

大森 尚* 三崎 規生** 玉田 滋基*** 中井 一吉**** 寺田 孝男***** 小高 幹男*****

Automatization of Tapping and Related Operations in Converter Steelmaking

Hisashi Ohmori, Norio Misaki, Shigeki Tamada, Kazuyoshi Nakai, Takao Terada, Mikio Kodaka

要旨

転炉における精錬作業の自動化は最近の重要課題の一つであり、全自動無人吹錬等も実施されている。しかしながら吹止め以後の出鋼作業、炉補修作業などに関してはまだまだ人手を介する割合が高い。当社においてはこれらの作業の自動化に取り組み、サイフォン式転炉出鋼孔による自動スラグカット法、この出鋼孔の自動着脱装置、および自動測温サンプリング装置を開発し、転炉作業全自動化の一環として大きな成果を挙げた。

Synopsis:

With the phase of blowing reached its full automation in converter steelmaking, one of the important subjects in recent years is the automatization of the rest of the operations which require man-power, such as operations at blow-end and tapping, and repairing of refractories.

Kawasaki Steel has recently developed a syphon tapping hole for automatic slag-cutting, automatic exchanging device for syphon tapping hole, and automatic sampling and temperature measuring device. These developments have achieved good results for automation of process operations in converter steelmaking.

1. 緒 言

転炉製鋼における一連の精錬作業の自動化は、最近の重要課題の一つであり、吹錬作業については、無人に近い全自動吹錬技術が完成している。一方、吹錬終了以降の出鋼に関する作業や、耐火物の補修作業については、依然として人力を要する作業が多く、省力の阻害要因となっている。

当社においては、サイフォン式転炉出鋼孔による精錬スラグの自動カット法と、その迅速自動着脱装置、および出鋼中の自動測温サンプリング装置などを開発し、転炉作業の自動化に大きく寄与している。本報告では、これらの概要とその効果についてまとめた。

2. サイフォン式転炉出鋼孔

2.1 サイフォン式出鋼の原理

サイフォン式転炉出鋼孔は、Fig. 1および2に模式的に示したU字型の出鋼管を転炉出鋼口に取り付け、出鋼最終時期に、Fig. 2中の H_m 、 H_s で示される溶鋼およびスラグの静圧の均衡によって、出鋼流を自動的に停止させ、スラグの取鍋への流入を防止するものである。

実際の出鋼時のスラグカット成立条件は、Fig. 2に示した状態における静的および動的な均衡を考え近似的に次式で表現できる。

$$\rho_m \cdot g \cdot H_m - \frac{1}{2} \rho_m \cdot V_3^2 > \rho_s \cdot g \cdot H_s + \frac{1}{2} \rho_s \cdot V_2^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

g : 重力加速度

管内における連続の式、および管内流速を決定する管径最小部における流速を表す式を、(1)式に代入すると、次式が得られる。

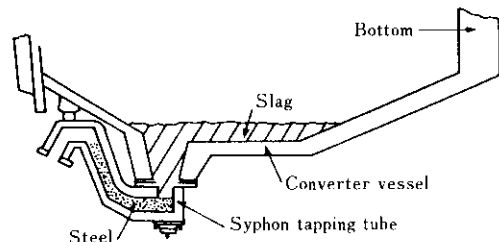
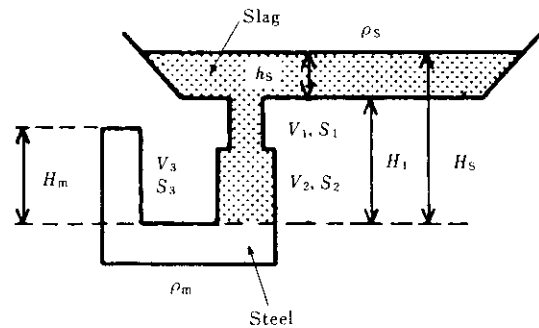


Fig. 1 Schema of syphon tapping tube showing final stage of tapping



H : Height
 V : Flowing velocity
 S : Cross sectional area
 ρ_m : Density of molten steel
 ρ_s : Density of slag

Fig. 2 Principle of slag cutting by using syphon tapping tube

* 技術本部企画調整室主査 (課長)
 *** 水島製鉄所保全部保全技術室
 ***** 千葉製鉄所保全部保全技術室主査 (掛長)
 (昭和58年3月17日原稿受付)

** 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室
 **** 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室主査 (掛長)
 ***** 知多製造所第2造管部シームレス管技術室

$$\frac{H_m}{H_s} > \frac{\rho_s}{\rho_m} (1 + \alpha) \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha = \frac{\left(H_1 + H_m + \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot h_s \right) \left\{ \rho_m \cdot \left(\frac{S_1}{S_3} \right)^2 + \rho_s \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \right\}}{\rho_s \cdot H_s} \dots\dots\dots(3)$$

Fig. 3は、スラグカット成立条件に関して、5 tおよび180 t 転炉における実験結果を(2)式と比較して示したものであるが、スラグ流出を完全に防止するためには、計算による限界値より余裕を見込んだ範囲とする必要がある。この結果に基づいて、サイフォン出鋼管の形状は、Fig. 3中に破線で示した関係を満足する仕様とした。

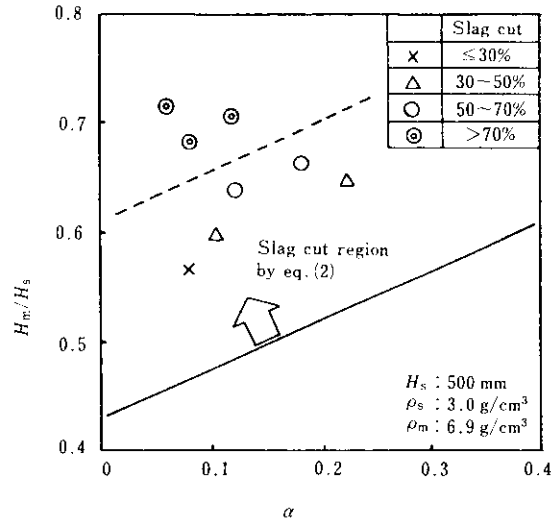


Fig. 3 Comparison of experimental results with calculated slag cutting region

2.2 ガス吹込みの効果

(1)式によれば、スラグカットをより確実に行うためには、サイフォン出鋼管入口における動圧を小さくすることが有効である。サイフォン出鋼管入口における出鋼流速を減少させる目的で、サイフォン管へのガス吹込みを実施した。Fig. 4は、ガス吹込みの模式的に示したものであるが、出鋼の前、中期においては、出鋼流とともに炉外へ排出されるガス流は、出鋼流速の低下ともなっており炉内へ浮上するようになり、さらに流速を低下させる。

出鋼流中に吹込まれた気泡の浮上条件は、Fig. 5の諸量を using 次式で与えられる。

$$\frac{4}{3} \pi \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^3 > \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^3 + C_d \cdot \frac{\rho_m}{2g} \cdot V_r^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\rho_m \gg \rho_s$ であるから、右辺の第一項を無視して次式が得られる。

$$d > \frac{3 \cdot C_d \cdot V_r^2}{4g} \dots\dots\dots(5)$$

- g : 動加速度, 980 cm/s²
- d : (cm)
- V_r : (cm/s)

出鋼中の条件下では、レイノルズ数は約 6×10^5 であり、 C_d は0.2程度である。このような状況下では、サイフォン管内は乱流状態となり²⁾、半径方向の任意の点 r における流速 V_r は、次式で与えられる。

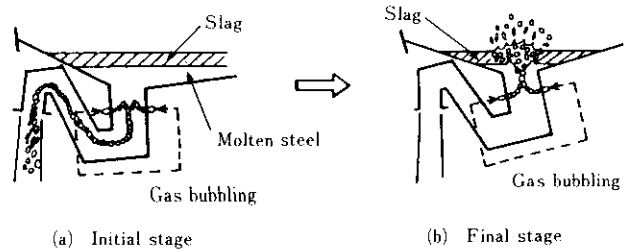


Fig. 4 Schema of gas bubble movement in syphon tapping tube at initial and final stages of tapping

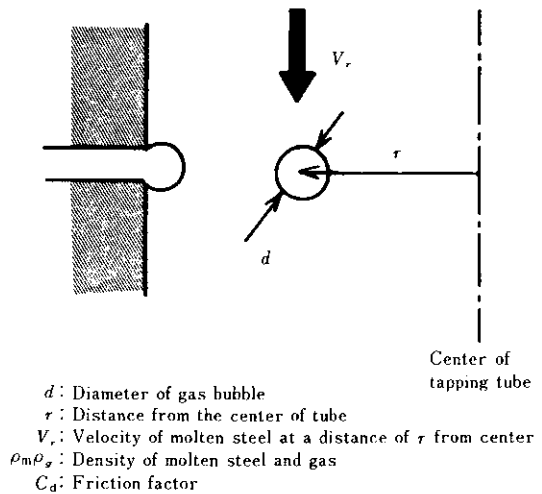


Fig. 5 Variables for behavior calculation of a gas bubble in syphon tapping tube

$$V_r = 1.18 V_{av} \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

r_0 : 管半径 (cm)

V_{av} : 溶鋼の平均流速 (cm/s)

(5), (6)式から、気泡の浮上臨界径、 d_c を求めると、次式が得られる。

$$d_c = 2.12 \times 10^{-4} \cdot V_{av}^2 \cdot \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

一方、静止浴中に吹込まれる気泡の軌跡を求めた Themelisらの実験値³⁾を用いると、ノズルから吹込まれた気泡の浮上する位置 r を得ることができる。

また、Davidsonらの式から、ガス流量と気泡径との間には次の関係が知られている⁴⁾。

$$d = 0.59 (V_g \cdot d_0^{0.5})^{0.289} \dots\dots\dots(8)$$

V_g : ガス流量 (cm³/s)

d_0 : ノズル径 (cm)

これらを参考にして、吹込みノズル位置とその径、吹込みガス流量を試算し、実機に適用した結果、ガス吹込みによる流速減少効果が認められ、スラグカットが安定した。

2.3 サイフォン式出鋼の効果

水島製鉄所第1製鋼工場の180 t 転炉に Photo. 1 の出鋼孔を装着し、実機実験を4期にわたって実施し、出鋼管出口高さの増加、出側流速の低下、ガス吹込みの採用等の改善を重ねた結果、現在では、Fig. 6に示したように、取鋼内流入スラグ厚さを30 mm以下とする成功率は、ほぼ100%に達している⁵⁾。

Photo. 1にサイフォン出鋼孔の外観を、Photo. 2に出鋼から



Photo. 1 A syphon tapping tube attached to 180 t converter

スラグカットにいたる状況を示す。

サイフォン式出鋼孔の採用によって、取鍋内に流入するスラグ量は大幅に減少し、スラグ厚さが従来の50~200 mmから15~30 mmに低減した。

その結果、Fig. 7に示すように、取鍋内における復燐量も0.001%以下と、安定して小さくなった。さらに、Alなどの合金鉄歩留の向上、取鍋耐火物原単位の低減などの効果も確認されている。

取鍋スラグ量の減少により、鋼浴表面からの熱放散が大きくなるため、浴鋼温度の降下量の増大が懸念されたが、適切な保

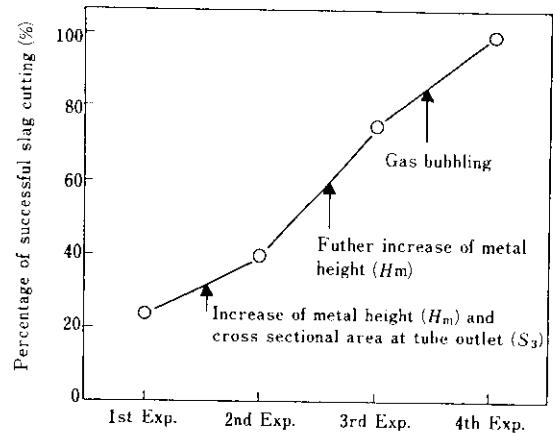


Fig. 6 Effects of some improvements on automatic slag cutting by syphon tapping tube

温材の使用などの対策によって、従来と同レベルに維持している。

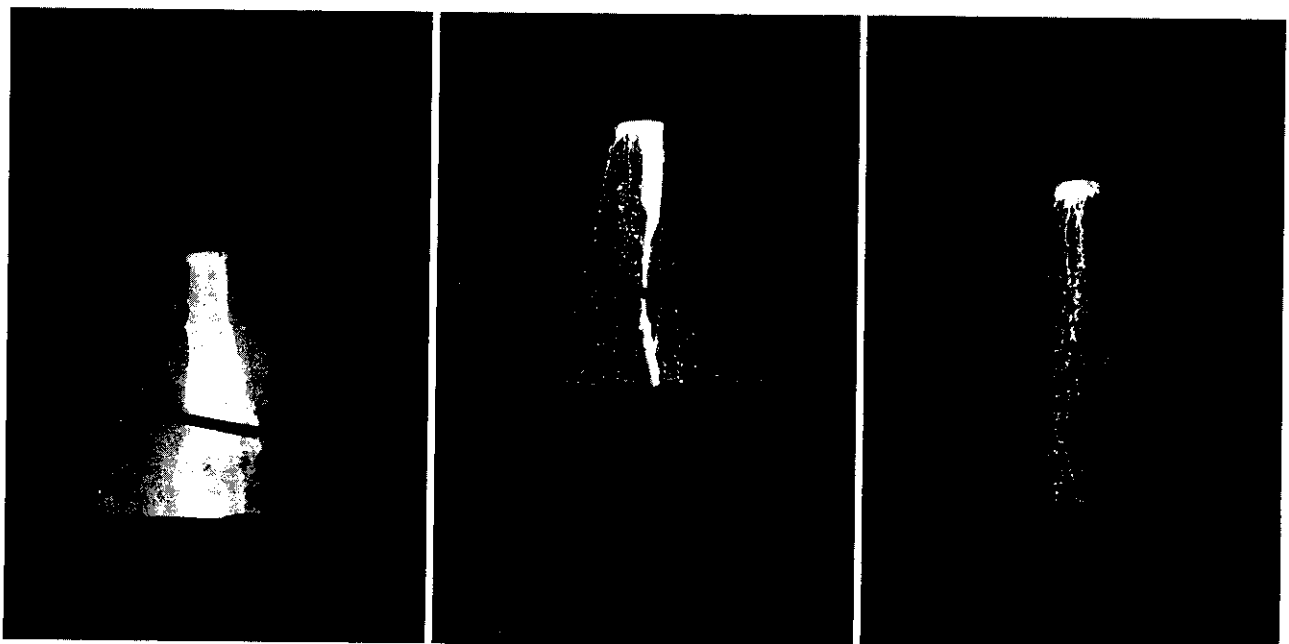
2.4 サイフォン式出鋼孔用耐火物

サイフォン式出鋼管の耐火物としては、大きなエネルギーをもつ溶鋼流による侵食、熱負荷の繰り返し等に耐え得る信頼性の高い特性が要求される。特に、衝撃の大きい湯あたり部は、その対策が必要であり、MgO-C系の耐火物を採用し、また交換可能な構造としている。その結果、平均出鋼温度が1660°C程度では、湯あたり部で0.5 mm/ヒート程度の損耗が観察される以外、特に大きな溶損は認められない。

現在では、サイフォン管1基あたり80~100ヒートの寿命を達成している。

2.5 サイフォン式出鋼孔の自動着脱

サイフォン式出鋼孔は、水島製鉄所第1製鋼工場において工程使用しており、その一連の交換作業には、Fig. 8に示した迅速



(a) Middle stage of tapping (b) Final stage of tapping just before slag cutting (c) Final stage of slag cutting

Photo. 2 Operation of automatic slag cutting by using syphon tapping tube at 180 t LD converter

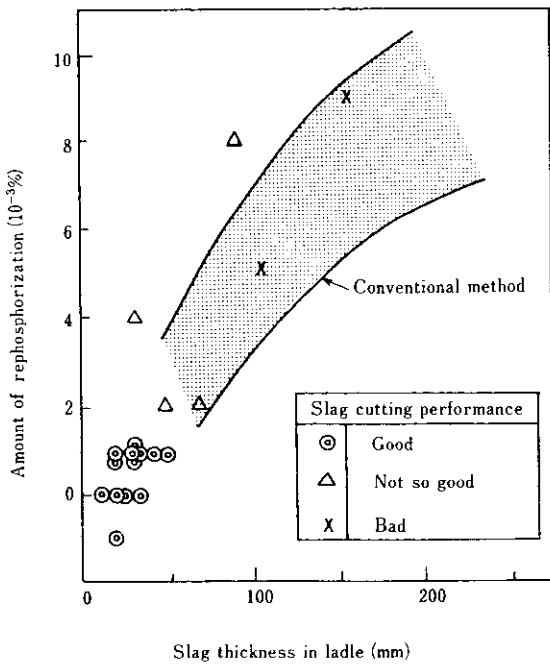


Fig. 7 Relationship between slag thickness and rephosphorization in ladle

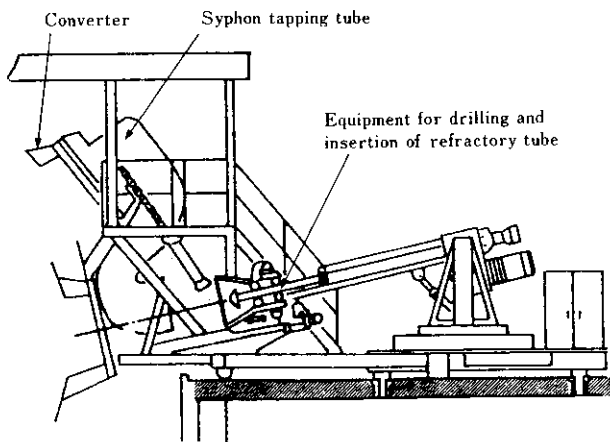


Fig. 8 Schema of automatic exchanging device of syphon tapping tube

着脱装置を用いている。この着脱装置は各炉共通で、交換時に転炉正面に据え付けられる。

サイフォン出鋼孔と転炉炉体とは、数本のフックで固定されるが、これらの締結、開放は短時間で操作が可能な構造となっている。交換に必要な前後作業についても、着脱装置に搭載された穿孔及びスリーブレンガ挿入の機構によって、遠隔操作により短時間で実施される。その結果、サイフォン式出鋼管の交換に必要な時間は、従来の出鋼口補修方式とほぼ同程度の60分以内となり、作業性が良く、安全性、信頼性の高い安定した作業が、可能となっている。

3. 出鋼中自動測温サンプリング装置

3.1 装置の概要

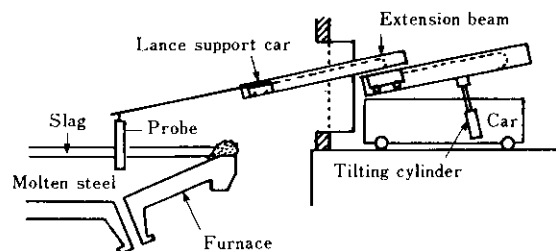
底吹き転炉あるいは上底吹き転炉においては、安定した吹錬

挙動と、センサーランスの活用により優れた終点制御性が得られる⁶⁾。この利点を活用してQDT (Quick and Direct Tapping) 法を開発し、大きな成果を挙げてきた⁷⁾。このQDT法において、取鍋内溶鋼成分の制御性の向上、および人力による測温サンプリングの廃止による安全性の向上のために、出鋼中の自動測温サンプリング装置を開発した。

Fig. 9は、本装置の概念図である。本装置は複数の転炉で共用できるように自走式とした。出鋼開始後、本装置の伸縮アームおよび伸縮アーム上のランスを転炉内に伸ばし、目標位置まで挿入する。次いで伸縮アームごとランスを傾動し、プローブを溶鋼内に浸漬させる。この一連の自動動作のサイクルタイムは、復帰する時間を含めて約35秒と短時間である。

本装置の特徴を以下に列挙する。

- (1) プローブを溶鋼に対して垂直に浸漬するので、良好な測定波形およびサンプルが得られる。
- (2) 設定値を変えることにより、溶鋼量、スラグ厚み、炉内形状等に応じて、ランスの下降位置を変えることができ、プローブの浸漬深さを最適に保てる。
- (3) ランスは、安全上の観点から、空冷2重管構造を採用している。
- (4) 下記A、B 2種類のプローブを使い分けることができる。
A: サンプリング、溶鋼温度測定、サンプルの凝固温度測定による溶鋼[C]の推定。
B: サンプリング、溶鋼温度測定、オキシゲンプローブによる溶鋼中酸素活量測定。



Velocity of car	Max. 30 m/min
Velocity and stroke of extension beam	600 mm/s, 2 950 mm
Velocity and stroke of lance support car	700 mm/s, 3 700 mm
Lifting velocity and stroke of lance	360 mm/s, 3 100 mm
Tilting angle of furnace at sampling	90~95°
Cycle time	30~40s

Fig. 9 Schematic drawing and specification of automatic equipment for sampling and temperature measuring during tapping

3.2 自動測温サンプリングの効果

3.2.1 取鍋内溶鋼成分の制御性の向上

QDT 操業では、Fig. 10に示すように、センサーランスを用いた終点制御技術による推定出鋼成分に基づいて、取鍋内溶鋼の成分調整を行っていた。本装置を用いて凝固温度から出鋼中の[C]を推定することにより、Table 1に示すように、取鍋内溶鋼の[C]、[Mn]のばらつきが減少し、平均値もそれぞれ0.001%、0.003%下がり、合金鉄の節約が可能となった。[Mn]のば

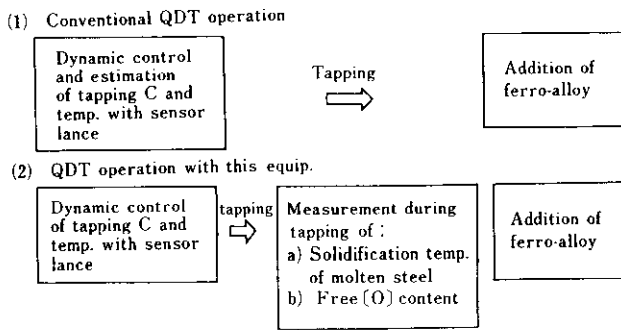


Fig. 10 Flow chart of QDT operation

Table 1 Compositional change of low carbon rimming steel in ladle by QDT operation with vs. without automatic sensor during tapping

	C		Mn	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Without sensor n=138	Standard	0.010%	Standard	0.018%
With sensor n=104	-0.001%	0.008%	-0.003%	0.015%

らつきが減少するのは、出鋼中の [C] の推定精度の向上により、間接的に出鋼中の [Mn] の推定精度が向上するからである。

一方、Al キルド鋼においては、鋼中の [Al] のばらつきを減らすことが、品質、コストの両面で重要である。[Al] のばらつきの原因である Al 歩留のばらつきは、多くの要因によって生ずるが、最も強い影響を与えるのが溶鋼中の酸素活性である。Fig. 11 は、出鋼中溶鋼の酸素活性の測定値と Al 歩留の関係を示しているが、明確な相関が認められる。この関係を用いて Al の添加量を決めることにより、Fig. 12 に示すように、取鍋内溶鋼の [Al] のばらつきは大幅に低減し、Al 原単位の低減も達成できた。

また、溶鋼中の酸素活性の測定値と [Mn] には Fig. 13 に示

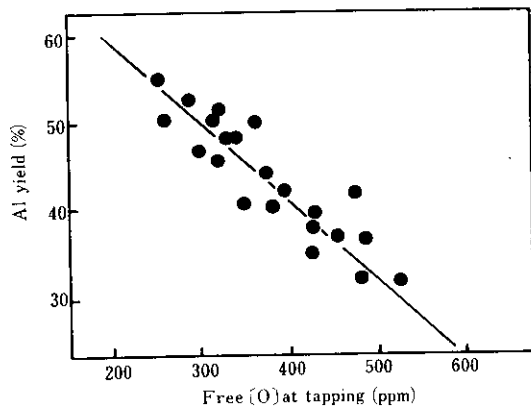


Fig. 11 Relationship between aluminum yield and free oxygen at tapping

すような強い相関があり、[Mn] の推定に酸素活性測定が役立つ。

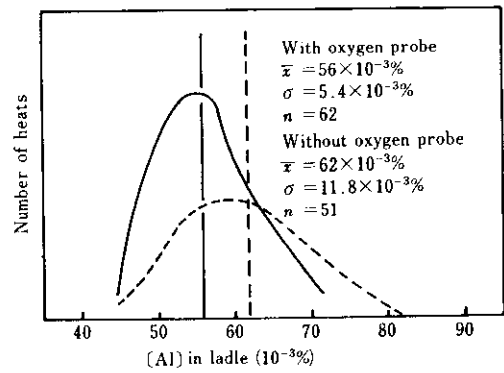


Fig. 12 Distribution of aluminum content of molten steel in the ladle

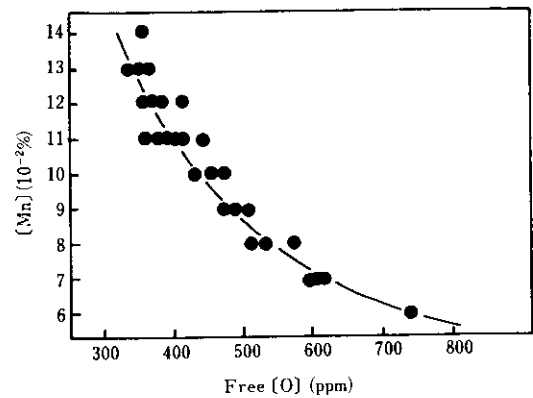


Fig. 13 Relationship between [Mn] and free [O] at tapping

つ。その精度は、A タイプのプローブを用いた場合とほぼ同等であり、十分に実用化できる。

3.2.2 安全性の向上

出鋼中に限らず炉内溶鋼の人力による测温あるいはサンプリングには、炉内スラグの突沸や、あるいは底吹きガスによるスラグの飛散などによる火傷の危険が伴った。本装置の採用により、転炉前方にオペレータが位置する必要がなく、上記の危険はなくなった。

4. 結 言

転炉操業における自動化の一環として、出鋼作業の自動化に取組み、サイフォン式出鋼孔とその自動着脱装置、および出鋼中自動测温サンプリング装置を開発した。その結果、サイフォン式出鋼孔にガス吹込みを行うことにより、取鍋内流入スラグ厚みを 30 mm 以下にすることが 100% 可能となった。

また QDT 操業時に、凝固温度による溶鋼中 [C] の推定や、オキシゲンプローブによる溶鋼中酸素活性の測定により、取鍋内溶鋼の [C]、[Mn]、[Al] のばらつきが減少した。

参 考 文 献

- 1) 飯田義治, 江本寛治ら: 鉄と鋼, 65(1979)4, S203
- 2) J. Szekeley and N. Themelis: Rate Phenomena in Process Metallurgy, [Wiley-Interscience] (1970)
- 3) N. Themelis, P. Tarassoff and, J. Szekeley: Trans. AIME, 245(1969)11, 2425
- 4) L. Davidson: AICHEJ.: 2(1956), 337
- 5) 大森尚, 藤山寿郎ら: 鉄と鋼, 67(1981)4, S228
- 6) 山田純夫, 数土文夫ら: 鉄と鋼, 64(1978)11, S590
- 7) 数土文夫, 山田純夫ら: 鉄と鋼, 64(1978)11, S591