

(技術資料)

# 新ESRによる高品位ロール製造技術

## High-quality Work Roll Manufacturing Technology Using New ESR



佐藤 潤\*  
Jun SATO



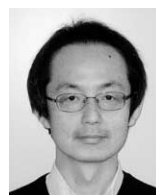
岩永浩司\*  
Kouji IWANAGA



富岡 篤\*  
Atsushi TOMIOKA



西口克茂\*  
Katsushige NISHIGUCHI



中嶋宏樹\*\*  
Hiroki NAKASHIMA



石田 斉\*\*\*  
Hitoshi ISHIDA

As work rolls for cold rolling (hereinafter referred to as rolls) have a stringent requirement for a high degree of surface and internal quality, the rolls are generally made from ESR (Electro Slag Remelting) ingots, which assures stable quality. In order to produce rolls with good dendrite pattern, a fine and uniform dendrite structure with no flow pattern is necessary. Segregation lines called freckle are sometimes generated in the ingots. Freckle should not be generated within the range of use of the rolls. In recent years, the equipment was upgraded, and a great improvement was seen in surface quality and internal quality.

ま え が き＝冷間圧延用ワークロールは、薄板用鋼板を冷間で圧延するとき使用されるロールである。表面および内部品質の要求が厳しいため、これらに対して安定した品質が保証できる ESR (Electro Slag Remelting) 鋼塊が一般的に使用されている。ロール表面の耐肌荒れ性に対して流れ模様のない微細で均一なデンドライト模様が必要である。また、鋼塊の内部には、材質によってフレッケルと呼ばれる偏析線が発生するが、ロールの有効使用範囲にフレッケルが現出してはならない。このような厳しい品質要求に対応するために、2007年に ESR 設備の更新を行い、表面品質および内部品質の大幅な向上を実現したので報告する。

### 1. 冷間圧延用ワークロール製造方法と求められる特性

冷間圧延用ワークロール（以下、ロールという）は、EF(電気炉)→LF(取鍋精錬炉)→下注造塊→ESR→鍛錬・熱処理→機械加工の工程で製造される。ESR 法は、目的とする金属を消耗電極とし、水冷铸型内で熔融スラグ層に大電流を流すことによって抵抗熱を発生させて電極を溶解する再溶解法の一つである。液滴状となった溶鋼はスラグ層を通過し、逐次凝固して鋼塊となる。得られた鋼塊は清浄度に優れており、ロールや航空機用部材などの高付加価値製品の製造に用いられている。

ロールの製品品質は ESR 後の鋼塊品質に大きく影響を受け、表面のデンドライト組織が微細で均一であること、およびフレッケルと呼ばれる溶鋼成分の正偏析が使用範囲内に現出しないことが求められる。ロールはその使用条件によって求められる品質が異なり、飲料水用缶材を圧延するために用いられるブリキ圧延用ロールは、とくにその表面に微細で均一なデンドライト組織が必要である。ブリキ圧延用ロールの中でも使用後のロールを

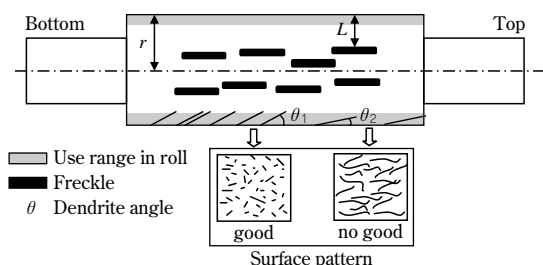


図 1 ロール材に必要な品質  
Fig. 1 Necessary quality for roll material

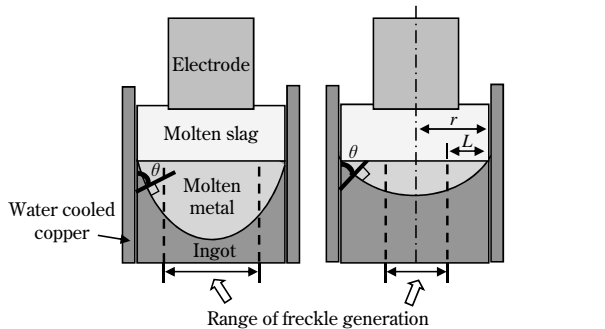
再加工して使用する再生ロールは、厳しい表面品質に加え、通常のロールの約 2 倍の深さまでフレッケルが現出してはならない。

表面デンドライト組織を微細化するためには铸型と鋼塊のデンドライト成長方向との角度を大きくする必要があり、デンドライト角度によってロールの表面組織を評価することが可能である。本稿では、表面品質の評価指標としてデンドライト角度  $\theta$  を、内部品質の評価指標としてフレッケル深さ  $L/r$  ( $L$ : 鋼塊外周からのフレッケル発生距離,  $r$ : 鋼塊半径) を使用し (図 1), それらの指標の改善内容について述べる。

### 2. デンドライト角度とフレッケル深さの関係

デンドライトは溶鋼プール形状 (凝固界面) に垂直に成長するため<sup>1), 2)</sup>, デンドライト角度を大きくするには溶鋼プール側面を铸型にできるだけ平行にする必要がある。一般的に、溶解速度が速くなると溶鋼プールは深くなり、デンドライト角度は大きくなる。一方、フレッケルは、濃化溶鋼が浮上して凝固層に捕らえられたものであり、溶鋼プールが浅いほど発生しにくい<sup>3), 4)</sup>。溶鋼プールを浅くするためには溶解速度を遅くする必要がある。すなわち、デンドライト角度とフレッケル深さは相

\*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鋳鍛鋼工場 製鋼製造部 \*\*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鋳鍛鋼工場 技術開発部 \*\*\*技術開発本部 材料研究所



Melting rate	High	Low
Molten metal depth	Deep	Shallow
Dendrite angle ( $\theta$ )	Big(good)	Small(no good)
Depth of freckled region ( $L/r$ )	Small(no good)	Big(good)

図2 溶解速度、溶鋼プール深さ、 dendrite 角度 ( $\theta$ ) およびフレックセル深さ ( $L/r$ ) の関係

Fig. 2 Relationship between melting rate, molten metal depth, dendrite angle ( $\theta$ ), and depth of freckled region ( $L/r$ )

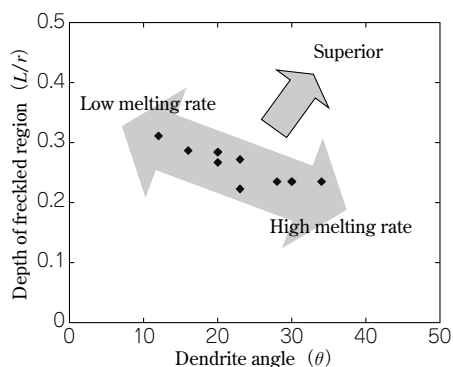


図3 dendrite 角度とフレックセル深さの関係

Fig. 3 Relationship between dendrite angle and depth of freckled region ( $L/r$ )

反する関係があり、溶解速度が速いと、 dendrite 角度  $\theta$  は大きくなり、フレックセル深さ  $L/r$  は小さくなる。逆に、溶解速度が遅いと dendrite 角度  $\theta$  は小さくなり、フレックセル深さ  $L/r$  は大きくなる (図2)。溶解速度を種々変えて溶解したときの dendrite 角度 ( $\theta$ ) とフレックセル深さ ( $L/r$ ) の関係を図3に示す。 dendrite 角度は、鋼塊表面側から 30mm 深さ位置 (出荷時のロール外表面を想定) と、90mm 深さ位置 (ロール廃却時のロール外表面を想定) の平均値で整理して示しているが、この図からも溶解速度のみのコントロールでは dendrite 角度とフレックセル深さの両者を同時に改善できないことがわかる。

### 3. スラグスキン厚さの低減

ESRにおいて溶解速度以外に鋼塊の品質に影響を及ぼす溶解条件は、フラックス組成、フラックス量、電流、電圧、鑄型冷却能力、フィルレシオなど種々ある。当社では、 dendrite 角度とフレックセル深さの両者を同時に改善することを目的として、鋼塊と水冷銅鑄型の間に形成されるスラグスキンの熱伝達に着目し、スラグスキン厚さを薄くして鋼塊の冷却速度を向上させ、溶鋼プールの側面を鑄型に平行に近くすることによって全体的に浅い形状にすることを考えた (図4)。

スラグスキン厚さは、主にスラグ組成と電極の浸漬量に大きく影響を受けており、スラグスキンを薄くするた

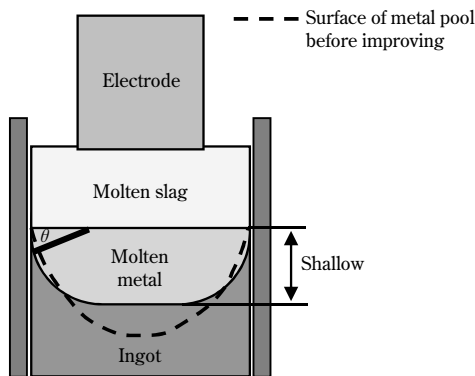


図4 理想的な溶鋼プール形状

Fig. 4 Ideal shape of molten metal

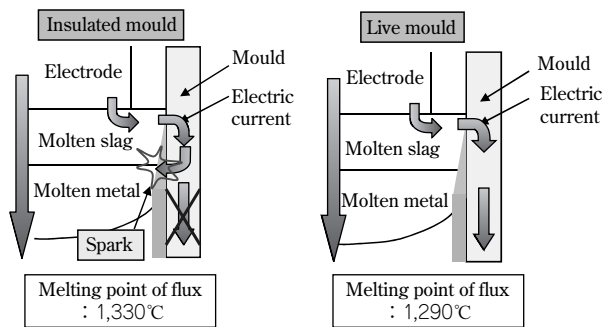


図5 ESR 溶解における鑄型絶縁方式と鑄型導電方式の模式図

Fig. 5 Pattern diagrams of insulated mould and live mould in ESR melting

表1 電極位置制御方式

Table 1 Electrode positioning control

	Conventional ESR	New ESR
Electrode positioning control	Voltage swing	Resistance swing
Electrode positioned by	Winch hoisting	Ball screw
Amount of immersion	10mm	1 ~ 3mm

めには低融点フラックスの使用や電極浸漬量の低減が有効である。

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>系フラックスにおいて CaF<sub>2</sub>濃度を高めた低融点フラックスは電気伝導性が高く、鑄型と鋼塊が絶縁されている絶縁方式で使用した場合、鑄型-鋼塊間に電位差が生じアーキングが発生する。このため、更新前の設備では使用が困難であった。低融点フラックスを使用するためには、鑄型-鋼塊間を同電位とすることが必要である (図5)。新 ESR では鑄型導電方式を採用することにより、低融点 (1,290°C) のフラックスを使用することが可能となった。

また、スラグ層への電極浸漬量を大きくすると電極からの抜熱が大きくなり、スラグ層温度が低下してスラグスキンが厚くなる。このため、電極の浸漬量はできるだけ小さいほうがよい。しかし、更新前は電極をワイヤでつる方式を採用していたため、応答速度が遅く、電極位置の正確な制御が困難であった。また、電圧スイング方式を採用していた電極位置制御に対しては、スラグ組成の変化による電気伝導度の変化やスラグボリュームの変化、電極およびインゴット長さの変化に伴う電気抵抗および電圧の変動がその制御を阻害していた。このため、電極位置制御方法を抵抗スイング制御とした (表1)。

その他、ESR 設備の更新前後の特徴を図6にまとめた。

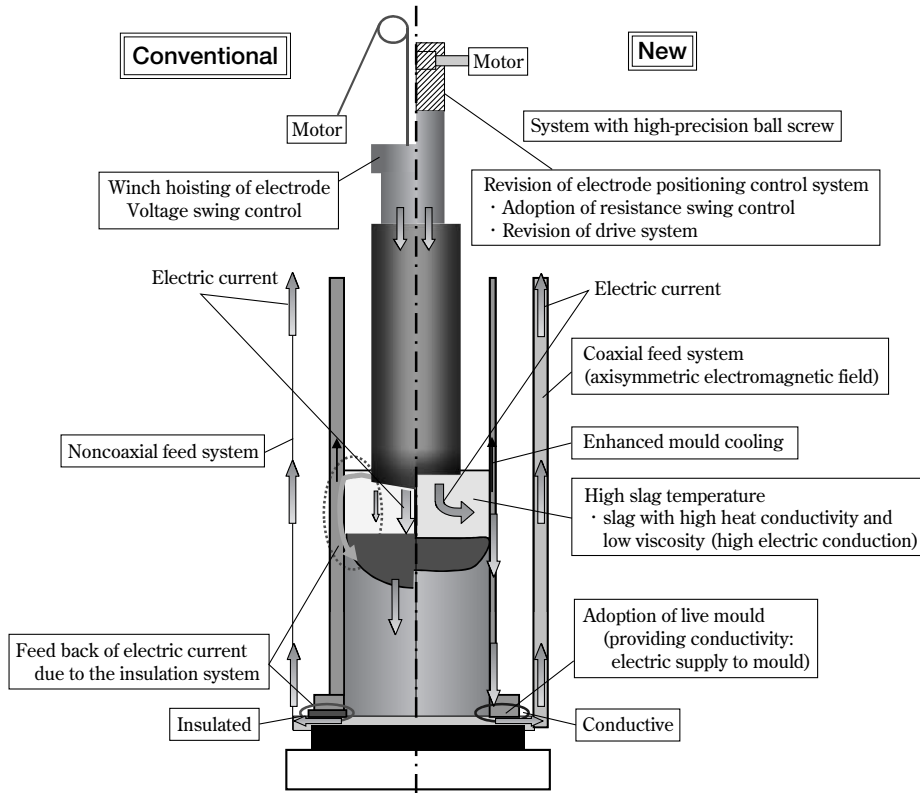


図6 更新前後のESRの特徴  
Fig. 6 Features of conventional and new ESR

#### 4. 新 ESR で製造した鋼塊の品質

ESR 更新前後における鋼塊の品質評価に加え、最適な操業条件を考察した。

##### 4.1 調査方法

新 ESR での鋼塊品質を調査するため、TOP 部に 500mm の余長をつけた鋼塊を製造し、図 7 に示す要領で①φ810×30mm 横断面マクロ用試験片、②810×470×30mm 縦断面マクロ用試験片を採取した。

横断面マクロ用試験片にて認められるスポット状偏析のなかで、平均径が 2mm を超えるものをフレッケルと判定し、その発生位置を調査した。また、縦断面マクロ用試験片ではデンドライト成長方向の角度を測定した。

##### 4.2 調査結果

図 8 に横断面マクロ組織写真を、図 9 に縦断面マクロ

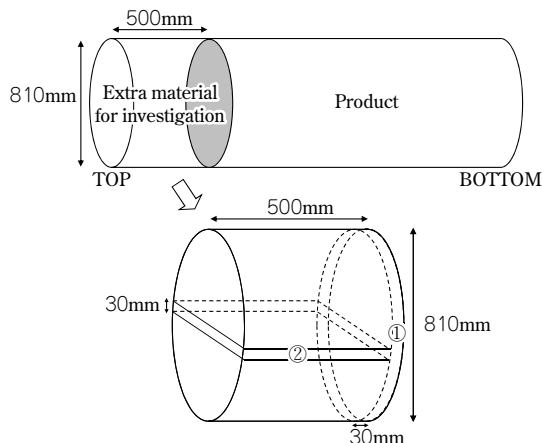


図7 ESR 鋼塊調査用試験片  
Fig. 7 Specimens for investigation of ESR

組織写真の一例を示す。また、図10にデンドライト角度とフレッケル深さの関係を、新 ESR の場合および従来 ESR の場合を比較して示す。デンドライト角度およびフレッケル深さが従来よりも大幅に改善していることがわかる。

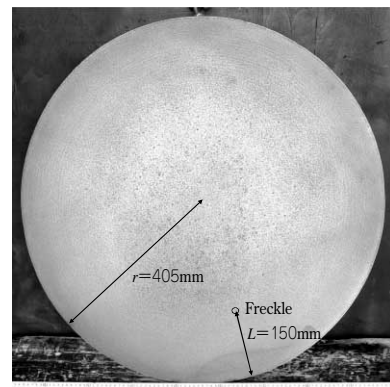


図8 横断面マクロ組織写真の一例〔フレッケル発生位置：表面下 150mm 深さ ( $L/r=0.37$ )〕

Fig. 8 Photograph of typical cross-sectional macro structure [Freckled region:150mm deep from the surface ( $L/r=0.37$ )]

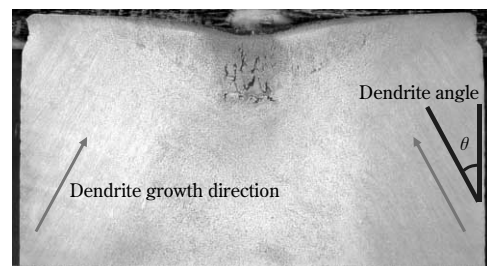


図9 縦断面マクロ組織写真の一例  
Fig. 9 Photograph of typical longitudinal sectional macro structure



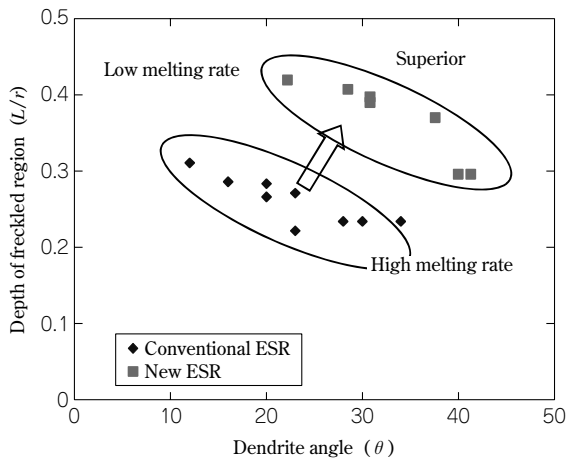


図10 新 ESR 鋼塊におけるデンドライト角度とフレックル深さの関係

Fig.10 Relationship between dendrite angle( $\theta$ ) and depth of freckled region( $L/r$ ) in the ingot produced by New ESR

### 5. 鋼塊内部品質向上の理論的検証

今回の ESR 装置の更新により、制御方法の違いやスラグ組成、スラグ温度、溶鋼温度、スラグスキン厚さ、鋳型構造など、鋳造条件が従来と変わったため、凝固プロフィールが変化しと考えられる。そこで、今回の鋼塊品質の向上を理論的に検証するため、数値解析（伝熱計算）によって溶鋼プール形状（デンドライト角度）を求め、4章で実施した鋼塊品質調査結果と比較した。

ESR 溶解における凝固界面の進行状況および溶鋼プール形状の算出は、当社が開発した有限要素法凝固解析プログラム“CASTEM (Casting Analysis System)”を使用した<sup>5)</sup>。CASTEM は次式のような凝固時の潜熱放出を考慮した非定常熱伝導方程式を解くことができる。

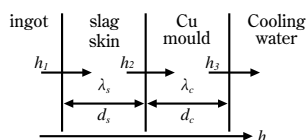
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

ここで、 $T$  は温度、 $t$  は時間、 $C$  は比熱、 $\rho$  は密度、 $L$  は潜熱、 $f_s$  は固相率、 $\lambda$  は熱伝導率である。

伝熱計算に用いた物性値は表 2 に示すとおりである。溶解速度は 600, 700, 920 kg/h の 3 条件とした。溶鋼プール表面の溶湯温度  $T$  (°C) は測定データがないため、従来 ESR において過去に別鋼種の溶解で測定したスラグ温度を参考に式 (1) より算出した。ここで  $\alpha$  をフィッティングパラメータとした。

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0.24 \times (\text{溶解速度 kg/h}) + 1460 + \alpha \quad \dots\dots (1)$$

また、鋼塊側面と水冷銅鋳型間の総括熱伝達係数  $h$  は、式 (2) の計算式により算出した値を使用した。



$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{\lambda_s/d_s} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{\lambda_c/d_c} + \frac{1}{h_3} \quad \dots\dots (2)$$

上記条件で計算したスラグスキン厚さと総括熱伝達係数の関係を図 11 に示す。従来 ESR のスラグスキン厚さが約 3mm であったのに対して更新後の ESR では 1mm であり、総括熱伝達係数は約 2.5 倍になっていると考えら

表 2 伝熱計算に使用した物性値と実験条件

Table 2 Physical properties and experimental conditions used in heat transfer analysis

Liquid steel physical properties	Liquidus temperature	1,450°C		
	Solidus temperature	1,344°C		
	Heat conductivity	$3.8 \times 10^{-2} \text{ cal}/(\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$		
	Specific heat	0.17 cal/g/K		
	Density	$7.6 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$		
	Latent heat of solidification	65 cal/g		
Coefficient of heat transfer	Ingot bottom	$1.4 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$		
	Ingot side surface	$2.7 \times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$		
Melting speed		600kg/h	700kg/h	920kg/h
Molten metal temperature		$1,604^{\circ}\text{C} + \alpha$	$1,628^{\circ}\text{C} + \alpha$	$1,681^{\circ}\text{C} + \alpha$

表 3 スラグスキン厚さと総括熱伝達係数

Table 3 Slag skin thickness and overall heat transfer coefficient

	Slag skin thickness (mm)	Overall heat transfer coefficient ( $\times 10^{-4} \text{ cal}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ )
Conventional ESR	3	1.05
New ESR	1	2.68

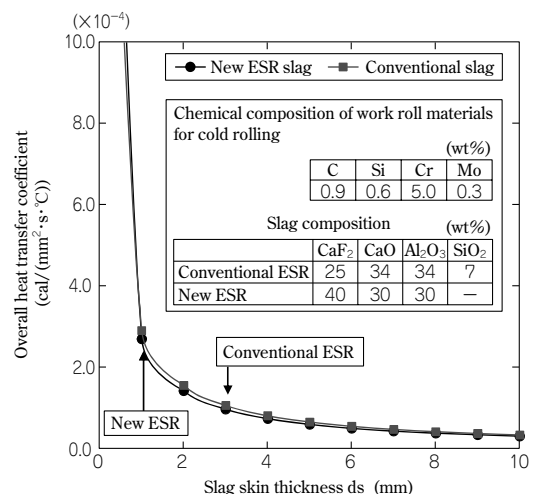


図11 スラグスキン厚さと総括熱伝達係数

Fig.11 Slag skin thickness and overall heat transfer coefficient

れる (表 3)。

つぎに、溶鋼プール形状を計算した一例を図 12 に示す。計算モデルは 2 次元軸対称モデルのため、左側が鋼塊中心、右側が鋼塊表面となる。図中には、各時間における等液相線温度分布と等固相線温度分布から決まる溶鋼プール形状を示した。

デンドライト角度の算出は、鋼塊表面側から 30mm および 90mm 深さ位置において、等液相線温度分布で決まる溶鋼プール形状に垂直な方向をデンドライト成長方向とした。これと鋼塊表面との角度を求めてデンドライト角度とし、30mm および 90mm 深さ位置の平均値で評価した。

平均デンドライト角度の計算値と実測値を比較した結果を図 13 に示す。計算値と鋼塊の実測値に差異があることがわかった。また、図 13 は従来設備で測定したスラグ温度を参考に算出したが、今回の更新で電極位置制御

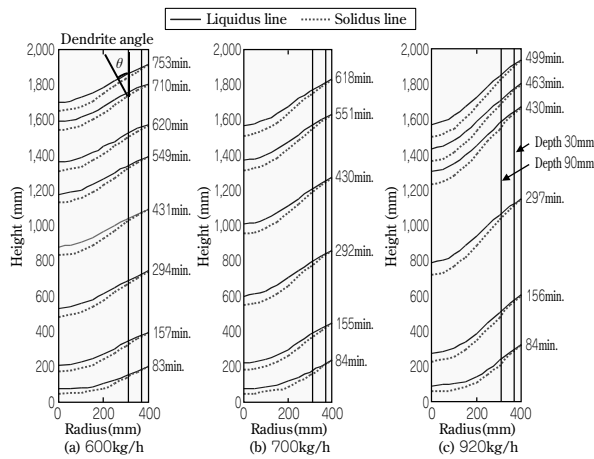


図12 各溶解速度のメタルプール形状 ( $\alpha=50^\circ\text{C}$ )  
Fig.12 Metal pool shapes at each melting speed ( $\alpha=50^\circ\text{C}$ )

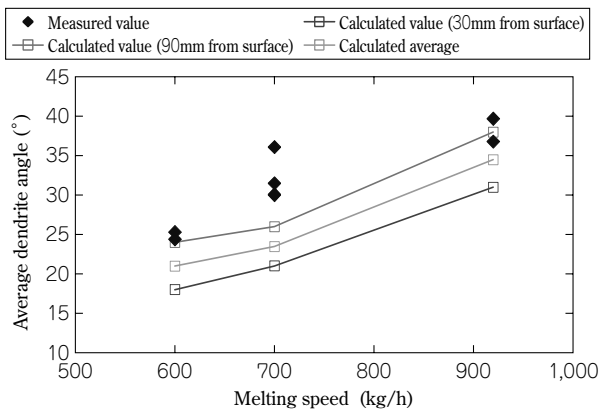


図13 平均デンドライト角度の計算 ( $\alpha=0^\circ\text{C}$ ) と実測値  
Fig.13 Calculated (Molten metal temperature  $\alpha=0^\circ\text{C}$ ) and measured values of average dendrite angle

機構を変更 (抵抗スイング制御の採用, 電極駆動方式変更) したことにより, 更新後の ESR では電極浸漬量を浅くすることができ, より高いスラグ層温度 (=溶湯温度) が得られていると考えられる。

そこで, 式 (1) におけるフィッティングパラメータ  $\alpha$  を  $50^\circ\text{C}$  および  $100^\circ\text{C}$  の条件で溶鋼プール表面の溶湯温度  $T(^\circ\text{C})$  を求めた。おのおのの条件で平均デンドライト角度を算出し, 実測値と比較を行った結果を図14, 15 に示す。

実測値と比較した結果, 溶鋼プール表面の溶湯温度  $T(^\circ\text{C})$  は,  $\alpha=50\sim 100^\circ\text{C}$  においてデンドライト角度が鋼塊の実測値に近づくことがわかった。

以上のことから, 今回更新した ESR 装置では, 更新前よりもスラグ温度が  $50\sim 100^\circ\text{C}$  高く保たれており, その結果としてスラグスキン厚さが従来の  $3\text{mm}$  から新 ESR で  $1\text{mm}$  に薄くなったと考えられる。また, スラグスキンが薄くなって鋼塊側面の冷却速度が速くなり, 溶鋼プール形状が改善されて (図 4) デンドライト角度が大きくなり, かつフレッケル欠陥の少ない鋼塊が得られたものと考えられる。

## 6. まとめ

高品位ロールの生産を目的として ESR 装置を更新した。新装置での溶解条件と鋼塊内部品質の関係を調査

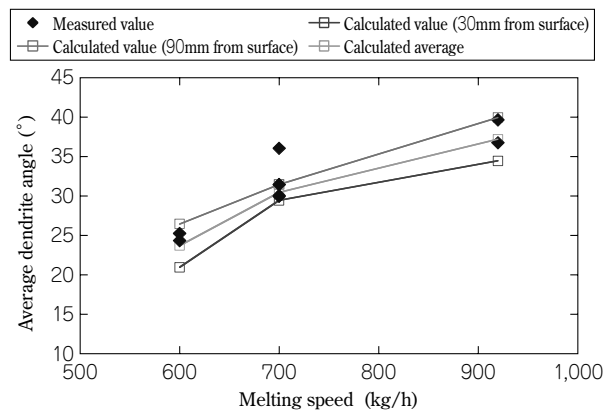


図14 平均デンドライト角度の計算 ( $\alpha=50^\circ\text{C}$ ) と実測値  
Fig.14 Calculated (Molten metal temperature  $\alpha=50^\circ\text{C}$ ) and measured values of average dendrite angle

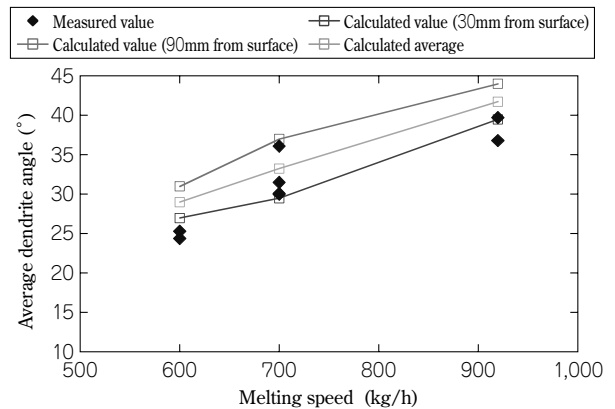


図15 平均デンドライト角度の計算 ( $\alpha=100^\circ\text{C}$ ) と実測値  
Fig.15 Calculated (Molten metal temperature  $\alpha=100^\circ\text{C}$ ) and measured values of average dendrite angle

し, 以下の結果が得られた。

- (1) 新 ESR におけるデンドライト角度とフレッケル発生深さは, 従来 ESR に比較して大幅に改善した。
- (2) ESR 鋼塊のスラグスキンは従来 ESR の  $3\text{mm}$  に対して新 ESR では  $1\text{mm}$  となり, 総括熱伝導係数は約 2.5 倍となった。
- (3) 鋼塊内部品質と凝固解析結果より, 新 ESR では従来 ESR よりもスラグ温度が  $50\sim 100^\circ\text{C}$  高くなったと考えられる。高スラグ温度の実現により, スラグスキンを薄くできたと考えられる。

むすび=更新後の ESR 装置で製造したロール材の品質とその評価について概説した。さらに, 本装置は自動溶解制御システムを具備しており, 作業によるバラツキが少なく, 高品位のロール材を安定的に生産することが可能である。

## 参考文献

- 1) 鈴木 章ほか: エレクトロスラグ再溶解法の物理化学と技術的諸問題, (1979), pp.132-133.
- 2) 梶井 明ほか: エレクトロスラグ再溶解法の物理化学と技術的諸問題, (1979), pp.149-151.
- 3) 山田人久ほか: 鉄と鋼, 第1号 (1989), pp.97-104.
- 4) 山田人久ほか: 鉄と鋼, 第1号 (1989), pp.105-112.
- 5) 藪 忠司ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.37, No.4 (1987), pp.99-100.