

© 1986 ISIJ

二次精錬プロセスの開発と低酸素，低硫鋼溶製法の確立

技術報告

小倉 康嗣*・菊地 良輝*²・長谷川輝之*松尾 和彦*・田口喜代美*³・半明 正之*

Development of Secondary Refining Process and Its Application to Production of Clean Steel

Yasutsugu OGURA, Yoshiteru KIKUCHI, Teruyuki HASEGAWA,
Kazuhiko MATSUO, Kiyomi TAGUCHI and Masayuki HANMYO

Synopsis :

Recently the needs of ultra low [S] and ultra low [O] steel for many kinds of products increase.

Secondary refining process to achieve less than 5 ppm sulfur and less than 10 ppm oxygen in molten steel was investigated. In order to produce ultra low sulfur steel the optimum slag composition was determined as 60%CaO-32%Al₂O₃-8%SiO₂ and the deviation of final slag composition could be decreased by the method of 2 times flux addition.

In the case of producing ultra low oxygen steel, it was important for increasing deoxidation rate that the total content of FeO+MnO in slag before RH process was less than 1 wt% and then deoxidizing products were removed through RH process. On the basis of these results, the refining process, BOF-VSC-NKAP-GI-RH process, was established. By this process it became possible to achieve less than 5 ppm sulfur and less than 10 ppm oxygen in steel.

1. 緒 言

近年耐 HIC 鋼をはじめとして，多品種にわたって超低硫，超低酸素鋼の品質要求が強まっている．例えば耐 HIC 鋼の場合，スラグの中心偏析が軽減しても介在物が多いと，介在物起因の水素誘起割れが起るため，Ca/S コントロールばかりでなく，[O]，[S] の絶対値低減が必要となる．

[O]，[S] を従来よりさらに低下させるには，二次精錬技術が重要な役割を果たす．[S] ≤ 5 ppm を安定して得るには，二次精錬処理前の [S] を低くし，溶鋼中の Al を高くすることはもとより，二次精錬での最適スラグコントロール，攪拌力増大，攪拌時間の最適化が重要となる．また [O] ≤ 10 ppm を安定して得るには，二次精錬でのスラグ中酸素ポテンシャルの低減，介在物浮上のための精錬プロセスの最適化が重要となる．

本報告は，二次精錬を活用し，最適プロセスを選択することによつて，超低硫，超低酸素鋼を溶製する技術について検討した．

2. 溶製プロセス概要

当所の二次精錬設備としては，①昇熱・軽脱硫のための取鍋精錬炉 (Ar=600 Nl/min, 以下 NK-AP と略す)，②脱硫，Ca 添加のための強攪拌装置 (Ar=2000 Nl/min), 以下 GI と略す) ③脱ガス装置 (以下 RH と略す)，さらに④取鍋スラグ除去のためのスラグ真空吸引装置 (以下 VSC と略す) を有している．Table 1 にこれらの設備手段を用いた実際の超低硫，超低酸素鋼溶製プロセスを示す．また使用した鋼種の代表組成を Table 2 に示した．

3. 超低硫鋼の溶製

3-1 スラグコントロール方法

脱硫反応は一般に(1)式で示されるが，平衡に達した時の (S)/[S] を(4)式で定義した SP (スラグパラメーター) を用いて，(2)式から求めると(3)式のようになる．



昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 5 月 7 日受付 (Received May 7, 1985)

* 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)中央研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (現: 吾孺製鋼所仙台製造所) (Keihin Works, Nippon Kokan K. K., Now Sendai Works, Azuma Steel Co., Ltd.)

Table 1 . Refining process.

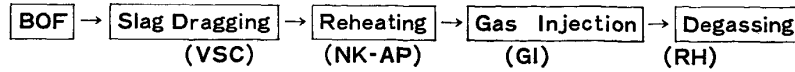


Table 2. Example of steel composition (wt%).

C	Si	Mn	P	S	SolAl	Nb	V	N	T. O
0.10	0.20	1.50	0.008	0.0004	0.020	0.035	0.060	0.0040	0.0010

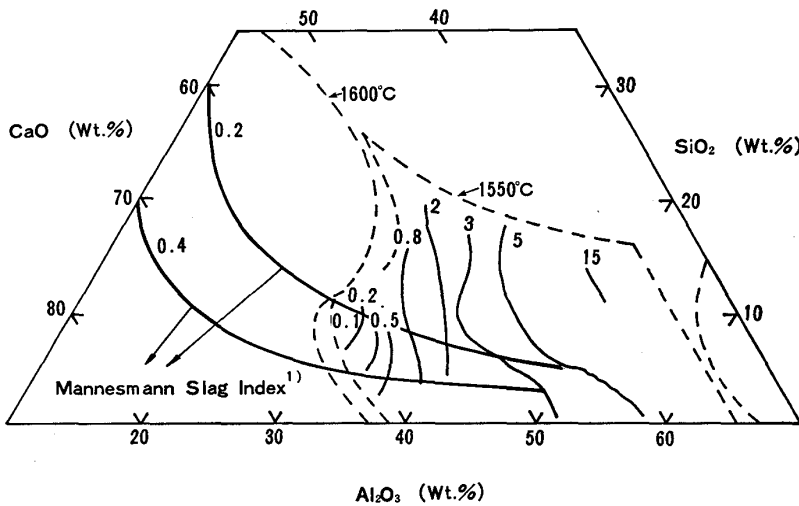


Fig. 1. Slag parameter (1550°C) and liquidus curves of CaO and C₂S (1550°C, 1600°C).

$$\Delta G^\circ_{(1)} = -RT \ln \frac{a_{CaS}^3 \cdot a_{Al_2O_3}}{a_{CaO}^3} \cdot \frac{1}{a_{Al}^2 \cdot a_S^3} \dots\dots (2)$$

$$a_{CaS} = f'_{CaS} \cdot (\%S), \quad a_S = f'_S \cdot [\%S]$$

$a_{CaS} = 1$ at sulfide saturation

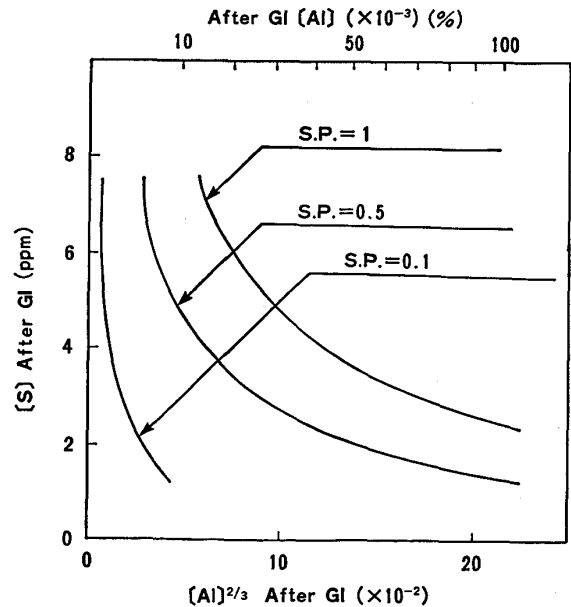
$$\frac{(\%S)}{[\%S]} = \frac{a_{CaO}}{f'_{CaS} \cdot a_{Al_2O_3}^{1/3}} \cdot f'_S a_{Al}^{2/3} \cdot e^{-\frac{\Delta G^\circ_{(1)}}{3RT}}$$

$$= \frac{a_{Al}^{2/3}}{(S.P.)} \cdot f'_S \cdot e^{-\frac{\Delta G^\circ_{(1)}}{3RT}} \dots\dots (3)$$

$$(S.P.) \equiv a_{Al_2O_3}^{1/3} / (\%S)_{Sat} \cdot a_{CaO} \dots\dots (4)$$

$$f'_{CaS} = 1 / (\%S)_{Sat}$$

(3)式より, (S)/[S]を増大させるにはAlを増大させ,かつ,(S.P.)を低くすることが重要となる. Fig. 1は川上ら¹⁾,CAMERON²⁾の熱力学データより計算した(S.P.)を示しており,この(S.P.)はスラグ組成によつて決まる値である.(S.P.)=0.1付近が最小値であり,スラグ-メタル反応が平衡に達したとすれば,擬似三元系で60%CaO-10%SiO₂-30%Al₂O₃が最適スラグ組成となる.またFig.2は,精錬終了(ここではGI終了)[S]値に及ぼす[Al],(S.P.)の影響を定量的に見るため,精錬終了[S]と[Al]の関係を計算により求めたものである.[Al]=0.02%の場合,S.P.=1→S.P.=0.5とすることで終了[S]を2ppm低減



Condition
 Slag thickness before AP treatment : 20mm
 [S] in molten steel before AP treatment : 20ppm
 (S) in slag before AP treatment : 300ppm

Fig. 2. Relation between [Al] and [S] after GI.

でき, S.P.=0.1とすればさらに[S]を下げるができることになる.一般に[Al]は機械特性上あるいは,CC鑄片表面性状の点から高くできない.このため

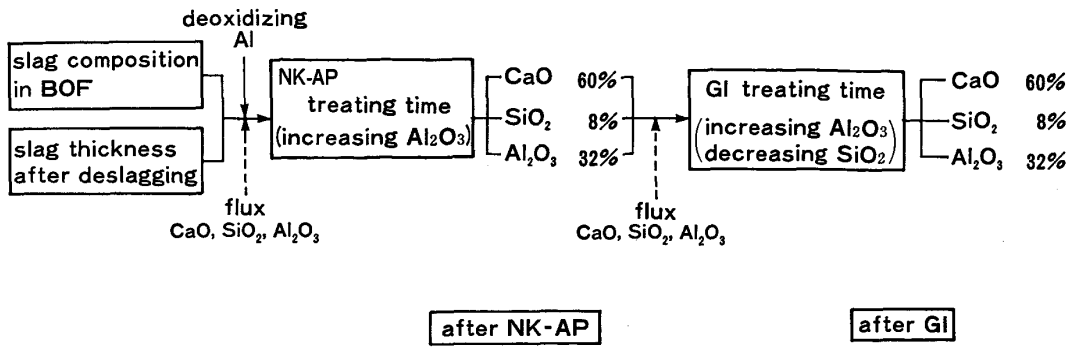
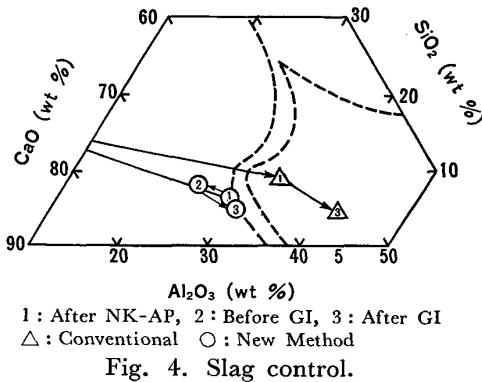


Fig. 3. Improved method of controlling slag composition.



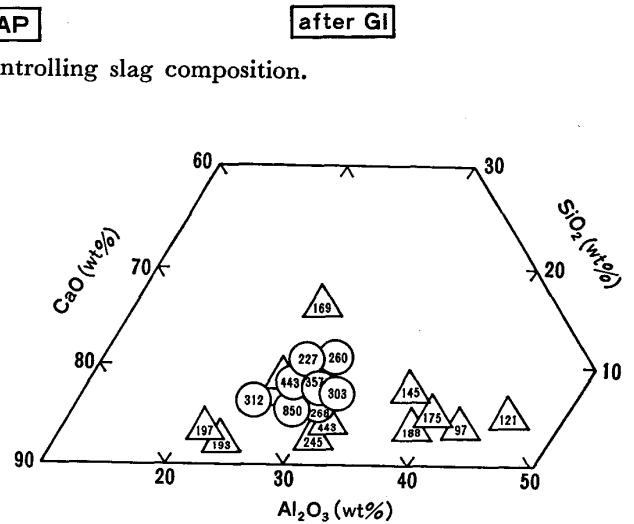
1: After NK-AP, 2: Before GI, 3: After GI
△: Conventional ○: New Method

Fig. 4. Slag control.

[Al] を高めずにスラグ組成のコントロールにて対処せざるを得ないケースが多い。

従来、スラグコントロールは二次精錬前にスラグボリューム 7t を目標に造滓剤を投入するのみであった。このため、転炉の出鋼温度、あるいは除滓時間のばらつきによつて AP の昇熱時間、すなわち処理時間がばらつき、スラグコントロール精度が悪くなった。そこでスラグ-メタル攪拌中のスラグ中 (Al₂O₃) の増大、(FeO) (MnO) (SiO₂) の減少を処理時間の関数として、また造滓剤添加量、除滓後のスラグ厚などを測定することによつて、処理時間に伴うスラグ組成の動きを予想した。すなわち、Fig. 3 に示すようにまず AP 昇熱後に最適スラグ組成となるよう、さらに GI 処理後に再び最適スラグ組成となるよう計算により造滓量を再調整することによつて、スラグコントロール精度を上げた。

Fig. 4 は、擬似三元系での処理中のスラグ組成の動きを調査したもので、△印は従来のスラグコントロール方法、○印は新しいスラグコントロール方法によるものである。従来法では、AP 後△から GI 後△に移動する過程で造滓しないため、△を最適スラグ組成領域に入れることは容易でない。これに対して改善した方法では、AP 後①から GI 処理を行う前に、スラグ組成修正のための造滓剤を投入することによつて、いつたん GI 処理前に②に移動させ、GI 処理後③に移動させる。その結



△ Conventional ○ New method
Number in △ and ○ is (S)/[S]

Fig. 5. Slag Composition after GI.

果③を最適スラグ組成領域内に入れることが容易となる。Fig. 5 はスラグコントロール結果を示しており、数値は (S)/[S] の実測値を表す。

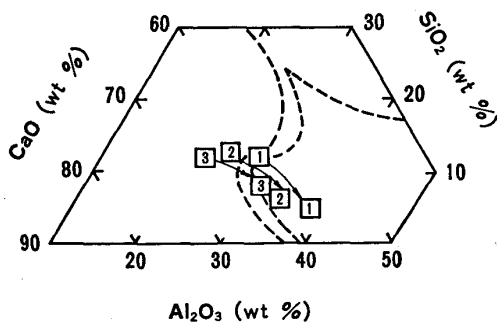
従来方法に対し、改善した方法ではスラグコントロール精度が向上しており、(S)/[S] の実測値も 200 以上が確保できている。

3.2 最適スラグ組成

超低硫鋼溶製のための最適スラグ組成は、スラグ-メタル反応が平衡に達したとすれば、Fig. 1, Fig. 2 に示したように S. P.=0.1 付近のライン上の組成が最適となる。ところが実機、特に強攪拌精錬においては、処理中に溶鋼中 Al, Si, 及びスラグ中 (Al₂O₃), (SiO₂) が変化するため、限られた処理時間内ではスラグ-メタル反応は平衡では進まない。[S] の減少速度は一般に一次式として(5)式で示されるが、ここで注目すべき点は平衡 [S] 濃度 [S]_e が処理中変化することである。川上ら¹⁾は [S]_e を平衡実験により求め(6)式を得た。

$$\frac{d[S]}{dt} = -\frac{A}{V} r K_s \{ [S](t) - [S]_e(t) \} \dots\dots (5)$$

A : Reaction Surface, V : Volume of Molten Steel



□→□ Change of slag composition during GI Treatment
1: Case 1 2: Case 2 3: Case 3

Fig. 6. Change of slag composition during GI.

K_S : Constant of Desulfurization Rate,

$[S]$: $[S]$ in Ladle

$[S]_e$: $[S]$ equilibrium

$$\frac{[S]}{[S]_e} = 1780 \times \frac{[Al]^{2/3}}{(S.P.)} \dots\dots\dots (6)$$

(S) : (S) Content in Slag $[S]_e$: Equilibrium $[S]$ Content in Ladle

ここで、強攪拌処理 (GI) 中の浴中 S の濃度変化は、処理中変化するスラグ組成及び Al に依存するため、まず、処理中のスラグ組成の動きを求めめる必要がある。

Fig. 6 は処理前のスラグ組成①, ②, ③がおのおのの処理進行とともに移動するスラグ組成の軌跡を矢印で示している。GI 処理中の Si , Al の濃度変化を実測により (7) (8) 式の一次式とし、(9) 式のマスバランスを用いて Fig. 6 の軌跡を、 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ の擬次三元系として求めた。

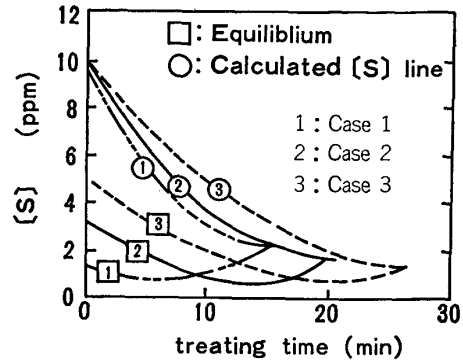
$$[Si] = at + b \dots\dots\dots (7)$$

$$[Al] = -ct - d \dots\dots\dots (8)$$

$$SiO_2 + \frac{4}{3} Al \rightarrow \frac{2}{3} Al_2O_3 + Si \dots\dots\dots (9)$$

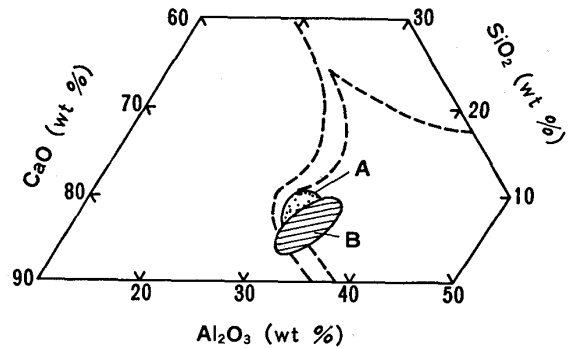
ここで GI 処理前に AP 処理によつて一次還元されているため、GI 処理中の (FeO) , (MnO) の減少量は $(FeO+MnO)$ で 0.5~1.0 wt% と、 (SiO_2) の減少量 4~6 wt% に対し少ない。従つて Al_2O_3 生成に寄与する (FeO) , (MnO) はマスバランスを考える上で無視しうる。このスラグ組成の軌跡より、 $[S]_e(t)$ を求めることができ、その $[S]_e$ を Fig. 7 の □印の線として示した。この $[S]_e(t)$ を 2 次関数と近似し (5) 式に代入すると、(5) 式は解析的に求めることができ、Fig. 7 の ○印の線として表される。①の $[S](t)$ は ①の $[S]_e(t)$ から求めたものである。ここで処理前の $[S]_i = 10 \text{ ppm}$, $[Al]_i = 0.090\%$, スラグボリューム 7 t, また、 rK_S は高橋ら³⁾の求めた 0.27 m/min を用いた。

$[S]_e(t)$ は最適スラグ組成の位置、すなわち、S. P.



$[S]_i = 10 \text{ ppm}$ $[Al]_i = 0.090\%$

Fig. 7. Change of $[S]$ in ladle during GI treatment.



A : Optimum composition in equilibrium condition
B : Aim region in actual operation

Fig. 8. Aim Region of slag control.

の最小点を通過した以降は S. P. の上昇、 Al の減少とともに上昇する。①のケースでは、処理の最初に最適スラグ組成点を通過してしまうので、 $[S] = [S]_e$ となつた処理 15 min 時にはすでに $[S]_e$ は 3 ppm まで上昇している。また、処理の最終に最適スラグ組成点を通過する③のケースでは、 $[S] = [S]_e$ となるまでには処理時間が 25 min と長く、温度降下デメリットが大きい。これに対し②のケースは、温度降下デメリットから考えて処理時間 20 min を目標として $[S]$ の最小値が得られる最適なパターンである。これは処理終了 5~7 min 前に最適スラグ組成点を通過するパターンであり、平衡では進まない実機では、最終目標スラグ組成が、必ずしも平衡論的に最適な組成ではないことを示している。

この考え方から、処理終了の最適スラグ組成は、Fig. 8 に示すように、平衡論的に最適な組成領域 A ではなく、少しずれた位置である組成領域 B となる。これは Fig. 5 の $(S)/[S]$ の実測点からみても、やや SiO_2 の下がつた位置が高い値を示すことでもわかる。こうして前述したスラグコントロールの目標値として、60%CaO-8% SiO_2 -32% Al_2O_3 を決定した。

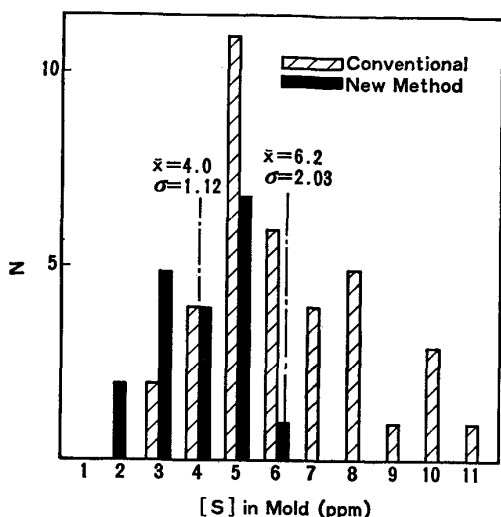


Fig. 9. Distribution of [S] in mold.

3.3 超低硫鋼の溶製結果

Fig. 9 は従来と改善後の鋼中 [S] の分布を示したもので、従来平均 6.2 ppm であったものが、改善後平均 4.0 ppm に低減した。

4. 超低酸素鋼の溶製

4.1 脱酸速度

脱酸は一般に脱酸生成物の浮上分離 (Output) と溶鋼の再酸化 (Input) とのバランスで進行する⁴⁾。[O] (全酸素量) の減少を模式的に表すと、(10)式に示される。

$$-\frac{d[O]}{dt} = -\frac{d[O]}{dt}_{Output} + \frac{d[O]}{dt}_{Input} \quad \dots(10)$$

$$\frac{d[O]}{dt}_{Input} = \left(\begin{array}{l} \text{スラグからの} \\ \text{酸素供給} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{耐火物からの} \\ \text{酸素供給} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{大気からの} \\ \text{酸素供給} \end{array} \right)$$

Input には、大きくはスラグの巻き込み、耐火物の溶損、空気酸化による酸素供給があり、そのほかにも RH では合金投入、RH 槽内の地金による酸素供給などが考えられる。

4.2 スラグからの酸素供給

一般に [O] を減少させるには、スラグ中 (T. Fe) を下げることが有効である⁵⁾。一方、スラグ中の (FeO) (MnO) が減少すると、(SiO₂) も無視し得なくなる。Fig. 10 は、強攪拌である GI にて、何も添加せず、20 min 攪拌した時の浴中 Al 減少量の実測値と、すべて SiO₂+4/3Al→2/3Al₂O₃+Si によつて Al が減少したと仮定し、浴中 Si の増加の実績値から計算した Al の減少値との関係を示したものである。この GI 処理では、AP による一次還元を終えているため、FeO+MnO≈1.0 wt% 前後の動きであり、Al の減少がすべ

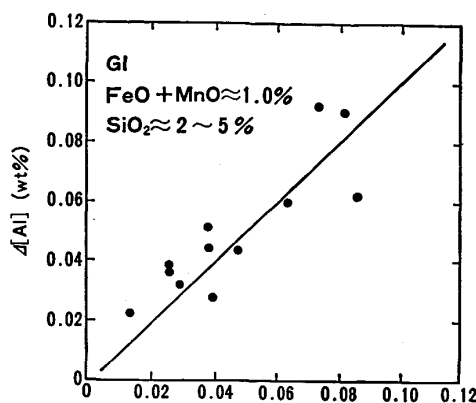
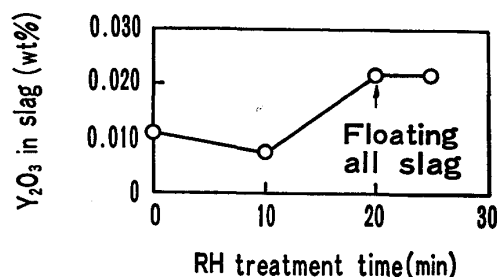


Fig. 10. Relation between experimental and calculated decrease of [Al].



Y₂O₃ deviation of analysis σ=4 ppm
Limitation of analysis ≥10 ppm

Fig. 11. Influence of Residual slag in ladle after casting on next heat refining.

て SiO₂ によるものであると仮定できる。この関係より、スラグを攪拌するような精錬例えば GI では、(FeO+MnO) が減少すると、(Al₂O₃) の生成源はスラグ中 (SiO₂) によるものと想定され、[O] の減少には、(FeO), (MnO) のほかに (SiO₂) も無視し得ない要素であることがわかる。

スラグからの汚染は上置スラグのほかに、取鍋に付着したスラグも汚染の大きな要因の一つである。出鋼中にトレーサーとして Y₂O₃ を 4 kg 投入し、その取鍋製造後のスラグ排滓時にスラグを約 1 t 残存させた取鍋を再度受鋼し、RH 処理中に Y₂O₃ がどのように浮上してくるかを調査した。Fig. 11 はスラグの付着した取鍋で受鋼した後の RH 処理中のスラグ中の Y₂O₃ の濃度変化を見たものである。受鋼中には鍋内に残存したスラグのすべては浮上しない。RH 処理 20 min 以降 Y₂O₃ の濃度が 0.022% と変化しないこと及び、Y₂O₃ の濃度がマスバランスから考えて約 0.026% であることから、残りのスラグは RH 処理中に浮上すると考えられる。従つて清浄鋼の溶製には、取鍋の清浄化も重要であることがわかる。

4.3 スラグ以外からの酸素供給

スラグ以外の Input 要因は耐火物主に取鍋, 空気酸化, 合金投入, RH では槽内地金などである. 取鍋では, シリカ鍋 (スリンガーマス) を用いると, GI 処理後浴中 $Al \approx 0.030\%$ の時で, GI 処理中の Al 減少が 0.050% もある. これはハイアルミナれんが鍋を用いた時に比較して 0.02% 大きい. この Al 減少分が鋼中酸素の増加となつている. このほか, 空気酸化の防止, 合金 (主に Al 投入後の攪拌時間の確保), RH の槽内地金管理などが清浄鋼溶製に不可欠な要素である.

4.4 [O] 減少速度の精錬炉による比較

(10)式の右辺を GI, RH の2種の精錬炉について定量的に把握することは困難であるため, 定性的に考察する. Table 3 に示すように, 空気酸化は GI でのシール強化, 耐火物についてはハイアルミナれんが鍋の使用によつてそれぞれ最小に押えることができるため, [O] の減少は主に, 脱酸生成物の浮上とスラグ汚染とのバランスにより進行すると考えられる. GI は強攪拌であるため, 浮上力も大きい, スラグの巻き込みも大きい. これに対して, RH では浮上力はそれほど大きくないが, スラグの巻き込みはかなり少ないことが想定される.

[O] の減少速度を経験上(11)式に示す一次式

$$-\frac{d[O]}{dt} = K([O] - [O]_{\infty}) \dots\dots\dots (11)$$

と仮定して GI, RH でののおのおの見掛け物質移動係数 K を求めたものを Fig. 12 に示す. GI, RH とも

Table 3. Comparison of deoxidation rate.

	$\frac{d[O]}{dt}$ Output	$\frac{d[O]}{dt}$ Input		
	Floating	Reoxidation by slag	Reoxidation by air	Refractory
GI	large	large	small	small
RH	middle	small	non	small

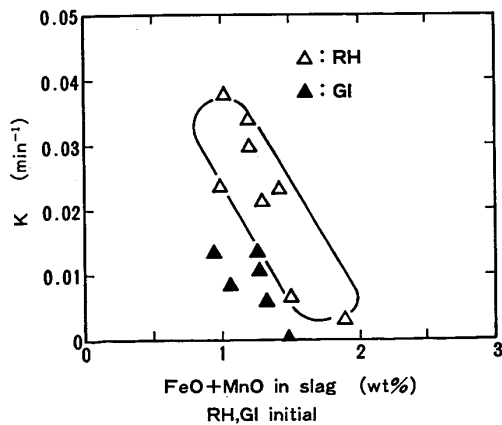


Fig. 12. Relation between reaction rate constant K and $FeO+MnO$ in slag.

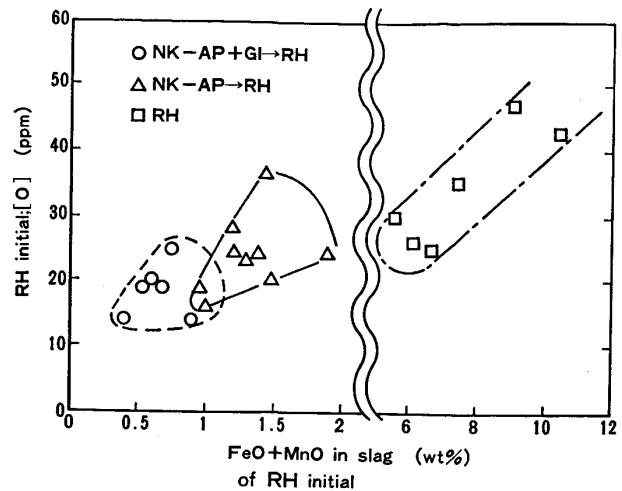


Fig. 13. [O] before RH treatment at several process.

に処理前のスラグ中 ($FeO+MnO$) 濃度に依存しているが, GI よりも RH の K が大きい. すなわち, RH では浮上力は GI ほど大きくないが, スラグからの巻き込みが極めて小さく, 結果として脱酸速度が大きかつたものと想定される. しかしながら Fig. 12 で明らかのように, スラグ巻き込みの小さい RH であつても, 脱酸速度がスラグ中 ($FeO+MnO$) に依存していることから, 処理前にスラグ中 ($FeO+MnO$) を下げておくことも脱酸速度増加の重要なポイントとなる.

4.5 清浄鋼溶製のための最適プロセス

4.4 項で示したように脱酸速度を大きくするためには RH 処理前のスラグ中 ($FeO+MnO$) を下げるのが重要である. Fig. 13 は RH 処理前にどの精錬プロセスをとつたものが最適かを示したものである. この図は, RH 処理前のスラグ中 ($FeO+MnO$) と [O] の関係を表している. 転炉出鋼後直ちに RH に到着したものに比べ, 弱攪拌精錬である AP 処理を行つた方が, スラグ中 ($FeO+MnO$) は低い. また強攪拌である GI を行くとスラグ-メタル反応がはやいため, 得られるスラグ中 ($FeO+MnO$) の値はさらに低く, RH 処理前に ($FeO+MnO$) ≤ 1 wt% を得ることができる.

以上述べてきたように脱酸速度の大きい精錬炉は RH であり, その RH にて脱酸速度をより大きくするには, RH 前に強攪拌を行い, スラグ中 ($FeO+MnO$) を下げておくことが重要である. すなわち Table 4 に示すように, 転炉出鋼後 VSC などにより転炉スラグを排除し, あらかじめスラグの酸素ポテンシャルを下げておく. 次に後の精錬での温度補償のために昇熱炉 AP により昇熱を行い, GI によつて強攪拌し, スラグ中 ($FeO+MnO$) ≤ 1 wt% まで下げ, 最後に脱酸速度の最

Table 4. Process and refining purpose for producing clean steel.

Process	LD→deslagging→ NK-AP (ladle refining) + GI (gas injection) →RH→CC			
	Removal of FeO, MnO	FeO+MnO ≤ 1 wt% Reheating		Removal of inclusion
Purpose of refining				

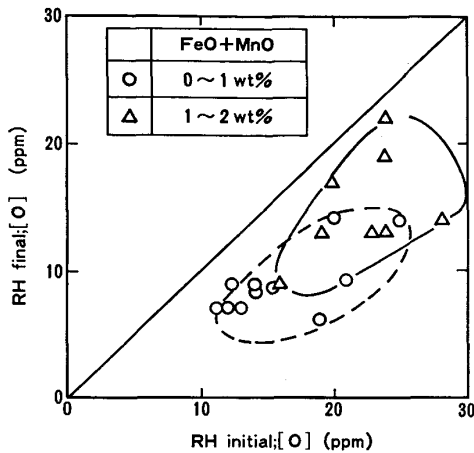


Fig. 14. [O] level in ladle.

も速い RH 処理を行う精錬プロセスが最適プロセスとなる。

4.6 超低酸素鋼の溶製結果

Fig. 14 の○印は Table 4 の最適プロセスにて処理した時得られた [O] 値を, RH 処理前後の値でプロットしたものである。参考として RH 処理前に強攪拌を行わないプロセスの時得られる [O] 値も示したが, スラグ中 (FeO+MnO)=1~2 wt% と高いために, [O] 値は高い値を示している。従つて RH 処理前に (FeO+MnO) ≤ 1 wt% とすることによつて, RH 処理後 [O] ≤ 10 ppm をほぼ得ることができる。

5. 超低硫, 超低酸素鋼溶製のための二次精錬プロセス

耐 HIC 鋼用素材など的高级鋼では, 清浄度の高い鋼すなわち低硫, 低酸素, 低燐化が同時に要求される。低硫鋼, 低酸素鋼はともにスラグ中, 浴中の酸素ポテンシャルを下げる点で一致しており, 目標とするスラグ組成は同じである。ところが二次精錬の使用目的は以下に示すように若干異なる。まず溶鋼昇熱は二次精錬を行う上で必須のプロセスである。低硫鋼の溶製にあたり, VSC は正確なスラグコントロールを実施するため, GI は到達 [S] を下げるためにそれぞれ必要である。(耐 HIC 鋼の場合には [H] を下げるため RH が必要) また低酸素鋼の溶製にあたり, VSC は (FeO), (MnO) などのスラグを除去するため, GI は (FeO), (MnO) をさら

に限りなく下げるため, RH はスラグの巻き込みを押え, 介在物の浮上を促進するために必要である。このように二次精錬の使用目的は若干異なるが, プロセスの順番はいずれも VSC→NK-AP→GI→RH である。従つてこれらの設備を十分に活用することにより, 両者を兼ねそなえた溶鋼を同時に溶製することが可能である。

6. 結 言

昇熱炉 (AP), 強攪拌炉 (GI), 脱ガス炉 (RH), スラグ除去装置 (VSC) の各二次精錬機能を活用することにより, 超低硫鋼 ([S] ≤ 5 ppm) および超低酸素鋼 ([O] ≤ 10 ppm) を得ることができた。これらを溶製するにあたり以下の結論を得た。

(1) スラグ-メタル反応が非平衡で進む実機では, 平衡実験で得られる脱硫のための最適スラグ組成と若干異なり, 処理後の目標組成は低 SiO₂ 側かつ高 Al₂O₃ 側に移行する。このため, 処理最終ではその組成を目標とするのが好ましく, 脱硫のための目標スラグ組成を 60%CaO-8%SiO₂-32%Al₂O₃ とした。

(2) 超低硫鋼を得るためにあつて除滓を行い, フラックスの計算投入を繰り返し行う方法により, 処理後のスラグ組成のばらつきは小さくなり, (S)/[S] ≥ 200 を確実に得ることができた。その結果 [S] ≤ 5 ppm が溶製可能となつた。

(3) 脱酸速度はスラグ-メタルを強攪拌する GI よりも攪拌の少ない RH の方が大きい。また RH 処理前にスラグ中 (FeO+MnO) ≤ 1 wt% とすることはさらに脱酸速度を大きくするのに有効である。これより, LD-VSC-AP-GI-RH という清浄鋼を得るための最適精錬プロセスを決定した。その結果, [O] ≤ 10 ppm が溶製可能となつた。

文 献

- 1) K. KAWAKAMI, Y. KIKUCHI, Y. KAWAI and M. TATE: Stahl. Eisen, 102 (1982), p. 227
- 2) J. CAMERON, T. B. GIBBONS and J. TAYLOR: JISI, 204 (1966), p. 1223
- 3) 川上公成, 高橋謙治, 菊地良輝, 碓井 務, 海老沢勉, 田辺治良: 鉄と鋼, 69 (1983), A33
- 4) 例えば梅沢一誠, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2034
- 5) 例えば, K. SCHWERTFEGER: Arch Eisenhüttenwes., 54 (1983), p. 87