

RH真空脱ガス装置における 介在物除去機構

村井 剛*・松野 英寿*・櫻井 栄司*²・川嶋 一斗士*²

Separation Mechanism of Inclusion from Molten Steel during RH Treatment

Takeshi MURAI, Hidetoshi MATSUNO, Eiji SAKURAI and Hitoshi KAWASHIMA

Synopsis : Behavior of Al_2O_3 inclusion particles in molten steel was researched after deoxidation in RH degasser and ladle refining furnace (NK-AP).

Diameter distribution of inclusion particles was measured by photo scattering method. In result, it was observed that inclusion particles were almost Al_2O_3 spheres and logarithm of number of inclusion particles were directly proportional to diameter of inclusion particles in Al-killed molten steel.

It was observed that removal rate of bigger inclusion particles were faster than that of smaller inclusion particles, and particles under $3\mu m$ were hard to be removed.

Because it was cleared that inclusion particles weren't removed by floating of mono-particles, model considered turbulent coagulation of inclusion particles in stirring molten steel was constructed by Saffman-Turner model and mass balance of inclusion particles.

In result, behavior of inclusion particles in molten steel was explained in both of RH degasser and NK-AP by this model.

Key words : steelmaking ; inclusion particles ; RH degasser ; diameter distribution ; turbulent coagulation ; stirring energy dissipation rate.

1. 緒言

近年、鉄鋼材料の使用用途拡大やより苛酷な条件下で使用される材料の軽量化、薄肉化等が望まれており、それに伴う鋼の高清浄化の要求によりRH真空脱ガス装置(以下RHと略す)に代表される取鍋精錬における清浄性向上技術が¹必要とされている。溶鋼清浄性向上のための介在物除去機構に関しては従来からさまざまな検討が行われている。樋口ら²はRHでの数十 μm 前後の粒径の大きい介在物を対象としているが、 $10\mu m$ 以下の微小粒径の介在物については検討されていない。また、Nakanishiら³、Shirabeら³は取鍋精錬時の取鍋内の流動解析を行い、介在物の凝集体による除去機構の検討を行っているが、RHの真空槽内については検討されていない。そこで本研究では実機RHにおいて粒径が $10\mu m$ 以下の介在物挙動から微小介在物が凝集体する機構として、溶鋼攪拌場における介在物同士の乱流凝集を考慮したSaffmanら⁴のモデルを用いた介在物除去モデルを構築し、介在物除去機構の検討を行った。

2. 実験方法

2・1 実機における溶鋼清浄性測定方法

溶鋼環流型の精錬装置であるRHと取鍋攪拌型である取鍋精錬炉(以下NK-APと略す)において、処理中のアルミ脱酸後の溶鋼を取鍋内溶鋼湯面下方500mmのところからサンプラーによって適時採取し、T.[O]分析、介在物個数の測定を実施した。また、一部サンプルの介在物組成をSEMによって分析した。それぞれの操業条件をTable 1, 2に示す。なお、この時のガス流量は273K, $1.013 \times 10^5 Pa$ での値である。この時の溶鋼成分と処理終了後のスラグの組成をTable 3, 4に示す。

2・2 溶鋼清浄性評価方法

採取した溶鋼サンプルは以下の2種類の 방법으로分析した。

- 1) 燃焼法による化学分析でT.[O]測定
- 2) 酸溶解抽出光回折散乱法⁵⁾(Photo Scattering Method-以下PSMと略す)

サンプルを酸溶解し、抽出された介在物の個数を光回折

平成9年2月18日受付 平成9年5月30日受理 (Received on Feb. 18, 1997; Accepted on May 30, 1997)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

* 2 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corp.)

Table 1. RH operation.

Mass of steel	2.5×10^5 (kg)
Diameter of snorkel	0.6 (m)
Gas flow rate of circulation	3.33×10^{-2} (m ³ /s)
Pressure in vacuum vessel	$\leq 1.01 \times 10^3$ (Pa)

Table 2. NK-AP operation.

Mass of steel	2.5×10^5 (kg)
Gas flow rate from lance	0.01 (m ³ /s)
Depth of gas injection	2.7 (m)

Table 3. Component of steel in this study.

Steel component (mass%)				
C	Si	Mn	P	sol.Al
0.05~0.15	0.2~0.3	1.2~1.5	~0.01	0.01~0.04

Table 4. Component of slag in this study.

	Slag component (mass%)				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	T.Fe+MnO
RH	30~50	5~15	30~50	5~10	~5
NK-AP					~2

散乱法によって測定した。測定には約100gの溶鋼サンプルを用いた。

3. 実験結果

3・1 介在物の形態

Fig. 1にPSMによって観察された介在物の写真の一例を示すが、介在物はほぼ球形であった。

これら介在物のSEMによる組成分析の結果をFig. 2に示すが、介在物はほとんどがAl₂O₃であった。これは、Table 3に示した本調査における溶鋼組成からも妥当であると考えられる。

そこで、介在物が100%Al₂O₃であり、形状が球であると仮定して、PSMによる介在物個数から溶鋼中T.[O]を算出し、化学分析値と比較した結果、Fig. 3に示すようにAl₂O₃粒子が凝集体によりクラスター状になった⁶⁾ものがあるためと考えられる若干の誤差はあるものの、RH、NK-AP処理中どの時間においても良く一致しているといえる。

従って、RH、NK-AP処理中どの時間においても、介在物はほとんどがAl₂O₃粒子で、形状はほぼ球とみなすことができると考えられるので、以降はこの前提に沿って検討した。

3・2 介在物挙動

RH、NK-AP処理中でのT.[O]の経時変化をFig. 4に示す。

図からわかるように、脱酸直後にT.[O]は激減し、その後、

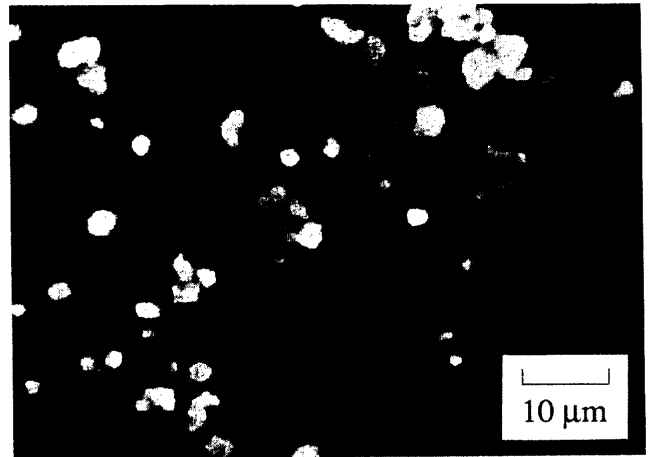


Fig. 1. Example of observed inclusions by PSM.

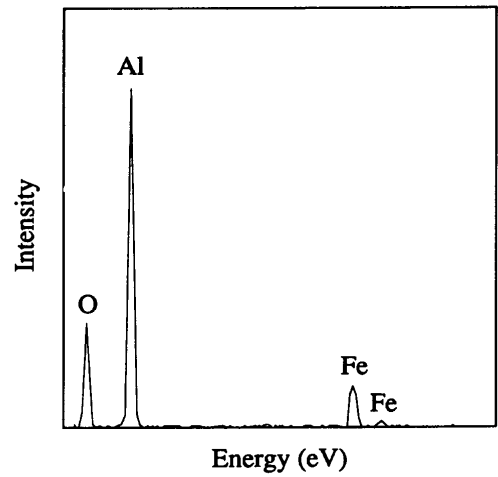


Fig. 2. Example of component in inclusion.

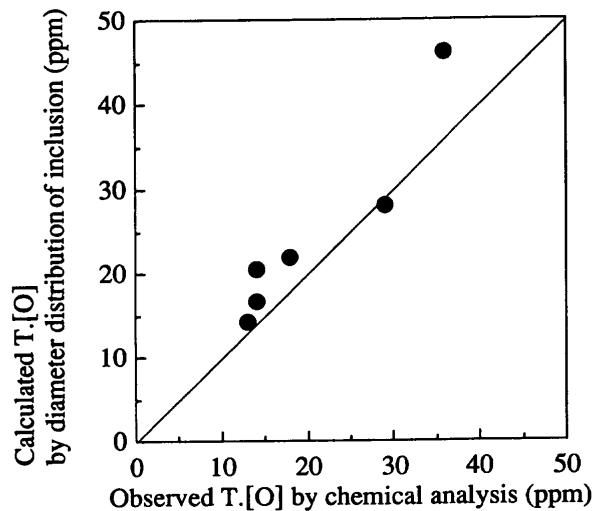


Fig. 3. Comparison of T.[O] by several methods.

徐々に減少量が少なくなっている。

また、PSMによる介在物個数分布から各粒径範囲の介在物が占めるT.[O]の時間変化のRHでの一例をFig. 5に示すが、時間とともに介在物は粒径の大きなものから減少して

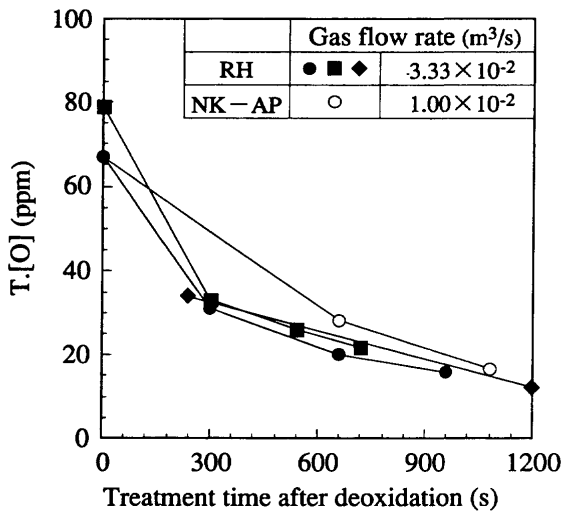


Fig. 4. Behavior of T.[O].

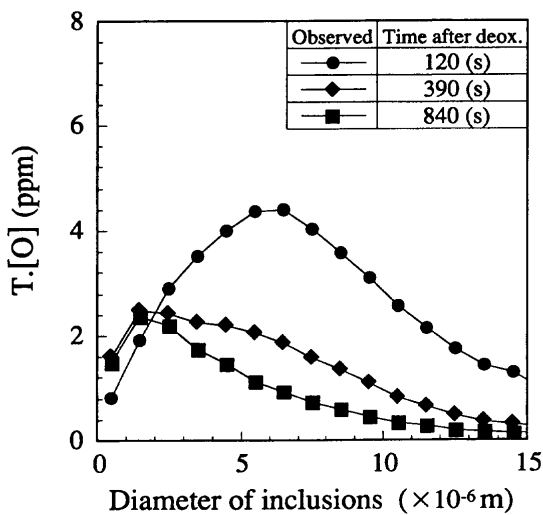


Fig. 5. Change of diameter distribution of inclusion in RH degasser.

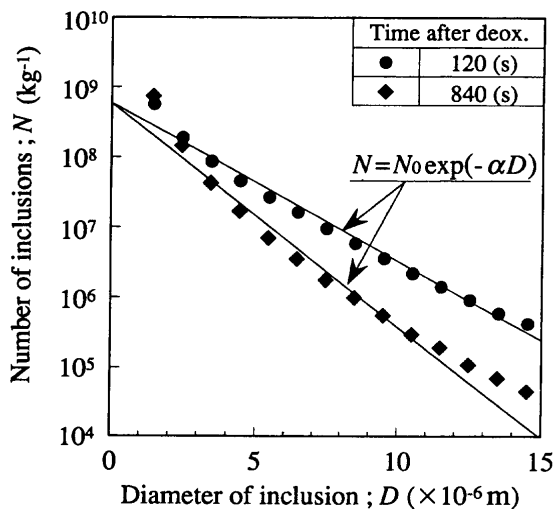


Fig. 6. Diameter distribution of inclusion in RH degasser.

いる。

Fig. 5 において、 $2 \mu\text{m}$ 以下の介在物量が若干増加しているのは取鍋スラグ及び空気からの再酸化、PSMでの分析誤差等が考えられるが、本論文においては考慮しないこととした。

3.3 介在物粒径分布

Fig. 6 にRH処理中のサンプルのPSMでの介在物粒径分布の一例を示すが、浅野ら⁷⁾が示した(1)式で良く整理された。

$$N = N_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot D) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D : 介在物粒径 (m)

N : 介在物個数 (1/kg)

N_0, α : 定数

4. 考察

4.1 一次速度式による脱酸挙動

従来、脱酸反応は(2)式に示す一次速度式で整理される⁸⁾といわれている。

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 \cdot C \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C : 溶鋼中T.[O] (ppm)

k_0 : 脱酸速度定数 (1/s)

Fig. 4でのT.[O]の経時変化を(2)式で近似し、Fig. 7に示すが、全ての時間範囲において精度良く整理するのは難しい。

4.2 浮上による介在物除去

取鍋内の微小介在物の除去が介在物の溶鋼中の浮上による考えたとき、1)取鍋内溶鋼流れは押し出し流れである、2)取鍋内に介在物は均一に分散している、という2つの仮定を置くと、単独で存在しているある粒径 D を持つ介在物が溶鋼内を浮上する速度は丸川ら⁹⁾のモデルから(3)式によっ

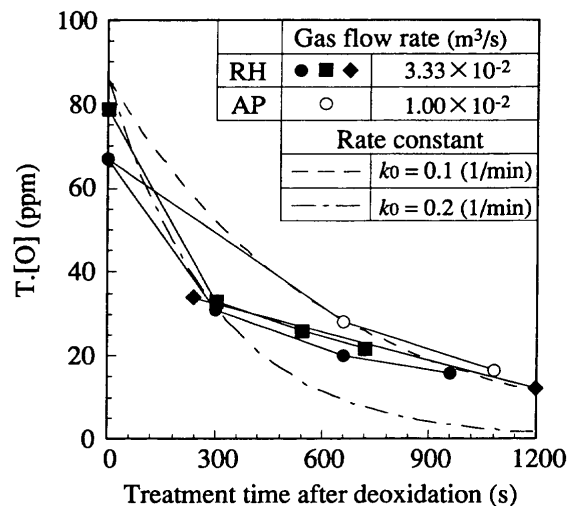


Fig. 7. Behavior of T.[O].

て示される。

$$\frac{dN(D)}{dt} = -\frac{U(D)}{H} N(D) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $U(D)$: 見かけの介在物浮上速度 (m/s)
 H : 取鍋内溶銅深さ (m)

ここで、(3)式をある時間0から t まで積分し、 $U(D)$ について解くと(4)式を得る。

$$U(D) = \frac{H}{t} \cdot \ln\left(\frac{N(t,D)}{N(0,D)}\right) \dots\dots\dots (4)$$

実操業での介在物挙動から(4)式を用いて算出される見かけの介在物浮上速度をFig. 8に示す。浮上速度が時間により変化しており、微小介在物は単なる一粒子の浮上で整理することはできない。

4・3 凝集体による介在物除去

4・3・1 介在物除去モデル

微小介在物が溶銅中から除去される機構として、溶銅攪拌場における介在物同士の乱流凝集を考慮したモデルを考えた。

Saffmanら⁴⁾は乱流場でのある粒径の介在物同士の衝突回数は(5)式で表わされると提案している。

$$W = \sqrt{\frac{8\pi^2}{15}} \cdot (D_1 + D_2)^3 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \cdot \frac{N(t,D_1)}{\rho} \cdot \frac{N(t,D_2)}{\rho} \dots (5)$$

ここで、 W : 介在物衝突回数 (1/s)
 D_1, D_2 : 介在物粒径 (m)
 ϵ : 乱流エネルギー消散速度 (m²/s³)
 ν : 溶銅の動粘度 (m²/s)
 $N(t, D_i)$: 粒径 D_i の介在物個数 (1/kg)
 ρ : 溶銅密度 (kg/m³)

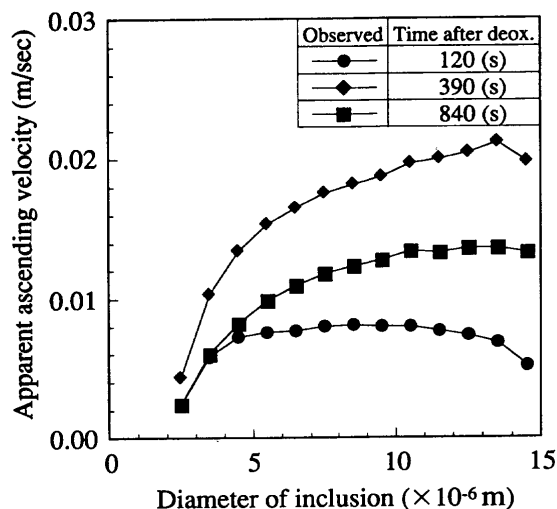


Fig. 8. Apparent ascending velocity of inclusion in RH degasser.

(5)式をある粒径の介在物と全ての介在物との衝突回数に拡張すると(6)式になる。

$$W(t,D) = \int_0^{\infty} \int_{D-D/2}^{D+D/2} \sqrt{\frac{8\pi^2}{15}} \cdot (D+D')^3 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \cdot \frac{N(t,D)}{\rho} \cdot \frac{N(t,D')}{\rho} dDd' \dots (6)$$

ここで、ある粒径範囲 $D \pm \Delta D/2$ の介在物のみを見た場合、凝集体によって粒径範囲 $D \pm \Delta D/2$ より大きくなり個数は減少するが³⁾、介在物は衝突してもある割合(凝集効率)でしか合体しない⁴⁾。また、より小さい介在物同士が凝集体して粒径範囲 $D \pm \Delta D/2$ の介在物になるものもある。そのため、時間 Δt 間の粒径範囲 $D \pm \Delta D/2$ の介在物個数のマスバランスは、これら粒径範囲 $D \pm \Delta D/2$ からの消滅と生成を考慮した(7)式で表わすことができる。

$$N(t+\Delta t, D) = N(t, D) - \alpha_T \cdot W(t, D) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \alpha_T \cdot W_0 \cdot \Delta t \dots (7)$$

ここで、 α_T : 介在物の凝集効率(-)

W_0 : 凝集で粒径 $D \pm \Delta D/2$ になる介在物の衝突回数 (1/s)

一方、(7)式中 W_0 は乱流場での介在物の衝突回数なので(8)式で評価した。

$$W_0 = \sum_{i+j=D \pm \Delta D/2} \sqrt{\frac{8\pi^2}{15}} \cdot (D_i + D_j)^3 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \cdot \frac{N(t, D_i)}{\rho} \cdot \frac{N(t, D_j)}{\rho} \dots (8)$$

(7)式における介在物の消滅項(= $\alpha_T \cdot W(t, D) \cdot \Delta t$)と生成項(= $1/2 \cdot \alpha_T \cdot W_0 \cdot \Delta t$)をまとめると(9)式が得られる。

$$N(t+\Delta t, D) = N(t, D) - \alpha_T \cdot \left(1 - \frac{W_0}{2W(t, D)}\right) \cdot W(t, D) \cdot \Delta t \dots (9)$$

(9)式中の $(1 - W_0/2W(t, D))$ を各粒径において算出するとFig. 9が得られる。その時の介在物粒径分布は(1)式により表わせるとし、(1)式を用い、介在物が Al_2O_3 の球であるとした場合の $T \cdot [O]$ を算出する(10)式から(1)式中 α を算出した。また、 N_0 は実測値から $\exp(20.2)$ とした。

$$C_{T[O]} = 10^6 \cdot \frac{3M_O}{M_{Al_2O_3}} \cdot \rho_P \int_0^{\infty} \frac{\pi}{6} D^3 \cdot N_0 \exp(-\alpha D) dD \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $C_{T[O]}$: 溶銅中T.[O]濃度 (ppm)

M_O : 酸素原子モル数

$M_{Al_2O_3}$: Al_2O_3 分子モル数

ρ_P : 介在物密度 (kg/m³)

Fig. 9から $(1 - W_0/2W(t, D))$ は本実験範囲内では $T \cdot [O]$ に依らずほぼ一定であるとみなすことができるため、(9)式は(11)式に変形することができる。

$$N(t+\Delta t, D) = N(t, D) - k \cdot W(t, D) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 k : 見かけの介在物除去効率(-)

(6)、(11)式を用いて実機での介在物挙動の整理を行った。

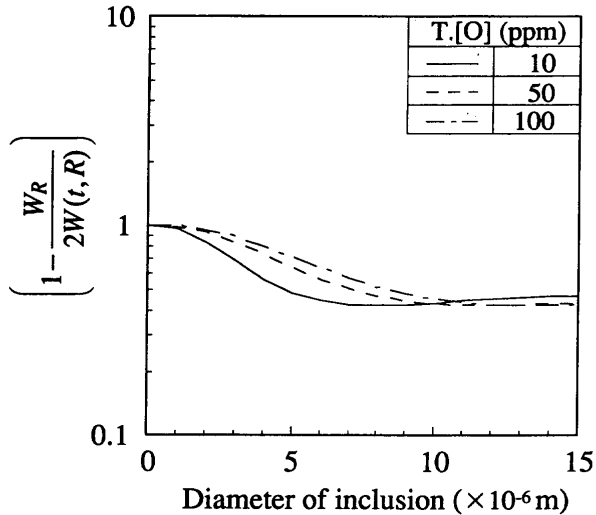


Fig. 9. Relation between the generation and the collision of inclusions.

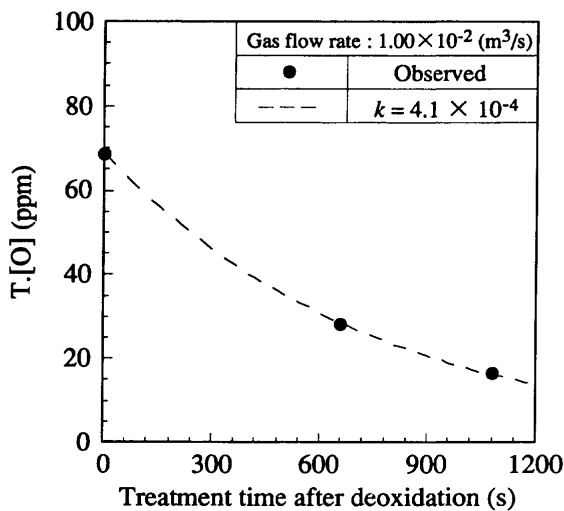


Fig. 10. Behavior of T.[O] in NK-AP.

4・3・2 取鍋精錬炉(NK-AP)への適用

NK-APでの脱酸挙動を本モデルで整理する際に、取鍋内を介在物凝集サイトと考え、気泡による攪拌の場合、(6)式での乱流エネルギー消散速度は攪拌動力密度と等しくなるため、(12)式¹⁰⁾によって算出した。

$$\varepsilon = 370.8 \frac{G \cdot T}{W} \left[1 - \frac{273}{T} + \ln \left(1 + \frac{68600Z}{P} \right) \right] \quad \dots (12)$$

ここで、 G ：吹き込みガス流量 (m^3/s)

T ：溶鋼温度 (K)

w ：溶鋼量 (kg)

Z ：ガス吹き込み深さ (m)

P ：雰囲気圧力 (Pa)

(11)式において、見かけの介在物除去効率 k を 4.1×10^{-4} とすることによりFig.10に示すように実操業での脱酸挙動を良く整理できた。この時の介在物粒径分布の初期値は(1)式で規定し、PSMによる実測値から

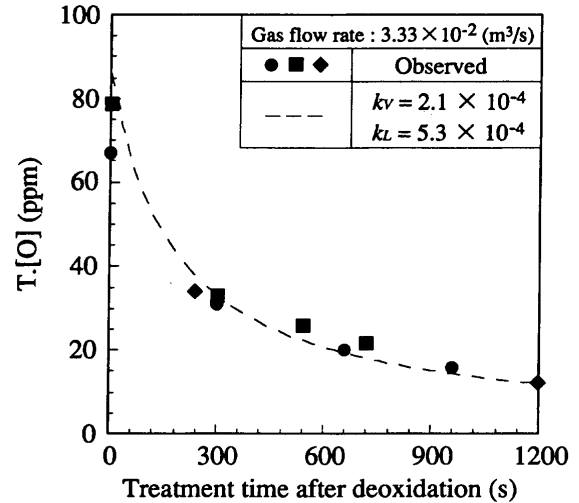


Fig. 11. Behavior of T.[O] in RH degasser.

$N_0 = \exp(20.2)$, $\alpha = 0.475 \times 10^6$ とした。

4・3・3 RH真空脱ガス装置への適用

RHにおける介在物凝集サイトとして真空槽内と取鍋内の2箇所を考え、(11)式を(13)式のように書き換えた。

$$N(t+\Delta t, D) = N(t, D) - kv \cdot \frac{w_v}{w} W_v(t, D) \cdot \Delta t - k_L \cdot \frac{w_L}{w} W_L(t, D) \cdot \Delta t \quad \dots (13)$$

ここで、添字 V ：真空槽

L ：取鍋

この時、溶鋼量は取鍋内湯面を境界として真空槽内と取鍋内に分割した。また、(6)式でのエネルギー消散速度即ち攪拌動力密度は真空槽内は(12)式、取鍋内は(14)¹¹⁾、(15)式¹²⁾で与えた。

$$\varepsilon = \frac{8 \rho Q^3}{\pi^2 d_s^4 w_L} \quad \dots (14)$$

ここで、 Q ：溶鋼環流量 (m^3/s)

d_s ：浸漬管径 (m)

$$Q = \frac{1900}{\rho} G_0^{1/3} d_s^{4/3} \left(\ln \left(\frac{P}{P_V} \right) \right)^{1/3} \quad \dots (15)$$

ここで、 G_0 ：溶鋼環流用ガス流量 (m^3/s)

P_V ：真空槽内圧力 (Pa)

また、4・3・1で見かけの介在物除去効率 k は粒子の凝集効率 α_T と k が比例すると仮定しており、 α_T はTaniguchiらの報告¹³⁾によれば攪拌動力密度の -0.12 乗に比例するので、 k と ε の関係として(16)式が得られる。

$$\frac{k'}{k} = \frac{\alpha'_T}{\alpha_T} = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right)^{-0.12} \quad \dots (16)$$

(16)式を用いてNK-APでの ε と k を基準にRHでの真空槽内、取鍋内での見かけの介在物除去効率、即ち、(13)式での k_v, k_L を算出するとそれぞれ 2.1×10^{-4} 、 5.3×10^{-4} となった。これらの値と(6)、(13)式により、介在物の粒径毎の個数を求め、T.[O]換算することにより、Fig.11に示すよう

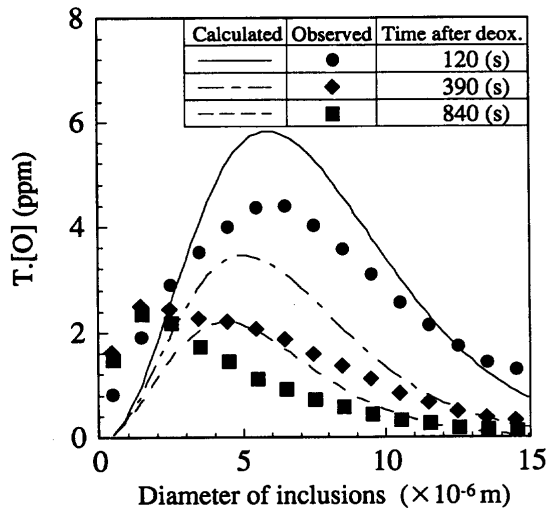


Fig. 12. Change of diameter distribution of inclusion in RH degasser.

に実操業での脱酸挙動を良く整理できた。

4.3.4 介在物粒径分布挙動

本モデルによる介在物粒径分布挙動の計算結果をFig.12に示す。この時の介在物粒径分布の初期値は(1)式で規定し、PSMによる実測値から $N_0 = \exp(20.2)$, $\alpha = 0.45 \times 10^6$ とした。

本モデルは粒径の大きな介在物から優先的に除去されており、実際の挙動を定性的に良く表現している。

絶対値に差があるのは介在物粒径分布の実測値と(1)式の差によるものであり、今後、詳細についてさらなる検討が必要と考えられる。

5. 結言

以上、実機RH, NK-APにおけるAl脱酸時の介在物除去挙動を調査し、介在物除去モデルを構築し、以下の知見を得た。

- (1) Al脱酸時の溶鋼中の介在物はほぼ100% Al_2O_3 であり、形状は球とみなすことができ、介在物個数の対数が介在物粒径に比例することがわかった。
- (2) 介在物は粒径の大きなものから優先的に除去される。
- (3) $3 \mu m$ 以下の微細な粒径のものは除去されにくい。
- (4) 介在物の凝集体を考慮したモデルを構築し、介在物凝集サイトの異なる精錬装置における実操業での脱酸挙動を良く整理できた。

文 献

- 1) 樋口善彦, 城田良康, 尾花友之, 池永 寛: 材料とプロセス, 4 (1991), 266.
- 2) K.Nakanishi and J.Szekely: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 15 (1975), 522.
- 3) K.Shirabe and J.Szekely: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 23 (1983), 465.
- 4) P.G.Saffman and J.S.Turner: J.Fluid Mech., 1 (1956), 16.
- 5) 千野 淳, 石橋耀一, 郡司直樹, 岩田英夫: 材料とプロセス, 4 (1991), 387.
- 6) 大河平和男, 佐藤憲夫, 森 久: 鉄と鋼, 59 (1973), 1166.
- 7) 浅野鋼一, 中野武人: 鉄と鋼, 57 (1971), 83.
- 8) 藤沢敏治: 第126・127回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1988), 89.
- 9) 丸川雄浄, 川崎守夫, 中島敬治, 芳山純一郎: 鉄と鋼, 68 (1983), S913.
- 10) Y.Sundberg: Scand.J.Metall., 7 (1978), 81.
- 11) 渡辺吉夫, 赫冀 成, 浅井滋生, 鞭 巖: 鉄と鋼, 69 (1983), 1160.
- 12) 桑原達朗, 三村満俊, 森 幸治, 梅沢一誠, 田中武司: 鉄と鋼, 73 (1987), S176.
- 13) S.Taniguchi, A.Kikuchi, T.Ise and N.Shoji: ISIJ Int., 36 (1996), S117.