

真空脱ガスにおける酸素上吹き法「KTB法」による 極低炭素鋼の溶製*

川崎製鉄技報
23 (1991) 2, 136-141

Mass Production of Ultra-low Carbon Steel by "KTB Method" Using Oxygen Top Blowing in the Vacuum Vessel



亀山 恭一
Kyo-ichi Kameyama
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(掛長)



西川 廣
Hiroshi Nishikawa
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長
補)



荒谷 誠
Makoto Aratani
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室



朝穂 隆一
Ryu-ichi Asaho
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長)



田村 望
Nozomu Tamura
千葉製鉄所 エネルギ
ー部エネルギー技術室
主査(掛長)



山口 公治
Koji Yamaguchi
鉄鋼研究所 鉄鋼プロ
セス研究部製鋼研究室
主査

1 緒 言

冷延鋼板の焼鈍プロセス連続化 (CAL 化)¹⁾に伴い、延性、深絞り性、耐時効性の向上²⁾を目的として、従来の低炭素アルミキルド鋼を精錬プロセスで極低炭素鋼化する必要性が急速に高まった。千葉製鉄所第3製鋼工場における極低炭素鋼の生産量比率の推移をみると、Fig. 1に示すように、ここ数年著しい増加傾向にあることがわかる。

極低炭素鋼精錬の一般的方法³⁾として、転炉では経済的な脱炭限界まで粗脱炭後未脱炭出鋼し、さらに真空脱ガスで目的とする炭素濃度まで脱炭する転炉—真空脱ガスプロセスが適用されてきたが⁴⁻¹¹⁾、以下の問題点を有していた。

- (1) 真空脱ガスにおいて長時間の脱炭処理を必要とするのみならず、温度降下が大きい。

要旨

CAL 化の進行に伴い、精錬プロセスで極低炭素鋼を大量に製造する必要性が急速に高まった。この対応として、酸素上吹きランスを組み合わせた真空脱ガスによる極低炭素鋼精錬技術 (KTB 法)を開発した。KTB 法は、真空脱炭初期における脱炭速度の向上に効果的であり、これを [C]、[O] の同時移動を考慮した脱炭モデルにより証明した。また、KTB 法のもう一つの特徴である熱補償能力については、減圧下での熱移動解析モデルにより、2次燃焼および断熱効果によるものであることを明らかにした。当社の極低炭素鋼精錬の全プロセスにおいて、KTB 法を工程化し、脱炭速度の向上、出鋼温度の低下を実現するとともに、極低炭素鋼を連続的に大量に溶製する技術として確立した。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed a new top oxygen blowing degassing method in the vacuum vessel, KTB method, which can remarkably promote the decarburization reaction rate in the vacuum vessel, lower tap temperature, and enhance productivity and quality of ultra-low carbon steel.

The KTB method, in which oxygen is blown onto the surface of molten steel by a top lance in the vacuum vessel during decarburization treatment, is effective both in promoting the decarburization reaction in the initial stage of the vacuum decarburization treatment and in enhancing the capacity of heat compensation during degassing treatment. The promotion of decarburization reaction has been proved by the decarburization reaction model considering the simultaneous mass transfer of [C] and [O]. It has also been proved by the analysis of the heat transfer model under vacuum pressure that post-combustion and adiabatic effects bring about great heat compensation.

- (2) 転炉の限界脱炭域では、鋼中酸素濃度やスラグ中 (T. Fe) の急激な上昇を伴うため、歩留り低下、耐火物損耗、介在物増加 (品質劣化) を引き起こす。
- (3) 真空脱ガス時の温度降下に対応するため、高温出鋼を必要とする。

Table 1 に、上記精錬負荷の具体例を、低炭素鋼との比較において示した。

これらの問題点を解決するために、千葉製鉄所第3製鋼工場において、酸素上吹きランスを組み合わせた環流式真空脱ガス装置を使用し、極低炭素鋼を効率良く製造する技術—KTB 法 (Kawasaki Steel's new top oxygen blowing degassing method) を開発した。本

* 平成3年3月12日原稿受付

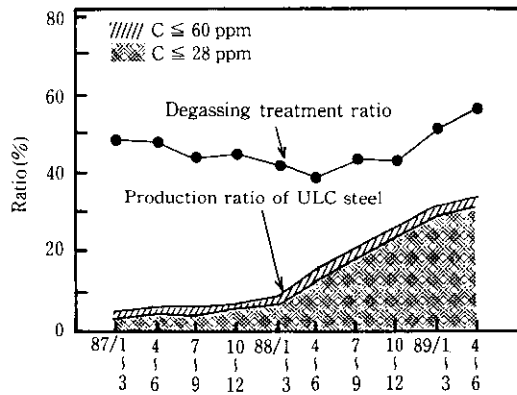


Fig. 1 Trend of production ratio of ULC steel at No. 3 steel-making shop

Table 1 Comparison between low carbon aluminum killed (LCAK) and ultra-low carbon (ULC) steel making (conventional method)

Item	LCAK	ULC
Tap temperature	(Base)	+48°C
Treatment time	(Base)	+12 min
Tap C	$4.5 \times 10^{-2}\%$	$2.6 \times 10^{-2}\%$

報告では、KTB法の特徴と効果についてまとめた。

2 KTB法の概要

KTB法は、真空脱ガスに水冷式の酸素上吹きランス（KTBランス）を組み合わせた装置を使用するプロセスである。Fig. 2にKTB法の概念図を示す¹²⁻¹⁴。

上吹き酸素を真空脱ガス処理に導入した目的は次の2点である。

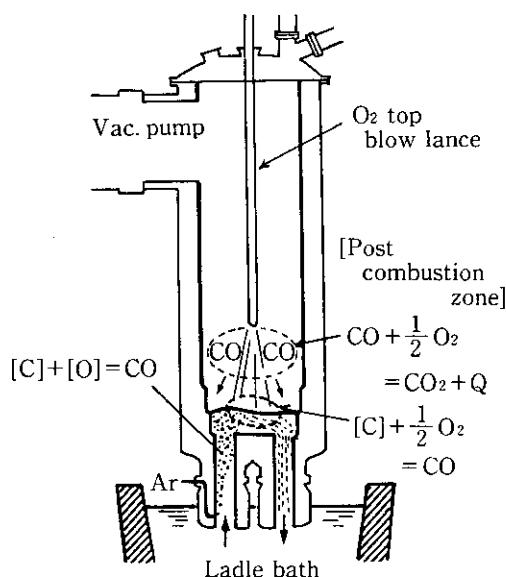


Fig. 2 Schematic illustration of KTB

- (1) 脱炭反応が酸素供給律速であるリムド処理前半に、真空槽内の鋼浴面に酸素を吹き付けることにより、脱炭を促進させる。
- (2) 脱炭反応中に発生するCOガスを真空槽内で2次燃焼させ、その反応熱を利用して溶鋼の熱補償を行う。

これらが達成された結果、脱炭速度の向上と転炉出鋼[C]の上昇、さらに転炉出鋼温度の低下を可能ならしめている。

3 KTB法による脱炭速度の向上

3.1 KTB法による脱炭処理改良の効果

真空脱ガスにおけるリムド処理中の脱炭反応の進行は(1)式で示される。

$$[C] = [C]_i \exp(-K_C t) \quad (1)$$

[C]: 到達炭素濃度

[C]_i: 脱炭処理開始時の初期炭素濃度

K_C: 見かけの脱炭速度定数

t: 脱炭時間

Fig. 3にリムド処理中の[C]の時間的变化を、KTB法と従来工程法の平均値の比較として示す。Fig. 3を[C]_i/[C]_iの変化として書き直すとFig. 4のようになる。見かけの脱炭速度定数K_Cを、KTB処理（上吹き酸素吹込）区間担当の脱炭処理初期で比較すると、従来工程法（上吹き酸素なし）の0.21 min⁻¹に対し、KTB法では0.35 min⁻¹まで増大している。この結果、KTB法においては、Fig. 3に示すように初期炭素濃度を大幅に増大させても、従来工程法と同程度の処理時間で脱炭可能である。

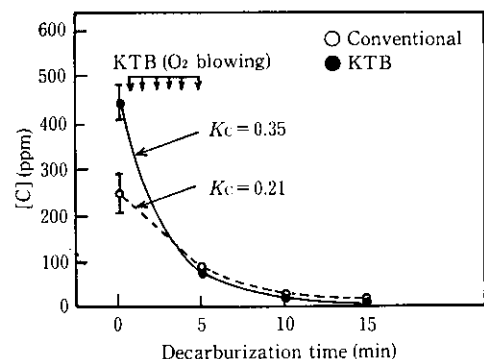


Fig. 3 Transition in carbon content during decarburization period

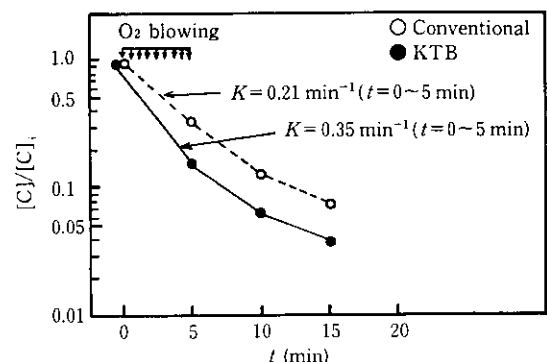


Fig. 4 Comparison of decarburization rate ($[C]/[C]_i$) between KTB and conventional methods

3.2 真空脱ガス槽内の脱炭反応に及ぼす上吹き酸素の影響

真空槽内において、上吹き酸素が脱炭反応促進に有効となる条件を、[C]の移動のみでなく[O]の移動も考慮した反応モデルを用いて検討した。反応モデル¹⁵⁾の設定に際しては以下の(1)~(3)を仮定する。

- (1) 取鍋および真空槽内の溶鋼は完全混合である。
- (2) 真空槽内溶鋼表面で、[C]、[O]はガス側CO分圧 P_{CO} と平衡している。
- (3) 脱炭反応は溶鋼側での[C]と[O]の物質移動により律速される。

これらの仮定から、以下の式が導かれる。

取鍋内溶鋼中の物質収支：

$$V \frac{dC_L}{dt} = Q(C_v - C_L) \quad (2)$$

$$V \frac{dO_L}{dt} = Q(O_v - O_L) \quad (3)$$

脱ガス槽内溶鋼中の物質収支：

$$v \frac{dC_v}{dt} = Q(C_L - C_v) - ak_c(C_v - C_o) \quad (4)$$

$$v \frac{dO_v}{dt} = Q(O_L - O_v) - ak_o(O_v - O_o) + 3.401\beta F_{O_2} \quad (5)$$

$$\frac{ak_c}{12}(C_v - C_o) = \frac{ak_o}{16}(O_v - O_o) \quad (6)$$

[C]、[O]反応の平衡関係：

$$\log \frac{1.013C_o \cdot O_o \cdot 10^{-3}}{P_{CO}} = - \left(\frac{1160}{T} + 2.003 \right) \quad (7)$$

V, v ： 取鍋内および真空槽内の溶鋼体積 (m³)

C_L, C_v ： 取鍋内および真空槽内の[C]値 (ppm)

O_L, O_v ： 取鍋内および真空槽内の[O]値 (ppm)

ak_c, ak_o ： 真空槽内溶解中の[C]および[O]の物質移動容量係数 (m³/s)

C_o, O_o ： 気液反応界面での[C]および[O]値 (ppm)

Q ： 溶鋼の還流速度 (m³/s)

P_{CO} ： 真空槽内CO分圧 (Pa)

T ： 溶鋼温度 (K)

F_{O_2} ： 真空槽内への酸素供給速度 (m³-norm/min)

β ： 真空槽内鋼中への酸素吸収効率

[C]、[O]の物質移動容量係数⁹⁾は、溶鋼の流動状況などによって変化すると考えられるが、その比 $\alpha(=ak_o/vk_c)$ は拡散係数の比 (D_O/D_C) と一定の関係にあると考えられる。鈴木ら¹⁶⁾はつば実験の結果から $\alpha=0.69$ という結果を得て、これが $(D_O/D_C)^{1/2}$ に近い値であることを報告している。一方、千葉製鉄所での真空脱ガスの作業実績を[C]移動律速のみを考慮する従来モデルを用いて解析すると、 $ak_c \approx 0.6$ (m³/s) が得られるので、本モデルでもこれを用いる。

$$\alpha = \frac{ak_o}{ak_c} = 0.69, \quad ak_c = 0.6 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (8)$$

また、真空槽内溶鋼中への酸素吸収効率 β は、上吹き酸素ガスのうち2次燃焼に使われる分以外の酸素が、すべて、いったん溶鋼中に吸収された後鋼中炭素と反応すると仮定すると、以下の式で表される。

$$\beta = 1 - \eta \quad (9)$$

$$\eta = \frac{G_{CO+CO_2} \cdot \gamma}{2F_{O_2}} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{CO_2}{CO+CO_2} \quad (11)$$

η ： 2次燃焼酸素効率

G_{CO+CO_2} ： (CO+CO₂)発生速度 (m³-norm/min)

γ ： 2次燃焼率

真空脱ガスでのKTB法の操作データとして、 $F_{O_2}=25$ (m³-norm/min)、 $\gamma=0.60$ (後出)、 $G_{CO+CO_2}=35$ (m³-norm/min)を用いると、 $\eta \approx 0.4$ 、 $\beta \approx 0.6$ となる。反応モデルでは $\beta=0.6$ とした。

$C_L, O_L, P_{CO}, F_{O_2}$ を種々に変更して反応モデルにより脱炭挙動を計算し、見かけの脱炭速度定数 K_C を(12)式により求めた。

$$K_C = \frac{ak_c}{V} \cdot \frac{(C_v - C_o)}{C_L} \quad (12)$$

脱炭反応初期の脱ガス槽内真空度に相当する $P_{CO}=6.66 \times 10^3$ (Pa)の条件を用いてモデル計算から導出した K_C が、 $K_C > 0.25$ 、0.20、0.15 min⁻¹となる C_L と O_L の領域を、従来工程法の場合(上吹き酸素なし)およびKTB法の場合($F_{O_2}=25$ m³-norm/min)について、それぞれFig. 5および6に示した。図中の斜線部は、脱炭処理初期の槽内真空度 $\geq 6.66 \times 10^3$ Pa下において、反応の進行に伴う C_L - O_L 領域の移動の実績値を示すものである。Fig. 5および6より以下のことが考察できる。

- (1) 上吹き酸素がない場合、400 ppm程度の比較的 O_L の高い領域から、 K_C に及ぼす O_L の影響が強い。
- (2) KTB法の場合、従来工程法と比較して、同一[C]値においても K_C が低下する O_L は低くなる。
- (3) 比較的真空度の低い $P_{CO}=6.66 \times 10^3$ Paの条件では、 C_L の低下にともなって[C]・[O]の濃度積が低下し脱炭の駆動力が低下することから、 O_L が低下すると K_C が低下する。上吹き

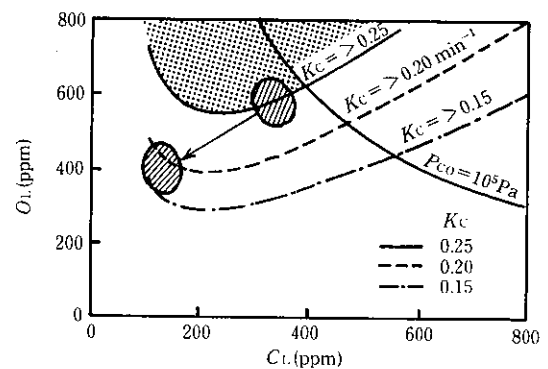


Fig. 5 Calculated value of K_C in conventional method ($P_{CO}=6.66 \times 10^3$ Pa, $F_{O_2}=0$)

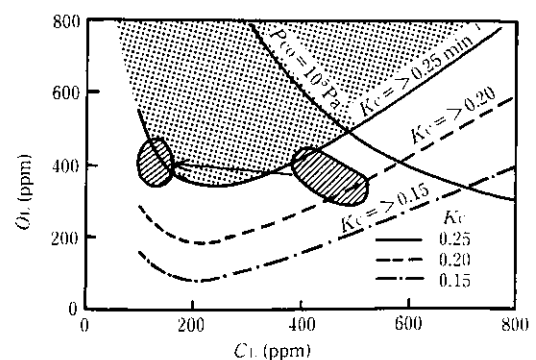


Fig. 6 Calculated value of K_C in KTB method ($P_{CO}=6.66 \times 10^3$ Pa, $F_{O_2}=25$ m³-norm/min)

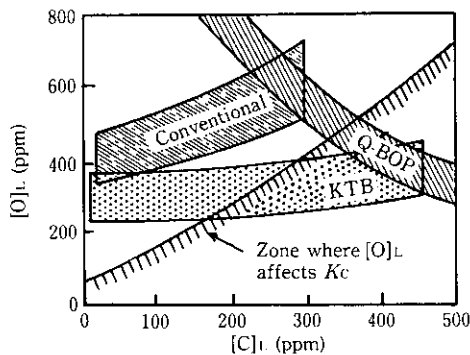


Fig. 7 Oxygen content at blow end in Q-BOP and changes in oxygen content during vacuum decarburization treatment

酸素なしの方がこの傾向は強く、 K_c を維持するためには高い初期酸素濃度を必要とする。

- (4) 上吹き酸素がない場合、初期 C_L の上昇すなわち転炉出鋼 $[C]$ の上昇は、初期 O_L の低下を招き K_c が低下するが、KTB法の場合、出鋼 $[C]$ が上昇し初期 O_L が低下しても、真空槽内で溶鋼に酸素が供給されるため K_c の低下が防止できる。

したがって、 C_L が O_L に比較して高いときの酸素移動律速の場合のみならず、真空度の低い脱炭反応初期においては、KTB法すなわち上吹き酸素の供給が、脱炭速度向上の有効な手段であることが理解できる。Fig. 7 に真空脱ガスにおける KTB 法の適用範囲を示す。

4 KTB 法による熱補償

4.1 熱補償効果

KTB 法の最大の特徴は、処理中の熱補償効果が格段に優れることである。熱補償効果は主として、脱炭反応中に発生する CO ガスが真空槽内で 2 次燃焼するときの反応熱によるところが大きい。KTB 法と従来工程法における、脱炭処理中の排ガス中 CO、CO₂ 濃度の変化を Fig. 8 に比較して示す。従来工程法では脱炭処理中の 2 次燃焼はほとんど起こり得ないが、KTB 法においては、2 次燃焼率 η は CO が多量に発生する脱炭処理前半においても $\eta=0.60$ (60%) 程度の高い値を示すことがわかる。

Fig. 9 は、転炉出鋼時から連続鋳造までのプロセスルート内で、極低炭素鋼の鋼浴温度がどのように変化するかを示したものであ

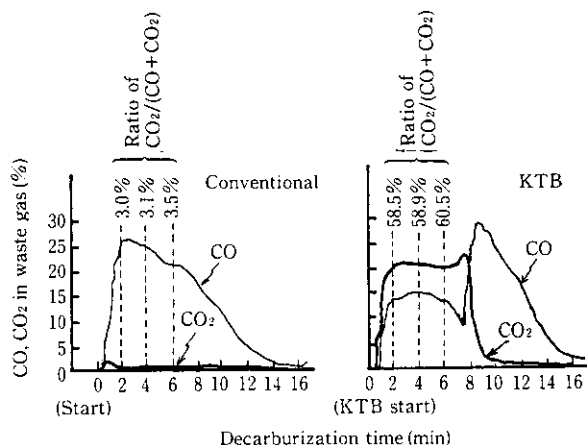


Fig. 8 Component of waste gas during decarburization

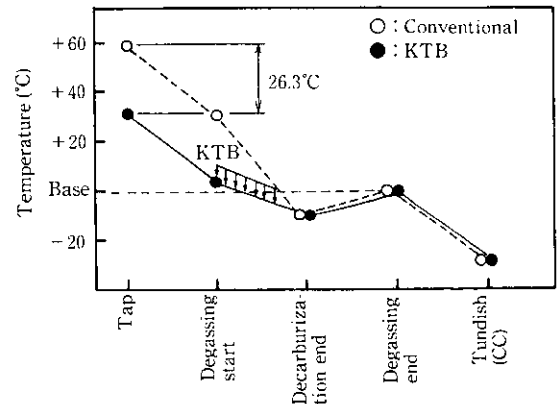


Fig. 9 Effect of KTB on the reduction of tap temperature

る。KTB 法では処理中の熱補償効果により温度降下が小さいため、脱ガス開始時の鋼浴温度を低く設定することが可能であり、したがって、出鋼温度を従来工程法より低下させることが可能である。従来工程法と比較して、KTB 法においては、出鋼温度を平均的に 20°C 以上低下させることが可能となった。補償は主として、

- (1) CO ガスの 2 次燃焼反応熱の溶鋼への着熱
 - (2) 槽内耐火物温度上昇に伴う断熱効果
- によるものである。

4.2 減圧下における熱移動のモデル解析

前項で述べた熱補償効果を、減圧下での熱移動解析モデルにより検討した。真空槽内を 0~4 の 5 つのゾーンに分割した本モデルの概要を Fig. 10 に示す。また、モデルの特徴を以下の (1)~(5) に示す。

- (1) 高温場の伝熱を取り扱うため、伝熱の条件は“輻射支配”を仮定する。
- (2) 真空脱ガス槽内の高さ方向に 5 分割 (0~4 zone) し、解析にはゾーン法を用いている。
- (3) KTB 酸素による 2 次燃焼域を 1 zone とし、ランス高さに応じてゾーン長さを変化させ、実機との対応をとっている。
- (4) 3 zone の槽内測温に基づき、モデルのパラメータ (ガス輻射率・槽内鋼浴受熱面積) を決定している。

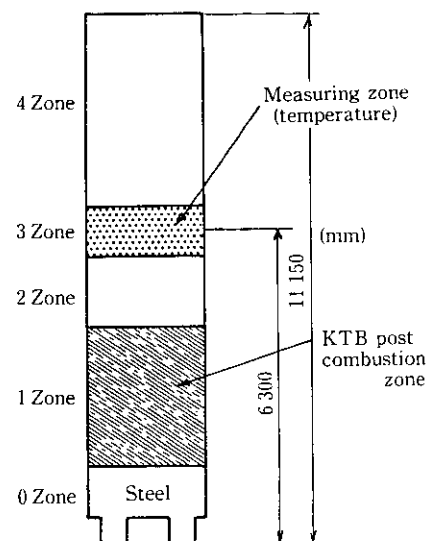


Fig. 10 Schematic illustration of zone distribution for the heat analysis

- (5) 槽内耐火物の非定常伝熱を考慮し、鋼浴への熱移動の時間変化を精度よく算出するため、槽内耐火物をふくめた非定常伝熱方程式を解く方法を採用している。

本モデルの基礎式を以下に示す。

輻射の伝熱式:

$$G_i = \varepsilon_i \cdot E_i - (1 - \varepsilon_i) \cdot J_i \quad (13)$$

$$J_i = \sum_{j=0}^n (F_{ij} \cdot G_j) + \varepsilon_g \cdot E_g \quad (14)$$

$$Q_i = \varepsilon_i \cdot (J_i - E_i) \cdot A_i \quad (15)$$

$$E_i = \sigma \cdot T_i^4 \quad (16)$$

$$E_g = \sigma \cdot T_g^4 \quad (17)$$

排ガスの炉内熱バランス:

- (a) 燃焼ゾーン (第 m ゾーン; $m=1$)

$$\begin{aligned} & V(\text{CO} + \text{Ar}) \cdot C_p(\text{CO} + \text{Ar}) \cdot T(\text{CO} + \text{Ar}) \\ & + V(\text{O}_2) \cdot C_p(\text{O}_2) \cdot T(\text{O}_2) + V'(\text{CO}) \cdot \{-\Delta H(\text{CO} \rightarrow \text{O}_2)\} \\ & = V(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{Ar}) \times T_{g(m=1)} + \sum_{i=0}^n Q_{i(m=1)} \quad (18) \end{aligned}$$

- (b) 非燃焼ゾーン (第 m ゾーン; $m=2 \sim 4$)

$$\begin{aligned} & V(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{Ar}) \cdot C_p(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{Ar}) \cdot T_{g(m-1)} \\ & = V(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{Ar}) \cdot C_p(\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{Ar}) \cdot T_{g(m)} \\ & + \sum_{i=0}^n Q_{i(m)} \quad (19) \end{aligned}$$

真空槽内耐火物の非定常熱伝導・熱放散 (各ゾーン):

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = a(T_r) \cdot \left(\frac{\partial^2 T_r}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T_r}{\partial R} \right) \quad (20)$$

$$\left[\begin{aligned} & t=0, \quad R \geq R_{in}; \quad T_r = f(R) \\ & t \geq 0, \quad R = R_{in}; \quad \lambda(T_r) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial R} = \frac{Q_i}{A_i} \\ & t \geq 0, \quad R = R_{out}; \quad \lambda(T_r) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial R} = U_i \cdot (T_r - T_\infty) \end{aligned} \right]$$

A_i : 耐火物または溶鋼の表面積 (m^2)

i (または j): ゾーン No.

$v(T)$: 耐火物の熱拡散度 (m^2/s)

$C_p(\quad)$: 比熱 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

E_i : 輻射のポテンシャルエネルギー ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

E_g : 燃焼ガスの熱放出能力 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

F_{ij} : i, j 間の形態係数

G_i : 放出エネルギー ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

J_i : 吸収エネルギー ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

Q_i : 輻射伝熱による熱量 (W)

R : 半径 (m)

R_{in} : 耐火物の内面側半径 (m)

R_{out} : 耐火物の外面側半径 (m)

T_i : 耐火物または溶鋼の温度 (K)

T_g : 燃焼ガスの温度 (K)

$T(\quad)$: 単体ガスまたは混合ガスの温度 (K)

T_r : 耐火物温度 (K)

T_∞ : 大気温度 (K)

t : 時間 (s)

U_i : 脱ガス槽鉄皮~大気間の熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

$V(\quad)$: ガス流量 (m^3/s)

$V'(\quad)$: 燃焼したガスの流量 (m^3/s)

$-\Delta H(\rightarrow)$: 燃焼熱 (J/m^3)

ε_i : 耐火物または溶鋼の輻射率

ε_g : 燃焼ガスの輻射率

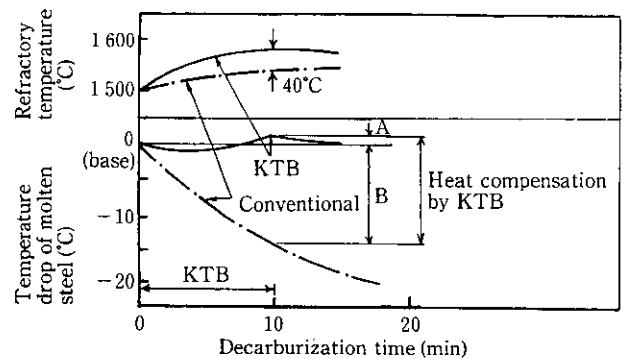


Fig. 11 Calculation results of heat analysis with KTB practice (temperature drop of molten steel due to heat transfer to exhaust gas and refractory; temperature of refractory surface calculated at No. 1 zone; and heat compensation by KTB)

$\lambda(T)$: 耐火物の熱伝導度 ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

σ : ステファン・ボルツマン定数

本モデルによる計算結果の一例を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、KTB 法による熱補償では、2 次燃焼域の耐火物温度上昇に伴う鋼浴断熱効果の役割が非常に大きいことが理解できる。

5 KTB 法の工業的効果

Fig. 12 に千葉製鉄所第 3 製鋼工場における極低炭素鋼 ($[\text{C}] \leq 28$ ppm) の出鋼 $[\text{C}]$ と出鋼温度の推移を示す。1988 年 4 月より KTB 法を工程化した結果、顕著な出鋼 $[\text{C}]$ の上昇と出鋼温度の低下が達成された。

Fig. 13 には、従来工程法と KTB 法の真空脱ガスにおける FeMn

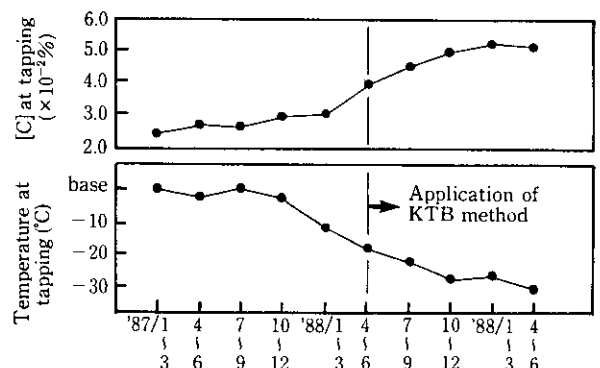


Fig. 12 Average quarterly trends of $[\text{C}]$ content and temperature at tapping of converter for making ULC steel ($[\text{C}] < 28$ ppm)

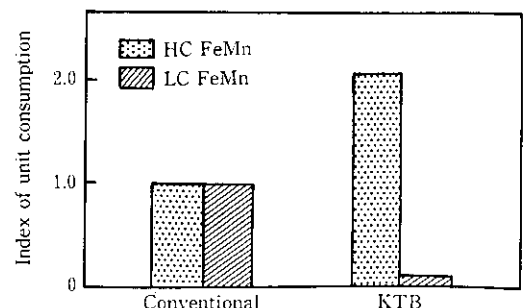


Fig. 13 Comparison of FeMn unit consumption in conventional and KTB practice

合金鉄の原単位指数を比較した。KTB法により高価なLC(低炭素)FeMnから安価なHC(高炭素)FeMnへの合金鉄種類の切換えが可能となった。

6 KTB法の適用による品質改善

Fig. 14は、脱ガス処理終了時における取鍋スラグ中(T. Fe)と鋼液中酸素 $[O]_T$ の関係を示したものである。出鋼[C]上昇と出鋼温度低下の効果により、KTB法では(T. Fe)、 $[O]_T$ を低位に安定させることが可能となった。この結果、連続铸造プロセスにおいては Al_2O_3 起因の浸漬ノズル閉塞が改善され、さらにスラブ表面品質

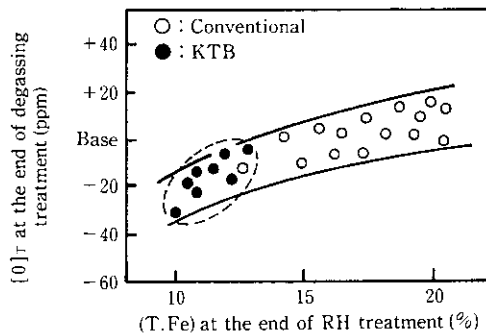


Fig. 14 Relation between (T. Fe) and $[O]_T$ at the end of degassing treatment

の向上により連铸スラブの無手入れ化に貢献している。

7 結 言

極低炭素鋼の連続的な大量生産のニーズに対応するために、真空脱ガスにおける酸素上吹き技術であるKTB法を開発し、極低炭素鋼量産プロセスとして確立した。技術開発の過程において得られた結果を以下に要約する。

- (1) KTB法は、脱炭反応が酸素供給律速であるリンド処理前半に、真空槽内の鋼液に酸素を供給し脱炭を促進させる。この効果は、[C]、 $[O]$ の同時移動を考慮した脱炭反応モデルによって証明できた。
- (2) KTB法は、処理中の熱補償効果が顕著に優れる。熱補償は主として、2次燃焼熱の溶鋼への着熱および槽内耐火物温度上昇に伴う断熱効果によるものである。この効果は、減圧下での熱移動解析モデルにより証明できた。
- (3) KTB法の工程化により、顕著な出鋼[C]の上昇と出鋼温度の低下が達成され、さらに脱ガスプロセスにおいて安価な高炭素FeMn合金の使用が可能となった。
- (4) KTB法の適用によって、脱ガス終了時の(T. Fe)、鋼中 $[O]$ が安定的に低下できた。このことにより、連続铸造での浸漬ノズル閉塞が改善され、またスラブ表面品質が向上した。

KTB法は現在、当社の極低炭素鋼精錬の標準プロセスとして、全社的に工程化されている。

参 考 文 献

- 1) 阿部英夫, 佐藤 進: 川崎製鉄技報, 21 (1989) 3, 208-215
- 2) 佐藤 進, 小原隆史, 高崎順介, 安田 顕, 西田 稔: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 4, 273-279
- 3) 大西正之: 第126, 127回西山記念技術講座, (1988), 51-87
- 4) 上田 新, 日名英司, 片桐忠夫, 大森 尚, 山本武美, 永井 潤: 鉄と鋼, 67 (1981) 12, S888
- 5) 住田則夫, 藤井徹也, 小口征夫, 江見俊彦, 橋 正治, 吉村啓介, 数土文夫: 鉄と鋼, 68 (1982) 4, S186
- 6) 星田達男, 遠藤豪士, 海老沢 勉, 田口喜代美, 高橋謙治, 菊地良輝: 鉄と鋼, 69 (1983) 4, S179
- 7) 吉岡敬二, 橋 克彦, 田口喜代美, 高橋謙治: 鉄と鋼, 69 (1983) 12, S879
- 8) 池田正文, 宮脇芳治, 半明正之, 安斎孝儀, 田辺治良, 碓井 努: 鉄と鋼, 69 (1983) 12, S880
- 9) 山崎 勲, 戸崎泰之, 城田良康, 青木伸秀, 渡辺吉夫: 鉄と鋼, 70 (1984) 4, S239
- 10) 大西保之, 伊賀一幸, 小林 功, 志依教之: 鉄と鋼, 70 (1984) 12, S976
- 11) 市村深一, 平岡照祥, 延本 明: 鉄と鋼, 70 (1984) 12, S977
- 12) 荒谷 誠, 亀山恭一, 西川 廣, 鷲尾 勝, 朝穂隆一, 大西正之: 材料とプロセス, 2 (1989) 4, 1230
- 13) 西川 廣, 近藤 寛, 岸本康夫, 田村 望, 朝穂隆一, 大西正之: 鉄と鋼, 76 (1990) 11, 1940-1947
- 14) H. Nishikawa, K. Kameyama, M. Aratani, Y. Kishimoto, R. Asaho, and M. Ohnishi: "Improvement of Steelmaking Technology for Production of Ultra Low Carbon Steel at No. 3 Steelmaking Shop in Chiba Works", Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya (Japan), Oct. (1990)
- 15) 山口公治, 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也: 「RHにおける脱炭反応モデルと極低炭素鋼溶製時の脱炭反応の容量係数」, 界面移動現象部会中間報告書, 鉄鋼基礎共同研究会界面移動現象部会編, (1989), 36
- 16) 鈴木 鼎, 森 一美, 北川 融, 柴山卓真: 鉄と鋼, 62 (1976), 3, 354-361