

## LF 脱ガス条件改善によるエネルギー低減

## Energy Reduction by Improvement of Vacuum Degassing Condition for Refining Process

高橋 一樹  
Kazuki Takahashi浦本 和孝  
Kazutaka Uramoto生方 貴  
Takashi Ubukata鈴木 忠  
Tadashi Suzuki

## 要 旨

LF 精錬では真空脱ガス(VD: Vacuum Degassing)を必要とする。スチームエゼクターを使用して取鍋内を真空排気しており、VDは溶鋼量によらず同一条件を設定していた。しかしながら、VDの攪拌エネルギーには取鍋内溶鋼深さが大きく影響する。そこで、溶鋼量によらず脱ガス能を一定にするため、VDにおける攪拌エネルギーを統一した。その結果、過剰なVD処理時間を短縮することで蒸気量を削減することが出来た。

## — Synopsis —

Refining period needs VD (Vacuum Degassing) process. In this process, refining ladle is evacuated by steam ejector and the same conditions were set regardless of the amount of molten steel. However, the stirring power of VD greatly depends on the molten steel depth in the ladle. Therefore, in order to make the degassing ability constant regardless of the amount of molten steel, the stirring power in VD was unified. As a result, shortening the excessive VD time leads to reduction of steam consumption.

## 1. 緒 言

当社は発電所向け発電機軸材や圧力容器を主とした大型鍛鋼製品を完全受注生産にて製造している。そのため、製鋼工程では真空上注 casting で最大 670ton 鋼塊、下注 casting で 60ton 以下の鋼塊を製造しており、電気炉・取鍋精錬炉(以降 LF: Ladle Furnace と記述する)の処理量はヒート毎に大きく変化する。また、溶鋼量を 138ton 以上必要とする鋼塊は取鍋を複数基使用して精錬を行い、中間鍋を介して 1 つの鋼塊を製造する合せ casting を行っている。LF では脱ガスを目的とした真空処理(以降 VD: Vacuum Degassing と記述する)を行っているが VD の条件は真空 casting 用、下注 casting 用でそれぞれ溶鋼量に関わらず一定であった。しかし、VD における攪拌エネルギーは取鍋内溶鋼の高径比(H/D)により大きく変わるため過剰

攪拌の防止によるエネルギー費低減、溶鋼の脱酸不良率低減、介在物やスラグの懸濁抑制を目的に VD 条件の見直しを行った。

## 2. 製鋼プロセス

図 1 に当社製鋼工場の製鋼プロセスを示す。電気炉で鉄スクラップを溶解してできた溶鋼は酸化精錬による脱磷後に取鍋へ出鋼される。取鍋内の溶鋼は処理湯量に応じて各 LF (30tonLF × 1 基、大型 LF × 3 基)で還元精錬・VD・成分調整が施され、温度調整後に casting へと進む。真空 casting では最大 5 基合せでの casting を行っており、精錬は加熱ステーションが 3 基の大型 LF (130tonLF × 1、140tonLF × 2)を用いて同時に行っている。一方、下注 casting や一部の真空 casting では取鍋 1 基で製造する。

大型 LF における取鍋 1 基当たりの処理湯量は真空鑄造では 60 ~ 137ton、下注鑄造の場合は 45 ~ 120ton と鋼塊重量に応じた広い範囲で調整しており、取鍋内溶鋼の H/D はヒート毎に異なる。また、電気炉は 1 基であることから、取鍋 2 基以上で鑄造する場合に電気炉 1 ヒート目に出鋼された溶鋼は後に出鋼されるヒートの溶解・精錬分の長い待機時間が発生している。

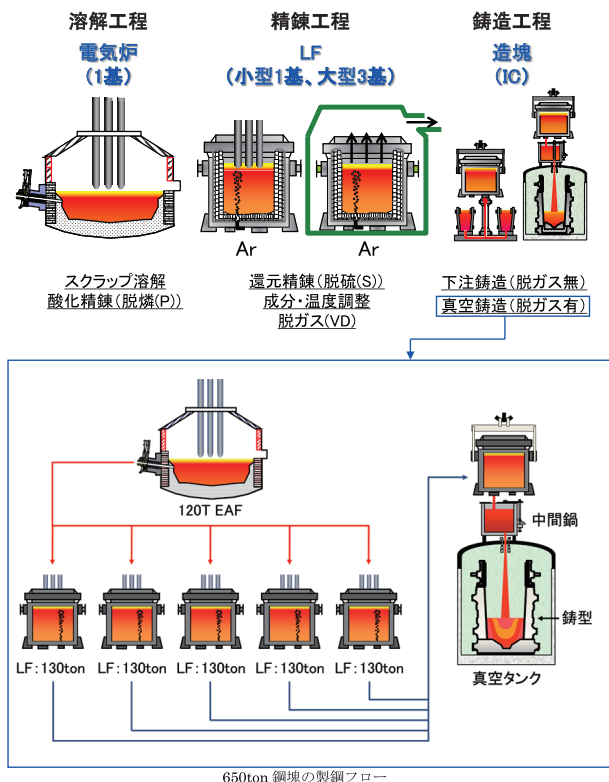


図1 製鋼プロセス概要

### 3. LF の真空脱ガス処理

LF では VD にて溶鋼を攪拌させることで脱ガス(水素、酸素、窒素)、脱硫を行っている。ここで、VD における攪拌エネルギーは(1)、(2)式<sup>1)</sup>で示される。

$$\varepsilon = \frac{6.18 \times 10^{-3} \times Q T_L}{W} \times \left\{ \ln \left( 1 + \frac{H}{148 \times P a} \right) + \left( 1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \right\} \quad (1)$$

$$P = \varepsilon \times 60 \times B \quad (2)$$

$\varepsilon$ : 攪拌エネルギー密度 (W/ton)	$P$ : 攪拌エネルギー (J/ton)	$Q$ : Ar 流量 (L/min)
$T_L$ : 溶鋼温度 (K)	$W$ : 溶鋼量 (ton)	$H$ : 溶鋼深さ (cm)
$P a$ : 真空度 (atm)	$T_0$ : Ar ガス温度 (K)	$B$ : 高真空時間 (min)

従来、VD 条件は鑄込が①真空鑄造の場合、②下注鑄造の場合の 2 種類に分類し、それぞれ一定の条件(Ar 流量、高真空時間、溶鋼温度、真空度、を固定)で設定されていた。湯量が少なくなるほど溶鋼深さが小さくなり、(1)式より攪拌エネルギー密度が大きくなることから攪拌エネルギーを統一するならば少湯量であるほど VD 条件

は緩和できると考える。また、脱酸、脱硫はスラグ-メタル反応であることから VD 中以外の大気下における還元精錬、成分調整を行っている時にも電極通電や底吹き Ar により溶鋼とスラグが攪拌され、溶鋼中の酸素や硫黄は(3)、(4)式で示される反応が進行し、溶鋼からスラグ相へ移動する。



従って、取鍋 2 基以上で真空鑄造する際には最終ヒート以外は待機時間が生じるため、VD 中以外にある程度の脱酸、脱硫が進行することから VD では最終ヒートよりも少ない攪拌エネルギーで十分な脱酸、脱硫が可能である。一方、下注鑄造では真空鑄造と異なり、鑄込中の脱ガスがない事から VD 条件の緩和により水素の要求値逸脱リスクが生じるため、水素値が要求値以下であることの評価が必要である。

## 4. 攪拌エネルギー変更試験

### 4.1 真空鑄造品

図 2 に真空鑄造品の LF 湯量と VD における攪拌エネルギーを示す。図中の破線は従来設定していた VD 条件での攪拌エネルギーであり、LF 湯量の最小と最大で約 2.0 倍の攪拌エネルギー差が生じている。実線は試験にて設定した攪拌エネルギーである。図 3 に過去の製造実績における攪拌エネルギーと脱酸率(= VD 前後に変化した酸素量 / VD 前酸素量)の関係を示す。攪拌エネルギーが増加すると脱酸率は増加傾向にある。試験では脱酸率が 80% となる攪拌エネルギーを狙いとして設定した。図 4 に Ar 流量と攪拌エネルギー密度の相関を示す。Ar 流量を増加させると攪拌エネルギー密度が大きくなることから、試験では可能な限り Ar 流量を増加させた。また、当社では LF における脱酸状況の確認として VD 前はスラグの色で判断し、VD 後は石英ピンサンプルによる酸素量の分析にて管理していた。そこで、脱酸率 80% を狙い値としたことから、VD 後の酸素量が満足できるよう VD 前の酸素量に管理値を設けた。表 1 に試験における VD 条件を示す。溶鋼温度と真空度は従来から変更せず、Ar 流量を増加させ、高真空時間の調整で攪拌エネルギーをコントロールした。試験では鋼塊の超音波探傷試験(以降 UT: Ultrasonic Testing と記述する)検査不良率、脱酸・脱硫状況について評価した。

図 5 に VD 前後の酸素含有量の相関を、図 6 に VD 前後の S 含有量の相関を示す。試験 N 数はそれぞれ 20 であり脱酸、脱硫不良は発生せず全てにおいて目標値以下

の成分が得られた。図7に試験時の攪拌エネルギーと脱酸率の関係を示す。脱酸率は従来と比べてバラつきが大きい。比較対象の従来品は湯量 120ton 前後でしか VD 前の酸素濃度を測定している実績が無く、試験では湯量 60 ~ 135ton と取鍋内の溶鋼深さの幅が広いことから攪拌エネルギー密度が異なるため、高真空時間を調整して同等の攪拌エネルギーを与えた。従って、攪拌エネルギーのみでは脱酸率を制御できず、その密度も考慮した VD 条件を設定する必要があると推定される。しかし、VD 後の目標酸素量は逸脱していないことから、湯量が少なく攪拌エネルギー密度が大きい条件では更なる攪拌エネルギー低減の可能性があると考えられ、今後取り組む予定である。図8にVD直後のSi濃度頻度を示す。試験を行った鋼種はSi脱酸鋼であり、VD後のSi濃度は脱酸度合いの指標となる。従来と比較して試験ではVD後Si濃度が高い傾向にあり、攪拌エネルギーを統一してVD前酸素に管理値を設けたことからSiロスとなる脱酸不良が解消されたものと考えられる。図9に鋼塊表層部のUT検査不良率を示す。UT検査不良率は従来と比較して減少傾向が認められた。その理由の1つは前述した脱酸不良の解消により低級酸化物の生成が抑制できたものによると考える。図10に攪拌エネルギー低減による品質改善メカニズムを示す。一般に介在物粒子はストークスの法則に従って溶鋼内を浮上すると考えられ、その浮上速度は(5)式<sup>(2)</sup>によって表され、浮上速度は粒子径の2乗に比例している。

$$v = 2gr^2\Delta\rho/9\eta \quad (5)$$

$v$ : 浮上速度 (mm/s)	$g$ : 重力加速度 (mm/s <sup>2</sup> )	$r$ : 粒子半径 (mm)
$\Delta\rho$ : 溶鋼と介在物の密度差 (g/mm <sup>3</sup> )	$\eta$ : 溶鋼の粘性 (Pa・s)	

従って、比較的粒子径の小さいスラグが懸濁した介在物は溶鋼中で浮上しにくいものの、攪拌エネルギーを低減したことで懸濁が抑制されたと推定される。以上のことから、UT検査不良率が低減したのはVD中の脱酸不良解消により低級酸化物の生成が抑制されたこと、および攪拌エネルギー低減によりスラグの顕濁が抑制されて凝固時に捕捉される介在物が減少したことによるものと考えられる。

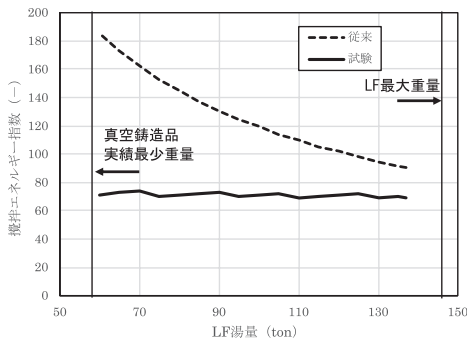


図2 LF湯量と攪拌エネルギーの相関

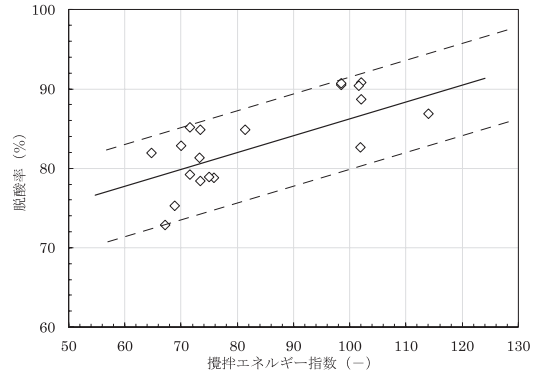


図3 攪拌エネルギーと脱酸率の関係

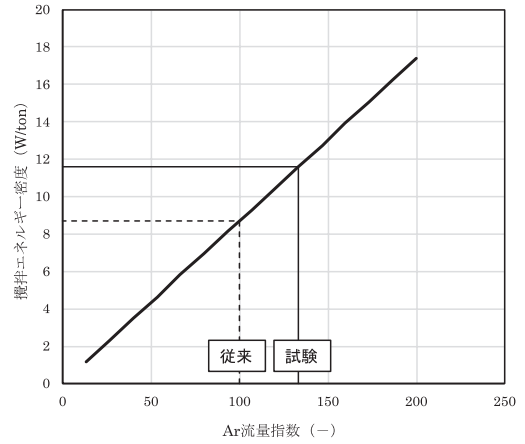


図4 Ar流量と攪拌エネルギー密度の相関 (LF湯量: 100ton)

表1 VD条件

項目	真空製造品		下注製造品	
	従来	試験	従来	試験
VD開始時溶鋼温度 (°C)	1655		1680	
目標到達真空度 (Torr)	<1			
高真空 (<1Torr) 時間 (min)	15	x	35	x
Ar流量指数 (-)	100	133	133	

x : 攪拌エネルギーを一定にするための変数

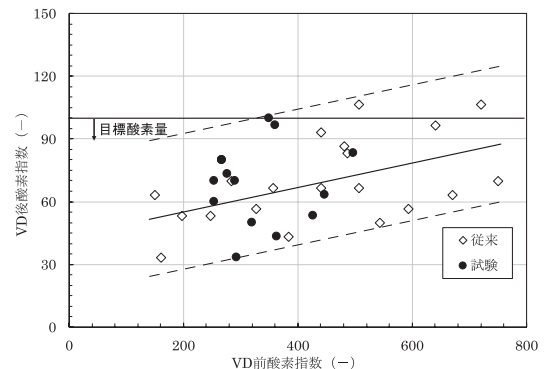


図5 VD前後の酸素含有量の相関

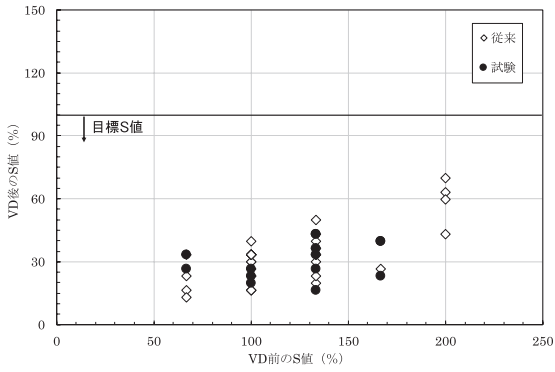


図6 VD 前後の S 含有量の相関

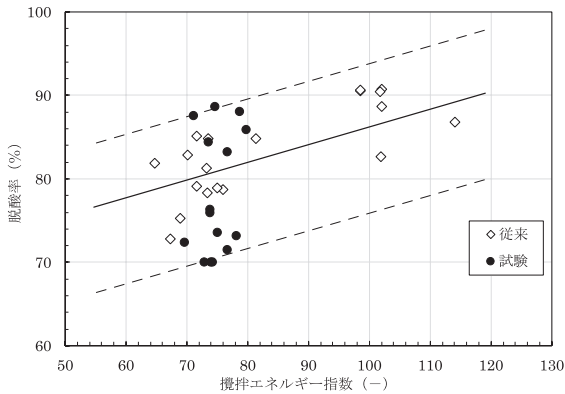


図7 試験時の攪拌エネルギーと脱酸率の関係

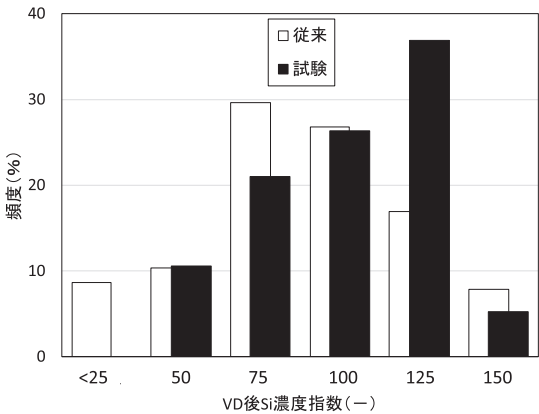


図8 VD直後の溶鋼 Si 濃度

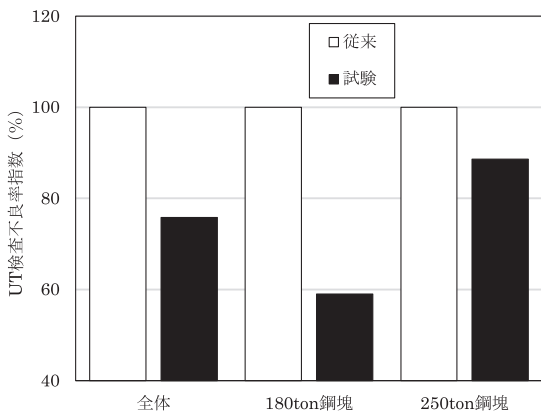
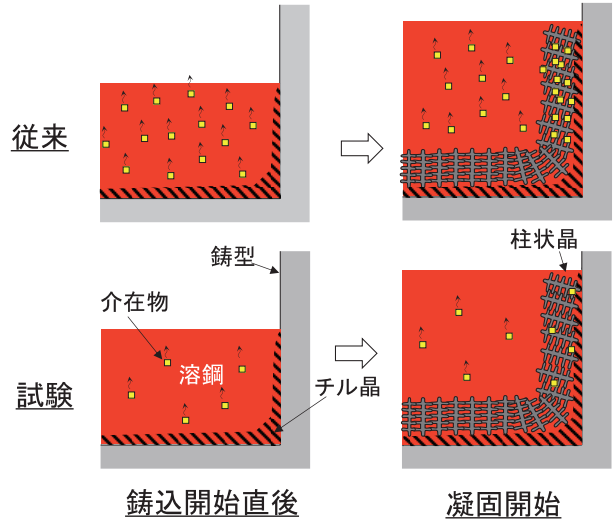


図9 鋼塊表層部の UT 検査不良率指数



攪拌エネルギー低減によりスラグ、介在物の懸濁抑制  
⇒凝固の早い表層部の砂疵欠陥低減

図10 攪拌エネルギー低減による品質改善メカニズム

#### 4.2 下注铸造品

図11に下注铸造品のLF湯量とVDにおける攪拌エネルギーを示す。真空铸造同様に最小、最大湯量で約2.5倍の攪拌エネルギー差が生じている。下注铸造では脱水素不足の懸念があることから、試験する湯量は100ton以下に限定した。表1に示した試験の攪拌エネルギーの狙い値は従来のVD条件におけるLF湯量100tonの攪拌エネルギーと同等になるよう高真空時間を調整した。図12に攪拌エネルギーとVD後水素値の相関を示す。当所では水素のオンライン分析にHydris (Heraeus electro nite社製)を使用している。湯量に関わらず攪拌エネルギーを低減してもVD後水素は従来と同等な値が得られており脱水素不良がないことを確認できた。

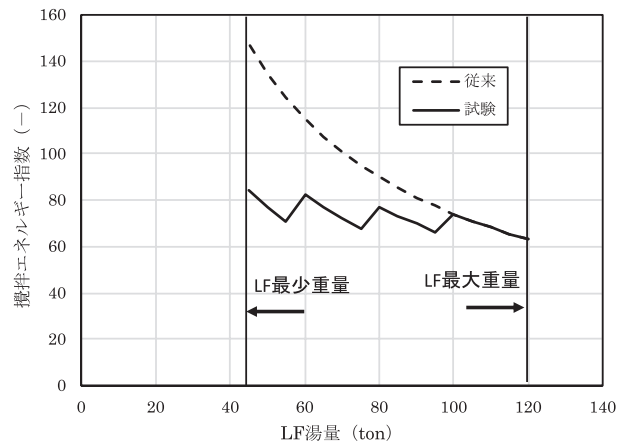


図11 下注铸造品のVD条件におけるLF湯量と攪拌エネルギー

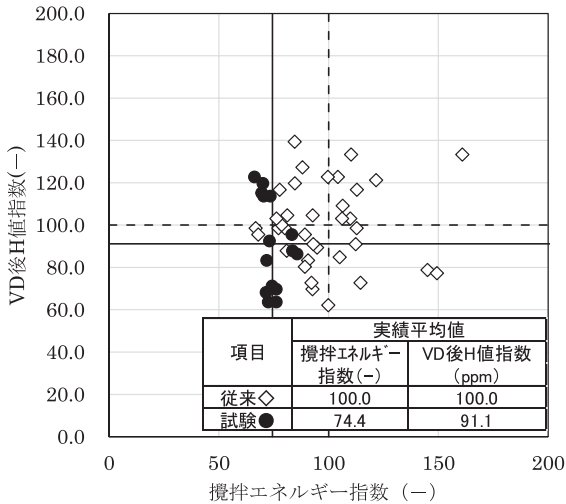


図12 攪拌エネルギーとVD後水素値

- ・攪拌エネルギーが常に一定となるVD条件を設定したところ、従来の製造実績と比較して脱酸・脱硫不良を発生させることなく操業を行うことが出来た。
- ・LF湯量の違いで攪拌エネルギー密度が異なると攪拌エネルギーあたりの脱酸率にも変化が認められ、更なる処理時間短縮の可能性が示唆された。
- ・攪拌エネルギーを統一したVDを行った結果、鋼塊表層部のUT検査不良率が低減した。
- ・従来よりも攪拌エネルギーを低下しても脱水素率は同等な値が得られ、従来のVD条件が溶鋼の脱水素についても過剰な設定であったことがわかった。
- ・見直したVD条件の適用によりスチームエゼクター蒸気使用量が13%低減できた。

本試験において鋼塊表層部のUT検査不良率が低減したが、原因として①溶鋼の脱酸不足の解消による低級酸化物生成量の低減、②攪拌エネルギーの低減により溶鋼中のスラグや介在物の懸濁量抑制が考えられた。

### 5. エネルギー費低減効果

図13にスチームエゼクター蒸気使用指数の変化を示す。攪拌エネルギー変更試験ではVDの処理時間を調整したことから真空排気用スチームエゼクターの蒸気使用量を低減できていることがわかる。真空铸造品では合せ铸造を行う一部の製品のみの適用としたため効果は小さかったものの、下注铸造品は全ヒートに適用したことから効果は大きくなっている。操業全体で集計すると蒸気使用量を13%低減することができた。また、定量評価は行っていないが、VD時間の短縮を行うことで取鍋煉瓦やVD天井といった耐火物の原単位低減や、LF処理時間の短縮による電力原単位、電極原単位の低減効果もあると考えられる。

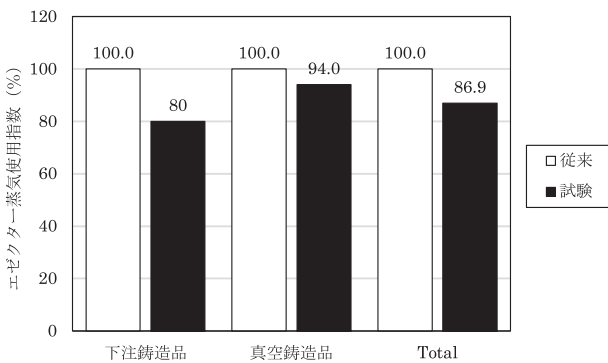


図13 スチームエゼクター蒸気使用指数の変化

### 参考文献

- (1) 森一美、佐野正道：“インジェクション冶金の動力学”，鉄と鋼，Vol. 67 (1981) No. 6, pp. 672-695
- (2) 鈴木是明、福本勝、谷口晃造：“鋼塊の凝固過程における酸化物系非金属介在物の挙動について”，鉄と鋼，Vol. 58 (1972) No.1, pp. 60-75

### 6. 結 言

LF精錬中のVDを攪拌エネルギーによって整理し、過剰な処理時間の短縮を行った。この中で以下の知見が得られた。