技術資料

Technical Paper

大型 VIM へのプレキャスト・ルツボの導入

竹園嘉識^{*1}，原田衛司^{*2}，松谷博司^{*1}

Application of Monolithic Precastable Crucible for Large-sized VIM

Yoshinori Takesono, Eiji Harada, and Hiroshi Matsuya

Synopsis

Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd., installed 9-ton vacuum induction melting furnace(VIM) in February, 1999(and also installed 3-ton VIM in July, 1999) at melting shop in order to expand production of high alloyed material and to strengthen competitiveness.

The 9-ton VIM was a model designed by ALD and further improved by Daido Steel, and has the following major characteristics; (1)Enlarged size (a maximum class domestically), (2)Enhancement of vacuum during melting and vacuum refining capability by strengthening stirring power and(3)automatic control of teeming rate. On the other hand, it succeeded in applying monolithic precastable crucible to a large-sized VIM for the first time in the world. Its major improvements were(1)changing particle size construction of refractory raw material, (2)change of major composition at each particle size class, and (3)improvement of molten material leakage detector. Still more, stabilization of refractory material quality and increase in melting input power and productivity through improved operation condition have been realized.

1 . 緒 言

大同特殊鋼(株)渋川工場(以下当社と称す)では、3t 真空誘導炉 (Vacuum Induction Melting Furnace, 以下 VIM という) および 15t 電気炉で、合せて月間 700 t という日本最大規模の高合金の生産を誇ってきた。しかしながら 3tVIM は設備導入後 20 年以上が経過していたため、その老朽化が顕著となり、また 1980 年以降の年率 15% の伸びを続ける旺盛な需要に対し、近年では VIM 能力制約から高合金生産量の伸びは頭打ちという状況にあった。そこで高合金の受注拡大と品質、コスト、デリバリー競争力の向上を図るべく 1999 年 2 月当製鋼工場に最新鋭の 9tVIM を導入(1999 年 6 月には特殊溶解工場から製鋼工場への 3tVIM の移設も完了)した。その結果、現在では高合金の月間生産量が電気炉と合せて 800 t、VIM 生産量としても 1000 t に達するまでに至っている。本報ではその設備概要と耐火物・操業改善状況について報告する。

2 . 9tVIM 設備概要と特徴

Fig.1 に渋川工場新 VIM の鳥瞰図を示す。新 VIM は 9t/3t 炉の溶解ステーションを各 1 カ所有し、チャージャー(真空装入装置)とモールド室(鑄込み室)は省スペース化のため、2 炉共用設備となっている。なお電源・炉体については 9t 炉が 1 電源 2 炉体、3t 炉が 1 電源 1 炉体という構成になっている。

Table 1 に新 VIM の主な設備仕様を示す。今回導入した 9t 炉は、近年 ALD 社(独)が開発した最新鋭機を更に当社独自に改善したタイプであり、従来との主たる変化点は、大型化(国内最大級)、溶解真空度の向上および攪拌電源利用による真空精錬能力の向上、鑄込み速度制御による鋼塊品質の改善などである。

Fig.2 に新 9tVIM と旧 3tVIM との比較一覧を示す。旧 VIM は炉体が真空チャンバー内で前後傾する構造のため大きな容器を必要としたが、新 VIM は炉体と共に容器全

2000 年 10 月 10 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.), * 2 大同特殊鋼(株)星崎工場 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

Fig. 1. Bird's-eye view of new VIM.

Table 1. Basic specifications of new VIM.

Classification	Item	Specification
Furnace	Number of furnaces	9ton Furnace × 2 3ton Furnace × 1
	Furnace capacity	9ton : 5 ~ 10ton/charge 3ton : 2 ~ 4ton/charge
	Melting chamber capacity	14m ³
	Method of raw materials charging	Available for charging in air or vacuum
	Power supply	9ton : 2750k 3ton : 1800kW
Vacuum pump	Pumping systems	3Step × 3Line(R.P + M.B)
Stirring	Electric source for stirring	Three phase electromagnetic stirring installed
Casting	Casting	Pouring out of ladle via launder(Up-hill pouring)
	Pour rate control	Controlled by load-cell & stopper
Furnace replacement	Furnace replacement	Quick change available within 10min.

体が前後傾するタイプ（VIDP方式：Vacuum Induction Degassing & Pouring）を採用したため、真空チャンバーの容積が従来の約10～20%とコンパクト化され、排気時間の短縮と到達真空度の向上が可能となった。また溶解電源とは別に低周波の攪拌専用電源を備えているため、溶湯の温度上昇に制約されず十分な攪拌が得られることから、従来対比、脱ガス精錬能力の向上にも寄与している。

一方、VIMでの高合金の造塊は「上注」が一般的であるが、当社では鋼塊清浄度の向上を目的に「下注」造塊を実施してきた（二次溶解用電極に関しては、設備制約上「上注」としていた）。新VIMでは全量「下注」とし、更

にロードセル＋取鍋ストッパー開度調整による自動鋳込み制御装置を導入し鋼塊肌改善および歩留向上を図っている。また最大溶解量が10t/chとなるため、従来の3tVIMでは溶解できなかったガスタービンディスク、ブレードといった大型鍛造品の製造が可能となっている。更に製品ロットを対象とした場合では従来の製鋼工場／特殊溶解工場における溶解ロット（30t電気炉：25～30t/ch，15t電気炉：15～25t/ch，3tVIM：2～4t/ch）に不足していた小ロット範囲（5～10t/ch）への対応が強化できるようになり、より最適な溶解チャージ構成が可能となった。

またVIMは炉耐火物や前回溶解鋼種からの汚染を嫌う

Item	Former VIM	New VIM
Concept of Design		
Furnace	3ton $\times$ 2 : 1Power-2Melting chamber -2Mold chamber	9ton $\times$ 2 + 3ton $\times$ 1 : 2Power -3Melting chamber-1Mold chamber
Melting chamber	65m ³	14m ³
Stirring	Not available	Electromagnetic stirring
Casting	Pouring out of ladle	Pouring out of ladle via launder
Pour rate control	Controlled by nozzle size	Controlled by load-cell & stopper
Furnace replacement	Quick change available within 10min.	Quick change available within 10min.

Fig. 2. Comparison between new and former VIM.

	① Construction of crucible	② Sintering process	③ Product melting
Conventional (Dry stamp method)			
Improved (Precastable crucible method)			

Fig. 3. Comparison between dry-stamp method and precastable crucible method.

こと、あるいは炉体交換に長時間（2～8 Hr）を要することなどから、類似鋼種を連続的にシリーズ溶解するのが一般的である。新 9tVIM では当社が独自に開発した電源のクイックチェンジ方式を採用したことで炉体交換を 10 分以内で実施することが可能となり、少量多品種の鋼種へのフレキシブルな生産体制を確立している。

3．大型プレキャストルツボの開発

3.1 プレキャストルツボの導入経緯

当社 VIM では生産性および耐火物の耐用寿命の向上を目的に、旧 3tVIM 使用時から炉体耐火物として一体成型型プレキャストルツボを採用してきた。Fig.3 に VIM においては一般的な炉体耐火物施工方法である乾式加振充填方式とプレキャストルツボ方式との比較を示す。乾式加振充填方式では乾式炉材表層へ焼結層を形成させるため炉

材に鉄シリンドーを内挿した上で、長時間かけた焼結溶解が必要となる。これに対してプレキャストルツボ方式では成形済みのルツボを使用するため乾燥程度の加熱で使用可能となる。このためルツボの初回使用時から鋼種を問わず製品溶解を実施することが可能となり生産性向上への効果が大きい。またプレキャストルツボは湿式材振動方法で成形されているため、炉材充填密度が高く、高耐用寿命が期待できる。

3.2 9tVIM へのプレキャストルツボ適用

Fig.4 に示すように容量 6t 以上の大型 VIM では、その炉体耐火物としてレンガを使用するか、もしくは乾式加振充填方法で施工することが一般的である。しかしレンガでは目地からの地金浸入の恐れがあり、ワークレンガとパーマレンガをセットで施工する。このため誘導コイル／レンガ内面（溶湯）の距離が大きくなり電力効率を悪化させて

Fig. 4. Comparison of refractory in each-sized VIM.

しまう。また製品溶解までに要する時間も乾式加振充填方法と同様に長時間を必要とする (Fig.5)。一方、プレキャストルツボはレンガ対比で炉材を薄肉成形することが可

Fig. 5. Comparison of necessary time until product melting.

能であり、電力効率、生産性の面からも有利となる面が多い。しかし炉材厚さを薄肉化するということは、耐火物に対してより高い信頼性が要求されるということである。今回の新 9tVIM 設備導入は、生産性の向上および高合金の生産量拡大が主目的であるため、従来の旧 3tVIM での実績・知見を勘案し、世界的にも初の試みとなる大型 VIM への一体成形品プレキャストルツボの適用に踏み切った。

9tVIM 炉体耐火物ライニングを Fig.6 に、今回適用したルツボ成分を Table 2 に示す。耐火物厚さは、ルツボ 70 mm + バック材 40 mm = 110 mm というように、一般的な大型 VIM 耐火物厚さと比較して 30 ~ 40% の厚さまで薄肉化した。また耐火物成分は旧 3tVIM での使用実績から同材質を選択した。

3.3 初期使用結果と課題

設備立上げ当初の炉体使用後残寸調査結果の代表例を

Fig. 6. Schematic view of precastable crucible (9tVIM).

Table 2. Properties of refractory.

Type	
Chemical composition(wt %)	
MgO	80
Al ₂ O ₃	20
Bulk density	3.1
Apparent porosity(%)	13
Compressive strength(MPa)	42.7
Modulus of rupture(MPa)	4.1
Coefficient of linear expansion in hot condition(at 1273K)	0.98
Coefficient of residual expansion(1823K × 10Hr)	3.09

Fig.7 に示す。当社 VIM では従来からスラグ精錬を実施しているため、スラグライン部では他部位と比較して残寸の

Fig. 7. Residual length after 16 heats use.

Fig. 8. Operation pattern of new VIM.

低下傾向がみられているものの、その絶対量としては大きな問題にはならない。

一方、耐火物表面に亀裂が発生し、溶湯がバック材表面もしくはコイルセメント表面まで浸入するという現象が発生していた。従って耐火物厚さは十分あるにも関わらず、部分的に発生する亀裂へ地金が入り込んだ結果、湯漏れ検知装置（後述）が作動し、炉修・解体を余儀なくされるという状況が頻発していた。

VIM での耐火物損傷形態としては、溶湯攪拌による耐火物の摩耗損傷、スラグと耐火物の化学反応による溶損、スラグ成分が耐火物中へ選択吸収されることによる変質層の生成とこれに伴う構造的スポーリング、加熱・冷却時の熱衝撃を原因とする熱的スポーリングが考えられる。このうち亀裂については構造的スポーリングをきっかけに発生し、熱的スポーリングで進行するところが大きいと考えられる。特に新 VIM では Fig.8 に示すような計3基の炉体を使用する操作パターンを採用しているため炉内の加熱・冷却が旧 3tVIM と比較して、より一層過酷になっている。これに加えて炉体大型化による熱膨張・収縮長さの絶対量増加、あるいは炉内温度の不均一さが亀裂の拡大・進行を促したと推定される。

またプレキャストルツボ成形段階において使用する中子も炉体大型化にあわせて分割タイプに変更したが、分割体境界部に相当するルツボ内表面で段差が発生していたため、更に亀裂発生を助長する要因となっていた。

以上から大型 VIM でのプレキャストルツボ適用のために、耐火物へのスラグ浸透および変質層生成の抑制、耐火物の熱間膨張率抑制、耐火物温度の高位維持、ルツボ内表面品質改善が必要となった。

3.4 耐火物材質改善

Fig.9にプレキャストルツボの主構成材である MgO 系材料と Al_2O_3 系材料の各配合比率における浸食試験結果を、Fig.10に残存膨張収縮率の結果を示す。耐スラグ浸透度からみた場合、 $MgO > 60\%$ とすることで浸透レベルが悪化するため、極力 MgO を低減させる方向で検討すべきであるが、スラグ精錬を実施する当社 VIM の操作条件では耐

火物の溶損拡大を招くことが予想される。また過去 Al_2O_3 含有量を増加した際、溶湯中への [Al] ピックアップ問題が発生したという経験があることから、従来材の成分組成をベースに改善を進めた。

Fig. 9. Result of erosion test in several composition.

Fig. 10. Result of residual expansion test in several composition.

3.4.1 原料の粒度構成変更

一般的に耐火物原料の粒度構成について、最大粒径を耐火物製品厚さの約 10% に設定し、その粒径に応じた最適な粒度分布を構成することが重要といわれている(10% を超えると、強度の低下を招く)。これは微粒子(粒径 < 0.1 mm)の構成比率が低減することによって、スラグとの反応界面積が減少する(化学的溶損抑制)、緻密な組織をもつ粗粒子(粒径 > 3 mm)の構成比率が増加すること

で、スラグの浸透深さが抑制される（構造的スポーリング抑制），ことが要因と考えられる．そこで粒度構成（最大粒径）を変化させたプレキャスト耐火物による溶損試験，スポーリング試験を実施し，耐スラグ溶損性，耐スラグ浸透性を評価した．Fig.11 にその結果を示すように，粒径拡大の効果が明らかとなっている．このときの耐火物組織の変化を Fig.12 に示すが，全体的に緻密な組織が得られていることが分かる．

Fig. 11. Result of erosion and spalling test.

Fig. 12. Structural comparison between conventional and improved refractory. (Left : Improved , Right : Conventional)

また粒径による耐熱的スポーリング性の変化は，テスト材の弾性係数を評価して求めた．その結果を Fig.13 に示す．やはり粒径を拡大した材料で良好な結果が得られているが，これは微粒子と粗粒子との粒界に熱膨張によって生ずる間隙が粒度構成を変更したことで適度に分散し，亀裂の進行を抑制したことが要因と考えられる．以上のテスト結果を基に，従来品を Fig.14 に示す粒度分布へ変更した．

3.4.2 原料構成変更

さらに粒度別に主要成分の見直しを実施した．変更内容

を Table 3 に示す．Fig.11 で示したように粒子径が小さくなるほど耐スラグ溶損性は悪化するが，CaO と低融点化合物を生成しやすい Al_2O_3 は特に不利になると考えられる．そこで微粒子部の主成分を従来の Al_2O_3 から MgO に変更した．

Fig. 13. Result of spalling test.

Fig. 14. Modification of particle size distribution.

Table 3. Change of major composition at each particle size class.

Size	Conventional	Improved
Fine-grained	Al_2O_3	MgO
Coarse-grained	MgO	Al_2O_3

3.5 その他改善

上記に述べた耐火物改善に加えて，耐火物温度の高位維持...炉体保温蓋の導入と休転時間内での弱電力通電予熱，ルツボ表面品質改善...分割中子寸法精度向上と境界部へのカバー方式改善を実施した．

また VIM では湯漏れ検知装置を使用するのが一般的であるが，これについても改善を実施した．改善内容を Fig.15 に示す．湯漏れ検知装置は耐火物亀裂部などへ浸入

した溶湯地金の浸入レベルを電氣的に測定する装置であるが、その検知用ネット（アンテナ）はコイルセメント内もしくはその内周面に一体品をセットするのが一般的である。しかし、この方式では全方向に対して 1 回路の設定となるため、地金浸入位置は分からない。そこで検知用ネットを 4 方向に均等分割させることによって、地金浸入位置特定を可能にし、炉修精度向上を図った。

Fig. 15. Schematic view of molten material leakage detector.

3.6 改善結果

上記に述べた種々改善の結果、Fig.16 に示すように耐用寿命の向上と高位安定化および耐火物コストの 50% 低減を達成し、大型 VIM への一体成形品プレキャストルツボの適用を実現した。

Fig. 16. Changes of life and index of cost.

4. VIM 生産性向上

4.1 溶解投入パワー向上

3.3 で述べたように、新 VIM は 3 炉体を交互に使用する操作パターンを採用しているため、1 炉あたりでの間欠時間が長くなってしまふ。このため炉内温度の低下が生じ、

炉体耐火物の冷却割れを起こしやすい。再通電時の投入電力も熱衝撃による悪影響を及ぼさない程度に低く抑えた操作を実施していた。したがって、材料の溶解に時間を要することになり、生産性の悪化要因となっていた。

耐火物の耐用度を計る基準として、破壊強度 (S) と損傷抵抗係数 (R) がある。材料内に発生する熱応力の最大値 (最大引張応力) を σ_{max} とすると、一般的に以下の関係式がある¹⁾。

$$\sigma_{max} = (E \cdot \alpha) / (1 - \nu) \times (\Delta T / 3) \times T \quad (1)$$

$$R = (\sigma_{max} \cdot h) / (2k)$$

ここで E: ヤング率, ν : ポアソン比, α : 熱膨張係数, k: 熱伝導率, h: 熱伝達係数, ΔT : ピオ係数 (Biot's modulus)²⁾, T: 温度差であり, σ_{max} が材料の破壊強度 S を超えた場合に、材料が破壊 (亀裂) すると考えられる。

また R は破壊の進行程度を示すものであり、以下で表される。

$$R = (E/S^2) \times 1/(1 - \nu) \quad (2)$$

このように R は S の 2 乗に反比例するため、S の増加に伴って急激に低下する。また、ある程度使用された誘導炉耐火物での S は極めて大きいと考えられるが、この場合に亀裂を進行させないためには、(ア) ΔT を小さくする (材質改善)、(イ) 実操作での炉壁温度差 ΔT をより小さくする (炉体保温、弱昇熱)、ことが肝要となる³⁾。

そこで従来の代表的な通電パターンおよび改善後の通電パターンを Fig.17 に示す。従来パターンでは急加熱に

Fig. 17. Modification of electric power pattern.

よる熱的スポーリングと亀裂進行の抑制、また昇熱時間を延長させることによって、発生した微小亀裂部へ溶湯が到達する前に亀裂自身を閉塞させることを目的としていた。これに対し前項の改善後プレキャストルツボの導入によって熱間膨張率等の諸特性を改善し、また保温蓋使用な

どによる耐火物温度の高位維持を図り熱衝撃度を緩和させたことによって、投入パワーを約 10% 向上させた電力パターンを適用することが可能になった。

4.2 ラウンダー形状改善

新 VIM の大きな特徴として出湯作業にラウンダーを用いることが挙げられる。これは分離されている溶解ステーションとモールド室間の溶湯の移動を目的とした樋に相当するものである。従って出湯作業は Fig.18 に示すラウンダー受湯部に実施している。しかし受湯部が構造的に浅くオーバーフロー気味になるため十分な出湯速度が確保できないという問題が生じていた。この出湯時降下温度は出湯時間にほぼ比例して大きくなる傾向にあり、炉内最終出湯温度上昇、すなわち昇熱時間の延長を招いていた。そこで出湯時の温度降下低減と昇熱時間の短縮を目的にラウンダーの形状改善を実施した。

Fig. 18. Schematic view of tapping system of new VIM.

Fig.19 に改善前後でのラウンダー概略図を示す。主な改善点は、オーバーフローを防止し、更に大量の溶湯を注ぎ込むため受湯部容積を 44% 拡大、湯流れ性向上のため、樋部勾配率を 50% 向上、である。

Fig. 19. Comparison between conventional and improved launder.

Fig.20 に改造ラウンダーによる出湯速度、温度降下度の変化状況を示す。出湯速度が約 25% 向上したことで、出

湯時の温度降下も約 15℃ 低減されたことになる。この結果、生産性は向上し操業温度低減による炉体耐火物耐用寿命延長も可能になった。

Fig. 20. Effect of improved launder.

4.3 生産性および生産量推移

Fig.21 に新 VIM での生産性および生産量推移を示す。これまで取り組んできた種々改善項目を実施した結果、新 VIM での生産性は設備立上げ当初から約 25% 増加し、これに併せて生産量も順調に伸びている。

Fig. 21. Productivity and production changes of VIM.

5. 結 言

当社渋川工場において 1999 年 2 月に導入した 9t および 3tVIM では、種々改善の結果、世界的にも初の試みとなる大型 VIM への一体成型型プレキャスト炉の適用を実現した。また耐火物改善にあわせて溶解投入パワー向上等を実施したことで生産性の改善も果たしてきた。これらによって 1999 年 7 月での 3tVIM 移設を経て、現在では月間約 1000 t (導入以前対比約 60% 増) を生産するに至っている。

今後もより高品質かつ効率的な高合金製造プロセス実現に向け、更なる技術改善に取り組んでいく所存である。

(文 献)

- 1) W. D. Kingrey: Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons, Inc. (1960)
- 2) 中山 淳: セラミックス Ⅷ (1973), 343
- 3) セラミックス材料技術集成編集委員会: セラミックス材料技術集成 (1979), 273