

技術報告

UDC 669.14-412 : 621.74 : 621.746 : 620.192.43 : 620.184.4

超大型鋼塊の製造における保持炉の操業と鋼塊内偏析*

新 実 高 保**・岡 村 正 義**

Operation of Arc Heating Furnace on Manufacturing Gigantic Ingots and Segregation of Gigantic Ingots

Takayasu NIIMI and Masayoshi OKAMURA

Synopsis:

The techniques and procedure for manufacturing gigantic ingots heavier than 200 t are described. Especially, practical results of an arc heating furnace which plays an important role in the procedure and segregation of gigantic ingots are discussed in detail. By appropriate operations of the arc heating furnace, hydrogen and phosphorus are kept unchanged, and oxygen and sulphur decrease to very low levels. Furthermore, the temperature can be accurately controlled. The application of multipour technique reduces segregation and its degree is dependent on kinds of steel. V-segregation and inverted V-segregation in steel deoxidized with carbon in vacuum seem to be very slight.

1. 緒 言

高度成長の時代から低成長時代への転換期にあつて、量より質への転換、より安定性のあるものへのニーズが強まってきた。大形鍛鋼用鋼塊の製造対象分野である原子力機器、発電機械、製鉄機械（例えばロールなど）、船用部品、化学装置などの分野においては機械を構成する機器を巨大化することによつて、機能の安定性と高効率化を図ろうとしている。これに伴い、素材の品質に対する要求はますます厳しいものとなつてきつつある。

鍛鋼品の品質はおおむねの素材である鋼塊の性状によつて決まるといつても過言ではない。ここでは、200 t 以上の超大型鋼塊製造上のポイントとなる保持炉の操業と、製鋼上の問題点、および製造された鋼塊の内部性状の一例について述べたい。

2. 保持炉の操業および製鋼上の問題点

2.1 保持炉の必要性

一般的に、たとえば 300 t 鋼塊を製造する場合、それに合った電弧炉を設置すると 100 t 炉 3 基、または 150 t 炉 2 基というような大きな設備が必要となり、設備費の増大と、できあがつた炉の製鋼能力と鑄鍛鋼の需要の間のアンバランスが解消され得ない。これに対して

100 t 電弧炉 1 基と 100 t 保持炉 2 基を設置する方法をとれば、上記の問題点はかなり緩和されることとなる。このような考え方により保持炉を使用した当社の 300 t 以上の鋼塊の製造概要をフローチャートによつて示すと Fig. 1 のごとくになる。Fig. 1 で保持炉は受鋼鍋と類似の形状をしており出鋼脱ガス時の受鋼、加熱時、およびポニーレードルへの溶鋼の移しかえのすべての段階で同一である。たとえば 300 t 鋼塊を製造する際には電弧炉で溶解、精錬した溶鋼を出鋼脱ガス処理した後、保持炉にてそれぞれ約 4 ないし 8 hr 加熱保持し、第 3 チャージの溶鋼が電弧炉より出鋼されるまで待機する。このようにして、合計 300 t の溶鋼を真空タンクの上に設置したポニーレードルを介して順次タンク中の鑄型に真空鑄造する。溶鋼は出鋼脱ガス処理と真空鑄造の 2 回にわたつて真空処理されるために酸素、水素が低減されるわけであるが、この間にある保持炉の役割が非常に重要なものとなる。

2.2 操業方法

保持炉の操業に対し次の点に留意している。すなわち a) 溶鋼を常に攪拌し鋼の温度を均一に維持する。この攪拌には炉の底部より Ar をポーラスレンガを通して鋼中に送り込むが、攪拌は鋼がスラグでほぼ完全に被覆される程度の非常に軽微なものである。これによつて鋼の

* 昭和 51 年 7 月 5 日受付 (Received July 5, 1976)

** (株)神戸製鋼所鑄鍛鋼事業部高砂事業所 (Takasago Works, Kobe Steel Ltd., 2-3-1 Niihama Araicho Takasago 676)

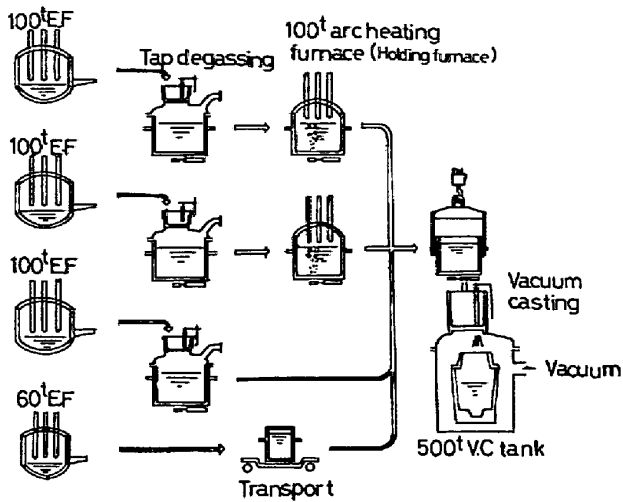


Fig. 1. Procedure of gigantic ingotmaking.

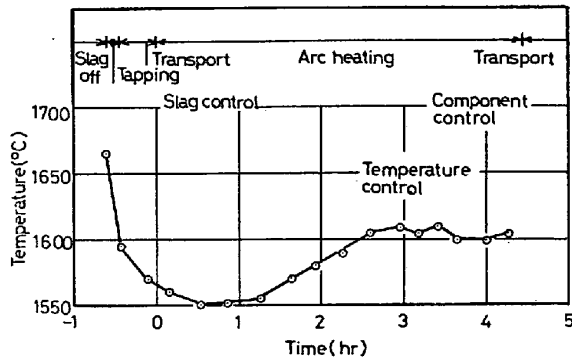


Fig. 2. Operation pattern of arc heating furnae.

酸化, Hの吸収および耐火物の損傷を抑制する. b) スラグは適性な塩基度を確保し, 常に還元性組成を維持するよう造滓には十分注意する. これによつてOを低値に保持しかつ脱硫反応を促進する.

保持炉の操業パターンの1例を Fig. 2 に示す. 電弧炉において出鋼前に除滓され, 0.5 Torr 以下で通常出鋼脱ガスされる. 出鋼された溶鋼は保持炉専用ピットに輸送され, Ar が導入される. Ar の導入は溶鋼温度の均一化, 精錬反応の促進, および成分の均一化を行なうためである. その後電弧加熱を開始し, 適宜試料採取, 測温を実施し, それによつて造滓, 温度調整を行ない, 成分および温度調整を確実なものとする.

2.3 操業結果

操業中とくに大きく変動する成分は S および O であり, C, Si, Mn, その他の合金元素の変動は無視しうる程度である. H は超音波探傷で問題になる割れ, その他の欠陥の発生の原因となるため, 操業中の H の挙動が懸念された. Fig. 3 に操業初期と末期の H の差の頻度図を示すが, 操業中に H は平均的には若干減少することが明らかとなつた. これは Ar 気泡中への H の移動

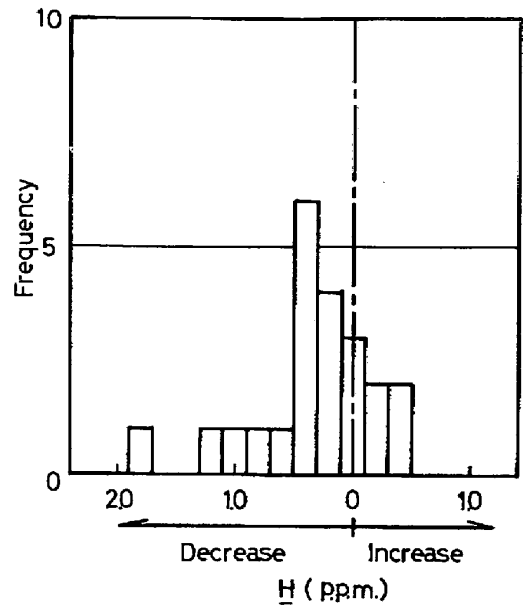


Fig. 3. Difference of hydrogen content between early stage and last stage in arc heating furnace.

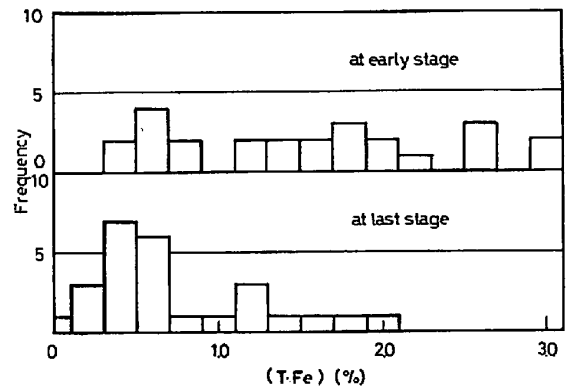


Fig. 4. Behaviour of T·Fe in slag in arc heating furnace.

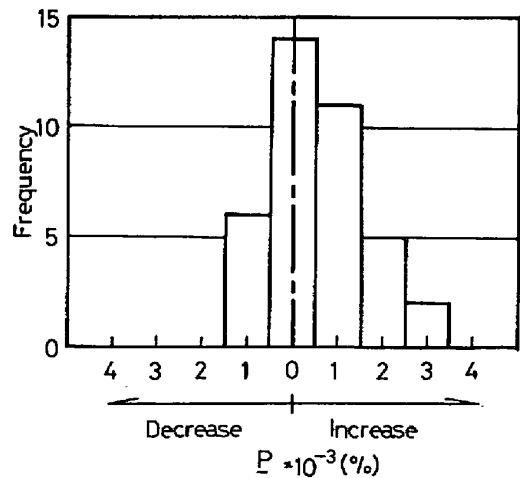


Fig. 5. Difference of phosphorus content between early stage and last stage in arc heating furnace.

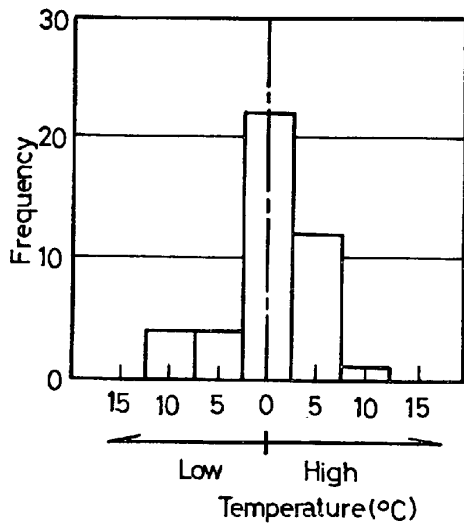


Fig. 6. Difference of temperature between target and actual temperature.

が生じているためと考えられる。

操業初期と末期の (T·Fe) の頻度図を Fig. 4 に示す。鋼種によつて若干の相異は認められるが、平均すれば 0.5% 程度と非常に低い値を示し、脱酸、脱硫反応の促進に対し非常に有効である。一方このような強還元性スラグが形成される場合には、復リン現象が問題になる。Fig. 5 に操業初期と末期の P の差の頻度図を示す。この図より復リンは平均 0.001% 程度で、とくに問題にはならない。現在電弧炉精錬技術、保持炉技術を確立し、0.006% の P S の鋼の溶製が可能である。

成分調整は酸素との親和力の小さい成分に対しては操業中期に調整するが、Mn, Si, Al, などは末期に調整する。これらの成分の歩留りは鋼種により異なるが、溶鋼の攪拌が十分に行なわれていること、O が低いこと、スラグが強還元性であることなどの理由から非常に良好で、Mn, Si は 100%, Al は 70% である。

また、温度調整の正確さが保持炉の特徴の 1 つである。Fig. 6 に保持炉終了時の目標温度と実際の温度との差を示す。このように目標温度に対し $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に管理することができ、超大型鋼塊の内部品質の安定に非常に貢献している。

保持炉は溶鋼の長時間保持とともに精錬炉としての役割もかねており、さらに電弧加熱と溶鋼の攪拌の影響をうけるために、この耐火物は非常に苛酷な状態に長時間さらされる。しかし長時間の保温中に耐火物が溶損され、溶鋼が汚染されるかどうかについて調査した結果、実際の操業に悪影響が出る程の溶損はないことが判明している。

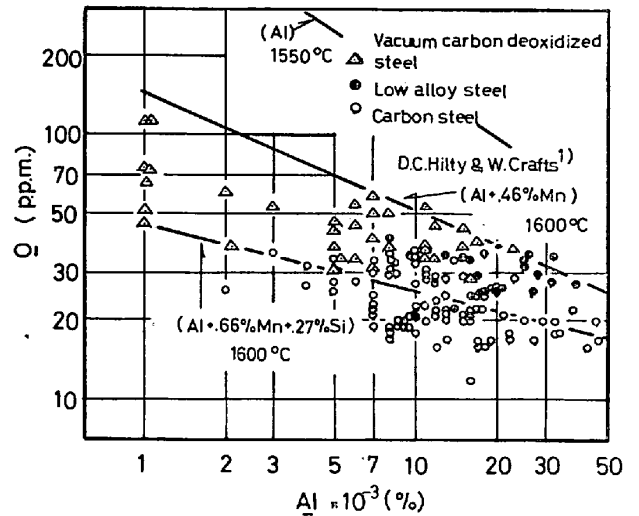


Fig. 7. Relation between aluminum and oxygen of various steel in arc heating furnace.

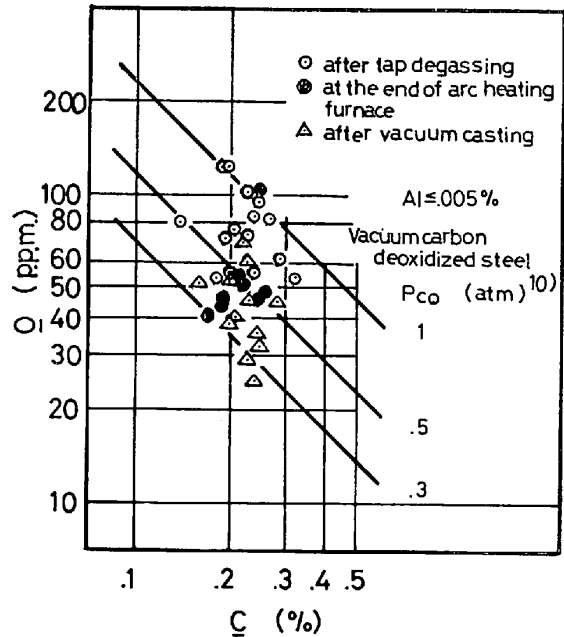


Fig. 8. Relation between carbon and oxygen of carbon deoxidized steel at each stage in the process.

2.4 考察

2.4.1 脱酸

Fig. 7 に操業時の Al と O の関係を真空炭素脱酸鋼 (Si < 0.1%), 低合金鋼, 普通鋼に層別して示す。D. C. HILTY, W. CRAFTS¹⁾ は Mn, Si が共存することにより、Al の脱酸力は Al 単独脱酸に比較して大きくなることを示しており、図中にそれぞれこの関係を示している。この図よりほぼ酸素レベルは真空炭素脱酸鋼, 低合金鋼, 普通鋼で差が認められる。真空炭素脱酸鋼は D. C. HILTY らの (Al+0.46%Mn) に相当するが、保持炉の

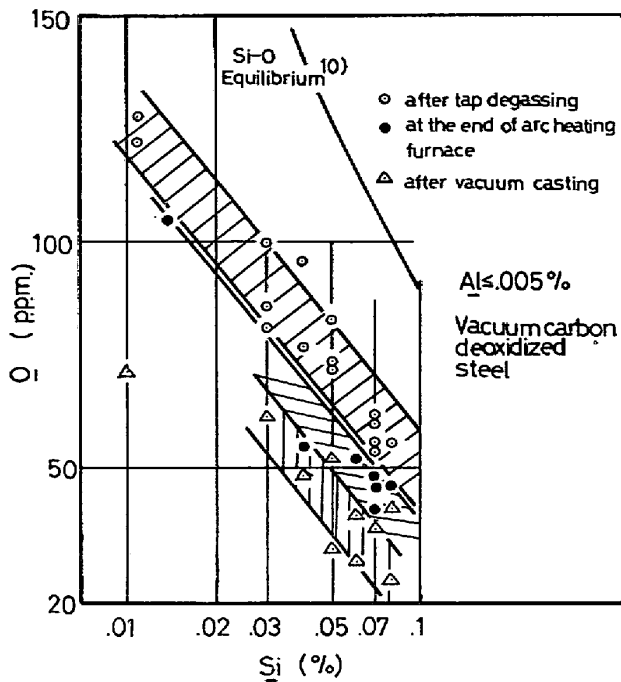


Fig. 9. Relation between silicon and oxygen of carbon deoxidized steel at each stage in the process.

結果は D. C. HILTY らの結果に比較して低値を示している。一方普通鋼の結果は D. C. HILTY らの結果と比較的よい一致を示している。このように若干の相異はあるが、保持炉の結果は D. C. HILTY らの結果と一致しており、脱酸に関して非常に有効である。

Fig. 7 において真空炭素脱酸鋼は他の鋼種に比較して \underline{O} が高いので真空炭素脱酸鋼の各工程における \underline{O} の推移を調べた (Fig. 8)。出鋼脱ガス後の \underline{O} は見掛上 P_{CO} が 0.5~1 atm に相当し、かつバラツキが大きい。保持炉末期の \underline{O} は P_{CO} が 0.5 atm に相当し、真空製造後では 0.3 atm に相当する \underline{O} まで逐次脱酸される。しかしながら真空製造後の \underline{O} は 25~70 p.p.m. と変動が大きいので、各過程における \underline{O} の推移を Si との関係において調べた結果を Fig. 9 に示す。このように \underline{O} は Si と非常によい相関を示し、真空炭素脱酸鋼の溶製に対しては微量の Si の影響を無視することができないことが明らかである。

F. KÖRBER, W. OELSEN²⁾ は Mn, Si の共同脱酸反応に及ぼす Si の影響はとくに微量の Si レベルで著しいことを示している。本調査でも出鋼脱ガス処理、保持炉、真空製造後の各段階で Si の影響は認められる。したがって著者らは真空炭素脱酸鋼の溶製にあたっては鋼塊の健全性の観点から Al を可能な限り低く維持し、なおかつ \underline{O} を低減するという意味において Si を 0.07% を目標に溶製している。

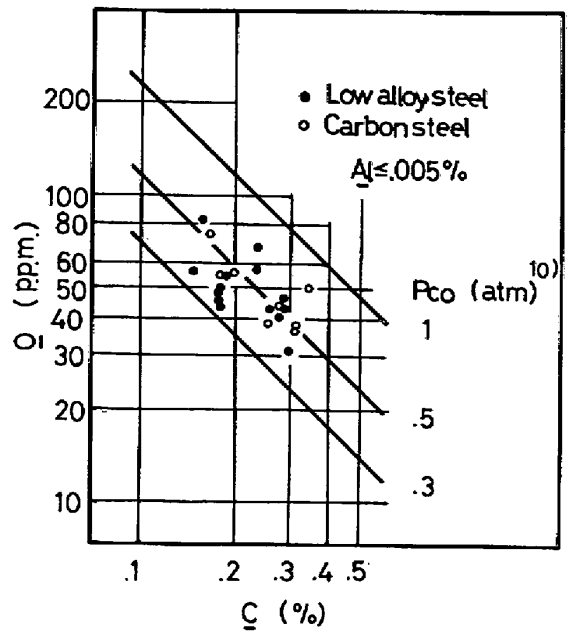


Fig. 10. Relation between carbon and oxygen of carbon and low alloy steel after tap degassing.

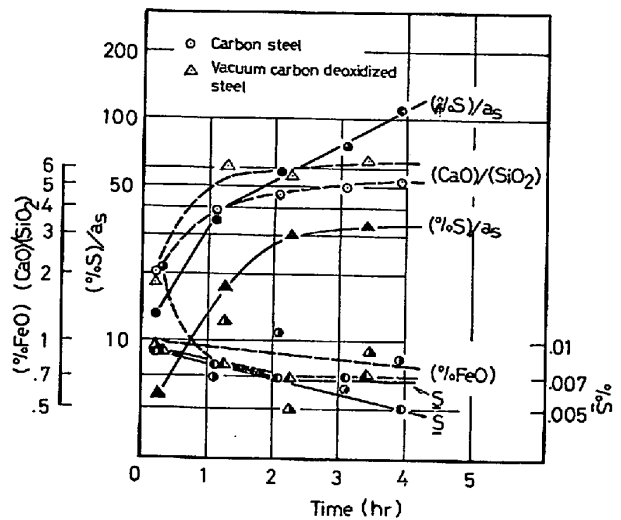


Fig. 11. Relation between $(\%S)/as$, $(CaO)/(SiO_2)$, $(\%FeO)$, \underline{S} and time in arc heating furnace.

Fig. 8 において真空炭素脱酸鋼で出鋼脱ガス後の \underline{O} は P_{CO} が 0.5~1 atm に相当した。Fig. 10 に出鋼脱ガス後の普通鋼および低合金鋼の \underline{C} と \underline{O} の関係を示す。このようにこれらの鋼種では \underline{O} は見掛上 P_{CO} が 0.5 atm に相当する。D. H.³⁾ および R. H.⁴⁾ 脱ガス装置の \underline{O} は低炭素レベルで P_{CO} が 0.1~0.2 atm に相当し、 \underline{C} が増加すると 0.5 atm 程度に相当すると報告されており、このように出鋼脱ガスにおける脱酸能は他の脱ガス装置と同一レベルと判断される。

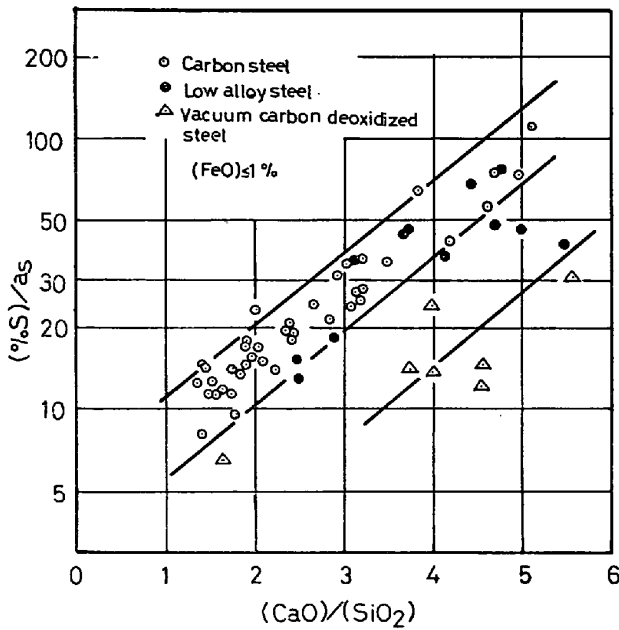


Fig. 12. Relation between (%S)/as ratio and (CaO)/(SiO₂) ratio in arc heating furnace.

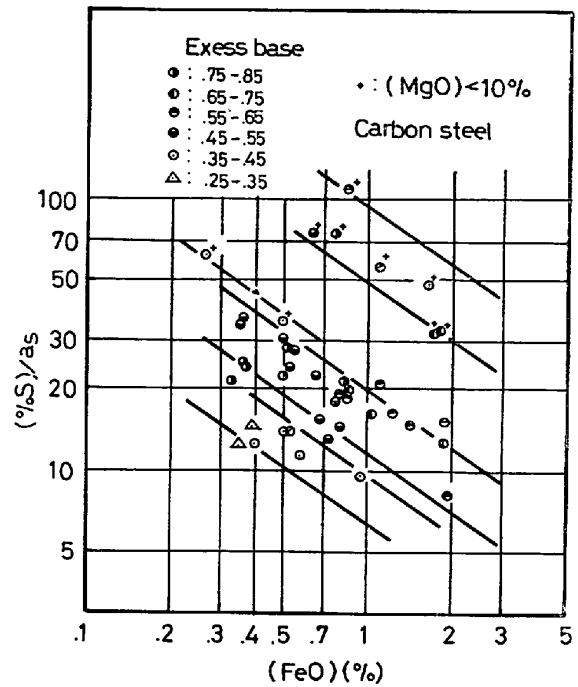


Fig. 13. Relation between (%S)/as ratio and (%FeO) in arc heating furnace.

2.4.2 脱 硫

保持炉の操業初期と末期の (T·Fe) の関係を Fig. 4 に示したが、このように保持炉のスラグは強還元性であり、かつ Fig. 7 に示すように \underline{O} は低レベルであるため脱硫に対して平衡論的にも速度論的にも非常に有利である。Fig. 11 に 1 例として (%S)/as, (CaO)/(SiO₂), (FeO), \underline{S} と保持時間の関係を示す。この図において脱硫速度は真空炭素脱酸鋼と普通鋼で特に大きな差は認められないが、(%S)/as の値はかなり異なる。現在保持炉の脱硫率は 40% 程度であり、0.005% の極低硫鋼の溶製も可能である。

Fig. 12 に操業末期の (%S)/as と (CaO)/(SiO₂) の関係を示す。このように分配比の対数は (CaO)/(SiO₂) に直線的に増加する。さらに分配比は真空炭素脱酸鋼と普通鋼、低合金鋼で明確に差が認められる。

Fig. 13 に操業末期の (%S)/as と (%FeO) の関係を G. G. HATCH, J. CHIPMAN⁵⁾ の過剰塩基の考え方をもとに整理し示す。

$$\begin{aligned} \text{過剰塩基 (Excess base)} &= (\text{CaO}) \\ &+ 2/3(\text{MgO}) - (\text{SiO}_2) - (\text{Al}_2\text{O}_3) \text{ (mol/100 g slag)} \\ &\dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

この図より (%S)/as は (%FeO) と強い相関を示す。図中 * 印は (MgO) が 10% 以下の場合を示しており、その他は 10% 以上の (MgO) を含有する場合である。すなわち (MgO) が高い場合、低い場合のいずれをとわず、過剰塩基が 0.45 を境にして (%S)/as に差が認

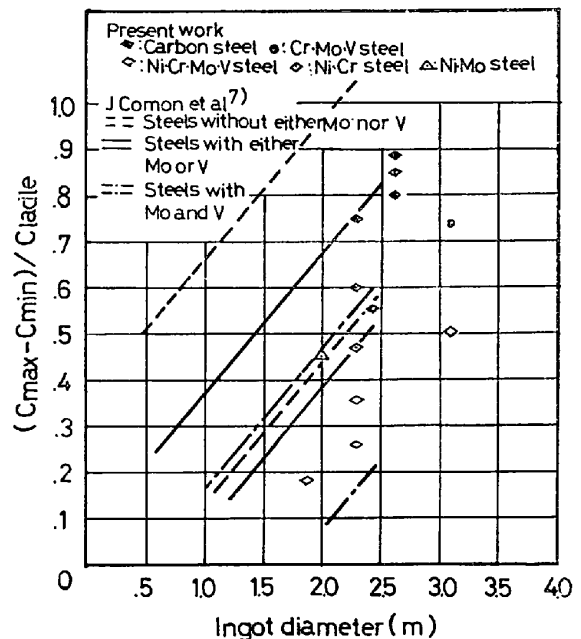


Fig. 14. Influence of ingot diameter on the carbon segregation ratio.

められ、(MgO) が 10% 以下の場合には (%S)/as は 10% 以上の場合に比較して著しく大きな値を示す。

一方速度論的な研究はこれまで非常に少なく、今後の研究に期待されるが、脱硫速度が表面活性成分である \underline{O} によつて影響されるという鈴木、谷口、竹之内らの報告もあり⁶⁾、真空炭素脱酸鋼と普通鋼、低合金鋼の分配比の差、および脱硫反応におよぼす (MgO) の影響を含

Table 1. Chemical composition in 300 t Ni-Cr-Mo-V steel ingot (%)

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Sn	As	Sb	
Weighted average		0.26	0.07	0.25	0.006	0.009	3.54	1.59	0.33	0.09	0.003	0.003	0.0012	
120 t (1)		0.32	0.06	0.24	0.006	0.010	3.57	1.57	0.33	0.08	0.002	0.003	0.0011	
120 t (2)		0.26	0.07	0.26	0.006	0.009	3.49	1.58	0.33	0.10	0.004	0.002	0.0012	
60 t (3)		0.16	0.10	0.23	0.005	0.008	3.52	1.64	0.33	0.11	0.003	0.003	0.0014	
Distance from bottom end of ingot (%)	98	Center	0.37	0.07	0.29	0.010	0.015	3.61	1.69	0.42	0.12	0.004	0.005	0.0017
		1/4R	0.30	0.07	0.26	0.008	0.011	3.54	1.62	0.37	0.11	0.004	0.004	0.0013
		1/2R	0.24	0.07	0.24	0.005	0.007	3.48	1.52	0.32	0.09	0.003	0.003	0.0010
		3/4R	0.25	0.07	0.24	0.006	0.008	3.51	1.55	0.32	0.10	0.003	0.003	0.0011
		R	0.24	0.06	0.24	0.006	0.009	3.50	1.55	0.33	0.09	0.003	0.003	0.0011
	18	Center	0.26	0.06	0.26	0.006	0.008	3.52	1.53	0.33	0.09	0.003	0.003	0.0012
		1/4R	0.26	0.06	0.26	0.006	0.008	3.48	1.53	0.33	0.09	0.003	0.003	0.0011
		1/2R	0.26	0.06	0.26	0.006	0.009	3.48	1.55	0.34	0.09	0.003	0.003	0.0011
		3/4R	0.26	0.06	0.26	0.006	0.009	3.47	1.54	0.33	0.09	0.003	0.003	0.0010
		R	0.32	0.06	0.24	0.006	0.009	3.48	1.51	0.32	0.08	0.003	0.003	0.0010

めて、今後保持炉の脱硫機構を明確にしていきたいと考えている。

以上保持炉について簡単に報告したが、操業は極めて順調に稼動しており、超大型鋼塊の製造に対して大いに自信を深めている。

3. 超大型鋼塊の内部性状

電弧炉、保持炉、真空処理などによつて、P, S, O, H などの不純物の低減を行ない、目標成分に合せた溶鋼を注入した後、鑄型の中で数十時間も要して異なつた状態で凝固するため鋼塊の外周部と内部の各位置でのマクロ組織、即ち結晶粒組織やサブ組織、さらに成分組成などに不均一が生じるのは当然である。

鋼塊の健全性を示すものは一般的に、(1) 成分のマクロ偏析が少ないこと、(2) V 偏析、逆 V 偏析などのマクロ偏析が少ないこと、(3) 非金属介在物が少ないこと、などであるが、いずれの場合でも鋼塊の大型化にともない悪条件となる。

成分偏析についてこれまで調査した結果を最大正偏析度 $(C_{\max.} - C_{\text{ladle}}) / C_{\text{ladle}}$ と鋼塊の大きさとの関係で整理すると鋼種により程度は異なるが、衆知のごとくほぼ分配係数と関係があり、S, P, C, の順で小さくなり、Mo, V, Si, Mn, Cr, Ni などは偏析度は小さい。Sn, As, Sb など焼戻し脆性で問題となる元素の偏析度は比較的大きく C に匹敵すると考えられる。Sn, As, Sb は通常の精錬で除去できないため、原料の選定が重要となる。負偏析度は正偏析度に比較し小さく、ある一定の限界が存在していると考えられる。C の場合でいえば負偏析の限界は偏析度で 0.20~0.30 とみられる。

J. COMON, J. DOLORME, P. BASTIEN らは⁷⁾ C 偏析に

及ぼす鑄型形状、成分の影響について次のような式を提出している。

$$(C_{\max.} - C_{\min.}) / C_L \cdot 1/D = 2.81 + 4.31(L/D) + 28.9\%Si + 805.8\%S + 235.2\%P - 9.2\%Mo - 3.82\%V \dots\dots\dots (2)$$

ここで $C_{\max.}$; 最大炭素値, $C_{\min.}$; 最小炭素値, C_L ; 取鍋中の炭素値, D ; 鋼塊の平均径, L ; 鋼塊の本体高さを示す。この式において鋼塊の大きさとともに S が非常に大きな影響を及ぼすことは注目すべき点である。J. COMON らが 3.5~190 t の鋼塊について調査した結果と当社の実績値とを比較して Fig. 14 に示す。当社の実績では (a) 普通鋼, (b) Cr-Mo-V, Ni-Mo, Ni-Cr 鋼 (c) Ni-Cr-Mo-V 鋼の順に偏析は小さくなる。

現在 C 偏析を低減するためにとり得る最も有効でかつ実際的な方法として、初めに鑄込む溶鋼の炭素値を高くし、後から注入する炭素値を低くする方法を実施している。さらに積極的な方法として、初期に注入した溶鋼を一部凝固させ、一定時間経過後低炭素の溶鋼を注入する方法が考えられるが、実際には砂疵を誘発するなどの悪影響があり成功する確率は少ない。

Table 1 に一例として Ni-Cr-Mo-V 鋼の 300 t 鋼塊にて C の値を注入溶鋼ごとに変えた場合の偏析状況を示す。このように偏析状況は良好であり、とくにボトム部の偏析は Ni を含む本鋼種の特徴とも考えられるが、負偏析はほとんど認められない。また鋼塊トップ部のサルファプリントを実施したが、他の鋼種に比較して V および逆 V 偏析は認め難い。

V 偏析、逆 V 偏析の生成は凝固のメカニズムによつて決まるものであるが、真空中で Si, Al などの強力な脱酸元素を用いなくて C-O 反応によつて脱酸を行なう真

空炭素脱酸鋼塊はVおよび逆V偏析の低減に有効であると判断している。このことは F. HOCHSTEIN⁸⁾, 中川, 前田, 鈴木, 谷口⁹⁾ らの報告でも確認されている。しかし現在この理由については明確ではなく, 今後の研究が期待される。

4. 結 言

以上のごとく, 超大型鋼塊の製造にあたって, 重要な役割をなす保持炉の操業結果を主体に考察を加えるとともに, 300 t の超大型鋼塊の合金元素の内部偏析状況の結果を示した。超大型鋼塊の内部品質を高める方法はもちろん以上述べた点にとどまらず, 押湯の形状, 保温方法, 鋼塊形状との関連によつて大きな影響を受けるものであるが, こういつた諸条件がいかにあるべきかについて, 今後系統的な検討を行ない, よりよい品質の超大型鋼塊を製造していきたいと考えている。

文 献

- 1) D. C. HILTY and W. GRAFTS: Trans. AIME 188 (1950), p. 34
- 2) F. KÖRBER and W. OELSEN: Mitt. K. W. Inst. Eisenforschung, 15 (1933), p. 21771
- 3) 第27, 第28回西山記念講座: 製鋼技術の現状と今後の展開, (1974), p. 13
- 4) O. WINKLER and R. BAKISH: Vacuum Metallurgy, (1971), p. 446
- 5) G. G. HATCH and J. CHIPMAN: Trans. AIME 185 (1949), p. 274
- 6) 鈴木, 谷口, 竹之内: 鉄と鋼, 61 (1975), S 486
- 7) J. COMON, J. DOLME, and P. BASTEIN: 6th International Forgemasters Meeting, (1972), Cherry Hill, New Jersey, U. S. A.
- 8) F. HOCHSTEIN: Stahl u. Eisen, 94 (1975), p. 785
- 9) 中川, 前田, 鈴木, 谷口: 鉄と鋼, 62 (1976), A. 37
- 10) 学振製鋼 19 委員会; 製鋼反応の推奨平衡値, (1968), [日刊工業新聞社]