

より浮上分離できず鋼塊底部に捕捉される。ただ、本機構は一要因のみで律せられるものでなく総合的な見地からの究明が必要で、今後さらに検討を加えていく予定である。

5. 結 言

大型介在物生成機構究明のための第一段階として、6 t 電気炉により、厚鋼板の超音波欠陥におよぼす精練・造塊条件の影響を調査した。その結果、注入温度は大型介在物生成の重要な因子であることがわかった。

文 献

- 1) J. H. S. DICKENSON: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 113 (1926), p. 177
- 2) 中川, 百瀬: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 428
- 3) 田尻: 学振19委資料 7520 (昭和39年4月11日)
- 4) 森, 他: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 419
- 5) 小池, 他: 鉄と鋼, 43 (1957), p. 122

下注ぎキルド鋼塊の底部における組織的不均一性について*

神戸製鋼所, 中央研究所

理博, 工博 成田 貴一・谷口 政行

神戸製鋼所, 神戸工場

久次米 章・山田 史郎

On the Structural Non-uniformity in the Lower Portion of Killed Steel Ingot Made by Bottom Pouring

Dr. Kiichi NARITA, Masayuki TANIGUCHI
Akira KIJIME and Shirō YAMADA

1. 結 言

一般に下注ぎキルド鋼塊の造塊に際して、溶鋼の注入温度が低い場合、あるいは鑄型内における溶鋼の保温が不十分な場合には、その鋼塊の底部に相当する圧延鋼片の断面に、“湯模様”欠陥とよばれている巨視的な不均一組織を生ずることがある。しかしこの湯模様の性状と発生機構はまだあきらかにされていない。そこで本報では、この湯模様の性状、発生機構ならびにその防止対策について2, 3の検討をおこなった結果を報告する。

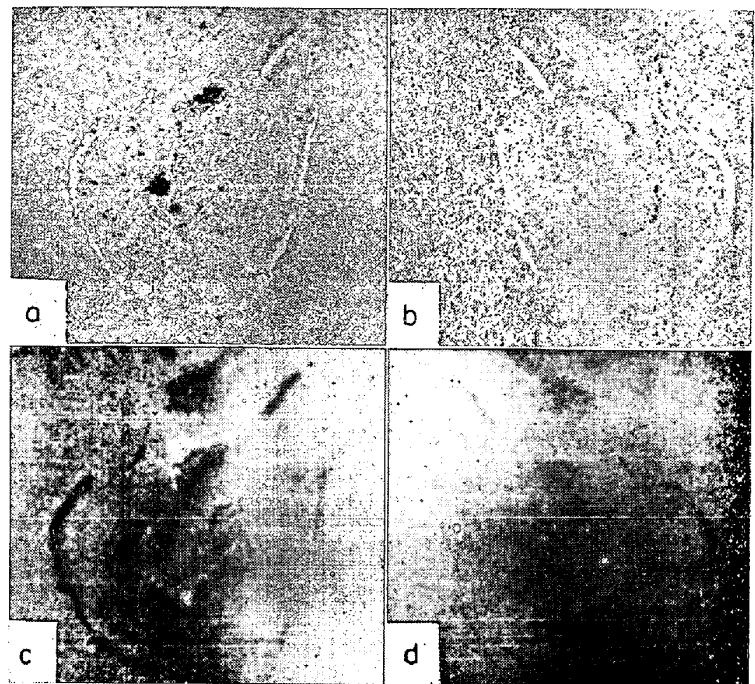
2. 鋼片による予備実験およびその結果

湯模様は鋼片の断面で観察される組織的な不均一性にもとづく欠陥であり、溶鋼の凝固過程中に形成されるものと考えられる。したがってその発生機構を知るためには凝固鋼塊そのものを調べる必要があるが、そのまえにまず湯模様の概略の性状を知っておくために、湯模様の発生している鋼片を用いて2, 3の予備実験をおこなった。すなわち鋼片の湯模様発生部の横断面より板状試料を採取し、そのマクロ組織、サルファー・プリント組織およびオートラジオグラフ組織を観察した。その結果の1例をPhoto. 1に示す。Photo. 1のc)とd)のオートラジオグラフは後放射化法すなわち試料を原子炉で放射化する方法によつて撮

影したものであり、c)は試料中の ^{56}Mn の濃度分布をd)はおもに ^{64}Cu の濃度分布を示している。これらはMnとCuの放射化断面積が他の元素にくらべてきわめて大きく、しかも生成される ^{56}Mn と ^{64}Cu の半減期にかなりの差があることを利用して同一試料について撮影したものである。白く写っている部分がMnとCuの正偏析部に相当し、d)にみられる点状の正偏析はMnを含んだ比較的大型の介在物によるものである。これらの結果より、湯模様は鋼片の断面では、その中間部から中心部にかけて発生する成分偏析および比較的大型の介在物をともなつた環状の巨視的な不均一組織であることがわかる。

3. 試験鋼塊の溶製および実験方法

50 t 塩基性平炉で溶製した溶鋼(S40C)を上広角鑄型に下注ぎ法によつて注入し、4 t 下注ぎ鋼塊をつつた。このとき湯模様を人為的に発生させるため、過去の経験にもとづいて注入速度を普通よりおそくし(注入時間約11 min)、フラ灰などの保温剤は使用しなかつた。また湯模様の発生には注入過程あるいは注入終了後の鑄型内における溶鋼の流れが関係していると予想されるので注入の初期と末期の溶鋼にそれぞれAuおよびTaをトレーサーとして加えた。Auは注入初期の1 min間、Taは注入末期の2 min間に加え、しかもその間に注入される溶鋼中のAuとTaの濃度が一定(Au:0.02%, Ta:0.06%)になるように分割投入した。つぎにこの試験鋼塊の底部縦断面および横断面より板状試料を採取しこれに放射化オートラジオグラフ法を適用して、鋼塊における湯模様の発生位置、形状ならびに湯模様部の凝固組織、成分偏析などを調べた。一方注入の初期と末期に加えたAuとTaの鋼塊内における分布状態を観察し、その結果より鑄型内における溶鋼の流れの状況を調べ、



a : Macrostructure
c : Autoradiograph, ^{56}Mn
b : Sulphur print
d : Autoradiograph, ^{64}Cu

Photo. 1. Structural non-uniformity found in the cross section of billet. $\times 1(4/5)$

* 第73回講演大会にて発表 講演番号112 昭和42年5月18日受付

それと湯模様発生との関係を検討した。

4. 実験結果

試験鋼塊の底部縦断面のオートラジオグラフの1例を Photo. 2 に示す。これは試料を放射化してから 40~50hr 後に撮影したものであり、おもに試料中の ^{64}Cu と ^{198}Au の分布状態を示している。鋼塊底部の外周部に相当する部分はおもに注入初期に加えた Au によつて感光しており、中間部および中心部では Au は十分にうすめられているのでその影響はほとんどなく、おもに試料中の Cu によつて感光している。一般にオートラジオグラフ法によれば、鋼塊の凝固組織と成分の偏析傾向とを同時に観察できるが、Photo. 2 によるとこの鋼塊の断面には成分偏析をともなつた不均一組織がみられ、後述のようにこれが鋼片における湯模様に対応するものである。

これらのオートラジオグラフより、まず鋼塊における湯模様の発生位置と形状がわかる。すなわち湯模様は鋼塊底部の中間部の等軸晶域に発生し縦断面および横断面のいずれにおいても巾 10~20 mm の帯状を呈し、いずれも凝固がその近くまで進んだときの凝固面にほぼ平行に発生している。したがつて立体的には“inverted dome”状を呈し、またその厚さすなわち湯模様の巾は底部側ほど少しずつうすくなつていく。

つぎに Photo. 3 に示した湯模様部のオートラジオグラフより、湯模様部とその周辺部との凝固組織を比較することができる。湯模様部の組織は非常に微細で方向性があり、一方周辺部は比較的粗大な等軸晶組織を呈しており、両者の凝固条件にはかなりの差のあることがわかる。また湯模様部とその周辺部の境界、とくに鋼塊の外周側の境界は非常に明瞭に観察され、かつなめらかである。さらに Photo. 3 より湯模様部とその周辺部の成分の偏析傾向がよくわかる。すなわち白く写つている部分は Cu、つまり一般的には分配係数が 1 より小さい溶質元素の正偏析部である。また Fig. 1 は Photo. 3 に示した位置について湯模様部のオートラジオグラフの黒化度を測定した結果であり、成分の偏析傾向をより正確に知ることができる。これらの結果よりあきらかなように、各湯模様の中央部には巾のせまい線状の負偏析帯が一つずつみられ、その位置は湯模様の中央よりもやや鋼塊の中心側にかたよつていく。また湯模様の中央部は負偏析を呈しているが、その両端は正偏析を呈し、とくに鋼塊の外周側の部分が顕著である。なお一般化学成分と酸化物系介在物の定量結果によれば、湯模様の中央部では各成分元素とも負偏析の傾向があり、オートラジオグラフの結果と一致し、とくに凝固時の分配係数の小さい C, P, S にその傾向が強い。ところが酸化物系介在物は逆に周辺部よりも湯模様部に非常に多いことがわかつた。

つぎに湯模様の発生に関連して、これと密接な関係にある鑄型内の溶鋼の流れをしらべるため、注入の初期と末期に加えた Au と Ta の鋼塊内における分布状態を観察した。まず Photo. 2 より Au の分布状態を知ること

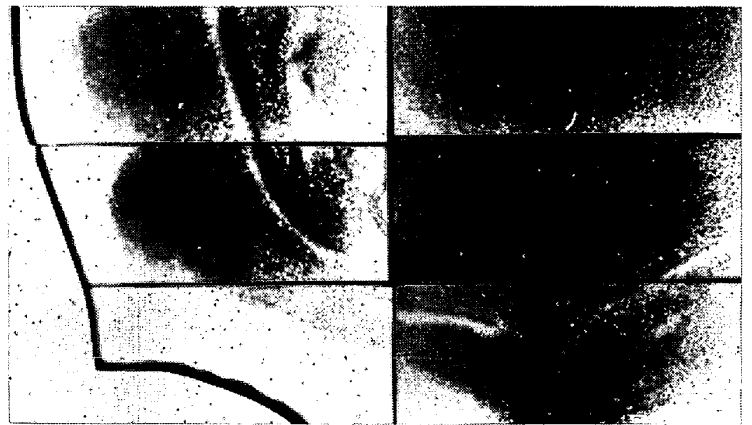
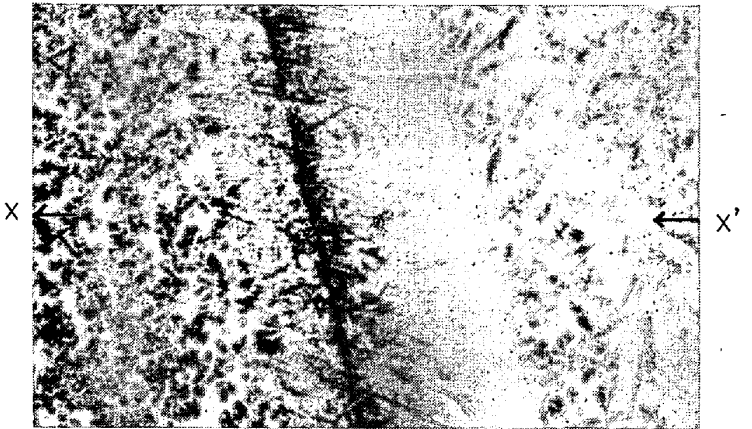


Photo. 2. Structural non-uniformity in the vertical section of steel ingot revealed by autoradiograph.
×1/5(4/5)



—Center of the ingot
Density of the film was measured along X-X' line. (Fig. 1)
Photo. 3. Autoradiograph of the zone of structural non-uniformity in the vertical section of test ingot.
×2(2/3)

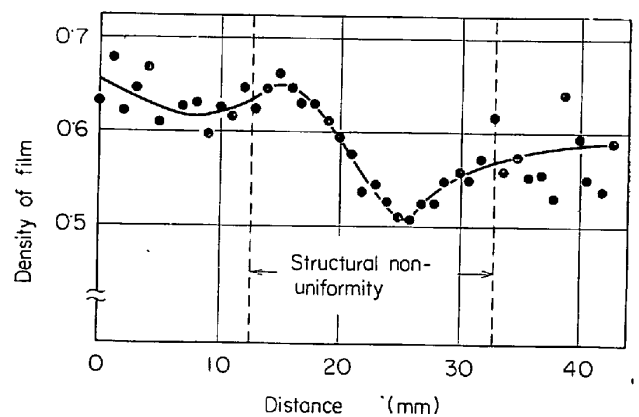


Fig. 1. Solute distribution in the zone of structural non-uniformity.

ができるが、これより推察されるように初期に注入される溶鋼は鋼塊底部の外周部より凝固層を構成しながら順次注入される溶鋼と十分にまざりあつてうすめられる。なお Photo. 2 の湯模様部の正偏析は湯模様の発生にともなつて生じた Cu などの成分元素の凝固偏析であつて、Au の混合不十分によるものではない。つぎに ^{182}Ta



Photo. 4. Autoradiograph showing the distribution of Ta in the vertical section of test ingot. $\times 1/5(4/5)$

の半減期が ^{64}Cu , ^{198}Au に比べてきわめて長いことを利用して、放射化してから約 20 日後に撮影した Ta のオートラジオグラフを Photo. 4 に示す。Photo. 4 によると Ta を加え始めたときの凝固面が観察され、その内部では注入末期に加えられた Ta もある程度混合されている。しかしこの場合にはちょうどその位置と形状が湯模様に対応する部分に Ta が分布していないことがわかる。これはこの部分がすでに独立した固相を形成していたためとも考えられるが、その位置、形状、成分偏析などを考慮するとむしろ鑄型内につきのような溶鋼の流れがあるためと考えられる。すなわち注入流れによつて鋼塊の中心部を底部側から頭部側へ流れる溶鋼の流れが生じ、これにともなつて鋼塊の中間部を凝固面にそつて頭部側から底部側へ流れる流れが生じる。しかもこれらは溶鋼の慣性によつて注入終了後もしばらく持続される。そのため注入末期あるいは注入終了後比較的短時間内に頭部または中央部の中間部にあつた Ta のまだほとんど混入していない溶鋼が凝固面にそつて下方へ流れ、Ta がすでに拡散されている底部溶融層内に流入し、そこで周囲の溶鋼と十分に混合されないまま凝固したと考えられる。しかもこの部分がちょうど湯模様に対応していることから、これらの流れが湯模様の発生に直接関係していることがわかる。

5. 結果の考察

以上の実験結果より湯模様の発生機構について考察し、いちおうつぎのような結論をえた。まず湯模様の発生時期はその発生位置と鋼塊の凝固速度より求まるが、注入終了後比較的短時間内である。この時期には前述したように注入にともなう溶鋼の流れが持続しており、また凝固は等軸晶域まで進んでおり、凝固面の前方には巾の広い帯状の“mushy zone”がある。したがつてこのとき溶鋼の流れが mushy zone 内を通過する可能性があり、そのときつぎのようにして湯模様が発生すると考えられる。mushy zone 内では平衡凝固温度と実際の温度とはほぼ一致し、凝固は平衡に近い条件下で進んでいるが、このとき mushy zone 内を溶鋼の流れが通過すると、その近くの溶質濃度分布と温度分布は定性的に Fig. 2 に示したような状態になると考えられる。流れの溶質濃度は最初は bulk のそれに近く、温度も周囲の mushy zone より高いと考えられる。しかし mushy zone 内を通過するとき、流れの両側にある溶質の濃化された液相

から溶質が流れの中へ拡散あるいは流入するため Fig. 2 の b) のように流れの両端の溶質濃度は中央部より高くなり、それに対応する平衡凝固温度分布は Fig. 2 の c) のようになる。一方熱の伝導は溶質の拡散より速いため、流れの温度は mushy zone の温度とすみやかに平衡し、すでに直線的な温度分布をしていると考えられる。そのため流れの内部の温度は平衡凝固温度よりも低くなり、そこに組成的過冷がおこる。このとき流れの中央部で過冷度をもつとも大きくなるから、そこに凝固の核が発生して成長することが考えられる。しかもそのとき放出される凝固潜熱は、溶質の濃度分布がほとんど変化しないうちに流れの外の mushy zone によつて奪われるから、過冷状態はある程度持続され、その間は流れの中央部から

横方向への凝固も持続されると考えられる。いずれにしてもこの部分の凝固には方向性があり、それは温度勾配よりもこの場合はむしろ溶質の濃度分布の方向性によると考えられる。またこのように過冷をとめないながら凝固すれば、その部分の凝固組織は周囲よりも微細になると考えられるから、オートラジオグラフで観察されるような方向性のある微細組織になる。一方凝固後の溶質濃度分布は、この部分がまだ流れであるときの濃度分布にほぼ一致するが、中央部の最初に凝固が始まつた部分は負偏析を呈し、またそこから横方向へ凝固が進む際には溶質の濃化も多少おこると思われるから、結局 Fig. 1 の黒化度測定結果とよく一致した濃度分布になる。このようにして凝固した流れの部分が湯模様になると考えると、たとえばその巾が底部側ほど小さく、その境界線が明りようかつなめらかであるのは、流れが mushy zone 内を通過するとき、そこで成長しつつある等軸晶を再融解したためと考えられる。また湯模様部には比較的大型の介在物が多いのは、湯模様がまだ流れである時期に、周囲の mushy zone 内の不純物の多い液相中に析出して

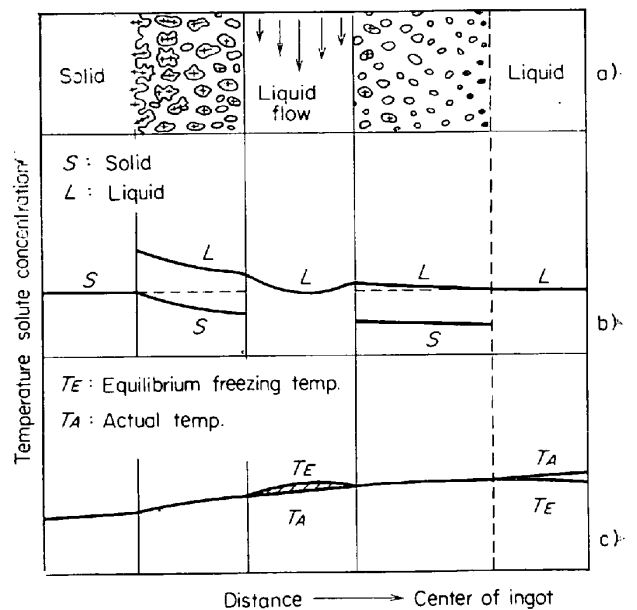


Fig. 2. Schematic explanation of the formation of structural non-uniformity.

いる介在物がこの流れに捕捉され、成長あるいは凝集する結果であると考えられる。

以上にのべたように湯模様発生の直接の原因はいわゆる“mushy zone”内を溶鋼の流れが通過することでありその可能性は mushy zone の巾が大きいほど、また注入にともなう溶鋼の流れがおそくまで持続されるほど大きくなる。したがってその発生防止対策としては、注入温度を高くし、溶鋼の温度勾配を大きくしてmushy zone の巾を小さくすることおよび注入速度を大きくして凝固が等軸晶域まで進まないうち、いかにえれば広いmushy zoneが形成されないうちに注入を終了してしまうことなどが考えられる。

鋼塊用押湯の設計法*

住友金属工業、鋼管製造所

江藤重任・梅田洋一・山田恭暉

Calculation of the Feeder Head for Steel Ingot

Shigeto Etō, Yōichi Umeda and Yasuteru Yamada

1. 緒 言

キルド鋼鋼塊の内質の健全性を確保するために、押湯が広く用いられていることは改めて述べるまでもない。しかし押湯の設計にあたって、適正な形状、あるいは容量の決定が、ほとんど経験的な勘に基づいたものであると言つても過言ではなく、理論的な解析もいくつかみられるが^{1)~4)}、必ずしも満足すべきものではない。特にこれらの報告では収縮孔が本体に入らないための限界の押湯についてのみ論じており、これから実用の押湯を設計する手段を見出すことは困難である。すなわち、この限界の押湯の場合には押湯から鋼塊本体への熱移動の影響が大きく、G. FENTON⁵⁾による実験データはあるが、普遍性のある解析法は未だ得られていない。

さらに、押湯上面あるいは側面からの熱の放散はいずれも非定常的であることが一層問題を複雑にしている。しかし、押湯の計算という、比較的ラフな検討の場合には、次のような仮定をおいてさしつかえないであろう。

1) 押湯上面からの放熱は無視することができる。

押湯上への発熱ふりかけ剤の使用が広く行なわれており、その使用量が極端に少ない場合のほかは無視しう程度の熱放散しかないと考えられる。

2) 鋼塊本体—押湯間の熱の移動は無視することができる。

上述した限界押湯の場合には、この熱移動は収縮孔の形状に大きく影響するが、実用の押湯については、本体内の偏析を防止するための余裕がかなりあり、押湯内溶鋼の含熱量が大きくなるため、この熱移動は、相対的に小さなものとなる。

3) 鋼塊下部からの冷却は無視できる。

鋼塊の H/D は通常 2 以上の値であり、押湯部にまで、底部からの奪熱の影響が現われることはないと考えて良いであろう。

4) 押湯および本体内部での凝固は、時間の平方根に比例して進行する。

現実には、鋼塊本体内の凝固は、段階的に進行する⁶⁾と考えられるが、押湯内の凝固についても同様な現象は起こりうるとすれば、両者の相関関係としては、無視してよいであろう。

なお、ここでは全て円形断面の押湯および鋼塊についてのみ検討する。正方形断面あるいは長方形断面の場合の計算式を求めるのは容易である。

2. 偏析帯を含んだ押湯の計算

(断熱スリーブの場合)

t 時間内に凝固する鋼の体積 $V(t)$ は、前述の仮定から次式で表わされる。

$$V(t) = S \eta \sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

ここで S は放熱面の面積(鑄型あるいは押湯の側壁面積) η は凝固速度定数である。(1)式を変形すると(2)式が得られ、凝固が完了する時間 t_e は(3)式で与えられる。

$$\sigma = R \{1 - (2\eta \sqrt{t})/R\}^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

$$t_e = (R/2\eta)^2 \dots \dots \dots (3)$$

σ : t 時間後の未凝固部の半径

R : 鑄型または押湯の内径(半径)

以下では添字 i をつけたものは鋼塊本体を、 f をつけたものは押湯を示すことにする。

t 時間後の押湯上面での未凝固部の面積、 $F(t)$ は、

$$F(t) = \pi R_f^2 \{1 - (2\eta_f \sqrt{t}/R_f)\} \dots \dots \dots (4)$$

また、単位時間内に鋼塊本体内部で凝固する体積 $dV(t)$ は次式で与えられる。(ここで H_i は本体高さを示す)

$$dV(t) = \pi R_i H_i \eta_i t^{-1/2} dt \dots \dots \dots (5)$$

一方、溶鋼の凝固による見かけ体積収縮率を k とし、押湯上面が単位時間内に dh だけ沈下すると考えると

$$k \cdot dV(t) = F(t) dh \dots \dots \dots (6)$$

という関係があり(4)、(5)式を代入して積分し、さらに時間 t に(3)式の凝固完了時間を代入すると

$$h_e = \frac{k R_i H_i \eta_i}{R_f \eta_f} \cdot \ln \left(\frac{R_f \eta_i}{R_f \eta_i - R_i \eta_f} \right) \dots \dots \dots (7)$$

が得られ、これは、本体凝固完了までに、押湯上面が沈下する高さを示すことになる。

よつて、本体内部に収縮孔が入らないための限界の押湯容量比は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{f0}/V_i &= \pi R_f^2 h_e / \pi R_i^2 H_i \\ &= \frac{k R_f \eta_i}{R_i \eta_f} \cdot \ln \left(\frac{R_f \eta_i}{R_f \eta_i - R_i \eta_f} \right) \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

しかるに実用の押湯では、本体の凝固が完了した時に押湯内に、いわゆる上部偏析部に相当するだけの溶鋼が残存する必要がある。上部偏析部の鋼塊全体に対する比率を α とすると、必要残存溶鋼の高さ h_0 は次式で与えられる。

$$F(t_e) \cdot h_0 = \alpha \pi \{ (1+k) R_i^2 H_i + R_f^2 h_0 \} \dots \dots \dots (9)$$

(9)式に(3)式を代入すると、

$$h_0 = \alpha (1+k) R_i^2 H_i \eta_i / R_f \{ (1+\alpha) R_f \eta_i - R_i \eta_f \} \dots \dots \dots (10)$$

よつて押湯の必要注入高さ H は、次式で示される。

$$H_f = h_e + h_0 \dots \dots \dots (11)$$

この結果、偏析を考慮した必要押湯量 V_f は(12)式で与えられる。

* 第73回講演大会にて発表 講演番号 113 昭和42年5月10日受付