

論 文

UDC 669.14-412 : 621.74 : 620.192.43 : 620.184.4

大型キルド鋼塊の凝固と偏析について

平原 弘 章**・橋 尾 守 規**
丸 川 雄 浄**・白 石 博 章***

On the Solidification and Segregation of the Large Killed Steel Ingots

Hiroaki HIRAHARA, Moriki HASHIO,
Katsukiyo MARUKAWA, and Hiroaki SHIROISHI

Synopsis:

Segregation in steel ingots cause the degradation of mechanical and chemical properties. We have experimented on segregation and solidification of the large steel ingots (24-39T) and obtained the results as follows:

1. The solidification pattern in the large flat steel ingots is proportional to the square root of time after teeming in the first stage solidification and the square of it with the formation of sedimental crystals.
2. By scraping the liquid steel in a mold, the inverse V segregation disappears in the near surface of ingot top, but it remains in the ingot bottom. Further, the inverse V segregation lines become thin and shift to the inner parts of the ingot, and the floating velocity of the rich liquid steel quickly increases.
3. The formation of the inverse V segregation is closely related with the solidification velocity and the critical solidification velocity of the formation of the inverse V segregation becomes small by scraping the liquid steel in a mold.
4. By R.E.M. addition to the liquid steel in a ladle, the inverse V segregation lines in sulfurprint become the white segregation and also the large inclusion is insignificant. Judging from these results, we could confirm the effectiveness of the method of R.E.M. addition to the liquid steel in a mold (BCCT-Method).

1. 緒 言

鋼塊内の成分偏析は鋼材の機械的性質、化学的性質の劣化、バラツキの原因となり、また割れや表面疵を誘起し、非常に大きな問題となる。従来よりキルド鋼の偏析(V偏析、逆V偏析)に関しては種々の研究が進められているが^{1)~7)}、いまだに効果的な対策は判明していない。

また、凝固速度と偏析との間にはかなり密接な関係があるということは確認されている⁸⁾⁹⁾。(たとえば、小型の金型鋼塊では偏析は認められない。)

以上の点を考慮して、偏析防止対策を検討した場合、凝固過程を強制的にかえる次のような方法がある。

(1) 加圧造塊法¹⁰⁾¹¹⁾; 鑄型-鋼塊間の空隙を消滅させて凝固速度を大とする。

(2) 振動造塊法^{12)~15)}; 機械的、電氣的振動をあたえて、均一核生成をねらう。

(3) スクレイプ法^{16)~17)}; 強制攪拌により偏析の低減を図る。

(4) 鑄型形状改善^{18)~19)}; 扁平度を増して凝固速度を大にする。

(5) Ca, R. E. M. などの添加により偏析改善を図る^{20)~24)}。

そこで我々は(3)のスクレイプ法(鑄型内溶鋼攪拌)、(5)のCa, R. E. M. 添加法をとりあげ、大型実用鋼塊にて試験実施し、偏析、特に逆V偏析におよぼす影響を調査するとともに、バーテスト(縦方向)により凝固状況も調査したので、その結果を報告する。

* 昭和49年4月本会講演大会にて発表 昭和51年3月1日受付 (Received Mar. 1, 1976)

** 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*** 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

2. 試験概要

2.1 試験方法

供試材の鋼塊形状, 処理方法, 化学組成および鋼塊諸元を Table 1, 2 に示す. 供試材は C=0.10~0.20% Mn>1.00% (H-4 のみ Mn=0.72%), S=0.015%, 前後の中炭高 Mn 鋼とし, 鑄型内溶鋼の攪拌試験を実

施した. なお比較の意味で Ca, R. E. M. 添加鋼塊の偏析についても調査を行なった.

鋼塊重量は 当社鹿島製鉄所にて通常溶製されている U6, U7, F8 鋼塊で 28~39 t である.

また鑄型内溶鋼の攪拌方法としては Table 3 に示すように, 鑄込終了後 30 min 以降に 30 min 間隔で丸鋼 (SS 41.16 mmφ) にて 2~3 min の攪拌を行なった.

Table 1. Details of specimens used

Heat No.	Mold type	Treated method	Chemical composition (%)							
			C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	Ca	Ce
H-1	U7	Standard	0.21	0.30	1.11	0.021	0.017	0.025	—	—
H-2	U6	Scraped	0.10	0.28	1.28	0.021	0.012	0.020	—	—
H-3	〃	〃	0.12	0.28	1.13	0.017	0.006	0.039	—	—
H-4	〃	〃	0.14	0.20	0.72	0.015	0.016	0.008	—	—
H-5	F8	Ca-treated	0.16	0.44	1.37	0.019	0.005	0.073	0.0036	—
H-6	〃	R.E.M.-treated	0.15	0.40	1.36	0.020	0.005	0.059	—	0.014

Table 2. Ingot dimensions.

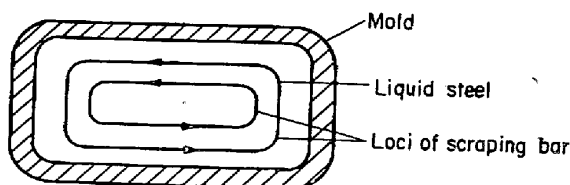
Heat No.	Mold type	Ingot dimensions (mean)			Flat grade	Ingot weight
		Thickness	Width	Height		
H-1	Big end Down 〃 〃 〃 〃	868.5	2 235.5	2 600	2.57	T 34.850
H-2		763.5	1 973.5	2 700	2.59	28.050
H-3		〃	〃	2 750	〃	28.480
H-4		〃	〃	2 700	〃	28.050
H-5		864.0	2 440.0	2 530	2.82	37.580
H-6		〃	〃	〃	〃	〃

Table 3. Experimental conditions for scraping.

Heat No.	Element No.	Starting time for scraping from teeming end	Time interval for scraping	Scraping time	Finishing time for scraping from teeming end
H-1	—	—	—	—	—
H-2	②	30 min	20~30 min	2~3 min/C	120 min
	③	30	30	〃	30
H-3	⑦	33	30	〃	210
H-4	⑦	28	20~30	〃	225
H-5	(Ca)	—	—	—	—
H-6	(R.E.M.)	—	—	—	—

c.f. 1. Scraping bar : Cylindrical steel (SS 41.16 mmφ)

2. Scraping method : 2~3 min/cycle



(2~3 min/C)

さらに Ca. R. E. M. 添加は投射機を用いた BCCT 法により行なつた²⁴⁾。(BCCT 法=Bubbling+Ca. Ce 弾添加+Bubbling-Treatment) すなわちこの BCCT 法は第1次バブリング、投射機による弾添加、第2次バブリングの3段階よりなつており、その目的は以下に示すようになってゐる。

第1次バブリング:

転炉出鋼後、取鍋内溶鋼のガスバブリング、発泡弾添加²⁵⁾、DH 処理により脱酸生成物を浮上除去し、Ca R. E. M. の添加効果の増大を図る。

投射機による弾添加

カプセル内に Ca. R. E. M. などの発泡性および強脱酸剤を封じ込み、取鍋内溶鋼中に添加する。この際、弾速を大きくすることが効果的である。

第2次バブリング

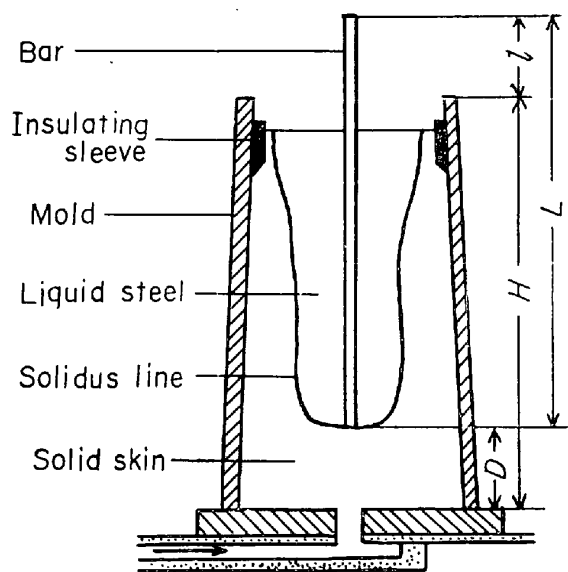


Fig. 1. Schematic representation of bar test.

ガスバブリング、発泡弾添加により脱酸、脱硫生成物を浮上除去し、清浄度の改善、脱硫効果を図る。

2.2 調査項目

2.2.1 バーテスト

Fig. 1 に示すように鑄込終了後、一定時間経過してから、長さLの丸鋼 (SS 41, 16 mmφ) を鑄型内溶鋼の軸芯部に垂直に浸漬し、凝固部と接触した時点でlの位置にマークを入れ迅速に測定棒を引き出す。

底部からの凝固厚さDは(1)式により求めることができる。

$$D = H - (L - l) \dots\dots\dots (1)$$

L : 測定棒の長さ

H : 鑄型高さ

l : 測定棒の上端~鑄型上端までの距離

D : 底部からの凝固厚さ

なお測定棒は、十分に乾燥させ、さびを除去する。

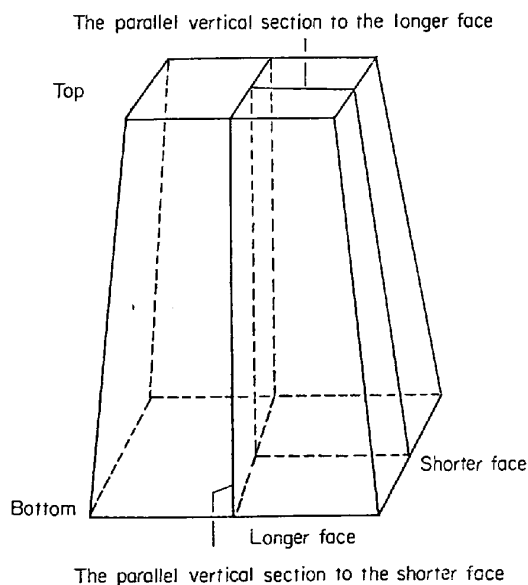


Fig. 2. Schematic representation of the cutting method steel ingots.

Table 4. Conditions of steel making (scraped method)

Heat No.	Mold type	Temp. of liq. steel		Scraping period (Time after teeming) (min)			
		Ladle (°C)	Mold (°C)				
H-1	U7	1 615	—	—	—	—	—
H-2	U6	1 610	1 520	30 120	50 —	70 —	90 —
H-3	U6	1 600	1 510	33 152	66 180	94 210	121 —
H-4	U6	1 605	1 520	28 145	60 175	90 192	123 225

2.2.2 鋼塊縦断

H-1, 2, 4, 5, 6 の鋼塊について、鋼塊縦断を実施した。

なお、鋼塊縦断要領を Fig. 2 に示す。また、鋼塊縦断サンプルより次の項目をチェックした。

- (1) サルファプリント
- (2) マクロ、マイクロ組織
- (3) チェック分析、サンド分析

2.3 スラブ縦断

H-2, 3, 4 において、スラブ縦断 (頭部より 30%)

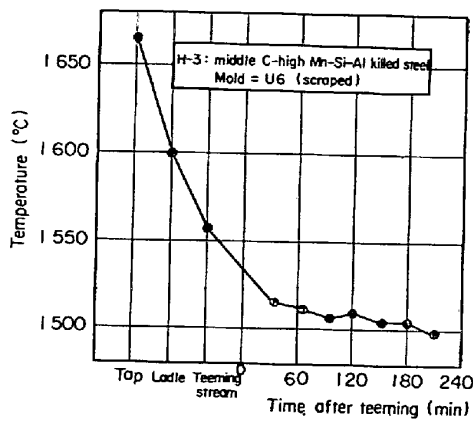


Fig. 3. Change of the liquid steel temperature from tapping to solidification.

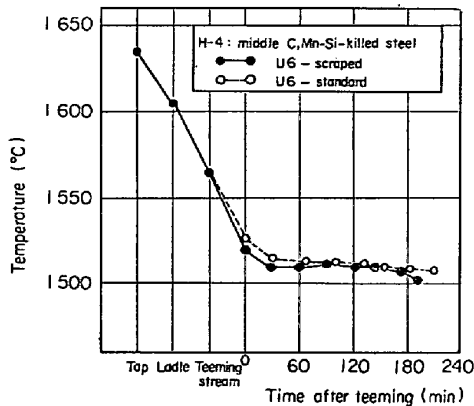


Fig. 4. Change of the liquid steel temperature from tapping to solidification.

を実施し、攪拌、機械的振動 (鋳型振動) の効果を調査した。

- (1) サルファプリント
- (2) チェック分析

3. 試験結果

比較材、H-1~4 (攪拌試験) の製造条件を Table 4、温度変化を Fig. 3, 4, H-5, 6 (Ca, R. E. M. 添加試験) の製造条件を Table 5 に示す。

3.1 バーテスト結果

凝固厚さ測定結果を Fig. 5 に示す。

3.3.1 U6 通常鋳込鋼塊

鋳込後経過時間 $t=30$ min で凝固厚さ $D=150$ mm となり、凝固初期においては、(2)式に示す凝固式と推定される。

$$D = K_1 \sqrt{t} \dots\dots\dots (2)$$

D : 凝固厚さ (mm)

K_1 : 凝固係数 (mm/min^{1/2})

t : 鋳込終了後経過時間 (min)

凝固の進行につれて、凝固速度は急激に増加し、 t に

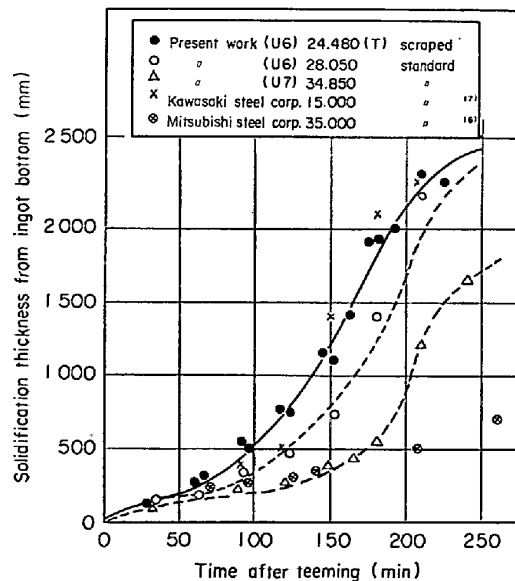


Fig. 5. Results of bar test.

Table 5. Conditions of steel making. (Ca, R.E.M. treated)

Heat No.	Addition quantity	Sampling position	Ladle temp °C	Chemical composition (%)								
				C	Si	Mn	P	S	SIAl	Ca/Ce	O	Al ₂ O ₃
H-5	Ca=0.019% Ca-Si bullet	Before addition	1635	0.15	0.42	1.36	0.020	0.006	0.040	—	0.0026	0.0025
		Mold	1625	0.16	0.44	1.37	0.019	0.005	0.073	0.0036	0.0027	0.0007
H-6	Ce=0.034% R.E.M. bullet	Before addition	1635	0.14	0.41	1.35	0.019	0.006	0.039	—	0.0033	0.0038
		Mold	1625	0.15	0.40	1.36	0.020	0.005	0.059	0.014	0.0031	0.0005

関する2次式と考えてもさしつかえなく、これが押湯部直下まで継続している。

$$D = K_1 t^2 + C \dots\dots\dots (3)$$

D : 凝固厚さ (mm)

K_1 : 凝固係数 (mm/min²)

C : 定数 (mm)

この第Ⅱ期の凝固速度は当然横方向の凝固とは様相が異なっており、この時期に沈澱晶の生成が開始し、溶鋼の沈澱堆積が加味され、第Ⅰ期に比べて凝固速度が急激

に増加したものと考えられる。

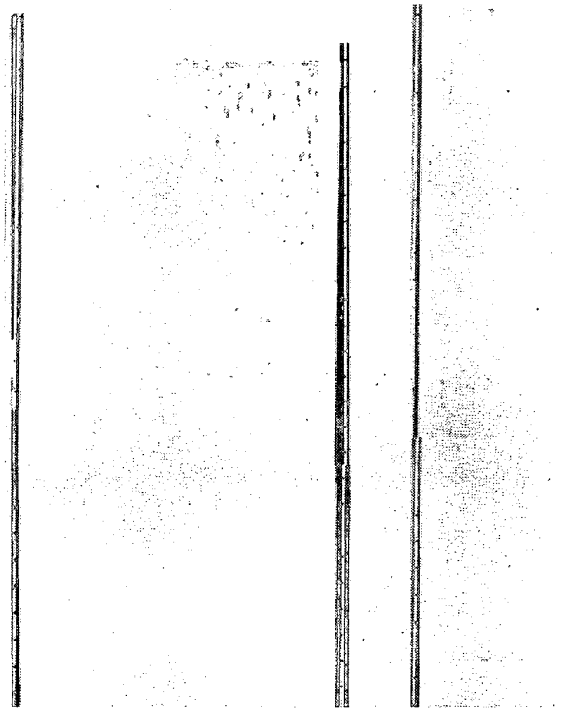
押湯部付近になると、押湯効果のため、再び凝固速度が減少する。

3.1.2 U6 攪拌鋼塊

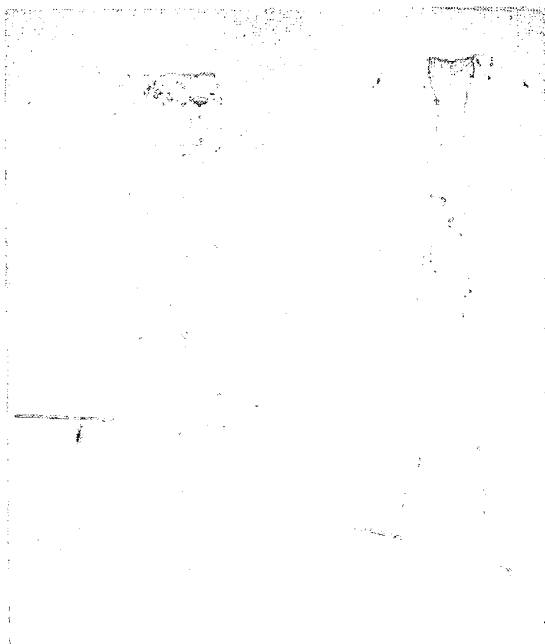
通常鑄込鋼塊に比べると $t=30$ min で $D=130$ mm, 凝固初期においては、(2)式にしたがった曲線を示し、 K_1 の値もほとんど一致しており、同様の凝固を示しているが、凝固進行にしたがって凝固速度はかなり大きくなり、その凝固式は(3)式で示される。そして、この場



(a) H-1 (U7 standard)



(b) H-2 (U6, scraped)



(c) H-4 (U6 scraped)

Photo. 1. Comparison of sulfurprints between the scraped and standard steel ingots. ($\times 1/33$)

合, K_I の値は通常鋼塊に比べてかなり大きく, これは溶鋼攪拌の影響が現われたものである.

すなわち凝固前面に攪拌をあたえることにより, 不安定な凝固殻を機械的に破壊するため, 通常鋼塊の場合より沈澱堆積が促進され, K_I の値が大きくなったものと考えられる.

3.1.3 U7 通常鋼塊

U6 鋼塊に比較して, 厚みが 100 mm 厚いため, 凝固速度はかなり遅くなっている. $t=30 \text{ min}$ で $D=75 \text{ mm}$ となり, 凝固初期は(2)式, 凝固中期以降になると凝固速度の増加がみられ, (3)式となる. K_I, K_{II} ともに U6 鋼塊に比較して小さくなっているが, 特に K_I の

差が大きく, 鋼塊厚みの影響が現われている.

3.2 攪拌鋼塊縦断結果

U7 (通常比較材) U6 (攪拌材) 縦断鋼塊のサルファプリント, マクロ組織を Photo. 1, 2 に示す.

3.2.1 内部組織

(1) 鑄型内溶鋼の攪拌により鋼塊頭部, 表面近傍の逆V偏析はほとんど消失しているが, 鋼塊底部の逆V偏析の消失は認められない.

(2) 逆V偏析は鋼塊内部に移動し, 微細化している傾向が認められる.

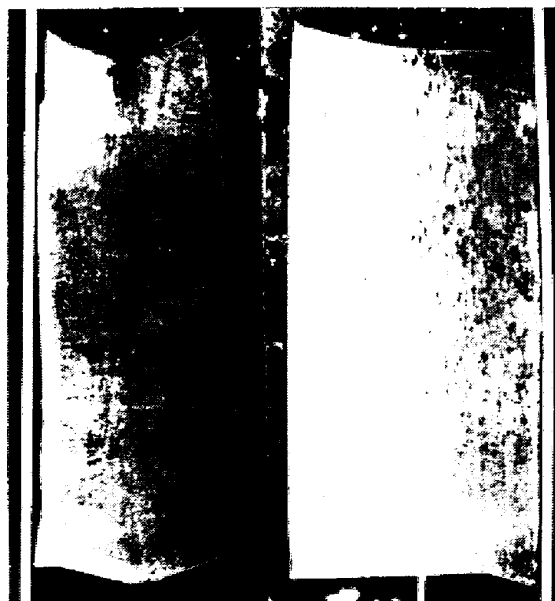
(3) 逆V偏析の生成開始時期は攪拌鋼塊で 170 mm (U6) 通常鋼塊で 140 mm (U7) 凝固後となっている.



(a) H-1 (U6 scraped)



(b) H-5 (F8 Ca-treated)



(c) H-6 (F8 R. E. M.-treated)

Photo. 2. Comparison of macro structure between the scraped and Ca R. E. M.-treated steel ingots. ($\times 1/40$)

(4) 鋼塊軸芯部において、溶鋼攪拌による攪拌棒の軌跡がサルファプリントに明瞭に現われ、負偏析を生じており、攪拌の影響が認められる。

(5) 攪拌鋼塊において鋼塊軸芯部頭部の偏析が大となっているが、この原因は凝固後半に濃化溶鋼の温度が低下し、粘性が非常に大きくなっているため、不純物が十分浮上できなかつたものと推定される。

(6) 柱状晶は側面より 150~200 mm までは、鑄型壁に垂直方向に成長しているが、これより内部では上向きに成長が変化している。しかし、逆V偏析はこの柱状晶を縦断して生成している。

3.2.2 チェック分析

鋼塊縦断サンプルのチェック分析値を Fig. 6 に、サンド分析結果を Fig. 7 に示す。

(1) C : 攪拌鋼塊は底部で負偏析が大きく、頭部での正偏析も小さくなっている。

(2) P : 大きな差はないが、通常鋼塊では底部で負偏析、頭部で正偏析となり、攪拌鋼塊に比べて頭部に濃縮されている傾向がある。従来攪拌により不純物が頭部に浮上し、濃厚偏析部を押湯部に移動させることを期待したが、今回の調査結果では明瞭に現われていない。

(3) S : Pと同様攪拌効果は明瞭ではない。

以上のように、鋼塊縦断サンプルのチェック分析結果では攪拌の影響は明瞭に現われておらず、効果を確認することはできなかった。

3.2.3 サンド分析

Fig. 7 からわかるように、鋼塊底部の軸芯部において

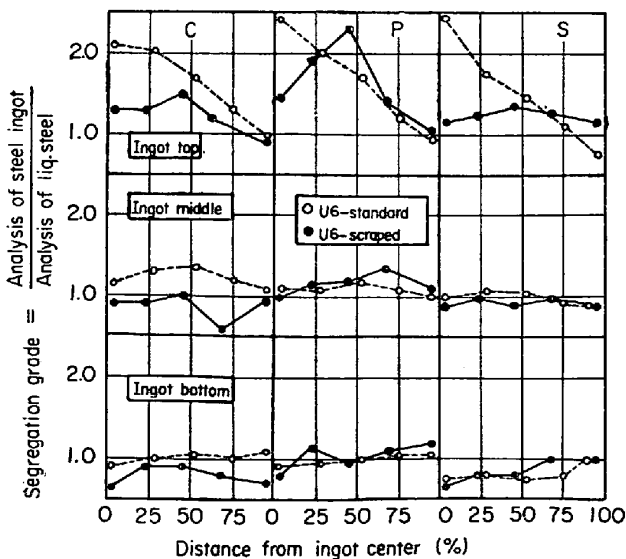


Fig. 6. Distribution of C, P and S along the vertical center axis of middle C-high Mn-Si-Al killed steel ingots.

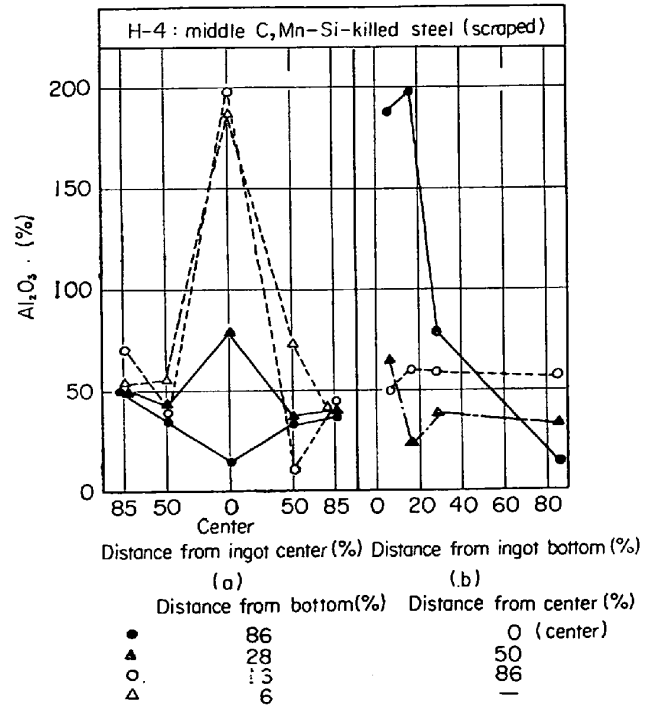


Fig. 7. Distribution of $[Al_2O_3]$ along the vertical lines of steel ingots. (U6)

$[Al_2O_3]$ が非常に大となり、この値は通常材に比較しても高い値である。攪拌の影響が現われたものと考えられる。

3.3 スラブ縦断

Photo. 3 にサルファプリント、Fig. 8 にチェック分析結果を示す。

この理由としては、被覆剤、保温剤など添加後の機械

3.3.1 サルファプリント
(1) H-2 の第1次試験では鑄込終了 30 min 後に 2~3 min 攪拌したのみであるため、攪拌効果は認められない。

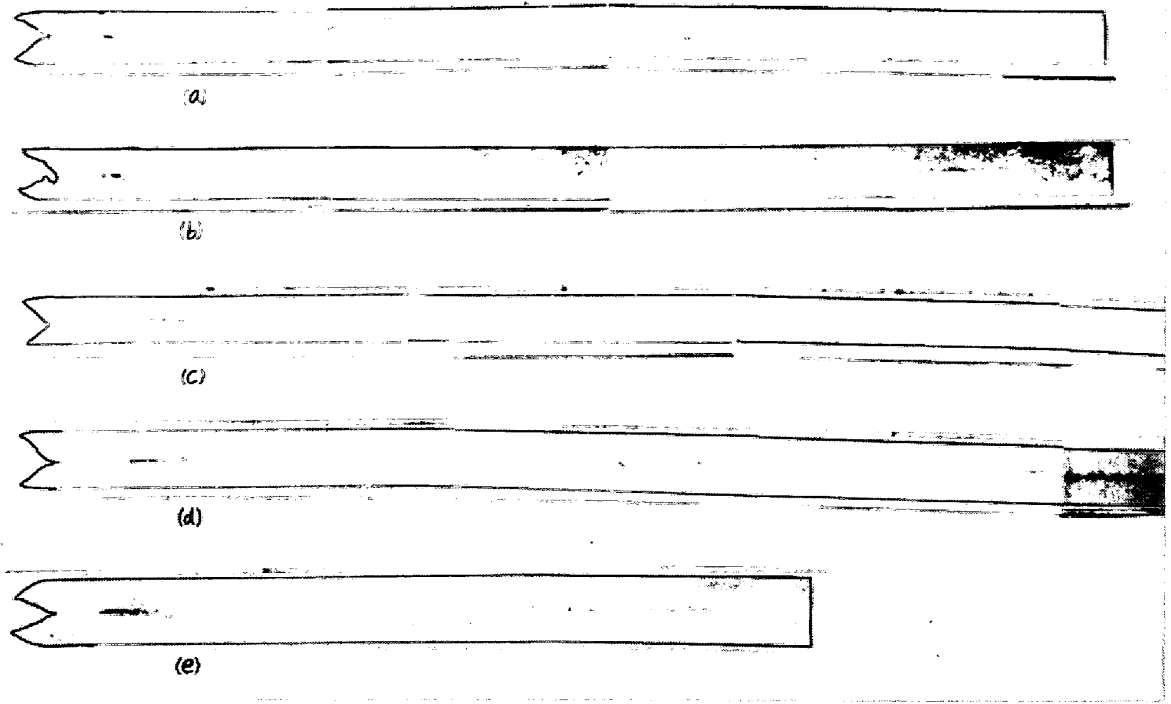
(2) 攪拌材についてはかなり効果が認められ、スラブ表面近傍の逆V偏析は軽減され、中心部に濃縮されている傾向がある。また頭部の逆V偏析は完全には消失していないが、かなり軽減されている。

(3) チェック分析

Fig. 8 から判断すると、濃厚偏析部を極力押湯上部に移動させるという点に関しては、今回の攪拌試験では十分な効果は現われなかつた。

鋼塊頭部では、むしろ通常鋼塊より偏析が大きくなる傾向が認められる。これは、凝固末期の不純物濃化溶鋼の温度が低く、粘性が高いため、攪拌しても十分な浮上が進行せず懸濁状態となり、比較的偏析率の高い値で平均化したものと推定される。

以上、述べたように、溶鋼攪拌法では、凝固末期の不



(a) H-2 (standard), (b) H-2 (scraped), (c) H-3 (scraped) (×1/30)
 (d) H-3 (mechanical vibration), (e) H-4 (scraped)

Photo. 3. Sulfurprints of the vertical section of slab.

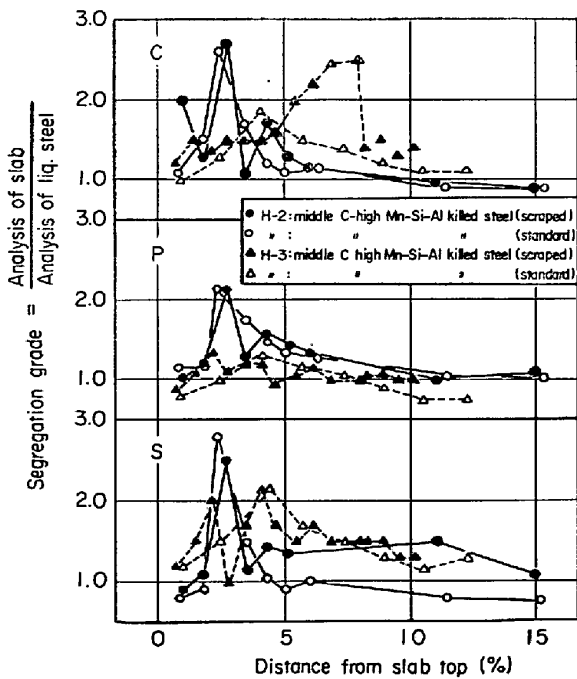


Fig. 8. Segregation grade of C, P and S along vertical center axis from slab top (=ingot top).

純物濃化溶鋼をいかにして浮上させ、濃厚偏析部を鋼塊上部に移動させるかということが重要になってくる。

3.3 Ca, R. E. M. 添加鋼塊

鋼塊縦断サンプルのサルファープリントを Photo. 4, マクロ組織を Photo. 2 に示す。また, Ca 処理鋼塊→A, R. E. M. 処理鋼塊→B とする。

(1) A, B とともに鋼塊頭部表面近傍の逆V偏析線が消失し, 鋼塊内部に移動している傾向がある。

(2) R. E. M. 処理した B 鋼塊のサルファープリントにおいて, V, 逆V偏析が消失し, 負偏析を生じている。

また, マクロ偏析は残留しているが, 通常材に比べると, かなり軽減されている。

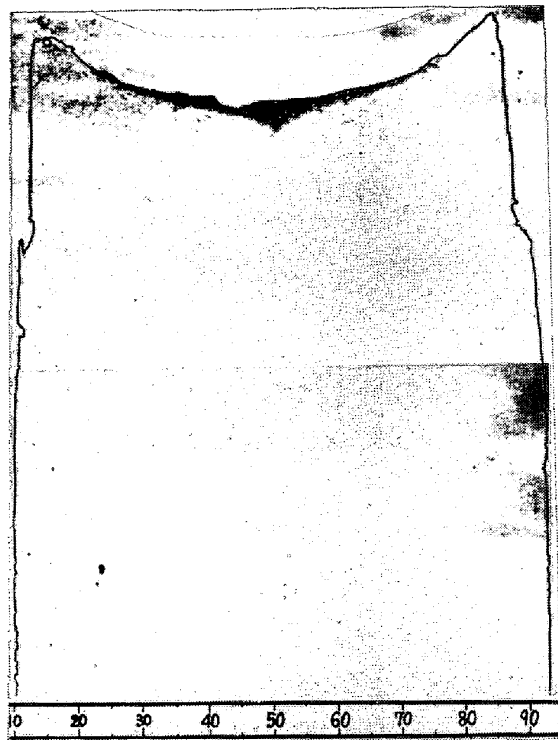
(3) R. E. M. 添加の際, 大きな問題となっていた沈澱晶部の大型介在物も大幅に改善されており, B.C.C.T. 法による取鍋添加の有効性が確認された^{20)~24)}。

(4) Ca 添加の A 鋼塊においても, サルファー, マクロ偏析はかなり軽減されているが, R. E. M. 添加のようなサルファープリントにおける逆V偏析の消失は認められない。

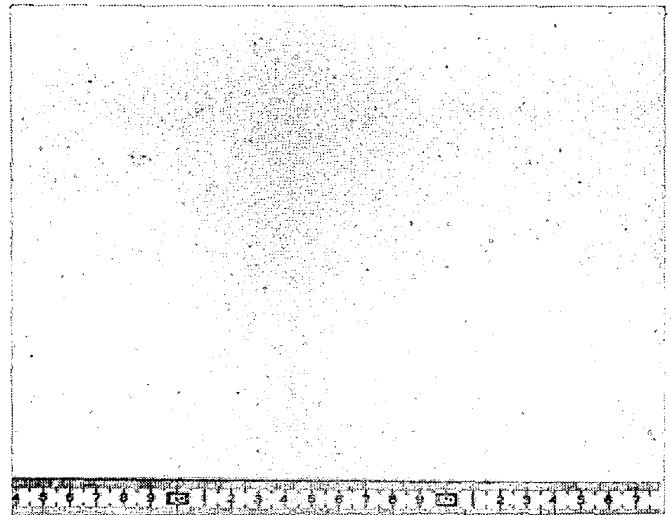
4. 考 察

4.1 大型鋼塊の凝固

パーテスト結果により 算出した凝固式, 凝固速度を Table 6 に示す。



(a) H-6 (F8) (×1/14)
(White inverse V segregation of ingot top.)



(b) H-6 (F8) (×1/3)
(White inverse V segregation of ingot center)

Photo. 4. Sulfurprints of vertical section of the R. E. M. treated steel ingots.

すなわちバーテストによる実測値（ casting 終了後経過時間、凝固厚さ）より、縦方向の凝固式を最小自乗法により、求めると次のようになる。

- U6 通常 casting : I $t < 80 \text{ min}$, $D = 24.7\sqrt{t}$
- II $t \geq 80$, $D = 0.039t^2 - 38$
- U6 攪拌鋼塊 : I $t < 50 \text{ min}$, $D = 24.6\sqrt{t}$
- II $t \geq 50$, $D = 0.055t^2 + 32$
- U7 通常鋼塊 : I $t < 100 \text{ min}$, $D = 19.7\sqrt{t}$
- II $t \geq 100$, $D = 0.015t^2 + 48$

凝固初期においては、U6 の場合、凝固係数 $K_I = 24.6, 24.7 (\text{mm}/\text{min}^{1/2})$ となっており、この値は横方向の凝固に関する従来の報告値とかなりよく一致している^{26)~28)}。

U7 についてみると、 $K_I = 19.7 (\text{mm}/\text{min}^{1/2})$ 若干低めになっているが、これは鋼塊厚みの影響が現われていると推定される。

次に通常 casting 鋼塊と攪拌鋼塊の凝固状況を比較すると凝固初期においては、凝固係数はほとんど一致している（ casting 終了 30 min 後より攪拌実施）。凝固中期以降になるといずれの場合も凝固は急速に進行し、 $D = K\sqrt{t} + C$ なる凝固式よりも、 $D = Kt^2 + C$ なる t に関する 2 次式で表わした方が適切であると考えられる。この時期は、

沈澱晶生成開始により凝固が急速に進行するということが説明できるが、攪拌鋼塊の場合、攪拌により柱状晶を分断し、この沈降堆積が加味されて、通常鋼塊に比べて、凝固が急速に進行しているものと推定される。

今回の実験結果によると、通常鋼塊では casting 終了後 80 min 以降に凝固式が 2 次式となるが、攪拌を実施するとこの時期が 50 min であり、凝固速度の増大が認められる。

また、横方向凝固の測定は行なっていないが、結晶の沈降堆積という現象が考えられないので、通常鋼塊と攪拌鋼塊とで凝固速度に差は少ないと考えられる。

凝固伝熱シミュレーション結果と比較しても、U6 に関しては凝固係数 K_I は、ほぼ一致していると考えてよい²⁹⁾。2T 砂型鋼塊での試験結果では、 $K_I = 10.1 (\text{mm}/\text{min}^{1/2})$ となっており、実用鋼塊よりかなり小さい値となっている²⁴⁾。

4.2 大型鋼塊の成分偏析

4.2.1 逆V偏析の生成

逆V偏析の生成位置をサルファープリント写真より実測した結果を Fig. 9, 凝固速度の経時変化を Fig. 10 に示す。

Fig. 9 をみると、攪拌により逆V偏析生成開始時期は

Table 6. Calculated solidification equation and velocity from results of bar test.

		U6 ²⁾ (calculation)		U6 (experiment)		U7 (experiment)	2 t sand mold (experiment)
		Standard		Standard	Scraped	Standard	Standard
Thickness of solid skin from surface	I ¹⁾	$D=21.4\sqrt{t}$		—	$t < 120 \text{ min}$ $D=22.6\sqrt{t}$	—	$t < 90 \text{ min}$ $D=10.1\sqrt{t}$
Thickness of solid skin from bottom	I ¹⁾	—		$t < 80 \text{ min}$ $D=24.7\sqrt{t}$	$t < 50$ $D=24.6\sqrt{t}$	$t < 100 \text{ min}$ $D=19.7\sqrt{t}$	—
	II ¹⁾	—		$t \geq 80$ $D=0.039t^2-38$	$t \geq 50$ $D=0.055t^2+32$	$t \geq 100$ $D=0.015t^2+48$	—
Solidification velocity (from surface) (mm/min)		$\frac{dD}{dt} = \frac{21.4}{2\sqrt{t}}$		—	$\frac{dD}{dt} = \frac{22.6}{2\sqrt{t}}$	—	$\frac{dD}{dt} = \frac{10.1}{2\sqrt{t}}$
The values on start- ing the formation of the V segre- gation	Thickness ²⁾ (mm)	140	170	—	170	—	40
	Solidification velocity (mm/min)	1.64	1.35	—	1.50	—	1.28

1) I : The first half of solidification, II : The second half of solidification
 2) Determined values by the thickness of solid skin from ingot surface on starting the formation of the inverse V segregation

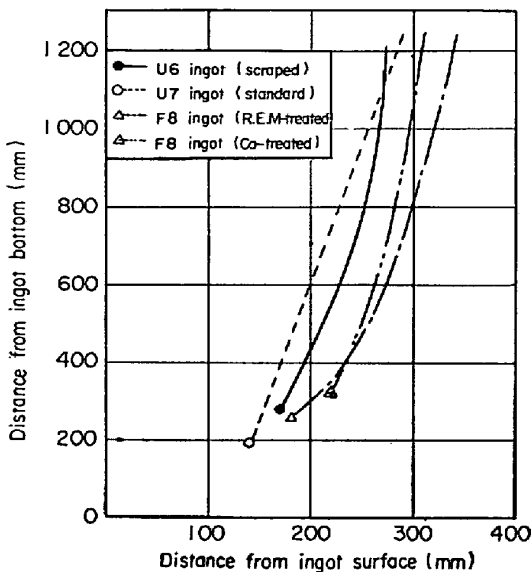


Fig. 9. Formating position of the inverse V segregation.

遅れ, 位置としても鋼塊内部に移動し, 凝固の進行とともに偏析線は立つてくる傾向が認められる.

マクロ組織をみると, 逆V偏析線は柱状晶を貫通しており, 組織そのものより凝固速度の影響を受けて, 攪拌鋼塊の逆V偏析線は鋼塊の内部に移動したと推定される.

また逆V偏析線の水平方向に対する角度 θ , 不純物濃化溶鋼の浮上速度Vを測定した結果を Table 7 に示す.

U6 の通常鋼塊においては, 浮上速度 $V=9.5 \text{ mm/min}$ (逆V偏析生成期), 攪拌の実施により偏析線の角度 θ は大となり, $V=10.4 \rightarrow 14.6 \text{ mm/min}$ と急激に増大

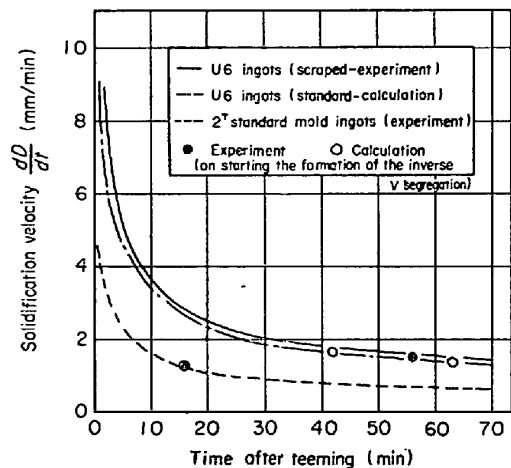


Fig. 10. Change of solidification velocity after teeming.

しており, 攪拌による浮上効果が明瞭に現われている.

4.2.2 逆V偏析の生成と凝固速度について

小型の金型鋼塊においては凝固速度が速いため, 逆V偏析はほとんど生成されないということはすでに, 確認されている⁸⁾.

したがって逆V偏析と凝固速度の間には密接な関係があると推定される.

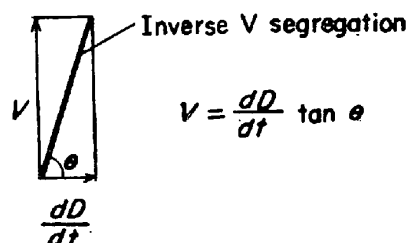
2^T 砂型鋼塊, U6 凝固シミュレーション計算結果, 攪拌鋼塊について比較すると, 逆V偏析の生成開始時の凝固速度 (臨界凝固速度 V_c) はそれぞれ 1.28 mm/min , 1.64 mm/min , 1.50 mm/min となっている.

ここで 2^T 砂型の場合は若干小さな値を示しているが

Table 7. Change of the horizontal angle of the inverse V segregation and the floating velocity of the thickened liquid steel in the scraped method.

Mold type	D	θ	t	$\frac{dD}{dt}$	V	Other
U7 (standard)	140	80	38	1.83	10.4	On starting the formation of the inverse V segregation
U6	170	81	57	1.50	9.5	" (standard)
	200	83	78	1.28	10.4	" (scraped)
	250	86	122	1.02	14.6	" (scraped)

c.f. D : Solidification thickness from ingot surface (mm)
 θ : Horizontal angle of the inverse V segregation (degree)
 t : Time after teeping (min.), $\frac{dD}{dt}$: Solidification velocity (mm/min)
 V : Floating velocity of the thickened liquid steel (mm/min)



凝固係数が実用鋼塊に比べてかなり小さい値となっており、この影響が現われている。

次に、U6 鋼塊において、計算結果と攪拌鋼塊について詳細に比較する。

計算結果を通常鑄込材と考えると、 $V_C = 1.64$ mm/min に対して攪拌を実施すると $V_C = 1.50$ mm/min と遅くなっている。すなわち通常鑄込の場合は、 $V \leq 1.64$ mm/min で逆 V 偏析の生成が開始するが、攪拌を行なうと、 $V = 1.64$ mm/min でも逆 V 偏析の生成は始まらず、 $V \leq 1.50$ mm/min で初めて生成が始まる。

したがって溶鋼攪拌は逆 V 偏析生成開始の臨界凝固速度 V_C を遅くする効果がある。

そこで U6 計算結果を用いて、実用鋼塊における逆 V 偏析生成開始時の凝固厚さの実測値により通常鑄込と攪拌鋼塊の逆 V 偏析の生成開始時間、 V_C を求めると次のようになる。

通常鋼塊：逆 V 生成開始時間、

$$t_u = 42 \text{ min}, V_{Cu} = 1.64 \text{ mm/min}$$

攪拌鋼塊：逆 V 生成開始時間、

$$t_s = 63 \text{ min}, V_{Cs} \times 1.35 \text{ mm/min}$$

攪拌により逆 V 偏析の生成開始時間が 20 min 遅れ、位置が 30 mm 内部に移動しており、定量的にも攪拌効

果が確認された。

4-2-3 R. E. M. 添加による S 負偏析の生成

3-3 で述べたように R. E. M. 添加鋼塊においては、C, P の逆 V 偏析線は残留しているが、サルファープリントにおいては逆 V 偏析部は白抜きの負偏析を呈しており、R. E. M. 添加の効果が明瞭に現われている。

通常鋼塊の凝固において、凝固はデンドライト状に進行し、C, P, S の濃化溶鋼がデンドライト樹間にしみ出して集積し、逆 V 偏析を生成する。したがって逆 V 偏析部には C, P, S が濃化しサルファー、マクロともに正偏析となる。また S は凝固過程の低温域で MnS として析出し正偏析を呈するが、高温で生成された酸化物はデンドライト樹間にトラップされるため、逆 V 偏析部の [O] は負偏析を呈する³⁰⁾。

一方 R. E. M. 添加鋼においては、溶鋼段階で S は R. E. M.-S (O) 系の介在物として固定され³¹⁾、酸化物の場合と同様にデンドライト樹間にトラップされ、逆 V 偏析部にはしみ出してこないために濃化溶鋼中には C, P のみが濃化される。すなわち逆 V 偏析部においては、C, P は正偏析を呈するが、S は負偏析となる³²⁾。

さらに Ca 添加鋼塊の場合は、Ca は溶鋼中に固溶されており凝固過程で CaS として析出してくるので、通

常の場合と同様の挙動を示し、逆V偏析部は C. P. S と
も正偏析を呈する。

5. 結 言

今回の試験結果より次のようなことが判明した。

1. 大型扁平鋼塊における縦方向の凝固パターンは次のようになる。

(1) 凝固初期 (沈澱晶生成前)

$$D = k_1 \sqrt{t}$$

(2) 凝固中期, 後期 (沈澱晶生成以降)

$$D = K_1 t^2 + C$$

すなわち凝固初期には \sqrt{t} に比例し、沈澱晶生成開始にともない、凝固が急速に進行し t^2 に比例する。

(縦方向)	U6 通常鋼塊	U6 攪拌鋼塊	U7 通常鋼塊
初 期	$D = 24.7\sqrt{t}$	$D = 24.6\sqrt{t}$	$D = 19.7\sqrt{t}$
中・後期	$D = 0.039t^2 - 38$	$D = 0.055t^2 + 32$	$D = 0.015t^2 + 48$

2. 鋳型内溶鋼攪拌により鋼塊頭部表面近傍の逆V偏析は消失するが、底部の逆V偏析線は消失しない。ただし偏析線の微細化、内部への移動、また凝固の進行とともに不純物濃化溶鋼の浮上速度が急速に増大し、攪拌効果が認められる。

3. 逆V偏析と凝固速度について

(1) 逆V偏析の生成と凝固速度との間には密接な関係があり、逆V偏析生成の臨界凝固速度 $V_c = 1.64$ mm/min となる (凝固シミュレーション)。

(2) 攪拌を実施すると $V_c = 1.50$ mm/min と臨界凝固速度を遅らせることができる。

(3) 攪拌により逆V偏析の生成開始時間を 20 min 遅らせ、位置を 30 mm 内部に移動させることができる。

4. 鋳型内溶鋼攪拌により鋼塊軸心部頭部の偏析が大となり (V偏析) また逆V偏析を完全に防止することはできないということが判明した。

したがって、現場での実現性などを考えた場合、実用鋼塊での偏析防止策として今回の様な機械的攪拌方法は適切ではなく別途 (電磁攪拌など) を検討する必要がある。

5. R. E. M. 添加によりサルファー、マクロの V, 逆

V偏析は軽減され、特にサルファープリントのV, 逆V偏析は消失し、沈澱晶部の大型介在物の問題もなく、BCCT法による R. E. M. の取鍋添加の有効性が確認された。

文 献

- 1) 中川: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 1406
- 2) 田辺, 福本: 日本製鋼所技報, p. 2346
- 3) 小野寺, 荒木田: 日本製鋼所技報, p. 1182
- 4) 成田, 森: 鉄と鋼, 46 (1970), p. 1323
- 5) 鈴木, 宮本: 学振19委, 9478, 凝固-123
- 6) 鈴木, 宮本: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 1540
- 7) E. A. KAZAKOV and S. L. MAKUROV: Izv. VUZ. Chern. Met., 1974, (11), 54
- 8) 佐々木, 小田: 学振19委, 9862, 凝固-181
- 9) 鈴木: 日本製鋼所技報, 31, p. 25
- 10) 鍵和田, 中川: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 454
- 11) 中川, 鹿野: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 906
- 12) J. J. FRAWLEY and W. J. CHILDS: Trans. AIME, 242 (1968), p. 256
- 13) A. H. FREEDMAN: Trans. Amer. Found. Soc., 65 (1957), p. 578
- 14) R. G. GARLICK and J. F. WALLACE: AFS, Trans., 67 (1959), p. 366
- 15) 中川: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1223
- 16) 中川, 萩原: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 886
- 17) 中西: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 237
- 18) 森永, 佐藤: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 1333
- 19) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 52 (1962), p. 1517
- 20) 江見, 桜田, 鈴木: 鉄と鋼, 59 (1973), S 449
- 21) 江見, 鈴木, 垣生: 鉄と鋼, 60 (1974), S 51
- 22) 江見, 鈴木, 垣生: 鉄と鋼, 61 (1975), S 181
- 23) 丸川, 白石, 橋尾, 高橋: 鉄と鋼, 61 (1975), S 509
- 24) 丸川, 白石, 豊田, 高橋: 鉄と鋼, 62 (1976), S 127
- 25) 丸川, 白石, 市橋, 高橋: 鉄と鋼, 61 (1975), S 435
- 26) L. H. NELSON: Trans. Ame. Soc. Metals, 22 (1934), p. 193
- 27) 浅野, 松永: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 1916
- 28) 田代, 轟木, 木村: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1479
- 29) 小田: 未発表資料
- 30) 石黒, 伊藤: 学振19委, 9836, 凝固-178
- 31) W. A. FISHER. et al.: Arch. Eisenhüttenw., 44 (1973), p. 87
- 32) 小田: 未発表資料 (私信)