

## 討 3

LD-LRFプロセスによる特殊鋼の溶製

川崎製鉄(株)水島製鉄所 ○江 本 寛 治 山 本 武 美 飯 田 義 治  
工 博 大 井 浩 西 岡 武 三 郎

1. 緒 言 水島製鉄所100t LRF (ASEA-SKF)は昭和45年3月に稼動以来、主として転炉鋼を母溶鋼とし、従来電気炉によつて製造されてきた鍛造用鋼塊、圧力容器用、原子力用極厚鋼板、ならびに軸受鋼などを製造し、満足すべき結果を得ている。この報告ではLRFの操業方法、特徴、製品の概要を述べる。

2. 設備の特徴 LRFは転炉工場から約3km離れた電炉工場内に設置され、処理溶鋼は200t転炉の分割出鋼あるいは30t電気炉から供給される。設備の配置は図1に示すとおりで、3相アーク加熱、脱ガス、および電磁誘導攪拌装置により構成されている。加熱装置は8000kVAの変圧器を有し、多量の合金鉄を投入でき、かつ温度調整が極めて容易である。溶鋼は処理全期を通じて攪拌され、またその間取鍋耐火物の蓄熱が進行するため、取鍋内成分の均一化がはかられ、注入時の温度降下も少なく、安定した製品が得られる。

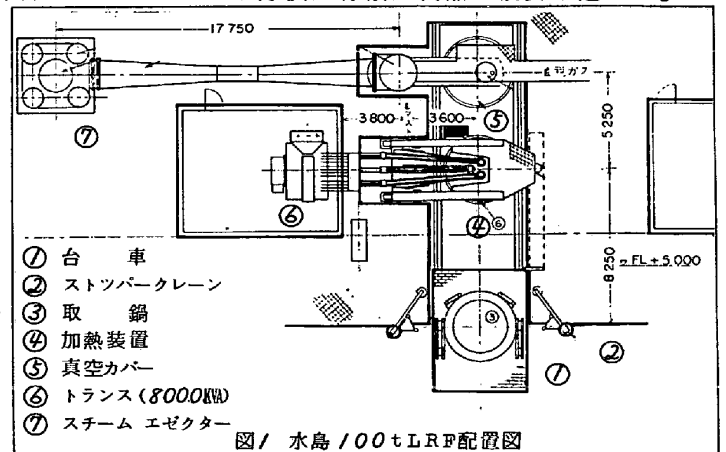


図1 水島100tLRF配置図

3. 操 業 LRFにより溶製される製品は低酸素はもちろんのこと低水素を要求される鋼種が多い。

操業は図2に示す基本的なパターンをとり、各段階において操業上留意すべきことは、(1)加熱期に溶鋼を高酸素の状態に保持するとともに脱ガス効率の観点からアークの安定に必要な最小限のslag量でかつ低塩基度として水素の再吸収を極力抑えること、(2)脱ガスでは特に低水素を要求される鋼材には末期の弱沸騰時にArガスバブリングにより表面積の増大をはかること、(3)脱ガス後Al脱酸を行い強力な攪拌により高い脱酸速度を得るとともに、Alsolを確実に目標範囲におさめることなどである。脱ガス後の加熱は、溶鋼温度および成分の微調整のために行われることがあるがその頻度は少ない。

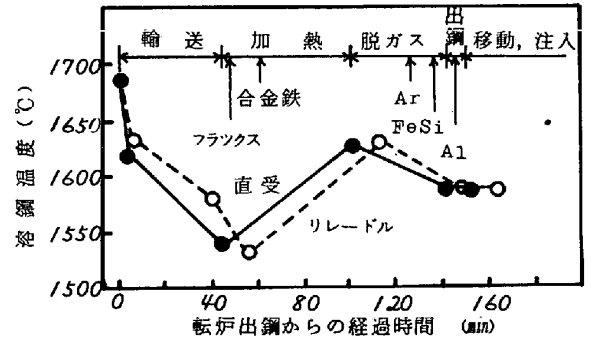


図2 LRF操業パターン

図2 LRF操業パターン

3.1 母溶鋼 処理される母溶鋼は主として200t転炉から分割出鋼して供給される。先鍋受鋼のため、LRFの専用取鍋で直接受鋼する場合でも転炉slagの混入は非常に少ないが、大量加炭する場合には、リレードル法がとられる。LRFにおける復リン量は炭素鋼の場合、最大0.002%に抑えられ、溶銑脱硫による低硫化、低水素吹錬、受鋼法(転炉副原料に対する配慮、リムド出鋼、低水分加炭材の使用)による低水素とともに、0.010%以下の低リン鋼が容易にできる。

3.2 加熱 加熱期には、少量の石灰石、ホタル石を添加後、脱酸材を除く合金鉄が目標組成まで添加されるが、2回脱ガスを行う鍛鋼以外は脱ガス時の脱炭量を安定させるため、加熱終点で0.05%程度のSiを添加する。

加熱期の重要な作業は合金鉄添加と昇熱であるが、通常の電気炉と異なり、常にflat bath であるため熱効率はおおよそ30%であり、合金鉄を多量に投入する場合でも40%(合金鉄1t添加による電力原単位 ≡ 9 kWh/t Steel 増加)である。

鋼の投入量力は、耐火物溶損指数の点から取鋼の直径により制約され、100t 取鋼の場合で変圧器容量として8000kVAが限度と考えられ、平均1.5°C/分の昇熱速度（定常時に2.0°C/分）が通常の操業状態である。合金鉄添加量も理論的には上限はないが、当所では最高1.3%までの経験を有し、この場合の全操業時間は3.5~4hrに達する。ちなみにFeCrを例にとつて、添加後の溶解、均一化の状況を示すと図3のとおりであり、0.8%Crの場合約9分で十分均一化されている。

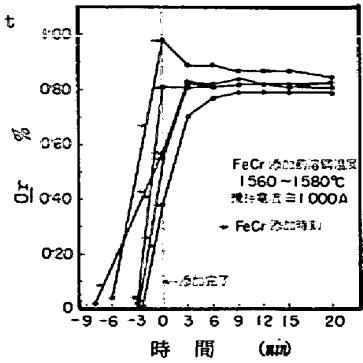


図3 100t LRFにおけるFeCr溶解均一化速度

成分調整の精度は秤量機の精度にもよるが、入念な調整を行うことにより  $\pm 0.005$  Si  $\pm 0.02$  Mn  $\pm 0.03$  (%)に制御できる。

また、加熱中の水素再吸収を防止するため取鋼内に窒素を吹込む。加熱終了の水素は従来大気湿度により影響され、(1)式で表わされるが、

$$\underline{H} = 0.53 \sqrt{PH_2O} + 2.2 \quad \text{ただし } PH_2O = \text{mmHg} \quad \underline{H} = \text{ppm} \quad (1)$$

アーク加熱における水素再吸収はアーク直下における水蒸気の分解により、溶鋼面から直接吸収される場合とスラグを介する場合が考えられ、この間の再吸収を防止するには図4に示すように炉内雰囲気調整するとともに、溶鋼の酸素含有量を高くし、さらにスラグの塩基度を下げるなどの方策が重要である。

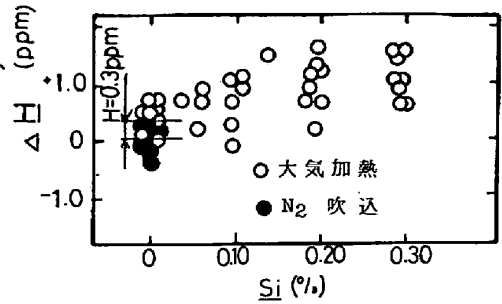


図4 Siと加熱中H再吸収の関係

3.3 脱ガス 脱ガスは脱水素を主眼にしてリムドまたはセミキルド状態で行われる。図5に代表的な水素の推移を示す。前述の転炉出鋼、加熱中における諸策を講じ、さらにAr吹込みを併用した2回脱ガスを行うことにより、平均1ppmまで低減できる。

脱ガス前のSi%と脱水素の関係は図6に示すとおりであり低Siの方が脱ガス効率は増大する。100T 鍋における脱ガス前Si%と脱炭量ΔC%の関係は次式に示すとおりである。

$$\log \Delta C \% = -1.0 / \log Si \% - 2.64 \quad (2)$$

この脱炭量は溶鋼の脱酸量との等量関係から推定される値よりかなり大きい、これはCがスラグ中の(FeO)、(MnO)の還元で消費されていることを示しており、リムド処理の場合には予想以上に大きな沸騰を示し、取鋼のフリーボードを超えて操業はきわめて困難である。これを解決するため、前述のように加熱中、炉内を窒素雰囲気保つことによつて、これらの酸化物の生成を減ずる方策を講じた結果、Σ(Fe, Mn) Oは大気中加熱の平均28.0%から19.6%に減少し、適正な沸騰状態が得られリムド処理が可能になつた。しかし、このような処理を行つても沸騰は2.5分程度で停止し平均的にはH 1.3ppmが限度であるため、再加熱後ランスによるArガス吹込みによつて再脱ガスを行う。LRFにおける脱水素処理の特徴は図7に示すように溶鋼と同時にスラグ中の水素も除去されることであり、このため水素分配率H/(H)はRH脱ガスに比較して大きな値を示す。

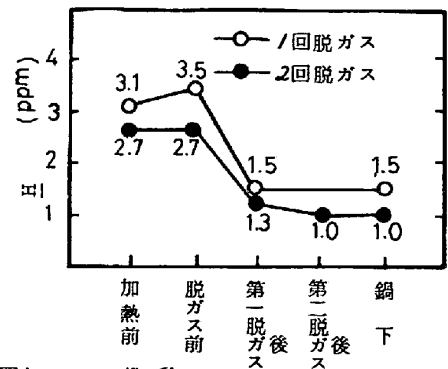


図5 Hの推移

この脱炭量は溶鋼の脱酸量との等量関係から推定される値よりかなり大きい、これはCがスラグ中の(FeO)、(MnO)の還元で消費されていることを示しており、リムド処理の場合には予想以上に大きな沸騰を示し、取鋼のフリーボードを超えて操業はきわめて困難である。これを解決するため、前述のように加熱中、炉内を窒素雰囲気保つことによつて、これらの酸化物の生成を減ずる方策を講じた結果、Σ(Fe, Mn) Oは大気中加熱の平均28.0%から19.6%に減少し、適正な沸騰状態が得られリムド処理が可能になつた。しかし、このような処理を行つても沸騰は2.5分程度で停止し平均的にはH 1.3ppmが限度であるため、再加熱後ランスによるArガス吹込みによつて再脱ガスを行う。LRFにおける脱水素処理の特徴は図7に示すように溶鋼と同時にスラグ中の水素も除去されることであり、このため水素分配率H/(H)はRH脱ガスに比較して大きな値を示す。

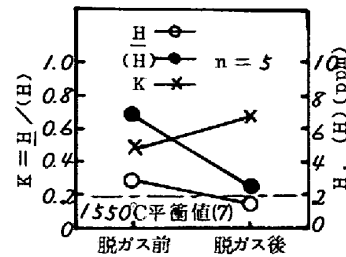


図7 水素分配率

沸騰は2.5分程度で停止し平均的にはH 1.3ppmが限度であるため、再加熱後ランスによるArガス吹込みによつて再脱ガスを行う。LRFにおける脱水素処理の特徴は図7に示すように溶鋼と同時にスラグ中の水素も除去されることであり、このため水素分配率H/(H)はRH脱ガスに比較して大きな値を示す。

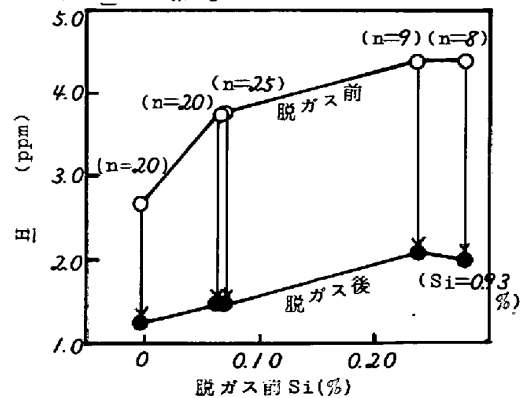


図6 脱ガス前Siと脱炭量ΔCの関係

一方、CO反応による脱酸について見ると、脱ガス時の脱酸経過を真空中サンプリング装置によつて調査した結果は図8に示すとおりである。

脱酸は比較的初期の10~15分に急速に進行し、(3)式により初期の物質移動容量係数  $K_a$  を算出すると、 $1 \sim 5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$  が得られ環流式脱ガス法で

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \exp(-k_a t) \quad (3)$$

ただし、 $C, C_0$  : それぞれ時刻  $t, t_0$  におけるバルク中溶質濃度  
 $C_i$  : 気液界面における液相側溶質平衡濃度  
 $k_a$  : 物質移動容量係数 ( $\text{sec}^{-1}$ )

知られる値に比較すると最も大きな方に属するが、終点の  $C \cdot t$  積は  $4 \sim 6 \times 10^{-6}$  程度でほぼ同水準にありこの限りではLRFの有利性は見られない。しかし温度調整の容易なこの脱ガス法では、時間的制約を受けることなく、安定して脱酸反応を行うことができる。したがつて、脱ガスはCO気泡の生成によつて脱水素を促進するとともに脱酸を進行せしめ、さらに以後の析出脱酸をいかにして行うかが品質要求を満足させる基本的なプロセスになるものと考えらる。

3.4 最終脱酸 通常、脱ガス終了5分前にSiを添加攪拌して処理を終るが、Al添加の必要な鋼種については、その後図9に示す迅速添加法によつてAlを添加し、最高電流を投入して数分間攪拌後注入に移る。この方法は中心孔のあいた4kg菊型鋳塊をロッドにセットし、油圧シリンダーを利用して40kg~100kgを一挙に添加する方法である。Alの溶解に約1分を要し、その後数分間の攪拌によつて酸素値は安定する。この方法によるAl歩止は、従来法の48%に対し66%に  $\sigma$  も0.0038%から0.0025%に向上し目標に対し  $\pm 0.005\%$  に適中させることは容易である。

Al添加後の  $[O]_{\text{Total}}$  の推移は図10に示すとおり、その減少速度は約6分で急速に緩慢になるが(4)式による脱酸速度定数  $k$  は平均  $0.12 \text{min}^{-1}$  が得られる。

$$C = C_0 \exp \{-k(t - t_0)\} \quad (4)$$

ただし  $C, C_0$  : 時刻  $t, t_0$  における酸素濃度

$t, t_0$  : 添加完了後時刻および定常到達時刻 (min)

100t取鍋の場合RIによる環流速度の測定結果は既報のとおり  $85 \text{t/min}$  が得られており、取鍋内の溶鋼流分布を側壁部で上昇流が生ずる放物線型と見た場合に、Y.Sundbergが求めた式によつて、攪拌効率を算出すると約20%にすぎないが、環流速度はRHに比較してかなり大きく、また中西らが示した均一混合時間と溶鋼に与えられるエネルギー密度との関係から見ても、約  $700 \text{watt/t}$  で著しく大きく、速度定数が他のプロセスと比較してかなり大きな値を示すことが理解できる。

#### 4. 製品

4.1 鍛鋼品 大型鍛鋼の代表的な操業パターンを図11に示す。2回目の脱ガス時には成分変化が

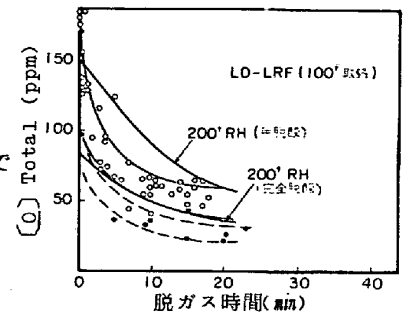


図8 脱ガス時の脱酸の推移

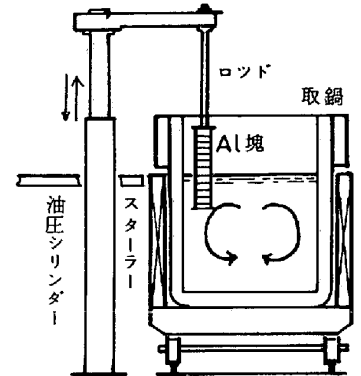


図9 Al迅速添加方法

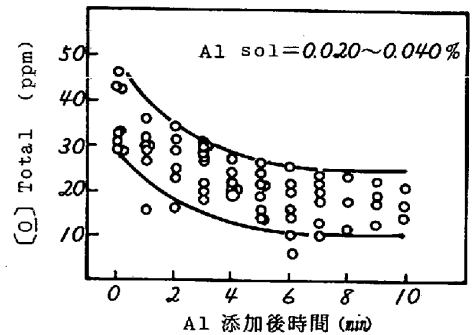


図10 Al脱酸状況

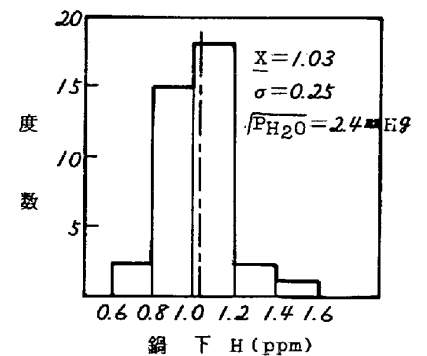


図12 H実績

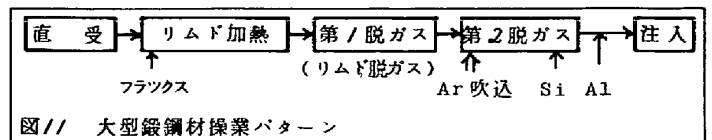
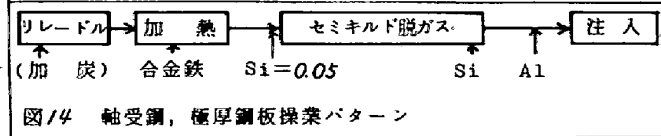


図11 大型鍛鋼材操業パターン

ほとんどないため、脱ガス終了後直ちに注入に移行できる。本法によるH値は図12に示す分布であり、鋼塊切断試験による酸素の分布も図13に示すとおり、沈澱品帯に大きな集積はなく、砂疵発生率は極めて低い。

4.2 極厚鋼板

圧力容器用 ASTM A387-



2.2 ならびに原子力用

A533B等の極厚鋼板の操業パターンは図14に示すとおりであり、合金鉄予熱のため通常リレードル法をとっている。脱ガスは低Siとし、成分許容範囲が厳しいため、脱ガス後微調整を行つた後Alを添加する。

最近A387-22は焼戻脆性改善のため、0.07%Si, 0.013%Alとし2回脱ガスを行うことにより、介在物分布も図15に示すように50μ以上の大型介在物はなく、また転炉鋼を母溶鋼とするため、トランプ元素の少ないこととあいまつて満足すべき材試結果を得ている。これらの鋼板は過去、超音波探傷試験で格落した例がなく、また表面、側面の染色探傷においてもほとんどの鋼板が無欠陥である。

4.3 軸受鋼

軸受鋼は一般に電炉によつて製造されているが、図14に示した操業パターンによつて、リレードル時に加炭を行うことにより、低リンでかつトランプ元素の少ない、低Al, 低酸素の軸受鋼をLD-LRFによつて製造可能であり、試作結果は図16に示すように、転動疲労寿命は電炉-脱ガス、プロセスと比較して優るとも劣らない結果が得られている。

5. 結 言

LRFは、他の方法にない低周波誘導攪拌装置を有し、品質の観点から見れば、安定して高品質が得られ、とくに低酸素とともに、低水素をを要求される鋼種に対しては現状におけるbest processと考えられ、転炉工場において溶製困難な鋼種はほぼ解消したと見ることができる。

文 献

- (1) 小口ほか；特殊鋼部会資料，特47-12共13
- (2) 特殊鋼部会特別報告書 №8 (1969)8
- (3) 大井，松野，藤井；川崎製鉄技報，4(1972)1, P/
- (4) Y.Sundberg；ASEA J 44(1971)4, P71
- (5) 中西，；Iron Making and Steel Making 1975 №3 P193
- (6) 西岡，江本；鉄と鋼 60(1974)12 P1661
- (7) 今井，大井，江見；鉄と鋼 50(1964)6 P878

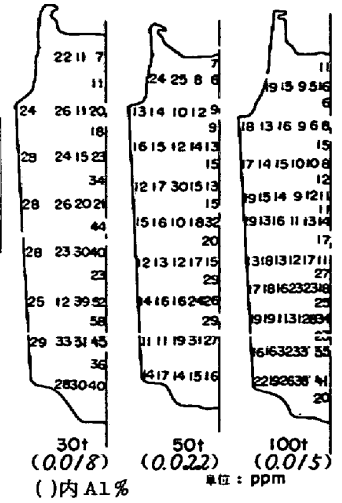


図13 鍛造用鋼塊酸素分布

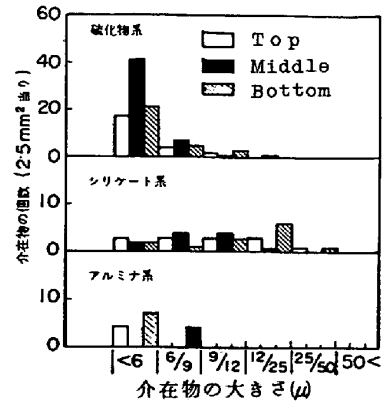


図15 A387-22 介在物分布

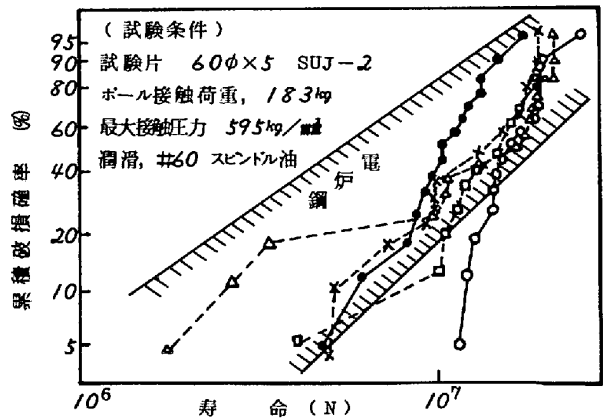


図16 スラスト型転動疲労試験結果