技術資料



真空誘導炉における湯漏れ検知システムの活用について

浅野 怜*, 山下博司*, 本庄則夫*

Application of the Molten Metal Leak Detection System in Vacuum Induction Melting Furnace

Rei Asano, Hiroshi Yamashita, and Norio Honjyo

Synopsis

As a furnace crucible refractory of Vacuum Induction Melting (VIM) furnaces, the precasting sleeve which had not been applied for the furnace having over 3 tons capacity has been applied for 3, 6, and 9 tons VIMs in Shibukawa plant, Daido Steel Co., Ltd. in order to increase its productivity. Daido had succeeded to increase lifetime of the precasting sleeve by couples of improvements, the composition of the material particle and the chemical composition, for example. On the other hand, the detection system of molten metal leak into the furnace refractory has been equipped for general VIM as the refractory lifetime judgment system to protect the induction coil and the insulator material. However the same system had been equipped for VIMs in Shibukawa plant for long time, it had a problem in detection accuracy and this was one of the major factors of inpede to increase the furnace refractory lifetime. A new detection system was installed in August 2004 in order to resolve this problem. However, there was also some difference between the system detection and actual value of the length of molten metal leak at the refractory replacement. Results of analyzing the factor that caused the differences and evaluation of the accuracy of the new system were reported in this paper.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株渋川工場(以下,当工場と称す)の3t,6t および9t 真空誘導炉(VIM)では,生産性の向上および 生産チャンスのフリー化を目的として同容量の VIM では ほとんど使用例がないプレキャスト耐火物を採用している.導入当初はプレキャスト耐火物の亀裂からの湯差しを 主としたトラブルにより耐火物耐用は計画値を大幅に下回っていたが,耐火物粒度構成変更,原料高品位化,組成変更などのプレキャスト耐火物亀裂防止対策を実施したことで,平均耐用は向上してきた.

一方,一般的に VIM では誘導コイルや絶縁体の損傷防止を目的に,湯漏れ検知装置を使用し,耐火物の耐用限界を判断している. 当工場でも VIM 設置当初から湯漏れ検知装置使用しているが,その判断精度向上を目的に新たな湯漏れ検知システムを導入した.

今回は、新湯漏れ検知装置による湯差し測定のバラツキの実態について調査し、従来検知よりも高精度であることを確認した結果、プレキャストスリーブの耐用回数をさらに高めることが可能となったので以下に報告する.

2. 当工場 VIM 炉体耐火物について

2. 1 プレキャストスリーブについて

VIM での炉体耐火物としては乾式スタンプ方式もしくはレンガ施工方式を採用するのが一般的である.しかし、当工場では生産性向上を目的に、一体成形型プレキャスト耐火物(以下、プレキャストスリーブと称す)を開発・採用してきた. Table 1 にプレキャストスリーブ適用の利点についてまとめる.また、Fig.1 に乾式スタンプ方式とプレキャストスリーブ方式の操業フローの比較を示す.乾式スタンプ方式ではスタンプ材のルツボ形状を保つための焼結層がない.そのため、スタンプ材表面へ焼結層を形成

する焼結溶解が必要となる.また,焼結溶解では,鉄製の型枠を使用することや溶鋼の清浄度を確保できないことから,当工場では高品質を要求される製品の溶解は行っておらず生産性の悪化を招く一因となる.一方,プレキャストスリーブ方式ではプレキャストスリーブが,この焼結層の役目を果たすため,焼結溶解が不要となり初回から製品溶解が可能となる.

2. 2 当工場 VIM 耐火物仕様

Table 2 に当工場の VIM 炉体耐火物諸元, Fig.2 に VIM 炉体耐火物概略図を示す。当工場 VIM 炉体耐火物はプレキャストスリーブ, スタンプ材, コイルセメントで構成さ

れており、スタンプ材とコイルセメントの間には湯漏れ検知装置用の電極が設置されている. VIM のコイルは Cu 製パイプに冷却水が流れる構造であり、コイルに溶湯が接触し水漏れが発生した場合、水蒸気爆発が発生する危険がある. 従って、VIM 耐火物の耐用安定化、および湯漏れ検知装置による湯差し監視は安全性確保の面からも非常に重要である.

3. 新湯漏れ検知装置の精度検証

3. 1 新湯漏れ検知装置について

当工場では,このプレキャストスリーブに適した交流印

Table 1. Advantages of precasting sleeve application.					
Item	Advantages				
Furnace installation time	Shorten furnace installation time by using precasting sleeve				
Sintering melt No need of sintering melt which is not production (Sintering melt is required in dry stamp.)					
Restrictions of	No chemical composition restriction (Pick up from provious melt is inevitable in dry stame)				

Table 1. Advantages of precasting sleeve application

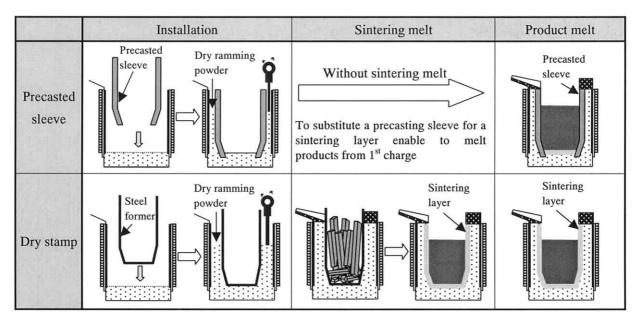


Fig.1. Difference between precasting sleeve and dry stamp operation.

Table 2. Specification of VIM refractories.

Item		Specification		
		Precasting sleeve	Back up lining	Coil grout
Function		Work lining		Parmanent lining
Refractory		Mono-brock	Dry ramming powder	Castable
Composition (mass%)	MgO	70	90	_
	Al ₂ O ₃	25	10	75
	SiO ₂	_	_	10

加式湯漏れ検知装置を 2004 年 8 月に導入した¹⁾. Fig.3 に 新湯漏れ検知装置の概略図を示す. 新湯漏れ検知装置はコ

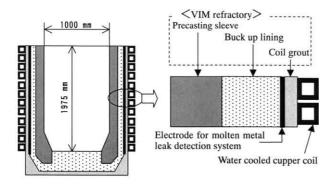


Fig.2. Schematic diagram of our VIM refractory.

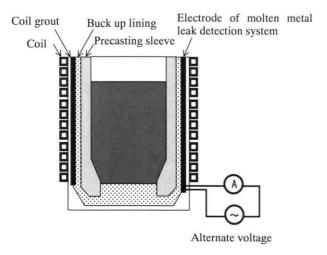


Fig.3. Schematic diagram of the new AC molten metal leak detection system.

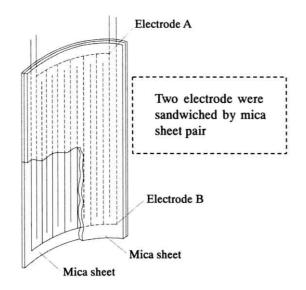


Fig.4. Schematic diagram of the electrode of the new AC molten metal leak detection system.

イルセメント前面に Fig.4 に示した検知電極を設置し、クシ型電極 A, B の間に交流電圧を印加する. この時の電流 測定の流れ方を Fig.5 に示す. 耐火物の抵抗値は Fig.6 に示すように温度の上昇に伴い対数的に減少する 2) ため、電流は温度の高い方向に流れ、もう一方の電極に戻ってくるように流れる. 従って、湯差しが進行してくると、湯差し周辺の耐火物温度が上昇するため、耐火物の抵抗値が下がり電流が流れやすくなる. 新湯漏れ装置はこの特性を利用したものであり、耐火物中の電流値を連続的に測定し、湯差し深さに換算する. なお、この時に電極 A と電極 B を 短絡して流れる電流は無視できる程度である.

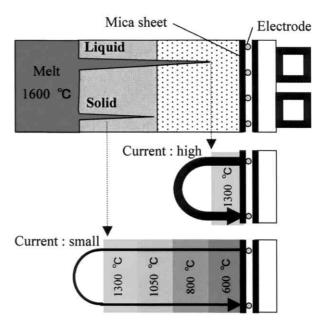


Fig.5. Model of electric current flow in the refractory.

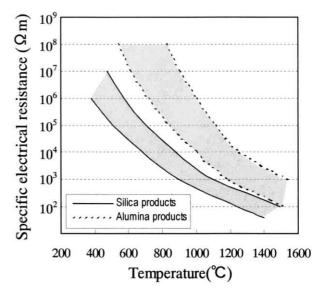


Fig.6. Relationship between temperature and specific electrical resistance of refractory materials.

次に、Table 3 に従来の検知との相違点をまとめる。新 湯漏れ検知装置は、先述のような機構を有するため、浸入 メタルが進行している (発熱あるいは溶融) 部位を的確に 検知できる. しかし、Fig.7 に示すように従来使用してい た検知では、浸入メタルの進行状態(凝固 - 発熱 - 溶融) に関らずメタルが存在している部位すべてを検知するた め,終点判定としては過敏な反応を示すケースがあった. また. 新湯漏れ検知装置では耐火物材質に応じた周波数の 交流電圧を使用して,耐火物に流れる交流電流値を測定す る. そのため, 同じ耐火物厚みでも新湯漏れ検知装置では 従来の湯漏れ検知装置(直流電圧)と比較して大きな電流 が流れ、湯差しの初期段階からの測定が可能である.

3.2 新湯漏れ検知装置による測定結果

新湯漏れ検知装置による湯差し位置の測定結果を Fig.8 に示す. 横軸は新湯漏れ検知装置による湯差し位置の測定 値であり、縦軸は耐火物解体時の実測値である. 新湯漏れ 検知装置での耐火物残厚測定 (メタル浸入位置) に対する メーカー保証精度は± 10 mm であるが、一部のデータが この精度範囲を逸脱している. 操業上問題なく使用してい たが, 更なる精度向上を目的に測定結果の検証と誤差原因

Conventional system New system Power souse DC voltage AC voltage Measurement parameter Current flowing in refractory Resistance of refractory Detection of solid metal in Detect for all metals Detectable for hot metals only refractory Detection of penetrated metal Detect for any amount of metal Detectable for heated metals in refractory Impossible to detect a molten metal leak Detectable at early stage of penetration Other feature untill the leak reach to close to a coil (current in a refractory higher with (current in a refractory is low) adjusting frequency for each refractory)

Table 3. Comparison between the conventional system and the new system.

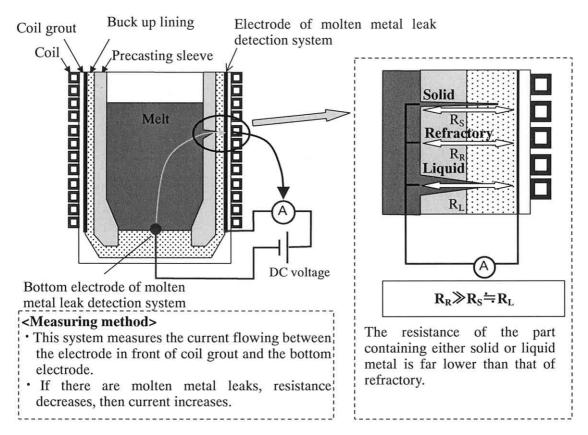


Fig.7. Schematic diagram of the conventional DC molten metal leak detection system.

の解析を実施した. なお, マイナス側に外れたものを [ZONE - I], プラス側に外れたものを [ZONE - II] とし整理した (Fig.9).

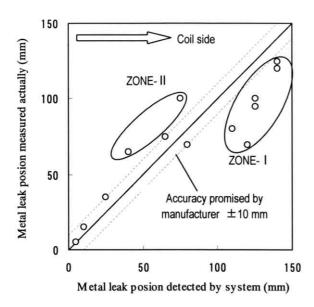


Fig.8. Result of metal leak position measurement by the new system and actual measurement after use.

3.3 測定結果の検証

(1) 検知測定値が実測より進行 [ZONE - I]

ZONE-Iは、解体後の実測値が湯漏れ検知装置で測定されたメタル浸入位置よりも進行していない(コイルから遠い)ケースである。Fig.10 にこれに該当する代表部位の解体後の耐火物断面写真を示す。また、Table 4 に新湯漏れ検知装置および目視でのメタル浸入位置測定結果とその特徴を示す。Point A では目視できるメタルは存在しない。

[ZONE-I]

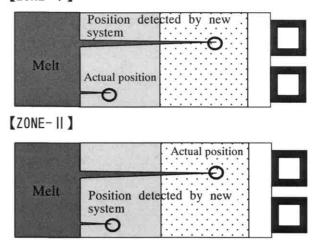


Fig.9. Molten metal leak model of ZONE – I and ZONE – ${\mathbb I}$.

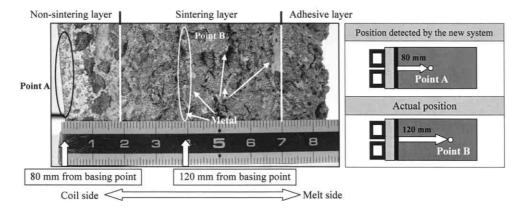


Fig.10. Cross-section photo of precasting sleeve after use.

Table 4. Feature of the positions detected by the new system and actual measurement.

Position		Distance from basing point	Feature
Α	Detected by the new system	80 mm	No metal existenceis observed, possible to observe partialy sintering areas
В	Actually observed	120 mm	Sintered, some metals are observed

また、溶鋼からの伝熱が達していないため、ほとんど耐火 物は未焼結であるべきにも関らず,部分的に耐火物が焼結 している.一方、Point B は溶鋼からの伝熱により全体が 焼結層となっており, さらに数 mm のメタル粒が存在して いる. このような状況から、目視観察のみでは Point B が 湯差し位置と判断される.しかし, Poin A での耐火物焼結 現象に着目した場合, 非磁性体である耐火物そのものが発 熱することは不可能であることから,この部位にメタルな どの磁性体が存在していたものと推定される. そこで, Point A の焼結部を EDX (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer) による定性分析を行った. その結果を Fig. 11 に示す。Mn, Ni, Fe など耐火物由来成分でない元素が大半 を占めている. 中でも Mn は非常に蒸気圧が高い元素 3),4) であることから,溶鋼成分が蒸発して耐火物中の空隙に浸 透5) し凝集したと推察される. 他の元素に関しても, Mn に付随して浸透したと考えられる. 以上の結果から, 耐火 物の空隙に浸透した溶鋼成分が凝集し, さらに誘導加熱さ れたため、目視によるメタル浸入位置 (Point B) よりも深 い位置 (Point A) が、メタル浸入位置として検知されたと

推定した.

(2) 実測が検知測定値より進行 [ZONE - II]

ZONE-IIは解体後の実測値が、湯漏れ検知装置で測定されたメタル浸入位置よりも進行している(コイルに近い)ケースである.これに該当する代表的部位として縦方向のメタル浸入部を Fig.12 に示す. また、Table 5 にこの時の

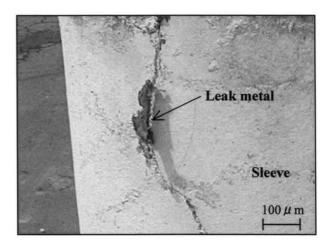


Fig.12. Photo of the leak metal in the refractory.

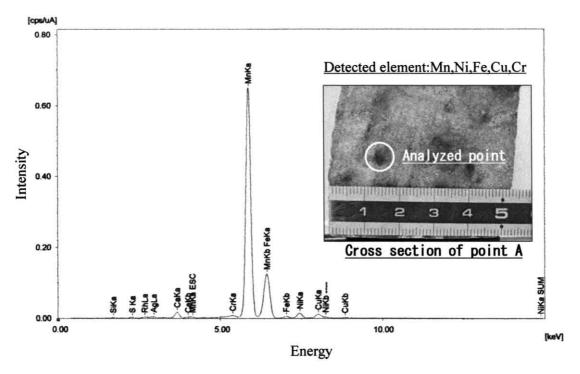


Fig.11. Result of analyzing the sintered point by EDX.

Table 5. Feature of the positions detected by the new system and actual measurement.

Position	Length from basing point	Feature
Detected by the new system	Not detected	-
Actual position	60 mm	Big leak metal Refractory around the metal is not sintered

新湯漏れ検知装置および目視でのメタル浸入位置測定結果とその特徴を示す。このメタルはZONE-1での代表例よりも明らかに形状が大きく、VIM 稼働中に大量の湯差しが発生していたことを示しているが、メタルに接触する耐火物に焼結反応は確認されなかった。この耐火物未焼結現象から考えると、浸入したメタルはそれ自身が誘導加熱されず発熱していない、あるいは発熱していても耐火物の焼結温度に達しないほどの低かったものと推定され(すなわち安全な浸入メタルといえる)、メタルが耐火物中に浸入しても必ずしも発熱体になるとは限らないということを示している。今回導入した新湯漏れ装置は、耐火物の温度変化によって抵抗値が変動する特性を利用した検出装置であるが、ZONE-2のような発熱しないメタルを検知しないことは、その測定原理から考えれば妥当な結果といえる。

なお誘導加熱による発熱レベルは、誘導電流の大きさやメタル自体の電気抵抗値などいくつかの要因によって変動すると考えられる。Fig.13 に 1500 ℃の溶鋼が湯差しによって耐火物内に浸入し抜熱される状況のシミュレーション結果 2) を示すが、浸入メタルは短時間で直ちに凝固し、誘導加熱はされていないことから、耐火物との接触による抜熱も無視できない要因となっている。

以上のように新湯漏れ検知装置でのメタル浸入位置の 測定結果は、発熱メタルの位置を忠実に示したものであ り、目視では確認できないメタルの存在、あるいは浸入し たメタル形状による発熱レベルの差によって目視と検知 の違いが生じ、見かけ上の誤差が発生していたと考えられ る.

4. 効 果

4. 1 湯漏れ検知精度向上による効果

コイルの溶損や絶縁劣化を防止するためには発熱する

メタルの検知精度が重要な要素となる. 旧湯漏れ検知装置ではメタルが耐火物中に存在することのみに過敏に反応するため, 浸入メタルの発熱挙動(真の危険性)に関らず突発的な検知反応を示すことがあり, これが耐火物の限界使用と安定操業の阻害要因になっていた. 今回の調査によって新湯漏れ検知装置システムの発熱メタルに対する検知精度と信頼性を確認したことにより, プレキャストスリーブおよびスタンプ材厚みの薄肉化を行い炉内径を拡大した. その結果, Fig.14 および Fig.15 に示すように耐火物コストおよび VIM 生産性が改善した.

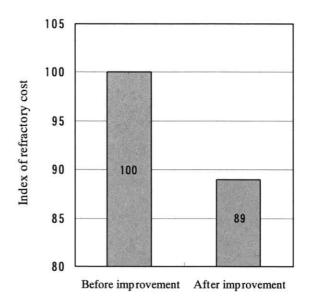


Fig.14. Productivity effect of installing the new molten metal leak detect system.

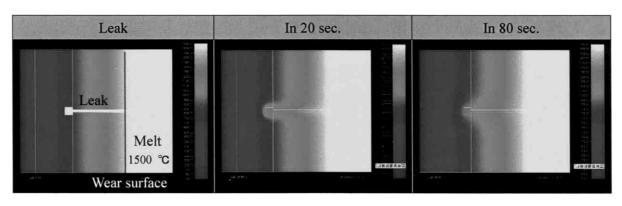


Fig.13. Simulation of solidification after molten metal leak.

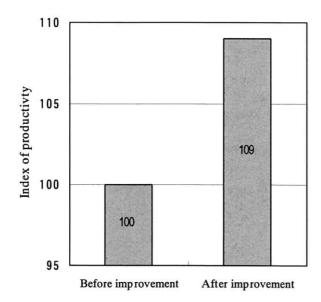


Fig.15. Cost effect of installing the new molten metal leak detect system.

5. 結 言

使用後のプレキャストスリーブの実態観察の結果,新湯漏れ検知システムでの解体調査時のバラツキの原因は下記によることが確認された.

- ① ZONE I …溶鋼成分が蒸発し耐火物中に浸透した後, これらが凝集・発熱したものは検知
- ② ZONE II …湯差しが発生したが、溶融せずに凝固し、 湯差しの進行が止まったものは非検知

いずれの場合も誤検知ではないことが確認され、耐火物の限界使用拡大が可能となった.この結果、一炉代あたりの生産性が向上し、耐火物コストも低減した.今後はバック材の材質改善などを図って耐火物耐用改善や生産性向上を目指す.

(文献)

- 1) 大同特殊鋼:日本鉄鋼協会第76回耐火物部会資料.
- 2) SAVEWAY社(独):社内データ.
- 3) 成田貴一:鉄と鋼,57(1971),2253.
- 4) 日本鉄鋼協会:鉄鋼便覧, Vol. I, 175.
- 5)鎌倉正孝,高木政明,三浦茂,石川英次郎:鉄と鋼,62 (1976),1823.