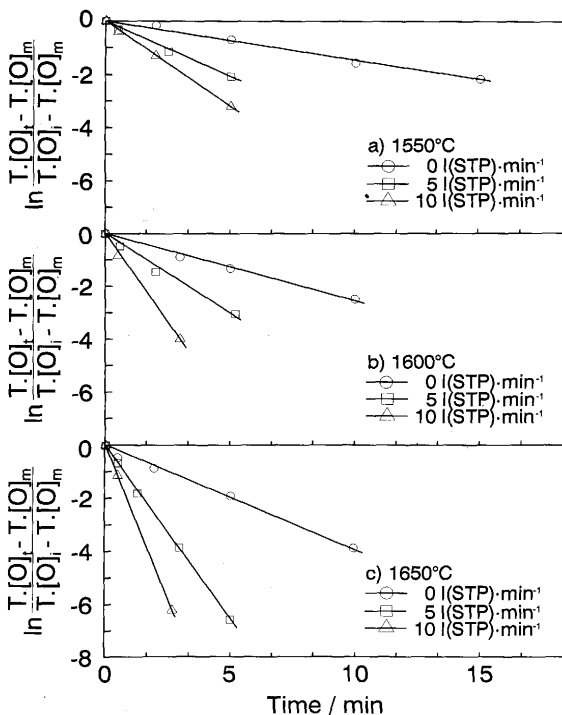


Fig. 5. Plot of the data according to Eq. (5).

Table 2. The k values calculated from equation (5). (unit: min⁻¹)

Temp. (°C)	1550	1600	1650
Q <sub>Ar</sub> (l (STP) · min⁻¹)			
0	0.120	0.206	0.318
5	0.332	0.514	1.126
10	0.557	1.184	2.308

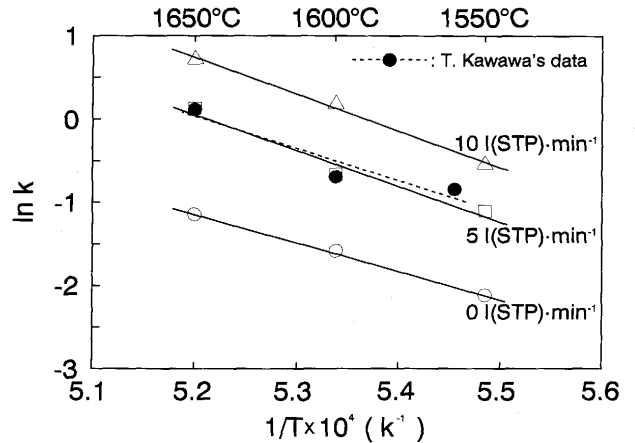


Fig. 6. Relation between ln k and 1/T in each Ar flow rate.

致している。

Fig. 6に得られた浮上速度定数kのアレニウスプロットを示す。最小二乗法を用いた回帰分析により、各流量における見かけの活性化エネルギーを求めたところ、0, 5, 10 l(STP) · min⁻¹に対しそれぞれ284.4, 355.1, 368.3 kJ · mol⁻¹であった。図中の点線は川和ら<sup>3)</sup>の結果を示す。彼らは、高周波誘導炉を用い、内径85mmのマグネシア坩堝で5 kgの鋼を溶解し、Ar雰囲気下で0.3%のAlを添加し、脱酸実験を行った。なお、ガス攪拌は行っていない。その結果より見かけの活性化エネルギーを計算したところ、322.5 kJ · mol⁻¹という値が得られた。彼らの結果を本実験のガスを吹込まない場合の結果と比較すると、見かけの活性化エネルギーはほぼ一致している。しかし、kの絶対値は約3倍大きな値となっている。彼らの実験では使った坩堝内径が本実験の約1/2であり、浴・坩堝界面積、および浴比表面積が大きいことが両者の差異の理由と考えられる。

4.4 浮上速度定数と攪拌動力との関係

本実験における攪拌動力はArバブリングによる $\epsilon_{B/B}$ と誘導攪拌による $\epsilon_{ind}$ を合わせたものと考えられる。各々の攪拌動力の計算は文献<sup>24)</sup>によった。

厳密にはこの二つの攪拌動力は独立ではないが、本実験における攪拌動力は $\epsilon_{B/B}$ と $\epsilon_{ind}$ の和、 $\epsilon = \epsilon_{B/B} + \epsilon_{ind}$ で与えられるものとする。Fig. 7は本実験で得られた浮上速度定数、kと $\epsilon$ の関係を示したものである。図よりkは攪拌動力の増加と共に大きくなり、その傾向は浴温が高いほど大きくなる事が分かる。

従来、脱酸速度定数の攪拌動力依存性については $k = k_1 \epsilon^n + k_2$ とするSandbergら<sup>6)</sup>および江本ら<sup>8)</sup>のものとして $k = k_1 \epsilon^n$ とする藤井ら<sup>9)</sup>および中島、川崎<sup>11)</sup>のものが報告されている。いずれも定数項や指数項は実験的に決められているが、ここではより汎用的にデータ比較の容易な後者の式を用いてデータの整理をやり直してみた。特に指数項に着目すると、ASEA-SKFプロセスであるSandbergら<sup>6)</sup>(30t)、江本ら<sup>8)</sup>(100t)、および大西ら<sup>10)</sup>(65t)ではそれぞれ0.58, 0.73, お

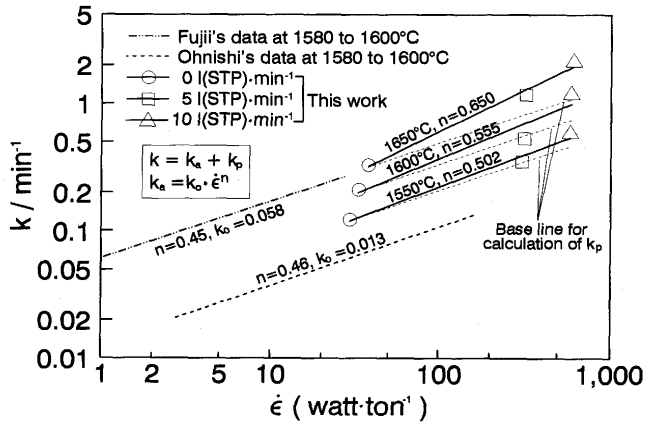


Fig. 7. Relation between rate constant  $k$  and stirring energy,  $\epsilon$ .

および0.95、藤井ら<sup>9)</sup>の噴流式攪拌装置(100t)で0.45、中島、川崎<sup>11)</sup>のタンディッシュ(100t)内の次元解析と水モデル実験で0.33、ガス攪拌である大西ら<sup>10)</sup>(85t)、伊吹ら<sup>16)</sup>(1.5kg~50t)および奥村ら<sup>22)</sup>(ただし、溶銅からのシリカ除去に関する小型実験(0.2~1.5kg))で、それぞれ0.46, 0.46, 0.55~0.76である。これらのデータはプロセスもヒートサイズも異なるので、直接に比較は難しいが、本実験結果は0.50~0.65であり、ほぼ奥村ら<sup>22)</sup>の結果の範囲以内に入っている。

#### 4.5 気泡への捕捉効果の分離

ガス吹込みによる $k$ の増大効果には、

- ① 攪拌の動力の増加に伴う凝集肥大促進( $k_a$ )
- ② 気泡への介在物の捕捉( $k_p$ )

の二つが同時に働いていることを考えなければならない。すなわち、 $k = k_a + k_p$ である。②を求めるためには、何らかの方法で①の効果を見積り、差し引かなければならない。ガス吹込み以外のプロセスにおける脱酸速度におよぼす攪拌効果は複雑である。ASEA-SKFプロセスでは、溶銅は取鍋内を大きく循環する中心軸に非対称流れを形成し、流れの方向によって脱酸速度定数が異なっている<sup>8)10)</sup>。奥村ら<sup>25)</sup>は溶銅からのシリカ除去に関する小型実験(0.2kg)で攪拌棒を同心円状に回転させて機械攪拌を与えた場合、脱酸は促進されるが、攪拌動力に対する明確な依存性はないとしている。藤井ら<sup>9)</sup>の噴流攪拌の場合、溶銅の流れは中心から沸き上がって取鍋壁に沿って下降するものとその逆の流れが交互に起こっている。本実験では、溶銅の流れは中心軸対称であり、表面付近では中心から沸き上がって取鍋壁に沿って下降すると考えられるので噴流攪拌の場合に近い。

したがって、本実験における①の効果の見積りには、仮に藤井らの指数の0.45を用いることとする。すなわち、

$$k_a = k_0 \cdot \epsilon^{0.45} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、ガスを吹込まなかった場合、 $k = k_a$ であるから、その時の $\epsilon$ の値を用いて $k_0$ を決める。これを用い、ガス吹込み時の $k_a$ は(6)式で見積もった。その結果をTable 3に示す。各実験条件での得られた $k_p$ の値は0.044~0.801min<sup>-1</sup>である。

この表より $k_p$ は浴温およびガス流量の増加と共に大きくなるのが分かる。

これらの値をアレニウスプロットし、最小二乗法により見かけの活性化エネルギーを求めたところ、5, 10 l(STP)·min<sup>-1</sup>に対しそれぞれ635, 671 kJ·mol<sup>-1</sup>を得た。見かけの活性化エネルギーはガス流量によらずほぼ同じであった。

#### 4.6 介在物粒子の気泡への物質移動速度式の適用

潘偉ら<sup>20)</sup>は水モデル実験により気泡への懸濁粒子の捕捉過程について定量的検討を行っている。その取り扱いを本実験結果に適用すると、

$$\ln \frac{C_{p,t}}{C_{p,i}} = -k_{p,p} \cdot A \cdot C_b \cdot t \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $C_{p,t}$ (個·cm<sup>-3</sup>)、 $C_{p,i}$ (個·cm<sup>-3</sup>)は時間 $t$ および初期の溶銅中介在物粒子の濃度、 $k_{p,p}$ (cm·sec<sup>-1</sup>)は粒子の物質移動速度係数であり、 $A$ (cm<sup>2</sup>·個<sup>-1</sup>)は気泡1個の平均表面積、 $C_b$ (個·cm<sup>-3</sup>)は溶銅単位体積当たりの気泡数である。

一方、上記で求めた捕捉速度定数 $k_p$ を用いて、捕捉速度式を書けば、

$$\ln \frac{T \cdot [O]_t}{T \cdot [O]_i} = -k_p t \quad \dots \dots \dots (8)$$

介在物粒径分布は初期の1 minを除き極端には変わらなかったため、 $T \cdot [O]$ と $C_p$ は比例するものと仮定する。すると、(10)、(11)式の左辺の値は一致するので、両式を比較すると、

$$k_p = k_{p,p} A C_b \quad \text{または} \quad k_{p,p} = \frac{k_p}{A C_b} \quad \dots \dots \dots (9)$$

(9)式中の $A$ と $C_b$ は以下のように求めた。

佐野ら<sup>26)</sup>は気泡分散層内の気泡平均径 $d_b$ を

$$d_b = 0.091 \left( \frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{0.3} V_s^{0.44} \quad \dots \dots \dots (10)$$

で与えている。ここに、 $\sigma$ は溶銅の表面張力、 $\rho_1$ は溶銅の密度、 $V_s$ は鋼浴温度に換算したガス流量を坩堝断面積で割った空塔速度である。これを用い、 $A$ は $A = \pi d_b^2$ で与えられる。

鋼浴中に存在する気泡の数は鋼浴中に滞留しているガスの体積を一個の気泡体積で割れば求められる。さらに、それを鋼浴体積で割れば $C_b$ が求まる。すなわち、

$$C_b = \frac{6 V_g \tau}{\pi d_b^3 V_1} \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $V_g$ は鋼浴温度に換算したガス流量、 $V_1$ は鋼浴体積、 $\tau$ は気泡の滞留時間である。 $\tau$ は $\frac{H}{U_b}$ で定義できる。ここで、 $H$ は溶鋼のみの高さ(cm)、 $U_b$ は平均気泡上昇速度(cm)である。なお、 $U_b$ に対して、井口ら<sup>27)</sup>は、川上ら<sup>28)</sup>やCASTILLEJOSら<sup>29)</sup>の測定値と比較的よく一致する次式を導いており、本研究ではこの式を用いた。

$$U_b = 1.76 \cdot (V_g \cdot g^2)^{1/5} \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 $g$ は重力加速度(g·sec<sup>-2</sup>)である。

上記より得られた $A$ と $C_b$ を用い、Table 3に示す $k_p$ より $k_{p,p}$ を求めて、Table 4に示す。

Table 3. The entrapment rate constant,  $k_p$ .  
(unit: min<sup>-1</sup>)

Temp. (°C)	1550	1600	1650
$Q_{Ar}(l(STP) \cdot min^{-1})$			
5	0.044	0.141	0.435
10	0.075	0.250	0.801

Table 4. The  $k_{p,p}$  values calculated from equation (9).  
(unit: cm·sec<sup>-1</sup>)

Temp. (°C)	1550	1600	1650
$Q_{Ar}(l(STP) \cdot min^{-1})$			
5	0.009	0.029	0.089
10	0.013	0.041	0.128

#### 4・7 $k_{p,p}$ の無次元相関関係式の比較

潘偉ら<sup>20)</sup>は上記の物質移動速度係数 $k_{p,p}$ を粒子径/気泡径, 粒子密度/液体密度および気泡上昇速度の関数として次式のような整理を行った。

$$k_{p,p} = 0.0121 + 0.125 \cdot r^* \cdot \rho^* \cdot U_b \dots \dots \dots (13)$$

ここに,  $r^* = r_p/r_b$ ,  $\rho^* = \rho_p/\rho_l$ ,  $r_b$ および $r_p$ は気泡および粒子の半径であり,  $\rho_l$ および $\rho_p$ は液体および粒子の密度である。本実験結果にこれを適用すると,  $r^*$ ,  $\rho^*$ および $U_b$ の値はそれぞれ $0.8 \sim 1.0 \times 10^{-4}$ ,  $0.5$ および $96 \sim 112 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ であるから, (13)式の右辺第2項はほとんど零であり,  $k_{p,p} = 0.0121$ で一定となる。Table 4の導出された値と比較すると,  $1550^\circ\text{C}$ の値はほぼ一致する。このことは, Levich<sup>20)</sup>が, 粒子径が非常に小さく, かつ衝突速度に対する粒子密度の影響が無視できる場合には液体中粒子は乱流拡散によって移動するとしていることに対応している。しかし, 高温になるほど導出された値は大きくなる傾向がある。これは $k_p$ を求める時の $\epsilon$ の指数 $n$ として温度によらずに $0.45$ の値を用いたためであると考えられる。(  $k_p$ の見かけの活性化エネルギーが極端に大きかったのもこのためである。) 事実, Fig. 7に示すように, 高温程 $n$ は大きな値である。したがって,  $n$ の温度変化を適当に与えれば, 導出された値を(13)式に合わせることは可能である。

### 5. 結論

高周波誘導炉を用い, Al脱酸溶鋼中の微細なアルミナ介在物の浮上除去に対するArバブリングと浴温の影響を調べ, 以下の結論を得た。

(1) T. [O]は5~15minまで急速に低下した後, 一定となるか緩やかに上昇した。30min後のT. [O]は30~45ppmであった。

(2) 本実験ではトップスラグを置かなかったため, 一旦浮上した介在物の再巻き込みが見られた。脱酸速度は浮上速度と再巻き込み速度の差として求められるものとして速

度式を導き, 浮上速度定数を求めた。その見かけの活性化エネルギーは各流量において,  $288.4, 355.1, 368.3 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ を得た。

(3) 浮上速度定数を誘導攪拌とガス攪拌のエネルギーを加えた総攪拌エネルギー $\epsilon$ を用い,  $k = k_1 \epsilon^n$ の形で整理した。 $n$ は温度とともに大きくなり,  $0.50 \sim 0.65$ であった。

(4) Ar気泡への介在物の捕捉の速度定数を分離して求め, この捕捉過程は水中の懸濁粒子の気泡への捕捉モデルで説明できた。

### 文 献

- 1) 内堀秀男: 高純度鋼, 第126・127回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1988), p.10
- 2) 川和高穂, 大久保益太: 鉄と鋼, **53** (1967), p.1569
- 3) 川和高穂, 大久保益太, 笹島保敏, 郡司好喜: 鉄と鋼, **51** (1965), p.777
- 4) 横山栄一, 大井 浩: 鉄と鋼, **55** (1969), p.454
- 5) 草川隆次, 吉田千里, 田村芳彦, 小野 創: 鉄と鋼, **59** (1973), p.395
- 6) H.Sandberg, T.A. Engh, J.Andersson and R.Olsson: Japan-Sweden Joint Sympto., (1971), p.87
- 7) T.A. Engh and N.Lindskog: Scand. J. Metall., **4** (1975), p.49
- 8) 江本寛治, 山本武美, 飯田義治, 大井 浩, 西岡武三郎: 鉄と鋼, **63** (1977), p.2043
- 9) 藤井徹也, 小口征男, 住田則夫, 江見俊彦, 石坂邦彦: 鉄と鋼, **68** (1982), p.1595
- 10) 大西稔泰, 高木 弥, 若杉 勇, 片桐行雄, 青木松秀, 松本 洋, 小川兼広: 鉄と鋼, **69** (1983), p.A53
- 11) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p.852
- 12) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p.860
- 13) 佐伯 毅, 椿原 治, 草野昭彦, 梅沢一誠, 鈴木功夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p.A207
- 14) 半明正之, 石川 勝, 小倉康嗣, 松村千史, 宮原 忍, 大久保豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p.A215
- 15) 小川兼広, 井上 健, 小山伸二, 福崎良雄, 川崎正蔵, 下津佐正貴: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1206
- 16) 伊吹一省, 桑野清吾, 沖本伸一, 河井良彦, 菊地良輝, 松野英寿: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1210
- 17) L.R.Flint and W.J.Howarth: Chem. Eng. Sci., **26** (1971), p.1155
- 18) David Reay and G.A.Ratcliff: Can. J. Chem. Eng., **51** (1973), p.178
- 19) David Reay and G.A.Ratcliff: Can. J. Chem. Eng., **53** (1975), p.481
- 20) 潘 偉, 植村健一郎, 小山伸二: 鉄と鋼, **78** (1992), p.1361
- 21) M.Hirasawa, K.Okumura, M.Sano and K.Mori: Proc. Sixth Int. Iron & Steel Con., Vol. 3 (1990), p.568
- 22) 奥村圭二, 伴 雅人, 平沢政廣, 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, **80** (1994), p.201
- 23) 製鋼反応の推奨平衡値, (日本学術振興会製鋼第19委員会編), (1984), p.38
- 24) 川崎正蔵: 攪拌を利用した最近の製鋼技術の動向, 第100・101回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1984), p.232
- 25) 奥村圭二, 平沢政廣, 佐野正道, 森 一美, 袴田成彦, 北澤 真: 鉄と鋼, **80** (1994), p.107
- 26) 佐野正道, 森 一美, 藤田康久: 鉄と鋼, **65** (1979), p.1140
- 27) 井口 学, 出本用司, 菅原直也, 森田善一郎: 鉄と鋼, **78** (1992), p.407
- 28) 川上正博, 細野 聡, 高橋一寿, 伊藤公允: 鉄と鋼, **78** (1992), p.407
- 29) A.H.Castillejos and J.K.Brimacombe: Metall. Trans. B, **20** (1989), p.595
- 30) V.G.Levich: Physicochemical hydrodynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1962), p.103