

Table 2. Effect of ingot hot top on the internal defects. (Ingot weight 22 t, 12 heats)

	Index of internal defects in slab		
	Top	Bottom	Average
Ordinary refractory	3.5	1.6	2.6
Chemical hot top	2.8	0.3	1.6

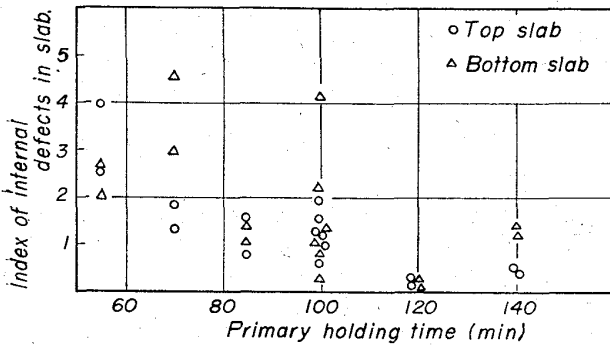


Fig. 2. Effect of holding time on the index of internal defects in slab.

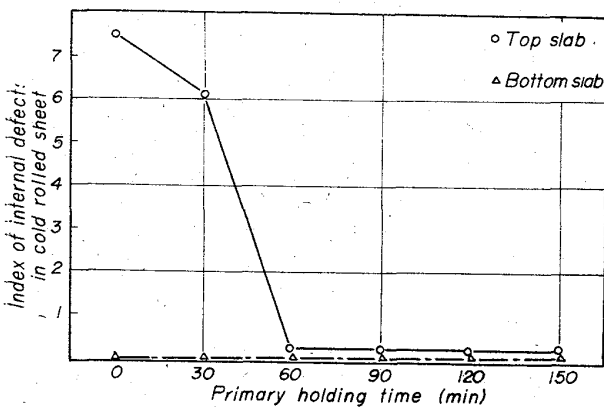


Fig. 3. Relation between index of internal defects and primary holding time.

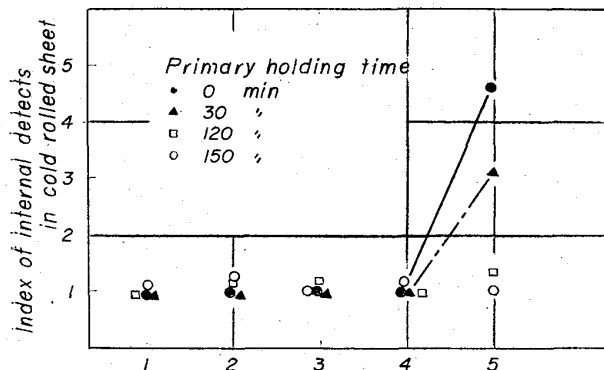
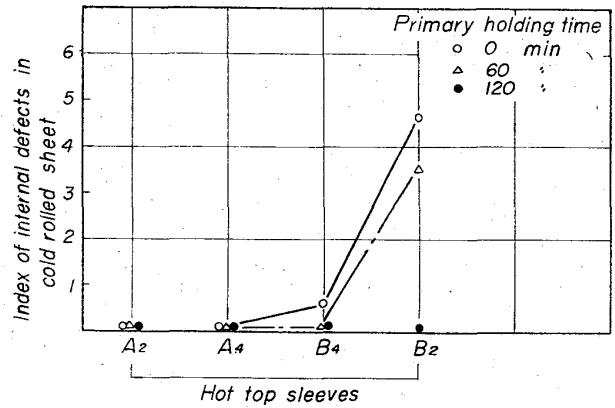


Fig. 4. Relation between index of internal defects and ingot number.

響はほとんど現われず、また発熱性スリーブでは2面も同様の結果となつている。前回報告したごとく、分塊歩留の点でも4面スリーブの優位性が認められたが、これ



A₂: Exothermic two sleeves A₄: Exothermic four sleeves
B₂: Insulating two sleeves B₄: Insulating four sleeves

Fig. 5. Effect of the lining of hot top on the internal defect in cold rolled sheet.

らの結果から、現在4面スリーブを常用している。

注入後、鋼塊台車の移動時期を決定する場合、押湯部の凝固率、温度を考慮し、かつ鋼塊の内部性状に対する影響を明らかとしなければならないが、以上の調査結果から鋼塊品質に悪影響を与えない最短の静置時間として60 min を得ることができた。この結果は注入線の能力向上と造塊作業面の環境改善にも大きく寄与した。

4. 結 言

キルド鋼の内部欠陥発生防止を目的として、注入後静置時間を決定するために試験調査を行なつた結果、次のように判明した。すなわち、成品板における内間欠陥の調査結果ではほとんど鋼塊頭部について認められ、その場合静置時間の影響はほとんど最終鋼塊に現われた。

化学保温材使用時の注入後静置時間はレンガ押湯法時の120 min から60 min と短縮して問題なく品質の向上ならびに安定維持ができ、かつ造塊作業工程の溢路は著しく改善された。

621.746.6 : 620.192.43

: 669.141.241.2 - 41.2 : 620.192.43

(77) キルド鋼塊凝固中の残溶鋼の湯動きについて

(製鋼工場における RI の利用—Ⅻ)

八幡製鉄, 技術研究所

理博 森 久・松尾 翠

○谷沢 清人・山手 実

Mode of Liquid Metal Flow during Ingot Solidification of Killed Steel.

(Tracer application of RI to steel works—Ⅻ)

Dr. Hisashi MORI, Midori MATSUO,
Kiyohito TANIZAWA and Minoru YAMATE.

1. 結 言

キルド鋼塊の凝固組織やマクロ偏析を支配する要因の一つとして、鋼塊凝固過程における残溶鋼の流動や攪拌などが重要であるが、実用鋼塊の静置凝固中の湯動きの状況を実証することは困難であつた。ところが最近 RI トレーサー法を利用することにより、この点についてかなりの知見が得られるようになった。

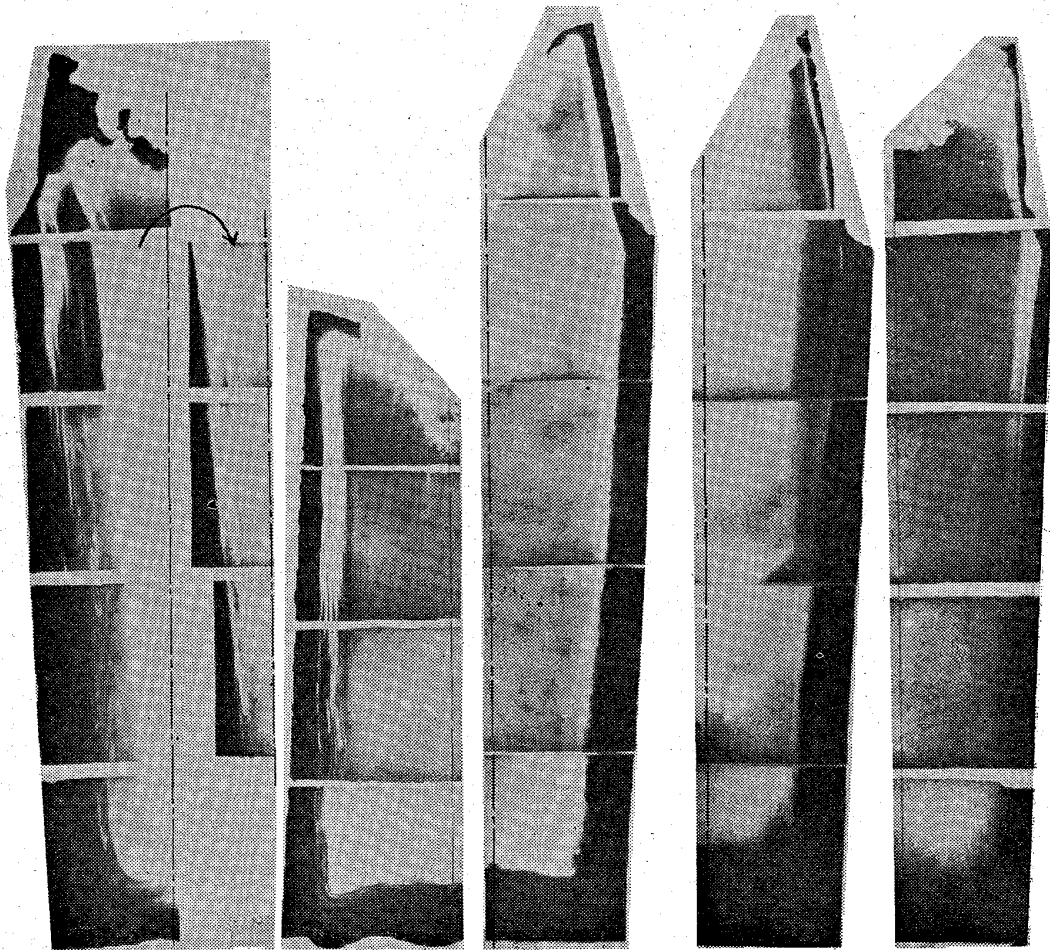
すなわち、KOSMIDER ら¹⁾は、1.6 t の下注ぎ鋼塊の注入中に、鑄型のトップから約 20 cm 下の所で上昇してくる溶鋼中に $Fe^{55}S$ を投入し、鋼塊縦断面のオートラジオグラフを観察したところ、鋼塊側面側の凝固線付近の ^{55}S 濃度がより内部に比べて高く、この輪郭がボトムに近づくほどぼやけてくるが底面近くまで ^{55}S が分布していることから、鋼塊の凝固過程においては凝固面に沿って残溶鋼が下降する流れがあると推測している。著者らの考えでは、下注ぎ注入中の湯動きがあるにもかかわらず、注入中に RI を投入した点に疑問を感じ、KOSMIDER らの説には同意するが、実験的証左を与えたものとは受取り難い。一方、SBOROWSKI ら²⁾は、注入後 0~20 min 後に ^{59}Fe を挿入した鋼塊のピレット長さ方向の放射能分布をしらべた結果、放射能計数率はボトムに近づくほど減少するが、注入終より 20 min 後に ^{59}Fe を投入し

た場合ですら、鋼塊ボトムから数%の高さまで ^{59}Fe が分布したことを認め、注入後かなり長時間残溶鋼の湯動きが持続することを明らかにした。

著者らは、残溶鋼の流動状況と鋼塊の凝固組織との対応づけならびに残溶鋼の流動速度の推測法を見出すための試験を行なった。

2. 実験方法

2 t 転炉または 1 t 電炉で溶製したキルド鋼を上注ぎ注入して (鋼塊単重は約 1 t) 1 min 以上経過したのち、0.5 g 以下の金属線状の ^{198}Au もしくは 1 g のメタリック ^{140}La を直径 1 cm 長さ 5 cm の Al カプセルに封入して直径 3 mm の鋼棒で保持したものを、溶鋼表面より約 10 cm の深さにすばやく挿入した。注入終より Al カプセル挿入までに 1 min 以上経過させた理由は、注入流による湯動きが一応おさまるのを待つためである。



Ingot No.	1	2	3	4	5
Kind of radioisotope	Low carbon ^{198}Au	Al killed steel ^{198}Au	^{198}Au	S45C ^{198}Au	^{140}La
Pouring time (min)	1.0	0.8	2.2	2.1	1.4
Time from pouring end to RI addition (min)	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0
Length of columnar crystal (mm)					
Side	140~165	70~80	30	40~50	40~50
Bottom	140	65	20	35	20

Photo. 1. Autoradiographs of half of longitudinal cross-section of ingot.

鋼塊断面のオートラジオグラフ検査要領は前報³⁾に準ずる。

3. 実験結果と考察

3.1 RI の分布状況と鋼塊のマクロ組織との対応

鋼種は低炭 Al キルド鋼および S45C を対象とし、RI 挿入時期としては、注入終より 1~6 min をえらんだ。鋼塊縦断面のオートラジオグラフの数例を Photo. 1 に示す。

いずれの鋼塊にも共通して認められることは、鋼塊側面側の凝固線付近の RI 濃度が、より内部のそれに比べて高く、この輪郭がボトムに近づくにつれてぼやけてくるが、底面近くまで RI が分布していることであり、前述した KOSMIDER らの説を裏付けている。

低炭 Al キルド鋼と S45C との差異に着目すると、S45C の場合には、底面側の RI の分布境界は側面側のそれに比べて不明瞭であり、側面側の RI の分布しない厚さに比べて底面側の RI の分布しない厚さがかなり厚いことが認められる。すなわち、S45C においては、底面側の凝固面上に粘調な相が滞溜しており、側面側の凝固面に沿って下降してきた RI を含む溶鋼が、この粘調な相の上に流れて若干混合した結果、ぼやけた RI の分布を示すと考えられる。一方、低炭 Al キルド鋼の場合には、底面側の RI の分布境界が S45C に比べて明瞭であり、底面側の RI の分布しない厚さと側面側のそれとがほぼ等しく、側面側—底面側の RI 分布境界線は、なだらかな曲線をなして連続している。すなわち低炭 Al キルド鋼においては、底面側の凝固面上に粘調な相が滞溜していなかったことを示すと考えられる。No. 2 鋼塊に比べて、No. 1 鋼塊底面側の RI 分布境界が明瞭であることが注目される。なお、No. 1 および No. 2 鋼塊においては、鋼塊側面にはほぼ平行な数層をなして RI が分布しているが、何らかの理由により、挿入した ^{198}Au が数群に分散し、各々がそれぞれの時期に、凝固面に沿った下降流に伴われて下降したものであろう。

Photo. 1 に示した鋼塊は、注入終より 1.2 min 後までに RI を挿入した例であるが、よりおそい時期に RI を挿入した他の鋼塊においては、側面側の RI の分布しない厚さと底面側のそれとの差異がより大きくなり、底面側の RI の分布境界のぼやけが著しくなることが認められた。この傾向は、低炭 Al キルド鋼よりも S45C の場合に著しかった。

つぎに鋼塊のマクロ組織に着目し、オートラジオグラフ、サルファープリント、マクロ腐食写真を観察して、柱状晶の長さを求めた結果を、Photo. 1 にあわせて記入した。S45C においては、側面側の柱状晶の長さは 50 mm 以下であつて、側面側の RI の分布しない厚さと同程度もしくはそれ以下である。また底面側の柱状晶の長さは 20 mm 程度であつて、底面側の RI がぼやけて分布している部位の組織は沈澱晶である。一方、低炭 Al

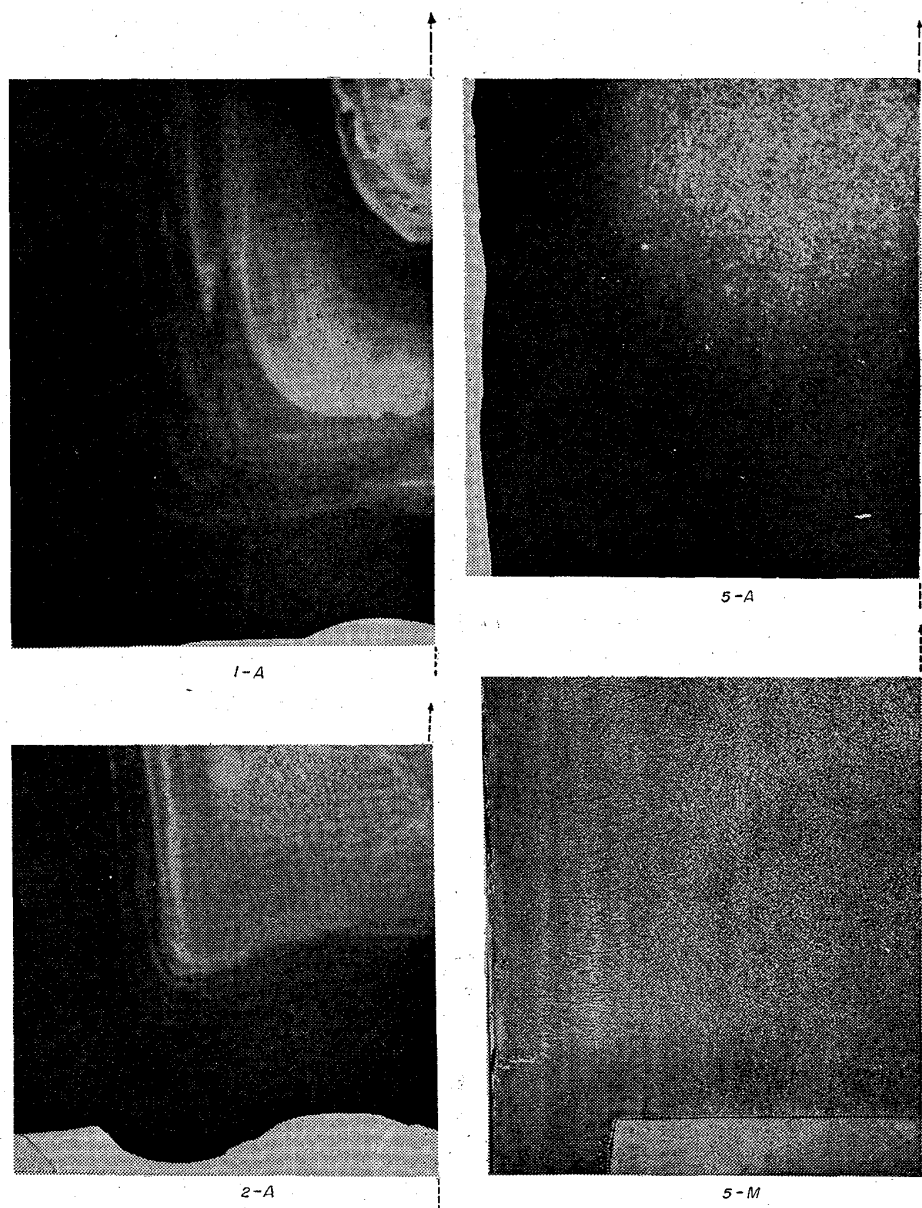


Photo. 2. Autoradiographs and macrostructure of ingot bottom. (I-A and \uparrow denote autoradiograph of No. 1 ingot and central axis)

キルド鋼である No. 1 鋼塊においては、柱状晶が鋼塊中心軸近くまで発達しており、Photo. 1 にみられる数層をなして ^{198}Au が分布している部位の組織は、すべて柱状晶である。No. 2 鋼塊においては、柱状晶の長さが No. 1 鋼塊よりも短く、底面側の RI 分布境界は、柱状晶と沈澱晶との境界にほとんど一致している。このような RI の分布状況と鋼塊のマクロ組織との対応の証左として、マクロ組織の 1 例と Photo. 1 に示したオートラジオグラフの 1 部とを Photo. 2 に示す。

キルド鋼塊の凝固機構について、残溶鋼内において自由晶が析出し沈澱晶の滞溜が開始すると、柱状晶の発達が阻止されることが知られている。上述した実験結果は、沈澱晶の滞溜が開始する時期までは、KOSMIDER の説による湯動き状況が残溶鋼全容積にわたって持続するが、いつたん沈澱晶がボトム部に滞溜し始めると、沈澱晶部の粘度が高いために、この部位の湯動きがほとんど停止することを示すものと考えられる。

キルド鋼塊の介在物が沈澱晶部に多く残留することはよく知られており、この理由として、介在物（特に固体の）を核として沈澱晶が析出することが認められているが⁴⁾、本報で明らかにされたごとく、沈澱晶に含まれた残溶鋼にすでに含まれる介在物およびそれ以後に析出する介在物は、沈澱晶部の湯動きがほとんどないために、浮上が停止することをも考慮すべきである。

3.2 凝固面に沿った溶鋼の下降速度

Photo. 1 を眺めると、鋼塊トップ側面側の RI の分布しない厚さとボトムのそれとの差異は、凝固速度係数 k が高さ位置によらず一定と仮定すると、注入時間の差異以上に大きいようである。

そこで、鋼塊の各高さ位置について、RI を挿入してからその位置まで RI が下降するに要する時間 T を、(1) 式によつて求めた。

$$T = T_C - T_A \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_A : その高さに溶鋼が注入されてから RI を挿入するまでの時間；実測値

T_C : k が $2.5 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1/2}$ と仮定して、その高さの RI が分布しない厚さから逆算した凝固時間

各鋼塊について、RI 挿入位置からの距離と T との関係プロットしてみると、バラツキはあるが、およそ原点を通る直線とみなしうることがわかった。 k を $3.0 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1/2}$ と仮定して T を求めると、原点からの外れが大きくなる。この直線の勾配の逆数が、溶鋼の下降速度 v であり、これを Fig. 1 に示す。図中に線で結んだ点は、同一鋼塊に属することを意味する。 $10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ のオーダーであり、凝固の進行につれて v が減少する傾向が認められるが、鋼種の影響は明らかでない。

鋳鉄型内の鋼塊の凝固速度係数 k に関する文献値は、 $2.5 \sim 3.0 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1/2}$ の範囲にあり、鋼塊高さ方向の k の変化については、ボトムに近いほど大きいとする考えもあるようである。そこで、 k を 3.0 と仮定して v を算出すると $8 \sim 104 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ なる値が得られ、極端な仮定として、ボトムから 20 cm の高さでは k が 3.0 であり、 80 cm の高さでは k が 2.5 と仮定すると、 v として $15 \sim 144 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ なる値が得られた。

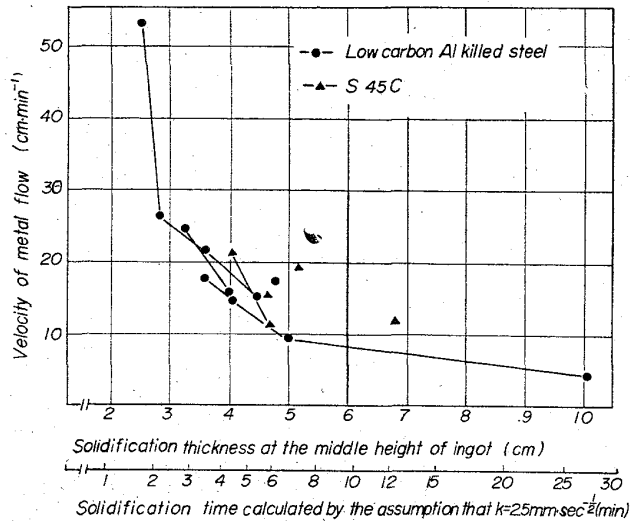


Fig. 1. Relation between velocity of metal flow along solidification front and solidification time.

キルド鋼塊の（初期）凝固過程における凝固面に沿う湯動きの起因として考えられるものは、凝固面近傍において析出した結晶片の沈降と thermal convection による下降流と、solute convection による上昇流であり、後の二者については理論式が導出されているが⁵⁾⁶⁾、物性定数などのデータの得られていないものが多いために、式による推算は困難である。ただ上述したように、凝固面に沿って下降することが明らかにされたので、thermal convection などが solute convection に優先したことがわかる。凝固が進むにつれて下降速度がおそくなる原因は、結晶片の析出により溶鋼粘度が急増するためと、結晶片の析出が残溶鋼の全容積にわたっておこるようになるためと、一応想像される。

最後に、本報の実験ならびに考察は、凝固の比較的初期に関するものであり、逆 V 偏析の生因などに関する RI 法による検討は、今後にもたねばならないことを付言する。

4. 結 言

1 t キルド鋼塊の注入終了より 1~6 min 後に、トップ部に RI を挿入し、オートラジオグラフ法により RI の分布をしらべ、マクロ組織と比較した。その結果、鋼塊側面側の凝固面に沿って溶鋼が下降するとする KOSMIDER の説を確認し、沈澱晶が生成するまでは残溶鋼全容積にわたる湯動きがあるが、いつたん沈澱晶がボトムに滞溜すると、この部位の湯動きがほとんどなくなることがわかった。凝固面に沿った溶鋼の下降速度を、トップ部の RI の分布しない厚さ（凝固厚さ）とボトム部のそれとの差異から算出したところ、 $10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ のオーダーであり、凝固が進むにつれて速度がおそくなることがわかった。

文 献

- 1) H. KOSMIDER et ali.: Stahl u. Eisen, 77(1957), p. 133
- 2) A. A. SBOROWSKI et ali.: Stal, 17 (1957), p. 24, 紹介は Stahl u. Eisen, 80 (1960), p. 102

- 8) 森, 他: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1973
- 4) P. H. S. Cox, et al.: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 201 (1963), p. 863
- 5) C. WAGNER: Trans. Met. Soc. Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 200 (1954) p. 154
- 6) G. S. COLE and W. C. WINEGARD: J. Inst. Metals, 93 (1964~1965), p. 153

(78) キルド鋼の特殊凝固試験

八幡製鉄, 技術研究所

工博 一戸正良・〇平居正純・金丸和雄

〃 特殊鋼技術部 徳重 勝

Segregation in Some Experimentally Solidified Killed Steel Ingots.

Dr. Masayoshi ICHINOE, Masazumi HIRAI, Kazuo KANAMARU and Masaru TOKUSHIGE.

1. 緒 言

キルド鋼の欠陥として指摘されているものの中に, 成分偏析およびインゴットパターンなどがあるが, その本質についてはまだ不明なところが多い。この問題は本質的には, 鋼塊の凝固に関するものであるが, 凝固機構の解明に対する一つのアプローチとして, 特殊凝固試験を行なったので, その結果について報告する。

2. 試験要領

2.1 凝固条件

- 1) 砂型鋼塊 (定盤はレンガで鑄型は砂型)
凝固速度を極端におそくする。
- 2) 銅製水冷定盤+鑄型下半分金型+鑄型上半分砂型
底部より冷却を進め, 縦方向の凝固を促進させる。
- 3) レンガ定盤+鑄型下半分砂型+鑄型上半分金型
凝固中の溶鋼に対流を促進せしめるがごとき条件を作り, それの鋼塊性状におよぼす影響を見る。
- 4) 傾斜凝固鋼塊 (鑄型は金型)
鋼塊注入後, 傾斜させたままで凝固させ, 鋼塊組織および偏析におよぼす重力の影響を調査する。

2.2 調査方法

20 t 塩基性平炉で出鋼した中炭素鋼を, 前記おのおのの凝固条件について 1 本ずつ上注造塊した約 2.6 t の角型鋼塊を切断後, S プリント, マクロ組織, 成分偏析調査を行なった。各試験鋼塊の注入条件および取鍋下分析値を Table 1 と Table 2 に示した。

3. 調査結果

切断鋼塊の S プリントの写真を Photo. 1 に, 同じく C の偏析曲線を Fig. 2, Fig. 3 に示した。Fig. 2 は鋼塊垂直方向および Fig. 3 は水平方向のそれぞれの偏析曲線である。また各鋼塊の C, P, S の最大偏析度を Fig. 4 に示した。

各鋼塊の S プリント, マクロ組織および成分偏析の調査結果をまとめると次のとおりである。

1) 砂型鋼塊

頭部の収縮パイプが本体内に深く入っている。柱状晶は頭部から底部まではほぼ一様に肌より約 30~40 mm 成長している。A 偏析線は柱状晶先端の肌近くより非常に多く発生し巾が広くまた濃い。V 偏析は鋼塊中央部に明確でないが巾の広いものが少し見られる。成分の負偏析は鋼塊中央を中心として下部側に巾広く現われ, 底部に向うほど大きい。頭部側でも肌側で負偏析を示す部分がある (A 偏析線と関係)。正偏析は鋼塊中央より上部側に大きく示す。

2) 上半部砂型鋼塊

押湯部下に小さいパイプが分散残存している。柱状晶

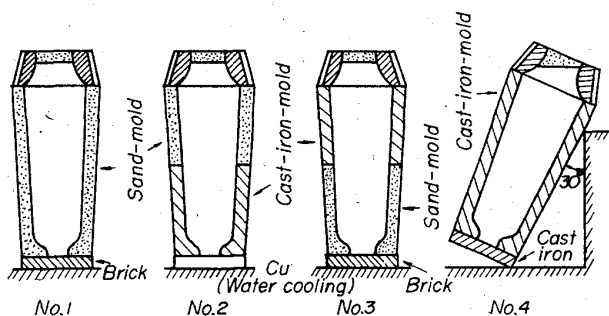


Fig. 1. Tested solidification conditions.

Table 1. Teeming condititons of tested ingots(2.6 t).

Ingot No.	2	3	4	5
Mould	Sand	Sand at upper half, cast-iron at lower parts	Cast-iron at upper half, sand at lower part	Cast-iron, inclined 30° after pouring
Tapping temperature °C	1600			
Pouring temperature (in ladle) °C	1545			
Pouring speed mm/min	805	870	1090	305
Feeder head	Exothermic hot top			

Table 2. Ladle analysis of tested ingots.

Element	C	Si	Mn	P	S
%	0.49	0.24	0.56	0.016	0.016