

技術報告

UDC 621.746.047 : 669.141.241.2 : 621.746.3 : 669.046.558.5 : 669.71

Al・ワイヤ添加装置による連铸 Al キルド鋼の Sol・Al
含有量制御*

田中 駿一**・内堀 秀男**・半明 正之**・内田 繁孝**

“Al-Wire-Feeder System” for the Control of Sol・Al Content in
Continuous Casting of Al-Killed Steel

Shunichi TANAKA, Hideo UCHIBORI, Masayuki HANMYO, and Shigetaka UCHIDA

Synopsis:

The technique of aluminum addition into molten steel is very important on the steel processing of low carbon aluminum killed steels. In the first place, the yield of aluminium from a given addition is not constant since these steels are usually in the low carbon ranges, furthermore a very narrow range of Sol・Al value is required in such steels in view of the formability of their end products.

The steelmaking shop at Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K. has been producing large quantities of continuously cast slabs having stable Sol・Al value and excellent surface and interior quality from those killed steels treated with ladle additions of aluminium wire by means of the “Al-wire feeder” developed by the company. As a result of application of this method, the standard deviation of Sol・Al content in steel has been reduced from 0.011 to 0.008 percent.

1. 緒 言

Al は鋼の脱酸剤のうちでもつとも一般的な脱酸剤の一つである。さらに、Al は強力な脱酸元素であるばかりでなく、鋼のオーステナイト結晶粒の調整による機械的性質の改善、深絞り用冷延鋼板の非時効性の保持と加工性の向上、あるいは鋼中非金属介在物の形態制御元素としても添加される。

このように Al は非常に有用な添加元素である半面、その添加量、添加方法が適切でなければその添加目的を達せられないばかりでなく、逆に鋼の機械的性質の劣化や清浄性の低下などの不都合を生じる。なかでも冷延向深絞り用 Al キルド鋼の Al 添加方法は、従来より製鋼上の重要な課題である。それは第1に深絞り用 Al キルド鋼のごとき低炭素域の Al 単独脱酸においては、Al の歩留が不安定なことがあげられる。第2には、製品の加工性の面から狭い範囲の Sol・Al 値を要求されること、第3には、製品の用途の点から表面、内質ともに高度な清浄性が要求されることである。

日本鋼管、福山製鉄所製鋼工場では、当社で開発され

た Al ワイヤ添加装置による Al の取鍋内添加技術を、連続製造における深絞り用 Al キルド鋼の製造に適用して抜群に安定した鋼中 Sol・Al 値を得るとともに、表面内質ともに優れたスラブを大量に生産している。その生産量は、月間 80 000 t に達して当社の超深絞り用、深絞り用冷延鋼板用素材の主要な部分を占めている。

2. Al ワイヤ添加装置の開発経過

2.1 従来の Al 添加法

従来の Al 添加法のうちもつとも一般的な方法は、出鋼時に取鍋内に Al 塊または Al 粒を添加する方法である。この方法による Al の添加は比較的容易であり費用も安い。Al の溶解と反応が取鍋内の湯面近傍で起こるため、スラグや出鋼流に巻込まれた空気による Al の酸化損失が多く歩留が不安定である。そこで当社においてはパイプ状の Al コンテナ (Fig. 1) の開発を行ない、Al キルド鋼の Al の歩留の安定のために大きな成果をあげてきた。しかし、製品面からの Sol・Al 含有量制御に対する強い要望や、連続製造による Al キルド鋼の製造が本格的に始まるにともない、さらに厳しい Sol・

* 昭和 49 年 4 月本会講演大会にて発表、昭和 50 年 2 月 24 日受付 (Received Feb. 24, 1975)

** 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K. 1 Kokan-cho Fukuyama-shi 720)

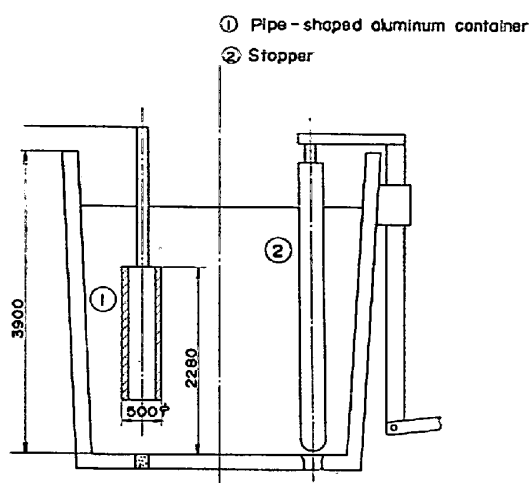


Fig. 1. Pipe-shaped aluminum container mounted on the 250 t ladle.

Al 含有量の制御が必要となってきた。これに対処するために考案された方法が、本報告で述べる取鍋内に Al ワイヤを添加する方法である。

2.2 取鍋溶鋼中における Al ワイヤの挙動

Al ワイヤを溶鋼中へ押込む方法でもっとも重要な点は、Al ワイヤの径と添加速度であるが、それは次に示すごとき条件を満たすように決めなければならない。

第1は、添加された Al ワイヤを溶鋼湯面下の十分に深い位置で溶解させることである。湯面近傍で溶解が起こるとスラグや空気による Al の酸化損失が多くなるとは明らかである。溶鋼中に添加された Al ワイヤの温度の時間変化は、一般的には (1) 式に示す非定常伝熱方程式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\theta(^{\circ}\text{C})$ は $t(\text{hr})$ 後の $x(\text{m})$ の位置における Al ワイヤの温度を示し、 λ , C , ρ はそれぞれ Al の熱伝導率 ($\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$)、比熱 ($\text{kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)、密度 (kg/m^3) である。

溶鋼温度を 1580°C 、添加前の Al ワイヤの温度を 25°C 、Al の融点を 660°C として (1) 式を円柱座標を用いて解くと、Al ワイヤの中心部が融点までに達する時間 $t(\text{hr})$ と Al ワイヤの直径 $D(\text{m})$ との関係は、(2) 式で示される。

$$t = 0.133 D^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

第2は、湯面下の十分に深い位置で溶解した Al がそのまま浮上することなく、浮力に打ち勝って溶鋼中深く侵入するだけのエネルギーを持つ必要がある。Al ワイヤの添加速度を $V_0(\text{m/sec})$ 、溶解点より $h(\text{m})$ だけ侵入した位置における溶融 Al の添加方向の線速度を V_1

(m/sec) とすると (3) 式の運動エネルギー保存法則が成立する。

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{Al}} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{Al}} V_1^2 + \int_0^h (\rho_{\text{Fe}} - \rho_{\text{Al}}) g dh \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで ρ_{Al} , ρ_{Fe} はそれぞれ Al および Fe の密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/sec^2) である。

第3には、溶融 Al の溶鋼内での反応、拡散を促進するためには、その流れが乱流であることが望ましい。すなわち、(4) 式に示す Re 数が乱流域であることが必要である。

$$Re = \frac{V_0 D}{\eta_{\text{Al}} / \rho_{\text{Al}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 η_{Al} は溶融 Al の粘性係数 ($\text{kg/m}\cdot\text{sec}$) である。

いま仮に、 $10\text{mm}\phi$ の Al ワイヤを 1580°C の溶鋼内へ添加したとすると、Al ワイヤの中心が融点までに達するに要する時間は (2) 式より 0.048sec と計算される。また (3) 式からは、溶鋼内 $2\sim 3\text{m}$ 程度の深さまで溶融 Al を侵入させるに要する添加速度 V_0 は $8\sim 10\text{m/sec}$ と計算される。すなわち $10\text{mm}\phi$ の Al ワイヤを $8\sim 10\text{m/sec}$ の速度で添加すれば、Al ワイヤの溶解は湯面下 $400\sim 500\text{mm}$ の位置で起こり、溶融した Al はさらに $2\sim 3\text{m}$ の深さまで侵入するエネルギーを有することになる。

なお、(4) 式において $\eta_{\text{Al}} = 1.9\text{CP}$ (700°C における粘性係数)、 $\rho_{\text{Al}} = 2.4$ とすると $Re \approx 126000$ となり、侵入する Al 融液の流れは乱流域にあるので、溶鋼との反応、拡散は十分起こりやすい状態であることが推定される。

2.3 Al ワイヤ添加法による鋼中 Sol-Al 制御

Al ワイヤによる Al の溶鋼内への添加実験は、日本鋼管京浜製鉄所 100 t 転炉工場 Fig. 2 に示すごとき Al ワイヤ添加装置で行なわれた。その結果、Sol-Al 制御に必要な種々の要因が解明され、Al ワイヤ添加装置が鋼中 Sol-Al 制御の有力な手段となり得ることが明らかとなった。

たとえば、連鑄法の場合のモールド内鋼中 Sol-Al は (5) 式または (6) 式に示すごとき実験式により、非常によい一致を見ることができた。

i) すべての Al を Al ワイヤで添加する場合の例 (Sol-Al)_M

$$= \left\{ \text{添加 Al ワイヤ} (\%) - \frac{54}{48} [\text{O}] - G(t) - C \right\} \times k$$

ii) 通常の方法で取鍋内に Al を添加した後、Al ワ

イヤで Al の補正添加を行なう場合の例

$$\begin{aligned} (\text{Sol} \cdot \text{Al})_M &= \{(\text{Sol} \cdot \text{Al})_L + \text{添加 Al ワイヤ}(\%) \\ &\quad - G(t) - C\} \times k \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで

$(\text{Sol} \cdot \text{Al})_M$; 連铸モールド内の溶鋼中 Sol・Al (%)

$(\text{Sol} \cdot \text{Al})_L$; Al ワイヤ添加前の取鍋溶鋼中の Sol・Al (%)

[O] ; Al ワイヤ添加前の溶鋼中 O (%)

$G(t)$; 取鍋のガスバブリング中に酸化損失される Al 量 (%)

C ; ガスバブリング中以外に取鍋レンガやスラグによつて酸化損失される Al 量 (%)

k ; 取鍋からモールドに到る間の溶鋼中 Sol・Al の酸化損失に対応する酸化損失係数

$G(t)$, C および k はいずれも実験により求められるものであり, $G(t)$ はガスバブリングの方法によつて変わり, C は取鍋内スラグの量, 取鍋耐火物などによつて変化する. さらに k については, 取鍋, タンディッシュ間のエアシールの有無, タンディッシュスラグの量, タンディッシュ耐火物の種類, 補修方法あるいは浸漬ノズル材質など多岐に渡る要因の集積されたものとして求めるものであり, (5), (6) 式において示したごとく,

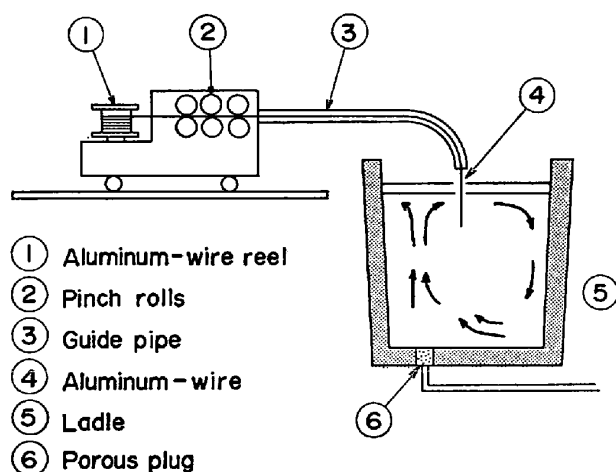


Fig. 2. Aluminum wire feeder.

取鍋内 Sol・Al 値に比例するものとして処理するのが経験的には簡便な方法である.

本報告に示す連続铸造深絞り用 Al キルド鋼の Sol・Al 制御には上記の ii) 項の方法を適用した. それは, i) 項で示したとき Al の全量を Al ワイヤで添加する方法では, 溶鋼中 [O] の簡便な測定あるいは推定が必要であり, それは比較的難しいからである.

3. 連铸向深絞り用 Al キルド鋼への Al ワイヤ添加システムの適用

3.1 連铸向深絞り用 Al キルド鋼の Sol・Al 制御の問題点

福山製鉄所第 2 製鋼工場は, 250 t の純酸素転炉を 3 基有し, 処理能力 350 万 t/年 の普通造塊設備と合計 300 万 t/年 の処理能力を持つ 2 ストランドの円弧型連铸機を 3 基有している. 当連铸機における深絞り用 Al キルド鋼の生産は, 1970 年 2 月のスラブ連铸機の稼動とともに始まり, 1971 年 3 月, 5 月の新たな 2 基のスラブ連铸機の増稼動とともにその生産量は飛躍的に上昇し, 70 000~80 000 t/月 を生産している (Fig. 3)

深絞り用 Al キルド鋼の化学成分規格の一例を Table 1 に示す. Al ワイヤ添加法が当鋼種に適用されるまでは, Al はすべて出鋼中に添加された. 添加方法は Fig. 1 で示した Al コンテナ法で, 調整用として 1 kg の塊 Al が用いられた. 添加量は終点 [C] によつて決めたが, 次に示すとき問題によつて Sol・Al 制御はかなり難しい.

i) 終点 [C] などで溶鋼中 [O] を推定し Al 添加量を決定するのは, 当鋼種のごとき低炭素域では難しい.

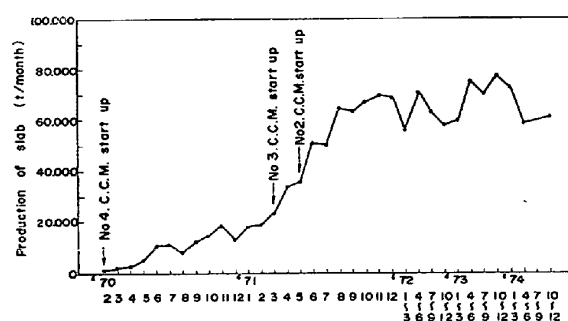


Fig. 3. Production output of deep drawing aluminum-killed steel.

Table 1. Chemical composition of aluminum-killed steel.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Sol・Al
≤0.06%	tr.	0.25~0.40%	≤0.015%	≤0.025%	≤0.08%	0.030~0.065%

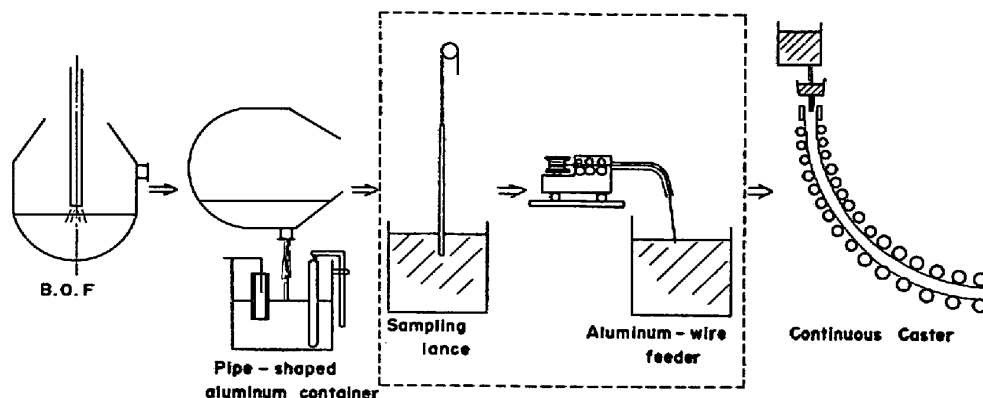


Fig. 4. Aluminum wire feeder system.

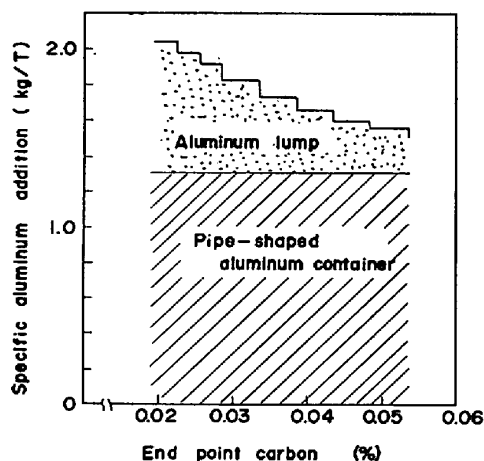


Fig. 5. Aluminum added in the ladle during tapping.

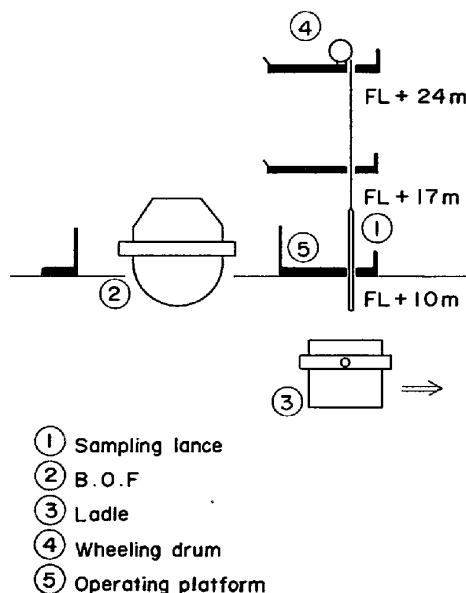


Fig. 6. Ladle-sampling equipment.

ii) 出鋼口の状況によって出鋼中に溶鋼とともに巻込まれる炉内スラグや空気の量が変化して、酸化損失 Al 量が大きく変化する。

iii) 鑄造前の溶鋼温度調整時に取鍋内溶鋼の攪拌が必要であり、その攪拌時間の長短によつて Al の酸化損失量が変化する。

以上のごとき理由により、Al ワイヤ添加システムが採用された。Al ワイヤ添加システムは Fig. 4 に示すごとく、取鍋内溶鋼サンプリング測温装置と取鍋内溶鋼への Al ワイヤ添加装置とから構成されている。

3.2 取鍋内サンプリング装置

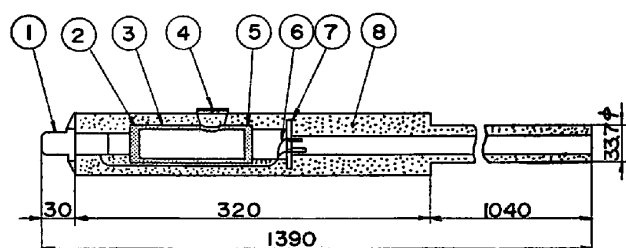
深絞り用 Al キルド鋼は転炉で [C] を 0.050% 以下に吹精された後、Fe-Mn, Al を取鍋に添加しながら出鋼される。添加される Al の量は Fig. 5 に示すごとく終点 [C] によつて決める。添加される Al のうちで一定量は Fig. 1 に示したごときあらかじめ取鍋に保持されたパイプ状のコンテナであり、残余の Al は出鋼

流落下点に添加される 1 kg の塊 Al である。添加される Al の総量は、あとで Al ワイヤで調整することを前提として若干不足気味に設定してある。

出鋼終了後、取鍋は転炉作業デッキ下まで移動され、Fig. 6 に示すごときサンプリングランスで溶鋼の測温と Total Al 分析用のサンプル採取が行なわれる。サンプリングランスはモーター駆動で転炉作業床より操作する。サンプリングランスに装着するサーモ・サンプラーの構造は Fig. 7 に示すごとく、溶鋼の測温とサンプリングが同時に行なえる機構となつている。

サンプリングは添加された Al の溶解完了後 2 min 程度経過した時点で行なう。Al の分析はカウンタメーターによる急速分析が可能という点から考えて、Total Al 値を用いざるを得ない。一方、Total Al 値は溶鋼中に浮遊している Al_2O_3 の Al をも含む訳であるから、

Al の溶解終了後からサンプリングまでの時間の長短による Al_2O_3 の Al の量の変化を調査した。溶鋼中 Al_2O_3 に対応するものとして、ここでは酸に不溶性の Al (Insol-Al) を用いた。その結果は Fig. 8 に示すごとく Insol-Al は Al の溶解終了後数分は徐々に減少する傾向を有するが、そのバラツキは比較的少なく、Al 溶解完了後 2 min を経た時点で $0.010\% \pm 0.002\%$ 程度と比較的安



- | | |
|----------------------|---------------|
| ① Protector | ⑤ Washer |
| ② Bottom steel plate | ⑥ Compensator |
| ③ Steel pipe | ⑦ Connector |
| ④ Steel sheet | ⑧ Paper tube |

Fig. 7. The structure of a thermo-sampler.

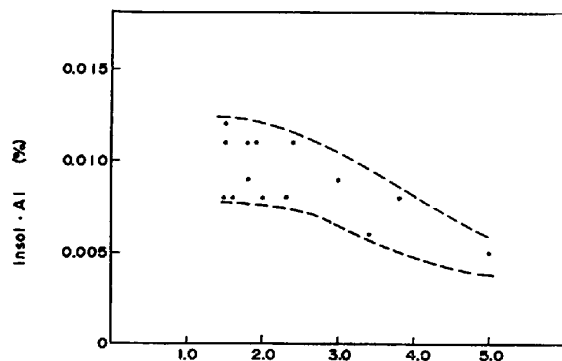


Fig. 8. Relation between the time from aluminum addition and Insol-Al in molten steel.

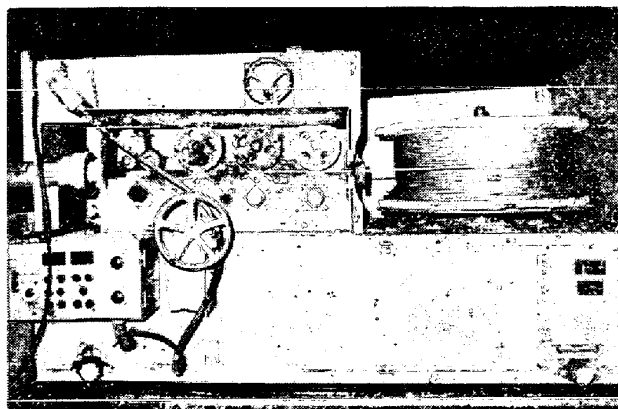


Photo. 1. Appearance of aluminum-wire feeder.

定した値を示している。したがって、取鍋内サンプリングによる Total-Al の分析値はこの 2 min 経過後の値を用い、(Total-Al 分析値-0.010%) をこの時点の取鍋内 Sol-Al の推定値とした。

3.3 Al ワイヤ添加装置

サンプリングの終了した鍋は取鍋輸送台車で連铸ヤードまで運ばれる。連铸ヤードには温度調整用の固定取鍋スタンドを有し、そこで N_2 ガスバブリングによる温度調整と Al ワイヤの添加が同時に行なわれる。

Al ワイヤ添加装置の設備概要を Table 2 に、外観写真を Photo. 1 に、Al ワイヤの添加状況を Photo. 2 に示す。使用される Al ワイヤは焼鈍ずみの $9.5\text{mm}\phi$ のものである。Al ワイヤの送り装置は AC220V, 5.5kW の可変速電動機と無段変速機を組み合わせたもので、無段変速機より単列 3 段のピンチロールに出力を与え、ピンチロールの回転力で Al を送り出すものである。送り出された Al ワイヤは導管を通つて取鍋内溶鋼へ導かれる。Al ワイヤの添加位置はガスバブリングのために設けられたポーラスレンガの直上は避け、取鍋中央部である。

容量 200 kg の Al ワイヤのリールは電磁ブレーキを内蔵した減速電動機で駆動され、Al ワイヤの添加を停

Table 2. Specifications of aluminum-wire feeder.

Diameter of aluminum wire	9.5 mm ϕ (annealed)
Capacity of aluminum-wire reel	200 kg
Pinch roll motor	Variable speed motor (220 V, 5.5 kW)
Feeding speed of aluminum wire	0.8~8.0 m/sec.
Aluminum-wire reel motor	Geard motor (electromagnetic brake type)
Machine weight	2 000 kg
Operator	1

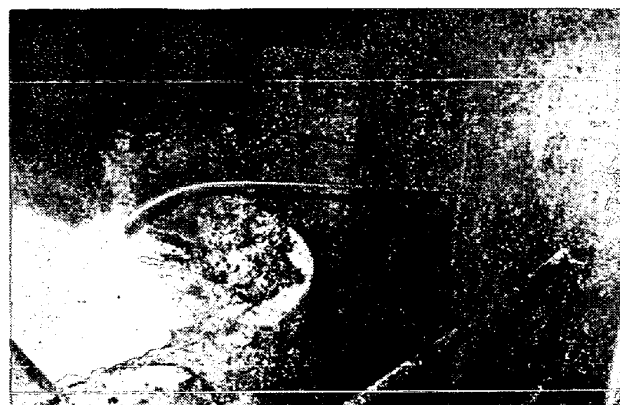


Photo. 2. Operation of aluminum-wire feeding.

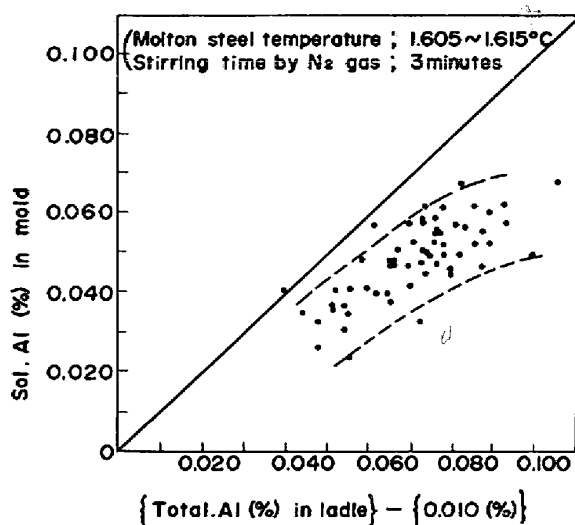


Fig. 9. Relation between Total Al (%) in ladle and Sol Al (%) in mold.

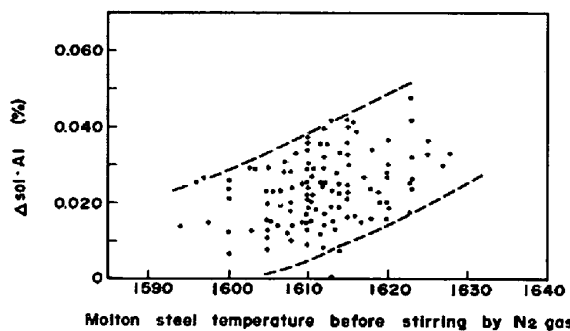


Fig. 10. Effect of molton steel temperature on burn-off loss of aluminum in steel.

止する際には回転力のついたドラムに制動力をかける。Al ワイヤの添加速度は 8m/sec である。N₂ ガスは鍋底にセットされたポーラスレンガより 3~5 kg/cm² の圧力で吹き込まれ、温度の均一化、添加 Al の均一化および溶鋼の清浄化の働きを持つ。温度の均一化のみでも最低 3 min 間の N₂ ガスバブリングが必要である。

Al 添加量は取鍋内 Total Al 分析値と取鍋溶鋼温度により決定される。Fig. 9 は Al ワイヤ添加法を採用する以前の Sol Al 推定値 (Total Al (%) - 0.010%) と連铸モールド内の Sol Al 値との関係を示したものである。ただし、データの対象はすべて N₂ ガスバブリング時間が 3 min 間の標準的ヒートを選定した。勾配 45° の直線との差が出鋼直後より铸造中期のモールド内までの Al の酸化損失量を示すものである。低 Sol Al 域で 0.020%, 高 Sol Al 域では 0.030% 程度に達することが判る。

この酸化損失 Al 量 (ΔSol Al) は溶鋼温度、スラグの量、スラグの酸化度、スラグの温度、N₂ ガスバブリ

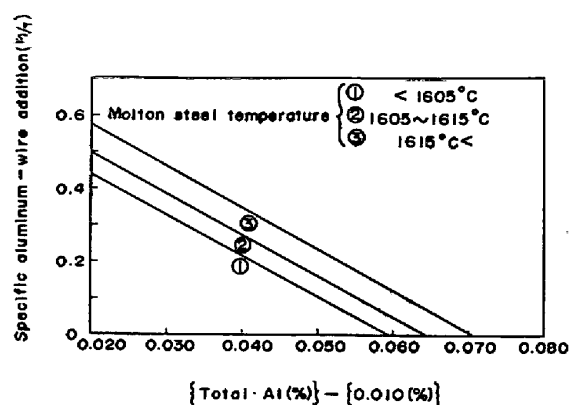


Fig. 11. Standard of aluminum-wire addition.

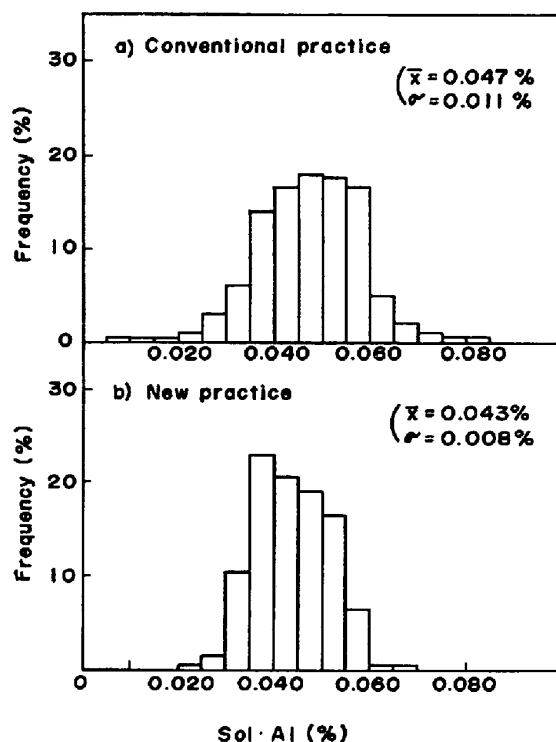


Fig. 12. Comparison of Sol Al distribution between conventional practice and new practice.

ング時間などに関連することは容易に推定されるが、その中でも溶鋼温度との相関がもっとも強い。それはスラグの反応性、温度調整のための N₂ ガスバブリング時間などの Al の酸化損失要因と溶鋼温度との関連が強いと考えられる。

Fig. 10 は N₂ ガスバブリング前の取鍋内温度と ΔSol Al の関係を示したものである。

取鍋内 Al が以上のごとき挙動を示すことから、Al ワイヤの添加基準は Fig. 11 に示すごとく Total Al 値と溶鋼温度との関数として決められる。すなわち、Total Al 値のある限度以下のヒートに対してその Total Al 量

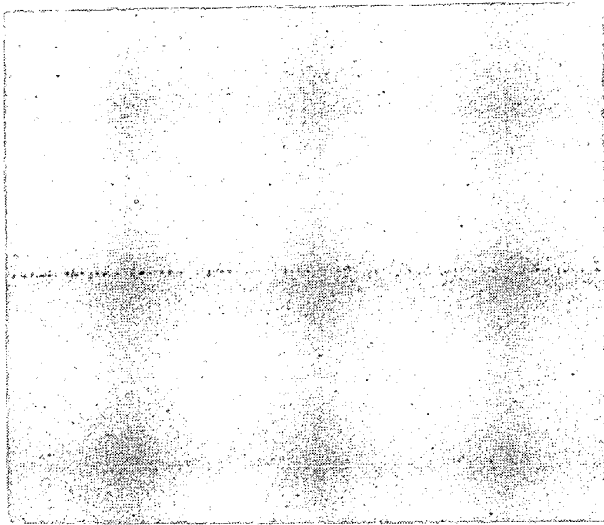


Photo. 3. Sulfur print of Al-killed slab treated by aluminum-wire feeder. ($\times 1/3$)

が低い程、また N_2 ガスバブリング前の温度が高い程、Al ワイヤの添加量が多くなる。さらに、スラグの量、スラグの酸化度、 N_2 ガスバブリング時間などの要因を加味して、コンピューターによる Al ワイヤ添加量の決定法を鋭意検討中であり、今後が期待される。

3.4 Al ワイヤ添加システムの適用効果

Al ワイヤ添加システムによる深絞り用 Al キルド鋼の Sol・Al 制御の効果は Fig. 12 に示すとおりである。すなわち、Sol・Al 値の分布の標準偏差が 0.011% から、0.008% に大幅に改善された。その結果、次に示すごとき効果が得られた。

i) Sol・Al 規格はずれによる運用変更ヒートが減少した。また、最終製品の機械的性質の良好な Sol・Al 範囲に分布するようになった。

ii) Sol・Al < 0.020% の発生ヒートが皆無となった。一般に低 Sol・Al スラブの表面はブローホール、ノロ嚙みなどの表面欠陥が発生しやすい。したがって、Sol・Al の安定によりスラブのスカーフィング損失も減少した。

なかでも品質の安定はスラブ表面スカーフィング量の減少に大きく貢献し、もつとも表面性状の厳しい用途に対しても 2% のスカーフィング量で十分である。

当然のことながら、内部清浄性に対する Al ワイヤの添加の影響は全くない。それは、Al ワイヤの溶解、反応が溶鋼湯面下で起こるため、Al ワイヤ添加によつて新たに Al の酸化生成物が溶鋼中で発生することがないことに起因していると考えられる。Photo. 3 に Al ワイヤを 0.3 kg/t 添加のスラブの S プリントを示すが、 Al_2O_3 クラスターの量は非常に少なく、通常の Al ワイヤを添加しないものと同様に清浄性は高い。

4. ま と め

取鍋内 Al ワイヤ添加法は、Al の溶解、反応を溶鋼表面下において起こらせることが可能なため、Al の歩留の安定に効果的である。日本鋼管福山製鉄所では Al ワイヤ添加法を連鑄向深絞り用 Al キルド鋼に適用し、Sol・Al の安定に大きな成果をおさめた。その方法は、出鋼終了後の取鍋内溶鋼の测温、サンプリング装置と、Al ワイヤ添加装置とを組み合わせたシステムで、溶鋼の Total・Al 値と溶鋼温度を知つて Al ワイヤ添加量を決め、Sol・Al 値を目標値に制御する方法である。その結果、Sol・Al 値の分布の標準偏差が 0.011% から 0.008% に改善され、Sol・Al 値の安定による深絞り用冷延鋼板の機械的性質の安定とスラブ表面性状のバラツキの減少によるスカーフィング損失の減少、脱酸不良による作業事故の減少などの効果が得られた。

さらにこの Al ワイヤ添加システムの適用は深絞り用 Al キルド鋼のみならず、各種の鋼に適用し微妙な Sol・Al 制御、特に低 Sol・Al 鋼種の脱酸制御には大いに威力を発揮している。

参 考 文 献

- 1) 根本, 川和, 他: 鉄と鋼, 58 (1972) 3, p. 387