

技術報告

UDC 669.184.244.66-251 : 669.046.554-982

LD-VAD 法の操業と品質について*

森 谷 尚 玄**・俵 正 憲**

On the Operations of LD-VAD Process and Product Qualities

Takaharu MORIYA and Masanori TAWARA

Synopsis:

VAD (Vacuum Arc Degassing) plant is characterized by 3-phase AC arc heating under reduced pressure while Ar gas is injected by a porous plug set at the bottom of ladle. Thus alloying, desulphurizing, oxygen reduction and dehydrogenation can be made easily and sufficiently. For instance, the sulphur concentration can be easily achieved to less than 0.005%, the oxygen level of the slab of low alloy steels ranges between 10 and 35 ppm, and, the hydrogen in the molten steel after degassing is 1.5 ppm on an average.

At Kure Works, high grade carbon steels and low alloy steels, such as structural steels, tool steels and bearing steels, and extra low carbon steels (carbon concentration is less than 0.005%) are produced economically by this plant from the molten steel of LD converters. This paper describes the techniques procedure for manufacturing these steels by this LD-VAD process.

1. 緒 言

近年科学技術の進歩により、鋼材にも高度な品質が要求されるようになり、高級鋼の溶製には真空処理が必要欠くべからざるものとなつている。呉製鉄所では、転炉鋼の品質向上と転炉溶製鋼種の拡大を目的として、昭和48年12月に FINKL 方式の 90t VAD 設備を設置し LD-VAD 法により構造用鋼、工具鋼、軸受鋼、極低炭素鋼など広範囲の鋼種を製造している¹⁾。

LD-VAD 法の特徴は減圧下における溶鋼の加熱と Ar 気泡による溶鋼の攪拌にあり、加熱装置を持たない従来の脱ガス法にくらべ、溶鋼温度の低下にともなう制約が緩和されるうえ加熱中にも脱ガス効果があり、その機能は飛躍的に向上する。また適当な造滓剤を用いることによつて脱硫などスラグによる精錬も可能であり、VAD 法は単純な脱ガス法というよりは、真空精錬法とみなすことができる。

当所では、転炉と VAD 法の特徴を生かし、脱炭、脱磷を転炉で行ない、脱硫、脱ガスを VAD 法により行なう精錬方式により順調な操業を続けている。以下に VAD 設備の概要と操業について、とくに精錬方式の異なる構造用合金鋼と極低炭素鋼の精錬法について報告する。

2. 設 備

2.1 設備概要

VAD 設備は、転炉工場の造塊ヤードに設置され、90 t LD 転炉から母溶鋼の供給をうけている。設備の全体図を Fig. 1 に、主要設備諸元を Table 1 に示す。設備は、取鍋、脱ガス装置、加熱装置から構成されており、すべての作業を減圧下でなうため、装置の気密性と作業の自動化には十分な配慮がなされている。

2.2 加熱装置

加熱装置は電気炉と類似しているが、減圧下で加熱を行なうために電極系は気密シリンダーにより大気から遮断され、電極の昇降は、応答性のよい電気液圧駆動方式

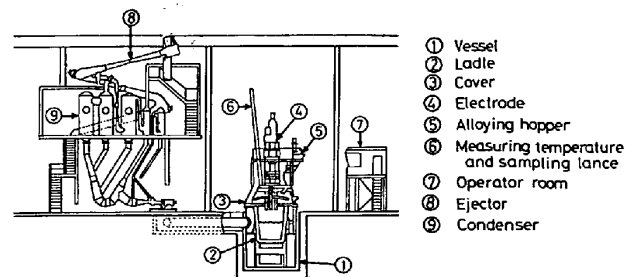


Fig. 1. Outline of VAD plant.

* 昭和 52 年 2 月 28 日受付 (Received Feb. 28, 1977)

** 日新製鋼(株)呉製鉄所 (Kure Works, Nisshin Steel Co., Ltd., 7 Showadori Kure Hiroshima 737)

Table 1. Main specifications of VAD plant.

Classification	Item	Specifications
Vacuum vessel	Inside diameter	5150 mm ϕ
	Height	6830 mm
Ladle	Inside diameter	2700 mm ϕ
	Height	2899 mm
	Quality of lining	High alumina
	Free board	775 mm at initial use
Vacuum pump system	Ejectors	9 (6 stages)
	Condensers	5 (5 stages)
	Capacity	250 kg/h at 1 Torr
	Max. vacuum degree	0.5 Torr
Heating system	Transformer	9900 KVA
	Electrode	305 mm ϕ \times 1500 mm
	Lifting & lowering	Hydraulic system
	P.C.D.	900 mm
Measuring temperature & sampling	Rods	2
	Driving system	Rack pinion driving system
Hoppers supplying alloys	Hoppers	2
	Capacity	2.8 m ³

を採用している。

2.3 脱ガス装置

脱ガス装置は、真空容器、真空容器蓋、測温・サンプリングランス、副原料供給槽および蒸気エ젝タから構成されている。排気容量は 250 kg/h (at 1 Torr)、到達圧力は 0.5 Torr である。造滓剤、合金鉄の投入、測温およびサンプリングは、すべて遠隔操作により行なうことができる。

2.4 取鍋および攪拌装置

取鍋は溶鋼の滞留時間が長いうえ、アーク加熱を行なうので、きわめて苛酷な条件にさらされる。このため、取鍋の耐火物については種々の検討を行ない、現在ではスラグラインにマグクロ煉瓦、側壁に不焼成アルミナ煉瓦を使用して安定した操業を行なっている。取鍋の底部にはスライディングノズルおよび Ar 攪拌のためのポーラスプラグを取付けている。また脱ガス処理中の沸とう現象による溶鋼の溢出を防ぐために、約 780 mm のフリーボード (free board) をとり、取鍋内鋼浴の直径と高さの比 (D/H) を約 1.1 としている。攪拌のための Ar ガス流量は、ポーラスプラグの状態、溶鋼の脱酸度、真空度によって攪拌の程度が変化するので、目視により 40~100 Nl/min の範囲で調整している。

3. 操業方法

3.1 操業概要

LD-VAD 法の精錬方式は、目的あるいは鋼種によって異なる。以下にキルド状態で VAD 処理を行なう構造用合金鋼とリムド状態で VAD 処理する極低炭素アルミキルド鋼の操業方法について述べる。

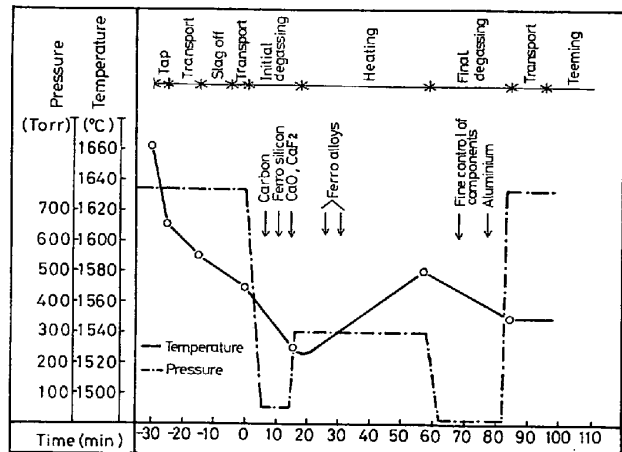


Fig. 2. Typical operating pattern of low alloy steel.

3.2 構造用合金鋼

Fig. 2 に構造用合金鋼の標準的な操業パターンを示す。母溶鋼の転炉溶製法は、脱磷に重点をおいた精錬条件とし、すべての鋼種について、終点 C は 0.10% 前後とする。出鋼温度は VAD 工程の負荷を軽減するため、1650~1670°C の高温とし、出鋼中の合金鉄の添加は、フェロマンガンのみとする。取鍋に受鋼した母溶鋼は、VAD ヤードに運ばれ、除滓ののち、真空容器中へ静置する。Ar を吹込み、溶鋼の攪拌を確認してから、は真空容器の蓋をして初期脱ガスを開始する。初期脱ガス 50 Torr 以下の圧力で約 10 min 間行ない、その間に、造滓剤、加炭剤、フェロシリコンを添加する。初期脱ガスは造滓剤の滓化と C, Si の成分調整を目的としており、強い攪拌が必要である。造滓剤は生石灰、螢石を使用し、その添加量および配合比率は、目的に応じて変化させる。また C%, Si% は、初期脱ガス時に成品目標成分値に調整することを原則とする。初期脱ガスののち、圧力 300 Torr でアーク加熱を行なう。加熱中の圧力は、高すぎるとグロー放電を生じたり、アーク長の増大によって耐火物の溶損が大きくなるので、300 Torr 程度が適当である。アーク加熱による溶鋼の昇温速度は約 1.6°C/min、加熱時間は 40~60 min である。なお Cr, Mo, Ni などの合金鉄類は、加熱中に分割して投入する。

溶鋼温度が目標に達した時点で加熱を止め、圧力 10 Torr 以下で 20~30 min 間の最終脱ガスを行ない、Al 脱酸をして VAD 処理を完了する。

3.2 極低炭素アルミキルド鋼

VAD 法は他の脱ガス法と同じく、C が 0.01% 以下の極低炭素鋼を製造することができる。Fig. 3 に極低炭素アルミキルド鋼の操業パターンを示す。

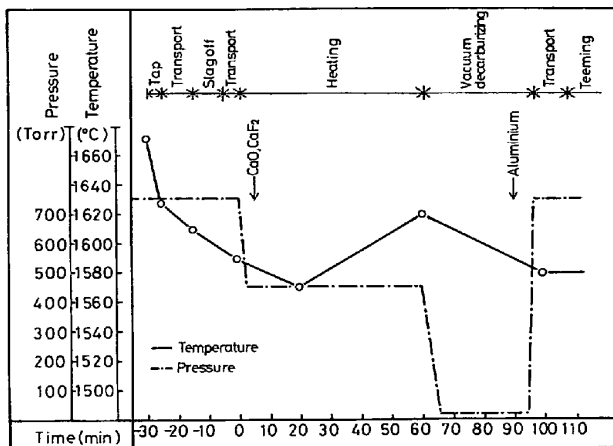


Fig. 3. Operating pattern of extra low carbon steel.

母溶鋼の転炉溶製法は、構造用合金鋼とほぼ同じであるが、終点Cは0.04%以下とする。出鋼後除滓し、VAD処理を行なうが、本鋼種の場合、初期脱ガスは行わず、造滓剤を添加して直ちに加熱を開始する。

加熱中の圧力は、低すぎると脱炭反応による溶鋼の沸とうが強すぎ、アークの不安定を招くので400~500 Torrが適当である。加熱終了後、10 Torr以下で30 min間の真空脱炭処理を行なうが、そのさい激しい溶鋼の沸とうをとまなうので、減圧操作は溶鋼の状況を目視しながら注意深く徐々に行なう。真空脱炭終了後、脱酸用Alを投入し、ひきつづきAlの均一化および脱酸生成物の浮上分離のために、5 min間のAl攪拌を行なつてVAD処理を終了する。

4. 操業結果

4.1 構造用合金鋼精錬中の成分元素の変化

4.1.1 酸素

構造用合金鋼のうちSi:0.20~0.28%, Mn:0.40~0.70%, C:0.15~1.20%の鋼種を対象としてVAD処理中のOの変化を調査した。Fig. 4にVAD処理中のOの変化を加熱初期(加熱開始から10 min後)、加熱末期(加熱終了直前)および最終脱ガス後について示す。加熱初期のOは平均40 ppmであるが、加熱中に脱酸が進行し、加熱末期には30 ppm、最終脱ガス後には21 ppmまで低下する。

Fig. 5にCとOの関係を示す。加熱初期と加熱末期のOは $P_{CO}=300$ TorrのC-O平衡値²⁾付近に存在し、加熱末期のOがより平衡値に近い。図中にD. C. Hilty³⁾のSi-Mn共同脱酸のデータから1550°C, Si:0.25%, Mn:0.50%におけるSi-Mn-O平衡O値を示しているが、実測Oは、はるかに低い値である。なお、最終

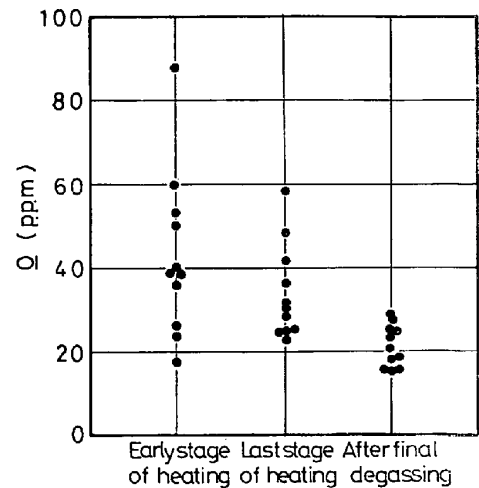


Fig. 4. Change of \underline{O} during VAD treatment. (low alloy steel)

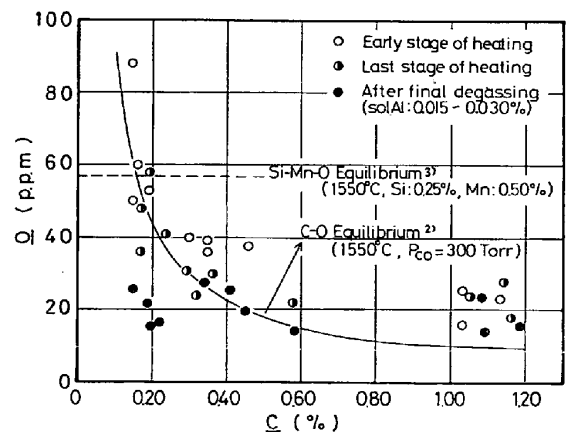


Fig. 5. Relation between \underline{C} and \underline{O} during VAD treatment. (low alloy steel)

脱ガス後は、Al脱酸によつて0.015~0.030%のsol. Alを含んでいるためOはCとは無関係に約20 ppm前後の一定値である。

4.1.2 窒素および水素

窒素および水素の挙動は鋼種によつて大きく異なる。すなわち、転炉から供給される母溶鋼のN, Hは、きわめて低い水準にあるが、VAD処理中に添加する加炭剤、造滓剤、合金鉄類はNを含有しているから加炭剤および合金鉄の添加量の多い鋼種ほどN, Hともに高い値となる傾向にある。

Fig. 6にSCM4鋼のVAD処理中におけるNの変化を示す。Nは初期脱ガス時に30 ppm、加熱中に20 ppm上昇し、最終脱ガス中に10 ppm低下する。初期脱ガス時のNの上昇は、加炭材に起因し、一般に加炭剤1 kg/tの添加によつてNは5~6 ppm上昇する。加熱中のNの上昇は、フェロクロムおよびフェロモリブデンによりフェロクロム1 kg/tの添加は2~3 ppmのNの上昇を

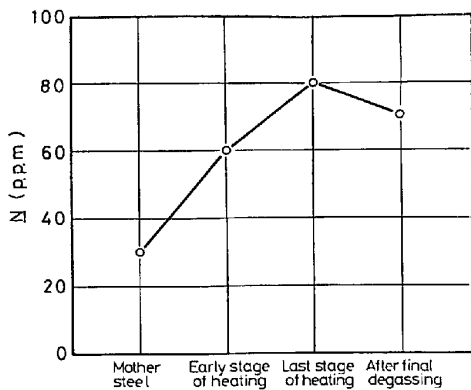


Fig. 6. Change of \underline{N} during VAD treatment. (SCM4)

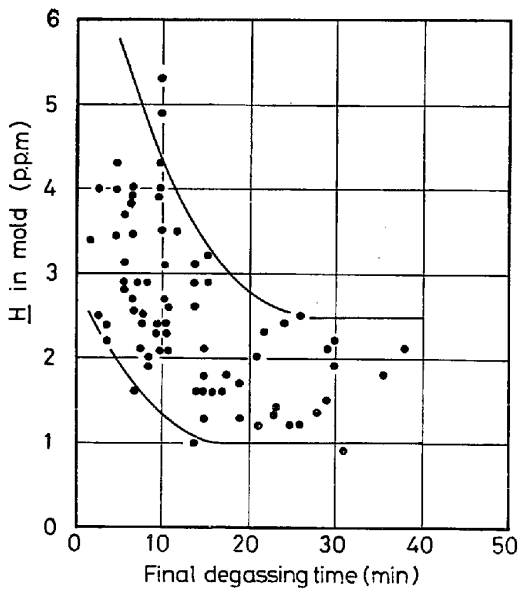


Fig. 7. Effect of final degassing time on \underline{H} in mold. (low alloy steel)

招く。最終脱ガス中の \underline{N} の低下は、鋼種にかかわらず約 10ppm とほぼ一定値である。

\underline{H} は精錬途中の試料採取が困難であるため、処理中の変化は把握していないが、操業、管理データによると、Fig. 7 に示すように鑄型内溶鋼の \underline{H} は最終脱ガスの時間と相関性があり、脱水素は約 15 min 間の処理によって平衡に達し、1~2ppm まで低下する。

4.1.3 硫黄

VAD法は塩基性造滓剤を使用することにより脱硫が可能である。操業管理データの月間平均値によると、母溶鋼の \underline{S} は 0.015% であるのに対し、構造用合金鋼一般材の成品 \underline{S} は 0.0085% で、脱硫率は約 40% である。特殊な用途のために極低硫鋼が必要な場合には、造滓剤の添加量を増量し、最終脱ガス時間を延長することによって成品 \underline{S} を 0.005% 以下にすることもできる。

Fig. 8 に VAD 処理中の $(\%CaO)/(\%SiO_2)$ 、 $(\%$

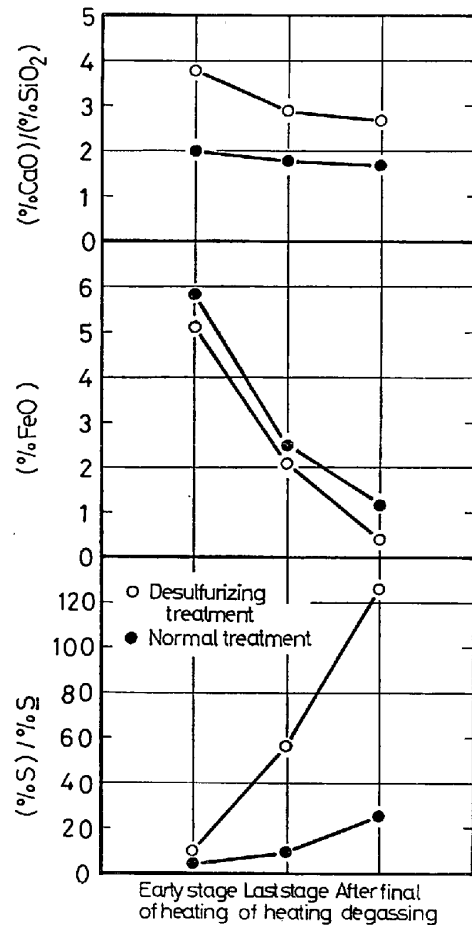


Fig. 8. Change of $(\%CaO)/(\%SiO_2)$, $(\%FeO)$ and $(\%S)/\%S$ during VAD treatment. (low alloy steel)

\underline{FeO}), $(\%S)/\%S$ を通常材と脱硫処理材について示す。 $(\%CaO)/(\%SiO_2)$ は加熱中に若干の低下は認められるが、ほぼ一定値で推移する。 $(\%FeO)$ は転炉スラグの混入のため、加熱初期には 5~6% 存在するが、加熱末期には 2%、最終脱ガス後には 1% 以下に低下する。 $(\%S)/\%S$ は処理中にしだいに上昇してくるが、通常材と脱硫処理材では大きく異なり、 $(\%CaO)/(\%SiO_2)$ と $(\%FeO)$ の影響が認められる。

Fig. 9 に加熱末期と最終脱ガス後の $(\%S)/\%S$ と $(\%FeO)$ の関係を G. G. HATCH⁴⁾ らの過剰塩基の考え方をもとに整理して示す。

過剰塩基 (Excess Base)

$$= n_{CaO} + \frac{2}{3} n_{MgO} - n_{SiO_2} - n_{Al_2O_3} \dots\dots\dots (1)$$

n_i : スラグ 100g 中の i 成分の mol 数

本図の $(\%S)/\%S$ は $(\%FeO)$ が低く、過剰塩基が大きいほど大きな値となり、適切なスラグ調整によって非常に大きな脱硫率が得られることを示している。

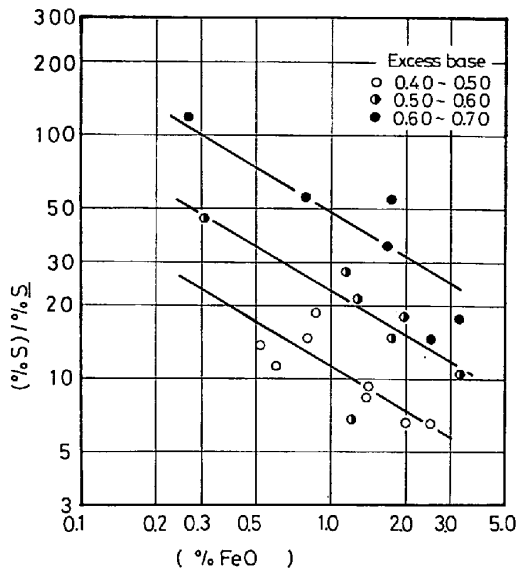


Fig. 9. Relation between $(\%S)/\%S$ and $(\%FeO)$. (low alloy steel)

4-1-4 磷

LD-VAD 工程で最も懸念された成分は P であつたが、転炉の母溶鋼を低炭素リムド鋼とし、取鍋内転炉スラグの排滓を強化することによつて解決している。操業管理データの月間平均値によると、母溶鋼の P は 0.014%、成品の P は 0.016% であり、VAD 処理中の復磷量は 0.002% である。

4-1-5 炭素, 珪素, クロム

C, Si は初期脱ガス時に、Cr は加熱中に成分調整を行なうが、合金鉄の添加後、ほぼ一定値を維持している。これらの元素の添加歩留は C : 80%, Si : 87%, Cr : 97% である。

4-2 極低炭素アルミキルド鋼精錬中の成分元素の変化

4-2-1 真空脱炭処理中の炭素と酸素

Fig. 10 に真空脱炭処理中の C の変化を代表的な 2 チャージについて示す。初期の脱炭速度が非常に大きく、減圧開始後約 10 min で C は 0.01% 以下となる。その後脱炭速度は急激に小さくなるが、脱炭開始後約 25 min で C は 0.002~0.004% となる。Fig. 11 に脱炭処理中の C と O の関係を示す。C と O は時間の経過とともに矢印の方向へ変化し、25~35 min 後には $P_{CO}=10$ Torr の C-O 平衡値²⁾に達している。

脱炭中の C と O は C : O = 12 : 16 の化学量論関係より若干 O が高めに推移し、スラグからの酸素供給が認められるが、その程度はきわめて小さく、CaO 造滓剤の場合で 30ppm, CaO+CaF₂ 造滓剤の場合で 80ppm である。

Fig. 12 に真空脱炭中の (T.Fe) の変化を示す。(T.

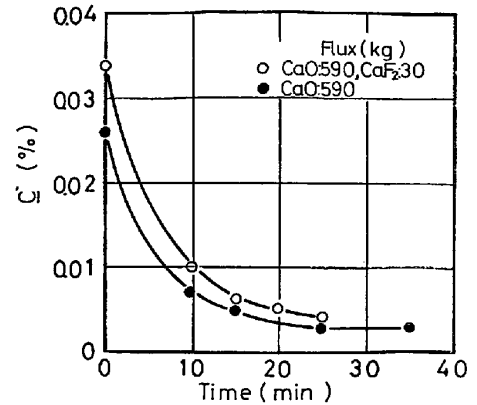


Fig. 10. Relation between \underline{C} and time for vacuum decarburizing. (extra low carbon steel)

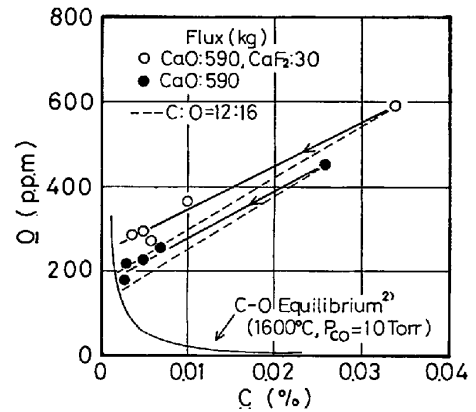


Fig. 11. Relation between \underline{C} and \underline{O} for vacuum decarburizing. (extra low carbon steel)

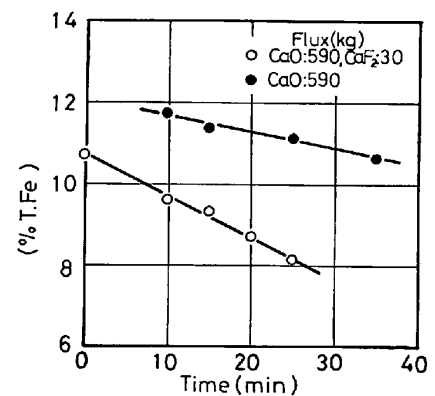


Fig. 12. Relation between $(\%T.Fe)$ and time for vacuum decarburizing. (extra low carbon steel)

Fe) の減少速度は CaO 造滓剤よりも CaO+CaF₂ 造滓剤を使用したチャージで大きく、スラグの流動性の影響が認められる。

Fig. 12 の (T.Fe) 減少量とスラグ重量 (溶鋼の約 1.2%) よりスラグから溶鋼へ供給される酸素量を計算すると CaO と造滓剤の場合には 32ppm, CaO+CaF₂ 造滓剤の場合には 105 ppm となり、Fig. 11 の結果とほぼ

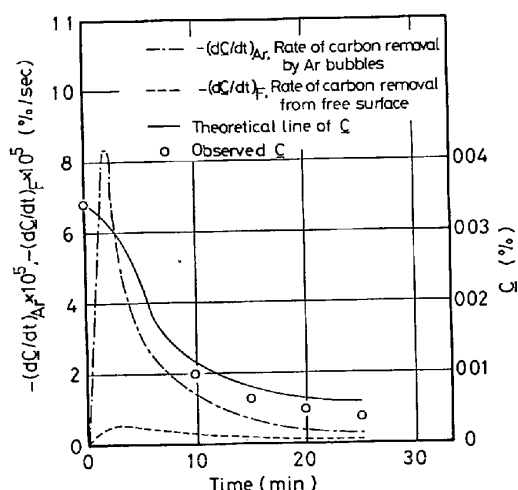


Fig. 13. Theoretical and observed $\underline{C} - (d\underline{C}/dt)_{Ar}$, $-(d\underline{C}/dt)_F$ as function of time for vacuum decarburizing⁵⁾.

一致する。

4.2.2 脱炭反応と Ar 気泡

VAD法のような不活性ガスの気泡吹込みをとまなう脱ガス法では、取鍋内の鋼浴表面で生ずる脱炭の他に溶鋼中を上昇している Ar 気泡による脱炭が大きな役割をはたしているものと考えられる。中島ら⁵⁾はVAD処理による極低炭素域の脱炭挙動を数学的モデルにより解析し、Fig. 13の結果を得ている。すなわち、取鍋内鋼浴表面からの脱炭速度 $-(d\underline{C}/dt)_F$ はAr気泡による脱炭速度 $-(d\underline{C}/dt)_{Ar}$ にくらべてきわめて小さく、VAD法における脱炭反応は主として吹込まれたAr気泡と溶鋼の反応によるとしている。このようにVAD法のAr気泡吹込みは、単に鋼浴を攪拌することだけではなく、Ar気泡自身が脱酸に大きく寄与しており、前述の構造用合金鋼における脱ガス効果も気泡吹込みに負うところがきわめて大きいと考えられる。

Table 3. Comparison of residual component, microcleanliness and number of inclusions of SCM4 slabs produced by VAD and electric furnace.

Classification	Sampling point	Residual component			Microcleanliness by JIS method				Number of inclusions (60 fields × 400)			
		N (ppm)	O (ppm)	S (%)	dA	dB	dC	d	Size range (length) (μ)			
									10-20	20-50	50-100	100<
VAD	Top	72	25	0.009	0.035	0.004	0.008	0.047	6	0	0	0
	Middle	69	31	0.008	0.025	0.008	0.017	0.050	6	1	0	0
	End	74	28	0.006	0.025	0.008	0.018	0.051	8	2	0	0
Electric furnace	Top	68	35	0.010	0.040	0.008	0.013	0.061	6	2	0	0
	Middle	75	46	0.010	0.025	0.013	0.025	0.063	10	4	1	0
	End	70	48	0.008	0.029	0.009	0.030	0.068	9	5	1	0

Table 2. Cost ratio of VAD treatment.

Item	Ratio (%)
Refractory	40.2
Electric power	10.3
Electrode	2.8
Steam	2.2
Argon	0.9
Flux	3.0
Labor	11.5
Depreciation	13.6
Maintenance	2.4
The others	13.1
Total	100.0

4.3 処理費用について

Table 2に処理費用の費目別割合を示す。処理費用に占める割合は、耐火物が最も大きい。VAD法の処理費用はRH法、DH法などの脱ガス法にくらべて、やや高価であるが、従来、電気炉で製造していた高級特殊鋼をLD-VAD工程で製造することが可能となり、その製造費用は大幅に低減する。

5. 成品の品質

5.1 構造用合金鋼

VAD法により製造した構造用合金鋼は、電気炉溶製材にくらべ酸素値が低く、非金属介在物清浄度が良好である。Table 3に6t鋼塊から製造した162mm×620mm×LのSCM4スラブのトップ部、ミドル部、エンド部から試料を採取し、調査した結果を示す。VAD材

Table 4. Comparison of residual component, microcleanliness and mechanical properties of extra low carbon steel sheets produced by VAD and decarburization annealing.

Classification	Residual component			Microcleanliness by JIS method				Mechanical properties				
	C (%)	N (ppm)	O (ppm)	dA	dB	dC	d	YP (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	El (%)	CCV (mm)	Er (mm)
VAD	0.002	42	53	0	0.023	0	0.023	15.4	29.9	48.3	36.3	12.1
Decarburization annealing	0.002	52	37	0	0.015	0	0.015	14.7	30.0	48.6	36.5	12.2

は、電気炉材にくらべ酸素が約 15ppm 低く非金属介在物清浄度は JIS 法 B 系、C 系の酸化物系介在物が減少している。また、400 倍 × 60 視野の検鏡条件における介在物の大きさ（長さ）別個数の測定結果によると、VAD 材は 20 μ 以上の大型介在物の発生量が減少している。

5.2 極低炭素アルミキルド鋼

Table 4 に VAD-普通焼鈍法と、低炭素アルミキルド鋼-OCA 脱炭焼鈍法で製造した深絞り用極低炭素アルミキルド鋼冷延鋼板の調査結果を示す。VAD 材は OCA 脱炭焼鈍材にくらべ、酸素値、清浄度ともに若干高い値となっているが、機械試験値はほぼ同一水準である。今後、Al 脱酸方法、鑄造方法の検討を行ない、酸素値および清浄度の改善に努力して行く所存である。

6. 結 言

呉製鉄所の LD-VAD 法の設備、操業および品質について述べた。VAD は転炉鋼の品質向上と転炉溶製鋼種の拡大をもたらし、従来電気炉で溶製していた高級特殊鋼を LD-VAD 工程で製造することによつて、品質、能率の向上および大幅な原価低減を達成している。

文 献

- 1) 弘田 昇, 篠田城吉, 俵 正憲: 日新製鋼技報, (1975) 32, p. 53
- 2) 学振 19 委員会: 製鋼反応推奨値, (1968), p. 2 [日刊工業新聞社]
- 3) D. C. HILTY and W. CRAFTS: Trans. AIME, 185(1949), p. 274
- 5) 中島義夫, 高木一字, 森谷尚玄: 日新製鋼技報: (1975) 33, p. 1